

UNIWERSYTET PRZYRODNICZY w LUBLINIE

Wydział Inżynierii Produkcji

Dyscyplina naukowa: Inżynieria Mechaniczna

mgr inż. Emilia Osmólska

Rozprawa doktorska

Kształtowanie jakości napojów owocowo-warzywnych poprzez dodatek sumaka (*Rhus coriaria* L.) i obróbkę plazmową z użyciem reaktora ze ślizgającym się łukiem

Shaping the quality of fruit and vegetable beverages through the addition of sumac (*Rhus coriaria* L.) and plasma treatment using a gliding arc reactor

Rozprawa doktorska wykonana w
Katedrze Biologicznych Podstaw Technologii Żywności i Pasz

Promotor: Dr hab. inż. Agnieszka Starek-Wójcicka, prof. uczelni

Lublin, rok 2024

*Pracę dedykuję wszystkim tym, którzy wspierali mnie
w trakcie jej powstawania, a szczególnie*

Mojej Pani Promotor

dr hab. inż. Agnieszce Starek-Wójcickiej, prof. uczelni

Mojemu narzeczonemu Radkowi Zarębie

Moim rodzicom Zdzisławie i Feliksowi.

Dziękuję za cierpliwość i wyrozumiałość.

Oświadczenie promotora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że niniejsza rozprawa doktorska została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

Data. 11.10.2024.....Podpis promotora.....
A. Stawek - Wojcik

Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

Świadom/a odpowiedzialności prawnej oświadczam, że:

- niniejsza rozprawa doktorska została przygotowana przez mnie samodzielnie pod kierunkiem Promotora/~~Promotorów/Promotora pomocniczego*~~ i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.
- przedstawiona rozprawa doktorska nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem stopnia naukowego.
- niniejsza wersja rozprawy doktorskiej jest tożsama z załączoną na pendrivie z wersją elektroniczną.

Data. 11.10.2024.....Podpis autora.....
Emilia Osmańska

*niepotrzebne skreślić

PRACE STANOWIĄCE ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ

- P1. Osmólska, E., Stoma, M., & Starek-Wójcicka, A. (2023).** Juice Quality Evaluation with Multisensor Systems - A Review. *Sensors*, 23(10), 4824. (IF=3,400, MNiSW=100).
- P2. Kobus, Z., Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., & Krzywicka, M. (2023).** Effect of High-Powered Ultrasound on Bioactive Compounds and Microbiological Stability of Juices. *Applied Sciences*, 13(19), 10961. (IF=2,500, MNiSW=100).
- P3. Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Pawłat, J. (2024).** Niekonwencjonalne metody utrwalania produktów rolno-spożywczych. Wydawnictwo Inżynieria Rolnicza, Kraków, 105 s, 978-83-64377-58-7. (IF=0,000, MNiSW=80).
- P4. Pawłat, J., Starek-Wójcicka, A., Krajewska, M., Sagan, A., Andrejko, D., Zdybel, B., Osmólska, E. (2023).** Sposób kondycjonowania soku sumakiem. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243354. (MNiSW=75).
- P5. Pawłat, J., Starek-Wójcicka, A., Kwiatkowski, M., Terebun, P., Zarzeczny, D., Krajewska, M., Osmólska, E. (2023).** Sposób kondycjonowania soku sumakiem i plazmą w systemie stacjonarnym. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243355. (MNiSW=75).
- P6. Osmólska, E., Stoma, M., Sagan, A., Chudzik, B., & Starek-Wójcicka, A. (2022).** Effect of Supplementation of Freshly Pressed Carrot Juice with *Rhus coriaria* L. on Changes in Juice Quality. *Sustainability*, 15(1), 719. (IF=3,300, MNiSW=100).
- P7. Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Żukiewicz-Sobczak, W., Lachowicz-Wiśniewska, S., & Sobczak, P. (2024).** Effects of the powdered fruit of *Rhus coriaria* L. addition on quality attributes based on total polyphenols content of smoothie during storage. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 69(1), 4. (IF=0,000, MNiSW=20).
- P8. Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., Kwiatkowski, M., Osmólska, E., Krajewska, M., ... & Pawłat, J. (2022).** Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. *Applied Sciences*, 13(1), 578. (IF=2,500, MNiSW=100).
- P9. Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., & Pawłat, J. (2024).** The Effect of the Addition of Powdered Sumac (*Rhus coriaria* L.) and Cold Plasma

Treatment on the Quality of Carrot Juice. Applied Sciences, 14(3), 1263. (IF=2,500, MNiSW=100).

Punktację podano według listy czasopism punktowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW), a Impact Factor (IF) według Journal Citation Reports.

Łączna punktacja osiągnięcia wynosi: 750 pkt. MNiSW; IF = 14,2

STRESZCZENIE

Problematyka jakości produktów żywnościowych nie jest tematem nowym, jednak wzrastające oczekiwania i potrzeby konsumentów sprawiają, że zagadnienie to jest ciągle aktualne. Pomimo szerokiej wiedzy na temat użycia wysokich temperatur (szczególnie pasteryzacji), w dalszym ciągu istnieje potrzeba znalezienia takich sposobów utrwalania, które w najmniejszym stopniu będą zmieniały właściwości fizykochemiczne materiału, nie obniżając jego bezpieczeństwa mikrobiologicznego.

Obiecującym wydaje się przedłużenie trwałości soków opierające się na wprowadzeniu naturalnych dodatków, w postaci przypraw charakteryzujących się właściwościami antyoksydacyjnymi i przeciwdrobnoustrojowymi.

Kolejną propozycją jest zastosowanie zimnej plazmy atmosferycznej, zaliczanej do niskotemperaturowych obróbek, pozwalających na zachowanie substancji termolabilnych.

Biorąc powyższe pod uwagę, celem naukowym prowadzonych badań było kształtowanie jakości napojów (soku marchwiowego, soku pomidorowego, smoothie marchwiowo-bananowego) poprzez dodatek sumaka garbarskiego (*Rhus coriaria* L.) i obróbkę plazmową z użyciem reaktora z wyładowaniem łukowym, ślizgającym się wzdłuż elektrod o technologicznej nazwie GlidArc.

Jak wykazały badania dodatek sproszkowanego owocu sumaka *Rhus coriaria* L. do napojów owocowo-warzywnych obniżał ich pH oraz zwiększał zawartość substancji biologicznie czynnych (karotenoidów, polifenoli), dodatkowo zabezpieczając każdy z wyrobów przed przedwczesnym zepsuciem. Co bardzo ważne, zastosowanie zimnej plazmy, generowanej w reaktorze ze ślizgającym się łukiem, z gazem procesowym jakim było powietrze, skutecznie wpływało na inaktywację ogólnej liczby drobnoustrojów tlenowych oraz drożdży i pleśni zanieczyszczających soki przygotowane z marchwi i pomidorów, jednocześnie zachowując ich właściwości fizykochemiczne. Bez wątplenia, wykorzystanie metody kombinowanej, czyli obróbki zimną plazmą z uzupełnieniem świeżo tłoczonego soku marchwiowego sproszkowanym owocem sumaka garbarskiego, pozwoliło na skuteczną redukcję drobnoustrojów (do niewykrywalnego poziomu), wzbogacając wyrób o dodatkowe składniki odżywcze.

Słowa kluczowe: jakość napojów, sumak garbarski, bezpieczeństwo żywności, zimna plazma atmosferyczna, reaktor ze ślizgającym się łukiem

ABSTRACT

The issue of food product quality is not a new topic, but the increasing demands and needs of consumers make the topic ever relevant. Despite extensive knowledge of the use of high temperatures (especially pasteurization), there is still a need to find such methods of preservation that will change the physicochemical properties of the material to the least extent, without reducing its microbiological safety.

A promising one seems to be the extension of the shelf life of juices based on the introduction of natural additives, in the form of spices characterized by antioxidant and antimicrobial properties.

Another proposal is the use of cold atmospheric plasma, classified as a low-temperature treatment, allowing the preservation of thermolabile substances.

Taking the above into account, the scientific objective of the conducted research was to shape the quality of beverages (carrot juice, tomato juice, carrot-banana smoothie) through the addition of sumac (*Rhus coriaria* L.) and plasma treatment using an arc discharge reactor sliding along electrodes with the technological name GlidArc.

As the research showed, the addition of *Rhus coriaria* L. sumac fruit powder to fruit and vegetable beverages decreased their pH and increased the content of biologically active substances (carotenoids, polyphenols), further protecting each product from early spoilage. Very importantly, the use of cold plasma, generated in a sliding arc reactor, with the process gas air, effectively influenced the inactivation of the total number of aerobic microorganisms, as well as yeasts and molds contaminating juices prepared from carrots and tomatoes, while preserving their physicochemical properties. Undoubtedly, the use of a combined method, i.e. cold plasma treatment with addition of freshly pressed carrot juice with powdered fruit of sumac, allowed effective reduction of microorganisms (to undetectable levels), enriching the product with additional nutrients.

Keywords: beverage quality, sumac, food safety, cold atmospheric plasma, gliding arc reactor

Spis treści

1. WPROWADZENIE	1
2. CEL I PROBLEMY BADAWCZE.....	5
3. MATERIAŁY I METODY BADAŃ	6
3.1. Materiał badawczy i jego przygotowanie	6
3.1.1. <i>Wzbogacanie próbek sproszkowanym owocem sumaka garbarskiego</i>	<i>8</i>
3.1.2. <i>Sposób obróbki soku zimną plazmą atmosferyczną</i>	<i>8</i>
3.2. Analiza jakościowa napojów	11
3.2.1. <i>Określenie ogólnej liczby mikroorganizmów tlenowych oraz liczby drożdży i pleśni</i>	<i>11</i>
3.2.2. <i>Pomiar kwasowości czynnej (pH)</i>	<i>12</i>
3.2.3. <i>Oznaczenie kwasowości ogólnej</i>	<i>12</i>
3.2.4. <i>Oznaczenie całkowitej zawartość substancji rozpuszczalnych</i>	<i>12</i>
3.2.5. <i>Oznaczenie zawartości karotenoidów i likopenu</i>	<i>12</i>
3.2.6. <i>Oznaczenie zawartości polifenoli</i>	<i>12</i>
3.2.7. <i>Oznaczenie zawartości witaminy C</i>	<i>13</i>
3.2.8. <i>Oznaczanie barwy</i>	<i>13</i>
3.2.9. <i>Analiza mikrostruktury próbek</i>	<i>14</i>
3.2.10. <i>Analiza statystyczna</i>	<i>14</i>
4. OMÓWIENIE NAJWAŻNIEJSZYCH WYNIKÓW BADAŃ WRAZ Z DYSKUSJĄ.....	15
5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	39
BIBLIOGRAFIA POMOCNICZA.....	41
SPIS RYSUNKÓW	50
KOPIE OPUBLIKOWANYCH PRAC WCHODZĄCYCH W SKŁAD CYKLU PUBLIKACJI.....	51
OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORÓW.....	278

1. WPROWADZENIE

W dzisiejszych czasach, za sprawą postępu technologicznego, dostęp do informacji jest niezwykle prosty i niemal nieograniczony. W związku z tym konsumenci stają się coraz bardziej świadomi jakości produktów, które wybierają. Firmy, zwłaszcza te z sektora spożywczego, są oceniane nie tylko pod względem wyników finansowych, ale także pod kątem jakości oferowanych towarów. Proces produkcji żywności, począwszy od identyfikacji potrzeb konsumentów, aż po wprowadzenie gotowego produktu na rynek, jest skomplikowany i czasochłonny. Wymaga licznych badań i analiz, aby dobrze zrozumieć oczekiwania klientów, ocenić koszty produkcji oraz korzyści płynące ze sprzedaży danego wyrobu [Bryła, 2016; Kułyk i Dubicki, 2019; Nagyová i in., 2019].

Pojęcie jakości ma wiele znaczeń i nie istnieje powszechnie uznana, uniwersalna definicja w literaturze przedmiotu. Dla konsumenta kluczowe są cechy produktu, w tym przydatność do zaspokajania potrzeb oraz cena. Nie dysponuje on obiektywnymi metodami oceny jakości żywności, dlatego opiera się na subiektywnych wrażeniach. Główne aspekty jakości żywności obejmują jej wartość odżywczą, w tym kaloryczną i dietetyczną, a przede wszystkim bezpieczeństwo produktu [Adamczyk, 2019].

Obecnie większość osób ma dostęp do wystarczającej ilości produktów spożywczych, jednak większa świadomość konsumentów, przyczynia się również do wzrostu ich wymagań dotyczących jakości zdrowotnej. Powszechne jest przekonanie, że nieodpowiednia dieta, w tym spożywanie wyrobów niskiej jakości, może prowadzić do wielu chorób, zarówno wynikających z niedoboru, jak i nadmiaru niektórych składników odżywczych. W Polsce szacuje się, że około 20% społeczeństwa boryka się z problemami zdrowotnymi spowodowanymi nieprawidłowym odżywianiem. Na całym świecie natomiast około 19% zgonów jest powiązanych z niewłaściwą dietą [Brown, 2009; Konduracka, 2019; Kopp, 2019].

Pomimo, iż poziom jakości jest zmienny w czasie dla każdego konsumenta i zależy między innymi od wysokości dochodów czy zmiany trybu życia, współcześni klienci w momencie kiedy, mają zaufanie do produktu i są przekonani o jego autentyczności, chętniej dokonują zakupu. Stąd też, zapewnienie wysokich standardów jakości i bezpieczeństwa żywności na każdym etapie łańcucha dostaw, od produkcji po konsumpcję, powinno być priorytetem dla firm działających w branży spożywczej. Wysoka jakość produktów stanowi kluczowy element konkurencyjności tego sektora.

Brak kontroli produktów i procesów może prowadzić do poważnych strat finansowych przedsiębiorstw, a nawet ich upadku [Omiecuch, 2016].

Soki to produkty naturalne, cenione przez konsumentów ze względu na obecne trendy związane ze zdrowym stylem życia oraz racjonalnym żywieniem. Otrzymywane są z jednego lub większej liczby gatunków zdrowych, dojrzałych, świeżych, mrożonych lub schłodzonych owoców i/lub warzyw. W sprzedaży detalicznej dostępna jest szeroka gama tego typu wyrobów. W celu zachowania ich jakości konieczne jest utrwalanie, poprzedzające proces dystrybucji i magazynowania. Najpopularniejszą była i jest jak na razie pasteryzacja, polegająca na wykorzystaniu temperatur bliskich 100°C. Niestety dużo substancji, które korzystnie wpływają na funkcjonowanie organizmu człowieka, należy do grupy związków termolabilnych. Oznacza to, że ulegają rozpadowi w wyniku działania zbyt wysokich temperatur [Gwóźdź i Gębczyński, 2015; Silva i in., 2016; Aadil i in., 2019]. Pasteryzacja napojów, choć skuteczna w przedłużaniu ich trwałości i eliminowaniu szkodliwych mikroorganizmów, może zmieniać naturalny smak owoców czy warzyw, przez co sok nie zawsze smakuje tak świeżo, jak dla przykładu produkt niepasteryzowany [Donalisio i in., 2018; Lyng i in., 2019; Ahmed i Ramaswamy, 2020; Marciniewicz i in., 2020; Śmigielska i in., 2022].

Stąd też, istnieje potrzeba znalezienia takich sposobów utrwalania, które w najmniejszym stopniu będą wpływały na właściwości fizykochemiczne napojów, skutecznie eliminując niepożądane drobnoustroje.

Fortyfikacja polega na dodawaniu składników odżywczych do żywności, niezależnie od tego, czy były one pierwotnie obecne przed przetworzeniem [Chadare i in., 2019; Bolarinwa i in., 2019; Szymańska i Ścibisz, 2021]. Stosuje się różne substancje w celu wzbogacenia wyrobów, takie jak antyoksydanty, minerały, witaminy, błonnik pokarmowy, sterole i stanole roślinne, a także ekstrakty owocowe, ziołowe oraz nasienne. Inne dodatki obejmują aminokwasy, peptydy, białka, a także nutraceutyki, na przykład kwasy tłuszczowe omega-3, resweratrol, koenzym Q₁₀, oraz pro- i prebiotyki, takie jak inulina, fruktooligosacharydy, laktuloza czy bakterie *Lactobacillus* i *Bifidobacterium* [Osendarp i in., 2018; Szymańska i Ścibisz, 2021; Leszczyński, 2023].

Jednym z interesujących dodatków do różnych produktów spożywczych, który zyskuje na popularności, jest *Rhus coriaria* L., znany powszechnie jako sumak garbarski. Roślina ta, należąca do rodziny *Anacardiaceae*, występuje głównie w regionie śródziemnomorskim i od wieków używana jest jako przyprawa oraz środek aromatyzujący. Sumak rośnie jako krzew o wysokości 3 - 4 metrów, z pierzastymi liśćmi składającymi się

z 6-8 par listków oraz z kwiatostanami na szczycie, które tworzą białe kwiaty. Owoce są kuliste i po dojrzeniu przybierają czerwony kolor [Rayne i Mazza, 2007; Abdul-Jalil, 2020; Alsamri i in., 2021]. Po wysuszeniu, owoce te mieli się na proszek o kwaśnym, cierpkim smaku, często używany jako przyprawa w kuchniach śródziemnomorskiej i bliskowschodniej. Popularnie jest on dodawany do sałatek lub mięsa, nadając potrawom cytrynowy posmak, bywa składnikiem mieszanki przyprawowej zwanej zaatar, a także używany jest jako zamiennik kaparów lub czerwonej papryki [Ozcan i in., 2021; Khoshkharam i in., 2022].

Oprócz kulinarnego zastosowania, sumak garbarski ma długą historię użycia w tradycyjnej medycynie Bliskiego Wschodu i Azji Południowej. Owoce tego krzewu były stosowane w leczeniu takich schorzeń jak choroby wątroby, biegunka, problemy z układem moczowym oraz wrzody. Ponadto, sproszkowane owoce wykorzystywano do obniżania poziomu cholesterolu [Khoshkharam i in., 2020; Korkmaz, 2021]. Szeroki zakres właściwości terapeutycznych *Rhus coriaria* L. wynika z jego licznych aktywności biologicznych, takich jak działanie przeciwutleniające, przeciwdrobnoustrojowe, przeciwzapalne, hipoglikemiczne oraz hipolipidemiczne. Dotychczas zidentyfikowano w sumaku ponad 200 związków fitochemicznych, w tym kwasy organiczne, kwasy fenolowe, flawonoidy, izoflawonoidy, garbniki hydrolizowalne, antocyjany, terpenoidy, a także pochodne buteiny, irydoиду i kumaryny [Rayne i Mazza, 2007; El Ghizzawi i in., 2023; Zannou i in., 2025].

W związku z szybkim rozwojem technologicznym, obiecującym wydaje się zastosowanie innowacyjnych metod, wykorzystujących podwyższone ciśnienie, ultradźwięki, pole elektryczne, do eliminacji patogenów i mikroorganizmów odpowiedzialnych za psucie się żywności.

Szczególnie istotne znaczenie ma technika dekontaminacji materiałów biologicznych, która uważana jest obecnie za niedrogą, prostą, niezawodną i przyjazną dla środowiska - zimna plazma atmosferyczna (*Cold Atmospheric Plasma, CAP*) [Zhang i in., 2011; Bhattacharjee i in., 2019; Starek i in., 2019]. Źródłem plazmy i sposobem dostarczania do niej energii jest wymuszony przepływ prądu elektrycznego w gazie. Generalnie plazmę niskotemperaturową, zwaną też nietermiczną wytwarza się doprowadzając do wyładowań elektrycznych między elektrodami. Zależnie od geometrii elektrod i sposobu ich zasilania dochodzi do wyładowań niezupełnych (nie zwierających elektrod reaktora) lub zupełnych (przykładowo łukowych). Stosowane są również

wyładowania w uwarstwionych układach dielektrycznych, koronowe, jarzeniowe czy mikrofalowe.

Zjonizowanym gazem może być powietrze lub azot, ewentualnie gazy szlachetne, takie jak hel czy argon. Podczas generowania zimnej plazmy ma miejsce jonizacja częściowa zaś większość energii układu jest przekazywana elektronom zamiast ogrzewać cały strumień gazu, dzięki czemu temperatura cięższych cząstek pozostaje zbliżona do temperatury pokojowej. Oznacza to, że tę technikę można wykorzystać do utrwalania produktów zawierających substancje termolabilne, w tym soków owocowych i warzywnych [Brisset i Pawłat, 2016].

Jednak najbardziej pożądaną cechą tej obróbki jest skuteczność działania przeciw komórkom wegetatywnym, sporom bakterii, a także drożdżom i pleśniam. Reaktywne formy plazmy wywołują efekt utleniania zewnętrznej powierzchni komórek drobnoustrojów. Szczególnie reaktywne są pochodne tlenu lub azotu: $O_2^{\bullet-}$, 1O_2 , O_3 , $\bullet OH$, NO^{\bullet} , i NO_2^{\bullet} , przy czym najbardziej letalne działanie wykazuje tlen atomowy i rodnik hydroksylowy. Plazma prowadzi także do degradacji DNA mikroorganizmów - promienie UV charakteryzują się wysoką wartością energetyczną i dużym stopniem absorbancji przez cząsteczki DNA i RNA, co prowadzi do powstania dimerów tyminy i fragmentacji nukleoidu [Bruggeman i in., 2016].

W zależności od doboru urządzenia (geometrii reaktora), parametrów zasilania, ciśnienia gazu, składu gazu, a także stanu i rodzaju obrabianej próbki, zimna plazma stanowi obecnie niekonwencjonalną metodę przetwarzania żywności jako alternatywę dla tradycyjnych technik obróbki termicznej. Optymalizacja parametrów kontrolnych plazmy, wymaga jednak przeprowadzenia dogłębnych badań w celu określenia warunków, które mogą zapewnić bezpieczeństwo mikrobiologiczne napojów, a jednocześnie zachować kluczowe cechy jakościowe tych wyrobów [Laroque i in., 2022].

2. CEL I PROBLEMY BADAWCZE

Obecnie konsumenci chętnie sięgają po produkty, które mają pozytywny wpływ na zdrowie i samopoczucie, by chronić swój organizm przed chorobami. W prawidłowej diecie człowieka powinno znaleźć się dużo owoców i warzyw, czy to w formie surowych produktów, czy przetworzonych.

Soki tłoczone NFC (*Not From Concentrate*) oraz smoothie wpisują się w promowany obecnie tak zwany zdrowy styl życia. Dostarczają bowiem organizmowi witamin, minerałów, błonnika pokarmowego, pektyn oraz wielu bardzo ważnych dla zdrowia substancji, o charakterze antyoksydantów [Nabrdalik i Świsłowski, 2017].

Większość tego typu produktów jest pasteryzowana, jednak proces termicznej obróbki, może zniszczyć niektóre wrażliwe na ciepło witaminy, enzymy i związki smakowe. Stąd też, istnieje potrzeba znalezienia takich sposobów utrwalania napojów, które w najmniejszym stopniu będą zmieniały właściwości fizykochemiczne materiału, nie obniżając jego bezpieczeństwa mikrobiologicznego.

Biorąc powyższe pod uwagę, **celem naukowym prowadzonych badań było kształtowanie jakości napojów owocowo-warzywnych poprzez dodatek sumaka (*Rhus coriaria* L.) i obróbkę plazmową z użyciem reaktora ze ślizgającym się lukiem.**

Aby zrealizować postawiony cel konieczne było rozwiązanie następujących problemów badawczych:

Czy dodatek przyprawy sumak (*Rhus coriaria* L.) korzystnie wpływa na jakość świeżo przygotowanych soków oraz smoothie?

Czy parametry procesu obróbki zimną plazmą prowadzą do przedłużenia trwałości świeżo tłoczonych soków przy jednoczesnym zachowaniu ich właściwości fizykochemicznych?

Czy zastosowanie obróbki kombinowanej pozwala zwiększyć ilość substancji biologicznie aktywnych i zapewnić bezpieczeństwo mikrobiologiczne świeżo przygotowanego soku?

3. MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Proces badawczy realizowano w latach 2021-2024. Przygotowanie napojów, uzupełnianych sumakiem garbarskim (*Rhus coriaria* L.), analizy fizykochemiczne i mikrobiologiczne wykonywano w laboratoriach Katedry Biologicznych Postaw Technologii Żywności i Pasz Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie, natomiast traktowanie soków zimną plazmą atmosferyczną (*Cold Atmospheric Plasma*, CAP) i analizowanie ich mikrostruktury odbywało się w Katedrze Elektrotechniki i Technologii Inteligentnych Politechniki Lubelskiej.

3.1. Materiał badawczy i jego przygotowanie

W pierwszym etapie pracy materiał badawczy stanowił sok uzyskany z marchwi odmiany Nerac F1, uprawianej na terenie województwa pomorskiego. Warzywa posiadały cylindryczny kształt korzenia, były zdrowe, bez widocznych uszkodzeń mechanicznych (**P4, P5, P6, P9**).

W kolejnej fazie badań tłoczono sok z pomidorów odmiany Bekas, które pochodziły z Gospodarstwa Ogrodniczego mieszczącego się w województwie lubelskim. Owoce charakteryzujące się regularnym kulistym kształtem i intensywnym czerwonym kolorem zbierano w fazie dojrzałości technologicznej (**P4, P5, P8**).

Przygotowano również smoothie z marchwi odmiany Nerac (woj. pomorskie) oraz bio bananów (kraj pochodzenia Kolumbia) zakupionych w lokalnym supermarkecie Lidl (Lublin, Polska) (**P7**). Surowce i wytworzone z nich wyroby zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Surowce w postaci owoców i warzyw oraz wytworzone z nich napoje
(źródło: fot. własna)

Surowce zostały umyte oraz osuszone za pomocą bibuły laboratoryjnej. Aby przyspieszyć i ułatwić proces tłoczenia podzielono je na mniejsze części. Świeże soki uzyskano przy użyciu wyciskarki wolnoobrotowej firmy Sana EUJ-707 (Omega Products, Ceske Budejovice, Czechy). Z kolei smoothie otrzymano z soku marchwiowego (85%) i bananów (15%), które połączono w jednolitą konsystencję używając homogenizatora (JTC OmniBlend, Guangdong, Chiny).

Sumak garbarski (*Rhus coriaria* L.) zakupiono w sklepie ze zdrową żywnością (Lublin, Polska). Produkt zmielono w młynku laboratoryjnym ChemLand, model FW 100 (Stargard, Polska), otrzymując poziom ziarnistości 0,5 mm (rys. 2).



Rys. 2. Sproszkowany owoc sumaka garbarskiego

(źródło: fot. własna)

3.1.1. Wzbogacanie próbek sproszkowanym owocem sumaka garbarskiego

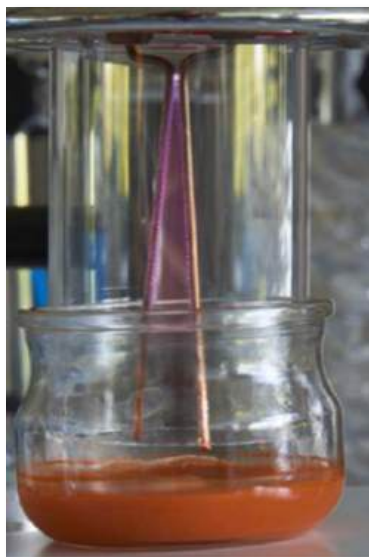
Napoje rozlano do plastikowych, sterylnych pojemników po 100 ml każdy i wzbogacono sproszkowanym owocem sumaka w różnych ilościach (0,1-3,0 g/100 ml). Próbę kontrolną stanowiły wyroby bez udziału przyprawy (**P4, P5, P6, P9**).

3.1.2. Sposób obróbki soku zimną plazmą atmosferyczną

Do obróbki plazmą wykorzystano jednofazowy reaktor ze ślizgającym się łukiem (*Gliding Arc Discharge, GAD*), pracujący pod ciśnieniem atmosferycznym. Obudowa urządzenia została wykonana z materiałów chemicznie obojętnych (teflon, szkło). Do wykonania elektrod użyto drutu miedzianego o grubości 2 mm i długości 78 mm. W celu ograniczenia rozpyłu gazu na zewnątrz układu, elektrody (przy kącie rozwarcia 12°), umieszczono w szklanej osłonie o średnicy 60 mm.

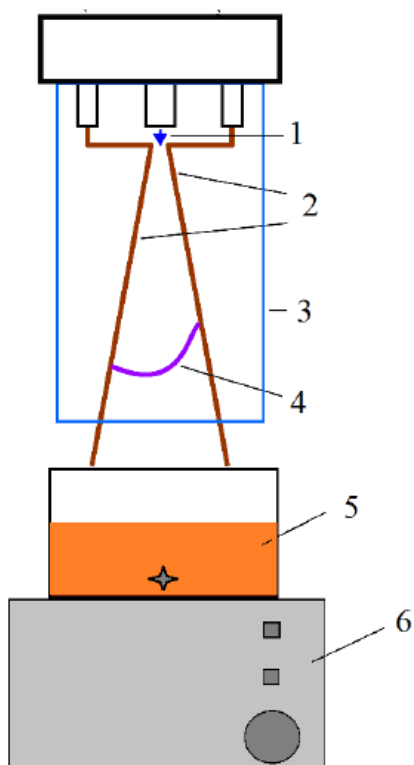
Szklany pojemnik o średnicy wewnętrznej 63 mm napełniano świeżo tłoczonym sokiem (25-50 ml) i umieszczono w taki sposób, aby zwierciadło cieczy było w odległości 10 mm od powierzchni elektrod. Jako gaz roboczy wykorzystano sprężone powietrze przy przepływnie 440 l/h, regulowanym za pomocą szklanego rotametu tablicowego (Zakłady Automatyki „ROTAMETR”).

W wyniku wymuszonego przepływu gazu, wytworzony łuk elektryczny (widoczny na rysunku 3 w postaci niebieskiego światełka) poruszał się wzdłuż elektrod w kierunku cieczy, po czym następowało jego gaśnięcie i ponowne pojawienie się w strefie zapłonu.



Rys. 3. Wyładowanie plazmowe podczas obróbki soku marchwiowego

Dla uzyskania równomiernej ekspozycji traktowanego soku na czynniki aktywne, podczas obróbki trwającej od 30 do 1200 s był on mieszany z użyciem mieszadła magnetycznego oraz mieszadełek pokrytych teflonem (rys. 4).



Rys. 4. Układ do obróbki za pomocą plazmy nierównowagowej:

1 – kierunkowy przepływ gazu; 2 – elektrody zasilające; 3 – przewodząca rura szklana; 4 – ślizgający się łuk elektryczny; 5 – naczynie otwarte z płynem (sokiem) i mieszadłem; 6 – napędzane magnetycznie mieszadło

Do kontroli temperatury cieczy po traktowaniu plazmą wykorzystano miernik temperatury DT-847U (Yu Ching Technology) z termoparą typu K. Maksymalna zaobserwowana temperatura soków dla najdłuższego czasu obróbki nie przekraczała 39°C (**P5, P8, P9**).

Wszystkie próbki przechowywano chłodniczo w zamkniętych pojemnikach przez określony czas, zależy od stanu mikrobiologicznego produktów.

3.2. Analiza jakościowa napojów

3.2.1. Określenie ogólnej liczby mikroorganizmów tlenowych oraz liczby drożdży i pleśni

Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych oraz drożdży i pleśni w próbkach napojów została określona według odpowiednich norm PN-EN ISO 4833-1:2013 i PN-ISO 21527. Aby przeprowadzić badania należało wykonać szereg 10-krotnych rozcieńczeń w postępie geometrycznym. W tym celu jałową pipetą 1 ml soku przenoszono do falkonu zawierającego 9 ml wody peptonowej. Następnie z pierwszego rozcieńczenia (1:10) pobierano 1 ml do 9 ml płynu rozcieńczającego, otrzymując rozcieńczenie 1:100. Dalej postępowano w analogiczny sposób. Z każdej przygotowanej próby posiewano po 0,5 ml na powierzchnię stałej pożywki agarowej znajdującej się na płytkach Petriego o średnicy 60 mm. Tę procedurę wykonywano w sterylnych warunkach - komorze laminarnej z lampą UV firmy CRUMA 670FL (El Prat de Llobregat, Barcelona, Hiszpania). W celu oznaczenia ogólnej liczby mikroorganizmów płytki inkubowano w temperaturze 30°C w cieplarni POL-EKO typ CLN 115 SMART (Wodzisław Śląski, Polska) przez trzy dni, zaś w przypadku drożdży i pleśni w 25°C przez pięć dni. Liczbę mikroorganizmów w mililitrze próbki obliczano na podstawie liczby kolonii uzyskanych na płytkach zawierających mniej niż 300 kolonii. Wyrosłe kolonie zostały zliczone, a wyniki wyrażono jako \log_{10} jednostek tworzących kolonie na mililitr próbki napoju (\log_{10} jtk/ml).

W przepisach prawnych nie ma dokładnych informacji na temat dopuszczalnej zawartości mezofilnych mikroorganizmów tlenowych w świeżych sokach niepasteryzowanych. Stąd też, przydatność do spożycia napojów ujętych w programie badawczym ustalono na podstawie Rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 13 stycznia 2003 r., [Rozporządzenie, M. Z., 2003] z późniejszymi zmianami, w sprawie maksymalnych poziomów zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych, które mogą znajdować się w żywności, składnikach żywności, dozwolonych substancjach dodatkowych, substancjach pomagających w przetwarzaniu albo na powierzchni żywności. Według zapisów obecność mezofilnych mikroorganizmów tlenowych w liczbie równej lub niższej od $3,0 \log_{10}$ jtk/ml, a w maksymalnie dwóch próbkach z pięciu pobranych z danej partii może wynosić pomiędzy $3,0$ a $4,0 \log_{10}$ jtk/ml. Wynik powyżej $4,0 \log_{10}$ jtk/ml dyskwalifikuje całą partię produktu. Przyjmuje się również, że dopuszczalna zawartość drożdży i pleśni w sokach pasteryzowanych może być równa lub niższa $1 \log_{10}$ jtk/ml.

3.2.2. Pomiar kwasowości czynnej (pH)

Do pomiaru pH napojów posłużył cyfrowy pehametr 780 pH Meter firmy Metrohm (Herisau, Szwajcaria) z wbudowanym mieszadłem magnetycznym. Przygotowany materiał został pobrany w takiej objętości, aby elektroda z diafragmą całkowicie się w nim zanurzyła. Przed pomiarem urządzenie odpowiednio skalibrowano według instrukcji dołączonej przez producenta.

3.2.3. Oznaczenie kwasowości ogólnej

Badanie kwasowości napojów wykonano przy użyciu titratora potencjometrycznego marki TitraLab AT1000 Hach (Wrocław, Polska). Do zlewki odmierzano 25 ml soku i dopełniano wodą destylowaną do 60 ml. Następnie naczynie umieszczono na wyznaczonym polu pomiarowym z elektrodą pomiarową. Jako titranta użyto 0,1 M NaOH. Uzyskane wyniki były przeliczane automatycznie na kwas cytrynowy [g/l].

3.2.4. Oznaczenie całkowitej zawartości substancji rozpuszczalnych

Całkowita zawartość substancji rozpuszczalnych, czyli ekstraktu została oznaczona za pomocą refraktometru PAL-1 Atago (Tokio, Japonia). Wartości wyrażono w stopniach Brix. Próbkę nanoszono na czyste pole pryzmatu pomiarowego, który po każdym użyciu był przemywany wodą destylowaną oraz osuszany bibułą laboratoryjną.

3.2.5. Oznaczenie zawartości karotenoidów i likopenu

Oznaczenie zawartości karotenoidów i likopenu dokonano przy użyciu spektrofotometru firmy Thermo Scientific UV-Vis Helios Omega 3 (Massachusetts, USA). Barwniki wyekstrahowano mieszaniną acetonu z 0,2% BHT, etanolu i heksanu (1:1:2). Pomiar absorbancji fazy heksanowej odbywał się przy długości fali $\lambda=450$ nm (dla karotenoidów) i $\lambda=503$ nm (dla likopenu).

3.2.6. Oznaczenie zawartości polifenoli

Zawartość polifenoli oznaczono metodą Folina. Próbkę napojów rozcieńczono 80% metanolem w stosunku 1:1 i wytrząsano przez pół godziny. 100 μ l tej mieszaniny połączono z 2,0 ml wody i 200 μ l odczynnika Folina-Ciocalteu. Następnie dodano 1 ml 20% węgla sodu. Absorbancję otrzymanego roztworu mierzono po 60 minutach przy długości fali 765 nm za pomocą spektrofotometru UV-vis (Helios Omega, Massachusetts, USA). Krzywą kalibracyjną wykonano przy użyciu standardowych roztworów kwasu galusowego, stosując tę samą metodę.

3.2.7. *Oznaczenie zawartości witaminy C*

Zawartość witaminy C oznaczono metodą miareczkową. Próbki napojów ekstrahowano 2% kwasem szczawiowym, filtrowano i następnie miareczkowano roztworem 2,6-dichlorofenoloindofenolu (barwnik Tillmansa) do uzyskania trwałego różowego zabarwienia. Za miano 2,6-dichlorofenoloindofenolu przyjęto liczbę cm³ barwnika potrzebną do utlenienia 1 mg kwasu askorbinowego.

3.2.8. *Oznaczanie barwy*

Barwę próbek mierzono za pomocą spektrofotometru 3Color SF80 (Marcq- en- Barœul, Francja), używając oświetlacza D65° z kątem obserwacji 10°. Instrument przed rozpoczęciem analiz skalibrowano poprzez odczyt wzorca bieli oraz odczyt wzorca czerni (wzorcowanie zera) i ewentualne sprawdzenie poprawności odczytu danych dla wzorca bieli. Wyniki pomiarów wyrażono w skali CIE Lab, rejestrując parametry L*, gdzie niska liczba 0-50 oznacza ciemną barwę, a wysoka wartość 51-100 wskazują na jasną barwę; a* gdzie liczba dodatnia świadczy o zaczerwienieniu próbki, a wartość ujemna zazielenieniu, a także wartość b* informującą, czy barwa badanego produktu jest bardziej żółta, czy niebieska.

Ponadto obliczono całkowitą różnicę kolorów (ΔE) za pomocą następującego równania:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (1)$$

gdzie: L_0 , a_0 i b_0 to wartości parametrów barwy próbek kontrolnych

W opracowaniu wyników posłużono się kryterium, według którego bezwzględne różnice barw (ΔE), pomiędzy 0 i 1 były nierozpoznawalne (odchylenie niewidoczne), od 1 do 2 niewielkie odchylenie, rozpoznawalne przez osobę doświadczoną w odróżnianiu niuansów barw, 2-3,5 średnie odchylenie rozpoznawane nawet przez osobę postronną, 3,5-5 wyraźne odchylenie, ΔE powyżej 5 oznaczało duże odchylenie barwy.

3.2.9. Analiza mikrostruktury próbek

Obraz mikroskopowy monitorowano przy użyciu optycznego mikroskopu KEYENCE VHX-5000 z obiektywem VH-Z100R (Osaka, Japonia) z szybką i czułą kamerą o szerokim kącie obserwacji wraz ze stanowiskiem komputerowym wyposażonym w oprogramowanie pozwalające na odczyt i przesyłanie danych z urządzenia.

3.2.10. Analiza statystyczna

Analiza statystyczna wyników obejmowała obliczenie średniej i odchylenia standardowego (Microsoft Excel 2019) oraz analizę ANOVA/MANOVA (Statistica 10, StatSoft Inc., Tulsa, OK., U.S.A.). Wnioskowania dokonano na poziomie istotności 0,05. Test Tukey'a pozwolił na dokładną analizę średnich przedziałów ufności.

4. OMÓWIENIE NAJWAŻNIEJSZYCH WYNIKÓW BADAŃ WRAZ Z DYSKUSJĄ

Praca przeglądowa P1 zatytułowana „*Juice Quality Evaluation with Multisensor Systems - A Review*” prezentuje dogłębną analizę stanu wiedzy na temat elektronicznego nosa i elektronicznego języka, które są nowoczesnymi urządzeniami badającymi jakość, bezpieczeństwo i autentyczność produktów spożywczych, w tym napojów owocowo-warzywnych. W publikacji skupiono się na opisie możliwości tych technik w ocenie jakości oraz profili smakowych i aromatycznych soków. Przeprowadzono krótką charakterystykę tych urządzeń, obejmującą historię ich powstawania, rodzaje, zasadę działania, a także przedstawiono wady i zalety tych sensorów.

E-nos i e-język to nowoczesne technologie, umożliwiające szybką i dokładną ocenę zapachów oraz smaków, dzięki specjalistycznym czujnikom. Te zaawansowane systemy znajdują szerokie zastosowanie, szczególnie w branży spożywczej, gdzie pomagają między innymi w identyfikacji składników, ocenie jakości produktów, wykrywaniu zanieczyszczeń oraz monitorowaniu stabilności i okresu trwałości.

Obecnie termin „e-nos” odnosi się do różnych urządzeń zaprojektowanych tak, aby naśladować ludzką percepcję zapachów, umożliwiających analizę sygnałów związanych z cechami produktu w sposób zbliżony do funkcjonowania opuszki węchowej w mózgu [Shurmer, 1990; Persaud i in., 1993; Craven i in., 1996; Wilson i Röck i in., 2008; Baietto, 2009]. W uproszczeniu można stwierdzić, że e-nos działa na zasadzie podobnej do ludzkiego zmysłu węchu, gdzie czujniki odgrywają rolę nabłonka węchowego. Mechanizmy wykrywania substancji zapachowych zastosowane w tych urządzeniach elektronicznych są zbliżone do procesów zachodzących w ludzkim nosie [Cieśla i Wójcik, 2018]. Dokładniej, zasada działania e-nosa opiera się na selektywnej reakcji zestawu czujników na związki zapachowe lub ich grupy obecne w badanej próbce. Urządzenie identyfikuje zapach, który składa się z wielu różnych substancji lotnych znajdujących się w przestrzeni nad próbką, a następnie generuje dane wyjściowe, które stanowią *fingerprint* wszystkich składników próbki [Bushdid i in., 2014]. Oznacza to, że zapach jest rozpoznawany, gdy zestaw analizowanych sygnałów jest wystarczająco zbliżony do wzorca zapisanego w systemie. E-nos składa się z matrycy czujników, która może obejmować kilka lub kilkadziesiąt elementów, jednostki przetwarzającej dane, takiej jak sztuczna sieć neuronowa (ANN), oprogramowania z algorytmami rozpoznawania wzorców oraz baz danych [Shurmer i Gardner, 1992; Freund i Lewis, 1995]. Warto zaznaczyć,

że w komercyjnych wersjach tych urządzeń poszczególne elementy są montowane w modułach, co umożliwia ich łatwą wymianę i dostosowanie do konkretnego zadania.

Elektroniczne nosy są powszechnie wykorzystywane w przemyśle spożywczym, szczególnie w zakresie kontroli jakości produktów. Znajdują zastosowanie w różnych dziedzinach, obejmujących między innymi: monitorowanie jakości żywności [Loutfi i in., 2015; Ordukaya i Karlik, 2017], testowanie trwałości, kontrolę świeżości i ocenę autentyczności [García i in., 2006]. W branży sokowniczej elektroniczny nos może służyć do rozpoznawania charakterystycznych aromatów i smaków poszczególnych napojów. Ze względu na swoją wysoką czułość jest niezwykle przydatny w ocenie jakości surowców używanych do produkcji soków. Dodatkowo, urządzenie to znajduje zastosowanie w kontrolowaniu jakości gotowych, zapakowanych produktów, zwłaszcza w kontekście problemów z trwałością wynikających z ewentualnych błędów w procesie przetwarzania [Li i in., 2006; Hegazi i in., 2021].

Z kolei, elektroniczny język to nowoczesne narzędzie analityczne, które naśladuje ludzki zmysł smaku, umożliwiając identyfikację, rozróżnianie oraz klasyfikację substancji chemicznych i płynnych mieszanin w oparciu o ich cechy smakowe [Jiang i in., 2018].

Standardowy elektroniczny język składa się z zestawu czujników, z których każdy jest zaprojektowany do wykrywania specyficznych związków chemicznych lub ich grup. Czujniki te współpracują, tworząc profil sensoryczny badanej próbki. Działanie elektronicznego języka polega na zbieraniu danych z tych czujników, które następnie są poddawane analizie za pomocą technik statystycznych lub algorytmów uczenia maszynowego. Dzięki temu możliwa jest identyfikacja i klasyfikacja próbek na podstawie ich właściwości smakowych. E-język przetwarza informacje z wielu źródeł, umożliwiając wykrycie subtelnych różnic w składzie próbki oraz wyodrębnienie charakterystycznych wzorców, co pozwala na precyzyjną klasyfikację [Riul i in., 2010; Aouadi i in., 2020].

Szczególne znaczenie ma wykorzystanie tych urządzeń w przemyśle spożywczym, zwłaszcza ze względu na ich zdolność monitorowania jakości surowców, półproduktów i produktów finalnych oraz wykrywania zanieczyszczeń, obecności bakterii, toksyn lub alergenów, co ma kluczowe znaczenie dla ochrony zdrowia konsumentów, a także optymalizacji procesów produkcyjnych. Elektroniczne języki są również stosowane do porównywania produktów konkurencyjnych, a także analizowania wpływu warunków przechowywania na trwałość wyrobów, takich jak wino, piwo, kawa czy soki [Li i in., 2006; Lvova, 2016; Wadehra i Patil, 2016].

W pracy przeglądowej P2 zatytułowanej „*Effect of High-Powered Ultrasound on Bioactive Compounds and Microbiological Stability of Juices*” przedstawiono różne metody generowania ultradźwięków, omówiono stosowany sprzęt oraz najnowsze osiągnięcia w konstrukcji urządzeń ultradźwiękowych. Przeprowadzono analizę wpływu ultradźwięków na właściwości fizyczne i chemiczne soków, ze szczególnym uwzględnieniem substancji bioaktywnych. Oceniono także skuteczność wykorzystania sonikacji w inaktywacji mikroorganizmów i enzymów. Ponadto, artykuł porusza perspektywy rozwoju technologii ultradźwiękowych, które mogą znacząco zwiększyć efektywność procesów utrwalania napojów z owoców i warzyw.

Urządzenia do generowania fal ultradźwiękowych składają się z trzech podstawowych elementów: generatora energii elektrycznej, przetwornika (przetworników), emitera. Generator elektryczny dostarcza energię do systemu ultradźwiękowego, zasilając przetwornik. Jego główną funkcją jest konwersja standardowego prądu przemiennego o częstotliwości 50 Hz lub 60 Hz na prąd przemienny o wyższej, pożądanej częstotliwości, zazwyczaj mieszczącej się w przedziale od 20 kHz do 40 kHz. Generatory często umożliwiają regulację mocy poprzez dostosowanie napięcia i prądu. Przetwornik stanowi kluczowy element systemu ultradźwiękowego, przekształcając energię elektryczną w mechaniczne wibracje o ultradźwiękowej częstotliwości. Emiter, znany także jako reaktor lub komórka ultradźwiękowa, ma za zadanie przekazywać fale ultradźwiękowe z przetwornika do medium, a często również wzmacniać te drgania podczas emisji.

Ulepszenia technologii generowania ultradźwięków w ciągu ostatnich lat wzbudziły zainteresowanie w szczególności redukcją drobnoustrojów. Mechanizmów ultradźwiękowej inaktywacji mikroorganizmów dopatruje się w szeregu złożonych procesów fizykochemicznych, u których podstaw leżą szybkozmienne naprężenia mechaniczne, dyssypacja energii, kawitacja wraz z całą gamą zjawisk pochodnych, a w szczególnych przypadkach, tak zwany rezonans komórkowy. Badania laboratoryjne wykazują destrukcyjny wpływ ultradźwięków na kolonie drobnoustrojów uwidaczniający się w postaci uszkodzeń elementów komórek i struktur tkankowych.

Reasumując, obróbka ultradźwiękowa stanowi skuteczną alternatywę dla tradycyjnych metod obróbki cieplnej. Jej zalety obejmują poprawę jakości soków owocowo-warzywnych, co skutkuje zwiększeniem zawartości substancji bioaktywnych oraz zachowaniem ich naturalnych cech sensorycznych (konsystencji, barwy, smaku i zapachu).

Praca monograficzna **P3** zatytułowana „**Niekonwencjonalne metody utrwalania produktów rolno-spożywczych**” obejmuje charakterystykę sektora rolno-spożywczego, w tym wpływ pandemii COVID-19, prawne i organizacyjne wymagania warunkujące jego funkcjonowanie w Polsce. W monografii zawarto również zarys historyczny i opis znaczenia stosowania konwencjonalnych metod utrwalania żywności. W szczególowy sposób przedstawiono nowoczesne sposoby obróbki produktów żywnościowych, w tym między innymi pulsacyjne pole elektryczne (PEF), ozonowanie, wysokie ciśnienie hydrostatyczne - technologia HPP, ultradźwięki - sonikację oraz plazmę nietermiczną. W końcowej części pracy wymieniono szanse i zagrożenia wynikające ze stosowania innowacyjnych metod utrwalania żywności.

Ze względu na dużą złożoność pracy monograficznej, do ogólnej charakterystyki niekonwencjonalnych metod obróbki żywności, wybrano plazmę nietermiczną, która jest ściśle związana z niniejszą rozprawą doktorską.

Termin „plazma” opisuje zjonizowany gaz, który jest w stanie quasi-neutralnym i składa się głównie z fotonów, jonów oraz swobodnych elektronów, a także atomów w ich podstawowych lub wzbudzonych stanach, które mają neutralny ładunek. Plazmę klasyfikuje się na „termiczną”, kiedy elektrony i inne cząsteczki gazu są w stanie równowagi termodynamicznej oraz „nietermiczną”, gdy znajdują się w stanie nierównowagi. Tradycyjnie, zimna plazma była wytwarzana w warunkach niskiego ciśnienia, co ograniczało jej praktyczne zastosowanie [Pankaj i in., 2018; Laroque i in., 2022]. Obecnie możliwe jest wytwarzanie zimnej plazmy przy ciśnieniu atmosferycznym, co znacznie rozszerzyło jej zastosowania w różnych dziedzinach nauki. Coraz więcej uwagi poświęca się jej znaczeniu przetwórstwie żywności. Poprzez inicjowanie reakcji fizykochemicznych z udziałem reaktywnych form tlenu i azotu (RONS) oraz naładowanych cząstek, plazma może być wykorzystywana, między innymi do poprawienia wartości odżywczych czy przedłużenia przydatności do spożycia surowych i przetworzonych wyrobów. Ze względu na różnorodność biologiczną poszczególnych produktów żywnościowych, odmienne właściwości reaktorów plazmowych oraz możliwość zastosowania obróbki na różnych etapach produkcji, wiele potencjalnych zastosowań plazmy wciąż pozostaje do odkrycia [Skryplonek, 2016; Osmólska i in., 2024].

Z przeprowadzonego przeglądu literatury wynikało również, że owoce i warzywa oraz produkty z nich wytworzone odgrywają ogromną rolę w żywieniu człowieka, ponieważ są źródłem witaminy C, karotenu, polifenoli i składników mineralnych, a w szczególności potasu, magnezu, manganu, wapnia, żelaza i miedzi.

Niestety w napojach, w tym świeżo tłoczonych sokach czy przygotowanych smoothie mogą zachodzić mikrobiologiczne i fizykochemiczne zmiany, pogarszające ich jakość. Duże znaczenie przypisuje się działalności szkodliwej dla zdrowia pierwotnej mikroflory i jej metabolitów obecnych w surowcach do ich produkcji, a także wtórnym zakażeniom produktów [Kowalska i in., 2016; Snyder i Worobo, 2018].

Żywność i napoje to sektor przemysłowy, który odgrywa kluczową rolę w światowej gospodarce, zarówno w ujęciu ekonomicznym, jak i społecznym. Według raportu AIJN (Europejskiego Stowarzyszenia Soków Owocowych), spożycie wśród Polaków 100% soków z roku na rok wzrasta. Jednym z ważniejszych czynników wpływających na popyt na tego typu artykuły jest rosnąca świadomość zdrowotna polskich konsumentów i promocja tej kategorii wyrobów, jako jednej z 5 zalecanych przez specjalistów porcji owoców i warzyw, które każdy powinien spożywać codziennie [Gwóźdź i Gębczyńska, 2015; Yahia i in., 2017]. Tym bardziej, że pandemia spowodowana przez koronawirusa SARS-CoV-2, doprowadziła do niszczycielskich skutków dla zdrowia. Do tej pory nie zostały opracowane skuteczne leki na zahamowanie wirusa grypy i koronawirusów, stąd też uzasadnione jest promowanie stosowania odpowiedniej diety jako terapii profilaktycznej.

Generalnie dąży się do znalezienia takich związków bioaktywnych, które zapobiegając wystąpieniu wielu chorób u ludzi oraz wspomagając leczenie już tych występujących, będą przede wszystkim chronić produkty przed rozwojem szkodliwych mikroorganizmów.

Owoce sumaka garbarskiego (*Rhus coriaria* L.) posiadające w swoim składzie różne klasy fitochemikaliów, w tym między innymi kwasy organiczne, związki fenolowe, flawonoidy, izoflawonoidy, garbniki ulegające hydrolizie, antocyjany, a także witaminy (tiaminę, ryboflawinę, cyjanokobalaminę, biotynę, kwas askorbinowy) oraz minerały (potas, wapń, magnez, żelazo, cynk i miedź) wykazują pozytywny wpływ na zdrowie człowieka i zdolność do hamowania aktywności drobnoustrojów [Mahdavi i in., 2018; Khoshkharam i in., 2022].

Przeprowadzenie szeregu analiz, polegających na uzupełnieniu świeżo tłoczonych soków marchwiowych i pomidorowych sproszkowanym owocem sumaka garbarskiego (*Rhus coriaria* L.) o maksymalnej ziarnistości 0,5 mm w ilości 0,1; 1,0; 2,0 i 3,0 g/100 ml, pozwoliło ustalić, że zastosowany dodatek skutecznie ograniczał namnażanie się drobnoustrojów, w czasie chłodniczego przechowywania. W sokach marchwiowych wzbogaconych jego największą ilością średnia ogólna liczba drobnoustrojów

po 72 h przechowywania była niższa w stosunku do wyrobu kontrolnego o 4,92 log₁₀ jtk/ml i wynosiła 2,84 log₁₀ jtk/ml. Z kolei w kontrolnych próbkach soków pomidorowych po trzech dniach wykryto dość wysoką zawartość mezofilnych drobnoustrojów tlenowych, która kształtowała się na poziomie średnio 6,41 log₁₀ jtk/ml, a po zastosowaniu dodatku sproszkowanego owocu sumakach została zredukowana do niewykrywalnego poziomu. Oznaczało to, że w ten sposób przygotowane wyroby charakteryzowały przydatnością do spożycia. Została ona ustalona na podstawie kryterium dopuszczalnej zawartości mezofilnych drobnoustrojów tlenowych dla pasteryzowanych soków owocowych i warzywnych (brak norm dla soków świeżo tłoczonych), określonego w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 13 stycznia 2003 r., z późniejszymi zmianami, w sprawie maksymalnych poziomów zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych, które mogą znajdować się w żywności, składnikach żywności, dozwolonych substancjach dodatkowych, substancjach pomagających w przetwarzaniu albo na powierzchni żywności. Według zapisów obecność mezofilnych mikroorganizmów tlenowych w liczbie równej lub niższej od 3,0 log₁₀ jtk/ml, a w maksymalnie dwóch próbkach z pięciu pobranych z danej partii może wynosić pomiędzy 3,0 a 4,0 log₁₀ jtk/ml. Wynik powyżej 4,0 log₁₀ jtk/ml dyskwalifikuje całą partię produktu. Przyjmuje się również, że dopuszczalna zawartość drożdży i pleśni w sokach pasteryzowanych może być równa lub niższa 1 log₁₀ jtk/ml.

Co więcej, w zbadanych po 72 h kontrolnych próbkach soku marchwiowego ogólna zawartość karotenoidów kształtowała się na poziomie 11,21 mg/100 g. Zaś dodatek proszku z sumaka w ilości 3,0 g/100 ml zwiększył udział tych barwników o około 10%. Podobne zależności zaobserwowano również w przypadku soku pomidorowego, a różnice w wartościach wynosiły blisko 35%.

Otrzymanie pozytywnych rezultatów analiz, których jeszcze nikt wcześniej nie opisał w literaturze naukowej, umożliwiło przygotowanie wniosku patentowego. W związku z decyzją Urzędu Patentowego RP o udzieleniu patentu na wynalazek, pt. „**Sposób kondycjonowania soku sumakiem**”, zgłoszonego w dniu 02.09.2022 r. został on oznaczony numerem P.442178 (P4).

Przełomowym etapem badań była jednak skojarzona stacjonarna obróbka przedłużająca przydatność do spożycia świeżo tłoczonych soków marchwiowych i pomidorowych z jednoczesnym zachowaniem ilości karotenoidów przy zastosowaniu dodatku w postaci przyprawy sumak ze sproszkowanego owocu sumaka (*Rhus coriaria* L.) i użyciu nietermicznej plazmy atmosferycznej.

Istotą sposobu obróbki było to, że do reaktora ze ślizgającym się łukiem Glide-arc o częstotliwości od 10 do 200 Hz i o napięciu od 3,7 do 17 kV podawano gaz procesowy, korzystnie w postaci powietrza i po przejściu przez łuk elektryczny kierowano jego strumień na próbkę napoju wzbogaconego wcześniej sumakiem w ilości od 0,1 do 3,0 g na 100 ml soku, umieszczonego na podajniku przez okres od 30 do 1200 s. Tego typu przeprowadzone zabiegi miały wysoką skuteczność w eliminacji mikroorganizmów naturalnie zanieczyszczających produkty i potencjał do uzyskania niepasteryzowanych wyrobów o wydłużonym terminie przydatności do spożycia.

Badania wykazały, że ogólna liczba drobnoustrojów w marchwiowym soku kontrolnym (bez dodatku sumaka, nie poddanym plazmowaniu) po pierwszej dobie przechowywania, w zamkniętych pojemnikach w temperaturze 6°C, wynosiła 5,09 log₁₀ jtk/ml i rosła, osiągając po trzech dobach wartość 7,63 log₁₀ jtk/ml, co czyniło sok nieprzydatnym do spożycia. Zastosowana obróbka wykazała dużą skuteczność w eliminacji drobnoustrojów, zależną od dawki przyprawy i czasu trwania niskotemperaturowego utrwalania. W rezultacie całkowitą eliminację liczby mezofilnych mikroorganizmów tlenowych zaobserwowano w przypadku próbek z udziałem sumaka w ilości 3,0 g/100 ml i traktowanych plazmą przez 1200 s (częstotliwość zasilania 50 kHz; napięcie 7,2 kV) po 3 dniach przechowywania. Z kolei próbki soku pomidorowego już po uzupełnieniu sumakiem w ilości 0,1 g/100 ml i obróbce zimną plazmą przez 30 s (częstotliwość zasilania 10 kHz; napięcie 17 kV) nadawały się do spożycia (biorąc pod uwagę Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 13 stycznia 2003 r.).

Co bardzo ważne, w analizowanych napojach wraz ze wzrostem ilości użytego dodatku proszku z sumaka garbarskiego i wydłużaniem czasu niskotemperaturowego przetwarzania ogólna zawartość karotenoidów rosła.

Uzyskanie innowacyjnych rezultatów badań przedstawionych w zgłoszeniu patentowym w dniu 02.09.2022 r. zaowocowało otrzymaniem decyzji na udzielenie patentu na wynalazek (23.05.23 r), pt. **„Sposób kondycjonowania soku sumakiem i plazmą w systemie stacjonarnym”** oznaczony numerem P.442179 (P5).

Kontynuowanie prowadzenia doświadczeń naukowych, pozwoliło uzyskać bardziej szczegółowe dane na temat jakości mikrobiologicznej i cech fizykochemicznych soku marchwiowego wzbogaconego sproszkowanym owocem sumaka *Rhus coriaria* L. (w ilości 0,5; 1,5 i 3,0 g/100 ml) przechowywanego w warunkach chłodniczych przez 72 h. Informacje zawarte w pracy doświadczałnej P6 pod tytułem **„Effect of Supplementation of Freshly Pressed Carrot Juice with *Rhus coriaria* L. on Changes in Juice Quality”**

wskazują, że średni poziom zanieczyszczenia tlenowymi mikroorganizmami mezofilnymi próbek kontrolnych soku z marchwi odmiany Nerac F1 po pierwszym dniu przechowywania w warunkach chłodniczych wynosił 6,11 log₁₀ jtk/ml. W próbkach soku z dodatkiem 3,0 g sumaka na 100 ml zaobserwowano spadek liczby drobnoustrojów tlenowych o 0,28 log₁₀ jtk/ml w porównaniu do wyrobu kontrolnego. Po 48 godzinach przechowywania stwierdzono wyraźny efekt bakteriostatyczny dodatku sumaka. W próbkach kontrolnych liczba bakterii tlenowych wzrosła do poziomu 7,30 log₁₀ jtk/ml, natomiast w soku wzbogaconym sumakiem w ilości 1,5 i 3,0 g/100 ml liczba mikroorganizmów była niższa o około 2 log w porównaniu do próby kontrolnej. Po 72 godzinach ogólna liczba drobnoustrojów w próbie kontrolnej osiągnęła wartość 8,30 log₁₀ jtk/ml, zaś zastosowanie sumaka w ilościach 0,5, 1,5 i 3 g skutkowało redukcją tych mikroorganizmów odpowiednio o 1,7; 2,9 i 3,1 log₁₀ jtk/ml.

Zanieczyszczenie kontrolnego soku marchwiowego drożdżami i pleśniami po 24 godzinach, wynosiło średnio 2,3 log₁₀ jtk/ml. Dodanie sumaka w największej zastosowanej ilości, czyli 3,0 g/100 ml początkowo przyczyniło się do jedynie niewielkiego spadku liczby tych mikroorganizmów (o 0,4 log₁₀ jtk/ml). Z kolei kiedy po 48 i 72 godzinach przechowywania liczba drożdży oraz pleśni w próbkach kontrolnych znacznie wzrosła, osiągając wartość odpowiednio 4,3 i 5,8 log₁₀ jtk/ml, sok wzbogacony sumakiem charakteryzował się niższym zanieczyszczeniem mikrobiologicznym. Tym sposobem dowiedziono, że sumak ma działanie przeciwdrobnoustrojowe, co najprawdopodobniej wynikało z jego zakwaszających właściwości. Zaobserwowano, statystycznie istotne zwiększenie ogólnej zawartości kwasów (w przeliczeniu na kwas cytrynowy) soku zawierającego 3 g sumaka, po 72 - godzinnym przechowywaniu.

Co więcej, udowodniono, że polifenole zawarte w *Rhus coriaria* L. mogą zapobiegać namnażaniu się drobnoustrojów w soku marchwiowym. W kontrolnych próbkach napojów w trzy dniowym okresie badawczym stwierdzono całkowitą zawartość polifenoli na poziomie 20,85 mg/100 ml - 22,26 mg/100 ml. Uzupełnienie soków przyprawą sumak w ilości 1,5 g oraz 3,0 g zwiększyło zawartość tych związków odpowiednio o 14% i 42% w pierwszym dniu przechowywania w porównaniu do próbki kontrolnej. Po 72 godzinach różnice te wyniosły 28% i 60%.

Innym ważnym czynnikiem jakościowym, który poddano ocenie, była zawartość karotenoidów, istotnych zarówno z perspektywy wartości odżywczych, jak i sensorycznych. To właśnie karotenoidy nadają warzywom i owocom charakterystyczne pomarańczowe, czerwone i żółte odcienie. Najwyższą zawartość tych dobroczynnych związków

zaobserwowano w pierwszym dniu badań w soku marchwiowym z 3-gramowym dodatkiem sumaka, wynoszącą 20,47 mg/100 g. W próbce kontrolnej stwierdzono o około 23% niższą ich ilość.

Zawartość całkowitych rozpuszczalnych substancji stałych (ekstraktu) w analizowanych sokach mieściła się w przedziale od 8,73 do 9,63°Brix. W przypadku soku bez dodatków, zawartość ekstraktu wynosiła od 8,73 do 8,90°Brix. Produkty wzbogacone sumakiem w ilości 1,5 g oraz 3,0 g na 100 ml wykazywały wyższy poziom tej cechy. Średnie wartości parametru w ciągu kilku dni badań oscylowały między 9,23 a 9,63°Brix.

Analiza barwy soków pozwoliła uzyskać kompleksowe informacje na temat ich jakości oraz wpływu zastosowanego dodatku na tempo zachodzących zmian. W pierwszym dniu eksperymentu zauważono spadek wartości parametrów barwy (L^* , a^* i b^*) w próbkach soku z marchwi wzbogaconych sumakiem. Dodanie naturalnego konserwantu prowadziło do niewielkiego przyciemnienia próbek w porównaniu do soku kontrolnego ($p < 0,05$) po 48 i 72 godzinach przechowywania w warunkach chłodniczych. Dodatkowo, soki uzupełnione sumakiem wykazywały mniejsze nasycenie czerwonym i żółtym kolorem w porównaniu do soku kontrolnego w tych samych dniach. Obliczony współczynnik, znany jako całkowita różnica barwy (ΔE), w większości przypadków mieścił się w zakresie wartości $2 < \Delta E < 3,5$, co oznaczało, że zmiany były istotne nawet dla niedoświadczonych obserwatorów.

Zadawalające rezultaty analiz otrzymane dla soku marchwiowego postanowiono potwierdzić, wykorzystując inny materiał badawczy, jakim było smoothie marchwiowo-bananowe. Podobnie jak poprzednio świeżo przygotowany wyrób uzupełniono sproszkowanym owocem sumaka w ilości 0,5; 1,5 and 3,0 g/100 ml, oceniając jego jakość w czasie 3-dniowego chłodniczego przechowywania.

Na podstawie wyników przedstawionych w publikacji **P7** zatytułowanej „*Effects of the powdered fruit of Rhus coriaria L. addition on quality attributes based on total polyphenols content of smoothie during storage*” stwierdzono, że średni poziom zanieczyszczenia świeżych prób owocowo-warzywnego smoothie, po pierwszym dniu przechowywania, mezofilnymi drobnoustrojami tlenowymi i drożdżami wynosił odpowiednio: 6,06 \log_{10} jtk/ml i 2,24 \log_{10} jtk/ml. W kolejnych dniach ogólna liczba mikroorganizmów wzrosła do poziomu 6,31 \log_{10} jtk/ml, a następnie 6,94 \log_{10} jtk/ml. Podobnie zawartość drożdży zasiedlających przygotowane wyroby kontrolne w drugim dniu badań osiągnęła wartość równą 2,88 \log_{10} jtk/ml, natomiast w trzecim zaobserwowano ich wzrost do 4,26 \log_{10} jtk/ml.

Dodanie sumaka do świeżo przygotowanego napoju okazało się skuteczne w ograniczeniu rozwoju mikroorganizmów, jednak efekt ten wyraźnie uzależniony był od ilości użytej przyprawy. Należy zauważyć, że ze względu na namnażanie mikroorganizmów w kontrolnych próbkach smoothie w trakcie przechowywania i zahamowanie tego namnażania w próbkach z sumakiem, największą redukcję liczby mikroorganizmów stwierdzono po 3 dniach. Ogólna liczba mikroorganizmów tlenowych w próbkach z udziałem przyprawy w ilości 0,5 i 1,5 g/100 ml spadła, w porównaniu z próbkami kontrolnymi odpowiednio o 1,46 i 2,07 \log_{10} jtk/ml. Liczba drożdży i pleśni w smoothie uzupełnionych sumakiem w ilości 0,5 mg/100 ml została obniżona do 4,16 \log_{10} jtk/ml, zaś kiedy zwiększono zawartość przyprawy do 1,5 g/100 ml średni poziom rozpatrywanych drobnoustrojów został zredukowany do 2,29 \log_{10} jtk/ml. Zastosowanie sumaka w ilości 3,0 g/100 ml przyniosło najlepsze efekty i umożliwiło eliminację ogólnej liczby drobnoustrojów do średniego poziomu 3,66 \log_{10} jtk/ml (obniżenie ich ilości o 43% w stosunku do próby kontrolnej). Zadawalające rezultaty dodania sumaka zaobserwowano również wobec drożdży obecnych w smoothie, kiedy w próbkach uzupełnionych 3-gramowym dodatkiem w trzecim dniu analiz ich ilość została zredukowana o 48%, w porównaniu z kontrolą.

Podczas chłodniczego przechowywania wartość pH w przypadku smoothie kontrolnego oraz wzbogaconego sumakiem w ilości 0,5 i 1,5 g/100 ml nieznacznie obniżyła się lub pozostawała na tym samym poziomie. Zaś w napoju, gdzie dodano 3 g przyprawy od 1 do 3 dnia odnotowano 6% wzrost pH. Zaobserwowane zmiany (potwierdzone testem statystycznym) wynikały z kwasów obecnych w owocach sumaka, do których należą między innymi jabłkowy, cytrynowy, fumarowy, winowy i askorbinowy.

Smoothie różniły się pod względem zawartości ekstraktu. Wykazane różnice w materiale badawczym uwarunkowane były ilością sumaka wykorzystaną do przygotowania wyrobów. Spośród analizowanych napojów statystycznie najwyższą wartością ekstraktu charakteryzowały się wyroby z dodatkiem sumaka w ilości 3,0 g/100 ml (13,17°Brix), najniższą natomiast produkty kontrolne (10,13°Brix) w pierwszym dniu badań.

Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, że ilość dodanego sumaka miała również istotny wpływ na kształtowanie się zmian zawartości karotenoidów ogółem w badanych smoothie z marchwi i banana. Czas przechowywania także był czynnikiem różnicującym ten parametr, gdyż podczas trzech dni badań w analizowanych próbkach napojów odnotowano wzrost zawartości tych barwników. Smoothie 3-gramowym udziałem

przyprawy w trzecim dniu badań było najbardziej zasobne w karotenoidy ogółem i zawierało ich o około 15% więcej w porównaniu do wyrobu kontrolnego.

W kształtowaniu właściwości przeciwutleniających napojów istotną rolę odgrywają związki zaliczane do grupy polifenoli. Analizowane smoothie różniły się statystycznie istotnie ($p < 0,05$) pod względem zawartości związków polifenolowych ogółem. Zdecydowanie największą ich ilością, odznaczały się soki z najwyższą zawartością sumaka. Różnice pomiędzy próbą bez dodatku przyprawy, a smoothie uzupełnionym 3,0 g sumaka na 100 ml w 1, 2 i 3 dniu badań wynosiły odpowiednio 54%, 63% i 65%.

Barwa napojów także była ważnym wskaźnikiem weryfikacji ich jakości. Wartości parametru L^* świadczącego o jasności smoothie wahały się w zakresie od 42,09 do 44,96. Najwyższą wartość, czyli najjaśniejszą barwę zanotowano dla napoju kontrolnego w pierwszym dniu badań, natomiast najniższą wartość i tym samym najciemniejszą barwę dla smoothie w udziale sumaka w ilości 3,0 g/100 ml w drugim dniu analiz. Wartości parametru a^* smoothie, zmieniały się w zależności od ilości dodanego sumaka. Kiedy napój zawierał więcej przyprawy to wartość parametru obniżała się (malał udział barwy czerwonej). W pierwszym dniu badań wartości zawierały się w zakresie od 14,20 do 16,21, zaś po trzech dniach smoothie kontrolne przyjmowało bardziej ciemnoczerwoną barwę, a próbki napojów z sumakiem nie wykazywały takiej tendencji (14,41 – 17,31). Niższe wartości parametru b^* oznaczone w wyrobach z dodatkiem sumaka, w porównaniu do smoothie bez udziału przyprawy, świadczyły o niższym udziale barwy żółtej. Najwyższą wartość parametru zmierzono w smoothie kontrolnym (najbardziej żółte), zaś najniższą w wyrobie uzupełnionym sumakiem w ilości 1,5 g/100 ml w 3. dniu badań. Bezwzględna różnica barwy, wyrażana jako ΔE , przyjmowała różne wartości w zależności od ilości zastosowanego sumaka i czasu przechowywania smoothie. Wartość współczynnika dla wyrobu z najniższym udziałem sumaka w pierwszym i drugim dniu badań zawierała się pomiędzy 0 a 1 (odchylenie niewidoczne), stąd różnice barwy były nierozpoznawalne, zaś w 3 dniu różnice były dostrzegalne nawet przez osobę postronną. Większość wyrobów, gdzie dodano przyprawy w ilości 1,5 oraz 3,0 g/100 ml wykazywało wyraźne odchylenie, gdyż wartości ΔE zawierały się w zakresie 3,5 – 5. Zaobserwowano postępujące brunatnienie soku kontrolnego, gdyż indeks brązowienia (BI) od pierwszego do trzeciego dnia badań wzrósł z 86,46 do 91,34. W czasie przechowywania smoothie z sumakiem charakteryzowały się znacznie większą stabilnością indeksu brązowienia (nawet w kilku przypadkach w 3 dniu analiz stawały się mniej brunatne).

Reasumując, zastosowanie sumaka w odpowiedniej ilości jest realną alternatywą dla napojów na bazie nietrwałych lub brązowiejących owoców i warzyw. Najwyższe wartości wskaźników jakości (zawartość ekstraktu, karotenoidów i związków polifenolowych) stwierdzono w smoothie z najwyższą zawartością *Rhus coriaria* L. Przyprawę tę można łatwo i szybko stosować, oferując wartość dodaną do produktów końcowych charakteryzujących się bezpieczeństwem mikrobiologicznym.

Bardzo ciekawe rezultaty analiz, zawarto w pracy doświadczalnej **P8** zatytułowanej „*Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment*”, które polegały na zastosowaniu dwuelektrodowego reaktora plazmowego typu Glide-arc pracującego pod ciśnieniem atmosferycznym (napięcie przyłożone 3,8 kV, moc średnia 40 W), w celu oceny jakości świeżo tłoczonego soku z pomidorów odmiany Bekas. Do strefy rozładowania dostarczono powietrze w ilości 440 l/h za pomocą regulatora przepływu, a 50 ml napoju w sterylnym szklanym pojemniku umieszczono na mieszadle magnetycznym AREX (VELP Scientifica, Usmate, Włochy). Odległość między elektrodami a powierzchnią soku wynosiła 10 mm, zaś prędkość mieszania ustawiono na 120 obr./min. Przeanalizowano wpływ generowanej plazmy z gazem procesowym powietrzem na właściwości fizykochemiczne, mikrobiologiczne oraz mikrostrukturę próbek. W badaniu wykorzystano pięć grup soków, które poddano różnym czasom ekspozycji na plazmę (30, 60, 120, 300 i 600 s), oraz sok niepoddany obróbce jako grupę kontrolną. Najwyższa temperatura próbki zmierzona po 600 s obróbki termoparą typu K podłączoną do miernika DT-847U (Maxtech, Tajpej, Tajwan) wyniosła 29,6°C. Jakość soku oceniano po 1, 3, 5 i 10 dniach przechowywania w warunkach chłodniczych.

Kwasowość to parametr, który jest jednym z istotniejszych wskaźników jakości soku, ponieważ wpływa na wybór metod utrwalania, które zapewniają bezpieczeństwo produktu. Stwierdzono statystycznie istotny wzrost wartości pH w próbach soków poddanych obróbce zimną plazmą w stosunku do próby kontrolnej. W pierwszym dniu przechowywania, w soku wystawionym na działanie zimnej plazmy przez 600 s, pH wzrosło do 4,45 w porównaniu do 3,89 w próbie kontrolnej. Obniżenie tego parametru w produktach traktowanych zimną plazmą można tłumaczyć powstawaniem tlenków azotu i innych związków w wyniku zderzenia elektronów energetycznych z azotem cząsteczkowym obecnym w gazie roboczym. Efektem tego jest wzrost wartości pH.

Całkowita zawartość rozpuszczalnych substancji stałych badanych soków była nieznacznie wyższa w sokach poddanych działaniu zimnej plazmy od pierwszego do piątego dnia przechowywania. Statystycznie istotny wzrost tego parametru w stosunku

do próby kontrolnej we wszystkich plazmowanych sokach stwierdzono w piątym dniu eksperymentu. Wtedy w przypadku 600 s obróbki plazmą odnotowano, względem próby kontrolnej, wyższą o prawie 20% wartość tej cechy. Po dziesięciu dniach przechowywania rozpatrywany parametr dla soków poddanych działaniu plazmy przez 30 i 60 s był wyższy niż w sokach, dla których zastosowano dłuższą obróbkę trwającą 120, 300 i 600 s.

Wyniki wykazały, że po zaledwie jednym dniu przechowywania soku w warunkach chłodniczych średnia liczba mezofilnych mikroorganizmów tlenowych w badanych próbkach wyniosła $3,22 \log_{10}$ jtk/ml. Przy takiej całkowitej liczbie mikroorganizmów sok nie wykazywał oznak zepsucia i nadawał się do spożycia. W kolejnych dniach przechowywania w warunkach chłodniczych liczba mikroorganizmów wzrastała z powodu ich proliferacji, co prowadziło do psucia się soku i sprawiło, że zagraża on zdrowiu w przypadku spożycia. Całkowita liczba tlenowych mikroorganizmów mezofilnych w soku jadalnym nie powinna przekraczać $3-4 \log_{10}$ jtk/ml (biorąc pod uwagę Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 13 stycznia 2003 r.). Zakłada się, że liczba kolonii przekraczająca $4 \log_{10}$ jtk/ml jest odpowiedzialna za psucie się soku. Po 3 dniach przechowywania w warunkach chłodniczych zaobserwowano niewielki wzrost liczby kolonii tworzonych przez mikroorganizmy tlenowe ($3,40 \log_{10}$ jtk/ml), jednak po 5 dniach przechowywania ich liczba wzrosła do wysokiego poziomu przekraczającego $5 \log_{10}$ jtk/ml, a po 10 dniach była większa niż $6 \log_{10}$ jtk/ml. Od piątego dnia zauważono zmianę cech organoleptycznych soku, a po 10 dniach widoczne były wyraźne oznaki pogorszenia, w tym pleśń rozwijająca się na powierzchni soku. Zawartość drożdży i pleśni po 1 dniu przechowywania była na bardzo niskim poziomie (mniej niż $0,5 \log_{10}$ jtk/ml), jednak zauważono ich intensywną proliferację w trakcie przechowywania, co w dużej mierze przyczyniło się do psucia się soku. Już po 3 dniach ich liczba wzrosła do poziomu zbliżonego do $3 \log_{10}$ jtk/ml, a po 10 dniach osiągnęła wartość $3,66 \log_{10}$ jtk/ml. Wyniki wykazały, że pomimo niskiego pH i niskiej zawartości cukru w soku pomidorowym, całkowita liczba mikroorganizmów tlenowych wzrosła w trakcie przechowywania w warunkach chłodniczych i po około 5 dniach czyniła go niezdatnym do spożycia.

Skuteczność obróbki świeżo przygotowanych próbek soku za pomocą zimnej plazmy atmosferycznej (CAP) w eliminacji całkowitej liczby mezofilnych mikroorganizmów tlenowych zależała od czasu tej działania. 30-sekundowe traktowanie CAP nie dało oczekiwanych efektów, ponieważ osiągnięto redukcję całkowitej liczby mikroorganizmów o mniej niż $1 \log_{10}$ jtk/ml, a po 10 dniach przechowywania nastąpiła redukcja o około $2 \log_{10}$ jtk/ml w porównaniu z nieutralną próbką kontrolną. Podobnie, działanie zimnej

plazmy przez 60 i 120 s miało niewielki wpływ na redukcję liczby kolonii liczonych po 1 i 3 dniach przechowywania, ale mikroorganizmy w tych próbkach proliferowały znacznie wolniej niż w kontroli, a po 5 i 10 dniach przechowywania zaobserwowano redukcję liczby mikroorganizmów o ponad 2 log₁₀ jtk/ml w porównaniu z próbką kontrolną. Obróbka CAP przez 300 s okazała się znacznie skuteczniejsza, liczba jednostek tworzących kolonie została zredukowana do średnio 1,83 log₁₀ jtk/ml, a w kolejnych dniach przechowywania utrzymywano ją na niskim poziomie nieco ponad 2 log₁₀ jtk/ml, dzięki czemu sok nadawał się do spożycia nawet po 10 dniach przechowywania w warunkach chłodniczych. Największą skuteczność w usuwaniu zawartości mikrobiologicznej uzyskano poprzez plazmowanie próbek soku przez 600 s. W tym przypadku liczba jednostek tworzących kolonie spadła do mniej niż 0,5 log₁₀ jtk/ml i nie wzrosła w ciągu 10 dni przechowywania. Można było zatem wnioskować, że obróbka CAP przez 600 s jest skuteczną metodą usuwania całkowitej liczby mikroorganizmów tlenowych w soku pomidorowym, wydłużając jego okres przydatności do spożycia do 10 dni, bez obróbki cieplnej. W przypadku usuwania drożdży i pleśni traktowanie CAP przez 30, 60 i 120 s było nieskuteczne, ponieważ ich liczba wzrosła w tych próbkach w ciągu kolejnych dni przechowywania, podobnie jak w przypadku kontroli niepoddanej traktowaniu. Natomiast leczenie CAP przez 300 i 600 s okazało się bardzo skuteczne, ponieważ w tych próbkach liczba drożdży i pleśni nie wzrosła aż do 10-tego dnia przechowywania i pozostała poniżej 0,5 log₁₀ jtk/ml (wizualnie nie zaobserwowano wzrostu pleśni na tych próbkach).

W tym badaniu udowodniono również, że w 1. i 3. dniu chłodniczego przechowywania sok pomidorowy odznaczał się zawartością likopenu wynoszącą odpowiednio 66,70 i 65,00 mg/100 g, i nie były to wartości statystycznie różne ($p < 0,05$) od tych otrzymanych dla soku plazmowanego przez 30 do 600 s. Natomiast w soku kontrolnym w 5. dniu badań zawartość likopenu spadła o około 6% w porównaniu do tego z pierwszego dnia. Zaś soki pomidorowe traktowane zimną plazmą CAP charakteryzowały się niezmienną zawartością tego cennego barwnika przez cały okres przechowywania.

Co bardzo ważne, w soku pomidorowym obecna jest witamina C, która charakteryzuje się zdolnością dezaktywacji rodników nadtlenkowych powstających zarówno podczas przygotowywania żywości, jak i w wyniku procesów metabolicznych w organizmie. Zawartość kwasu askorbinowego w badanych sokach pomidorowych kształtowała się na poziomie od 266,40 mg/100 g do 277,45 mg/100 g. Podczas przechowywania największe straty tego związku wystąpiły w próbie kontrolnej. Po pięciu dniach zawartość witaminy C była o blisko 17% niższa niż w soku badanym

w pierwszym dniu. W sokach poddanych działaniu CAP straty te były znacznie mniejsze (około 2-3% między pierwszym a dziesiątym dniem eksperymentu).

Barwa jest ważną cechą jakościową soków i głównym czynnikiem wpływającym na percepcję sensoryczną. W pierwszym dniu badań odnotowano istotne zmniejszenie jasności wyrobów poddanych obróbce zimną plazmą, w porównaniu z sokiem nietraktowanym. Natomiast w czasie przechowywania (po 10 dniach) zaobserwowano brak statystycznie istotnych zmian wartości parametru L^* w sokach obrabianych zimną plazmą przez 600 s, w porównaniu z wyrobem kontrolnym.

Współczynnik chromatyczności a^* , zmieniał się wraz ze zmianą czasu obróbki plazmą. Im dłuższy był czas traktowania soku pomidorowego CAP tym ten współczynnik osiągał niższe wartości. Czas przechowywania był czynnikiem różnicującym ten parametr.

Współczynnik chromatyczności b^* , uległ zmianie po zastosowaniu obróbki zimną plazmą w pierwszym dniu badań. Wykazano, że CAP wpłynęła na obniżenie współczynnika charakteryzującego barwę żółtą o około 32% w przypadku soku traktowanego przez 600 s i wyrobu kontrolnego. W 10. dniu analiz parametr chromatyczności b^* osiągnął nieco niższe wartości, w porównaniu do tych uzyskanych w pierwszym dniu badań. Natomiast różnice w wartościach współczynnika dla soku kontrolnego i najdłużej obrabianego zimną plazmą (600 s) wynosiły tylko 1%.

Całkowita różnica barwy ΔE dla soków poddanych działaniu plazmy i analizowanych w pierwszym dniu, wynosiła 2,65 – 2,94 (biorąc pod uwagę próbki o parametrach skrajnych), co świadczyło o średnim odchyleniu barwy, rozpoznawalnym nawet przez osobę postronną. Obliczono również całkowitą różnicę barwy dla próbek napojów badanych w 10. dniu. Otrzymano wartości ΔE poniżej 1 dla soku traktowanego zimną plazmą przez 30 s, co świadczy o odchyleniu niewidocznym oraz wartości pomiędzy 1 a 2 wskazujące na niewielkie różnice, rozpoznawalne jedynie przez osobę doświadczoną w odróżnianiu niuansów barw.

Wykonane obrazy mikroskopowe zarówno kontrolnego soku pomidorowego, jak i poddanego procesowi plazmowania prezentowały nieuszkodzone komórki zawierające w sobie kryształy karotenoidów.

Podsumowując tę część pracy, kluczowe znaczenie zyskuje opracowanie systemowych mechanizmów, które zapewnią odpowiednią jakość świeżo wyciskanych soków, charakteryzujących się szczególnie krótkim okresem przydatności do spożycia. Oprócz dostarczania niezbędnych składników odżywczych, tego typu produkty muszą cechować się dobrą zdolnością do długotrwałego przechowywania, a co za tym idzie

łatwością w dystrybucji w sieciach handlowych. Zastosowanie niskotemperaturowej obróbki plazmą generowaną w reaktorze ze ślizgającym się łukiem przyniosło liczne korzyści zarówno pod względem poprawy jakości mikrobiologicznej, jak i wzrostu ilości substancji biologicznie czynnych w soku pomidorowym, w stosunku do wyrobu kontrolnego.

Ze wszystkich uzyskanych danych liczbowych jasno wynikało, że łączny efekt zastosowania innowacyjnej metody kombinowanej, czyli włączenia do świeżo tłoczonego soku proszku z sumaka wraz z poddaniem go działaniu zimnej plazmy miało bardzo duże znaczenie w poprawie jakości i bezpieczeństwa wyrobu. Wyniki badań zaprezentowano w publikacji P9 zatytułowanej „*The Effect of the Addition of Powdered Sumac (Rhus coriaria L.) and Cold Plasma Treatment on the Quality of Carrot Juice*”. Eksperymenty przeprowadzono przy ilości proszku sumaka (o maksymalnej granulacji 0,5 mm) 0,5 g i 3,0 g na 100 ml produktu, który został dodany przed lub po 1200 s obróbki plazmowej z użyciem reaktora ze ślizgającym się łukiem ($V = 3,8$ kV, $f = 50$ Hz). Powietrze o przepływie 440 l/h było używane jako gaz substratowy dla dwuelektrodowego reaktora plazmowego, który pracował przy średniej mocy 40 W. Próbkę soku (25 ml) umieszczono w sterylnym szklanym pojemniku pod elektrodami GAD w odległości 1 cm i mieszano przy użyciu mieszadła magnetycznego. Maksymalna temperatura próbek mierzona za pomocą miernika DT-847U (Yu Ching Technology) z termoparą typu K wynosiła 35°C. Generalnie przygotowano 8 próbek soku, które odpowiednio zakodowano: K-Kontrola, S05 – sok z pół gramowym dodatkiem sumaka, S3 – sok z 3-gramowym dodatkiem sumaka, CAP – sok plazmowany, S05+CAP i S3+CAP – sok plazmowany z 0,5 i 3 gramowym dodatkiem sumaka wprowadzonego przed obróbką, CAP+05S i CAP+3S – w tym wypadku obróbkę plazmą zastosowano przed uzupełnieniem soku sumakiem. Ocenę jakości przygotowanych soków przeprowadzono po 24, 48 i 72 godzinach przechowywania w warunkach chłodniczych w temperaturze 6°C.

W kontrolnych próbkach soku (nie traktowanych plazmą, bez dodatku proszku z sumaka, kod K) po 24 godzinach wykryto dość wysoką zawartość mezofilnych drobnoustrojów tlenowych, która kształtowała się na poziomie średnio 5,27 log₁₀ jtk/ml. W kolejnych godzinach przechowywania liczba ta znacząco wzrosła, na skutek namnażania się drobnoustrojów, do poziomu 6,45 log₁₀ jtk/ml (po 48 h) i do 7,36 log₁₀ jtk/ml (po 72 h). W kontrolnych próbkach soku w 24 h wykryto również obecność drożdży na poziomie 2,19 log₁₀ jtk/ml, których liczba intensywnie wzrastała i po 48 i 72 godzinach przechowywania osiągnęła wartości odpowiednio 4,30 log₁₀ jtk/ml i 5,34 log₁₀ jtk/ml.

Porównując otrzymane wyniki z posiewów mikrobiologicznych z dopuszczalnymi wartościami zamieszczonymi w regulacjach prawnych odnoszących się do jakości mikrobiologicznej soków pasteryzowanych można było stwierdzić, że już po 24 h od wytłoczenia w świeżym soku marchwiowym ogólna liczba mikroorganizmów tlenowych została przekroczona. Wynikało to najprawdopodobniej z liczby drobnoustrojów na powierzchni marchwi, czystości procesu wyciskania soku, stopnia zanieczyszczenia powietrza w różnych dniach, itp. Kolejne godziny przechowywania powodowały dalszy wzrost ilości drobnoustrojów, co skutkowało nieprzydatnością do spożycia badanego soku z marchwi.

Ustalono, że dodanie do soku marchwiowego proszku z sumaka w ilości 0,5 i 3,0 g/ 100 ml oraz poddanie wyrobu działaniu plazmy przyczyniało się do zmniejszenia ilości drobnoustrojów. Ogólna ilość mikroorganizmów tlenowych w próbkach soku S05 i S3 w poszczególnych godzinach przechowywania spadła średnio o 0,14 – 2,78 \log_{10} jtk/ml w porównaniu z odpowiednimi próbkami kontrolnymi. W przypadku działania zimnej plazmy CAP ilość bakterii zmniejszyła się średnio o 0,81 – 3,01 \log_{10} jtk/ml. Natomiast ilość drożdży spadła o maksymalnie 1,11 \log_{10} jtk/ml dla próbki S05, o 2,80 \log_{10} jtk/ml dla produktu oznaczonego kodem S3 i o 4,17 \log_{10} jtk/ml po obróbce plazmą. Największe różnice zaobserwowano po 72 godzinach chłodniczego przechowywania. Stwierdzono, że redukcja mikroorganizmów w rezultacie tego typu zabiegów była wysoka, jednak nie przyczyniła się w znaczącym stopniu do przedłużenia przydatności soku marchwiowego do spożycia.

Uzupełnienie soku proszkiem z sumaka w ilości 0,5 g/100 ml oraz traktowanie plazmą (S05+CAP) lub też zastosowanie dodatku po procesie plazmowania (CAP+05S) dało lepsze wyniki, ale również nie były one zadowalające pod względem przedłużenia przydatności soku do spożycia po 24 godzinach od wytłoczenia. Należy zauważyć, że ze względu na namnażanie mikroorganizmów w kontrolnych próbkach soku w trakcie przechowywania i zahamowanie tego namnażania w próbkach traktowanych plazmą (przed lub po dodaniu sumakowego proszku), największą redukcję liczby mikroorganizmów stwierdzono po 72 godzinach przechowywania. Ogólna liczba mikroorganizmów tlenowych spadła w próbkach S05+CAP i CAP+05S, w porównaniu z próbkami kontrolnymi o odpowiednio 65 i 68%, natomiast liczba drożdży po tym czasie przechowywania została zredukowana do niewykrywalnego poziomu. Stąd też, w ten sposób przygotowane soki nadawały się do spożycia (biorąc pod uwagę całkowitą liczbę

drobnoustrojów tlenowych oraz liczbę drożdży dopuszczalną dla soków pasteryzowanych wg Rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 13 stycznia 2003 r.).

Zastosowanie większej ilości proszku z sumaka, zarówno w kombinacji S3+CAP, jak i CAP+3S pozwoliło na przedłużenie okresu przydatności do spożycia niepasteryzowanego soku marchwiowego do 72 godzin, przy jeszcze większej redukcji liczby mikroorganizmów w porównaniu z sokiem kontrolnym. Ogólna liczba drobnoustrojów oraz drożdży znajdowała się poniżej granicy oznaczalności.

Podsumowując tę część analiz uznano, że dzięki połączeniu działania plazmy z uzupełnieniem świeżo tłoczonego soku z marchwi sproszkowanym owocem sumaka *Rhus coriaria* L. można otrzymać wyrób zdatny do spożycia nawet po 72 godzinach chłodniczego przechowywania.

Z kolei szczegółowa analiza właściwości fizykochemicznych soku marchwiowego wykazała, że dodatek proszku sumaka i proces obróbki zimną plazmą spowodowały zwiększenie kwasowości soków w stosunku do próby kontrolnej po 24 h przechowywania. Najniższym pH charakteryzowały się próby z 3% udziałem przyprawy. Na wartość pH nie miało wpływu czy dodano go przed obróbką zimną plazmą czy po procesie. Najmniejsze obniżenie tego parametru w stosunku do próby kontrolnej zaobserwowano w soku plazmowanym bez dodatku sumaka (CAP) - wzrost o około 0,6 jednostek. Statystycznie istotne obniżenie pH podczas przechowywania soków zaobserwowano jedynie dla próby kontrolnej. Po 72 h wartość tego parametru obniżyła się o około 6%, co mogło być związane z rozwojem mikroflory i jej zakwaszającego wpływu.

Po 24 godzinach przechowywania zawartość ekstraktu wynosiła średnio 8,40 dla nieprzetworzonych soków marchwiowych, zaś dla wyrobów poddanych obróbce zimną plazmą (CAP) lub uzupełnionych proszkiem z sumaka (S05 i S3) zawierała się w przedziale 8,27 – 8,73°Brix, co oznaczało, że zastosowane zabiegi zachowały naturalny stan soków marchwiowych. Najwyższą wartość ekstraktu wykryto w próbce S3+CAP, która była o 25% wyższa w porównaniu z kontrolą. Czas przechowywania wyrobów (w większości przypadków) nie wpływał znacząco na ten parametr.

Ogólna zawartość polifenoli w próbie kontrolnej soku marchwiowego wahała się w granicach od 11,18 mg/100 ml do 13,46 mg/100 ml. Uzupełnienie soku proszkiem z sumaka wyraźnie podwyższyło zawartość tych bioaktywnych związków. W napoju poddanym działaniu zimnej plazmy (CAP) ogólna zawartość polifenoli była tylko nieznacznie niższa niż w próbie kontrolnej. Największą różnicę (2,24 mg/100 ml) odnotowano po 72 godzinach ale i ona nie była statystycznie istotna.

Wykonane analizy potwierdziły, że dodatek proszku z sumaka w ilości 3,0 g/100 ml skutkowało zwiększeniem się zawartości karotenoidów w soku o 15% w stosunku do próby kontrolnej. Natomiast poddanie soków marchwiowych działaniu CAP spowodowało niewielki (5% w próbie bez sumaka i 4% w soku z 3-gramowym udziałem przyprawy) spadek zawartości tych barwników w porównaniu z próbami bez obróbki. Podczas przechowywania soków marchwiowych największe straty w ogólnej zawartości karotenoidów stwierdzono dla próby kontrolnej. Po 72 godzinach ich ilość była niższa o około 30% w porównaniu z sokiem badanym po 24 godzinach.

Obecność naturalnych pigmentów i zachodzące reakcje chemiczne podczas przetwarzania należą do istotnych czynników wpływających na barwę wyrobów z owoców i warzyw. Najwyższe średnie wartości parametru L^* (po 24 h przechowywania) i tym samym najjaśniejszą barwę oznaczono w kontrolnym soku marchwiowym (39,91), a także uzupełnionym sumakiem w mniejszej lub większej ilości (odpowiednio 39,28 i 39,78) i traktowanym zimną plazmą (39,29). Natomiast najmniejsze wartości parametru, a tym samym najciemniejszą barwę zaobserwowano w wyrobach z proszkiem sumakowym dodanym w ilości 3,0 g/100 ml przed lub po procesie plazmowania (odpowiednio 36,28 i 37,85). Czas przechowywania powodował nieznaczne zmiany opisywanego parametru. Wartość parametru L^* dla soku kontrolnego po 72 h spadła do 38,48, czyli o 4% w porównaniu do wartości sprzed trzech dni. Różnica w wartościach L^* nastąpiła również w czasie przechowywania soku S3+CAP – spadek z 36,28 (po 24 h) do 34,33 (po 72 h). Pozostałe wyroby nie ulegały tak znaczącym zmianom jasności w czasie przechowywania.

Niskie wartości parametrów a^* oznaczone w soku uzupełnionym proszkiem z sumaka i plazmowanym (S3+CAP) świadczą odpowiednio o niższym udziale barwy czerwonej. W porównaniu z wyrobem kontrolnym (15,89) nastąpił spadek charakteryzowanego parametru do 12,35, i postępował w czasie ponieważ rozpatrywana wartość po 72 h przechowywania wynosiła 8,65.

Współczynnik b^* , również uległ zmianie po zastosowaniu obróbki zimną plazmą i uzupełnieniu soku marchwiowego proszkiem z sumaka. W pierwszym dniu badań (24 h) wykazano, że użycie dodatku i traktowanie CAP (S3+CAP) wpłynęło na obniżenie współczynnika charakteryzującego barwę żółtą o około 27% w stosunku do wyrobu kontrolnego. W 72 godzinie chłodniczego przechowywania parametr chromatyczności b^* dla tak obrabianego napoju osiągnął niższe wartości (10,13), w porównaniu do tych uzyskanych po 24 h (14,96).

Nie bez znaczenia było wykonanie badań mikrostruktury próbek, które pozwoliły zaobserwować widoczną agregację frakcji stałych w napoju. Struktura mikrocząstek sumaka rozproszonych w soku marchwiowym była rozróżniona. Zaobserwowano również, że obróbka zimną plazmą spowodowała homogenizację soku.

Wnioskując, obróbka plazmowa z użyciem reaktora ze ślizgającym się łukiem, jak i dodatek sumaka (*Rhus coriaria* L.) mają wysoki potencjał zapewnienia bezpieczeństwa mikrobiologicznego i pożądanymi właściwościami fizykochemicznymi soku z marchwi. Dlatego tego typu metoda kombinowana ma wysoki potencjał do praktycznego zastosowania w przemysłowej produkcji soków i innych napojów.

Na dzień dzisiejszy, nie znaleziono żadnych publikacji dotyczących zastosowania proszku z sumaka *Rhus coriaria* jako środka utrwalającego i wzbogacającego soki owocowo-warzywne czy smoothie's. Może to być spowodowane charakterystycznym, lekko cytrynowym, kwaśno-cierpkim smakiem tej przyprawy, który wynika z obecności w jej składzie kwasów organicznych, takich jak kwas jabłkowy, cytrynowy, fumarowy, winowy i askorbinowy [Fereidoonfar i in., 1997; Abu-Reidah i in., 2014]. Wang i in. [2023] dodali natomiast ekstrakty z sumaka *Rhus typhina* do sera Cheddar, który charakteryzował się niższymi wartościami pH w porównaniu do produktów kontrolnych.

Napoje ujęte w programie badawczym wzbogacone proszkiem z owoców sumaka posiadały wyższą zawartość karotenoidów. Jak wskazali Hosseini i in. [2020], β -karoten jest dominującym pigmentem oleju ekstrahowanego z owoców sumaka (*Rhus coriaria* L.), stąd jego obecność w przyprawie dodawanej do soków i smoothie prawdopodobnie zwiększyła ilość tych barwników. Inni autorzy, którzy do świeżo przygotowanego soku marchwiowego włączyli różne ilości kwasu cytrynowego, uzyskując pH 6, 5, 4 i 3 donieśli, że takie warunki zwiększają ogólną zawartość karotenoidów odpowiednio o 18%, 22%, 27% i 22% [Bell i in., 2016]. Wobec czego, nieznaczne zakwaszenie badanych wyrobów poprzez dodatek sumaka mogło spowodować wzrost ilości analizowanych związków.

Sumak jest bogatym źródłem polifenoli (kwasu galusowego, garbników ulegających hydrolizie, antocyjanów, flawonów) [Tohma i in., 2019; Batiha i in., 2022] i może być wykorzystany jako nowatorski składnik w celu wzbogacenia żywności o te związki. Wang i Zhu [2018] wodne ekstrakty proszku z owoców sumaka zastosowali w recepturze chleba pszennego. Dowiedli, że ekstrakt (w zależności od stężenia) nie tylko opóźnił rozwój pleśni oraz czerstwienie pieczywa, ale co bardzo ważne zwiększył całkowitą zawartość polifenoli i antocyjanów. Dziki i in. [2021] zastępując mąkę pszenną, tak zwaną mąką

sumakową nie tylko ograniczyli zawartość soli, ale również wzbogacili pieczywo w związki polifenolowe. Ogólna zawartość tych substancji wzrastała wraz ze wzrostem ilości zastosowanego dodatku, co z kolei skutkowało wzrostem zdolności antyoksydacyjnych.

Właściwości przeciwdrobnoustrojowe sumaka wykazane dla soku marchwiowego, pomidorowego i smoothie marchwiowo-bananowego, potwierdzają badania Gulmez i in. [2006], którzy ocenili wpływ traktowania powierzchni mięsa brojlerów ekstraktem z tej przyprawy. Badacze stwierdzili, że skuteczność ekstraktu sumaka była porównywalna z kwasem mlekowym i wyższa niż wody destylowanej, co czyniło go dobrą alternatywą dla syntetycznych środków utrwalających. Warto wspomnieć, że skrzydełka drobiowe potraktowane ekstraktem z sumaka charakteryzowały się pożądaną barwą w ocenie sensorycznej, w przeciwieństwie zarówno do skrzydełek potraktowanych wodą destylowaną, jak i kwasem mlekowym, które przybrały nieprzyjemny wygląd ogólny. Mahlooji i in. [2020] przeprowadzili badania mikrobiologiczne obejmujące oznaczenie całkowitej liczby *Pseudomonas*, *Escherichia coli*, pleśni i drożdży w mielonej wołowinie przechowywanej chłodniczo przez sześć dni. Wyniki testów przeciwdrobnoustrojowych wykazały, że dodatek ekstraktu z sumaka do próbek mięsa mielonego istotnie zapobiegł rozwojowi wszystkich drobnoustrojów. Celem pracy Fadiloglu i Çoban [2019] było zbadanie wpływu glazurowania ekstraktem z sumaka (*Rhus coriaria*, L.) na jakość filetów z pstrąga tęczowego podczas przechowywania w stanie zamrożonym. Produkty glazurowano ekstraktami otrzymanymi z przyprawy w stężeniu 5% i 10% i przechowywano w temperaturze -18°C przez 6 miesięcy. Wyniki wykazały, że glazurowanie za pomocą sumaka zapobiegało utlenianiu lipidów w porównaniu z zabiegami bez glazurowania i glazurowanymi wodą. Ekstrakt z sumaka oprócz tego, że zmniejszał powstawanie wolnych kwasów tłuszczowych podczas 6 miesięcy przechowywania, ograniczył również rozwój ogólnej liczby drobnoustrojów tlenowych mezofilnych.

Wśród ocenianych parametrów jakości soków, kwasowość odgrywała kluczową rolę, ponieważ wpływała na sposób utrwalania niezbędny do otrzymania bezpiecznych produktów. Traktowanie napojów zimną plazmą powodowało nieznaczne obniżenie pH w stosunku do prób kontrolnych. Zmiany te były porównywalne z obserwacjami innych autorów, których przedmiotem badań był sok z jabłek [Wang i in., 2020] i buraka [Dzimitrowicz i in., 2021]. Spowodowane to było prawdopodobnie powstawaniem podczas obróbki CAP niewielkiej ilości rodników o kwasotwórczych właściwościach.

Zaobserwowano, że zawartość karotenoidów po obróbce niskotemperaturową plazmą w większości testów eksperymentalnych wrosła, co było zgodne z wcześniej przeprowadzonymi badaniami soku z aceroli [Fernandes i in., 2019] i marchwi [Umair i in., 2019]. Podwyższenie zawartości tych bioaktywnych związków na skutek działania zimnej plazmy tłumaczy się efektem ich zwiększonej ekstrakcji z matrycy soku. Biodostępność niektórych związków w sokach poddanych obróbce zimną plazmą może ulec zwiększeniu w wyniku rozerwania komórek oraz dysocjacji agregatów i asocjatów substancji bioaktywnych ze ścianą komórkową [Pohl i in., 2022]. Z kolei obserwowane w niektórych przypadkach niewielkie zmniejszenie ilości związków karotenoidowych, naukowcy analizujący sok ze śliwca uzależnili od szybkości przepływu gazu plazmowego. Wyższa szybkość przepływu prowadziła do wzrostu reaktywnych związków wewnątrz komory plazmowej (więcej azotu dostępnego do jonizacji) powodującego degradację tych barwników [Paixão i in., 2019].

Wpływ zimnej plazmy na oznaczaną zawartość polifenoli również nie jest jednoznaczny. Generalnie zauważono, że liczba związków polifenolowych zmniejsza się po zastosowaniu zimnej plazmy w soku z pomidorów, jabłek czy białych winogron [Pankaj i in., 2017; Illera i in., 2019; Ali i in., 2021]. Dzieje się tak ponieważ, w wyniku wyładowania plazmowego generowane są energetyczne elektrony, które dysocjują cząsteczki tlenu. Po dysocjacji pojedyncze atomy tlenu łączą się z cząsteczkami tlenu, tworząc ozon, a spadek zawartości związków fenolowych następuje w wyniku wytwarzania ozonu i innych reaktywnych form w trakcie obróbki. Działanie ozonu na pierścienie aromatyczne polifenoli powoduje powstawanie związków alifatycznych, skutkując ich pękaniem, a następnie degradacją [Sruthi i in., 2022]. Jednak odpowiednio dobrane parametry procesu plazmowego (czas ekspozycji, intensywność mocy i natężenie przepływu) połączonego z użyciem przypraw o dużym potencjale antyoksydacyjnym mogą pozytywnie wpływać na zawartość tych bioaktywnych składników w produktach z owoców czy warzyw. Na skutek działania naładowanych cząstek i promieniowania UV następuje większe pęknięcie tkanek surowca, rozpad i rozerwanie błon komórkowych co ułatwia ekstrakcję związków fenolowych [Pohl i in., 2022].

Kwas askorbinowy nie uległ znaczącej destrukcji w wyniku działania zimnej plazmy na sok pomidorowy, chociaż w pierwszym dniu przechowywania zawartość witaminy C była statystycznie istotnie niższa w sokach traktowanych zimną plazmą niż w próbie kontrolnej. Różnice te były jednak niewielkie (do 2%). Wang i in. [2012] badając fizykochemiczne właściwości owoców i warzyw poddanych obróbce zimną plazmą,

również stwierdzili tylko niewielką redukcję zawartości witaminy C (mniej niż 4%). Straty te, cytowani autorzy tłumaczyli utleniającym wpływem zimnej plazmy oraz możliwością degradacji witaminy C poprzez promieniowanie UV wytwarzane przez plazmę. Hou i in. [2019] ocenili wpływ zimnej plazmy na jakość soku z borówki. Stosowali różne czasy obróbki (od 3 do 6 minut) i sugerują, że w celu ochrony witaminy C, wskazane jest stosowanie krótszych czasów ekspozycji na działanie zimnej plazmy.

Niektórzy autorzy w wyniku działania zimnej plazmy odnotowali nawet wzrost zawartości witaminy C w owocach i sokach owocowych [de Castro i in., 2020; Leite i in., 2021]. Utlenioną formą kwasu askorbinowego jest kwas dehydroaskorbinowy. Dehydroaskorbinian jest regenerowany przez enzym reduktazę dehydroaskorbinianową, tworząc kwas askorbinowy. Zimna plazma indukuje uwodornienie cząsteczek, może chemicznie przekształcić dehydroaskorbinian w kwas askorbinowy, odwracając mechanizm rozpadu i zwiększając zawartość witaminy C [Leite i in., 2021].

Technologia zimnej plazmy stosowana szczególnie do inaktywacji mikroorganizmów jest uważana za bezpieczną dla środowiska, nie zawiera dużej ilości związków toksycznych, a jej proces jest powtarzalny [Feroz i in., 2019; Mir i in., 2020]. Inaktywacja bakterii za pomocą plazmy nietermicznej jest jednak procesem złożonym, a mechanizm jej działania wciąż nie jest do końca poznany [Lu i in., 2014]. Przypuszcza się że CAP może rozrywać ważne wiązania w strukturze ściany komórkowej (peptydoglikanu) u bakterii Gram-dodatnich i prowadzić do peroksydacji lipidów błonowych u bakterii Gram-ujemnych [Ucar i in. 2021]. To przerwanie zewnętrznej powłoki komórki doprowadza zwykle do wycieku składników komórkowych, w tym potasu, kwasu nukleinowego i białek. Po uszkodzeniu ściany komórkowej reaktywne cząsteczki mogą przedostać się do wnętrza przewodów komórkowych i dalej niszczyć DNA oraz białka wewnątrzkomórkowe za pomocą form utleniających lub nitrozujących [Mai-Prohnow i in., 2014]. Podobne wyniki badań nad zdolnością zimnej plazmy do inaktywacji szkodliwych mikroorganizmów w napojach opisano w publikacjach [Starek i in., 2019; Mao i in., 2021; Waghmare, 2021].

Stosowane są również metody poprawy jakości soków podczas przechowywania, w których wykorzystuje się nie jeden czynnik utrwalający: zakwaszanie i sonikację; pulsacyjne pole elektryczne wraz z sonikacją; sonikację połączoną z obróbką zimną plazmą wysokonapięciową, a także pulsacyjne pole elektryczne w skojarzeniu z temperaturą i naturalnymi konserwantami [Jabbar i in., 2014; Aadil i in., 2015; Umair i in., 2019; Li i in., 2021].

Co bardzo ważne, połączenie działania plazmy z suplementacją świeżo tłoczonego soku z marchwi proszkiem z sumaka przeanalizowano po raz pierwszy, otrzymując wysokiej jakości wyroby zdatne do spożycia nawet po 72 godzinach chłodniczego przechowywania.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań dowodzą, że produkty uzupełnione sproszkowanym owocem sumaka charakteryzują się przede wszystkim większą ilością substancji biologicznie czynnych.

Obróbka zimną plazmą atmosferyczną (CAP) jest nowatorską technologią przetwarzania nietermicznego, która może z kolei zapewnić bezpieczeństwo mikrobiologiczne napojom z owoców i warzyw.

Często nowo wprowadzane sposoby przetwarzania mają ograniczenia ze względu na wysoki koszt sprzętu, mogą wpływać na jakość produktu, nie nadają się do każdego rodzaju żywności lub są niewystarczające dla maksymalnej ochrony produktu spożywczego przez zepsuciem. Natomiast właściwie zaprojektowane geometrie reaktorów plazmowych oraz odpowiednio dobrane parametry obróbki surowców płynnych i półpłynnych, mogą przynieść korzyści w postaci krótkiego czasu działania, nietermicznych, opłacalnych operacji, zmniejszonego wykorzystania wody i możliwości zwiększenia skali procesów. W rezultacie tego typu ekologiczna technologia CAP może przyczynić się do zapewnienia zrównoważonych procesów produkcyjnych.

Zabiegi polegające na uzupełnieniu wyrobów sumakiem połączone z obróbką zimną plazmą są w perspektywie w stanie przynieść wiele korzyści, między innymi powstrzymać psucie się tego typu żywności i jej marnotrawienie, zapewnić oszczędności ekonomiczne, przyczynić się do poprawy jakości oferowanych na lokalnym rynku napojów oraz zwiększyć udział innowacyjnych produktów polskiej gospodarki w segmencie rynków międzynarodowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Uzupełnienie świeżo przygotowanych napojów (soku marchwiowego, pomidorowego oraz smoothie marchwiowo-bananowego) sumakiem skutkowało zależnym od dawki (0,5 – 3,0 g/100 ml) spadkiem średnich wartości kwasowości czynnej (pH).
2. Dodatek sproszkowanego owocu *Rhus coriaria* L. wykazał wysoką skuteczność w inaktywacji ogólnej liczby drobnoustrojów tlenowych oraz drożdży i pleśni zanieczyszczających napoje na bazie owoców i warzyw, a jego działanie hamujące wzrastało wraz ze wzrostem stężenia. Największą redukcję mikroorganizmów stwierdzono w próbkach po 72 godzinach chłodniczego przechowywania.

3. Ujęte w programie badawczym napoje z dodatkiem przyprawy sumak charakteryzowały się wyższą zawartością substancji biologicznie czynnych (karotenoidów, polifenoli) w stosunku do wyrobów bez jego udziału.
4. Wartość współczynnika ΔE wskazuje, że dodatek sumaka spowodował widoczną zmianę barwy produktu.
5. Badania wykazały, że odpowiednio dobrane parametry procesu działania zimnej plazmy generowanej w reaktorze ze ślizgającym się łukiem Glide-arc z gazem procesowym powietrzem, wpływają na poprawę jakości mikrobiologicznej soku pomidorowego i marchwiowego, a tym samym przedłużenie ich przydatności do spożycia (biorąc pod uwagę całkowitą liczbę drobnoustrojów tlenowych oraz liczbę drożdży dopuszczalną dla soków pasteryzowanych wg Rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 13 stycznia 2003 r.).
6. W wyniku traktowania soków zimną plazmą uzyskano produkty charakteryzujące się wartością odżywczą, przewyższającą w niektórych przypadkach sok niepoddany obróbce pod względem zawartości ekstraktu, karotenoidów czy witaminy C.
7. Wartość współczynnika ΔE dla soków poddanych działaniu zimnej plazmy świadczyła o średnim odchyleniu barwy w stosunku do próby kontrolnej.
8. Połączenie obróbki plazmą generowaną w urządzeniu Glide-arc z gazem procesowym powietrzem z uzupełnieniem świeżo tłoczonego soku marchwiowego sproszkowanym owocem sumaka (*Rhus coriaria* L.) o maksymalnej ziarnistości 0,5 mm w ilości 3,0 g/100 ml umożliwiło skuteczną redukcję drobnoustrojów (do niewykrywalnego poziomu) i wydłużony okres trwałości produktu do 72 h.
9. Działanie zimnej plazmy na sok marchwiowy z dodatkiem sumaka powodowało wzrost ogólnej zawartości polifenoli i karotenoidów, w stosunku do próbki kontrolnej. Czas przechowywania niekorzystnie wpływał na ilość tych związków w soku kontrolnym, czego nie zaobserwowano dla pozostałych próbek ujętych w programie badawczym.
10. Badanie mikrostruktury próbek soku ujawniło, że na skutek działania naładowanych cząstek i promieniowania UV powstających podczas generowania plazmy może następować pękanie tkanek surowca, rozpad i rozerwanie błon komórkowych, co ułatwia ekstrakcję związków bioaktywnych zawartych w sumaku.

BIBLIOGRAFIA POMOCNICZA

1. Aadil, R. M., Madni, G. M., Roobab, U., ur Rahman, U., & Zeng, X. A. (2019). Quality control in beverage production: An overview. *Quality control in the beverage industry*, 1-38.
2. Aadil, R. M., Zeng, X. A., Han, Z., Sahar, A., Khalil, A. A., Rahman, U. U., ... & Mehmood, T. (2018). Combined effects of pulsed electric field and ultrasound on bioactive compounds and microbial quality of grapefruit juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(2), e13507.
3. Abdul-Jalil, T. Z. (2020). *Rhus coriaria* (Sumac): a magical spice. *Herbs and Spices*, 39.
4. Abu-Reidah, I. M., Ali-Shtayeh, M. S., Jamous, R. M., Arráez-Román, D., & Segura-Carretero, A. (2015). HPLC–DAD–ESI-MS/MS screening of bioactive components from *Rhus coriaria* L.(Sumac) fruits. *Food chemistry*, 166, 179-191.
5. Adamczyk, S. (2019). Jakość a bezpieczeństwo żywności. *Nauki Ekonomiczne*. 29/2019, 37–54.
6. Ahmed, J., & Ramaswamy, H. S. (2020). Microwave pasteurization and sterilization of foods. In Handbook of food preservation. *CRC Press*, 713-732.
7. Ali, M., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2021). Effects of dielectric barrier discharge cold plasma treatments on degradation of anilazine fungicide and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) juice. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(1), 69-75.
8. Alsamri, H., Athamneh, K., Pintus, G., Eid, A. H., & Iratni, R. (2021). Pharmacological and antioxidant activities of *Rhus coriaria* L. (Sumac). *Antioxidants*, 10(1), 73.
9. Aouadi, B., Zaukuu, J. L. Z., Vitális, F., Bodor, Z., Fehér, O., Gillay, Z., ... & Kovacs, Z. (2020). Historical evolution and food control achievements of near infrared spectroscopy, electronic nose, and electronic tongue—Critical overview. *Sensors*, 20(19), 5479.
10. Batiha, G. E. S., Ogunyemi, O. M., Shaheen, H. M., Kutu, F. R., Olaiya, C. O., Sabatier, J. M., & De Waard, M. (2022). *Rhus coriaria* L.(Sumac), a versatile and resourceful food spice with cornucopia of polyphenols. *Molecules*, 27(16), 5179.
11. Bell, T., Alamzad, R., & Graf, B. A. (2016). Effect of pH on the chemical stability of carotenoids in juice. *Proceedings of the Nutrition Society*, 75(OCE3), E94.

12. Bhattacharjee, C., Saxena, V. K., & Dutta, S. (2019). Novel thermal and non-thermal processing of watermelon juice. *Trends in Food Science & Technology*, 93, 234-243.
13. Bolarinwa, I. F., Aruna, T. E., & Raji, A. O. (2019). Nutritive value and acceptability of bread fortified with moringa seed powder. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(2), 195-200.
14. Brisset, J. L., & Pawlat, J. (2016). Chemical effects of air plasma species on aqueous solutes in direct and delayed exposure modes: discharge, post-discharge and plasma activated water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 36(2), 355-381.
15. Brown, L. R. (2009). Could food shortages bring down civilization?. *Scientific American*, 300(5), 50-57.
16. Bruggeman, P. J., Kushner, M. J., Locke, B. R., Gardeniers, J. G., Graham, W. G., Graves, D. B., ... & Zvereva, G. (2016). Plasma–liquid interactions: a review and roadmap. *Plasma sources science and technology*, 25(5), 053002.
17. Bryła, P. (2016). Organic food consumption in Poland: Motives and barriers. *Appetite*, 105, 737-746.
18. Bushdid, C., Magnasco, M. O., Vosshall, L. B., & Keller, A. (2014). Humans can discriminate more than 1 trillion olfactory stimuli. *Science*, 343(6177), 1370-1372.
19. Chadare, F. J., Idohou, R., Nago, E., Affonfere, M., Agossadou, J., Fassinou, T. K., ... & Hounhouigan, D. J. (2019). Conventional and food-to-food fortification: An appraisal of past practices and lessons learned. *Food science & nutrition*, 7(9), 2781-2795.
20. Cieśla, M., & Wójcik, E. (2018). Podróbka czy oryginał-nos elektroniczny jako narzędzie określania oryginalności perfum znanych marek. *Analit*, 5(34).
21. Craven, M. A., Gardner, J. W., & Bartlett, P. N. (1996). Electronic noses – Development and future prospects. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 15(9), 486-493.
22. de Castro, D. R. G., Mar, J. M., da Silva, L. S., da Silva, K. A., Sanches, E. A., de Araújo Bezerra, J., ... & Campelo, P. H. (2020). Dielectric barrier atmospheric cold plasma applied on camu-camu juice processing: Effect of the excitation frequency. *Food Research International*, 131, 109044.
23. Donalisio, M., Rittà, M., Francese, R., Civra, A., Tonetto, P., Coscia, A., ... & Lembo, D. (2018). High temperature—short time pasteurization has a lower impact on the antiviral properties of human milk than holder pasteurization. *Frontiers in pediatrics*, 6, 304.

24. Dziki, D., Cacak-Pietrzak, G., Hassoon, W. H., Gawlik-Dziki, U., Sulek, A., Różyło, R., & Sugier, D. (2021). The fruits of sumac (*Rhus coriaria* L.) as a functional additive and salt replacement to wheat bread. *LWT*, 136, 110346.
25. Dzimitrowicz, A., Jamroz, P., Cyganowski, P., Bielawska-Pohl, A., Klimczak, A., & Pohl, P. (2021). Application of cold atmospheric pressure plasmas for high-throughput production of safe-to-consume beetroot juice with improved nutritional quality. *Food Chemistry*, 336, 127635.
26. El Ghizzawi, F., Khaled, S., El Khatib, S., & Krayem, M. (2023). A focused insight into sumac: biological, chemical, health benefits and its applications in food industry. *Food Science and Engineering*, 191-203.
27. Fadıloğlu, E. E., & Emir Çoban, Ö. (2018). Effects of chitosan edible coatings enriched with sumac on the quality and the shelf life of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum, 1792) fillets. *Journal of Food Safety*, 38(6), e12545.
28. Fereidoonfar, H., Salehi-Arjmand, H., Khadivi, A., Akramian, M., & Safdari, L. (2019). Chemical variation and antioxidant capacity of sumac (*Rhus coriaria* L.). *Industrial Crops and Products*, 139, 111518.
29. Fernandes, F. A., Santos, V. O., & Rodrigues, S. (2019). Effects of glow plasma technology on some bioactive compounds of acerola juice. *Food Research International*, 115, 16-22.
30. Feroz, F., Nafisa, S., & Noor, R. (2019). Emerging technologies for food safety: high pressure processing (HPP) and cold plasma technology (CPT) for decontamination of foods. *Bangladesh Journal of Microbiology*, 36(1), 35-43.
31. Freund, M. S., & Lewis, N. S. (1995). A chemically diverse conducting polymer-based "electronic nose". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 92(7), 2652-2656.
32. García, M., Alexandre, M., Gutiérrez, J., & Horrillo, M. C. (2006). Electronic nose for ham discrimination. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 114(1), 418-422.
33. Gulmez, M., Oral, N., & Vatansever, L. (2006). The effect of water extract of sumac (*Rhus coriaria* L.) and lactic acid on decontamination and shelf life of raw broiler wings. *Poultry science*, 85(8), 1466-1471.
34. Gwóźdź, E., & Gębczyński, P. (2015). Health promoting properties of fruits, vegetables and their products. *Postępy Fitoterapii*, 4/2015, 268-271.

35. Hegazi, N. M., El-Shamy, S., Fahmy, H., & Farag, M. A. (2021). Pomegranate juice as a super-food: A comprehensive review of its extraction, analysis, and quality assessment approaches. *Journal of Food Composition and Analysis*, 97, 103773.
36. Hosseini, S., Ramezan, Y., & Arab, S. (2020). A comparative study on physicochemical characteristics and antioxidant activity of sumac (*Rhus coriaria* L.), cumin (*Cuminum cyminum*), and caraway (*Carum carvil*) oils. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14, 3175-3183.
37. Hou, Y., Wang, R., Gan, Z., Shao, T., Zhang, X., He, M., & Sun, A. (2019). Effect of cold plasma on blueberry juice quality. *Food chemistry*, 290, 79-86.
38. Illera, A. E., Chaple, S., Sanz, M. T., Ng, S., Lu, P., Jones, J., ... & Bourke, P. (2019). Effect of cold plasma on polyphenol oxidase inactivation in cloudy apple juice and on the quality parameters of the juice during storage. *Food chemistry*, 3, 100049.
39. Jabbar, S., Abid, M., Wu, T., Muhammad Hashim, M., Hu, B., Lei, S., ... & Zeng, X. (2014). Study on combined effects of blanching and sonication on different quality parameters of carrot juice. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 65(1), 28-33.
40. Jiang, H., Zhang, M., Bhandari, B., & Adhikari, B. (2018). Application of electronic tongue for fresh foods quality evaluation: A review. *Food Reviews International*, 34(8), 746-769.
41. Khoshkharam, M., Shahrajabian, M. H., Singh, R. B., Sun, W., Magadlela, A., Khatibi, M., & Cheng, Q. (2022). Sumac: a functional food and herbal remedy in traditional herbal medicine in the Asia. In *Functional foods and nutraceuticals in metabolic and non-communicable diseases*. Academic Press, 261-266.
42. Khoshkharam, M., Shahrajabian, M. H., Sun, W. L., & Cheng, Q. (2020). Sumac (*Rhus coriaria* L.) a spice and medicinal plant-a mini review. *Amazonian Journal of Plant Research*, 4(2):517-523.
43. Konduracka, E. (2019). A link between environmental pollution and civilization disorders: a mini review. *Reviews on environmental health*, 34(3), 227-233.
44. Kopp, W. (2019). How western diet and lifestyle drive the pandemic of obesity and civilization diseases. *Diabetes, metabolic syndrome and obesity: targets and therapy*, 2221-2236.
45. Korkmaz, H. (2021). Could sumac be effective on COVID-19 treatment? *Journal of medicinal food*, 24(6), 563-568.

46. Kowalska, M., Gajewnik, B., Suminska, T., & Baryga, A. (2016). Parametry mikrobiologiczne i fizykochemiczne soku surowego z buraków cukrowych przed i po ozonowaniu. *Żywność Nauka Technologia Jakość*, 23(3).
47. Kułyk, P., & Dubicki, P. (2019). Uwarunkowania zachowań konsumentów na rynku żywności ekologicznej. *Problems of World Agriculture/Problemy Rolnictwa Światowego*, 19(1), 79-87.
48. Laroque, D. A., Seó, S. T., Valencia, G. A., Laurindo, J. B., & Carciofi, B. A. M. (2022). Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application. *Journal of Food Engineering*, 312, 110748.
49. Leite, A. K., Fonteles, T. V., Miguel, T. B., da Silva, G. S., de Brito, E. S., Alves Filho, E. G., ... & Rodrigues, S. (2021). Atmospheric cold plasma frequency imparts changes on cashew apple juice composition and improves vitamin C bioaccessibility. *Food Research International*, 147, 110479.
50. Leszczyński, P. (2023). Ekstrakty roślinne: dodatek wspierający zdrowie oraz bezpieczeństwo żywności. *Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny. Fermentation, Fruits and Vegetable Industry*, (6) 12-15.
51. Li, L., Yang, R., & Zhao, W. (2021). The effect of pulsed electric fields (PEF) combined with temperature and natural preservatives on the quality and microbiological shelf-life of cantaloupe juice. *Foods*, 10(11), 2606.
52. Li, Z., Wang, N., & Vigneault, C. (2006). Electronic nose and electronic tongue in food production and processing. *Stewart Postharvest Review*, 4(7), 1-6.
53. Li, Z., Wang, N., & Vigneault, C. (2006). Electronic nose and electronic tongue in food production and processing. *Stewart Postharvest Review*, 4(7), 1-6.
54. Loutfi, A., Coradeschi, S., Mani, G. K., Shankar, P., & Rayappan, J. B. B. (2015). Electronic noses for food quality: A review. *Journal of Food Engineering*, 144, 103- 111.
55. Lu, H., Patil, S., Keener, K. M., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2014). Bacterial inactivation by high-voltage atmospheric cold plasma: influence of process parameters and effects on cell leakage and DNA. *Journal of applied microbiology*, 116(4), 784-794.
56. Lvova, L. (2016). Electronic tongue principles and applications in the food industry. In *Electronic noses and tongues in food science. Academic Press*, 151-160.

57. Lyng, J. G., Clemente, I., & McKenna, B. M. (2019). Ohmic pasteurization of meat and meat products. In Handbook of farm, dairy and food machinery engineering. *Academic Press*, 593-622.
58. Mahlooji, M., Ahmadi-Dastgerdi, A., & Sharafati-Chaloshtori, R. (2020). An Investigation of the Antibacterial Effect of Sumac Extract in Minced Beef Contaminated with Multidrug Resistance *E. coli*. *Yafteh*, 22(1), 69-83.
59. Mai-Prochnow, A., Clauson, M., Hong, J., & Murphy, A. B. (2016). Gram positive and Gram negative bacteria differ in their sensitivity to cold plasma. *Scientific reports*, 6(1), 38610.
60. Mao, L., Mhaske, P., Zing, X., Kasapis, S., Majzoobi, M., & Farahnaky, A. (2021). Cold plasma: Microbial inactivation and effects on quality attributes of fresh and minimally processed fruits and Ready-To-Eat vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 146-175.
61. Marciniewicz, M., Starek, A., & Sagan, A. (2020). Wpływ parametrów pasteryzacji na właściwości chemiczne i mikrostrukturę soku pomidorowego. Wybrane zagadnienia z zakresu przemysłu spożywczego oraz zarządzania i inżynierii produkcji, 41-47.
62. Margean, A., Lupu, M. I., Alexa, E., Padureanu, V., Canja, C. M., Cocan, I., ... & Poiana, M. A. (2020). An overview of effects induced by pasteurization and high-power ultrasound treatment on the quality of red grape juice. *Molecules*, 25(7), 1669.
63. Mir, S. A., Siddiqui, M. W., Dar, B. N., Shah, M. A., Wani, M. H., Roohinejad, S., ... & Ali, A. (2020). Promising applications of cold plasma for microbial safety, chemical decontamination and quality enhancement in fruits. *Journal of applied microbiology*, 129(3), 474-485.
64. Nabrdalik, M., & Świsłowski, P. (2017). Ocena mikrobiologiczna niepasteryzowanych soków owocowych i warzywnych. *Proceedings of ECOpole*, 11(2), 541-551.
65. Nagyová, E., Andocsová, A., Géci, A., Zajác, P., Palkovič, J., Košičiarová, I., & Golian, J. (2019). Consumers' Awareness of Food Safety. *Slovak Journal of Food Sciences/Potravinarstvo*, 13(1).
66. Omieciuch, J. (2016). Jakość i bezpieczeństwo żywności w Polsce. *Społeczeństwo i ekonomia*, (06), 123-136.
67. Ordukaya, E., & Karlik, B. (2017). Quality control of olive oils using machine learning and electronic nose. *Journal of Food Quality*, 2017(1), 9272404.

68. Osendarp, S. J., Martinez, H., Garrett, G. S., Neufeld, L. M., De-Regil, L. M., Vossenaar, M., & Darnton-Hill, I. (2018). Large-scale food fortification and biofortification in low-and middle-income countries: a review of programs, trends, challenges, and evidence gaps. *Food and nutrition bulletin*, 39(2), 315-331.
69. Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Pawłat, J. (2024). Niekonwencjonalne metody utrwalania produktów rolno-spożywczych. *Wydawnictwo Inżynieria Rolnicza*, Kraków, 105 s, 978-83-64377-58-7.
70. Ozcan, A., Susluoglu, Z., Nogay, G., Ergun, M., & Sutyemez, M. (2021). Phytochemical characterization of some sumac (*Rhus coriaria* L.) genotypes from southern part of turkey. *Food Chemistry*, 358, 129779.
71. Paixão, L. M., Fonteles, T. V., Oliveira, V. S., Fernandes, F. A., & Rodrigues, S. (2019). Cold plasma effects on functional compounds of siriguela juice. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 110-121.
72. Pankaj, S. K., Wan, Z., & Keener, K. M. (2018). Effects of cold plasma on food quality: A review. *Foods*, 7(1), 4.
73. Pankaj, S. K., Wan, Z., Colonna, W., & Keener, K. M. (2017). Effect of high voltage atmospheric cold plasma on white grape juice quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(12), 4016-4021.
74. Persaud, K. C., Bartlett, J., & Pelosi, P. (1993). Design strategies for gas and odour sensors which mimic the olfactory system. *In Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics? Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg*, 579-602
75. Pohl, P., Dzimitrowicz, A., Cyganowski, P., & Jamroz, P. (2022). Do we need cold plasma treated fruit and vegetable juices? A case study of positive and negative changes occurred in these daily beverages. *Food Chemistry*, 375, 131831.
76. Rayne, S., & Mazza, G. (2007). Biological activities of extracts from sumac (*Rhus spp.*): a review. *Nature precedings*, 1-1.
77. Riul Jr, A., Dantas, C. A., Miyazaki, C. M., & Oliveira Jr, O. N. (2010). Recent advances in electronic tongues. *Analyst*, 135(10), 2481-2495.
78. Röck, F., Barsan, N., & Weimar, U. (2008). Electronic nose: current status and future trends. *Chemical reviews*, 108(2), 705-725.
79. Rozporządzenie, M. Z. (2003). Z dnia 13 stycznia w sprawie maksymalnych poziomów zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych, które mogą znajdować się w żywności, składnikach żywności, dozwolonych substancjach dodatkowych, substancjach pomagających w przetwarzaniu albo na powierzchni żywności. Dz. U,

- (37). Dostępne online: <https://www.prawo.pl/akty/dz-u-2005-2-9,17148879.html> (dostęp 28 grudnia 2023 r.).
80. Shurmer, H. V. (1990). An electronic nose: a sensitive and discriminating substitute for a mammalian olfactory system. *IEE Proceedings G (Circuits, Devices and Systems)*, 137(3), 197-204.
81. Shurmer, H. V., & Gardner, J. W. (1992). Odour discrimination with an electronic nose. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 8(1), 1-11.
82. Silva, M. M., & Lidon, F. C. (2016). Food preservatives-An overview on applications and side effects. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 28(6), 366.
83. Skryplonek, K. (2016). Zimna plazma jako niekonwencjonalna metoda utrwalania żywności. *Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego*, 4(4), 20.
84. Śmigielska, N., Szosland-Fałtyn, A., & Bartodziejska, B. (2022). Przeżywalność bakterii probiotycznych w innowacyjnym napoju na bazie octu owocowego i serwatki. *Żywność Nauka Technologia Jakość*, 2, 57-69.
85. Snyder, A. B., & Worobo, R. W. (2018). The incidence and impact of microbial spoilage in the production of fruit and vegetable juices as reported by juice manufacturers. *Food Control*, 85, 144-150.
86. Sruthi, N. U., Josna, K., Pandiselvam, R., Kothakota, A., Gavahian, M., & Khaneghah, A. M. (2022). Impacts of cold plasma treatment on physicochemical, functional, bioactive, textural, and sensory attributes of food: A comprehensive review. *Food Chemistry*, 368, 130809.
87. Starek, A., Pawłat, J., Chudzik, B., Kwiatkowski, M., Terebun, P., Sagan, A., & Andrejko, D. (2019). Evaluation of selected microbial and physicochemical parameters of fresh tomato juice after cold atmospheric pressure plasma treatment during refrigerated storage. *Scientific Reports*, 9(1), 1-11.
88. Szymańska, I., & Ścibisz, I. (2021). Kształtowanie jakości i bezpieczeństwa żywności minimalnie przetworzonej. *Przemysł Spożywczy*, 75.
89. Tohma, H., Altay, A., Köksal, E., Gören, A. C., & Gülçin, İ. (2019). Measurement of anticancer, antidiabetic and anticholinergic properties of sumac (*Rhus coriaria*): analysis of its phenolic compounds by LC-MS/MS. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 1607-1619.
90. Ucar, Y., Ceylan, Z., Durmus, M., Tomar, O., & Cetinkaya, T. (2021). Application of cold plasma technology in the food industry and its combination with other emerging technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 355-371.

91. Umair, M., Jabbar, S., Senan, A. M., Sultana, T., Nasiru, M. M., Shah, A. A., ... & Jianhao, Z. (2019). Influence of combined effect of ultra-sonication and high-voltage cold plasma treatment on quality parameters of carrot juice. *Foods*, 8(11), 593.
92. Wadehra, A., & Patil, P. S. (2016). Application of electronic tongues in food processing. *Analytical Methods*, 8(3), 474-480.
93. Waghmare, R. (2021). Cold plasma technology for fruit based beverages: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 60-69.
94. Wang, R. X., Nian, W. F., Wu, H. Y., Feng, H. Q., Zhang, K., Zhang, J., ... & Fang, J. (2012). Atmospheric-pressure cold plasma treatment of contaminated fresh fruit and vegetable slices: Inactivation and physiochemical properties evaluation. *The European Physical Journal D*, 66, 1-7.
95. Wang, S., & Zhu, F. (2018). Quality attributes of bread fortified with staghorn sumac extract. *Journal of texture studies*, 49(1), 129-134.
96. Wang, S., Nie, S., Gan, R. Y., & Zhu, F. (2023). Properties of cheese and ground beef in the presence of staghorn sumac. *eFood*, 4(2), e74.
97. Wang, Y., Wang, Z., Zhu, X., Yuan, Y., Gao, Z., & Yue, T. (2020). Application of electrical discharge plasma on the inactivation of *Zygosaccharomyces rouxii* in apple juice. *LWT*, 121, 108974.
98. Wilson, A. D., & Baietto, M. (2009). Applications and advances in electronic-nose technologies. *Sensors*, 9(7), 5099-5148.
99. Yahia, E. M., Maldonado Celis, M. E., & Svendsen, M. (2017). The contribution of fruit and vegetable consumption to human health. *Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health*, 2nd Edition, 1-52.
100. Zannou, O., Oussou, K. F., Chabi, I. B., Alamou, F., Awad, N. M., Miassi, Y. E., ... & Ibrahim, S. A. (2025). Phytochemical and nutritional properties of sumac (*Rhus coriaria*): a potential ingredient for developing functional foods. *Journal of Future Foods*, 5(1), 21-35.
101. Zhang, H. Q., Barbosa-Cánovas, G. V., Balasubramaniam, V. B., Dunne, C. P., Farkas, D. F., & Yuan, J. T. (2011). *Nonthermal processing technologies for food*. IFT Press Wiley Blackwell.

SPIS RYSUNKÓW




Rys. 1. Surowce w postaci owoców i warzyw oraz wytworzone z nich napoje	7
Rys. 2. Sproszkowany owoc sumaka garbarskiego	8
Rys. 3. Wyładowanie plazmowe podczas obróbki soku marchwiowego	9
Rys. 4. Układ do obróbki za pomocą plazmy nierównowagowej:	9

**KOPIE OPUBLIKOWANYCH PRAC WCHODZĄCYCH W
SKŁAD CYKLU PUBLIKACJI**

P1. Osmólska, E., Stoma, M., & Starek-Wójcicka, A. (2023). Juice Quality Evaluation with Multisensor Systems - A Review. Sensors, 23(10), 4824. (IF=3,400, MNiSW=100).

Review

Juice Quality Evaluation with Multisensor Systems—A Review

Emilia Osmólska ¹, Monika Stoma ^{1,*} and Agnieszka Starek-Wójcicka ²

¹ Department of Power Engineering and Transportation, Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin, 20-612 Lublin, Poland; emilia.osmolska@up.lublin.pl

² Department of Biological Bases of Food and Feed Technologies, Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin, 20-612 Lublin, Poland; agnieszka.starek@up.lublin.pl

* Correspondence: monika.stoma@up.lublin.pl

Abstract: E-nose and e-tongue are advanced technologies that allow for the fast and precise analysis of smells and flavours using special sensors. Both technologies are widely used, especially in the food industry, where they are implemented, e.g., for identifying ingredients and product quality, detecting contamination, and assessing their stability and shelf life. Therefore, the aim of this article is to provide a comprehensive review of the application of e-nose and e-tongue in various industries, focusing in particular on the use of these technologies in the fruit and vegetable juice industry. For this purpose, an analysis of research carried out worldwide over the last five years, concerning the possibility of using the considered multisensory systems to test the quality and taste and aroma profiles of juices is included. In addition, the review contains a brief characterization of these innovative devices through information such as their origin, mode of operation, types, advantages and disadvantages, challenges and perspectives, as well as the possibility of their applications in other industries besides the juice industry.

Keywords: juice quality; food industry; sensors; multisensory systems; electronic nose; electronic tongue



Citation: Osmólska, E.; Stoma, M.; Starek-Wójcicka, A. Juice Quality Evaluation with Multisensor Systems—A Review. *Sensors* **2023**, *23*, 4824. <https://doi.org/10.3390/s23104824>

Academic Editor: Corrado Di Natale

Received: 27 April 2023

Revised: 10 May 2023

Accepted: 15 May 2023

Published: 17 May 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Nowadays, access to information is easy and unlimited due to technological development. At the same time, consumers are becoming increasingly aware of the quality of the products that are being offered. Enterprises, especially those operating in the food industry, are assessed not only in terms of economics but also in terms of quality.

The entire food production process, from identifying consumer needs to launching the finished product on the market, is complex and lengthy. A lot of research and analysis is required in order to understand the consumer expectations, production costs, composition, and benefits of a given product [1,2]. The biggest challenge is to ensure the appropriate quality and safety of the product, which is examined and analysed by scientists from various disciplines [3].

The parameters determining the quality of a food product include safety, nutritional value, composition (the quality of the ingredients used), and taste. Particularly noteworthy are the juices, which, if they are of high quality, should not contain preservatives, added sugar, or microorganisms that could harm the health of the purchaser. Another important parameter is the shelf life of the juice, which is inextricably linked to its packaging; it should be added that packaging primarily affects the sense of sight [4–6]. All these factors are interrelated and consequently affect the quality and safety of fruit and vegetable juices [7].

Juices are products made from ripe, fresh, frozen, or stored fruits and vegetables. They are obtained by pressing the juice from the pulp or by mechanically rubbing the raw materials. Depending on consumer preference, juices can be available in various forms, such as cold-pressed juices, pasteurized juices, NFC juices, etc. To extend shelf life, many juices are pasteurized in order to destroy the microorganisms and enzymes that could lead to spoilage [8].

Food products, including fruit and vegetable juices, provide many valuable nutrients that are necessary for the proper functioning of the body, such as vitamins, minerals, dietary fibre, flavonoid compounds, phytoestrogens, pectin, easily digestible sugars, and organic acids [9–11]. Therefore, juice producers want to avoid negative changes in taste, smell, and colour that may affect the quality and safety of food products. This problem especially applies to one-day-old juices and those that have been poorly stored. This is very important because microbiological contamination can occur already at the cultivation stage, which is when fruit and vegetables are exposed to contamination from soil, water, and air [12–15].

Despite the introduction of control measures to increase food safety, cases of food poisoning due to the consumption of juices that have been contaminated with microorganisms still occur worldwide [16–18]. Microorganisms capable of multiplying in juices, primarily yeasts and moulds, are the main causes of spoilage in unpasteurized and poorly stored juices, especially when the pH of the product is low. Although most of them are not harmful to humans, their presence in large quantities can lead to organoleptic changes and, in extreme cases, to complete spoilage of the product. Typical examples of undesirable flavours of substances that can appear in juices as a result of pathogenic microorganisms include odours caused by rancidity (fat oxidation), mustiness (mycotoxins), and faecal or earthy odours (geosmin and 2-methylisoborneol). In addition, typically metallic and astringent tastes may occur due to the presence of ferrous, copper, or zinc. Multisensory systems can independently detect such undesirable flavour substances in food and beverages [19–22]. According to the ECDC (European Centre for Disease Prevention and Control) and EFSA (European Food Safety Authority), juices are one of the most common sources of foodborne human illnesses [23–25]. Additionally, alcoholic beverages or junk food contribute to improper and unhealthy nutrition and to human illness.

To ensure the safety and the highest quality of food products, each stage of the production process is controlled, from obtaining raw materials, through processing, transport, trade, and to consumption [26]. The assessment of the quality of these products is based primarily on sensory analysis, chemical composition, physical properties, degree of microbiological and toxic contamination, as well as on the method of storage, packaging and labelling [27,28].

For many years, many different laboratory methods have been developed that allow for the qualitative and quantitative evaluation of food products. In laboratories, traditional analytical methods such as titration and weighing are used, as well as more advanced instrumental methods. Many laboratories also use modern analytical equipment. Separation techniques such as thin layer chromatography (TLC), gas chromatography (GC), and high performance liquid chromatography (HPLC) are the most commonly used methods. Depending on the purpose of the analysis and the type of sample, the chromatographs are combined with appropriate detectors, such as a mass spectrometer (MS) or a UV-Vis Spectrum [29]. Unfortunately, such devices are often very expensive. Furthermore, they require specialized staff, and the analysis can be complicated and time-consuming. For this reason, alternative methods that could allow for a quick and inexpensive analysis of samples are currently being explored.

As already mentioned, contemporary consumers are particularly interested in the quality of products through their appearance, smell, and taste, which are difficult to assess by standard laboratory methods. To overcome this problem, organoleptic tests involving a sensory panel are used. A group of trained volunteers use their senses such as sight, taste, smell, and touch to evaluate the products. However, the sense of taste is very complex and individual for each person, making the results of the research subjective [30]. In the case of products such as alcohol, cheese, juices, or coffee, whose market value depends on taste and brand, there is a need for an objective assessment of these features. In response to this, modern analytical tools have been proposed that enable for the fast and low-cost control of the production process and the quality of food products. In addition, research on electronic senses and nanotechnology contributes to the development of objective methods for evaluating sensory experiences.

These studies are conducted as part of biomimetics, i.e., an interdisciplinary field that uses the principles of engineering, chemistry, and biology to synthesize materials, synthetic systems, or machines whose functions mimic biological processes [31–34]. This field is gaining popularity as people are constantly trying to design technologies, devices, materials, etc., that closely resemble nature. Therefore, it is used in various areas, including sensory recognition, which means that it provides the possibility of digital processing using sensors of various human senses. Examples include image sensors (sense of sight), speakers (sense of hearing), pressure sensors (sense of touch) [35,36], the electronic nose (sense of smell), and the electronic tongue (sense of taste). It should be added that in many cases these sensors are much more sensitive than human sense organs.

Therefore, this article attempts to review modern multi-sensor systems, including the electronic nose and electronic tongue, for assessing the quality of fruit and vegetable juices. The article is divided into the following sections: Section 2, the essence and characteristics of the electronic nose; Section 2.1, the origin, operation, types, advantages, and disadvantages of the e-nose; Section 2.2, the application of the electronic nose in the quality analysis of fruit and vegetable juices; Section 3, the essence and characteristics of the electronic tongue; Section 3.1, origin, operation, types, advantages, and disadvantages of the e-tongue; Section 3.2, application of the electronic tongue in the quality analysis of fruit and vegetable juices; Section 4, challenges and perspectives; Section 5, the conclusions.

2. The Essence and Characteristics of the Electronic Nose

2.1. Origin, Operation, Types, Advantages, and Disadvantages of the E-Nose

Research and work on the construction of an “artificial nose” for the measurement, identification, and classification of odours has been carried out since the 1950s, when Hartman (1954) designed a simple microelectrode-based sensor for odour recognition [37]. In turn, the first attempts to create an innovative method by using a matrix of sensors were carried out already in the early 1960s. At the time, a device called a mechanical nose was developed [38]. Three years later, Wilkens and Hatman presented the electronic nose, which is a sensor array using a redox reaction on the electrode [39]. It was not until 20 years later that the concept of the first device consisting of an intelligent electronic matrix of chemical sensors was created, enabling the classification of odours [40] and their detection by using an integrated system of sensors [41]. In 1988, Gardner and Bartlett coined the term “electronic nose” to describe an instrument composed of a set of sensors capable of recognizing simple and complex odours: “an instrument which comprises an array of electronic chemical sensors with partial specificity and appropriate pattern recognition system, capable of recognizing simple or complex odors” [42,43].

In 1982, the first commercial electronic nose was developed [40]. Then, in 1998, Göpel created the concept of a bioelectronic nose—he proposed using scent neurons as sensitive elements. He suggested that the biomolecules present on the surface of the sensors could be used to develop high-sensitivity sensors (with detection limits similar to those of dogs, for detecting drugs, explosives, etc.) [44]. Figure 1 shows a brief history of the development of the electronic nose.

Currently, the term e-nose is understood as various devices designed to imitate human olfactory perception, i.e., enabling the analysis of signals regarding the properties of a given product/mixture in a way that resembles the operation of an olfactory analyser in the brain [43,45–48]. Thus, it can be simplified to say that the e-nose is a system analogous to the sense of smell and that the sensors play the role of the olfactory epithelium because the mechanisms for identifying odorous substances implemented in electronic devices are very similar to those in the human nose [49].

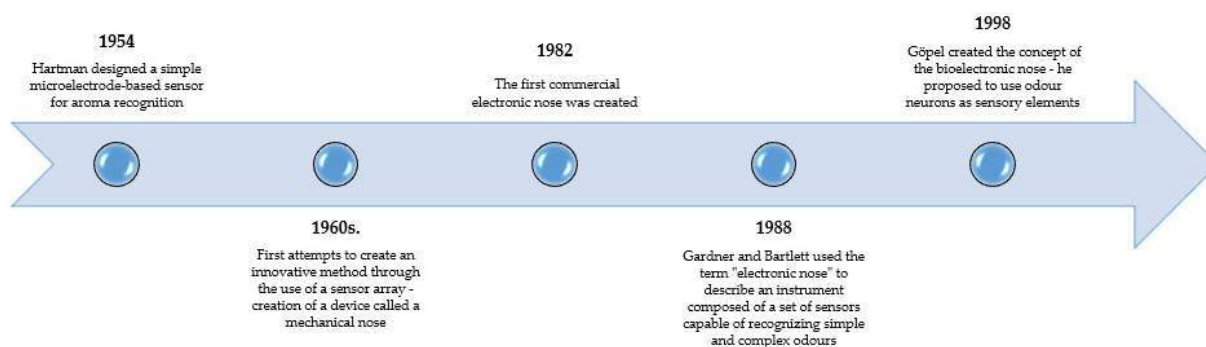


Figure 1. A brief history of the origins of the electronic nose, developed on the basis of Hartman, Moncrieff, Wilkens, and Gardner [37–39,42].

The human sense of smell is quite complex, as humans have the ability to perceive thousands of different smells—the olfactory senses can distinguish 10,000 types of smells using approximately 400 types of receptors [50,51]. This is determined by the complex structure of the olfactory epithelium located in the nasal cavity. Several million olfactory neurons are located there, and at the ends of their modified dendrites there are hair-like extensions that detect odorous substances. Due to the spatial segregation of neurons and axons, each odourant stimulates a specific set of olfactory glomeruli.

The principle of operation of the e-nose is that the sensor system selectively reacts to odorous compounds or their groups contained in the tested sample—that is, it determines the odour consisting of a large amount of various volatile substances in the space above the sample, and then provides output data that represent the “fingerprint” of all sample components [52]. This means that the “smell” is recognized when the analysed set of signals is sufficiently similar to the analogous set corresponding to the “pattern”.

Depending on the application of the system, different methods are used to construct the patterns and determine the degree of compatibility of both sets. However, an e-nose always consists of a set of sensors, consisting of several or several dozen elements, i.e., a multi-sensor matrix, an information processing unit, such as an artificial neural network (ANN), software with digital pattern recognition algorithms, and databases [53,54]. It is worth mentioning that these elements in commercial devices are mounted in easily replaceable modules, allowing the device to be adapted to the task performed.

Chemometric methods based on the use of one of many analytical techniques such as Principal Component Analysis (PCA), Discriminant Analysis (DA), Discriminant Function Analysis (DFA), Support Vector Machine (SVM), Partial Least Squares (PLS), Kernel Principal Component Analysis (KPCA), and single and multivariate Analysis of Variance (ANOVA) can be used to interpret the results obtained with the electronic nose. Artificial Neural Networks (ANN) are also used here [55–59].

Most often, electronic noses are constructed on the basis of conductometric sensors, which use the changes in the electrical conductivity of the active material, for example metal oxides (MOS) or some polymers, as well as piezoelectric sensors (quartz microbalances) and biosensors [49]. However, broadly speaking, the sensors used to build the matrix of electronic noses can be divided into several classes due to their construction and principle of operation [60–63]:

- Electrochemical (change in potential or resistance caused by charge transfer);
- Thermal (temperature change caused by chemical action);
- Mass (mass change due to the absorption of a substance);
- Optical (changes in light intensity).

Chemical sensors most often work on the following principles: 1. Change of resistance: MOS (metal oxide semiconductor), CP (conducting polymer), polymer composite, 2. Change of potential: MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor), 3. Frequency changes: BAW (bulk acoustic wave), SAW (surface acoustic wave), 4. Other, e.g.,

mass spectrometer. Attention should also be paid to biosensors in which the active element is a biomaterial deposited on a suitable transducer.

Artificial noses are currently used as a supplement to various methods of odour analysis, as they eliminate the various imperfections of classical methods (GC/MS, sensory panels, trained animals) such as, e.g., the subjectivity of sensory panels, analysis of substances at high concentration levels or the need to employ specialized personnel, long analysis time, and high prices.

Electronic noses are an objective, automated non-destructive technique characterized by their high sensitivity to chemicals (which is comparable to the sensitivity of the human nose), ease of construction, and cost-effectiveness [64]. In addition, the use of this multi-sensor system allows for faster and cost-effective odour analysis.

Among the other advantages of this measurement system, the following can also be mentioned [65–68]:

- High resistance to changing weather conditions, mainly temperature and humidity,
- “medium selectivity” in relation to “foreign” substances present in the gas mixture, which is sometimes more flavourful;
- High stability, repeatability, and reproducibility;
- Short response and recovery time;
- Easy calibration and a simplified data processing system;
- The device is often small in size.

It should also be added that many of the used sensors can improve the measurement capability of the system. However, on the other hand, it should also be remembered that the use of a large set of sensors results in a greater computational effort and time required to process the obtained data. In addition, there may be redundant sensors in multi-component systems, i.e., sensors that do not generate significant signals. Another disadvantage of the analysed measurement method is the limited scope of its application [69,70].

Table 1 below summarises the main advantages and disadvantages with a brief explanation.

Table 1. The main advantages and disadvantages of an electronic nose [19,21,43,47,53,56,65].

Advantages		Disadvantages	
Advantage	Brief Explanation	Disadvantage	Brief Explanation
Detection of odours [65].	The electronic nose can detect a variety of odours that the human nose may miss or not notice. It can be used to detect unpleasant odours, as well as chemicals, gases, or even odours of criminal substances [65].	Limited ability to detect subtle odours [19].	Electronic noses can have difficulty detecting very subtle odours that the human nose can sense. They can miss subtle nuances and details, which can affect the precision of the analysis [19].
Speed and precision [19].	The electronic nose can detect and analyse odours in a very short time. This allows specific odours to be identified immediately, which is particularly useful in time-sensitive situations [19].	Need for calibration and maintenance [56].	Electronic noses require regular calibration and maintenance to maintain their accuracy and effectiveness. This can be a time-consuming and costly task, especially for large systems or sensor networks [56].
Multi-tasking [21].	The electronic nose can be used to identify different odours simultaneously. It can detect and distinguish between different chemicals or odours in the same room, which is not possible with a regular nose [21].	Sensitivity to external conditions [47].	Electronic noses can be sensitive to changes in temperature, humidity, as well as to the presence of other substances in the environment. Extreme weather conditions or contamination can affect their performance and accuracy [47].
Convenience of use [43].	The electronic nose can be carried and used in a variety of places and situations. It can be used in industry, emergency services, medicine, or even in everyday applications [43].	Cost [65].	Electronic noses, especially those using advanced technology, can be expensive to both purchase and maintain. Some may be too expensive for small businesses or organisations [65].

Table 1. Cont.

Advantages		Disadvantages	
Advantage	Brief Explanation	Disadvantage	Brief Explanation
Objectivity [46].	The electronic nose works on the principle of sensors and analyses odours objectively, regardless of biases or personal preferences. This provides more objective results and eliminates individual differences in odour perception [46].	Complexity of data analysis [19].	Data collected by electronic noses can be complex to analyse. It requires sophisticated algorithms and data processing techniques to properly interpret and use the information associated with the odours [19].
Remote monitoring capability [47].	The electronic nose can be remotely monitored and controlled. Data on detected odours can be transmitted to the relevant persons or systems, allowing for a rapid response in the event that dangerous or abnormal odours are detected [47].	Lack of versatility [46].	Electronic noses may be optimised to detect specific groups of odours or chemicals. Some models may not be able to detect a wide range of different odours simultaneously, limiting their use in certain industries [46].
Time and cost savings [65].	An electronic nose can speed up the inspection and diagnostic processes by eliminating the need for manual sample searching or testing. This saves time and costs associated with traditional odour detection methods [65].	Complicated calibrations for different odours [43].	If an electronic nose is to be used to detect different odours, it may require complex calibration processes for each substance or odour group. This can be time-consuming and require the involvement of specialists [43].
Safety [19].	An electronic nose can help identify hazardous chemicals, gases, or odours that may pose a health or safety risk. It can be used to detect spills or contaminants in the environment, chemical industries, refineries, manufacturing plants, etc. In this way, appropriate countermeasures can be taken quickly and potential risks to workers and the environment can be minimized [19].	Risk of false results [21].	Electronic noses can be prone to erroneous readings or false results. Factors such as interference from other odours, contamination, or sensor damage can lead to incorrect results, challenging the accuracy of the analysis.
Innovation and technological development [21].	The electronic nose is an example of advanced technology that is developing and evolving. Research in this area is leading to continuous improvements in odour sensors, which can have a positive impact on many fields, from science and medicine to industry and public safety [21].	Dependence on programming and algorithms [56].	Electronic noses operate on the basis of programming and algorithms that determine what odours are to be detected and how they are to be interpreted. Incorrect programming or insufficiently precise algorithms can lead to incorrect results or inaccurate analysis [56].
Research and analysis of smell quality [43].	The electronic nose can be used for research and analysis of odour quality in various industries. It can help assess the quality of food products, cosmetics, perfumes, wines, coffees, etc. By accurately determining the fragrance ingredients and their proportions. This enables manufacturers to improve products and provide a better fragrance experience for consumers [43].	Lack of ability to subjectively assess odours [19].	Electronic noses do not have the ability to subjectively assess odours like humans. They are not able to sense context, emotion, or individual preferences, which can be important in certain fields such as the perfume industry or gastronomy [19].

Despite the disadvantages mentioned above, it seems that further development of odour analysis is related to the use of electronic noses. It should be added that they are constantly being improved, especially in the direction of increasing their sensitivity,

specificity, selectivity, accelerating the response time, while simplifying the principles of operation, and consequently their operation, as well as their miniaturization and increasing their mobility [71].

Electronic noses are currently quite widely used in many different market branches, as shown in Figure 2. They can be used in medical research (e.g., in the detection of disease biomarkers, selection of therapy, metabolic disorders or organ dysfunctions, detection and recognition of eye bacteria or bacteria in the blood, detection of blood in the urine, etc.) [72–78], forensic and criminology [79,80], and in the cosmetics industry, in particular perfumery (e.g., for authenticity assessment, for the development of new fragrances) [81,82], pharmaceutical industry (for quality control, purity and homogeneity of drug composition, and product safety) [70], and food industry (e.g., for testing compliance with standards, marking product composition, getting to know the brand, marking impairment on the shelf, etc.) [60,83,84], as well as in agriculture (for assessing the maturity of crops, determining the date of harvest and storage time, assessing the degree of contamination, characterizing varieties, and diagnosing plant diseases) [69,85–88].

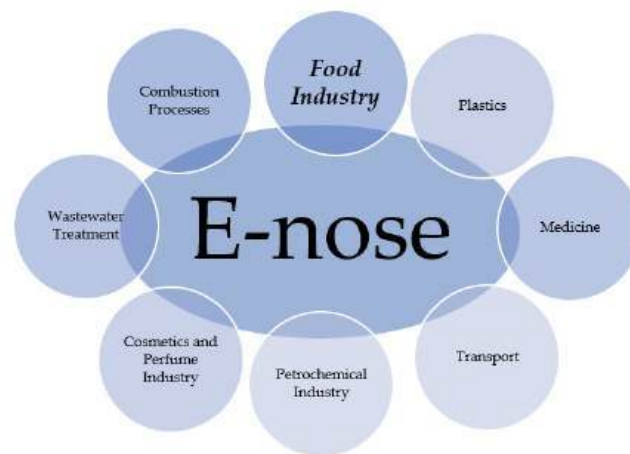


Figure 2. E-nose application areas, developed on the basis of Krzyżewska and Pawlak-Lemańska [89,90].

Electronic noses are also useful in monitoring and environmental protection, e.g., during the measurement of the degree of contamination of environmental samples (water, air), the emission of unpleasant and harmful volatile substances or poisonous leaks, and the assessment of the effectiveness of wastewater and waste gas treatment, or the assessment of their odour nuisance [91–96]. As an example, research conducted in Poland can be cited here. Since 2021, the SENSODOR project has been implemented at the Wrocław University of Technology. As part of this project, an e-nose is being developed to help detect sources of nuisance odours and monitor their levels in the environment. The implementation of the project is expected to take three years. The final stage of the project, after developing an electronic nose and creating a monitoring network, will be installing it on a drone. This type of autonomous device could therefore be used, among others, in to search for sources of odour nuisances [97].

Electronic noses are also used to analyse fuel components [98] and test groundwater quality [99]. They are also used in the military industry (e.g., for identifying combat gases, detecting mines, and testing the air quality inside vehicles, e.g., space vehicles) [71], as well as for detecting hazardous substances, including flammable and explosive substances (e.g., at airports) [100]. They are also used in the monitoring of production processes and in scientific research in various fields.

2.2. Application of the Electronic Nose in the Quality Analysis of Fruit and Vegetable Juices

As mentioned earlier, the use of electronic noses in the food industry is particularly widespread. They are applied in many different areas, such as food quality control [101,102], e.g., shelf life

testing [103–105], freshness assessment [106–112], processing monitoring [83,113–115], monitoring of storage processes [116], and assessment of authenticity [117–120]. In addition, they can be used to control the quality of production processes, monitor fermentation processes, control the quality (tightness) of packaging [121,122], or to identify products or their ingredients [123–128].

In the juice sector, the electronic nose can be used to identify the various aromas and flavours that are characteristic of a particular beverage. Thanks to its high sensitivity, it can be very useful in assessing the quality of the raw materials used in juice production. In addition, the electronic nose is used to check the quality of an already packaged product where shelf life problems may have occurred as a result of a poorly conducted fixing process [114,129]. Figure 3 shows the application of the electronic nose in the juice sector.

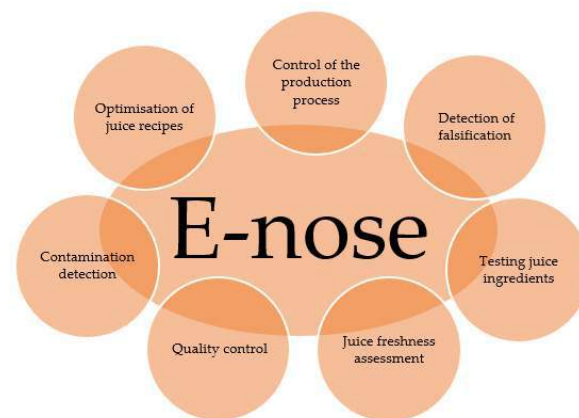


Figure 3. E-nose application areas in the juice sector, developed on the basis of Wahia and Li [114,130].

Many researchers have carried out various experiments on electronic noses. For example, Rasekh and Karami [131] used the e-nose in combination with an artificial neural network to detect the ripple effects in fruit juices by discriminating between them. They used unit-radius radar excursions to compare the patterns (i.e., the fingerprints) of juice samples. The authors of this study obtained the highest response for the sensors named MQ135 and TGS813, and the lowest response for the sensors named MQ3-4-8-9 and 136. They concluded that the selection of sensors with good discriminating characteristics could improve the classification ability. In addition, nine MOS gas sensors were used in an electronic nose. The signals from the sensors were analysed by PCR and the most suitable ones were selected. It was found that the selected sensors were effective in the qualitative evaluation of different fruit juices and could be used in the construction of an optimal machine olfaction system. The correlation between measurements and predicted fruit juice flavour parameters showed a high prediction performance based on the e-nose signals. The results suggest that e-nose in combination with ANN can be used to analyse products for authenticity with satisfactory results.

In turn, Zhang et al. [132] focused on evaluating the aroma of freshly squeezed strawberry juice stored in cold storage using e-nose, headspace solid phase micro extraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS). Although strawberries of the ‘Hong Yan’ (HY) and ‘Xiao Bai’ (XB) species are popular in Jiangsu Province, China, the aroma profile of freshly squeezed juice from these fruits is not well understood. Electronic nose, HS-SPME-GC-MS, and GC-IMS were used to analyse the aroma of HY and XB strawberry juices stored at 4 ± 1 °C. In the beverage freshly prepared by HS-SPME-GC-MS HY and XB, 17 and 21 volatile organic compounds (VOCs) were detected, while up to 50 VOCs were detected by GC-IMS. Characteristic compounds identified included hexanal, methylpropanal, 5-methylfurfural and 2-furfural in HY, and hexyl acetate, ethyl 3-methylbutyrate, propyl hexanoate, and octanal in XB. In addition, the quality and taste of HY and XB strawberry juices were compared. The vitamin C content of HY juice was higher than in XB, but other characteristics, such as taste and colour, were less satisfactory than in XB. Aroma profiles were different

between HY and XB, which was related to cultivars and chemical composition. The use of e-nose, HS-SPME-GC-MS, and GC-IMS allows for a complementary analysis of freshly squeezed strawberry juice during cold storage.

Other researchers Wang et al. [133] have focused on evaluating the aroma characteristics of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) juice using gas chromatography-mass spectrometry and e-nose. Juices from four sugarcane cultivars were analysed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and e-nose to investigate the aroma characteristics. Thirteen volatile compounds were detected, including aldehydes, alcohols, phenols, and ketones. Cluster and PCA analysis of e-nose data showed that bamboo cane (BC) and yellow rind sugarcane (YS) juices formed one group, while black rind sugarcane (BS) and green rind sugarcane (GS) formed the other group. E-nose with linear discriminant analysis (LDA) allowed the sugarcane juices to be clearly distinguished. Hexane, 1-pentanol, 2-butanol, 1-penten-3-one, 2-octanol, and acetaldehyde showed high correlation with e-nose response signals. Sensory analysis showed noticeable differences in aroma between BC and GS ($p < 0.01$) and YS and GS ($p < 0.05$). The use of GC-MS in combination with e-nose can serve as an alternative tool for assessing and differentiating sugarcane juices from different varieties, due to its high sensitivity and objectivity.

Wahia et al. [130] analysed the effect of mild thermosonication (MTS) on the quality of orange juice (OJ) infused with *Alicyclobacillus acidoterrestris* (AAT) during 24-day storage using various temperatures. Changes were related to bioactive compound content, antioxidant activity, and pectin methyl esterase (PME) concentration. No differences were observed in pH and total soluble solids levels. To analyse the nutritional and microbiological properties of the juice, non-linear kinetic curves, and four-parameter models of logistic decomposition were used. The electronic nose successfully distinguished between the control and OJ-treated odour through linear discriminant analysis (LDA). Terpenes, alcohol, and partially aromatic compounds were the main indicators of OJ spoilage. The combination of e-nose with GC/MS may be an alternative to traditional food analysis techniques for the rapid detection of the microorganisms responsible for juice spoilage.

As there are many studies on the use of the electronic nose in assessing the quality of fruit and vegetable juices, Table 2 below provides examples of studies carried out over the last five years.

Table 2. Examples of studies carried out over the last five years using e-nose in assessing the quality of fruit and vegetable juices.

Authors, Publication Year	Type of Juice Analysed	Object of Research	Selected Results
Liu et al. (2018) [134]	Watermelon juice	Comparison of fresh juice aroma characteristics of different varieties; identification and quantification of the fresh watermelon juice aroma of five varieties.	In watermelon juice, 55 volatile substances were identified, including 6 volatile substances identified for the first time in watermelon.
Wang et al. (2019) [133]	Sugarcane (<i>Saccharum officinarum</i> L.) juice	Investigating the properties of aroma, assessing the ability to differentiate juices.	Thirteen volatile compounds were identified. Alcohols were identified as the main volatile components in all sugarcane juice. It was concluded that e-nose in combination with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) can be used as an alternative approach to evaluate and distinguish sugarcane juice produced from different varieties because of its high sensitivity and objectivity.
Cao et al. (2019) [135]	Citrus juice	Classification of citrus juice from different days of storage.	An improved label consistent KSVD (L-KSVD) method called E-LCKSVD for e-nose has been proposed, which can improve its performance.

Table 2. Cont.

Authors, Publication Year	Type of Juice Analysed	Object of Research	Selected Results
Niu et al. (2019) [136]	Apple juice	Characterisation of apple juice ester odourants quantitative measurements, odour threshold, and aroma intensity analysis.	Perceptual interactions between key apple juice esters (identified and selected by GC-O, GC-MS, OAVs of compounds, and omission experiments) were investigated using odour thresholds, aroma intensity, and e-nose analysis. It was shown that fruity, sour, and “green” note attributes covaried well with the five sensors of the e-nose.
Cai et al. (2019) [137]	Jujube juice	Investigating the effect of different Lactic Acid Bacteria (LAB) strains on the flavour profile of fermented jujube juice.	A clear distinction was found between all fermented jujube juices. Furthermore, jujube juice fermented by <i>L. plantarum</i> (compared to juice fermented by <i>L. casei</i> and juice fermented by <i>E. faecium</i>) was found to produce less organic sulphur compounds and more aromatic compounds. In addition, its taste is perceived as less bitter and astringent, resulting in better consumer acceptability.
Zhao et al. (2019) [138]	Tomato juice	Investigating differences in the flavour profiles of tomato juices.	The response of the e-nose sensor set to volatile compounds showed that there was a noticeable change in taste after heat treatment.
Wahia et al. (2020) [130]	Orange juice	Determination of the nutritional properties and microbiological quality of juice during storage.	Based on linear discriminant analysis (LDA), the e-nose sensors were able to distinguish between the aroma of untreated and treated orange juice. It was shown that terpenes, alcohol, and partially aromatic compounds were the main indicators of juice spoilage during storage. It was concluded that the combination of e-nose with gas chromatography coupled to mass spectrometry (GC/MS) could be used as an alternative tool for the rapid detection of the microorganisms responsible for juice spoilage during storage.
Rasekh, Karami (2021) [139]	Two types of natural and industrial juices	Analysis of nine metal oxide semiconductor (MOS) response patterns using artificial neural networks (ANNs) to construct a method for selecting the minimum and most effective number of MOS gas sensors to construct an electronic nose system for the olfactory quality control of various food products.	The method can be used to select the minimum and most efficient number of MOS gas sensors to construct an electronic nose system. It was further found that the use of a minimum number of sensors reduces the cost of building an e-nose, reduces the amount of data input to the processor, and consequently increases the classification accuracy. Hence, the e-nose, in combination with an ANN, can be a highly efficient tool for the rapid and non-destructive classification of fresh and industrial fruit juices.
Nomura et al. (2021) [140]	Banana juice	Measuring and varying the aroma of banana juice from different brands to identify the characteristics, time-related changes, and differences between them.	The FF-2A e-nose used in the study was able to identify the odour of each banana juice in each shop, as well as time-related changes. In addition, it was found that by combining the e-nose with GC-MS, it was possible to assess the components of the odour that changed over time.
Lan et al. (2021) [141]	Fresh mango juice	Measuring the shelf life of non-industrial fresh mango juice.	It was found that the combination of electronic nose and GC-MS could enable effective differentiation and identification of changes in volatile compounds of fresh mango juices under different storage conditions.

Table 2. Cont.

Authors, Publication Year	Type of Juice Analysed	Object of Research	Selected Results
Wang et al. (2021) [142]	Noni (<i>Morinda citrifolia</i> L.) juice	Evaluation of differences in volatile matter profiles between samples.	The results suggest that the fermentation process may result in the formation of aromatic compounds and that the fermentation treatment may lead to a reduction in sulphides. It was further found that the difference in nitric oxide, alkanes, alcohols, and aromatic and sulphur compounds contributed to the differentiation of Noni juice produced under different fermentation time and scale conditions.
Zhang et al. (2022) [143]	Jujube juice	Analysis of juice aroma; identification of jujube juice aroma differences during fermentation and storage.	It was found that after fermentation and storage, the contents of methane, alcohols, aromatic compounds, terpenes, and other aromatic substances in jujube juice increased. Furthermore, it was shown that the contents of EH (enzymatic hydrolysis) jujube juice were higher than that of NEH (non-enzymatic hydrolysis) jujube juice. Hence, EH treatment could improve the content of flavour components in fermented jujube juice.
Liu et al. (2022) [144]	Tomato juice	Identification and control of cooked flavour in heat-treated tomato juice.	It was found that dimethyl sulphide, dimethyl trisulphide, metional, and 1-octen-3-one were responsible for the cooked off-flavour in tomato juice. It further proved that dimethyl sulphide could be used as a marker compound for the cooked off-flavour in tomato juice.
Wang et al. (2023) [145]	Cherry juice	Identification and analysis of the aroma profile.	The use of e-nose was found to effectively differentiate non-fermented sweet cherry juice and the sweet cherry juice separately inoculated with different LAB strains—Lactic Acid Bacteria.
Bao et al. (2023) [146]	Black carrot juice	Determination of the aroma profile of juice; evaluation of the effect of different sterilisation methods on the quality of black carrot juice.	It was found that the volatiles in black carrot juice were dominated by methane, organic sulphur compounds, terpenes, alcohols, and nitrogen oxides. It was further shown that two of the sterilisation methods ultra-high temperature instantaneous (UHT) and thermal pasteurisation (TP) did not alter the overall odour profile of BCJ.
Zhang et al. (2023) [132]	Strawberry juice	Flavour of freshly squeezed strawberry juice during storage at 4 ± 1 °C.	Using HS-SPME-GC-MS, 17 and 21 volatile organic compounds (VOCs) were detected in the freshly squeezed strawberry juice, while 50 VOCs, including esters, aldehydes, ketones, and alcohols, were detected using GC-IMS.
Zhang et al. (2023) [147]	Strawberry juice	Predicting the increase in total bacterial count in freshly squeezed strawberry juice during cold storage.	It was found that a single electronic nose (E-nose) or electronic tongue (E-tongue) sensor system could be used to predict the total bacterial count in freshly squeezed strawberry juice during cold storage, however, the best accuracy of matching was achieved by combining the two systems.

In summary, the electronic nose is a device capable of analysing and identifying odours, which is widely used in the food industry. Thanks to its various sensors, the e-nose can determine the chemical composition, detect contaminants and control the microbiological status of juices without the need for complex laboratory methods [124,132,147,148]. In this way the electronic nose supports quality control processes and helps ensure food safety,

which results in a reduction in food waste and financial losses for processing plants and, above all, consumer satisfaction [149,150].

3. The Essence and Characteristics of the Electronic Tongue

3.1. Origin, Operation, Types, Advantages, and Disadvantages of the E-Tongue

A few years later after the appearance of the e-nose, the concept of a similar analytical tool for analysing liquid samples, the so-called Taste Sensor, was developed. The first taste sensor, or electronic tongue, was designed in the late 1980s—it was created by a Japanese scientist Susumu Kurihara in 1989. Kurihara and his team at Osaka University developed a lipid membrane taste sensor that was capable of distinguishing between five basic tastes: sweet, sour, salty, bitter, and umami. This marked the beginning of a new era in the field of taste sensing technology, paving the way for the development of more advanced electronic tongues [151].

The Hayashi Taste Sensor is an electronic tongue developed by Dr. Kiyoshi Toko and his team at the Kyushu University, Japan, in the early 1990s. Dr. Toko worked with Dr. Hidekazu Hayashi, another pioneer in the field of electronic tongues. The Hayashi Taste Sensor was designed to mimic human taste sensation and analyse the taste profile of various substances, including food and beverages [152,153].

In 1997, a significant advancement in electronic tongue technology was achieved through a collaboration between researchers from the University of Rome Tor Vergata in Italy and St. Petersburg State University in Russia. This innovative electronic tongue was developed under the guidance of Prof. Yuri Vlasov, Prof. Anatoly Legin, and Prof. Andrey Rudnitskaya. The 1997 electronic tongue utilized potentiometric sensors, specifically ion-selective electrodes, to analyse and differentiate the taste profiles of various liquid samples. The acquired data was then processed using multivariate data analysis techniques, which enabled the classification and identification of complex taste patterns. The 1997 electronic tongue marked an important milestone in the development of taste sensing technology. It demonstrated the potential of electronic tongues for various applications in the food and beverage industry, environmental monitoring, and medical diagnostics. Since then, electronic tongue technology has continued to evolve, incorporating new sensing techniques and materials, and expanding its range of applications [154,155].

Since then, many of these devices have been developed with various gas sensors [156]. The electronic tongue was equipped with potentiometric sensors so as to identify liquid samples.

The development of electronic tongue technology also included the introduction of new detection methods such as electrochemical, optical, and acoustic sensors. In the following years, various electronic tongue systems have been successfully applied in food analysis, medicine, environmental protection, and pharmaceuticals [56,157,158]. Figure 4 shows a condensed history of the emergence of the electronic tongue.

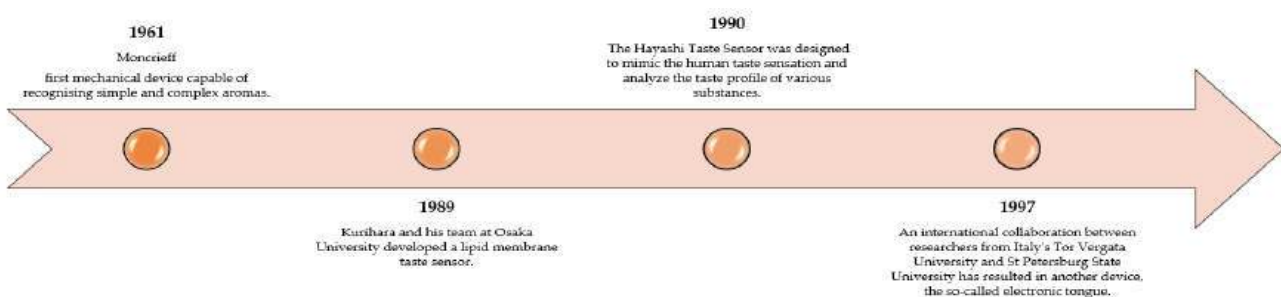


Figure 4. A brief history of the origins of electronic tongue, developed on the basis of Labanska, Toko, and Ciosek [29,154,155].

The advancement in the evolution of sense organs, such as the nose and tongue, is made possible by the occurrence of biological impulse responses in mammals. The sense of smell works through a number of receptors that respond to various chemical compounds.

These signals are then delivered by the nervous system to the brain, where a network of neurons configures them into response patterns. It should be mentioned that human taste testing will be irresolutely linked to long coordination, execution, and interpretation times, resulting in high costs. These concerns sometimes limit the taste evaluation in the early stages of product development. This is a very important step in designing the right organoleptic sensation. Researchers are therefore constantly looking for new solutions in this area [29,158]

The electronic tongue is an innovative analytical device that simulates the human sense of taste to identify, distinguish, and classify chemicals and liquid mixtures based on their taste characteristics [159].

A typical electronic tongue consists of several separate sensors, each used to detect specific chemical compounds or groups of compounds. These sensors work together to generate a profile of the sample that is being tested. Electronic tongues work by collecting data from sensors [157,159–161]. This data can then be analysed using statistical or machine learning techniques to identify and classify a sample based on its taste characteristics. In this way, an e-tongue can process information from multiple sensors to detect the subtle differences in sample composition and extract characteristic patterns, allowing samples to be classified [152,162]. Figure 5 shows a simplified diagram of how a tongue and e-tongue work.

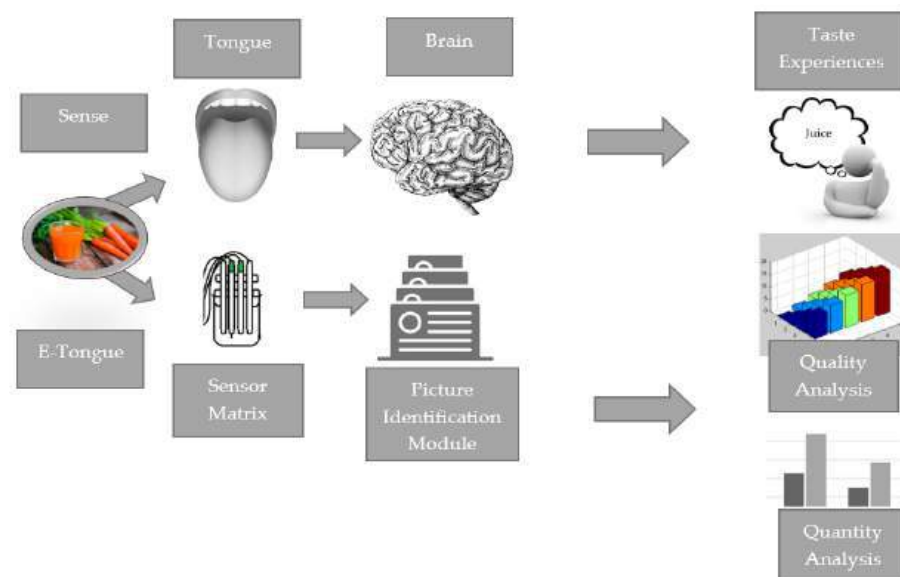


Figure 5. A simplified diagram of how a tongue and e-tongue work developed on the basis of Labanska [29].

Overall, the e-tongue is a valuable tool for analysing the chemical composition of liquid and solution samples and, similar to the human tongue, it performs a comprehensive analysis of their chemistry. The e-tongue reflects three levels of biological taste recognition: the receptor level (the taste buds in humans or probe membranes in e-tongue), the circuitual level (the neural transmission in humans or transducer in e-tongue), and the perceptual level (the cognition in the thalamus in humans or computer and statistical analysis in the e-tongue) [163].

As electronic tongues are very complex devices, they consist of different types of sensors. Electronic tongues can be divided into various types depending on the sensing technologies they use [162,164]. Common types of e-tongues are listed and characterised below [165,166]:

1. Electrochemical e-tongues: They use electrodes, such as ion-selective electrodes, to measure changes in the potential in liquid samples. They are used to assess the quality

- of beverages such as juices, mineral water, or alcoholic beverages, as well as to analyse the composition of food;
2. Optical e-tongues: Based on fibre-optic technology, this type of e-tongue analyses changes in the light passing through a sample to obtain information about its composition. They are used in assessing the quality of food products, such as milk, honey or vegetable oils, and to detect impurities and adulteration;
 3. E-tongues based on biosensor technology: They use biological molecules, such as enzymes or antibodies, to identify specific chemicals in liquid samples. They can be used to identify allergens, bacteria, or toxins in food, which is key to ensuring food safety;
 4. E-tongues with mass sensors: They use mass spectrometry technology to analyse the chemical composition of liquid samples. They are used to identify flavour and aroma components in the food industry, for example in assessing the quality of coffee or tea.

The e-tongue is a system that uses an automatic liquid sampler, via a sensor array module. The e-tongue can take samples without much preparation and needs only 2–3 min to analyse. The e-tongue system consists of a probe, designed to measure dissolved compounds in samples. Each of the probe's sensors has its own characteristic response span that interacts with other taste attributes. The integration of processes from each sensor generates a unique 'character'. The analytical part of the system works on a matrix of sensors that are able to detect the chemical compounds in samples [114,167,168].

A large number of detection sensors are similar to or even more precise than the human sense. The human tongue and electronic tongue have different taste detection limits. For example, the detection level of sucrose (sweetness) is 1×10^{-2} M and 2×10^{-6} M for a human tongue and an electronic tongue, respectively, and the detection threshold of caffeine (bitterness) is 0.7×10^{-3} and 1×10^{-6} for the same languages, respectively. Electronic tongues have the ability to pick up chemical changes before they are noticed by human receptors. The sensor array can be adapted as required. Very importantly, measurements are made by potentiometry, and the results are recorded with reference to an Ag/AgCl reference electrode. Each probe is cross-selective, allowing for complete coverage of the taste profile. Taste recognition is done at the perceptual level, rather than in the probe, through the use of a computer. The entire instrument includes a software package that comes complete with a system containing a sophisticated chemometric setup for measurement and data analysis [163,169,170].

An electronic tongue allows sensor data to be collated with taste patterns. The results obtained are compared quantitatively, taking into account analytical parameters such as concentration or flavour intensity on a scale. Depending on the intention of the analysis being performed, the study can provide a wide variety of information. If there are new chemical compounds for which there are no achievable data that do not explicitly mention a specific taste, a useful tool is to quantify the bitterness as a function of known bitterness factors, using discriminant factor analysis (DFA). Using this method, the bitterness of the API can be compared to the bitterness of urea of a known concentration, providing a starting point for flavour optimisation. Such a solution can help in the creation of bitter placebos for blinded clinical trials [159,163,171].

With advances in technology, electronic tongues have the potential to be used in a variety of industries, which can bring many benefits to humanity and the environment [152,172,173]. Electronic tongues are constantly being developed and refined, allowing for more and more accurate and rapid detection of different substances. Similar to any device, an electronic tongue will have advantages and disadvantages [174,175]. Table 3 below shows the main advantages and disadvantages of this innovative device.

Table 3. The main advantages and disadvantages of the electronic tongue [29,114,151,157,158,163,168,176].

Advantages		Disadvantages	
Advantage	Brief Explanation	Disadvantage	Brief Explanation
Objectivity [177]	Electronic tongues provide objective and consistent measurements, eliminating the subjective influences that can occur with a human taster [177].	Limited complexity [29].	Electronic tongues are simplified analogues of the human senses, meaning that they may not be able to discriminate between such complex taste patterns as humans do [29].
Repeatability [157]	E-tongues provide high repeatability of results, which is crucial for scientific research and quality control in the industry [157].	High initial costs [177].	The cost of purchasing and implementing an electronic tongue can be high, which can be a barrier for smaller businesses or institutions [177].
Speed of analysis [157]	Electronic tongues can carry out analyses in a short time, allowing for problems in production or research to be detected quickly [157].	Difficulty in imitating combinations of sensations [163].	E-tongues can struggle to discriminate and mimic the combination of taste sensations, smell experiences, and responses from visual and touch receptors that the human senses can perceive [163].
Sensitivity to small amounts of substances [163]	E-tongues have the ability to detect small amounts of chemical compounds, even allowing for low-concentration substances to be analysed [163].	Requirement for calibration and maintenance [29].	Electronic tongues require regular calibration and maintenance, which can generate additional costs and labour [29].
No ethical restrictions [168]	The use of e-tongues eliminates the ethical issues associated with human or animal testing [168].	Potential measurement errors [114].	E-tongues can be vulnerable to measurement errors caused by external disturbances such as temperature, humidity, or the presence of other chemicals [114].
Strength [163]	E-tongues are less susceptible to fatigue compared to human testers, allowing for long-term testing without losing the quality of the results [163].	Technical limitations [151].	E-tongues are based on available sensor technologies and data analysis methods, which may limit their ability to recognise non-familiar or new substances [151].
Flexibility [177]	Electronic tongues can be adapted to different applications by using appropriate sensors and analysis methods [177].	Complex software and data analysis [177].	Electronic tongues can require advanced software and analytical skills, which can be challenging for users without adequate training [177].
Safety [177]	E-tongues can analyse inedible, toxic, or dangerous substances, allowing testing under conditions where human testing would be impossible or dangerous [177].	Small number of devices available [157].	There are relatively few devices available on the market for the analysis of liquid samples compared to gas samples, which can make it difficult to choose the right device [157].
Integration with other technologies [176]	Electronic tongues can be easily integrated with other measurement or analysis systems, allowing for more comprehensive studies [176].	Small-scale applications in certain areas [29].	E-tongues may be of limited use in some areas where human senses are more important, such as in assessing the quality of wine or perfume products [29].
Cost reduction [29]	E-tongues reduce the costs associated with testing, eliminating the need to pay human testers or maintain laboratory animals [29].	Lack of a universal standard [158].	The lack of a uniform standard among e-tongues can make it difficult to compare measurement results between different devices and studies [158].

It is worth mentioning that these are not all the advantages as well as disadvantages that may arise during the operation of such a device. In addition, it should be noted that, although electronic tongues have many advantages, there may also be limitations, such as difficulties in identifying individual substances in mixtures or the limited lifetime of some

sensors. Nevertheless, electronic tongues are becoming increasingly sophisticated and are widely used in many areas [178–182], such as food and beverage analysis, environmental monitoring, and medical diagnostics. In food research, e-tongues have been used to detect contaminants, adulteration, and quality control. In environmental protection, e-tongues allowed for the identification of toxins and other harmful substances. In medicine, e-tongues were used to diagnose diseases, monitor patients, and detect biomarkers in body fluids [56,159,183]. In addition, e-tongues can be used in the cosmetics, fuel, electronics, and biotechnology industries [52,139,153,154]. Overall, the development of e-tongues has provided a valuable tool for analysing and understanding chemical composition. Figure 6 shows in which industries the e-tongue can be used.

Various models are currently available on the market, including the popular PEN manufactured by German company Airsense Analytics, the FOX models, and the latest Heracles offered by French company AlphaMOS [184]. Electronic tongues have been used, among other things, in the control of food production processes [185], the detection of human and plant diseases [43,56], and to identify the possible contamination of food products by pathogens [186].

In summary, electronic tongues are a valuable tool for understanding and analysing the chemical composition of liquids and solutions, with significant potential for future research and applications.

3.2. Application of the Electronic Tongue in the Quality Analysis of Fruit and Vegetable Juices

Particular emphasis should be placed on its application in the food industry due to its ability to analyse and assess the taste, chemical composition, and quality of food products. Very importantly, the food industry is a particularly difficult sector due to perishable products such as juices, dairy, and meat. In the food industry, e-tongues are widely used in various areas, such as:

1. Quality control: Monitoring the quality of raw materials, intermediate and final products, as well as detecting contamination and falsifications;
2. New product testing: E-tongues can help develop new recipes and flavours, as well as assessing the impact of changing ingredients on the taste and quality of products;
3. Food safety: E-tongues can be used to detect the presence of bacteria, toxins, or allergens in food products, which is key to protecting consumer health;
4. Optimisation of production processes: E-tongues can be used to provide real-time monitoring of production processes [114,168,172,176].

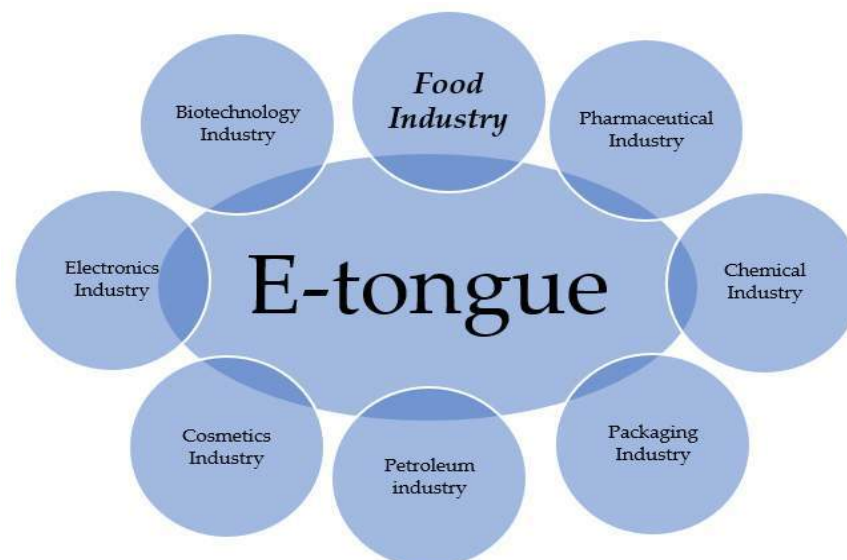


Figure 6. E-tongue application areas, developed on the basis of Wróblewski and Labanska [29,177].

The use of electronic tongues is so extensive that only a few possible applications have been outlined. The most important is the fact that electronic tongues are able to detect contamination and adulteration of food products, so that the quality and safety of the food remain at a high level. This is particularly important for consumers, who are becoming increasingly aware and concerned about their health [187,188].

As mentioned earlier, e-tongues have a wide range of applications, especially in the food industry, where they are used to test the quality of various products such as wine, beer, coffee, or juices. They are used to test the composition of products, to search for and identify flavours, to compare competing products or to test the effect of storage conditions on the shelf life of final products. Figure 7 shows the use of electronic tongue in the juice sector.

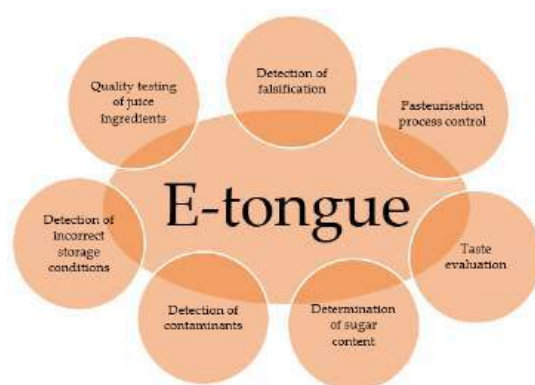


Figure 7. E-tongue application areas in the juice sector, developed on the basis of Wadehra and Legin [174,176].

For example, Hong and Wang [189] used an e-nose and e-tongue to measure the freshness of cherry tomatoes for juice production. The study showed that the freshness of these fruits can be measured using sensor systems such as an e-nose and e-tongue. The authors of the study found that the e-tongue had better prediction performance than the e-nose, with higher quadratic correlation coefficients and lower standard error of prediction. The study was conducted at different storage temperatures (4 and 25° Celsius) and durations of shelf life (SLs, 16 days at 4° Celsius and 8 days at 25° Celsius). Quality indicators of cherry tomatoes are SLs, pH, soluble solids content (SSC), vitamin C concentration (VC), and firmness. In general, it was found that it is possible to determine the freshness of fruit destined for juice using sensor systems and that one tool may be sufficient, without the need to combine them.

Qiu et al. [190] used an e-tongue and e-nose to characterise five types of freshly squeezed strawberry juices, as well as juices treated to microwave pasteurisation, steam blanching, short-term high-temperature pasteurisation, freezing, and then defrosting. Juice quality parameters (vitamin C, pH, acidity, and total soluble solids) were determined by traditional measurement methods. Qualitative classification and quantitative regression were performed using multivariate statistical methods (linear discriminant analysis (LDA) and partial least squares regression (PLSR)) and neural networks (Random Forest (RF) and Support Vector Machines). The e-tongue system achieved higher accuracy rates than the e-nose, and simultaneous use had an advantage in LDA classification and PLSR regression. According to the cross-validation, RF showed excellent and indisputable results in qualitative and quantitative analysis. This work indicates that the simultaneous use of an e-nose and e-tongue can be a useful technique for detecting the degree and/or manner of juice processing.

The aim of the study of Vitalis'a et al. [159] was to use advanced analytical techniques such as near-infrared spectroscopy (NIRS) and electronic tongue to detect *M. fructigena* fungal infection on plums and to quantify this contaminant in the juices pressed from them. The plums were inoculated with the fungus in different ways and stored under different conditions, and the results obtained with both apparatuses were analysed using

chemometric methods. The NIRS-based method proved successful in detecting infection before visible signs of spoilage appeared, while the e-tongue was able to quantify the level of these contaminants. Both methods proved suitable for discriminating treatment groups, but the classification accuracy was higher for samples stored at 24 °C. The results of the study indicate that both NIRS and e-tongue can be effective tools in reducing food waste through the rapid determination of fruit quality.

Moreover, Wang and Sun [191] investigated the potential use of an electronic tongue in combination with chemometric analysis for the early detection of *Zygosaccharomyces rouxii* in apple juice. The study used an electronic tongue to identify this contamination, and relied on a taste evaluation by a panel of tasters. Through discriminant analysis, contaminated juice was identified after 12 h when the yeast population was less than 2.0 log₁₀ CFU/mL. At this level, the panellists did not identify spoilage. The HA, ZZ, BB, and BA sensors were sensitive to changes in juice taste. The number of *Z. rouxii* cells could be determined by regression models with a high coefficient of determination of 0.98–0.99. The electronic tongue proved effective in detecting this yeast species at an early stage.

Cai et al. [137] investigated the effect of different strains of lactic acid bacteria on the flavour profile of fermented jujube juice. The researchers used an electronic nose and tongue to assess the effect of LAB on the taste of the juices. They observed differences between beverages fermented with different probiotic strains. They found that jujube juice fermented by *L. plantarum* had more aromatic compounds and less volatile sulfur compounds. The taste of the juice containing the *L. plantarum* strain had adequate acidity, which was preferred by consumers.

As there are many different studies on the use of an electronic tongue in evaluating the quality of fruit and vegetable juices, Table 4 below provides examples of studies carried out in the last five years. It should be added that the table includes fewer examples of e-tongue application in the juice industry than was the case with e-nose (Table 2), due to the fact that slightly fewer studies have been completed for e-tongue.

Table 4. Examples of studies carried out in the last five years using the e-tongue to evaluate the quality of fruit and vegetable juices.

Authors, Publication Year	Type of Juice Analysed	Object of Research	Selected Results
Yu et al. (2018) [192]	Chinese bayberry juice	Evaluation of the taste properties and flavour profile of the juice.	E-tongue was used to identify and characterise the flavour profiles of bayberry juice. Significant differences in sweet and bitter taste were observed between the four types of berry juice. It was further shown that total polyphenols, quinic acid, maleic acid, fructose, citric acid, lactic acid, succinic acid, and sucrose made significant contributions to the flavour characteristics of Chinese bayberry juice (the total polyphenols, quinic acid, maleic acid, fructose, citric acid, lactic acid, succinic acid and sucrose made significant contributions to the taste characteristics of the Chinese bayberry juice).
Daikuzono et al. (2019) [193]	Apple juice	Identifying and differentiating between different types of sugars and juice brands.	The e-tongue was able to distinguish between different types of sugars (e.g., glucose, fructose, and sucrose), as well as differentiating between commercial brands of apple juice.

Table 4. Cont.

Authors, Publication Year	Type of Juice Analysed	Object of Research	Selected Results
Wang, Sun (2019) [191]	Apple juice	Analysis of the feasibility of using an electronic tongue in combination with chemometric analysis for the early detection of <i>Zygosaccharomyces rouxii</i> spoilage in apple juice, using the evaluation of taste of the panellists as a reference.	It appeared that the identification of the contaminated juice was completed after 12 h, which is equivalent to the yeast population of less than 2.0 lg colony forming units/mL (identification of the contaminated juice was fulfilled after 12 h, equivalent to the yeast population of less than 2.0 lg colony forming units/mL). At this level, the panellists were unable to discern spoilage. It was therefore concluded that e-tongue appears to be an efficient, rapid, reliable, and cost-effective means of early detection of apple juice spoilage caused by <i>Z. rouxii</i>
Gou et al. (2019) [194]	NFC apple juice	Analysis of the effects of different temperatures (room temperature 25 °C, refrigerator temperature 4 °C, freezing temperature −1.5 °C and freezing temperature −18 °C), on the quality and taste qualities of NFC apple juices over a long storage period (150 days).	It was shown that juices stored at different temperatures had a significant difference in flavour, however juice stored at −1.5 °C showed the greatest similarity to freshly squeezed apple juice.
Benjamin, Gamrasni (2020) [195]	Pomegranate juice	Investigating the effect of high-pressure homogenization (HPH) on the microbiological, nutritional, and organoleptic properties of pomegranate juice for the identification of sample aroma.	Analysis of the effects of heat treatment and HPH processes on the taste of pomegranate juice showed similar taste profiles to fresh juice. However, the taste profile of HPH-treated juice was closer to that of fresh juice than that of heat-treated juice. Furthermore, e-language showed positive correlations with the perception of bitterness and astringency for different pomegranate fruit varieties. Additionally, a reduction in the intensity and type of volatile compounds was found in pomegranate juice after pasteurisation at 90 °C for 10 s compared to fresh juice.
Kovacs et al. (2020) [196]	Apple juice	Evaluation of the interfering effects of selected factors (temperature, memory effect, and cross contamination) on sensor signals during e-language measurement and development of drift correction techniques.	The study confirmed that temperature, cross-contamination, and memory effects affect sensor signals. Three drift correction methods were therefore developed and it was shown that the results could be explored for long-term measurements with the e-tongue.
Vitalis et al. (2021) [197]	Plum juice	Detection of <i>Monilinia</i> spp. contamination in plum juice and quantitative evaluation of this fungal contamination in raw plum juices.	The e-language was able to distinguish between treated groups, but the classification accuracy was higher for samples stored at 24 °C. E-language was found to be an effective method to reduce food waste by quickly determining fruit quality.

Table 4. Cont.

Authors, Publication Year	Type of Juice Analysed	Object of Research	Selected Results
Tan et al. (2021) [198]	Apple/berry juice	Analysis of the influence of the proportion of raw materials used on the sensory quality and antioxidant activity of apple and berry juices.	The blended apple and berry juice was found to have less acidity, astringency and bitterness and improved sensory acceptance. It was also shown that the blended juice could effectively neutralise the flavours of the component juices.
Pardo et al. (2021) [199]	Juice of 'Aliza', a new pomelo and mandarin hybrid	Analysis of the sensory properties of Aliza juice (objective evaluation of the taste profile) and their comparison with orange and red grapefruit juices.	E-lingual tests were carried out using sensors for sweetness, sourness, bitterness, saltiness, umami, and astringency. Significant differences in sourness, bitterness, and umami taste were found between the juices analysed: "Aliza", orange, and grapefruit. Grapefruit juice was found to be significantly more acidic than 'Aliza' juice, while orange juice was less acidic than 'Aliza' juice. Grapefruit juice was also significantly more bitter than 'Aliza' juice; while orange juice was less bitter than 'Aliza' juice. In summary, it was found that all three analysed juices had different taste profiles, with the taste of 'Aliza' juice being in the middle of the range between orange and grapefruit juices.
Zhang et al. (2022) [147]	Strawberry juice	Predicting the increase in total bacterial count in freshly squeezed strawberry juice during cold storage.	In the study, sweetness was chosen to simulate the growth curve of the total bacterial count. It was found that it was possible to predict bacterial growth in freshly squeezed strawberry juice using e-tongue sensors. However, higher predictive accuracy of fruit juice microbiology could be achieved by combining two sensor systems: e-tongue and e-nose.
Wójcik et al. (2022) [200]	Tomato juice	Testing the effectiveness of e-tongue profiling with innovative electrodes.	Tomato juice available in the local shop in two variants, natural and spicy, was used for the study. In addition, controlled additions of various undesirable substances were added to it. Five profiles of each juice were recorded on all electrode variants, allowing the use of the voltammetric signal from the new electrodes to be tested.
Li et al. (2022) [201]	Yunnan <i>Phyllanthus emblica</i> juice	Determination of nutrients and sensory characteristics of home-made raw <i>Yunnan phyllanthus emblica</i> juice, home-made compound <i>Phyllanthus emblica</i> juice, and commercial olive drinks.	The results showed that an electronic tongue can distinguish the taste quality of different olive juices, and the combination of this multisensor system with multivariate statistical analysis and sensory evaluation can provide an excellent reference for optimising the formulation of <i>Phyllanthus emblica</i> juice
Liu et al. (2023) [202]	Melon juice	Analysis of the effects of ultrasonic (US) and ultra-high pressure (UHP) on the taste qualities of melon juice	The sensors in the e-nose individually represented the intensity of sour, salty, fresh, bitter, tart, and sweet. US was shown to be significantly better at retaining melon juice flavour than UHP.

In conclusion, today's electronic tongues are becoming increasingly sophisticated, allowing them to be widely used in the juice industry for the benefit of both producers and consumers.

4. Challenges and Perspectives

Alongside the many potential opportunities for electronic tongues and noses, they will also face various challenges that will affect their further development and widespread use [68,203]. To sum up the topics related to the use of these devices, the prospects and potential challenges can be mentioned:

- Technological scale: improving the technologies used in e-tongues and e-noses is key to increasing their sensitivity, selectivity, and speed. Innovations in nanotechnology, materials or biotechnology can contribute to the development of new, more advanced sensors [29];
- Integration with other systems—e-tongues and e-noses have greater potential when integrated with other measurement systems, such as image analysis or chemical systems. This multi-parametric approach can lead to a better understanding of complex samples and more precise results [19];
- Portability and miniaturization—the development of portable and miniaturised e-tongues and e-noses devices will be key to their widespread use, especially in environmental monitoring or on-site medical diagnostics [21];
- Artificial intelligence and machine learning—the use of advanced data analysis techniques, such as artificial intelligence or machine learning, can help to improve the interpretation of measurement results, identify patterns, and speed up the decision-making process [56];
- Standards and regulations—the introduction and harmonisation of standards and regulations for e-tongues and e-noses can contribute to greater confidence in these technologies and their widespread use in various fields, such as the food industry, medicine, or environmental protection [27];
- Cost—reducing the cost of producing and using e-tongues and e-noses will be important for their wider use, especially in sectors with limited financial resources [92];
- Education and training—introducing training and education programs related to e-tongues and e-noses can help to improve potential users' understanding of these technologies and contribute to their widespread adoption [29];
- Interdisciplinary collaboration—collaboration between scientists, engineers, doctors, and entrepreneurs from different fields can contribute to the further development and innovation in the use of e-tongues and e-noses [29].

These are just a few of the challenges that arise from the development of these advanced devices.

5. Conclusions

Innovative methods to analyse samples faster, more efficiently, and more cost-effectively have long been sought after. Electronic tongues and noses are the kind of devices that can provide as much information as possible about a sample with a single test in an easy way. They are an alternative or complement to complex and costly classical analytical techniques, allowing for the direct examination of samples without the need for prior preparation.

Moreover, they enable the solution of complex research problems that do not depend on just one characteristic of the sample, such as the confirmation of wine authenticity. It should be noted that the best results are achieved when these two devices are used together, as their combination gives the best results.

However, although all the applications presented in this article seem promising for fruit and vegetable juice analysis, electronic tongues and noses are still in the early stages of development and need more time to be widely implemented. Therefore, the subject matter is so interesting and extensive that it is worth exploring through such reviews.

Author Contributions: E.O., M.S. and A.S.-W.—review, investigation, content editing, writing, original draft preparation, designing, analysis, and editing. All the authors contributed to the writing, reviewing, and structuring the work. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Sadílek, T. Consumer Preferences Regarding Food Quality Labels: The Case of Czechia. *Br. Food J.* **2019**, *121*, 2508–2523. [[CrossRef](#)]
2. Yin, S.; Hu, W.; Chen, Y.; Han, F.; Wang, Y.; Chen, M. Chinese Consumer Preferences for Fresh Produce: Interaction between Food Safety Labels and Brands. *Agribusiness* **2019**, *35*, 53–68. [[CrossRef](#)]
3. Górska-Warsewicz, H.; Świątkowska, M.; Krajewski, K. *Marketing Żywności*; Oficyna a Wolters Kluwer Business: Warsaw, Poland, 2013.
4. Rahman, S.M.E.; Mele, M.A.; Lee, Y.-T.; Islam, M.Z. Consumer Preference, Quality, and Safety of Organic and Conventional Fresh Fruits, Vegetables, and Cereals. *Foods* **2021**, *10*, 105. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
5. Dudziak, A.; Zajac, G.; Kuranc, A.; Słowik, T.; Stoma, M.; Szyszlak-Bargłowicz, J. Preferences Of The Consumers Of Cold Meat Market In Lights Of A Survey Research In The Region Of Lublin. *Carpathian J. Food Sci. Technol.* **2018**, *10*, 106–116.
6. Beshai, H.; Sarabha, G.K.; Rathi, P.; Alam, A.U.; Deen, M.J. Freshness Monitoring of Packaged Vegetables. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 7937. [[CrossRef](#)]
7. Barska, A. Kryteria Wyboru Produktów Żywnościowych Przez Młodych Konsumentów z Polski, Czech i Słowacji. *Zagadnienia Ekon. Rolnej* **2013**, *4*, 113–121.
8. Podolak, R.; Whitman, D.; Black, D.G. Factors Affecting Microbial Inactivation during High Pressure Processing in Juices and Beverages: A Review. *J. Food Prot.* **2020**, *83*, 1561–1575. [[CrossRef](#)]
9. Kalisz, S.; Grobelna, A.; Bielecka, M. Zmiany Wybranych Wyróżników Jakościowych Smoothie Jabłko-Jagoda Kamczacka w Trakcie Przechowywania. *Przem. Ferment. Owocowo-Warzywny* **2019**, *63*, 47–49. [[CrossRef](#)]
10. Martinez, P.F.; de Carvalho, M.R.; Mendonça, M.L.M.; Okoshi, M.P.; de Oliveira-Junior, S.A. Antioxidant and Anti-Inflammatory Effects of Orange Juice. *Arq. Bras. Cardiol.* **2021**, *116*, 1137–1138. [[CrossRef](#)]
11. Cano-Lamadrid, M.; Turkiewicz, I.P.; Tkacz, K.; Sánchez-Rodríguez, L.; López-Lluch, D.; Wojdyło, A.; Sendra, E.; Carbonell-Barrachina, A.A. A Critical Overview of Labeling Information of Pomegranate Juice-Based Drinks: Phytochemicals Content and Health Claims. *J. Food Sci.* **2019**, *84*, 886–894. [[CrossRef](#)]
12. Nadulski, R.; Kobus, Z.; Wilczyński, K.; Sobczak, P.; Panasiewicz, M.; Żukiewicz-Sobczak, W.; Szparaga, A. Effect of Extraction Method and Thermo-sonication on Apple Juice Quality. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 3977. [[CrossRef](#)]
13. Manzoor, M.F.; Ahmed, Z.; Ahmad, N.; Aadil, R.M.; Rahaman, A.; Roobab, U.; Rehman, A.; Siddique, R.; Zeng, X.-A.; Siddeeg, A. Novel Processing Techniques and Spinach Juice: Quality and Safety Improvements. *J. Food Sci.* **2020**, *85*, 1018–1026. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
14. Jeantet, R.; Croguennec, T.; Schuck, P.; Brulé, G. *Handbook of Food Science and Technology 1: Food Alteration and Food Quality*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2016.
15. Kaczmarczyk, T.Z.; Żywica, G.; Ichnatowicz, E. The Impact of Changes in the Geometry of a Radial Microturbine Stage on the Efficiency of the Micro CHP Plant Based on ORC. *Energy* **2017**, *137*, 530–543. [[CrossRef](#)]
16. Chavda, D.M.; Parikh, C.; Patel, V.V.; Pandya, P.S. Bitter Bottle Gourd Poisoning: A Case Report and Review of Literature. *J. Fam. Med. Prim. Care* **2022**, *11*, 4042–4044.
17. Okoronkwo, C.U. Food Poisoning of the Infantile Group, Microbiological Standpoint. *Artic. Fulltext Available Aug.* **2020**, *4*, 18.
18. Aneja, K.R.; Dhiman, R.; Aggarwal, N.K.; Kumar, V.; Kaur, M. Microbes Associated with Freshly Prepared Juices of Citrus and Carrots. *Int. J. Food Sci.* **2014**, *2014*, 408085. [[CrossRef](#)]
19. Tkaczyk, M.; Ślusarski, S.; Skrzecz, I. Zastosowanie Elektronicznego Nosa Do Detekcji Lotnych Związków Organicznych Wytwarzanych Przez Grzyby Patogeniczne Dla Roślin. *Sylwan* **2019**, *163*, 551–555.
20. Kaur, J.; Dhiman, D.; Kalia, A. Nanobiotechnological Strategies for Detection of Mycotoxins in Food Products. In *Fungal Cell Factories for Sustainable Nanomaterials Productions and Agricultural Applications*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2023; pp. 511–541.
21. Aheto, J.H.; Huang, X.; Tian, X.; Ren, Y.; Ernest, B.; Alenyorege, E.A.; Dai, C.; Hongyang, T.; Xiaorui, Z.; Wang, P. Multi-Sensor Integration Approach Based on Hyperspectral Imaging and Electronic Nose for Quantitation of Fat and Peroxide Value of Pork Meat. *Anal. Bioanal. Chem.* **2020**, *412*, 1169–1179. [[CrossRef](#)]
22. Tothill, I. Biosensors and Nanomaterials and Their Application for Mycotoxin Determination. *World Mycotoxin J.* **2011**, *4*, 361–374. [[CrossRef](#)]
23. European Food Safety Authority (EFSA). Guidelines on Submission of a Dossier for Safety Evaluation by the EFSA of Active or Intelligent Substances Present in Active and Intelligent Materials and Articles Intended to Come into Contact with Food. *EFSA J.* **2009**, *7*, 1208.

24. German Federal Institute for Risk Assessment (BfR), Department of Chemicals and Product Safety, Berlin, Germany; Beneventi, E.; Tietz, T.; Merkel, S. Risk Assessment of Food Contact Materials. *EFSA J.* **2020**, *18*, e181109.
25. EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ Panel); Koutsoumanis, K.; Allende, A.; Alvarez-Ordóñez, A.; Bolton, D.; Bover-Cid, S.; Chemaly, M.; Davies, R.; De Cesare, A.; Hilbert, F. Update of the List of QPS-Recommended Biological Agents Intentionally Added to Food or Feed as Notified to EFSA 10: Suitability of Taxonomic Units Notified to EFSA until March 2019. *EFSA J.* **2019**, *17*, e05753. [[PubMed](#)]
26. Bosona, T.; Gebresenbet, G. Food Traceability as an Integral Part of Logistics Management in Food and Agricultural Supply Chain. *Food Control* **2013**, *33*, 32–48. [[CrossRef](#)]
27. Sliwinska, M.; Wisniewska, P.; Dymerski, T.; Namiesnik, J.; Wardencki, W. Food Analysis Using Artificial Senses. *J. Agric. Food Chem.* **2014**, *62*, 1423–1448. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
28. Ruiz-Capillas, C.; Herrero, A.M. Impact of Biogenic Amines on Food Quality and Safety. *Foods* **2019**, *8*, 62. [[CrossRef](#)]
29. Labanska, M. Wykorzystanie Elektronicznego Języka Do Analizy Żywności. *Zienn. Pol.* **2021**, *31*, 33–40.
30. Woertz, K.; Tissen, C.; Kleinebudde, P.; Breitzkreutz, J. Performance Qualification of an Electronic Tongue Based on ICH Guideline Q2. *J. Pharm. Biomed. Anal.* **2010**, *51*, 497–506. [[CrossRef](#)]
31. Vincent, J.F.; Bogatyreva, O.A.; Bogatyrev, N.R.; Bowyer, A.; Pahl, A.-K. Biomimetics: Its Practice and Theory. *J. R. Soc. Interface* **2006**, *3*, 471–482. [[CrossRef](#)]
32. Bhushan, B. Biomimetics: Lessons from Nature—an Overview. *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* **2009**, *367*, 1445–1486. [[CrossRef](#)]
33. Bar-Cohen, Y. Biomimetics—Using Nature to Inspire Human Innovation. *Bioinspir. Biomim.* **2006**, *1*, P1–P12. [[CrossRef](#)]
34. Fayemi, P.-E.; Wanieck, K.; Zollfrank, C.; Maranzana, N.; Aoussat, A. Biomimetics: Process, Tools and Practice. *Bioinspir. Biomim.* **2017**, *12*, 011002. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Viry, L.; Levi, A.; Totaro, M.; Mondini, A.; Mattoli, V.; Mazzolai, B.; Beccai, L. Flexible Three-Axial Force Sensor for Soft and Highly Sensitive Artificial Touch. *Adv. Mater.* **2014**, *26*, 2659–2664. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
36. Mahata, C.; Algadi, H.; Lee, J.; Kim, S.; Lee, T. Biomimetic-Inspired Micro-Nano Hierarchical Structures for Capacitive Pressure Sensor Applications. *Measurement* **2020**, *151*, 107095. [[CrossRef](#)]
37. Hartman, J. A Possible Objective Method for the Rapid Estimation of Flavors in Vegetables. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* **1954**, *64*, 335.
38. Moncrieff, R.W. An Instrument for Measuring and Classifying Odors. *J. Appl. Physiol.* **1961**, *16*, 742–749. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
39. Wilkens, W.F.; Hatman, A.D. Cación “An Electronic Analog for the Olfactory”. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **1964**, *116*, 608. [[CrossRef](#)]
40. Persaud, K.; Dodd, G. Analysis of Discrimination Mechanisms in the Mammalian Olfactory System Using a Model Nose. *Nature* **1982**, *299*, 352–355. [[CrossRef](#)]
41. Ikegami, A.; Kaneyasu, M. Olfactory Detection Using Integrated Sensors. In Proceedings of the 3rd International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Philadelphia, PA, USA, 7–11 June 1985; pp. 136–139.
42. Gardner, J.W.; Pearce, T.C.; Friel, S.; Bartlett, P.N.; Blair, N. A Multisensor System for Beer Flavour Monitoring Using an Array of Conducting Polymers and Predictive Classifiers. *Sens. Actuators B Chem.* **1994**, *18*, 240–243. [[CrossRef](#)]
43. Wilson, A.D.; Baietto, M. Applications and Advances in Electronic-Nose Technologies. *Sensors* **2009**, *9*, 5099–5148. [[CrossRef](#)]
44. Göpel, W. Chemical Imaging: I. Concepts and Visions for Electronic and Bioelectronic Noses. *Sens. Actuators B Chem.* **1998**, *52*, 125–142. [[CrossRef](#)]
45. Persaud, K.C.; Bartlett, J.; Pelosi, P. Design Strategies for Gas and Odour Sensors Which Mimic the Olfactory System. In *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?* Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1993; pp. 579–602.
46. Shurmer, H.V. An Electronic Nose: A Sensitive and Discriminating Substitute for a Mammalian Olfactory System. *IEE Proc. G Circuits Devices Syst.* **1990**, *137*, 197–204. [[CrossRef](#)]
47. Röck, F.; Barsan, N.; Weimar, U. Electronic Nose: Current Status and Future Trends. *Chem. Rev.* **2008**, *108*, 705–725. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
48. Craven, M.A.; Gardner, J.W.; Bartlett, P.N. Electronic Noses—Development and Future Prospects. *TrAC Trends Anal. Chem.* **1996**, *15*, 486–493. [[CrossRef](#)]
49. Cieśla, M.; Wójcik, E. Podróbka Czy Oryginał-Nos Elektroniczny Jako Narzędzie Określania Oryginalności Perfum Znanych Marek. *Analit* **2018**, *5*, 34.
50. Gilad, Y.; Lancet, D. Population Differences in the Human Functional Olfactory Repertoire. *Mol. Biol. Evol.* **2003**, *20*, 307–314. [[CrossRef](#)]
51. Bushdid, C.; Magnasco, M.O.; Vosshall, L.B.; Keller, A. Humans Can Discriminate More than 1 Trillion Olfactory Stimuli. *Science* **2014**, *343*, 1370–1372. [[CrossRef](#)]
52. Hartváni, P.; Dalmadi, I.; Knorr, D. Electronic Nose Investigation of Alicyclobacillus Acidoterrestris Inoculated Apple and Orange Juice Treated by High Hydrostatic Pressure. *Food Control* **2013**, *32*, 262–269. [[CrossRef](#)]
53. Shurmer, H.V.; Gardner, J.W. Odour Discrimination with an Electronic Nose. *Sens. Actuators B Chem.* **1992**, *8*, 1–11. [[CrossRef](#)]
54. Freund, M.S.; Lewis, N.S. A Chemically Diverse Conducting Polymer-Based “Electronic Nose”. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **1995**, *92*, 2652–2656. [[CrossRef](#)]
55. Kim, C.; Lee, K.K.; Kang, M.S.; Shin, D.-M.; Oh, J.-W.; Lee, C.-S.; Han, D.-W. Artificial Olfactory Sensor Technology That Mimics the Olfactory Mechanism: A Comprehensive Review. *Biomater. Res.* **2022**, *26*, 40. [[CrossRef](#)]

56. Tan, J.; Xu, J. Applications of Electronic Nose (e-Nose) and Electronic Tongue (e-Tongue) in Food Quality-Related Properties Determination: A Review. *Artif. Intell. Agric* **2020**, *4*, 104–115. [[CrossRef](#)]
57. Karakaya, D.; Ulucan, O.; Turkan, M. Electronic Nose and Its Applications: A Survey. *Int. J. Autom. Comput.* **2020**, *17*, 179–209. [[CrossRef](#)]
58. Shao, X.; Li, H.; Wang, N.; Zhang, Q. Comparison of Different Classification Methods for Analyzing Electronic Nose Data to Characterize Sesame Oils and Blends. *Sensors* **2015**, *15*, 26726–26742. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
59. Leopold, J.H.; Bos, L.D.; Sterk, P.J.; Schultz, M.J.; Fens, N.; Horvath, I.; Bikov, A.; Montuschi, P.; Di Natale, C.; Yates, D.H. Comparison of Classification Methods in Breath Analysis by Electronic Nose. *J. Breath Res.* **2015**, *9*, 046002. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
60. Sanaeifar, A.; ZakiDizaji, H.; Jafari, A.; de la Guardia, M. Early Detection of Contamination and Defect in Foodstuffs by Electronic Nose: A Review. *TrAC Trends Anal. Chem.* **2017**, *97*, 257–271. [[CrossRef](#)]
61. Kim, C.; Raja, I.S.; Lee, J.-M.; Lee, J.H.; Kang, M.S.; Lee, S.H.; Oh, J.-W.; Han, D.-W. Recent Trends in Exhaled Breath Diagnosis Using an Artificial Olfactory System. *Biosensors* **2021**, *11*, 337. [[CrossRef](#)]
62. Jha, S.K.; Yadava, R.D.S.; Hayashi, K.; Patel, N. Recognition and Sensing of Organic Compounds Using Analytical Methods, Chemical Sensors, and Pattern Recognition Approaches. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* **2019**, *185*, 18–31. [[CrossRef](#)]
63. Nazemi, H.; Joseph, A.; Park, J.; Emadi, A. Advanced Micro-and Nano-Gas Sensor Technology: A Review. *Sensors* **2019**, *19*, 1285. [[CrossRef](#)]
64. Gomez, A.H.; Wang, J.; Hu, G.; Pereira, A.G. Monitoring Storage Shelf Life of Tomato Using Electronic Nose Technique. *J. Food Eng.* **2008**, *85*, 625–631. [[CrossRef](#)]
65. Jia, W.; Liang, G.; Wang, Y.; Wang, J. Electronic Noses as a Powerful Tool for Assessing Meat Quality: A Mini Review. *Food Anal. Methods* **2018**, *11*, 2916–2924. [[CrossRef](#)]
66. Lekha, S.; Suchetha, M. Recent Advancements and Future Prospects on E-Nose Sensors Technology and Machine Learning Approaches for Non-Invasive Diabetes Diagnosis: A Review. *IEEE Rev. Biomed. Eng.* **2020**, *14*, 127–138. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
67. Grassi, S.; Benedetti, S.; Magnani, L.; Pianezzola, A.; Buratti, S. Seafood Freshness: E-Nose Data for Classification Purposes. *Food Control* **2022**, *138*, 108994. [[CrossRef](#)]
68. Al-Dayyeni, W.S.; Al-Yousif, S.; Taher, M.M.; Al-Faouri, A.W.; Tahir, N.M.; Jaber, M.M.; Ghabban, F.; Najm, I.A.; Alfadli, I.M.; Ameerbakhsh, O.Z. A Review on Electronic Nose: Coherent Taxonomy, Classification, Motivations, Challenges, Recommendations and Datasets. *IEEE Access* **2021**, *9*, 88535–88551. [[CrossRef](#)]
69. Chen, L.-Y.; Wong, D.-M.; Fang, C.-Y.; Chiu, C.-I.; Chou, T.-I.; Wu, C.-C.; Chiu, S.-W.; Tang, K.-T. Development of an Electronic-Nose System for Fruit Maturity and Quality Monitoring. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI), Chiba, Japan, 13–17 April 2018; IEEE: Piscataway Township, NJ, USA, 2018; pp. 1129–1130.
70. Wasilewski, T.; Migoń, D.; Gębicki, J.; Kamysz, W. Critical Review of Electronic Nose and Tongue Instruments Prospects in Pharmaceutical Analysis. *Anal. Chim. Acta* **2019**, *1077*, 14–29. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
71. Bakar, M.A.A.; Abdullah, A.H.; Sa’ad, F.S.A.; Shukor, S.A.A.; Razak, A.A.A.; Mustafa, M.H. Electronic Nose Calibration Process for Monitoring Atmospheric Hazards in Confined Space Applications. *J. Telecommun. Electron. Comput. Eng. JTEC* **2018**, *10*, 15–19.
72. Kuchmenko, T.; Menzhulina, D.; Shuba, A. Noninvasive Detection of Bacterial Infection in Children Using Piezoelectric E-Nose. *Sensors* **2022**, *22*, 8496. [[CrossRef](#)]
73. De Vincentis, A.; Pennazza, G.; Santonico, M.; Vespasiani-Gentilucci, U.; Galati, G.; Gallo, P.; Vernile, C.; Pedone, C.; Antonelli Incalzi, R.; Picardi, A. Breath-Print Analysis by e-Nose for Classifying and Monitoring Chronic Liver Disease: A Proof-of-Concept Study. *Sci. Rep.* **2016**, *6*, 25337. [[CrossRef](#)]
74. Chen, Q.; Chen, Z.; Liu, D.; He, Z.; Wu, J. Constructing an E-Nose Using Metal-Ion-Induced Assembly of Graphene Oxide for Diagnosis of Lung Cancer via Exhaled Breath. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, *12*, 17713–17724. [[CrossRef](#)]
75. Lee, J.-M.; Choi, E.J.; Chung, J.H.; Lee, K.; Lee, Y.; Kim, Y.-J.; Kim, W.-G.; Yoon, S.H.; Seol, H.Y.; Devaraj, V. A DNA-Derived Phage Nose Using Machine Learning and Artificial Neural Processing for Diagnosing Lung Cancer. *Biosens. Bioelectron.* **2021**, *194*, 113567. [[CrossRef](#)]
76. D’Amico, A.; Pennazza, G.; Santonico, M.; Martinelli, E.; Roscioni, C.; Galluccio, G.; Paolesse, R.; Di Natale, C. An Investigation on Electronic Nose Diagnosis of Lung Cancer. *Lung Cancer* **2010**, *68*, 170–176. [[CrossRef](#)]
77. Wojnowski, W.; Dymerski, T.; Gębicki, J.; Namieśnik, J. Electronic Noses in Medical Diagnostics. *Curr. Med. Chem.* **2019**, *26*, 197–215. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
78. Dragonieri, S.; Quaranta, V.N.; Carratu, P.; Ranieri, T.; Resta, O. Exhaled Breath Profiling by Electronic Nose Enabled Discrimination of Allergic Rhinitis and Extrinsic Asthma. *Biomarkers* **2019**, *24*, 70–75. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
79. Wilson, A.D. Electronic-Nose Applications in Forensic Science and for Analysis of Volatile Biomarkers in the Human Breath. *J. Forensic Sci. Criminol.* **2014**, *1*, 1–21.
80. Ali, B.S. The Application of Nanotechnology in Criminology and Forensic Sciences. *Int. J. Electron. Crime Investig.* **2022**, *6*, 13–18.
81. Zeng, J. Analysis of Analytical Techniques for Fragrances Contained in Perfumes and Cosmetics. In Proceedings of the International Conference on Biometrics, Microelectronic Sensors, and Artificial Intelligence (BMSAI), Sanya, China, 25–27 March 2022; Volume 12252, pp. 79–84.
82. Zorpeykar, S.; Mirzaee-Ghaleh, E.; Karami, H.; Ramedani, Z.; Wilson, A.D. Electronic Nose Analysis and Statistical Methods for Investigating Volatile Organic Compounds and Yield of Mint Essential Oils Obtained by Hydrodistillation. *Chemosensors* **2022**, *10*, 486. [[CrossRef](#)]

83. Concina, I.; Falasconi, M.; Gobbi, E.; Bianchi, F.; Musci, M.; Mattarozzi, M.; Pardo, M.; Mangia, A.; Careri, M.; Sberveglieri, G. Early Detection of Microbial Contamination in Processed Tomatoes by Electronic Nose. *Food Control* **2009**, *20*, 873–880. [[CrossRef](#)]
84. Drake, M.A.; Gerard, P.D.; Kleinhenz, J.P.; Harper, W.J. Application of an Electronic Nose to Correlate with Descriptive Sensory Analysis of Aged Cheddar Cheese. *LWT-Food Sci. Technol.* **2003**, *36*, 13–20. [[CrossRef](#)]
85. Chen, H.; Huo, D.; Zhang, J. Gas Recognition in E-Nose System: A Review. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.* **2022**, *16*, 169–184. [[CrossRef](#)]
86. Pobkrut, T.; Eamsa-Ard, T.; Kercharoen, T. Sensor Drone for Aerial Odor Mapping for Agriculture and Security Services. In Proceedings of the 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, 28 June–1 July 2016; IEEE: Piscataway Township, NJ, USA, 2016; pp. 1–5.
87. Wilson, A.D. Diverse Applications of Electronic-Nose Technologies in Agriculture and Forestry. *Sensors* **2013**, *13*, 2295–2348. [[CrossRef](#)]
88. Chen, L.-Y.; Wu, C.-C.; Chou, T.-I.; Chiu, S.-W.; Tang, K.-T. Development of a Dual MOS Electronic Nose/Camera System for Improving Fruit Ripeness Classification. *Sensors* **2018**, *18*, 3256. [[CrossRef](#)]
89. Krzyżewska, I.; Kozarska, A. E-Nos (Elektroniczny Nos). *LAB Lab. Apar. Badania* **2016**, *21*, 20–28.
90. Pawlak-Lemańska, K.; Nowosad, K.; Chmielewski, J. Obiektywna Ocena Zapachu z Zastosowaniem Elektronicznego Nosa. *Zesz. Nauk. Ekon. W Poznaniu* **2012**, *234*, 107–123.
91. Tonacci, A.; Sansone, F.; Conte, R.; Domenici, C. Use of Electronic Noses in Seawater Quality Monitoring: A Systematic Review. *Biosensors* **2018**, *8*, 115. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
92. Matatagui, D.; Bahos, F.A.; Gràcia, I.; Horrillo, M.d.C. Portable Low-Cost Electronic Nose Based on Surface Acoustic Wave Sensors for the Detection of BTX Vapors in Air. *Sensors* **2019**, *19*, 5406. [[CrossRef](#)]
93. Wang, Q.; Song, K.; Guo, T. Portable Vehicular Electronic Nose System for Detection of Automobile Exhaust. In Proceedings of the 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, France, 1–3 September 2010; IEEE: Piscataway Township, NJ, USA, 2010; pp. 1–5.
94. De Vito, S.; Piga, M.; Martinotto, L.; Di Francia, G. CO, NO₂ and NO_x Urban Pollution Monitoring with on-Field Calibrated Electronic Nose by Automatic Bayesian Regularization. *Sens. Actuators B Chem.* **2009**, *143*, 182–191. [[CrossRef](#)]
95. He, J.; Xu, L.; Wang, P.; Wang, Q. A High Precise E-Nose for Daily Indoor Air Quality Monitoring in Living Environment. *Integration* **2017**, *58*, 286–294. [[CrossRef](#)]
96. Mumyakmaz, B.; Karabacak, K. An E-Nose-Based Indoor Air Quality Monitoring System: Prediction of Combustible and Toxic Gas Concentrations. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* **2015**, *23*, 729–740. [[CrossRef](#)]
97. The E-Nose Will Detect Sources of Unpleasant Odours. Available online: <https://pwr.edu.pl/en/university/news/the-e-nose-will-detect-sources-of-unpleasant-odours-10510.html> (accessed on 26 April 2023).
98. Mujahid, A.; Dickert, F.L. Monitoring Automotive Oil Degradation: Analytical Tools and Onboard Sensing Technologies. *Anal. Bioanal. Chem.* **2012**, *404*, 1197–1209. [[CrossRef](#)]
99. Lamagna, A.; Reich, S.; Rodriguez, D.; Boselli, A.; Cicerone, D. The Use of an Electronic Nose to Characterize Emissions from a Highly Polluted River. *Sens. Actuators B Chem.* **2008**, *131*, 121–124. [[CrossRef](#)]
100. Wang, J. Electrochemical Sensing of Explosives. *Electroanal. Int. J. Devoted Fundam. Pract. Asp. Electroanal.* **2007**, *19*, 415–423.
101. Loutfi, A.; Coradeschi, S.; Mani, G.K.; Shankar, P.; Rayappan, J.B.B. Electronic Noses for Food Quality: A Review. *J. Food Eng.* **2015**, *144*, 103–111. [[CrossRef](#)]
102. Ordukaya, E.; Karlik, B. Quality Control of Olive Oils Using Machine Learning and Electronic Nose. *J. Food Qual.* **2017**, *2017*, 9272404. [[CrossRef](#)]
103. Chatterjee, D.; Bhattacharjee, P.; Bhattacharyya, N. Development of Methodology for Assessment of Shelf-Life of Fried Potato Wedges Using Electronic Noses: Sensor Screening by Fuzzy Logic Analysis. *J. Food Eng.* **2014**, *133*, 23–29. [[CrossRef](#)]
104. Giovenzana, V.; Beghi, R.; Buratti, S.; Civelli, R.; Guidetti, R. Monitoring of Fresh-Cut *Valerianella Locusta Laterr.* Shelf Life by Electronic Nose and VIS–NIR Spectroscopy. *Talanta* **2014**, *120*, 368–375. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
105. Wojnowski, W.; Majchrzak, T.; Dymerski, T.; Gebicki, J.; Namieśnik, J. Portable Electronic Nose Based on Electrochemical Sensors for Food Quality Assessment. *Sensors* **2017**, *17*, 2715. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
106. Biondi, E.; Blasioli, S.; Galeone, A.; Spinelli, F.; Cellini, A.; Lucchese, C.; Braschi, I. Detection of Potato Brown Rot and Ring Rot by Electronic Nose: From Laboratory to Real Scale. *Talanta* **2014**, *129*, 422–430. [[CrossRef](#)]
107. Guohua, H.; Yuling, W.; Dandan, Y.; Wenwen, D.; Linshan, Z.; Lvye, W. Study of Peach Freshness Predictive Method Based on Electronic Nose. *Food Control* **2012**, *28*, 25–32. [[CrossRef](#)]
108. Balasubramanian, S.; Panigrahi, S.; Logue, C.M.; Gu, H.; Marchello, M. Neural Networks-Integrated Metal Oxide-Based Artificial Olfactory System for Meat Spoilage Identification. *J. Food Eng.* **2009**, *91*, 91–98. [[CrossRef](#)]
109. Kim, C.; Kim, S.-J.; Lee, Y.; Nguyen, T.M.; Lee, J.-M.; Moon, J.-S.; Han, D.-W.; Oh, J.-W. A Phage-and Colorimetric Sensor-Based Artificial Nose Model for Banana Ripening Analysis. *Sens. Actuators B Chem.* **2022**, *362*, 131763. [[CrossRef](#)]
110. El Barbri, N.; Llobet, E.; El Bari, N.; Correig, X.; Bouchikhi, B. Application of a Portable Electronic Nose System to Assess the Freshness of Moroccan Sardines. *Mater. Sci. Eng. C* **2008**, *28*, 666–670. [[CrossRef](#)]

111. Lee, J.-M.; Lee, Y.; Devaraj, V.; Nguyen, T.M.; Kim, Y.-J.; Kim, Y.H.; Kim, C.; Choi, E.J.; Han, D.-W.; Oh, J.-W. Investigation of Colorimetric Biosensor Array Based on Programmable Surface Chemistry of M13 Bacteriophage towards Artificial Nose for Volatile Organic Compound Detection: From Basic Properties of the Biosensor to Practical Application. *Biosens. Bioelectron.* **2021**, *188*, 113339. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
112. Hong, X.; Wang, J. Discrimination and Prediction of Pork Freshness by E-Nose. In Proceedings of the Computer and Computing Technologies in Agriculture V: 5th IFIP TC 5/SIG 5.1 Conference, CCTA 2011, Beijing, China, 29–31 October 2011; Proceedings, Part III 5. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012; pp. 1–14.
113. Bhattacharyya, N.; Seth, S.; Tudu, B.; Tamuly, P.; Jana, A.; Ghosh, D.; Bandyopadhyay, R.; Bhuyan, M.; Sabhapandit, S. Detection of Optimum Fermentation Time for Black Tea Manufacturing Using Electronic Nose. *Sens. Actuators B Chem.* **2007**, *122*, 627–634. [[CrossRef](#)]
114. Li, Z.; Wang, N.; Vigneault, C. Electronic Nose and Electronic Tongue in Food Production and Processing. *Stewart Postharvest Rev.* **2006**, *4*, 1–6.
115. Tan, J.; Kerr, W.L. Determining Degree of Roasting in Cocoa Beans by Artificial Neural Network (ANN)-Based Electronic Nose System and Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS). *J. Sci. Food Agric.* **2018**, *98*, 3851–3859. [[CrossRef](#)]
116. Vestergaard, J.S.; Martens, M.; Turkki, P. Application of an Electronic Nose System for Prediction of Sensory Quality Changes of a Meat Product (Pizza Topping) during Storage. *LWT-Food Sci. Technol.* **2007**, *40*, 1095–1101. [[CrossRef](#)]
117. Penza, M.; Cassano, G. Recognition of Adulteration of Italian Wines by Thin-Film Multisensor Array and Artificial Neural Networks. *Anal. Chim. Acta* **2004**, *509*, 159–177. [[CrossRef](#)]
118. Tian, X.; Wang, J.; Cui, S. Analysis of Pork Adulteration in Minced Mutton Using Electronic Nose of Metal Oxide Sensors. *J. Food Eng.* **2013**, *119*, 744–749. [[CrossRef](#)]
119. García, M.; Alexandre, M.; Gutiérrez, J.; Horrillo, M.C. Electronic Nose for Ham Discrimination. *Sens. Actuators B Chem.* **2006**, *114*, 418–422. [[CrossRef](#)]
120. Luo, D.; Hosseini, H.G.; Stewart, J.R. Application of ANN with Extracted Parameters from an Electronic Nose in Cigarette Brand Identification. *Sens. Actuators B Chem.* **2004**, *99*, 253–257. [[CrossRef](#)]
121. Rajamäki, T.; Alakomi, H.-L.; Ritvanen, T.; Skyttä, E.; Smolander, M.; Ahvenainen, R. Application of an Electronic Nose for Quality Assessment of Modified Atmosphere Packaged Poultry Meat. *Food Control* **2006**, *17*, 5–13. [[CrossRef](#)]
122. Poyatos-Racionero, E.; Ros-Lis, J.V.; Vivancos, J.-L.; Martínez-Manez, R. Recent Advances on Intelligent Packaging as Tools to Reduce Food Waste. *J. Clean. Prod.* **2018**, *172*, 3398–3409. [[CrossRef](#)]
123. Compagnone, D.; Faieta, M.; Pizzoni, D.; Di Natale, C.; Paolesse, R.; Van Caelenberg, T.; Beheydt, B.; Pittia, P. Quartz Crystal Microbalance Gas Sensor Arrays for the Quality Control of Chocolate. *Sens. Actuators B Chem.* **2015**, *207*, 1114–1120. [[CrossRef](#)]
124. Valdez, L.F.; Gutiérrez, J.M. Chocolate Classification by an Electronic Nose with Pressure Controlled Generated Stimulation. *Sensors* **2016**, *16*, 1745. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
125. Shi, Z.; Yu, T.; Zhao, Q.; Li, Y.; Lan, Y. Comparison of Algorithms for an Electronic Nose in Identifying Liquors. *J. Bionic Eng.* **2008**, *5*, 253–257. [[CrossRef](#)]
126. Siadat, M.; Losson, E.; Ghasemi-Varnamkhasti, M.; Mohtasebi, S.S. Application of Electronic Nose to Beer Recognition Using Supervised Artificial Neural Networks. In Proceedings of the 2014 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Metz, France, 3–5 November 2014; IEEE: Piscataway Township, NJ, USA, 2014; pp. 640–645.
127. Sánchez, C.; Lozano, J.; Santos, J.P.; Azabal, A.; Ruiz-Valdepeñas, S. Discrimination of Aromas in Beer with Electronic Nose. In Proceedings of the 2018 Spanish Conference on Electron Devices (CDE), Salamanca, Spain, 14–16 November 2018; IEEE: Piscataway Township, NJ, USA, 2018; pp. 1–4.
128. Flambeau, K.J.; Lee, W.-J.; Yoon, J. Discrimination and Geographical Origin Prediction of Washed Specialty Bourbon Coffee from Different Coffee Growing Areas in Rwanda by Using Electronic Nose and Electronic Tongue. *Food Sci. Biotechnol.* **2017**, *26*, 1245–1254. [[CrossRef](#)]
129. Hegazi, N.M.; El-Shamy, S.; Fahmy, H.; Farag, M.A. Pomegranate Juice as a Super-Food: A Comprehensive Review of Its Extraction, Analysis, and Quality Assessment Approaches. *J. Food Compos. Anal.* **2021**, *97*, 103773. [[CrossRef](#)]
130. Wahia, H.; Zhou, C.; Mustapha, A.T.; Amanor-Atiemoh, R.; Mo, L.; Fakayode, O.A.; Ma, H. Storage Effects on the Quality Quartet of Orange Juice Submitted to Moderate Thermosonication: Predictive Modeling and Odor Fingerprinting Approach. *Ultrason. Sonochem.* **2020**, *64*, 104982. [[CrossRef](#)]
131. Rasekh, M.; Karami, H. E-Nose Coupled with an Artificial Neural Network to Detection of Fraud in Pure and Industrial Fruit Juices. *Int. J. Food Prop.* **2021**, *24*, 592–602. [[CrossRef](#)]
132. Zhang, J.; Pan, L.; Tu, K. Aroma in Freshly Squeezed Strawberry Juice during Cold Storage Detected by E-Nose, HS-SPME-GC-MS and GC-IMS. *J. Food Meas. Charact.* **2023**, 1–14. [[CrossRef](#)]
133. Wang, L.; Wang, P.; Deng, W.; Cai, J.; Chen, J. Evaluation of Aroma Characteristics of Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) Juice Using Gas Chromatography-Mass Spectrometry and Electronic Nose. *LWT* **2019**, *108*, 400–406. [[CrossRef](#)]
134. Liu, Y.; He, C.; Song, H. Comparison of Fresh Watermelon Juice Aroma Characteristics of Five Varieties Based on Gas Chromatography-Olfactometry-Mass Spectrometry. *Food Res. Int.* **2018**, *107*, 119–129. [[CrossRef](#)]
135. Cao, W.; Liu, C.; Jia, P. Feature Extraction and Classification of Citrus Juice by Using an Enhanced L-KSVD on Data Obtained from Electronic Nose. *Sensors* **2019**, *19*, 916. [[CrossRef](#)]

136. Niu, Y.; Wang, R.; Xiao, Z.; Zhu, J.; Sun, X.; Wang, P. Characterization of Ester Odorants of Apple Juice by Gas Chromatography-Olfactometry, Quantitative Measurements, Odour Threshold, Aroma Intensity and Electronic Nose. *Food Res. Int.* **2019**, *120*, 92–101. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
137. Cai, W.; Tang, F.; Zhao, X.; Guo, Z.; Zhang, Z.; Dong, Y.; Shan, C. Different Lactic Acid Bacteria Strains Affecting the Flavor Profile of Fermented Jujube Juice. *J. Food Process. Preserv.* **2019**, *43*, e14095. [[CrossRef](#)]
138. Zhao, W.; Sun, Y.; Ma, Y.; Zhao, X. Dense Phase Carbon Dioxide Treatment of Tomato Juice: Effect on Physico-Chemical Properties, Phenolic Composition, Lycopene Isomerisation and in Vitro Bioaccessibility. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2019**, *54*, 1658–1669. [[CrossRef](#)]
139. Rasekh, M.; Karami, H. Application of Electronic Nose with Chemometrics Methods to the Detection of Juices Fraud. *J. Food Process. Preserv.* **2021**, *45*, e15432. [[CrossRef](#)]
140. Nomura, M.; Osada, E.; Tokita, T.; Iwamoto, T.; Manome, Y. Measurement and Differentiation of Banana Juice Scent Using an Electronic Nose FF-2A. *PeerJ* **2021**, *9*, e10638. [[CrossRef](#)]
141. Lan, T.; Bao, S.; Wang, J.; Ge, Q.; Zhang, H.; Yang, W.; Sun, X.; Ma, T. Shelf Life of Non-Industrial Fresh Mango Juice: Microbial Safety, Nutritional and Sensory Characteristics. *Food Biosci.* **2021**, *42*, 101060. [[CrossRef](#)]
142. Wang, Z.; Dou, R.; Yang, R.; Cai, K.; Li, C.; Li, W. Changes in Phenols, Polysaccharides and Volatile Profiles of Noni (*Morinda citrifolia* L.) Juice during Fermentation. *Molecules* **2021**, *26*, 2604. [[CrossRef](#)]
143. Zhang, L.; Zha, M.; Li, S.; Zong, W. Changes on Some Quality Characteristics of Jujube Juice with Enzymatic Hydrolysis Prior to *Lactobacillus Plantarum* Fermentation. *J. Food Meas. Charact.* **2022**, *16*, 3196–3207. [[CrossRef](#)]
144. Liu, Y.; Yang, C.; Wang, Q.; Zhang, J.; Zhang, L. Identification and Confirmation of Key Compounds Causing Cooked Off-Flavor in Heat-Treated Tomato Juice. *J. Food Sci.* **2022**, *87*, 2515–2526. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
145. Wang, J.; Wei, B.-C.; Wang, X.; Zhang, Y.; Gong, Y.-J. Aroma Profiles of Sweet Cherry Juice Fermented by Different Lactic Acid Bacteria Determined through Integrated Analysis of Electronic Nose and Gas Chromatography–Ion Mobility Spectrometry. *Front. Microbiol.* **2023**, *14*, 1113594. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
146. Bao, S.; Yin, D.; Zhao, Q.; Zhou, Y.; Hu, Y.; Sun, X.; Liu, X.; Ma, T. Comprehensive Evaluation of the Effect of Five Sterilization Methods on the Quality of Black Carrot Juice Based on PCA, TOPSIS and GRA Models. *Food Chem. X* **2023**, *17*, 100604. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
147. Zhang, J.-W.; Pan, L.-Q.; Tu, K. Growth Prediction of the Total Bacterial Count in Freshly Squeezed Strawberry Juice during Cold Storage Using Electronic Nose and Electronic Tongue. *Sensors* **2022**, *22*, 8205. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
148. Hotel, O.; Poli, J.-P.; Mer-Calfati, C.; Scorsone, E.; Saada, S. A Review of Algorithms for SAW Sensors E-Nose Based Volatile Compound Identification. *Sens. Actuators B Chem.* **2018**, *255*, 2472–2482. [[CrossRef](#)]
149. Tian, X.; Wang, J.; Ma, Z.; Li, M.; Wei, Z. Combination of an E-Nose and an E-Tongue for Adulteration Detection of Minced Mutton Mixed with Pork. *J. Food Qual.* **2019**, *2019*, 4342509. [[CrossRef](#)]
150. Xu, M.; Wang, J.; Zhu, L. Tea Quality Evaluation by Applying E-Nose Combined with Chemometrics Methods. *J. Food Sci. Technol.* **2021**, *58*, 1549–1561. [[CrossRef](#)]
151. Latha, R.S.; Lakshmi, P.K. Electronic Tongue: An Analytical Gustatory Tool. *J. Adv. Pharm. Technol. Res.* **2012**, *3*, 3–8.
152. Riul, A.; Dantas, C.A.R.; Miyazaki, C.M.; Oliveira, O.N. Recent Advances in Electronic Tongues. *Analyst* **2010**, *135*, 2481–2495. [[CrossRef](#)]
153. Vlasov, Y.; Legin, A.; Rudnitskaya, A.; Di Natale, C.; D’amico, A. Nonspecific Sensor Arrays (“Electronic Tongue”) for Chemical Analysis of Liquids (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.* **2005**, *77*, 1965–1983. [[CrossRef](#)]
154. Ciosek, P.; Wroblewski, W. Sensor Arrays for Liquid Sensing—Electronic Tongue Systems. *Analyst* **2007**, *132*, 963–978. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
155. Toko, K. Taste Sensor with Global Selectivity. *Mater. Sci. Eng. C* **1996**, *4*, 69–82. [[CrossRef](#)]
156. Peris, M.; Escuder-Gilabert, L. A 21st Century Technique for Food Control: Electronic Noses. *Anal. Chim. Acta* **2009**, *638*, 1–15. [[CrossRef](#)]
157. Tahara, Y.; Toko, K. Electronic Tongues—A Review. *IEEE Sens. J.* **2013**, *13*, 3001–3011. [[CrossRef](#)]
158. Podrażka, M.; Bączyńska, E.; Kundys, M.; Jeleń, P.S.; Witkowska Nery, E. Electronic Tongue—A Tool for All Tastes? *Biosensors* **2017**, *8*, 3. [[CrossRef](#)]
159. Jiang, H.; Zhang, M.; Bhandari, B.; Adhikari, B. Application of Electronic Tongue for Fresh Foods Quality Evaluation: A Review. *Food Rev. Int.* **2018**, *34*, 746–769. [[CrossRef](#)]
160. Walliczek-Dworschak, U.; Hummel, T. The Human Sense of Olfaction. *Facial Plast. Surg.* **2017**, *33*, 396–404. [[PubMed](#)]
161. Stevenson, R.J. An Initial Evaluation of the Functions of Human Olfaction. *Chem. Senses* **2010**, *35*, 3–20. [[CrossRef](#)]
162. Aouadi, B.; Zaukuu, J.-L.Z.; Vitális, F.; Bodor, Z.; Fehér, O.; Gillay, Z.; Bazar, G.; Kovacs, Z. Historical Evolution and Food Control Achievements of near Infrared Spectroscopy, Electronic Nose, and Electronic Tongue—Critical Overview. *Sensors* **2020**, *20*, 5479. [[CrossRef](#)]
163. Gupta, H.; Sharma, A.; Kumar, S.; Roy, S.K. E-Tongue: A Tool for Taste Evaluation. *Recent Pat. Drug Deliv. Formul.* **2010**, *4*, 82–89. [[CrossRef](#)]
164. Wu, X.; Tahara, Y.; Yatabe, R.; Toko, K. Taste Sensor: Electronic Tongue with Lipid Membranes. *Anal. Sci.* **2020**, *36*, 147–159. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

165. Osmólska, E.; Stoma, M.; Starek-Wójcicka, A. Application of Biosensors, Sensors, and Tags in Intelligent Packaging Used for Food Products—A Review. *Sensors* **2022**, *22*, 9956. [CrossRef] [PubMed]
166. Kassal, P.; Steinberg, M.D.; Steinberg, I.M. Wireless Chemical Sensors and Biosensors: A Review. *Sens. Actuators B Chem.* **2018**, *266*, 228–245. [CrossRef]
167. Guedes, M.D.V.; Marques, M.S.; Guedes, P.C.; Contri, R.V.; Kulkamp Guerreiro, I.C. The Use of Electronic Tongue and Sensory Panel on Taste Evaluation of Pediatric Medicines: A Systematic Review. *Pharm. Dev. Technol.* **2021**, *26*, 119–137. [CrossRef]
168. Titova, T.; Nachev, V. “Electronic Tongue” in the Food Industry. *Food Sci. Appl. Biotechnol.* **2020**, *3*, 71–76. [CrossRef]
169. Cho, S.; Moazzem, M.S. Recent Applications of Potentiometric Electronic Tongue and Electronic Nose in Sensory Evaluation. *Prev. Nutr. Food Sci.* **2022**, *27*, 354–364. [CrossRef]
170. Gharibzahedi, S.M.T.; Barba, F.J.; Zhou, J.; Wang, M.; Altintas, Z. Electronic Sensor Technologies in Monitoring Quality of Tea: A Review. *Biosensors* **2022**, *12*, 356. [CrossRef]
171. Apetrei, I.M.; Apetrei, C. Application of Voltammetric E-Tongue for the Detection of Ammonia and Putrescine in Beef Products. *Sens. Actuators B Chem.* **2016**, *234*, 371–379. [CrossRef]
172. Lvova, L. Electronic Tongue Principles and Applications in the Food Industry. In *Electronic Noses and Tongues in Food Science*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2016; pp. 151–160.
173. Peri, C. The Universe of Food Quality. *Food Qual. Prefer.* **2006**, *17*, 3–8. [CrossRef]
174. Legin, A.; Rudnitskaya, A.; Vlasov, Y.; Di Natale, C.; Davide, F.; D’Amico, A. Tasting of Beverages Using an Electronic Tongue. *Sens. Actuators B Chem.* **1997**, *44*, 291–296. [CrossRef]
175. Winqvist, F.; Holmin, S.; Krantz-Rülcker, C.; Wide, P.; Lundström, I. A Hybrid Electronic Tongue. *Anal. Chim. Acta* **2000**, *406*, 147–157. [CrossRef]
176. Wadehra, A.; Patil, P.S. Application of Electronic Tongues in Food Processing. *Anal. Methods* **2016**, *8*, 474–480. [CrossRef]
177. Wróblewski, W. ELEKTRONICZNY JEZYK. Available online: <http://www.konwersatorium.pw.edu.pl/konspekty/> (accessed on 24 April 2023).
178. Bougrini, M.; Tahri, K.; Haddi, Z.; El Bari, N.; Llobet, E.; Jaffrezic-Renault, N.; Bouchikhi, B. Aging Time and Brand Determination of Pasteurized Milk Using a Multisensor E-Nose Combined with a Voltammetric e-Tongue. *Mater. Sci. Eng. C* **2014**, *45*, 348–358. [CrossRef] [PubMed]
179. Aguinaga Bósquez, J.P.; Kovacs, Z.; Gillay, Z.; Bázár, G.; Palkó, C.; Hingyi, H.; Csavajda, É.; Üveges, M.; Jókainé Szatura, Z.; Barbulescu, I.D. Evaluating the Effect of a Brewery By-Product as Feed Supplementation on the Quality of Eggs by Means of a Human Panel and E-Tongue and E-Nose Analysis. *Chemosensors* **2021**, *9*, 213. [CrossRef]
180. Cheng, L.; Wang, Y.; Zhang, J.; Xu, L.; Zhou, H.; Wei, K.; Peng, L.; Zhang, J.; Liu, Z.; Wei, X. Integration of Non-Targeted Metabolomics and E-Tongue Evaluation Reveals the Chemical Variation and Taste Characteristics of Five Typical Dark Teas. *LWT* **2021**, *150*, 111875. [CrossRef]
181. Ruengdech, A.; Siripatrawan, U.; Sangnark, A.; Benedetti, S.; Buratti, S. Rapid Evaluation of Phenolic Compounds and Antioxidant Activity of Mulberry Leaf Tea during Storage Using Electronic Tongue Coupled with Chemometrics. *J. Berry Res.* **2019**, *9*, 563–574. [CrossRef]
182. Lamas, S.; Peres, A.M.; Pereira, J.A.; Rodrigues, N. An Electronic Tongue as a Tool for Discriminating Canned Tuna with Different Coating Oils. In *Livro de Resumos do XV Encontro de Química dos Alimentos: Estratégias para a Excelência, Autenticidade, Segurança e Sustentabilidade Alimentar*; Câmara, J.S., Pereira, J.A.M., Gouveia, R.P., Eds.; Universidade da Madeira: Funchal, Madeira, 2021; pp. 417–418.
183. Winqvist, F. Voltammetric Electronic Tongues—Basic Principles and Applications. *Microchim. Acta* **2008**, *163*, 3–10. [CrossRef]
184. Schwarzböck, T. Market Review on Available Instruments for Odour Measurement. Report. Project Acronym: ODOCO-ARTNOSE. Berlin, Germany. 2012. Available online: <https://publications.kompetenz-wasser.de/en/publication/492/> (accessed on 26 April 2023).
185. Fukushima, K.L.; Scagion, V.P.; Facure, M.H.M.; Pinheiro, A.C.M.; Correa, D.S.; Nunes, C.A.; Oliveira, J.E. Development of an Electronic Tongue Based on a Nanocomposite for Discriminating Flavor Enhancers and Commercial Salts. *IEEE Sens. J.* **2020**, *21*, 1250–1256. [CrossRef]
186. Haddi, Z.; Mabrouk, S.; Bougrini, M.; Tahri, K.; Sghaier, K.; Barhoumi, H.; El Bari, N.; Maaref, A.; Jaffrezic-Renault, N.; Bouchikhi, B. E-Nose and e-Tongue Combination for Improved Recognition of Fruit Juice Samples. *Food Chem.* **2014**, *150*, 246–253. [CrossRef]
187. Fung, F.; Wang, H.-S.; Menon, S. Food Safety in the 21st Century. *Biomed. J.* **2018**, *41*, 88–95. [CrossRef]
188. Rizou, M.; Galanakis, I.M.; Aldawoud, T.M.; Galanakis, C.M. Safety of Foods, Food Supply Chain and Environment within the COVID-19 Pandemic. *Trends Food Sci. Technol.* **2020**, *102*, 293–299. [CrossRef] [PubMed]
189. Hong, X.; Wang, J. Application of E-Nose and e-Tongue to Measure the Freshness of Cherry Tomatoes Squeezed for Juice Consumption. *Anal. Methods* **2014**, *6*, 3133–3138. [CrossRef]
190. Qiu, S.; Wang, J.; Gao, L. Discrimination and Characterization of Strawberry Juice Based on Electronic Nose and Tongue: Comparison of Different Juice Processing Approaches by LDA, PLSR, RF, and SVM. *J. Agric. Food Chem.* **2014**, *62*, 6426–6434. [CrossRef] [PubMed]
191. Wang, H.; Sun, H. Potential Use of Electronic Tongue Coupled with Chemometrics Analysis for Early Detection of the Spoilage of *Zygosaccharomyces rouxii* in Apple Juice. *Food Chem.* **2019**, *290*, 152–158. [CrossRef]

192. Yu, H.; Zhang, Y.; Zhao, J.; Tian, H. Taste Characteristics of Chinese Bayberry Juice Characterized by Sensory Evaluation, Chromatography Analysis, and an Electronic Tongue. *J. Food Sci. Technol.* **2018**, *55*, 1624–1631. [[CrossRef](#)]
193. Daikuzono, C.M.; Delaney, C.; Morrin, A.; Diamond, D.; Florea, L.; Oliveira, O.N. Paper Based Electronic Tongue—a Low-Cost Solution for the Distinction of Sugar Type and Apple Juice Brand. *Analyst* **2019**, *144*, 2827–2832. [[CrossRef](#)]
194. Gou, X.; Tian, Y.; Yang, X.; Sun, L.; Guo, Y. Freezing Point Temperature Is in Favor of Not-from-Concentrate Apple Juice Storage. *Food Sci. Nutr.* **2019**, *7*, 2242–2251. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
195. Benjamin, O.; Gamrasni, D. Microbial, Nutritional, and Organoleptic Quality of Pomegranate Juice Following High-Pressure Homogenization and Low-Temperature Pasteurization. *J. Food Sci.* **2020**, *85*, 592–599. [[CrossRef](#)]
196. Kovacs, Z.; Szöllhosi, D.; Zaukuu, J.-L.Z.; Bodor, Z.; Vitalis, F.; Aouadi, B.; Zsom-Muha, V.; Gillay, Z. Factors Influencing the Long-Term Stability of Electronic Tongue and Application of Improved Drift Correction Methods. *Biosensors* **2020**, *10*, 74. [[CrossRef](#)]
197. Vitalis, F.; Tjandra Nugraha, D.; Aouadi, B.; Aguinaga Bósquez, J.P.; Bodor, Z.; Zaukuu, J.-L.Z.; Kocsis, T.; Zsom-Muha, V.; Gillay, Z.; Kovacs, Z. Detection of Monilia Contamination in Plum and Plum Juice with NIR Spectroscopy and Electronic Tongue. *Chemosensors* **2021**, *9*, 355. [[CrossRef](#)]
198. Tan, C.; Li, J.; Xu, C.; Meng, H.; Feng, Y. Effects of Raw Materials Proportions on the Sensory Quality and Antioxidant Activities of Apple/Berry Juice. *Food Sci. Technol.* **2021**, *42*. [[CrossRef](#)]
199. Pardo, H.; Abiola Owoyemi, O.B.; Goldenberg, L.; Yaniv, Y.; Doron-Faigenboim, A.; Carmi, N.; Porat, R. Sensory Analysis of a New Citrus Juice Made from 'Aliza' Fruit: A New Pomelo x Mandarin Hybrid. *J. Food Sci. Nutr. Res.* **2021**, *4*, 01–011. [[CrossRef](#)]
200. Wójcik, S.; Górski, Ł.; Baś, B.; Jakubowska, M. Electrochemical Profiling of Tomato Juice Using a New Combined Metallic and Glassy Carbon Electronic Tongue. In Proceedings of the 32nd International Conference On Diamond & Carbon Materials (DIAM 2022), Mallorca, Spain, 10–14 September 2022.
201. Ruiting, L.; Linxian, S.; Qing, N.; Huiqiong, Z.; Xian, B.; Wen, Z.; Yan, J. Evaluation of Taste Quality of Yunnan *Phyllanthus Emblica* Juice Based on Electronic Tongue Technology. *Mod. Food Sci. Technol.* **2022**, *38*, 267–274.
202. Liu, X.; Zhang, C.; Wang, H.; Wang, Y.; Zhu, D.; Liu, H. Ultrasonic Treatment Maintains the Flavor of the Melon Juice. *Ultrason. Sonochem.* **2023**, *92*, 106284. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
203. Modesti, M.; Taglieri, I.; Bianchi, A.; Tonacci, A.; Sansone, F.; Bellincontro, A.; Venturi, F.; Sanmartin, C. E-Nose and Olfactory Assessment: Teamwork or a Challenge to the Last Data? The Case of Virgin Olive Oil Stability and Shelf Life. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 8453. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

P2. Kobus, Z., **Osmólska, E.**, Starek-Wójcicka, A., & Krzywicka, M. (2023). Effect of High-Powered Ultrasound on Bioactive Compounds and Microbiological Stability of Juices. *Applied Sciences*, 13(19), 10961. **(IF=2,500, MNiSW=100).**

Review

Effect of High-Powered Ultrasound on Bioactive Compounds and Microbiological Stability of Juices—Review

Zbigniew Kobus ¹, Emilia Osmólska ^{2,*}, Agnieszka Starek-Wójcicka ³ and Monika Krzywicka ¹

¹ Department of Technology Fundamentals, Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin, 20-612 Lublin, Poland; zbigniew.kobus@up.lublin.pl (Z.K.); monika.krzywicka@up.lublin.pl (M.K.)

² Department of Power Engineering and Transportation, Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin, 20-612 Lublin, Poland

³ Department of Biological Bases of Food and Feed Technologies, Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin, 20-612 Lublin, Poland; agnieszka.starek@up.lublin.pl

* Correspondence: emilia.osmolska@up.lublin.pl

Abstract: Extending the shelf life of fruit and vegetable juices plays a key role in improving food security. Ultrasonic technology can be an effective method in the process of replacing traditional heat treatment. It offers a number of benefits, such as better product quality expressed as a higher content of bioactive substances and the preservation of the natural sensory characteristics of the juice: consistency, colour, taste and smell. This paper discusses the methods of ultrasound generation, the equipment used and advances in the construction of ultrasound devices. The influence of ultrasounds on the physical and chemical properties of juices was also analysed, with particular emphasis on bioactive substances and the effectiveness of ultrasonic treatment in the inactivation of microorganisms and enzymes. Prospects and trends in the development of ultrasonic techniques that can effectively increase the efficiency of the ultrasonic juice preservation process are also described. Sonication used alone or with other processing techniques makes it possible to achieve a positive effect on the quality of consumed fruit and vegetable juices.

Keywords: ultrasounds; sonication; juice; natural products; antioxidants; preservation; quality; safety



Citation: Kobus, Z.; Osmólska, E.; Starek-Wójcicka, A.; Krzywicka, M. Effect of High-Powered Ultrasound on Bioactive Compounds and Microbiological Stability of Juices—Review. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 10961. <https://doi.org/10.3390/app131910961>

Academic Editors: Celestino Santos-Buelga and Filipa Mandim

Received: 1 September 2023

Revised: 29 September 2023

Accepted: 4 October 2023

Published: 4 October 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Ultrasound has various applications in food processing due to its ability to induce physical, chemical and mechanical changes in food materials. Ultrasound utilizes distinctive physical and chemical phenomena that stand in contrast to those employed in traditional extraction, processing or preservation methods. Ultrasound presents a clear edge in aspects of efficiency, output and specificity, showcasing improved processing durations, heightened quality and decreased chemical and physical risks, all while remaining ecologically conscious [1].

The basic method used in traditional food preservation is heat treatment, which destroys dangerous pathogens or limits the growth of microorganisms [2]. Thermal processing, despite its high effectiveness in inactivating microorganisms, also brings with it undesirable changes that adversely affect the final quality of the processed food. Many food ingredients are thermolabile and decompose when exposed to heat. In addition, heat treatment can also cause adverse changes in the taste, colour and even texture of the processed food. This gave rise to the need to search for new alternative methods of food preservation, which undoubtedly include power ultrasound.

Power ultrasound refers to the use of high-intensity sound waves with a range of 10 to 1000 W/cm² and frequency ranging from 20 to 100 kHz. They induce various physical and chemical effects in liquids, solids and gases. Power ultrasound is characterized by the application of intense acoustic energy, often leading to the phenomenon of cavitation, which involves the creation and collapse of tiny bubbles in the material being treated. These

collapses generate locally high temperatures and pressures, leading to mechanical and chemical effects that can be harnessed for different applications.

Ultrasound technology has found applications in juice preservation, offering several benefits in terms of extending shelf life, maintaining nutritional quality and minimizing the need for chemical preservatives. However, it is important to note that ultrasound still has some flows resulting in degradation of primary and secondary metabolites [3]. Therefore, its application in juice preservation should be optimized to achieve the desired effects without negatively impacting sensory attributes or causing undesirable changes.

Different reviews have explored the utilization of ultrasound technology in the preservation and processing of food products [4–7]. However, a comprehensive review addressing the specific application of power ultrasound in juice preservation has not been previously presented. This article provides a concise overview of the impact of ultrasound on the physical and chemical properties of juices, their microbiological stability and further prospects for using this type of treatment in juice preservation.

2. Ultrasound Generation

Devices for generating ultrasonic waves consist of three basic elements:

- An electrical power generator;
- A transducer(s);
- An emitter.

The electric generator is the source of energy for the ultrasonic system, which must supply the transducer. In general, the electric generator produces an electric current of a certain rated power. Its task is to convert alternating current with a frequency of 50 Hz or 60 Hz into alternating current with the desired frequency, usually from 20 kHz to 40 kHz. Most generators allow the power to be set indirectly by setting the voltage (V) and current (I). The transducer is the central element of each ultrasonic device, and its role is to generate ultrasonic waves. The transducer converts electrical energy into mechanical vibrations at ultrasonic frequencies. The transducer converts, for example, 20 kHz electrical energy from the generator into 20 kHz mechanical vibrations. The aim of the emitter, called a reactor by some and an ultrasonic cell by others, is to radiate an ultrasonic wave from the transducer to the medium. Emitters can also act as an amplification of ultrasonic vibrations during their emission. The two primary types of lab apparatus in the food industry are:

- An ultrasonic cleaning bath;
- A probe system.

Ultrasonic cleaning bath

The ultrasonic cleaner, also known as an ultrasonic bath, is a special device used for cleaning and sanitation in beverage processing operations. It consists of the following elements (Figure 1):

Tank: This is the main part of the ultrasonic cleaner, and is usually made of stainless steel or another chemical-resistant material. The tank has the shape of a bathtub and serves as a working chamber in which the sonication process is carried out. It is available in various sizes to accommodate different object sizes.

Power source with an electric generator: This converts an electric current of typical frequency into an electric current of ultrasonic frequency and delivers it to the transducer.

Transducer: This is the heart of the system. This element converts electrical energy into ultrasonic waves. This is the piezoelectric element attached to the bottom or sides of the tank. The transducer generates high-frequency ultrasonic waves, which create alternating high-pressure and low-pressure zones in the liquid.

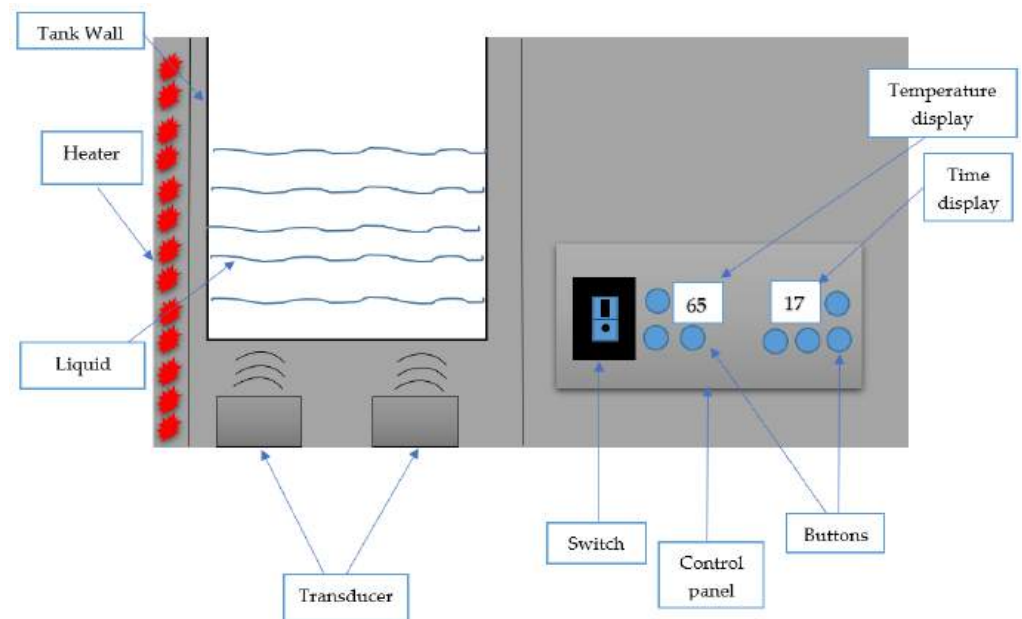


Figure 1. The main elements of an ultrasonic bath.

Heater: Some ultrasonic baths include a heating element to warm the liquid. This maintains the cleaning solution at an elevated temperature, which can enhance the effectivity of process for certain applications.

Timer: most ultrasonic baths come equipped with a timer that allows the duration of the cleaning cycle to be set.

Drain valve: a drain valve is positioned at the bottom of the tank for easy removal of used liquid once the treatment cycle is complete.

Lid: many models come with a removable or hinged lid to prevent solution evaporation and to reduce noise generated by the ultrasonic waves.

Fan: A cooling fan may be installed on some models to prevent overheating during extended work cycles.

Control panel: on the control panel, the user can adjust the settings of the washer, such as time, treatment temperature and other options.

Advances in ultrasonic bath technology

In the construction and operation of ultrasonic cleaners, several new trends and innovations can be noticed, which are aimed at improving efficiency, precision and comfort of use. Additional features include, among others:

- (a) The ability to choose the frequency of ultrasonic vibrations of two 25/45 or 35/130 kHz, or even three 45-80-100 [8];
- (b) Work at two different ultrasound frequencies simultaneously. The ultrasonic cleaner comprises two types of ultrasonic transducers operating at two equal resonance frequencies, for example, 25 and 40 kHz, which are attached on the bottom and the side, respectively. The result is uniform ultrasonic power distribution [9];
- (c) Power regulation: the ultrasonic power ranges from 10 to 100% of the total power;
- (d) Different working modes:
 - Sweep mode—ultrasonic cleaners have several ultrasonic transducers, which, despite the high precision of workmanship, differ in resonant frequency. Therefore, if the generator emits a constant-frequency electric current, some transducers will not work at the resonant frequency, resulting in poor efficiency and rapid overheating. To avoid this, the generator is equipped with a special sweep mode that determines the effective fundamental centre frequency and the range of frequency variation that allows each transducer to achieve resonance. Thanks to these measures, even if for a short time, all transducers operate at their own resonant frequency, which allows for optimization of

the energy efficiency of the entire assembly and even distribution of the load on all elements [10].

- Full-wave mode—this is the standard single-frequency ultrasonic treatment mode for all transducers;
- Burst mode—this involves generating periods of power 50–80% higher than normal power followed by equal periods of zero power;
- Degas mode—the intensity of the ultrasound is changed over time to speed up the process of degassing the liquid;
- Impulse mode.

The ultrasonic probe

An ultrasonic probe system, also known as an ultrasonic horn or ultrasonic probe, is a specialized piece of equipment used for applying ultrasonic vibrations directly to a sample. It consists of the following items (Figure 2):

- Generator—the generator produces electrical signals of a specific frequency that are sent to the ultrasonic transducer. The most common frequency is 20 kHz, but other frequencies are also available;
- Ultrasonic converter—this converts electrical energy into mechanical vibrations of fixed frequencies, usually 20 kHz;
- Probe—this transmits ultrasonic energy into a sample;
- Booster (optional)—this is used to increase the intensity of the ultrasonic vibrations.

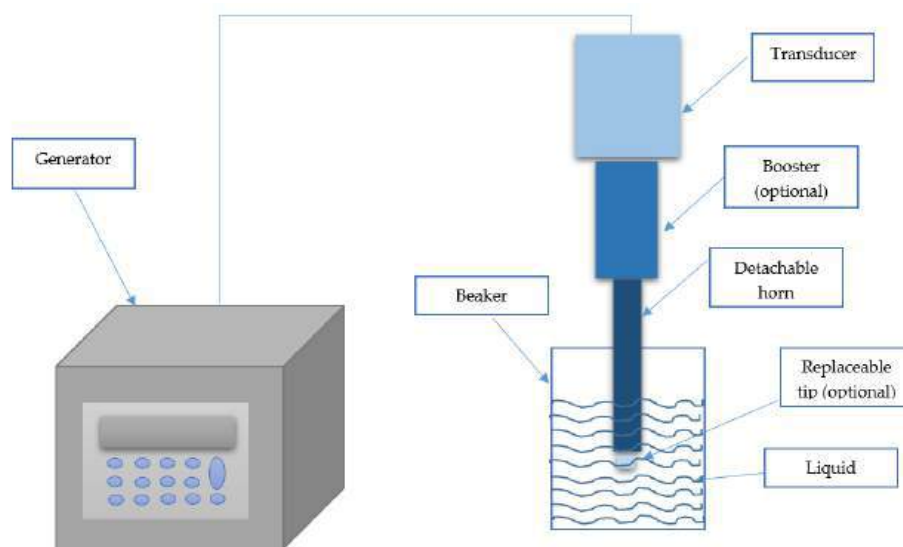


Figure 2. The main elements of an ultrasonic probe system.

There are two primary distinctions between an ultrasonic probe and an ultrasonic bath. Firstly, an ultrasonic probe is submerged directly into the solution, while in an ultrasonic bath, the liquid has no direct contact with the ultrasonic emitter and takes the shape of the tank into which it was poured. Secondly, an ultrasonic probe supplies much higher levels of ultrasonic energy than an ultrasonic bath (sometimes even 100 times higher). These significant variations dictate the specific applications of each system. An ultrasonic probe system offers several advantages that make it a valuable tool for various applications. A probe system enables precise targeting and is flexible in use. The probe's tip can be positioned directly at the point of interest, enabling focused treatment and minimizing the impact on surrounding areas. Ultrasonic probes come in various sizes and shapes, allowing for flexibility in adapting to different sample types and volumes [11].

Another advantage is the possibility of obtaining high ultrasound intensity. This higher intensity allows for more efficient and effective sample processing, especially for challenging tasks such as cell disruption or particle size reduction. Due to its higher energy

output, an ultrasonic probe system can achieve desired results in a shorter time. This is particularly advantageous for time-sensitive processes or situations where reducing the exposure of sensitive samples to ultrasonic energy is important. Ultrasonic probes are particularly suitable for small-scale processing, making them ideal for research labs, benchtop setups and applications where larger equipment is not necessary. Another advantage of this system is ease of use. Operating an ultrasonic probe system can be straightforward, especially when using modern systems equipped with user-friendly controls and displays.

Despite these advantages, it is important to note that ultrasonic probe systems also have limitations, such as potential sample heating with prolonged use and the need for careful handling to prevent probe damage. Choosing the right system depends on the specific application requirements and the desired outcomes.

Advances in ultrasonic probe technology

The probe system is constantly being developed and improved, as exemplified by the following trends.

New materials from which tips are made. Currently, tips made of silica glass appear on the market. These probes do not contaminate samples with metal particles, which makes them particularly useful during trace analysis in food and pharmaceutical analysis. Silica glass has a high melting point and is resistant to thermal shock. Silica glass has a relatively low coefficient of thermal expansion, which means that it undergoes minimal dimensional changes under the influence of temperature fluctuations. Silica glass is chemically inert and does not react with most substances. This property makes it valuable for use in corrosive or reactive environments. On the other hand, these types of probes have limited strength and therefore can be used at much lower ultrasonic intensities compared to metal probes [12].

New probe shape. The latest probes are spiral-shaped, and, unlike traditional probes, the ultrasonic power is distributed across the entire surface of a spiral probe (lateral irradiation). They are used in slim reaction vessels [12].

Multiples probes. Multi-element probes increase productivity and minimize repetitive tasks by processing numerous samples simultaneously. Units are available with 4, 8, 16 and 24 tips [13].

Cup horns. Cup horns offer indirect sonication, which means the ultrasonic waves pass through the wall of the sample container. A cup horn can process multiple sealed tubes or vessels at one time without contacting an ultrasonic probe. This method eliminates cross-contamination, sample foaming, overheating and aerosolization, which can all occur when using a probe. Most importantly, a cup horn enables samples under 200µL to be effectively processed [13].

Flow cells. They enable continuous processing of liquid. The process fluid enters through the inlet at the bottom of the unit. As it passes through the cavitation field, it is ultrasonically processed. The fluid exits the unit through an outlet port. The intensity and extent of processing are controlled by adjusting both the flow rate and amplitude setting [13].

3. The Influence of Ultrasound on the Physical and Chemical Properties of Juices

Consumption of fruit, vegetables or fruit and vegetable juices significantly increases ingestion of microelements, mineral salts and vitamins, as well as antioxidants and fibre, which are invaluable in the proper functioning of the body.

Many studies have shown that the substances contained in juices are absorbed much more efficiently by the human body than those that are supplied through various types of preparations (dietary supplements). Therefore, consuming juices that have unique compositions is recommended [14,15]. Experts recommend that you try to consume juices more often than vitamin-mineral tablets. Regular consumption of fruit and vegetable juices allows you to supplement deficiencies of vitamins and bioelements. All the substances contained in the juice are delivered in the easiest form for cells to absorb; additionally, they

do not burden the liver or the digestive system and are distributed throughout the body in an extremely fast time [16,17].

The quality and safety of juices are extremely important for the health of consumers. With the increase in public awareness of the importance of nutrition, more and more emphasis is being placed on producers, because they are responsible for providing the highest quality of products. At the same time, they cannot forget about meeting the highest food safety standards [18,19].

Undoubtedly, the raw materials used for the production of juices must be of a high quality. The healthiest are drinks made from fresh fruit and vegetables from controlled crops or organic sources. It is important not to use synthetic substances (preservatives or dyes) that may affect the final quality of the products [20,21]. Careful observance of production processes allows for the preservation of the richness of vitamins, minerals and other nutrients present in raw materials [22–24].

It is also very important to adhere to the highest standards of hygiene throughout the production process to avoid contamination and the growth of harmful microorganisms. The use of appropriate pasteurization technologies or other preservation methods is crucial to eliminate potential health risks [25,26].

Certifications such as HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points) or ISO (the International Organization for Standardization) are proof that the manufacturer applies rigorous procedures and complies with food quality and safety requirements [27,28]. Consumers should choose juices with appropriate certificates to be sure that the product meets high standards.

In addition, information on the packaging, such as the expiration date, ingredients, nutritional values and storage recommendations, helps consumers make the right purchasing and best-before decisions.

However, in order for the juices to be safe and fit for consumption for a longer period of time, they must be properly preserved. Heating treatment methods will, however, affect the physical and chemical properties of these types of products to some extent. Therefore, new ways of preserving beverages have recently been sought, including the use of high hydrostatic pressure (HPP), pulsed electric field (PEF) or the increasingly popular ultrasound (US) [29,30].

There are many studies on the effect of the sonication process on the physical and chemical properties of juices.

For example, Gupta et al. [31] carried out sonication of pomelo juice. The scientists examined the chemical composition of the obtained product. In addition, they verified flavour compounds, including octanal, linalool, citral and ethyl butyrate, and as the analyses show, these substances were significantly enhanced, i.e., the taste of the juice was intensified. The hydrolytic activity of rhamnosidase and glucosidase was increased by the use of sonication, which resulted in a lower level of bitterness in pomelo juice. Moreover, the results of the research indicate that properly set parameters of the ultrasonic process in cooperation with degassing agents lead to a significant change in the content of naringin in pomelo juice. And as it is well known, naringin is the main flavonoid, having a wide range of pharmacological activity, including increasing lipolysis, lowering cholesterol and anti-inflammatory, anticancer and antiseptic effects [32–35].

Improving the effectiveness of new cost-effective technologies in preserving the overall quality characteristics and antioxidant properties of fruit juices is of great interest. The team of Margean et al. [36] examined the effect of pasteurization (80 °C, 2 min) and high-power ultrasonic treatment (50% amplitude—57.5 µm and 70% amplitude—80.5 µm for 5 and 10 min) on the quality of red grape juice. The researchers analysed the processed juice in terms of physicochemical aspects, with particular emphasis on the content of phenolic compounds or L-ascorbic acid. In addition, the authors verified the samples in terms of microbiology. The results of the analyses showed that the samples subjected to pasteurization and sonication for 10 min with an amplitude of 70% had a similar level of total phenol content. On the other hand, the sonicated juice was distinguished by a higher

content of L-ascorbic acid compared with the thermally preserved juice. Similar results were obtained for pH, total soluble solids and titratable acidity. The conducted analyses also indicated that the US influenced the inactivation of microorganisms, which may be an alternative method to traditional pasteurization in the juice industry. In addition, it has been proven that, compared to pasteurization, ultrasonic treatments with an amplitude of 70% were more effective than those with an amplitude of 50% in terms of inactivating the microorganisms concerned. In general, the authors of this study determined that to achieve higher levels of flavonoids, such as rutin, quercetin, epicatechins, kaempferol and resveratrol, treatment with an amplitude of 70% for 5 min is recommended. On the other hand, the ultrasonic process conducted at an amplitude of 70% for 10 min turned out to be the most effective in reducing microorganisms and achieving the highest content of L-ascorbic acid and total polyphenols, including hydroxycinnamic acids such as ferulic acid and caffeic acid.

The analyses carried out by Yıkımsı [37] present similar results and relationships as in the previously described studies. However, in this case, the aim of the experiment was to examine the effect of ultrasonic treatment (4, 8, 12 and 16 min) and pasteurization on pH, titratable acidity, Brix, colour, lycopene, ascorbic acid, total phenol concentration, total flavonoid concentration, antioxidant activity, sensory properties and microbiological safety in red watermelon juice and yellow watermelon juice. And as the research showed, the Brix values and titratable acidity did not change statistically significantly after ultrasonic treatment ($p > 0.05$). Interestingly, there was an increase in lycopene content, phenol concentration, flavonoid concentration and antioxidant capacity after 16 min of US treatment. The applied ultrasonic process had an unfavourable effect on the concentration of ascorbic acid, reducing its content in comparison to control samples (not subjected to any treatment). However, these losses were not as high as in the case of pasteurization. Importantly, the organoleptic evaluation showed that the juices after ultrasonic treatment did not lose their sensory attractiveness.

The growing consumer demand for healthy, natural food products prompts scientists and producers to look for new preservation methods that will preserve the high quality and nutritional value of food, including juices. The positive impact of ultrasonic treatment was presented by Ruiz-De Anda et al. [38] in their study, the aim of which was to determine the effect of ultrasound on the physicochemical properties of two types of juices—orange and celery stalk juices. The juice samples were sonicated in the so-called ultrasonic bath (20 kHz, 20 ± 5 °C) for 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90 min. Thereafter, the articles were stored in the dark for 24 h at 4 °C. After this time, the juices were analysed, showing that the ultrasonic treatment had a significant ($p < 0.05$) effect on the number of bioactive compounds and antioxidant properties of the juices as early as 15 min into the process. The best results were achieved for 45 min of US treatment, where a 13% increase in the total phenol content, a two-fold increase in the content of flavonoids and a 17% increase in antioxidant activity were observed. The method of processing did not affect some physicochemical properties of juices, such as total soluble solids, pH and titratable acidity. Changes in colour after ultrasonic treatment were observed, showing significant correlations with the increase in the content of bioactive compounds and antioxidant activity. To sum up, properly conducted ultrasonic treatment provides the opportunity to obtain juices with increased health-promoting values.

In contrast, a study by Yıkımsı et al. [37] showed that sonication, compared to other unconventional methods, still needs to be improved. The researchers' analyses were aimed at assessing the impact of the use of high-pressure processing (HPP), ultrasound (US) and pulsed electric field (PEF) on changes in the physicochemical and phytochemical properties of strawberry juice. HPP processing at 300 MPa (1 min), US at 55 °C (3 min) and PEF at 35 kV/cm (27 μ s) were compared to traditional thermal pasteurization (72 °C, 15 s). No significant differences were observed in total solubles (7.83–8.00°Brix), titratable acidity (0.79–0.84 g/100 mL) or pH (3.45–3.50; except for sonication) between treated and untreated samples ($p > 0.05$). In contrast, HPP and PEF technologies significantly increased the

retention of total TPC phenol content (4–5%), increased TAC total anthocyanin content (15–17%) and RSA free radical scavenging activity (18–19%) compared to unprocessed strawberry juice samples. In the case of the US process, the positive effects of the research were not so noticeable. No changes in TPC were observed, and the content of TAC and RSA increased by less than 9% and 14%, respectively, compared to the control juice. Hence, the conclusion was that the samples treated with HPP and PEF had similar properties in terms of the content of phytochemicals, which was higher in these samples than in sonicated, thermally pasteurized and untreated samples. More research should be carried out, and different parameters of ultrasonic treatment in juice processing should be used to obtain satisfactory analysis results.

Santhirasegaram et al. [39] compared the quality of freshly prepared mango juice after sonication and heat treatment. The product samples were sonicated for 15, 30 and 60 min at 25 °C, 40 kHz (using an ultrasonic cleaning bath: Branson Model 3510 Ultrasonic Cleaner, CT, USA). Pasteurization was carried out in a covered water bath (Memmert, Germany) at a temperature of 90 ± 1 °C for 30 s (mild heat pasteurization) and 90 ± 1 °C for 60 s (high-heat pasteurization). The treatments used did not result in any significant changes in pH, total soluble solids or titratable acidity. Interestingly, sonication lasting 15 and 30 min resulted in a significant improvement in selected quality parameters (increase in the extraction of carotenoids and polyphenols), except for the colour and content of ascorbic acid, compared to freshly squeezed (control) juice. In addition, an increase in radical scavenging activity was observed in all sonicated juice samples regardless of the treatment time. The obtained results support the use of sonication to improve the quality of juices as an alternative to heat treatment.

Table 1 presents a summary of various analyses on the impact of ultrasound on the physical and chemical properties of various types of juices from the last 5 years.

Table 1. Summary of various analyses on the impact of ultrasound on the physical and chemical properties of various types of juices from the last 5 years.

Type of Juice	Type of Ultrasonic Generator	Process Parameters	Physical and Chemical Properties Discussed	Sonication Effect	References
Carrot–grape juice	Ultrasonic processor (UP400S, Hielscher Ultrasonics GmbH Hielscher USA, Inc.) with 0.5 in. probe at 2 in. depth of the sample	Amount of juice: 250 mL; Frequency: 20 kHz; Duration of sonication: 5 min; Processing temperature: 15 °C.	<ul style="list-style-type: none"> - Total soluble solids (°Brix); - Determination of pH; - Determination of total phenolics; - Determination of total flavonoids; - Determination of DPPH free radical scavenging activity; - Determination of total antioxidant capacity (TAC); - Reducing power ability. 	The results show that sonication does not affect the pH of the juice. It was also observed that the sonication increased the extract content of the juice. Furthermore, sonication had a positive effect on the bioactive compounds, antioxidant activity and reducing power of the juice compared to chemical preservation methods.	Nadeem M. et al. [40] (2018)

Table 1. Cont.

Type of Juice	Type of Ultrasonic Generator	Process Parameters	Physical and Chemical Properties Discussed	Sonication Effect	References
Açai (<i>Euterpe oleracea</i>) juice	Ultrasonic processor (model DES500 500W, Unique, Brazil) with a probe 1.3 cm in diameter	Amount of juice: 100 mL; Frequency: 19 kHz; Duration of sonication: 5 min; Processing temperature: 32 ± 1.2 °C.	<ul style="list-style-type: none"> - pH and titratable acidity; - Cloud value; - Non-enzymatic browning; - Viscosity; - Antioxidant activity (DPPH and ABTS); - Phenolics compounds; - Total anthocyanins; - Peroxidase; - Polyphenoloxidase activity. 	<p>The pH and titratable acidity did not change with ultrasound. The cloud values increased with increasing ultrasound energy density.</p> <p>Moreover, the combination of ultrasound together with the application of ozone affected the viscosity of the juices and affected the bioactive compound values, such as antioxidant activity (DPPH and ABST), phenolic compounds and anthocyanin content.</p>	Oliveira et al. [41] (2018)
Guava juice	Ultrasonic processor (ECOSONIC, QR1000 Model, Brazil) with 1.26 cm ² titanium tip	Amount of juice: 200 mL; Frequency: 20 kHz; Duration of sonication: 3, 6 and 9 min; Processing temperature: 25 °C.	<ul style="list-style-type: none"> - Microstructure; - Pulp sedimentation; - Turbidity (serum cloudiness); - Colour; - Carotenoid extraction; - Identification and quantification of carotenoids via high-performance liquid chromatography (HPLC); - Carotenoid in vitro accessibility. 	<p>Ultrasound improved both the in vitro availability of lycopene and the physical properties of guava juice. By reducing the particle size of the pulp, the stability of the physical properties of guava juice was increased.</p>	Campoli S. et al. [42] (2018)
Bayberry juice	Ultrasonic processor (BILON-600Y, Bilon Co., Ltd. Shanghai, China) with a 13 mm diameter probe tip	Amount of juice: 200 mL; Frequency: 20 kHz; Duration of sonication: 1–12 min; Processing temperature: no information.	<ul style="list-style-type: none"> - Enzyme extraction; - Measurement of enzyme activity; - Measurement of total phenols; - Colour assessment. 	<p>A significantly lower inactivation rate of polyphenol oxidase (PPO) and polyphenol peroxidase (POD) was found with ultrasound with cooling (USC) than with ultrasound treatment, indicating that the heat released during ultrasound treatment was beneficial for enzyme denaturation.</p> <p>Furthermore, blueberry POD showed greater resistance to heat and sonication than PPO. In addition, ice cooling during ultrasonic treatment was beneficial for colour and retention of phenolic compounds in blueberry juice.</p>	Cao X. et al. [43] (2018)

Table 1. Cont.

Type of Juice	Type of Ultrasonic Generator	Process Parameters	Physical and Chemical Properties Discussed	Sonication Effect	References
Mulberry juice	Ultrasonic bath (Daihan WUC-A10H, Seoul, Korea) containing 3 L of water as the coupling fluid	Amount of juice: 250 mL; Frequency: 40 kHz; Duration and processing temperature: -Group one: the mulberry mash was introduced into the ultrasound at different times of 30, 60, 90 and 120 min. The ultrasonic temperature was fixed at 60 °C; -Group two: the mash was treated with the ultrasound at 30, 45, 60 and 75 °C. The treatment time was fixed at 60 min.	<ul style="list-style-type: none"> - Total soluble solids; - Titratable acidity; - pH; - Moisture content; - Total phenolic content; - Antioxidant capacity; - Total anthocyanin contents; - L-ascorbic acid content. 	Ultrasonic treatment showed significantly increased extraction efficiency for processing the antioxidant-rich mulberry fruit juice. Furthermore, it showed some advantages, such as shorter extraction time and higher extraction efficiency for total ascorbic acid phenolic and anthocyanin content compared to normal processing. Positive correlations between total phenolic content (TPC) and antioxidant capacity of mulberry juice suggest that polyphenols are the main antioxidants in this product.	Nguyen C. L. and Nguyen V. H. [44] (2018)
Cloudy apple juice	Ultrasound probe system (UP 100H, Hielscher Company, Teltow, Germany) with tip diameters of 20 and 10 mm	Amount of juice: 100 mL; Frequency: 30 kHz; Duration of sonication: 2, 6 and 9 min; Processing temperature: less than 41 °C.	<ul style="list-style-type: none"> - Determination of total phenols (TPs); - Determination of total flavan-3-ols (TFL); - Determination of in vitro antioxidant capacity. 	This study showed the negative effect of ultrasound on the processing of cloudy apple juices with regard to the stability of bioactive compounds and antioxidant capacity. TP values and antioxidant capacity in the samples decreased during ultrasonic treatment. Furthermore, TFL showed higher stability than TP with a significant effect of probe diameter and treatment time. In addition, during 7 days of storage at 4 °C, the stability of TP, TFL and antioxidants decreased.	Kovačević D. B. et al. [45] (2019)

Table 1. Cont.

Type of Juice	Type of Ultrasonic Generator	Process Parameters	Physical and Chemical Properties Discussed	Sonication Effect	References
Plantlets juice	Ultrasonic (SKYMEN JP-031S, Skymen Cleaning Equipment Shenzhen Co. Ltd., Shenzhen, China) bath cleaner	Amount of juice: 100 mL; Frequency: 40 kHz; Duration of sonication: 20 and 40 min; Processing temperature: (30 °C, 45 °C and 60 °C).	<ul style="list-style-type: none"> - Total flavonoid contents (TFCs); - Total phenolic contents (TPCs); - The 2,2-Diphenyl-1-Picrylhydrazyl (DPPH) activity; - Total antioxidant capacity (TAC); - Carotenoids; - Chlorophyll contents; - Free amino acids; - Mineral elements; - Electric conductivity (EC); - Brix; - pH; - Cloud value; - Non-enzymatic browning (NEB); - Viscosity - Titratable acidity (TA); - Colour properties. 	The results indicate that the use of ultrasound treatments is suitable for the production of better-quality wheat seedling juice with reduced microbial load and increased retention of other bioactive compounds, antioxidants and nutrient profile at a much lower temperature. Therefore, sonication can be successfully used as an alternative processing approach to ensure the microbiological and nutritional quality of wheat juice on an industrial scale.	Ahmed Z. et al. [46] (2019)
Strawberry–apple–lemon juice blend	Ultrasound machine (SCIENTZ-IID, Ningbo Xinzhi Biological Polytron Technologies Inc., Ningbo, China) with a probe diameter of 6 mm and an operating immersion depth of 2 cm	Amount of juice: 50 mL; Power: 376 W; Duration of sonication: 10 min; Processing temperature: 35 °C.	<ul style="list-style-type: none"> - pH and TSS analysis; - Turbidity analysis; - Instrumental colour assessment; - Ascorbic acid analysis; - Total phenol analysis; - Total anthocyanin analysis; - Determination of antioxidants; - Capacity. 	This study showed that total phenols and ascorbic acid (AA) were more effectively retained in the high hydrostatic pressure (HHP)- and ultrasound (US)-treated juice blends than in the heat-treated (HT) blends. Furthermore, they showed a higher antioxidant capacity than the HT-treated samples. The US-treated juice blend was found to have a lower total anthocyanin content compared to the HHP-treated samples.	Feng X. et al. [47] (2020)
Sweet potato juice	Ultrasonic processor (UP200Ht; Hielscher Ultrasound Technology, Germany) attached to 40 mm diameter probe (treatment time of 8 min, ultrasonic intensity of 0.66 W cm ² , and a constant frequency of 26 kHz)	Amount of juice: no information; Frequency: 26 kHz; Duration of sonication: 8 min; Processing temperature: no information.	<ul style="list-style-type: none"> - pH; - Soluble solids; - Titratable acidity; - Extraction and analysis of β-carotene; - In vitro digestion of β-carotene; - Analysis of total polyphenols; - Analysis of antioxidant activity (FTC and ORAC); - Analysis of enzymatic residual activity (polyphenol oxidase and peroxidase); - Analysis of colour. 	This study found that the bioavailability of β -carotene increased after treatment, with sonication being the most effective. All the treatments used effectively preserved the antioxidant properties of the juices. However, not all conditions used for processing were effective in inactivating polyphenol oxidase and peroxidase. After processing, the sweet potato juice samples retained their characteristic colour, and the results indicate that ultrasound was the best processing method.	Rios-Romero E. et al. [48] (2021)

Table 1. Cont.

Type of Juice	Type of Ultrasonic Generator	Process Parameters	Physical and Chemical Properties Discussed	Sonication Effect	References
Melon (<i>Cucumis melo</i>) juice	Branson Sonifier SFX-550 (Branson Ultrasonics Corp, Danbury, CT, USA) equipped with a 1/2-inch tip-horn, operating at 550 W and 20 kHz	Amount of juice: 200 g; Frequency: 20 kHz; Duration of sonication: 10 and 15 min; Processing temperature: 10 °C ± 2 °C.	<ul style="list-style-type: none"> - Centrifugal sedimentation; - Colour difference; - Analysis of total carotenoids - Total phenolic compounds; - Antioxidant activity; - Radical scavenging according to DPPH assay; - ABTS free radical scavenging assay; - FRAP assay. 	The use of high-intensity ultrasound (HIUS) for melon juice processing improved the physical appearance, bioactive compound content and microbiological quality of the juice. HIUS improved the physical appearance of melon juice by reducing sedimentation pulp, minimizing colour change. In addition, the melon juice processed via HIUS was enriched with bioactive compounds due to the increased total carotenoid content and the presence of gallic and syringic acids, increasing the antioxidant capacity of the juice.	Rodríguez-Rico D. et al. [49] (2022)

According to the research results presented above, high-powered ultrasound treatment may be a promising alternative to traditional pasteurization or other processing methods to improve the quality of juices from various fruits and vegetables. It is worth continuing the experiments to determine the optimal process conditions that will meet both national and international requirements not only in terms of extending the shelf life, but also the pro-health value of beverages.

4. The Influence of Ultrasounds on the Microbiological Stability of Fruit, Vegetable and Fruit–Vegetable Juices

Due to the current trends related to a healthy lifestyle and rational nutrition, consumers, when choosing beverages, apart from taste, also take into account their pro-health value. However, in order to preserve the quality of the juice, it is necessary to preserve it before the distribution and storage process. The most popular method is still pasteurization, which involves the use of temperatures below 100 °C. Unfortunately, many substances that have a beneficial effect on the functioning of the human body belong to the group of thermolabile compounds. This means that they break down as a result of too-high temperatures. The pasteurization process has been modernized in recent years, so the losses of these compounds are much smaller. The main focus was on shortening the process time, in some cases even to several tens of seconds (flow pasteurization).

Due to rapid technological development, there are an increasing number of alternative methods. A number of tests are carried out that allow the introduction of innovative treatments that enable the production of products with the desired characteristics and quality, including being microbiologically safe for consumers.

Of particular importance are liquid food decontamination techniques that are inexpensive, simple, reliable and environmentally friendly. Ultrasonics have found application in the fruit and vegetable juice industry due to their desired multifunctional effect: reduced water and energy consumption, minimal loss of flavour and nutrients and increased product homogeneity [50]. Improvements in ultrasound generation technology in recent years have generated interest in reducing microbes. The mechanisms of ultrasonic inactivation of microorganisms are seen in a number of complex physicochemical processes, which are based on fast-changing mechanical stresses, energy dissipation, cavitation with a whole range of derivative phenomena and, in special cases, the so-called cell resonance. Studies show the destructive effect of ultrasound on colonies of microorganisms, manifested in the

form of damage to cell elements and tissue structures. Figure 3 shows the classification of the mechanisms responsible for the microbial inactivation effect of sonication.

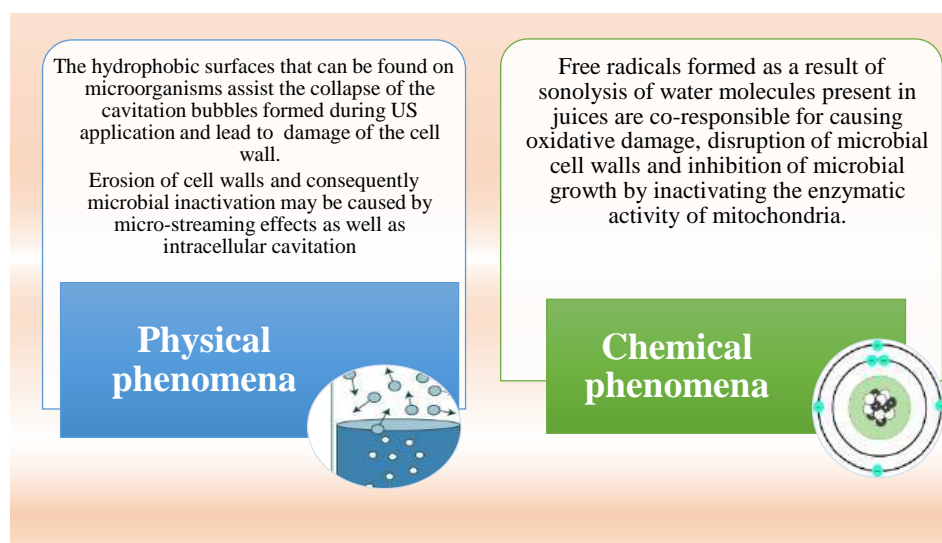


Figure 3. Mechanisms responsible for the effect of microbial inactivation of sonication.

The microbiological quality of the final product is determined by both the microbiological purity of the raw material and the hygiene of production. The risk of microbiological contamination is associated with the possibility of the development of numerous groups of microorganisms, even in refrigerated storage conditions. The microflora most often infecting fruit or vegetables are bacteria resistant to acidification of the environment, soil or air, lactic acid bacteria, acetic acid bacteria, acid-tolerant fungi and both moulds and yeasts.

Bacteria responsible for spoilage of juices include, among others, *Bacillus thermoacidurans*, which causes gasless fermentation and acid fermentation. In turn, *Alicyclobacillus acidoterrestris* causes changes in taste and smell, producing a substance called guaiacol, which is characterized by a medical, disinfectant, smoky smell. And in the presence of *Clostridium pasteurianum*, large amounts of butyric acid and acetic acid are formed and significant amounts of gases are released. In addition, yeasts are among the dominant microorganisms present in juices (mainly fruit juices) due to their ability to grow at low pH values. The fermentation yeast *Saccharomyces cerevisiae* produces significant amounts of carbon dioxide and ethanol, making it one of the main spoilage agents.

This type of microbial contamination of beverages can lead not only to the deterioration of their nutritional and sensory properties (functional ingredients, colour, taste, smell), but also contribute to food-borne diseases caused by pathogenic bacteria or toxic fungi. The causes of most diseases in the world, including fatal ones, are mainly *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* and *Bacillus cereus*, which are found in raw apple and citrus juices. *Listeria monocytogenes*, although it is not a cause of food poisoning, was isolated from unpasteurized apple juice and beetroot juice [51–54].

The results reported by Guerrouj et al. [55] indicate that a high level of inactivation of microorganisms present in beverages can be achieved by combining sonication with moderate heat. Freshly squeezed orange juice was sonicated for 1, 10, 20 and 30 min at a frequency of 24 kHz to evaluate its effect on selected microorganisms. Ultrasound was generated continuously using a UP200H processor from Hielscher Ultrasound Technology and an S3 probe (Hielscher). Overheating of the samples during the ultrasound treatment was prevented by circulating ice water through the treatment chamber. The number of aerobic mesophilic bacteria was significantly reduced when the prepared product was sonicated for 30 min, while 20 min of sonication was sufficient to eliminate yeasts and moulds. The results of this study indicate that the applied process conducted at a tempera-

ture of 43–45 °C can be used to process orange juice and leads to an improvement in its microbiological safety.

Adekunte et al. [56] used a 1500 W ultrasonic processor (VC 1500, Sonics and Materials Inc., Newtown, USA) for the sonication of tomato juice. Samples whose processing temperature ranged from 32 to 45 °C were processed at a constant frequency of 20 kHz. The performed tests showed the inactivation of yeast (*Pichia fermentans*) by 5 log, and the level of their reduction depended on the applied amplitude and duration of the process, which were 61 µm and 7.5 min, respectively. The yeast inactivation observed may result from the aforementioned combination of physical and chemical mechanisms occurring during cavitation. The formation of free radicals and H₂O₂ during sonication helps to inactivate microbes. Nevertheless, the physical effects of the process may not be effective enough to inactivate yeast cells that are difficult to disrupt through micro-jet action. Rather, ultrasound may lead to rupture of yeast cells and subsequent release of protein [57].

Satisfactory research results were obtained by Bhat et al. [58] when freshly squeezed kasturi lime fruit juice (*Citrus microcarpa*) was sonicated for 30 and 60 min at 20 °C and 25 kHz (using an ELMA[®] cleaning bath, model T700h W/Acc, Singen, Germany) for microbiological evaluation of the product via analysis of total plate counts, yeast and mould. Sonication of juice samples for 60 min showed a significant reduction in most microorganisms compared to 30 min treatment of samples and control (untreated) samples along with the achievement of final product safety and quality standards through 5-log reductions, which is the mandatory level set by the FDA for fruit and vegetable juices.

In the work of Khandpur and Gogate [59], the effectiveness of ultrasound in the processing of various fruit and vegetable juices obtained from oranges, sweet limes, carrots and spinach was assessed in terms of the growth of microorganisms and changes in quality parameters during storage. Ultrasonic treatment with a constant frequency (20 kHz) for 15 min at a temperature below 30 °C was adopted as the optimal process conditions. The results of the authors' research unequivocally confirmed the usefulness of sonication to maintain the microbiological safety of beverages characterized by an extended shelf life and excellent quality parameters compared to untreated (control) and thermally treated juices.

The analyses of Choo et al. [60] indicate that regardless of the method of processing used for noni fruit juice (*Morinda citrifolia* L.), i.e., ultrasonic exposure for 60 min at a constant temperature of 30 °C and frequency of 37 kHz or pasteurization at 90 °C for 60 s, the level of microbes may be within the acceptable range. No yeasts or moulds were detected during 8 weeks of refrigerated storage (4 °C), while the total number of aerobic mesophilic bacteria remained below 10⁴ CFU/mL, indicating that the juice was edible. However, importantly, compared to the fresh sample (control, untreated), the amount of malic acid, ascorbic acid and other beneficial compounds was increased in the sonicated sample but decreased in the pasteurized sample. This study highlights the feasibility of replacing traditional pasteurization with ultrasonic processing to improve the quality of noni juice on an industrial scale.

Several other studies have shown a greater reduction in microbes in juice samples treated with ultrasound at higher temperatures. For example, carrot juice was thermosonicated (24 kHz) at 50 °C, 54 °C and 58 °C for 10 min to evaluate quality parameters and microbial growth after processing and during storage at 4 °C. Control and samples sonicated at 50 °C and 54 °C had 10-, 12- and 14-day shelf lives, respectively. However, juices subjected to ultrasound at 58 °C had the best microbiological quality. In this case, microbial growth remained low at approximately 3 log for mesophiles, 4.5 log for yeasts and moulds and 2 log for Enterobacteria after 20 days of storage. What is more, the juice prepared in this way retained >98% of its carotenoids and 100% of its ascorbic acid. The content of phenolic compounds increased in all processed and stored juices. In this way, the planned experiment confirms that thermosonication is a promising technology ensuring the stability of carrot juice by retarding the growth of microorganisms during storage with minimal changes in the number of bioactive compounds [61].

Bermúdez-Aguirre and Barbosa-Cánovas [62] subjected pineapple, grape and cranberry juices to sonication (24 kHz) at 40 °C, 50 °C and 60 °C for 10 min in continuous and pulsed modes. They observed a reduction in *Saccharomyces cerevisiae* by 5–7 log units (depending on the product to be fixed) during treatments at 60 °C, with the continuous mode being more effective. In general, the authors of this paper stated that this processing technique seems to be a viable technology for preserving juices, but the process parameters should be controlled, because changes in the pH and colour of products may occur during cavitation. Ultrasound has been reported to increase the sensitivity of microorganisms to heat, high osmotic pressure and low pH due to cavitation and other changes in the outer membrane of the cellular structure.

Basumatary et al. [63] examined the effect of thermal sonication on the microbiological quality of pomelo (*Citrus maxima*) juice, which they treated for 15, 30, 45 and 60 min at 30, 40 and 50 ± 2 °C. Two ultrasound frequencies, 33 and 44 kHz, were used. Very good test results were obtained, because the total number of microorganisms, yeasts and moulds decreased significantly in relation to the control samples (fresh juice). With the increase in treatment time and temperature, the number of microorganisms under consideration decreased. Subsequent studies therefore indicated that a properly conducted process with the use of ultrasound can be used as a substitute for heat treatment in the processing of pomelo juice due to its positive effect on the quality of the final product (significant increase) in terms of antioxidant activity, with a lower decrease in ascorbic acid content compared to pasteurization.

Subsequent analyses confirmed that ultrasonic treatment may not only be an alternative to pasteurization, but also improve the nutritional value and safety of freshly pressed plum juice. Research by Oladunjoye et al. [64] consisted of pasteurization of the product at 90 °C for 60 s and thermal sonication of the drink for 5, 10, 20 and 30 min at the temperatures of 40, 50 and 60 °C at an ultrasound frequency of 40 kHz, and then determination of the microbiological properties. When evaluating the microflora of pasteurized plum juice, a decrease in all assessed microorganisms to an undetectable level was found, which could be related to cell wall/membrane rupture and nuclear components leading to cell death. However, after thermal sonication at 40 °C, the total number of microorganisms decreased from 3.75 to 1.01 log CFU/mL, and the number of yeasts and moulds decreased from 4.17 to 3.64 log CFU/mL. Raising the ultrasonic treatment temperature to 50 and 60 °C allowed the number of bacteria to be eliminated to undetectable levels, while the number of yeasts and moulds at 50 °C decreased from 3.36 to 1.93 log CFU/mL, with no detectable increase at 60 °C. The incomplete inactivation of yeasts and moulds at 40 °C and partially at 50 °C may be due to the formation of spores that are resistant to these treatment conditions. The inactivation of microorganisms via thermal sonication mainly concerns the acoustic cavitation taking place in the cellular structure, which in turn causes the implosion of bubbles in the liquid and/or the generation of free radicals with antimicrobial properties.

In addition, the high acidity level of plum juice and induced osmotic pressure, together with other reactions, may intensify the effect of cavitation on the structure of microorganisms, resulting in the release of intracellular components, such as protein lipids and nuclear compounds [57,65–68]. Not without significance is the high quality of ultrasound-treated juice, which is characterized, among other properties, by a higher content of ascorbic acid, carotenoids (2.19–4.30%) and flavonoids (10–16%), as well as antioxidant activity (32, 52–48.5%) compared to the control (untreated juice). Only elevated temperature (60 °C) was not conducive to most of these quality features, which means that the thermosonication process may require further optimization of treatment parameters in order to maintain the quality of the final product to the maximum extent [64].

Due to the biological diversity of individual food products, the structure of ultrasonic generators and the methods of setting and expressing process parameters, it is difficult to clearly indicate the optimal processing conditions for juices pressed from various fruits or vegetables. Based on our own research, we found that the ultrasound intensity needed to inactivate microorganisms ranges widely from 28 to 90 W/cm² and depends on the initial

microbiological condition and the type of juice processed. In the case of tomato juice, we showed that ultrasound sonication at an intensity of 40 W cm^{-2} for 5 min and 28 W cm^{-2} for 10 min yielded a microbiologically pure product devoid of microorganisms involved in spoilage even after 10 days of storage [68].

Other research results relating to the effective minimization of the presence of microorganisms contaminating fruit and vegetable juices through the action of ultrasounds were collected, as presented in Table 2.

Table 2. Other research results relating to the effective minimization of the presence of microorganisms contaminating fruit and vegetable juices through the action of ultrasounds.

Type of Juice	Type of Ultrasound Generator	Process Parameters	Microorganisms Discussed	Sonication Effect	References
Green cactus pear (<i>Opuntia ficus Indica</i>) juice	Ultrasonic processor (VCX1500, Sonics & Materials, Inc. Newtown, CT, USA)	Amount of juice: 250 mL; Frequency: 20 kHz; Duration of sonication: 10, 15 and 25 min (at amplitudes of 40%, 60% and 80%); Processing temperature: 36.1 ± 2.55 °C– 76.3 ± 1.16 °C.	Total plate counts; Enterobacteria	In the control juice sample, 4.6 and 4.2 log CFU/mL total plate counts and Enterobacteria were detected, respectively. The organisms considered were below the detection limit when samples were treated at 60% and 80% amplitudes and 15 and 25 min. The temperature reached during the processing of these samples (58 and 76 °C) may explain the reduction in microorganisms.	Cansino et al. [69] (2013)
Carrot juice	Ultrasonic device (Hielscher USA Inc., Ringwood, N.J., U.S.A.) with a probe of 22 mm	Amount of juice: 500 mL; Frequency: 24 kHz; Duration of sonication: 2–10 min; Processing temperature: 50, 54 and 58 °C.	<i>Escherichia coli</i> (ATCC 11755)	A more than 5-log reduction in <i>E. coli</i> ATCC 11755 was achieved in 2 min via the application of ultrasound (24 kHz, 120 µm, 400 W) at 58 °C. Treatment at 54 °C for 10 min was required to achieve the same level of reduction. However, at 50 °C, only a 3.5-log reduction was achieved after 10 min of treatment.	Pokhrel et al. [70] (2017)
Strawberry juice	Ultrasonic cleaning bath (TestLab, Argentine)	Amount of juice: no information Frequency: 40 kHz; Duration of sonication: 10 and 30 min; Processing temperature: 20 ± 1 °C.	Total mesophilic bacteria; total psychrophilic bacteria; yeast and moulds	The storage growth rate of each microbial population was significantly reduced after 30 min of treatment. During 10 days of storage, the reduction in total mesophilic bacteria, total psychrophilic bacteria and yeast and moulds was 0.78, 0.64 and 2.5 log CFU/mL relative to the control.	Tomadoni et al. [71] (2017)
Star fruit (<i>Averrhoa carambola</i>) juice	Ultrasonic bath (GT Sonic, Guangdong, China)	Amount of juice: 50 mL Frequency: 44 kHz; Duration of sonication: 15, 30, 45, and 60 min; Processing temperature: 25–45 °C.	Total plate counts; yeasts and mould	Regardless of the time and temperature of the process, the complete inactivation of bacterial populations was achieved, and the amount of yeast and mould was reduced from 6.10 (control sample) to about 5 log CFU/mL.	Nayak et al. [72] (2018)

Table 2. Cont.

Type of Juice	Type of Ultrasound Generator	Process Parameters	Microorganisms Discussed	Sonication Effect	References
Pumpkin juice	Ultrasonic bath (Elmasonic ultrasonic E-100H, Germany)	Amount of juice: 10 mL Frequency: 37 kHz; Duration and time of ultrasonication: 30 min, 23 °C; duration and time of thermosonication: 30 min, 40, 50 and 60 °C.	<i>Escherichia coli</i> K-12	Ultrasonic treatment was only able to inactivate <i>E. coli</i> K-12 by less than 1 log; however, thermosonication (60 °C, 30 min) reduced the microorganisms by 6.62 ± 0.00 log CFU/mL.	Demir and Kılınc [73] (2019)
Red grape juice	Ultrasonic processor for small- and medium-volume applications (VCX 750, Sonics & Materials, Inc., Newtown, CT, USA) with a 1/2" (13 mm) probe	Amount of juice: 150 mL; Frequency: 20 kHz; Duration of sonication: 5 and 10 min; Processing temperature: no information.	Total plate counts; Enterobacteriaceae	The lowest total plate counts for Enterobacteriaceae, 1.13 log CFU/mL and 0.53 log CFU/mL, were recorded after sonication for 10 min at 70% amplitude.	Margean et al. [36] (2020)
Red watermelon juice	UP200St- ultrasound device produced by Hielscher Ultrasonics (Berlin, Germany)	Amount of juice: 100 mL; Frequency: 24 kHz; Duration of sonication: 4, 8, 12 and 16 min; Processing temperature: no information.	Total aerobic plate count; yeast and mould	A reduction in total aerobic plate count and yeast and mould was observed from 2.72 to 3.07 log CFU/mL to undetectable levels after 8 min of sonication.	Yıkmiş [37] (2020)
Pineapple juice	Ultrasonic processor (UP200S, 200 W, Hielscher, Teltow, Germany) with a 13 mm probe diameter	Amount of juice: 80 mL Frequency: 24 kHz; Duration of sonication: 2–10 min; Processing temperature: 25–65 °C.	Total plate counts; yeast and mould	The average level of contamination of fresh juice samples (day 0) with total plate counts, yeasts and moulds was 4.71 and 4.51 log CFU/mL, and for thermosonicated juice samples, 2.74 and 2.30 log CFU/mL. The applied treatment turned out to be effective in delaying the development of microorganisms during 28 days of storage.	Mala et al. [74] (2021)
Spinach juice	Ultrasonic homogenizer (Scientz-IIID, Ningbo, China).	Amount of juice: 100 mL Frequency: 30 kHz; Duration of sonication: 20 min; Processing temperature: 60 °C.	Total plate count; yeasts and mould; <i>Escherichia coli</i>	There was a reduction in total aerobic plate count, yeast and mould as well as <i>E. coli</i> from 4.10, 3.63 and 1.75 log CFU/mL to undetectable levels in the sample treated at 30 kHz, power 600 W, 50% duty cycle, 60 ± 1 °C for 20 min.	Manzoor et al. [50] (2021)
Black carrot juice	Sonicator (UP200S, Hielscher, Germany) with a probe of 7 mm	Amount of juice: 50 mL; Frequency: 24 kHz; Duration of sonication: 4, 8 and 12 min; Processing temperature: 25 °C.	Total plate counts; yeasts and mould	The application of ultrasound for 12 min reduced the total plate count by approximately 2.63, 3.39 and 2.9 log CFU/mL, and for yeast and moulds, nearly 1.29, 2.42 and 2.0 log CFU/mL after 1, 7 and 15 days of storage.	Hasheminya and Dehghannya [75] (2022)

Koda et al. [76] studied the effectiveness of ultrasound with a frequency of 500 kHz on the inactivation of microorganisms (Gram-negative bacteria *Escherichia coli* IAM 12058 and Gram-positive bacteria *Streptococcus mutans* JCM 5175) and concluded that the mechanism

of their action is based mainly on chemical effects. Transmission electron microscopy (TEM) studies of bacteria confirmed lethal damage resulting from the interaction of bacterial cells with cavitation bubbles. A significant number of empty cell envelopes as well as their cytoplasmic content have been observed.

According to other scientists, the mode of action of ultrasound on microorganisms in liquids includes hydrodynamic effects (the phenomena of intracellular cavitation and microflux) and the formation of radicals that disrupt the structure of the cell. However, sometimes the use of ultrasound alone is not effective enough to decontaminate juices, especially those contaminated with pathogenic bacterial flora. In addition, high ultrasound power levels may adversely affect the nutritional and sensory properties of food [77–79].

Therefore, Kernou et al. [80] evaluated the survival of *Escherichia coli* ATCC 25922 in orange juice treated with microwaves and/or ultrasounds. Sonication conducted for 60 min at a frequency of 42 kHz had no significant effect on the reduction in survival rates (1.3-log reduction) of the bacteria under consideration. However, it has been established that this method of pretreatment can increase the effectiveness of microwaves to improve the microbiological quality of the juice. More specifically, a significant reduction (by 8.0 log) was achieved via sonication (42 kHz; 20 min) followed by microwave processing (900 W; 30 s) of the orange beverage.

Similar relationships were found by Hosseinzadeh Samani et al. [81] after subjecting cherry juice to microwave–ultrasound treatment. Based on response surface modelling (RSM), the optimal processing conditions were microwave output power, 352.21 W; temperature, 49.94 °C; ultrasound power, 475.13 W; and exposure time, 6 min. Such parameters resulted in a reduction in the number of *E. coli* bacteria, while maintaining the amount of vitamin C at the level of 142.5 mg per 100 mL. Unfortunately, it was found that each increase in the power of ultrasounds or microwaves and the extension of the exposure time led to a significant reduction in the content of vitamin C due to its increased oxidation, mainly due to the thermal effect. Microwave processing is fast and can significantly reduce the heating time of the juices. And the hydrodynamic effect of ultrasound on microorganisms has great potential to improve the effectiveness of their elimination. This study contributes to the design and control of effective methods for the inactivation of pathogenic microorganisms and food spoilage agents that can be achieved using combined methods.

Satisfactory research results were also obtained through combining ultrasonic and pulsed light treatment in order to obtain good microbiological stability of juice prepared from apples [78]; the use of ultraviolet radiation and ultrasonic treatments to inactivate *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores, also in apple juice [82]; the use of pulsed electric field and ultrasounds on the microbiological quality of grapefruit juice [83]; ultrasound and ozone processing to reduce the number of native microflora in cashew apple juice [84]; high-pressure processing and ultrasound for the preservation of strawberry juice [85]; and ultrasonic treatment with high-voltage cold plasma to ensure better quality and greater stability during carrot juice processing [86].

Ultrasound alone or in combination with mild temperatures (<50 °C in most cases) is a promising alternative technology for juice preservation. Power ultrasound has been shown to be effective against microorganisms contaminating liquid foods and meets the U.S. Food and Drug Administration's 5-log reduction requirement (pasteurization standards) for certain pathogens contaminating fruit and vegetable juices. This technology has the ability to destroy cell membranes due to the high pressure, temperature and shear forces generated during cavitation. In addition, the inhibitory effect of thermal sonication on the population of microorganisms may result from cavitation and the production of free radicals (H⁺, O₂, OH, HOO) formed as a result of the sonolysis of water molecules present in juices. Free radicals are therefore co-responsible for causing oxidative damage, disrupting microbial cell walls and inhibiting microbial growth by inactivating the enzymatic activity of mitochondria [87–89].

Where ultrasound alone is not sufficiently effective in achieving high microbial reduction, combining it with treatment methods (temperature, pressure, microwave, pulsed light,

ultraviolet, HPP, etc.) is recommended. This combination often shows a synergistic effect on more effective inactivation of microbes than when using individual methods separately.

5. Prospects for the Use of Ultrasound in the Future

The application of power ultrasound in juice preservation holds promise for enhancing the quality, safety and shelf life of fruit juices. However, it is important to note that while power ultrasound offers numerous benefits for juice preservation, its effectiveness depends on factors such as equipment design, operating parameters and the specific characteristics of the fruit juice being processed. Progress in the construction of ultrasonic generators has made them more and more efficient, which allows for obtaining higher ultrasonic power with lower energy consumption. Ultrasonic output power is a key factor in scaling up the process. Processing larger volumes of liquid will require more powerful equipment. The ultrasonic power of the devices currently used on an industrial scale varies between 500 W and 16 kW. In typical liquid processing applications, four or more units are clustered together for increased redundancy and capacity customization. For example, a cluster with a power of 60 kW can be used to process up to 50 cubic meters of liquid per hour. It is expected that in the future, the power of ultrasonic characteristics will be further increased, which will significantly increase the throughput of processes in which ultrasound is used. Another factor determining the economy of ultrasonic processes is the conversion of electrical energy into mechanical power. Currently used devices are characterized by an efficiency exceeding 85%. Further progress in the construction of ultrasonic transducers will increase the efficiency of energy conversion and reduce the costs of electricity needed to power ultrasonic generators [90].

New ultrasound generators offer better control of ultrasound parameters such as frequency, amplitude and pulse duration. This will make it possible to adjust the parameters of ultrasonic treatment to specific groups of microorganisms, as well as specific physico-chemical properties of the juice. A promising perspective in the preservation of fruit and vegetable juices may also be the construction of devices that include ultrasonic transducers operating at different ultrasound frequencies. This can contribute to a significant increase in the efficiency of the disintegration of microorganisms. Another important trend in preserving juices may be the use of pulsating processing. On the one hand, it significantly reduces the specific energy consumption, and on the other hand, it can be more effective than continuous processing. Another trend will be the use of installations for ultrasonic preserving juices in the flow. Placing ultrasonic transducers inside flowing juice allows for effective and regular transfer of ultrasonic energy. This enables the use of ultrasound on a larger scale, which requires a constant flow of material.

Undoubtedly, an interesting perspective is the combination of ultrasound with other techniques, such as microwave treatment or white pulsating light, which will allow for much better effects in the field of juice preservation and will also affect the preservation, allowing for a better overall quality of the final product. Further development of the application of ultrasound for preserving juices will require adaptation to specific types of fruit juice. Before implementing this technology on an industrial scale, it is necessary to conduct appropriate research, tests and analyses in order to determine the optimal conditions and ultrasound parameters for a given application.

6. Conclusions

Ultrasound has great potential in preserving fruit and vegetable juices. This method makes it possible to reduce the activity of microorganisms responsible for product spoilage, minimizing the loss of biohealth, nutritional, taste and aroma values. Juices pasteurized using ultrasound have a higher content of ascorbic acid compared to juices preserved using traditional heat treatments. In some cases, they also show higher antioxidant activity. The impact of ultrasonic treatment on the effectiveness of juice preservation depends on the intensity and frequency of the ultrasounds used as well as the time and temperature of the process. Important parameters include the chemical composition of the juice and the

structure, shape and condition of microorganisms and enzymes. Some enzymes, such as glucose oxidase, peroxidase and polyphenoloxidase, can be effectively inactivated by ultrasound. Still, many microorganisms and enzymes are resistant to ultrasound, which makes it necessary to combine it with technologies such as pulsating light or microwave treatment. The combination of ultrasound with other novel or conventional methods not only overcomes this limitation but also increases the efficiency of the ultrasound-based technique.

Ultrasonic juice preservation is an interesting prospect, but requires careful analysis and case-by-case study to ensure product effectiveness and quality. Future research should focus on scaling up and standardizing ultrasonic machining processes.

Author Contributions: Conceptualization, Z.K. and M.K.; Methodology, Z.K., M.K. and E.O.; Formal analysis, Z.K., M.K. and E.O.; Investigation, Z.K., A.S.-W. and M.K.; Data curation, M.K. and E.O.; Writing—original draft preparation, Z.K. and A.S.-W.; Writing—review and editing, Z.K., M.K. and E.O.; Visualization, Z.K., A.S.-W. and M.K.; Supervision, Z.K. and M.K.; Funding acquisition, Z.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data sharing not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Chemat, F.; Zill-e-Huma; Khan, M.K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrason. Sonochem.* **2011**, *18*, 813–835. [CrossRef] [PubMed]
2. Negi, P.S. Plant extracts for the control of bacterial growth: Efficacy, stability and safety issues for food application. *Int. J. Food Microbiol.* **2012**, *156*, 7–17. [CrossRef] [PubMed]
3. Chemat, F.; Rombaut, N.; Sicaire, A.-G.; Meullemiestre, A.; Fabiano-Tixier, A.-S.; Abert-Vian, M. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrason. Sonochem.* **2017**, *34*, 540–560. [CrossRef] [PubMed]
4. Bhargava, N.; Mor, R.S.; Kumar, K.; Sharanagat, V.S. Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrason. Sonochem.* **2020**, *70*, 105293. [CrossRef] [PubMed]
5. Khadhraoui, B.; Ummat, V.; Tiwari, B.K.; Fabiano-Tixier, A.S.; Chemat, F. Review of ultrasound combinations with hybrid and innovative techniques for extraction and processing of food and natural products. *Ultrason. Sonochem.* **2021**, *76*, 105625. [CrossRef]
6. Singla, M.; Sit, N. Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review. *Ultrason. Sonochem.* **2021**, *73*, 105506. [CrossRef]
7. Rastogi, N.K. Opportunities and Challenges in Application of Ultrasound in Food Processing. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2011**, *51*, 705–722. [CrossRef]
8. MK Test. Available online: <https://mktest.pl/produkt/myjka-ultradzwiekowa-o-potrojnej-czestotliwosci-45-80-100-khz-biobase-seria-uc-st/> (accessed on 30 August 2023).
9. Bandelin. Available online: https://bandelin.com/wp-content/prospekte/Technology_brochure_GB_BANDELIN.pdf (accessed on 30 August 2023).
10. Moroni Ultrasound. Available online: <https://www.ultrasuoni.org/en/the-technique-of-ultrasonic-cleaning/sweep-mode-in-ultrasonic-cleaners/> (accessed on 30 August 2023).
11. Santos, H.M.; Capelo, J.L. Trends in ultrasonic-based equipment for analytical sample treatment. *Talanta* **2007**, *73*, 795–802. [CrossRef]
12. Sonopuls. Available online: <http://www.labobaza.pl/download/produktkatalogplik/8860homogenizatory.pdf> (accessed on 30 August 2023).
13. Sonics. Available online: <https://www.sonics.com/vibracell/products/accessories/vcx-750-500w-systems/vcx-750-500w-system-accessories/?s=multi-element-probes> (accessed on 30 August 2023).
14. Turek, K.; Słupski, J.; Tabaszewska, M.; Skoczylas, Ł.; Tomf-Sarna, A.; Skoczeń-Słupska, R. Soki Jabłkowe Naturalnie Mętne Produkty Bogate w Związki Biologicznie Czynne. In *Rola Procesów Technologicznych w Kształtowaniu Jakości Żywności*; Wyd. Oddział Małopolski Polskiego Towarzystwa Technologów Żywności: Krakow, Poland, 2016; pp. 127–134.
15. Ryan, J.; Hutchings, S.C.; Fang, Z.; Bandara, N.; Gamlath, S.; Ajlouni, S.; Ranadheera, C.S. Microbial, Physico-Chemical and Sensory Characteristics of Mango Juice-Enriched Probiotic Dairy Drinks. *Int. J. Dairy Technol.* **2020**, *73*, 182–190. [CrossRef]

16. Gwóźdź, E.; Gębczyński, P. Prozdrowotne Właściwości Owoców, Warzyw i Ich Przetworów. *Postępy Fitoter.* **2015**, *16*, 268–271.
17. Piątkowska, E.; Kopeć, A.; Leszczyńska, T. Antocyjany—Charakterystyka, Występowanie i Oddziaływanie Na Organizm Człowieka. *Żywność. Nauka Technol. Jakość* **2011**, *4*, 24–35.
18. Putnik, P.; Kresoja, Ž.; Bosiljkov, T.; Jambrak, A.R.; Barba, F.J.; Lorenzo, J.M.; Roohinejad, S.; Granato, D.; Žuntar, I.; Kovačević, D.B. Comparing the effects of thermal and non-thermal technologies on pomegranate juice quality: A review. *Food Chem.* **2018**, *279*, 150–161. [[CrossRef](#)]
19. Biernaciak, Ł.; Rychcik, K. *Ocena Wpływu Metod Produkcji Wybranych Produktów Na Bazie Jabłek Na Ich Jakość; BEZPIECZEŃSTWA*: Olsztyn, Poland, 2019; p. 139.
20. Zhang, S.; Hu, C.; Guo, Y.; Wang, X.; Meng, Y. Polyphenols in fermented apple juice: Beneficial effects on human health. *J. Funct. Foods* **2021**, *76*, 104294. [[CrossRef](#)]
21. Bakuradze, T.; Tausend, A.; Galan, J.; Groh, I.A.M.; Berry, D.; Tur, J.A.; Marko, D.; Richling, E. Antioxidative activity and health benefits of anthocyanin-rich fruit juice in healthy volunteers. *Free Radic. Res.* **2019**, *53*, 1045–1055. [[CrossRef](#)]
22. Büsing, F.; Hägele, F.A.; Nas, A.; Döbert, L.-V.; Fricker, A.; Dörner, E.; Podlesny, D.; Aschoff, J.; Pöhl, T.; Schweiggert, R.; et al. High intake of orange juice and cola differently affects metabolic risk in healthy subjects. *Clin. Nutr.* **2019**, *38*, 812–819. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. Bilek, S.E.; Bayram, S.K. Fruit juice drink production containing hydrolyzed collagen. *J. Funct. Foods* **2015**, *14*, 562–569. [[CrossRef](#)]
24. Perrone, A.; Yousefi, S.; Basile, B.; Corrado, G.; Giovino, A.; Salami, S.A.; Papini, A.; Martinelli, F. Phytochemical, Antioxidant, Anti-Microbial, and Pharmaceutical Properties of Sumac (*Rhus Coriaria* L.) and Its Genetic Diversity. *Horticulturae* **2022**, *8*, 1168. [[CrossRef](#)]
25. Dominguez-Gonzalez, K.G.; Aguilar-Chairez, S.; Cerna-Cortes, J.; Soria-Herrera, R.J.; Cerna-Cortes, J.F. Microbiological quality and presence of foodborne pathogens in fresh-squeezed orange juice samples purchased from street vendors and hygienic practices in Morelia, Mexico. *Food Sci. Technol.* **2022**, *42*, e10222. [[CrossRef](#)]
26. Saleh, E.A.; Morshdy, A.E.M.; Hafez, A.-E.E.; Hussein, M.A.; Elewa, E.S.; Mahmoud, A.F.A.; Ebied; Saleh, A. Effect of Pomegranate Peel Powder on the Hygienic Quality of Beef Sausage. *J. Microbiol. Biotechnol. Food Sci.* **2017**, *6*, 1300–1304. [[CrossRef](#)]
27. Chen, H.; Liou, B.-K.; Hsu, K.-C.; Chen, C.-S.; Chuang, P.-T. Implementation of food safety management systems that meets ISO 22000:2018 and HACCP: A case study of capsule biotechnology products of chaga mushroom. *J. Food Sci.* **2021**, *86*, 40–54. [[CrossRef](#)]
28. Abduraimova, M.; Alibekov, R.; Orymbetova, G.; Nurseitova, Z.; Gabrilyants, E. Food Safety and HACCP System in the Apple Jam Production. *Ind. Technol. Eng.* **2020**, *3*, 38–44.
29. Samarasiri, M.H.; Chandrasiri, T.A.; Wijesinghe, D.B.; Gunawardena, S.P. Antioxidant Capacity and Total Phenolic Content Variations against *Morinda citrifolia* L. Fruit Juice Production Methods. *ETP Int. J. Food Eng.* **2019**, *5*, 293–299. [[CrossRef](#)]
30. Bobinaïtė, R.; Pataro, G.; Lamanuskas, N.; Šatkauskas, S.; Viskelis, P.; Ferrari, G. Application of pulsed electric field in the production of juice and extraction of bioactive compounds from blueberry fruits and their by-products. *J. Food Sci. Technol.* **2015**, *52*, 5898–5905. [[CrossRef](#)]
31. Gupta, A.K.; Sahu, P.P.; Mishra, P. Ultrasound aided debittering of bitter variety of citrus fruit juice: Effect on chemical, volatile profile and antioxidative potential. *Ultrason. Sonochem.* **2021**, *81*, 105839. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
32. Chen, R.; Qi, Q.-L.; Wang, M.-T.; Li, Q.-Y. Therapeutic potential of naringin: An overview. *Pharm. Biol.* **2016**, *54*, 3203–3210. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Ghanbari-Movahed, M.; Jackson, G.; Farzaei, M.H.; Bishayee, A. A Systematic Review of the Preventive and Therapeutic Effects of Naringin Against Human Malignancies. *Front. Pharmacol.* **2021**, *12*, 639840. [[CrossRef](#)]
34. Moghaddam, R.H.; Samimi, Z.; Moradi, S.Z.; Little, P.J.; Xu, S.; Farzaei, M.H. Naringenin and naringin in cardiovascular disease prevention: A preclinical review. *Eur. J. Pharmacol.* **2020**, *887*, 173535. [[CrossRef](#)]
35. Stabrauskienė, J.; Kopustinskiene, D.M.; Lazauskas, R.; Bernatoniene, J. Naringin and Naringenin: Their Mechanisms of Action and the Potential Anticancer Activities. *Biomedicines* **2022**, *10*, 1686. [[CrossRef](#)]
36. Margean, A.; Lupu, M.I.; Alexa, E.; Padureanu, V.; Canja, C.M.; Cocan, I.; Negrea, M.; Calefariu, G.; Poiana, M.-A. An Overview of Effects Induced by Pasteurization and High-Power Ultrasound Treatment on the Quality of Red Grape Juice. *Molecules* **2020**, *25*, 1669. [[CrossRef](#)]
37. Yıkımsı, S. Sensory, physicochemical, microbiological and bioactive properties of red watermelon juice and yellow watermelon juice after ultrasound treatment. *J. Food Meas. Charact.* **2020**, *14*, 1417–1426. [[CrossRef](#)]
38. Anda, D.R.-D.; Ventura-Lara, M.G.; Rodríguez-Hernández, G.; Ozuna, C. The impact of power ultrasound application on physicochemical, antioxidant, and microbiological properties of fresh orange and celery juice blend. *J. Food Meas. Charact.* **2019**, *13*, 3140–3148. [[CrossRef](#)]
39. Santhirasegaram, V.; Razali, Z.; Somasundram, C. Effects of thermal treatment and sonication on quality attributes of Chokanan mango (*Mangifera indica* L.) juice. *Ultrason. Sonochem.* **2013**, *20*, 1276–1282. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
40. Nadeem, M.; Ubaid, N.; Qureshi, T.M.; Munir, M.; Mehmood, A. Effect of ultrasound and chemical treatment on total phenol, flavonoids and antioxidant properties on carrot-grape juice blend during storage. *Ultrason. Sonochem.* **2018**, *45*, 1–6. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

41. Oliveira, A.F.A.; Mar, J.M.; Santos, S.F.; da Silva Júnior, J.L.; Kluczkovski, A.M.; Bakry, A.M.; Bezerra, J.D.A.; Nunomura, R.D.C.S.; Sanches, E.A.; Campelo, P.H. Non-thermal combined treatments in the processing of açai (*Euterpe oleracea*) juice. *Food Chem.* **2018**, *265*, 57–63. [[CrossRef](#)]
42. Campoli, S.S.; Rojas, M.L.; Amaral, J.E.P.G.D.; Canniatti-Brazaca, S.G.; Augusto, P.E.D. Ultrasound processing of guava juice: Effect on structure, physical properties and lycopene in vitro accessibility. *Food Chem.* **2018**, *268*, 594–601. [[CrossRef](#)]
43. Cao, X.; Cai, C.; Wang, Y.; Zheng, X. The inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in bayberry juice during thermal and ultrasound treatments. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2018**, *45*, 169–178. [[CrossRef](#)]
44. Nguyen, C.L.; Nguyen, H.V.H. Ultrasonic Effects on the Quality of Mulberry Juice. *Beverages* **2018**, *4*, 56. [[CrossRef](#)]
45. Bursać Kovačević, D.; Bilobrck, J.; Buntić, B.; Bosiljkov, T.; Karlović, S.; Rocchetti, G.; Lucini, L.; Barba, F.J.; Lorenzo, J.M.; Putnik, P. High-Power Ultrasound Altered the Polyphenolic Content and Antioxidant Capacity in Cloudy Apple Juice during Storage. *J. Food Process. Preserv.* **2019**, *43*, e14023. [[CrossRef](#)]
46. Ahmed, Z.; Manzoor, M.F.; Begum, N.; Khan, A.; Shah, I.; Farooq, U.; Siddique, R.; Zeng, X.-A.; Rahaman, A.; Siddeeg, A. Thermo-Ultrasound-Based Sterilization Approach for the Quality Improvement of Wheat Plantlets Juice. *Processes* **2019**, *7*, 518. [[CrossRef](#)]
47. Feng, X.; Zhou, Z.; Wang, X.; Bi, X.; Ma, Y.; Xing, Y. Comparison of High Hydrostatic Pressure, Ultrasound, and Heat Treatments on the Quality of Strawberry–Apple–Lemon Juice Blend. *Foods* **2020**, *9*, 218. [[CrossRef](#)]
48. Rios-Romero, E.A.; Ochoa-Martínez, L.A.; Bello-Pérez, L.A.; Morales-Castro, J.; Quintero-Ramos, A.; Gallegos-Infante, J.A. Effect of Ultrasound and Steam Treatments on Bioaccessibility of β -Carotene and Physicochemical Parameters in Orange-Fleshed Sweet Potato Juice. *Heliyon* **2021**, *7*, 1–6. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
49. Rodríguez-Rico, D.; Sáenz-Esqueda, M.d.l.Á.; Meza-Velázquez, J.A.; Martínez-García, J.J.; Quezada-Rivera, J.J.; Umaña, M.M.; Minjares-Fuentes, R. High-Intensity Ultrasound Processing Enhances the Bioactive Compounds, Antioxidant Capacity and Microbiological Quality of Melon (*Cucumis melo*) Juice. *Foods* **2022**, *11*, 2648. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
50. Manzoor, M.F.; Xu, B.; Khan, S.; Shukat, R.; Ahmad, N.; Imran, M.; Rehman, A.; Karrar, E.; Aadil, R.M.; Korma, S.A. Impact of high-intensity thermosonication treatment on spinach juice: Bioactive compounds, rheological, microbial, and enzymatic activities. *Ultrason. Sonochem.* **2021**, *78*, 105740. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
51. Irkin, R.; Korukluoglu, M. Growth Inhibition of Pathogenic Bacteria and Some Yeasts by Selected Essential Oils and Survival of *L. Monocytogenes* and *C. Albicans* in Apple–Carrot Juice. *Foodborne Pathog. Dis.* **2009**, *6*, 387–394. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
52. Sokolowska, B.; Chotkiewicz, M.; Niezgodna, J.; Dekowska, A. Ocena Zanieczyszczenia Mikrobiologicznego Świeżych, Niepasteryzowanych, Wyciskanych Soków Owocowych i Warzywnych Dostępnych w Handlu. *Zesz. Probl. Postępow. Nauk. Rol.* **2011**, *569*, 219–228.
53. Hashemi, S.M.B.; Jafarpour, D. Ultrasound and malic acid treatment of sweet lemon juice: Microbial inactivation and quality changes. *J. Food Process. Preserv.* **2020**, *44*, e14866. [[CrossRef](#)]
54. Ramos, S.; Silva, V.; Dapkevicius, M.d.L.E.; Caniça, M.; Tejedor-Junco, M.T.; Igrejas, G.; Poeta, P. *Escherichia coli* as Commensal and Pathogenic Bacteria among Food-Producing Animals: Health Implications of Extended Spectrum β -Lactamase (ESBL) Production. *Animals* **2020**, *10*, 2239. [[CrossRef](#)]
55. Guerrouj, K.; Sánchez-Rubio, M.; Taboada-Rodríguez, A.; Cava-Roda, R.M.; Marín-Iniesta, F. Sonication at mild temperatures enhances bioactive compounds and microbiological quality of orange juice. *Food Bioprod. Process.* **2016**, *99*, 20–28. [[CrossRef](#)]
56. Adekunle, A.O.; Tiwari, B.K.; Cullen, P.J.; Scannell, A.G.M.; O'donnell, C.P. Effect of sonication on colour, ascorbic acid and yeast inactivation in tomato juice. *Food Chem.* **2010**, *122*, 500–507. [[CrossRef](#)]
57. Wu, T.; Yu, X.; Hu, A.; Zhang, L.; Jin, Y.; Abid, M. Ultrasonic disruption of yeast cells: Underlying mechanism and effects of processing parameters. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2015**, *28*, 59–65. [[CrossRef](#)]
58. Bhat, R.; Kamaruddin, N.S.B.C.; Min-Tze, L.; Karim, A.A. Sonication improves kasturi lime (*Citrus microcarpa*) juice quality. *Ultrason. Sonochem.* **2011**, *18*, 1295–1300. [[CrossRef](#)]
59. Khandpur, P.; Gogate, P.R. Evaluation of ultrasound based sterilization approaches in terms of shelf life and quality parameters of fruit and vegetable juices. *Ultrason. Sonochem.* **2016**, *29*, 337–353. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
60. Choo, Y.X.; Teh, L.K.; Tan, C.X. Effects of Sonication and Thermal Pasteurization on the Nutritional, Antioxidant, and Microbial Properties of Noni Juice. *Molecules* **2022**, *28*, 313. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
61. Martínez-Flores, H.E.; Garnica-Romo, M.G.; Bermúdez-Aguirre, D.; Pokhrel, P.R.; Barbosa-Cánovas, G.V. Physico-chemical parameters, bioactive compounds and microbial quality of thermo-sonicated carrot juice during storage. *Food Chem.* **2015**, *172*, 650–656. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
62. Bermúdez-Aguirre, D.; Barbosa-Cánovas, G.V. Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in pineapple, grape and cranberry juices under pulsed and continuous thermo-sonication treatments. *J. Food Eng.* **2012**, *108*, 383–392. [[CrossRef](#)]
63. Basumatary, B.; Nayak, P.K.; Chandrasekar, C.M.; Nath, A.; Nayak, M.; Kesavan, R.K. Impact of thermo sonication and pasteurization on the physicochemical, microbiological and anti-oxidant properties of pomelo (*Citrus maxima*) juice. *Int. J. Fruit Sci.* **2020**, *20*, S2056–S2073. [[CrossRef](#)]
64. Oladunjoye, A.O.; Adeboyejo, F.O.; Okekunbi, T.A.; Aderibigbe, O.R. Effect of thermosonication on quality attributes of hog plum (*Spondias mombin* L.) juice. *Ultrason. Sonochem.* **2021**, *70*, 105316. [[CrossRef](#)]
65. Rivas, A.; Rodrigo, D.; Martínez, A.; Barbosa-Cánovas, G.; Rodrigo, M. Effect of PEF and heat pasteurization on the physical-chemical characteristics of blended orange and carrot juice. *LWT-Food Sci. Technol.* **2006**, *39*, 1163–1170. [[CrossRef](#)]

66. Anaya-Esparza, L.M.; Velázquez-Estrada, R.M.; Roig, A.X.; García-Galindo, H.S.; Sayago-Ayerdi, S.G.; Montalvo-González, E. Thermosonication: An alternative processing for fruit and vegetable juices. *Trends Food Sci. Technol.* **2017**, *61*, 26–37. [CrossRef]
67. Silva, F.V. High pressure processing pretreatment enhanced the thermosonication inactivation of *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores in orange juice. *Food Control* **2016**, *62*, 365–372. [CrossRef]
68. Starek, A.; Kobus, Z.; Sagan, A.; Chudzik, B.; Pawlat, J.; Kwiatkowski, M.; Terebun, P.; Andrejko, D. Influence of ultrasound on selected microorganisms, chemical and structural changes in fresh tomato juice. *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 365–372. [CrossRef] [PubMed]
69. Cansino, N.C.; Carrera, G.P.; Rojas, Q.Z.; Olivares, L.D.; García, E.A.; Moreno, E.R. Ultrasound Processing on Green Cactus Pear (*Opuntia Ficus Indica*) Juice: Physical, Microbiological and Antioxidant Properties. *J. Food Process. Technol.* **2013**, *4*, 267.
70. Pokhrel, P.R.; Bermúdez-Aguirre, D.; Martínez-Flores, H.E.; Garnica-Romo, M.G.; Sablani, S.; Tang, J.; Barbosa-Cánovas, G.V. Combined Effect of Ultrasound and Mild Temperatures on the Inactivation of *E. Coli* in Fresh Carrot Juice and Changes on Its Physicochemical Characteristics. *J. Food Sci.* **2017**, *82*, 2343–2350. [CrossRef] [PubMed]
71. Tomadoni, B.; Cassani, L.; Viacava, G.; Moreira, M.D.R.; Ponce, A. Effect of ultrasound and storage time on quality attributes of strawberry juice. *J. Food Process. Eng.* **2017**, *40*, e12533. [CrossRef]
72. Nayak, P.K.; Chandrasekar, C.M.; Kesavan, R.K. Effect of thermosonication on the quality attributes of star fruit juice. *J. Food Process. Eng.* **2018**, *41*, e12857. [CrossRef]
73. Demir, H.; Kılınc, A. Effect of Batch and Continuous Thermosonication on the Microbial and Physicochemical Quality of Pumpkin Juice. *J. Food Sci. Technol.* **2019**, *56*, 5036–5045. [CrossRef]
74. Mala, T.; Sadiq, M.B.; Anal, A.K. Optimization of thermosonication processing of pineapple juice to improve the quality attributes during storage. *J. Food Meas. Charact.* **2021**, *15*, 4325–4335. [CrossRef]
75. Hasheminya, S.; Dehghannya, J. Non-thermal processing of black carrot juice using ultrasound: Intensification of bioactive compounds and microbiological quality. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2022**, *57*, 5848–5858. [CrossRef]
76. Koda, S.; Miyamoto, M.; Toma, M.; Matsuoka, T.; Maebayashi, M. Inactivation of *Escherichia coli* and *Streptococcus mutans* by ultrasound at 500 kHz. *Ultrason. Sonochem.* **2009**, *16*, 655–659. [CrossRef]
77. Tiwari, B.K.; Muthukumarappan, K.; O'donnell, C.P.; Cullen, P.J. Effects of Sonication on the Kinetics of Orange Juice Quality Parameters. *J. Agric. Food Chem.* **2008**, *56*, 2423–2428. [CrossRef]
78. Ferrario, M.; Alzamora, S.M.; Guerrero, S. Study of the inactivation of spoilage microorganisms in apple juice by pulsed light and ultrasound. *Food Microbiol.* **2015**, *46*, 635–642. [CrossRef] [PubMed]
79. Ferrario, M.; Guerrero, S. Impact of a combined processing technology involving ultrasound and pulsed light on structural and physiological changes of *Saccharomyces cerevisiae* KE 162 in apple juice. *Food Microbiol.* **2017**, *65*, 83–94. [CrossRef] [PubMed]
80. Kernou, O.; Belbahi, A.; Amir, A.; Bedjaoui, K.; Kerdouche, K.; Dairi, S.; Aoun, O.; Madani, K. Effect of sonication on microwave inactivation of *Escherichia coli* in an orange juice beverage. *J. Food Process. Eng.* **2021**, *44*, e13664. [CrossRef]
81. Hosseinzadeh Samani, B.; Khoshtaghaza, M.H.; Minaee, S. Modeling the Simultaneous Effects of Microwave and Ultrasound Treatments on Sour Cherry Juice Using Response Surface Methodology. *J. Agr. Sci. Tech.* **2015**, *17*, 837–846.
82. Tremarin, A.; Brandão, T.R.; Silva, C.L. Application of ultraviolet radiation and ultrasound treatments for *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores inactivation in apple juice. *LWT* **2017**, *78*, 138–142. [CrossRef]
83. Aadil, R.M.; Zeng, X.; Han, Z.; Sahar, A.; Khalil, A.A.; Rahman, U.U.; Khan, M.; Mehmood, T. Combined effects of pulsed electric field and ultrasound on bioactive compounds and microbial quality of grapefruit juice. *J. Food Process. Preserv.* **2018**, *42*, e13507. [CrossRef]
84. Fonteles, T.V.; Barroso, M.K.d.A.; Filho, E.d.G.A.; Fernandes, F.A.N.; Rodrigues, S. Ultrasound and Ozone Processing of Cashew Apple Juice: Effects of Single and Combined Processing on the Juice Quality and Microbial Stability. *Processes* **2021**, *9*, 2243. [CrossRef]
85. Yıldız, S.; Pokhrel, P.R.; Unluturk, S.; Barbosa-Cánovas, G.V. Changes in Quality Characteristics of Strawberry Juice After Equivalent High Pressure, Ultrasound, and Pulsed Electric Fields Processes. *Food Eng. Rev.* **2021**, *13*, 601–612. [CrossRef]
86. Umair, M.; Jabbar, S.; Senan, A.M.; Sultana, T.; Nasiru, M.M.; Shah, A.A.; Zhuang, H.; Jianhao, Z. Influence of Combined Effect of Ultra-Sonication and High-Voltage Cold Plasma Treatment on Quality Parameters of Carrot Juice. *Foods* **2019**, *8*, 593. [CrossRef]
87. Guerrero, S.N.; Ferrario, M.; Schenk, M.; Carrillo, M.G. Hurdle Technology Using Ultrasound for Food Preservation. In *Ultrasound: Advances for Food Processing and Preservation*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2017; pp. 39–99.
88. Nunes, B.V.; da Silva, C.N.; Bastos, S.C.; de Souza, V.R. Microbiological Inactivation by Ultrasound in Liquid Products. *Food Bioprocess Technol.* **2022**, *15*, 2185–2209. [CrossRef]
89. Khan, S.A.; Dar, A.H.; Bhat, S.A.; Fayaz, J.; Makroo, H.A.; Dwivedi, M. High Intensity Ultrasound Processing in Liquid Foods. *Food Rev. Int.* **2020**, *38*, 1123–1148. [CrossRef]
90. Hielscher Ultrasonics. Available online: <https://www.hielscher.com/industry.htm> (accessed on 30 August 2023).

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

P3. Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Pawłat, J. (2024). Niekonwencjonalne metody utrwalania produktów rolno-spożywczych. Wydawnictwo Inżynieria Rolnicza, Kraków, 105 s, 978-83-64377-58-7. (IF=0,000, MNiSW=80).

INŻYNIERIA ROLNICZA

Seria: Monografie i Rozprawy

ISBN 978-83-64377-58-7

**Emilia Osmólska,
Agnieszka Starek-Wójcicka,
Joanna Pawłat**

**Niekonwencjonalne metody utrwalania
produktów rolno-spożywczych**

**Komitet Inżynierii Rolniczej
Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej**

Kraków 2024

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

**Niekonwencjonalne metody utrwalania
produktów rolno-spożywczych**

**Emilia Osmólska, Agnieszka Starek-Wójcicka,
Joanna Pawłat**

Kraków 2024

Rada Naukowa Wydawnictwa

Radomir Adamovsky, Czech University of Life Sciences Prague, Czech Republic

Aylin Altan, Mersin University, Turkey

Vlodymyr Bulgakov, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine

Karl-Heinz Dammer, Leibniz-Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy, Germany

Dariusz Dziki, University of Life Sciences in Lublin, Poland

Pavol Findura, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovakia

Dorota Haman, University of Florida, USA

Zuzana Hlaváčová, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovakia

Lisa A. Holden, College of Agricultural Sciences, USA

Ryszard Hołownicki, Research Institute of Horticulture in Skierniewice, Poland

Bruno Huyghebaert, Walloon Agricultural Research Centre, Belgium

Jacek Przybył, Poznań University of Life Sciences, Poland

Alaa Subr, University of Baghdad, Iraq

Bernardo Strasbourg, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil

Muhammad Sultan, Bahauddin Zakariya University, Pakistan

Komitet Redakcyjny

Prof. dr hab. inż. Maciej Kuboń – redaktor naczelny

Prof. dr hab. inż. Sławomir Kocira – sekretarz

Recenzenci:

Prof. dr hab. inż. Dariusz Choszcz - Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Prof. dr hab. inż. Andrzej Dowgiałło - Morski Instytut Rybacki PIB w Gdyni

Wydawca:

Wydawnictwo „Inżynieria Rolnicza”

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, ul. Balicka 116B

ISBN 978-83-64377-58-7

Druk i oprawa:

NOVA SANDEC

ul. Lwowska 143, 33-300 Nowy Sącz

tel. +48 (18) 547 45 45

e-mail: biuro@novasandec.pl; <http://www.novasandec.pl>

Ark. wyd. 7,56; ark. druk. 6,75

Nakład: 100 egz.

Spis treści:

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	5
1. WPROWADZENIE	7
2. SEKTOR ROLNO-SPOŻYWCZY W POLSCE.....	9
2.1. Rola sektora rolno-spożywczego.....	10
2.2. Pandemia COVID-19 a polski sektor rolno-spożywczy.....	13
2.3. Prawne i organizacyjne wymagania warunkujące funkcjonowanie przemysłu rolno-spożywczego w Polsce.....	15
3. BEZPIECZEŃSTWO I JAKOŚĆ ŻYWNOŚCI PRODUKOWANEJ W POLSCE...	17
4. ZARYS HISTORYCZNY I ZNACZENIE STOSOWANIA KONWENCJO- NALNYCH METOD UTRWALANIA ŻYWNOŚCI.....	21
5. WPROWADZENIE DO NIEKONWENCJONALNYCH METOD UTRWA- LANIA	25
6. WYBRANE INNOWACYJNE SPOSOBY PRZEDŁUŻANIA TRWAŁOŚCI PRODUKTÓW SPOŻYWCZYCH.....	27
6.1. Pole elektryczne – pulsacyjne pole elektryczne (PEF).....	27
6.2. Ozonowanie	35
6.3. Wysokie ciśnienie hydrostatyczne – technologia HPP	43
6.4. Ultradźwięki - sonikacja	53
6.5. Plazma nietermiczna.....	61
7. SZANSE I ZAGROŻENIA WYNIKAJĄCE ZE STOSOWANIA NIEKONWENCJONALNYCH METOD UTRWALANIA ŻYWNOŚCI.....	73
8. PODSUMOWANIE	75
BIBLIOGRAFIA	77
SPIS STRON INTERNETOWYCH.....	99
STRESZCZENIE	100
ABSTRACT.....	100
SPIS RYSUNKÓW	101
SPIS TABEL.....	102
ZAŁĄCZNIK 1	103

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- HT – wysoka temperatura (ang. *High Temperature*)
HTST – pasteryzacja łagodna (ang. *High Temperature Short Time*)
HP – wysokie ciśnienie (ang. *High Pressure*)
HPP – wysokie ciśnienia hydrostatyczne (ang. *High Pressure Processing*)
PEF – pulsacyjne pole elektryczne (ang. *Pulsed Electric Field*)
Ec – natężenie pola elektrycznego (ang. *Intensity of the Electric Field*)
CAP – zimna plazma atmosferyczna (ang. *Cold Atmospheric Plasma*)
FDA – Agencja Żywności i Leków (ang. *Food and Drug Administration*)
EFSA – Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności (ang. *European Food Safety Authority*)
USDA – Departament Rolnictwa Stanów Zjednoczonych, (ang. ang. *United States Department of Agriculture*)
RTE – gotowe do spożycia posiłki (ang. *Ready to Eat*)
SEM – skaningowy mikroskop elektronowy (ang. *Scanning Electron Microscope*)
RONS – reaktywne formy tlenu i azotu (ang. *Reactive Oxygen and Nitrogen Species*)
BI – indeks brązowienia (ang. *Browning Index*)
DPPH – modelowy rodnik 2,2-difenylo-1-pikrylohydrazylowy (ang. *2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical*)
ORAC – zdolność pochłaniania reaktywnych form tlenu przez przeciwutleniacze (ang. *Oxygen Radical Absorbance Capacity*)
FRAP – zdolności przeciwutleniacza do redukcji żelaza Fe (III) (ang. *Ferric Reducing Antioxidant Power*)
MDA – wolny aldehyd malonowy (ang. *Malondialdehyde*)

1. WPROWADZENIE

Utrwalanie żywności jest kluczowym aspektem zapewnienia zrównoważonych dostaw żywności i ograniczenia jej marnowania. Pozwala na wydłużenie okresu przydatności do spożycia artykułów spożywczych, zmniejszając tym samym prawdopodobieństwo ich przedwczesnego zepsucia i potrzebę ciągłej produkcji (Żakowska-Biemans, 2009; Sapa, 2010; Adamczyk, 2019).

Na przestrzeni dziejów różne kultury na całym świecie stosowały różnorodne metody obróbki żywności. Do dnia dzisiejszego obejmują one między innymi: suszenie, solenie, wędzenie, kiszenie i marynowanie, a każda z nich ma na celu przedłużenie okresu przydatności do spożycia. Suszenie, na przykład, polega na usuwaniu wilgoci z produktów spożywczych, hamując rozwój bakterii i pleśni. Podobnie, solenie i wędzenie są wykorzystywane do odwadniania i konserwowania mięsa i ryb, podczas gdy kiszenie i marynowanie opierają się na działaniu pożytecznych bakterii w celu utrwalenia między innymi owoców i warzyw (Polak, 2007; Hać-Szymańczuk i in., 2019; Calín-Sánchez i in., 2020).

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój innowacyjnych technik utrwalania żywności, które mają na celu wyeliminowanie użycia ciepła, przy jednoczesnej poprawie ogólnej jakości i bezpieczeństwa artykułów rolnych i żywnościowych. Kluczowe znaczenie ma wartość odżywcza, a także tekstura, smak, konsystencja czy barwa, przyczyniające się do ogólnego wrażenia sensorycznego podczas konsumpcji. Względy bezpieczeństwa dotyczą zaś minimalizowania ryzyka chorób wynikających z zanieczyszczenia żywności (Świdorski i in., 2012; Szosland-Fałtyń i in., 2013). Techniki te obejmują przetwarzanie pod wysokim ciśnieniem, za pomocą pola elektrycznego, ozonu, sonikacji czy plazmy nietermicznej (Zhang i in., 2019; Mahendran i in., 2019; Starek-Wójcicka i in., 2022; Waghmare i in., 2023). Wdrażanie wymienionych nowych metod nie wiąże się zazwyczaj z dużymi kosztami. Przyczynia się za to, do postępu technicznego, obejmującego lepsze gospodarowanie zasobami, które aktualnie są użytkowane. Proces zmian rozwojowych wyrażający się przez wprowadzenie do procesu produkcji udoskonalonych maszyn, urządzeń, technologii oraz nowych produktów indukuje działania proekologiczne i innowacyjne rozwiązania z korzyścią dla wszystkich ludzi na świecie. Zastosowanie niekonwencjonalnych metod obróbki na skalę przemysłową umożliwi również małym i średnim przedsiębiorstwom zwiększenie swojej konkurencyjności na rynku i rozwijanie nowych modeli biznesowych (Amit i in., 2017; Reżek Jambrak i in., 2021; Hassoun i in., 2022).

Szczególnie w obecnych czasach, gdy ludzkość trapi tak wiele trudnych i złożonych problemów, istnieje olbrzymia potrzeba zapewnienia bezpieczeństwa mikrobiologicznego żywności. Niezmiernie ważną staje się sprawa świadomości, umiejętności tworzenia systemowych mechanizmów gwarantujących zachowanie odpowiedniej jakości surowcom szczególnie nietrwałym. Szybkie psucie się tego typu produktów naraża bowiem zakłady przetwórstwa spożywczego na straty finansowe. Dlatego też, poza dostarczaniem odpowiednich składników odżywczych, zarówno produkty pochodzenia roślinnego, jak i zwierzęcego powinny charakteryzować się dużą zdolnością przechowalniczą oraz dyspozycyjnością ułatwiającą obrót w sieciach handlowych.

2. SEKTOR ROLNO-SPOŻYWCZY W POLSCE

Sektor rolno-spożywczy w Polsce odgrywa kluczową rolę w gospodarce kraju, obejmując produkcję żywności, przetwórstwo rolnicze, dystrybucję, a także eksport i import artykułów spożywczych. Polska charakteryzuje się bowiem zróżnicowanym krajobrazem rolniczym, umożliwiającym między innymi uprawę zbóż, warzyw, owoców, chów i hodowlę zwierząt (Soczewka i Ginter, 2013; Kiełbasa, 2015). Należy również podkreślić, że wiele polskich zakładów przetwórczych specjalizuje się w produkcji artykułów spożywczych, takich jak wędliny, sery, pieczywo, napoje czy słodycze. Nasz kraj jest również ważnym eksporterem produktów rolno-spożywczych na rynki zagraniczne. Jednocześnie kraj importuje pewne wyroby, aby zaspokoić krajowe potrzeby (Pawlak i Poczta, 2008; Dolata i Hadryjańska, 2013).

Rysunek 1 przedstawia najważniejsze branże polskiego sektora rolno-spożywczego.



Rys. 1. Najważniejsze branże polskiego sektora rolno-spożywczego

Ostatnie lata przyniosły wzrost innowacji i zastosowania nowoczesnych technologii w sektorze rolno-spożywczym. Firmy wprowadzają nowe metody produkcji, monitorują jakość żywności, a także skupiają się na ekologii i zrównoważonym rozwoju (Chyłek i in., 2016; Pawlewicz i Brodziński, 2017). Ponadto Polska implementuje różne programy i środki wsparcia dla rolnictwa, mające na celu zwiększenie konkurencyjności sektora, poprawę standardów produkcji oraz wsparcie dla małych gospodarstw rolnych (Duczowska-Małysz, 2009). Bez wątpienia w ostatnich latach w polskim rolnictwie nastąpiła widoczna zmiana jakościowa pod względem poprawy efektywności produkcji oraz modernizacji zaplecza techniczno-produkcyjnego.

Mimo wielu sukcesów w tym zakresie, krajowy sektor rolny oraz przemysł spożywczy wymagają dalszych zmian polegającym na wdrażaniu innowacyjnych rozwiązań. Można je

osiągnąć poprzez zwiększenie konkurencyjności obu sektorów. Wymaga to efektywnej współpracy pomiędzy kadrami naukowo-badawczą, administracją i przedsiębiorstwami oraz wdrażania praktycznych rozwiązań naukowych. Realizacja polityki państwa w zakresie wdrażania innowacyjności w rolnictwie i przemyśle rolno-spożywczym jest jednym z priorytetowych zadań ujętych w „Strategii na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju do roku 2020 (z perspektywą do 2030 roku), gdzie jako specjalizację określono: „Biogospodarka rolno-spożywcza, leśno-drzewna i środowiskowa”, a w ramach niej wyodrębniono trzy następujące: KIS 4. Innowacyjne technologie, procesy i produkty sektora rolno-spożywczego i leśno-drzewnego; KIS 5. Zdrowa żywność (o wysokiej jakości i ekologiczności produkcji); KIS 6. Biotechnologiczne procesy i produkty chemii specjalistycznej oraz inżynierii.

Zmiana klimatu również niesie ze sobą wiele wyzwań dla rolnictwa w Unii Europejskiej. Wspólna polityka rolna ma jednak za zadanie zwiększyć odporność rolnictwa i leśnictwa na zmianę klimatu oraz wspierać działania, które pomagają osiągnąć unijne cele klimatyczne. Nie bez znaczenia jest także problematyka związana ze zrównoważonym rozwojem, który odpowiada na obecne potrzeby globalne oraz bierze pod uwagę konieczność zaspokajania potrzeb przyszłych generacji (Chotkowski i Rembeza, 2010; Nosecka i in., 2012; Pawlak i Kołodziejczak, 2020).

2.1. Rola sektora rolno-spożywczego

Przemysł spożywczy wyróżnia się jako jeden z głównych i szybko rozwijających się segmentów polskiej gospodarki. Uważany jest za ważne ogniwo łańcucha żywnościowego, ponieważ integruje pozostałe elementy tego łańcucha, takie jak: rolnictwo, skup i handel produktami rolnymi oraz handel żywnością. Specyfika produktów żywnościowych powoduje, że są one absolutnie niezbędne dla konsumentów i w coraz większym stopniu są zdolne zaspokajać ich rosnące wymagania konsumentów. Co więcej, przemysł spożywczy w Polsce ma znaczący udział w gospodarce narodowej, szczególnie w wartości dodanej brutto, liczbie przedsiębiorstw, zatrudnieniu czy produkcji sprzedanej. Sektor ten w produkcji zużywa najwyższej jakości surowce, poziom technologiczny samego przetwórstwa uznać można za jeden z nowocześniejszych, a polska żywność cieszy się coraz większym zainteresowaniem na świecie (Firlej, 2015; Zuba-Ciszewska, 2020).

Era członkostwa Polski w Unii Europejskiej była okresem wyraźnego wzrostu handlu zagranicznego produktami rolno-spożywczymi. Ta wzrostowa trajektoria była widoczna już od akcesji w 2004 roku, kiedy to polski handel produktami rolno-spożywczymi odnotował znaczny wzrost o prawie 30% w porównaniu z rokiem poprzednim. Ta pozytywna dynamika utrzymywała się w kolejnych latach, a wartość handlu stale rosła, napędzana trwałym rozwojem eksportu, jak i importu. Od momentu akcesji Polski do UE dodatnie saldo wymiany handlowej produktami rolno-spożywczymi przeważnie wciąż rosło (z wyjątkiem lat 2008 i 2011). W 2017 roku wartość bilansu handlowego przekroczyła 9,6 mld USD, co oznacza ponad dziewięciokrotny wzrost w porównaniu z 2004 rokiem. Dla porównania, w tym samym okresie skumulowana stopa wzrostu PKB, wyrażona jako wartość stała, wyniosła około 163%. Dynamika eksportu i salda handlu zagranicznego produktami rolno-spożywczymi znacząco przewyższała tempo wzrostu PKB, potwierdzając proeksportowy

charakter rozwoju tego sektora polskiej gospodarki (Kowalski, 2009; Wiśniewska, 2010; Grzelak i Roszko-Wójtowicz, 2015; Mizik, 2021; Szajner i Szczepaniak, 2020).

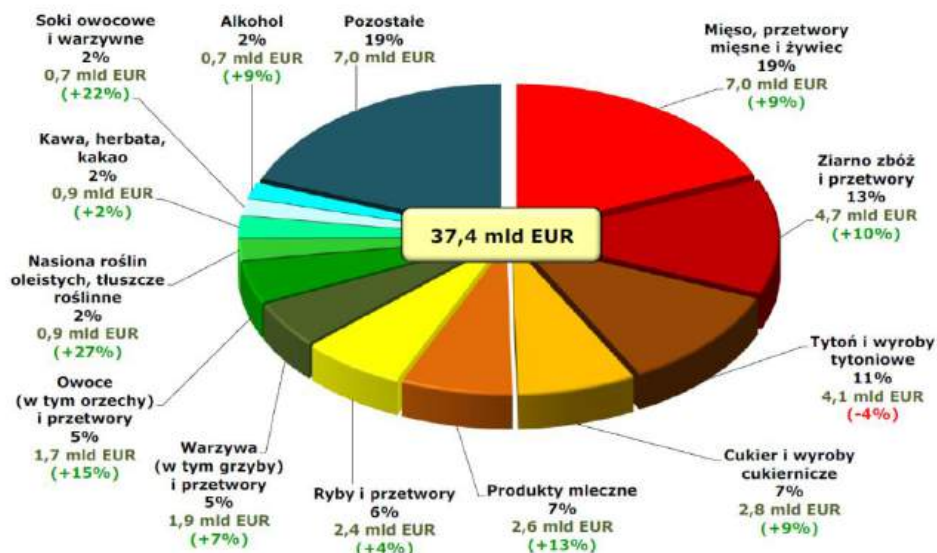
Jedynie odchylenie miało miejsce w 2009 roku, kiedy to w wyniku globalnego kryzysu finansowego prowadzącego do spowolnienia gospodarczego, handel skurczył się o prawie 11% w ujęciu rok do roku. Do 2017 roku całkowita wartość handlu polskimi produktami rolno-spożywczymi wzrosła do prawie 49,6 mld USD, przy eksporcie wynoszącym około 29,6 mld USD i imporcie na poziomie 20,0 mld USD. W porównaniu z 2004 rokiem oznacza to ponad czterokrotny wzrost obrotów, przy czym eksport wzrósł 4,5-krotnie, a import ponad 3,5 – krotnie (PARP – grupa PFR, 2020; PAIiH – grupa PFR, 2021).

Przemysł spożywczy charakteryzuje się znaczącym udziałem w tworzeniu PKB, czego wynikiem jest wartość dodana produkcji żywności, która w 2017 roku wyniosła 44,5 mld zł, stanowiąc 13,2% PKB. Dla porównania, sektor budowlany wniósł w owym okresie około 7% do PKB.

Co więcej, produkcja żywności miała zasadniczy udział w całkowitej wartości przetwórstwa przemysłowego. W 2017 roku stanowiła ona 15,4%, zapewniając 15. pozycję w rankingu produkcji sprzedanej. Silne powiązanie sektora z konkurencyjnymi rynkami eksportowymi, zarówno w UE, jak i w krajach trzecich, podkreśla strategiczne znaczenie produkcji żywności w Polsce dla wspierania inwestycji krajowych i zagranicznych. W szczególności produkcja i przetwórstwo żywności stanowią siłę napędową rozwoju gospodarczego kraju. Globalne trendy w popycie na żywność dodatkowo uwidaczniają znaczny potencjał rozwojowy polskiego przemysłu spożywczego (Pawlak, 2018; Baján i in., 2021).

W strukturze polskiego eksportu produktów rolno-spożywczych dominującą rolę odgrywało mięso i jego pochodne. W 2021 roku przychody wygenerowane ze sprzedaży zagranicznej w tej kategorii odnotowały 9% wzrost w porównaniu z rokiem poprzednim, osiągając łącznie 7,0 mld euro. Stanowiło to 19% ogólnej wartości polskiego eksportu produktów rolno-spożywczych. Największy udział w wartości eksportu posiadały kolejno: mięso drobiowe (39% - 2,7 mld euro), przetwory mięsne (24% - 1,7 mld euro), wołowina (23% - 1,6 mld euro) oraz wieprzowina (11% - 0,8 mld euro). Eksport żywych zwierząt i innych gatunków mięsa stanowiły stosunkowo niewiele - odpowiednio 2% i 1% przychodów z eksportu produktów mięsnych pochodzących z Polski (rys. 2) (Holstein, 2022).

Pod względem wartości, drugą pozycję w polskim eksporcie produktów rolno-spożywczych zajęły zboża i przetwory zbożowe, stanowiąc 13% udziału. Wartość sprzedaży wzrosła o 10% w stosunku do roku poprzedniego i wyniosła 4,7 mld euro. Odnotowano również znaczny wzrost wartości eksportu cukru i wyrobów cukierniczych (9%, łącznie 2,8 mld euro), produktów mleczarskich (13%, osiągając 2,6 mld euro), a także ryb i produktów przetworzonych (4%, łącznie 2,4 mld euro). Zwiększenie wartości eksportu zaobserwowano również w przypadku warzyw i produktów przetworzonych, z 7% wzrostem (osiągając 1,9 mld euro), owoców, w tym produktów przetworzonych, wykazujących 15% przyrost (osiągając 1,7 mld euro), nasion oleistych i tłuszczów roślinnych odnotowujących wzrost o 27% (osiągając 0,9 mld euro), kawy, herbaty i kakao odnotowujących przyrost o 2% (osiągając 0,9 mld euro), soków owocowych i warzywnych wykazujących 22% wzrost (osiągając 0,7 mld euro) oraz alkoholu wykazującego 9% przyrost (osiągając 0,7 mld euro). Przychody z zagranicznej sprzedaży tytoniu i wyrobów tytoniowych spadły natomiast o 4%, osiągając poziom 4,1 mld euro (rys. 2) (Holstein, 2021).



Rys. 2. Struktura towarowa polskiego eksportu rolno-spożywczego w 2021 roku

(www.holstein.pl)

Sukces rodzimych przedsiębiorców w eksporcie jest oczywisty, szczególnie w dziedzinie produktów spożywczych, takich jak wędliny, nabiał, owoce i warzywa, pieczywo, wyroby cukiernicze oraz napoje i soki. Polska żywność cieszy się bowiem dobrą opinią wśród europejskich konsumentów, co przyczynia się do jej rozpoznawalności na rynkach międzynarodowych. Krajowa żywność korzystnie konkuruje na rynkach zagranicznych również pod względem ceny, a zmieniający się krajobraz gospodarczy i rosnąca zamożność, zwłaszcza na perspektywicznych rynkach (azjatyckim czy afrykańskim), podkreślają, że jakość produktu będzie odgrywać coraz większą rolę w pozycjonowaniu rynkowym (Poczta i Pawlak, 2011; Bojnec i Fertó, 2015; Kacperska, 2015).

W świetle rosnących kosztów produkcji i nacisku na trendy prozdrowotne, istnieje szansa na utrzymanie istniejących rynków i zdobycie nowych poprzez wzmocnienie marki lokalnej żywności. Wiąże się to z koncentracją na produktach o najwyższej jakości i wartości odżywczej. Osiągnięcie tego celu będzie jednak wymagało zdobycia nowej wiedzy i umiejętności oraz kompetencji społecznych przez osoby zaangażowane w ten sektor gospodarki (Al-Tit, 2015; Popkin, 2017; Kowalczyk i Kwasek, 2020).

Podejście konsumentów do jakości produktów ewoluuje, wykraczając poza zwykłe potrzeby żywieniowe, obejmując zwiększony nacisk na zrównoważoną produkcję. Mowa tutaj również o kwestiach związanych z ochroną środowiska, w tym zmniejszeniu ilości odpadów, zużyciu energii i wody, ograniczeniu emisji CO₂ oraz rosnących preferencji dla opakowań pochodzących z recyklingu (Głodowska i Gałązka, 2017).

Polska produkcja żywności ma duży potencjał, który charakteryzuje się wyjątkową popularnością i wysokim uznaniem wśród klientów. Podkreśla to rosnącą potrzebę strategicz-

nego kształtowania wizerunku naszego kraju jako dostawcy smacznych, bezpiecznych produktów najwyższej jakości, wytwarzanych z zachowaniem rygorystycznych norm sanitarnych.

Branża przetwórstwa spożywczego odgrywa również znaczącą rolę w zatrudnieniu. W 2017 roku w zakładach przetwórstwa spożywczego pracowało 381 tys. osób, co stanowiło 3% ogółu. Biorąc pod uwagę osoby zaangażowane w produkcję surowców rolnych i dystrybucję, ogólną liczbę pracowników bezpośrednio lub pośrednio związanych z sektorem produkcji i przetwórstwa żywności szacuje się na około 2 miliony osób (PARP-grupa PFR, 2020).

Sektor produkcji żywności w Polsce wyróżnia się zaawansowanymi standardami technicznymi, technologicznymi i organizacyjnymi, wymagającymi siły roboczej wyposażonej w wysokie umiejętności technologiczne, organizacyjne i menedżerskie. Polska stała się wiodącym i innowacyjnym producentem żywności w Europie. Uznając ten potencjał, konieczne jest nadanie priorytetu strategicznym inwestycjom w rozwój sektora, w tym w kształceniu wykwalifikowanej kadry. Nacisk na rozwój umiejętności ma kluczowe znaczenie dla wspierania wszechstronnego rozwoju polskiej gospodarki (Płaza, 2017).

Szereg wyzwań, obejmujących popyt, podaż, uwarunkowania technologiczne, prawne i formalne, stanowi istotną barierę dla wielu firm aspirujących do wejścia na rynek. W związku z tym, istnieje pilna potrzeba ciągłej edukacji wśród specjalistów z branży, obejmującej zarówno krajowe, jak i międzynarodowe przepisy, pojawiające się trendy w technologii produkcji żywności i pakowania, a także zmieniający się krajobraz strategii marketingowych. W obliczu silnej konkurencji sukces operatorów sektora spożywczego w znacznym stopniu zależy od ich zdolności adaptacyjnych do przepisów określających standardy jakości zatwierdzone dla rynku europejskiego.

2.2. Pandemia COVID-19 a polski sektor rolno-spożywczy

Pandemia COVID-19 wywarła znaczący wpływ na polski sektor rolno-spożywczy, oddziałując na różne aspekty produkcji, dostaw i konsumpcji. Jednym z głównych obszarów zakłóceń była zmiana międzynarodowego łańcucha dostaw, co negatywnie wpłynęło na możliwości dystrybutorów surowców i produktów gotowych. Ograniczenia w przemieszczaniu się i zamknięcia granic doprowadziły do wielu problemów w transporcie i handlu międzynarodowym (Szczepaniak i in., 2020; Drożdż i in., 2021).

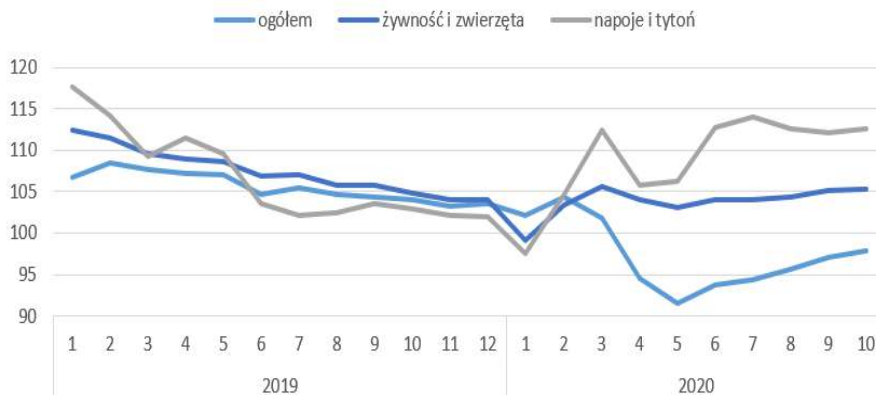
W 2020 roku Polska doświadczyła najbardziej znaczącego spadku PKB we współczesnej historii. Gospodarka skurczyła się realnie o 8,2% w porównaniu z rokiem poprzednim (GUS, 2020a). Spowolnienie rynkowe było jeszcze bardziej widoczne wśród naszych zachodnioeuropejskich konkurentów, a wahania koniunktury rok do roku przekroczyły w niektórych przypadkach 20%, na przykład w Hiszpanii (21,6%) i Wielkiej Brytanii (21,7%). W szerszej skali UE średni spadek w drugim kwartale 2020 r. wyniósł 14%. Pomimo przewidywanego ożywienia w drugiej połowie roku, globalny PKB za cały rok miał według prognoz zmniejszyć się o 5 procent (Spożywcze Technologie, 2021).

Z danych wynika, że polski sektor przetwórstwa spożywczego wykazał się dużą odpornością podczas początkowych skutków kryzysu związanego z Covid-19. Podczas gdy średnia produkcja przemysłu w UE spadła w 2020 r. o 2,6% (z wyłączeniem grudnia), Polska

odnotowała niewielki, ale dodatni wzrost rok do roku na poziomie 0,8%. Redukcja w drugim kwartale była także w Polsce mniej dotkliwa (5,3%) w porównaniu do całej UE (8,3%).

Pandemia Covid-19 w różnym stopniu oddziaływała na segmenty branży spożywczej w Polsce. W czasie kryzysu najlepiej zareagowali producenci trwałej żywności, takiej jak kasze i makarony, ze względu na ich przydatność do długotrwałego przechowywania i domowego przygotowania (rys. 3) (Spożywcze Technologie, 2021).

Co więcej, wyzwania związane z dostępnością siły roboczej stały się widoczne, szczególnie w sektorach związanych z produkcją rolną, gdzie praca dorywcza odgrywa kluczową rolę. Wywołane pandemią ograniczenia w przemieszczaniu się pracowników sezonowych wpłynęły na efektywność procesów rolniczych. Jednocześnie, ze względu na zamknięcie restauracji, ograniczenia w handlu detalicznym i zmiany w zachowaniach konsumentów, zauważalne były również przekształcenia w popycie na różnorodne produkty spożywcze. Wzrosło zainteresowanie produktami o wydłużonym okresie przydatności do spożycia, a konsumenci coraz częściej wyrażali chęć wspierania lokalnych producentów i artykułów spożywczych. Trend ten przyczynił się do zwiększenia znaczenia rynku lokalnego (Kowalczyk, 2020; Drożdż i Mroczek, 2022; Jezierski, 2022).



Rys. 3. Procentowy wskaźnik wolumenu w obrotach handlu zagranicznego w Polsce w latach 2019-2020 (www.spozywcze Technologie.pl)

Niektóre segmenty sektora rolno-spożywczego, napotkały znaczące wyzwania finansowe wynikające z zamknięć i ograniczeń operacyjnych podczas pandemii. Krajowy sektor napojów odczuł osłabienie popytu ze strony sektora Hotel, Restaurant, Catering, natomiast przemysł tytoniowy odnotował znaczne zyski, rosnąc o 6,4% w tym samym okresie i o 9,5% w najbardziej dotkliwym drugim kwartale. Negatywne skutki odczuły sektory produkujące świeżą żywność, pieczywo, silnie uzależnione od eksportu oraz branża HoReCa. Jednak w wielu segmentach nastąpiło odwrócenie negatywnych trendów wraz ze złagodzeniem ograniczeń dotyczących dystansu społecznego i częściowym otwarciem restauracji. Od czerwca w kilku poważnie dotkniętych segmentach ponownie odnotowano roczny

wzrost produkcji. Wpływ na te zmiany miało zniesienie ograniczeń i częściowe „odmrożenie” restauracji w Polsce i większości krajów UE (Spożywcze Technologie, 2021).

Podsumowując, pandemia COVID-19 zmusiła sektor rolno-spożywczy w Polsce do przystosowania się do zmieniających się warunków rynkowych, wdrożenia norm sanitarnych i modyfikacji strategii biznesowych w celu dostosowania się do zmieniającej się dynamiki związanej z pandemią.

2.3. Prawne i organizacyjne wymagania warunkujące funkcjonowanie przemysłu rolno-spożywczego w Polsce

Przemysł rolno-spożywczy ma ogromne znaczenie dla stabilności gospodarczej każdego narodu, będąc istotnym elementem funkcjonowania społeczeństw zarówno w krajach wysoko rozwiniętych, jak i tych rozwijających się. W Polsce sektor ten był świadkiem znaczących przemian, zwłaszcza od 1989 roku, kiedy to kraj przeszedł transformację ustrojową nazwaną liberalizacją, stabilizacją i kompleksowymi reformami gospodarczymi zwanymi „Planem Balcerowicza” (Szczepaniak i Wigier, 2020).

Przystąpienie Polski do Unii Europejskiej wywarło głęboki wpływ na wzrost i rozwój polskiego przemysłu spożywczego, jednak wiązało się z koniecznością przestrzegania wielu nowych praw i rozporządzeń. Codex Alimentarius, utworzony przez FAO i WHO, jest światowym aktem prawnym regulującym dokumenty związane z bezpieczeństwem żywności. Jednakże w Unii Europejskiej głównymi rozporządzeniami kontrolującymi bezpieczeństwo żywności są m.in. Rozporządzenie (WE) nr 178/2002, Rozporządzenie (WE) nr 852/2004 i Rozporządzenie (WE) nr 882/2004. Rozporządzenie (WE) nr 178/2002 ustanawia ogólne zasady i wymagania dotyczące prawa żywnościowego. Rozporządzenie (WE) nr 852/2004 określa wymagania higieniczne dla przedsiębiorstw spożywczych, a rozporządzenie (WE) nr 882/2004 wyznacza zasady dotyczące kontroli urzędowych w celu zapewnienia zgodności z prawem żywnościowym i zdrowiem zwierząt. Akty te pomagają w definiowaniu bezpieczeństwa i jakości żywności na terenie Unii Europejskiej (Garlińska-Bielawska i Jakóbiak, 2006; Bryła, 2017; Sokołowski, 2018; Szajner i Szczepaniak, 2020).

Produkty żywnościowe podlegają ścisłym regulacjom, aby zapewnić gwarancję zdrowotności i nieszkodliwości dla społeczeństwa. Przepisy te obejmują normy krajowe i międzynarodowe, których celem jest ochrona zdrowia ludzkiego. W Polsce podstawowym aktem prawnym regulującym sektor spożywczy jest ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 roku o bezpieczeństwie żywności i żywienia (Dz. U. z 2018 r., poz. 1541 ze zm.). Zapewnia ona kompleksowe ramy przestrzegania bezpieczeństwa żywności w całym łańcuchu, od produkcji po konsumpcję. Jednym z kluczowych wymogów określonych w tym ustawodawstwie jest wdrożenie systemu analizy zagrożeń i krytycznych punktów kontroli (HACCP) w zakładach zajmujących się produkcją i marketingiem żywności. System ten pomaga identyfikować i kontrolować potencjalne zagrożenia, aby zapobiegać chorobom przenoszonym w trakcie konsumpcji żywności (Rye i Scott, 2018; Szajner i Szczepaniak, 2020; Karwacka i in., 2020).

W okresie integracji polskiego prawa żywnościowego z UE, początkowa faza działań dostosowawczych doprowadziła do powołania Polskiego Komitetu Normalizacyjnego. Podstawowym celem tej komisji było wytyczenie kierunków i wspieranie rozwoju normali-

zacji. W ramach Polskiego Komitetu Normalizacyjnego stworzono Komitety Techniczne, których zadaniem było zapewnienie zgodności polskich standardów żywności z unijnymi (Nowastowski, 2020).

Ponadto, aby zabezpieczyć się przed wprowadzeniem na rynek niebezpiecznej żywności, Unia Europejska w 2002 roku wdrożyła System Wczesnego Ostrzegania o Niebezpiecznej Żywności i Paszach (RASFF – *The Rapid Alert System for Food and Feed*). Każde państwo członkowskie ma obowiązek uczestniczyć w tym systemie, który odgrywa kluczową rolę w zapobieganiu niekorzystnym skutkom wynikającym ze spożycia żywności niskiej jakości. Jeżeli produkt spożywczy na którymkolwiek etapie łańcucha żywnościowego zostanie uznany za mogący negatywnie wpłynąć na zdrowie i samopoczucie konsumentów, może zostać szybko wycofany z całej sieci handlowej. W systemie RASFF wyróżnia się trzy podstawowe typy powiadomień dotyczących nieprawidłowości w obrocie żywnością na rynku wspólnotowym: komunikaty alarmowe i informacyjne oraz powiadomienia o zatrzymaniu na granicy. Polska stała się częścią systemu RASFF w 2003 roku, zaś w latach ubiegłych istniał inny system-Krajowy System Informacji o Niebezpiecznych Produktach Żywnościowych, ułatwiający przekazywanie informacji o nieprawidłowościach występujących w procesie obrotu żywnością (Djekic i in., 2017; Majewski i Dziubdziela, 2018; Alshannaq i Yu, 2021).

W tabeli 1 (załącznik 1) przedstawiono wykaz wybranych aktów prawnych Unii Europejskiej i krajowych dotyczących bezpieczeństwa żywności, żywienia oraz materiałów i wyrobów przeznaczonych do kontaktu.

Ponadto, istnieją jeszcze akty dotyczące żywności dla określonych grup, suplementów diety, żywności wzbogacanej, naturalnych wód mineralnych, wód źródłanych, wód stołowych, grzybów, napromieniania żywności, zanieczyszczeń żywności i pobierania próbek, materiałów i wyrobów przeznaczonych do kontaktu z żywnością oraz kontroli granicznej.

3. BEZPIECZEŃSTWO I JAKOŚĆ ŻYWNOŚCI PRODUKOWANEJ W POLSCE

Zapewnienie bezpieczeństwa i jakości żywności jest priorytetem w dzisiejszym, ciągle zmieniającym się świecie. Ma to wpływ zarówno na konsumentów, organy regulacyjne, jak i producentów. Troska ta wykracza poza zwykłą etykę i ma bezpośredni wpływ na zdrowie publiczne. Wraz ze wzrostem złożoności globalnych łańcuchów dostaw produktów spożywczych wdrożenie rygorystycznych środków gwarantujących bezpieczeństwo i jakość żywności stało się ważniejsze niż kiedykolwiek wcześniej (Käferstein i Abdussalam, 1999; King i in., 2017; Fung i in., 2018).

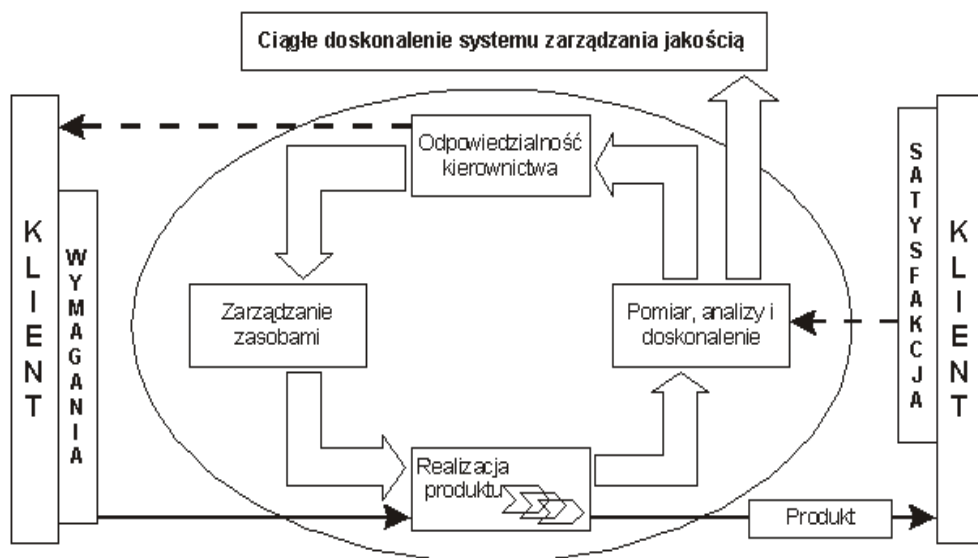
Normy ISO, znane również jako standardy Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej, to kompleksowy zestaw wytycznych i specyfikacji opracowanych przez ekspertów branżowych. Ich celem jest zagwarantowanie jednolitości, bezpieczeństwa i doskonałości produktów, usług i procesów. Przestrzegając tych dokumentów, organizacje mogą ustawić ustrukturyzowane ramy spełniające wymagania klientów, zwiększające efektywność operacyjną i ograniczające ryzyko. Normy ISO obejmują różne dziedziny, w tym zarządzanie jakością, zarządzanie środowiskiem, bezpieczeństwo informacji i bezpieczeństwo żywności. Uznanie znaczenia norm ISO jest niezbędne dla przedsiębiorstw dążących do sukcesu na dzisiejszym niezwykle konkurencyjnym rynku globalnym (Kotsanopoulos i Arvanitoyannis, 2017; Panghal i in., 2018; Agus i in., 2020).

Jedną z najbardziej znanych norm ISO jest norma ISO 9001, czyli wysoce uznawany dokument, który kładzie nacisk na systemy zarządzania jakością. Jest szeroko wdrażany przez organizacje, których celem jest konsekwentne spełnianie wymagań klientów i zwiększanie ich zadowolenia. ISO 9001 dostarcza cennych wskazówek dotyczących ustanawiania i utrzymywania skutecznych procesów, identyfikowania ryzyka i zarządzania nim, poprawy efektywności operacyjnej oraz wspierania ciągłego doskonalenia. Przestrzegając norm ISO 9001, organizacje mogą poprawić swoją ogólną wydajność i zapewnić skupienie się na kliencie w swoich działaniach (Rogala, 2012; Cholewicka-Goździk, 2016; Szkiel, 2016; Natarajan, 2017; Başaran, 2021).

ISO 9001 obejmuje szereg podstawowych zasad, które są kluczowe dla organizacji w celu osiągnięcia i utrzymania wysokich standardów jakości. Zasady te obejmują duży nacisk na satysfakcję klienta, skuteczne przywództwo, angażowanie pracowników, przyjęcie podejścia procesowego, podejmowanie decyzji w oparciu o dowody oraz wspieranie silnych relacji. Wdrożenie ISO 9001 wymaga od organizacji ustalenia jasnych celów jakościowych, regularnego monitorowania wyników i podejmowania działań naprawczych, jeśli zajdzie taka potrzeba. Stosując tę normę, przeprowadzane są regularne audyty i oceny, aby zapewnić przestrzeganie standardów i prowadzić do ciągłego doskonalenia (Purwanto, 2019; Echour i Nbigui, 2021).

Warto również wspomnieć o normie ISO 22000, która jest międzynarodowym standardem określającym wymagania dotyczące ustanawiania, wdrażania, utrzymywania i ciągłego doskonalenia. ISO 22000 to system zarządzania bezpieczeństwem żywności określający kryteria, które organizacja (dowolnej wielkości i o dowolnej pozycji) musi spełnić, aby wykazać skuteczną kontrolę nad zagrożeniami pojawiającymi się na wszystkich etapach produkcji. Norma ta obejmuje cały łańcuch żywnościowy i zawiera elementy zarówno ISO 9001, jak i HACCP.

Na rysunku 4 zobrazowano ramy systemu zarządzania jakością skupione wokół podejścia proceduralnego.



Rys. 4. Ramy systemu zarządzania jakością skupione wokół podejścia proceduralnego

(www.mfiles.pl)

ISO 22000 odgrywa kluczową rolę we wspieraniu organizacji w ulepszaniu i ustanawianiu ich systemów zarządzania bezpieczeństwem żywności, zapewnianiu zgodności z przepisami i udoskonalaniu różnych aspektów operacyjnych, takich jak kontrola zagrożeń i zarządzanie łańcuchem dostaw. Norma dotyczy komunikacji interaktywnej, zarządzania systemem, programów wprowadzających, zasad HACCP i innych kluczowych elementów znajdujących się w normach systemów zarządzania ISO. Organizacje są zobowiązane do ustanowienia wstępnych programów redukcji zanieczyszczeń, zawierających szczegółowe kryteria dostosowane do wyjątkowej sytuacji każdej organizacji (Psomas i Kafetzopoulos, 2015; Soares i in., 2016; Allata i in., 2017; Chen i in., 2020).

Korzyści wynikające z normy ISO 22000 obejmują globalne uznanie, podejście do zarządzania oparte na ryzyku oraz zaangażowanie w ciągłe doskonalenie.

Na rysunku 5 przedstawiono kluczowe obszary normy ISO 22000.



Rys. 5. Kluczowe obszary normy ISO 22000

HACCP (*Hazard Analysis and Critical Control Point*), znany również jako Analiza Zagrożeń i Krytycznych Punktów Kontroli to systematyczna i proaktywna metoda zapewniania bezpieczeństwa żywności. Poszczególne postępowania zawarte w tym systemie dotyczą identyfikacji, oceny i zarządzania potencjalnymi zagrożeniami na różnych etapach procesu produkcji żywności. System kieruje się zasadami obejmującymi weryfikację zagrożeń, identyfikację krytycznych punktów kontroli (CCP, *Critical Control Point*), ustalanie limitów krytycznych, bieżący monitoring i kontrolę oraz prowadzenie szczegółowej dokumentacji. Kluczowe zalety HACCP skupiają się na bieżącym charakterze, globalnej akceptacji jako podstawowego wymogu bezpieczeństwa żywności oraz nacisku na ciągłe monitorowanie (Soman i Raman, 2016; Rosak-Szyrocka i Abbase, 2020; Awuchi, 2023).

Rysunek 6 prezentuje siedem głównych zasad HACCP.

Oprócz względów bezpieczeństwa, ważna jest również jakość. Żywność o najwyższych walorach nie tylko spełnia normy, ale także zachowuje swoje wartości odżywcze i posiada atrakcyjne cechy sensoryczne. Zachowanie składników odżywczych i poprawa właściwości organoleptycznych odgrywają kluczową rolę w promowaniu ogólnego stanu zdrowia i zaspokojeniu preferencji konsumentów. Konsekwentne dostarczanie żywności wysokiej jakości buduje zaufanie wśród klientów, wzmacniając w ten sposób lojalność wobec marki i reputację przedsiębiorstwa. W dobie postępu technologicznego i wzmoczonych globalnych powiązań zaangażowanie w zapewnienie zarówno bezpieczeństwa, jak i właściwości fizykochemicznych, z uwzględnieniem wartości odżywczych jest zbiorową odpowiedzialnością dzieloną w całym łańcuchu dostaw (Balon i in., 2016; Brečić i in., 2017; Nagyová i in., 2019).



Rys. 6. Zasady systemu HACCP

Podsumowując, wspólny wysiłek producentów, organów regulacyjnych i konsumentów jest niezbędny do utrzymania standardów gwarantujących ogólną wysoką jakość żywności spożywanej przez ludzi. Zaangażowanie to zapewnia bezpieczniejszą przyszłość w obliczu wyzwań stale zmieniającego się globalnego krajobrazu żywnościowego.

4. ZARYS HISTORYCZNY I ZNACZENIE STOSOWANIA KONWENCJONALNYCH METOD UTRWALANIA ŻYWNOSCI

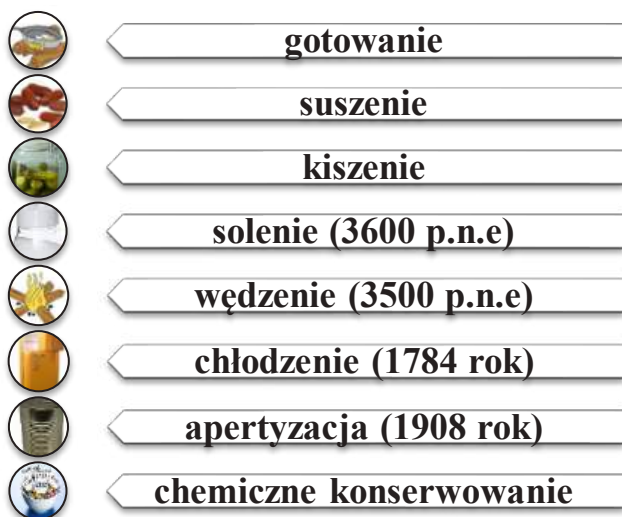
Podstawową funkcją jedzenia jest żywienie organizmu i zapewnienie mu odpowiednich ilości składników odżywczych, aby mógł nie tylko przetrwać, ale również funkcjonować i rozwijać się. Jedzenie określane jest mianem potrzeby niższego rzędu, co oznacza, że należy jeść aby żyć.

W czasach prehistorycznych zdobywanie jedzenia nie było sprawą prostą. Trudność polegała na znalezieniu oraz zebraniu korzeni i jagód lub polowaniu (najczęściej na mamuta). Ludzie odczuwali potrzebę przechowywania i konserwowania żywności, co ułatwiało im przetrwanie w okresie niedoboru świeżej. Ponadto możliwość przetwarzania wyrobów uwalniała człowieka od ciągłego poszukiwania pożywienia. Większość metod konserwacji żywności została zapoczątkowana przypadkowo, jednak z czasem udoskonalana i wraz z doświadczeniem przekazywana z pokolenia na pokolenie. Różne kultury, w różnych czasach i miejscach, stosowały tradycyjne techniki utrwalania produktów spożywczych, a część z nich jest nadal używana w wielu częściach świata.

Ponieważ procesy, które zachodzą w żywności podczas przechowywania obniżają jej jakość oraz wartości odżywcze i technologiczne, konserwowanie pozostaje dziś równie konieczne, jak w przeszłości. W większości krajów produkcja ma charakter sezonowy, co sprawia, że wiele surowców jest dostępnych tylko przez krótkie okresy w roku. W tym czasie wytwarza się większą ilość produktów, niż rynek jest w stanie wchłonąć, dlatego nadwyżki wielu z nich muszą zostać przetworzone w bardziej stabilną formę. Pozwala to uniknąć marnowania żywności oraz utraty dochodów producentów i przedsiębiorców. Zatem główny nacisk w przetwarzaniu żywności kładzie się na konserwację lub przedłużanie okresu przydatności do spożycia poprzez zapobieganie niepożądanym zmianom w wartości odżywczej i sensorycznej, kontrolując aktywność chemiczną, biochemiczną, fizjologiczną i mikrobiologiczną (Krzywinski i Tokarczyk, 2013; Joardder, i in., 2019; Aydin i Yildirim, 2021).

Metody przetwarzania i konserwacji żywności można podzielić na kilka kategorii, w tym między innymi suszenie, solenie, wędzenie i kiszenie (rys. 7). Każda z nich ma swoje unikalne zalety i przyczynia się do zapewnienia bezpiecznej, pożywnej i aromatycznej żywności przez dłuższy czas.

Początki gotowania sięgają czasów, gdy człowiek nauczył się kontrolować ogień. Istnieją dowody na to, że prehistoryczni ludzie zaczęli gotować mięso i stopniowo inne rodzaje żywności. Techniki gotowania znacznie się rozwinęły wraz z wynalezieniem ceramiki do gotowania wody. Większość praktykowanego obecnie gotowania wykorzystuje ciepło z wrzącej wody, a nie z bezpośredniego płomienia. Podczas tego procesu białka zawarte w potrawie ścinają się, skrobia zaś rozkleja, co powoduje, że składniki te stają się przyswajalne przez układ pokarmowy człowieka. Stosunkowo niska temperatura tego procesu, nieprzekraczająca stu stopni Celsjusza, sprawia iż w potrawie nie powstają szkodliwe dla zdrowia produkty rozkładu składników pokarmowych.



Rys. 7. Tradycyjne metody konserwacji żywności

Suszenie to jedna z najstarszych metod utrwalania, która polega na usunięciu wody z żywności, co hamuje rozwój bakterii i innych mikroorganizmów powodujących psucie. Suszenie można osiągnąć kilkoma technikami, w tym suszeniem na słońcu, suszeniem w piekarniku/suszarce z obiegiem powietrza lub poprzez odwodnienie. Suszona żywność nie traci wartości odżywczych i ma wydłużony okres przydatności do spożycia.

Kiszenie to proces wykorzystujący mikroorganizmy, takie jak bakterie lub drożdże, do rozkładu cukrów w żywności. W efekcie tym powstaje kwas mlekowy, który hamuje rozwój szkodliwych mikroorganizmów i wydłuża okres przydatności do spożycia artykułów spożywczych. Fermentowana żywność jest również bogata w probiotyki, które korzystnie wpływają na zdrowie jelit.

Solenie to kolejna tradycyjna metoda konserwacji żywności stosowana od wieków. Sól działa jako środek konserwujący, hamując rozwój bakterii i zapobiegając psuciu się. Wzmacnia również naturalny aromat produktów i poprawia ich smak.

Wędzenie polega na wystawianiu żywności na działanie dymu pochodzącego ze spalania drewna lub innych materiałów. Dym pomaga konserwować produkty, hamując rozwój niepożądanych drobnoustrojów. Ten sposób utrwalania poprawia także smak potraw i nadaje im niepowtarzalny wędzony zapach, pochodzący ze składników dymu otrzymanego ze spalania trocin z odpowiednich gatunków drewna, na przykład olchy czy buka.

Podczas chłodzenia zachodzi proces wymiany ciepła pomiędzy produktami, a środkiem chłodzącym. Stosowanie temperatur w granicach od 0°C do +10°C, umożliwia przedłużenie okresu przydatności do spożycia produktów mniej trwałych-do kilku dni, i bardziej trwałych – do kilku tygodni. Chłodzenie pozwala na eliminację tylko niewielkiej liczby drobnoustrojów, a te które przeżyją mogą rozwijać się w konserwowanej tym sposobem żywności po jej ogrzaniu. Natomiast mrożenie prowadzone od 0 do -30°C powoduje śmierć

większej liczby komórek drobnoustrojów, wskutek wzrostu kryształów lodu, a także zwolnienie przebiegu reakcji chemicznych, głównie utleniania.

Rodzaj sterylizacji, która polega na utrwalaniu żywności w hermetycznie zamkniętych opakowaniach w autoklawach to apertyzacja. Dzięki zastosowaniu procesów podgrzewania i odpowietrzania następuje całkowite (lub częściowe) zniszczenie mikroflory znajdującej się wewnątrz danego naczynia. Tym samym niemożliwy jest dalszy rozwój bakterii odpowiedzialnych za psucie się jedzenia. Konserwy poddane procesowi apertyzacji w temperaturze powyżej 100°C zazwyczaj w przedziale od 110 do 120°C w okresie od kilkunastu minut do nawet kilkunastu godzin można przechowywać przez długi czas i stanowią one wygodne źródło pożywienia (Żywica i in., 2017; Amit i in., 2017; Sharif i in., 2017; Augusto i in., 2018; Ariyamuthu i in., 2022).

Należy wspomnieć, że w dzisiejszych czasach stosowanie konserwantów jako dodatku do żywności stało się nieodzowne w procesie produkcyjnym spożywanej żywności. Pomimo wielu wątpliwości dotyczących ich bezpieczeństwa, rosnące zapotrzebowanie na większy wybór, łatwość i wygodę spożywania oraz wysokie standardy bezpieczeństwa sprawiają, że są one istotnym elementem systemów żywnościowych. Konserwanty stosowane obecnie w produkcji żywności są pozyskiwane ze źródeł naturalnych lub wytwarzane syntetycznie. Na przykład natamycyna (E235), która jest wykorzystywana w obróbce powierzchniowej sera i kiełbas, może być pozyskiwana w sposób naturalny z bakterii powszechnie występujących w glebie. Źródłem naturalnych konserwantów mogą być rośliny, zwierzęta, grzyby i algi. Kwas wanilinowy, monochlorooctowy, dehydrooctowy, propionowy, sorbinowy i glikole należą do związków organicznych stosowanych jako środki konserwujące. Syntetyczny konserwant, taki jak benzoosan sodu (E 211), w odpowiednim otoczeniu chemicznym (pH kwasowym) również przeciwdziała rozwojowi drobnoustrojów, jakimi są bakterie i pleśnie. Najczęściej stosuje się go przy produkcji słodzonych napojów kolorowych, majonezu, ketchupu, sosów, przecierów owocowych czy dżemów. Azotyn sodu (E250) jest również syntetycznie pozyskiwanym konserwantem, używanym powszechnie jako składnik mieszanki peklującej do mięs. Zaś dwutlenek siarki i siarczyny służą odpowiednio do konserwowania owoców i warzyw oraz win. Podobnie jak w przypadku większości innych środków konserwujących, należy zachować szczególną ostrożność, aby utrzymać niskie stężenia tych substancji i uniknąć niekorzystnych efektów smakowo-zapachowych (Pawlikowska i Kręgiel, 2018; Ochwanowska i in., 2019).

Generalnie tradycyjne metody przetwarzania i konserwacji żywności są niezbędne do utrzymania bezpiecznych, pożywnych i aromatycznych dostaw żywności. Jedną z głównych ich zalet jest to, że są naturalną formą obróbki nie wymagającą stosowania chemicznych konserwantów. Dzięki temu są zdrowszą i naturalną alternatywą dla nowoczesnej żywności przetworzonej. Stanowią ważną część wielu tradycyjnych kuchni, a także pomagają zachować dziedzictwo kulturowe i zapewniają nawiązanie do przeszłości. Ponieważ w dalszym ciągu zachowanie bezpieczeństwa żywności zgodnego ze zrównoważonym rozwojem jest wyzwaniem, tradycyjne metody przetwarzania i konserwacji zarówno produktów pochodzenia roślinnego, jak i zwierzęcego pozostają istotnym elementem systemu żywnościowego.

5. WPROWADZENIE DO NIEKONWENCJONALNYCH METOD UTRWALANIA

Cechą wartościującą bezpieczną żywność jest jej wysoka jakość. Istnieje wiele definicji jakości żywności, lecz najogólniej można stwierdzić, że pod tym pojęciem rozumie się pozytywną kombinację wartości odżywczej i atrakcyjności sensorycznej przy uwzględnieniu bezpieczeństwa określonego produktu spożywczego.

Konwencjonalne procesy utrwalania żywności wystawiają ją często na działanie bardzo wysokiej temperatury, co niewątpliwie zmniejsza zanieczyszczenie lub obciążenie mikrobiologiczne, ale powoduje także pewne niepożądane zmiany w żywności, takie jak utrata składników odżywczych wrażliwych na temperaturę, zmianę tekstury czy właściwości organoleptycznych. Niekiedy techniki termiczne przyczyniają się do powstawania w żywności substancji toksycznych, które są rakotwórcze i szkodzą organizmowi ludzkiemu. Gotowanie w kuchence mikrofalowej i smażenie w głębokim tłuszczu skutkuje tworzeniem heterocyklicznych amin aromatycznych, które mogą nawet powodować zmiany mutagenne w organizmie. Obróbka termiczna może również skutkować utratą wody z pożywienia, utlenianiem lipidów i zmianą w składzie kwasów tłuszczowych. Grillowanie mięsa powoduje utratę soków mięsnych, które zawierają głównie lipidy nasycone (magazynowane w organizmie postaci tkanki tłuszczowej), co prowadzi do zmniejszenia zawartości kwasów tłuszczowych nasyconych i wzrostu zawartości kwasów tłuszczowych wielonienasyconych w produkcie końcowym. Obecność wielonienasyconych kwasów tłuszczowych sprawia, że wyrób jest bardziej podatny na utlenianie, a także mniej przyjemny w smaku czy zapachu (Lee i in., 2016; Augusto i in., 2018; Wu i in., 2020).

Wszystkie te negatywne czynniki skłoniły specjalistów ds. żywności aby poszukiwali lepszych alternatyw. Oprócz tego, w zglobalizowanym środowisku charakteryzującym się wysoką konkurencją we wszystkich sektorach, a w szczególności przemyśle rolno-spożywczym innowacje stanowią ważne źródło umożliwiające utrzymanie i zwiększanie przewagi w skali globalnej. Ponadto zmiany w stylu życia i większa świadomość konsumentów w zakresie ochrony środowiska i poszanowania praw człowieka drastycznie zmodyfikowały wymagania społeczeństw, sprawiając, że innowacje w zakresie zrównoważonych produktów stają się coraz bardziej istotne dla firm rolno-spożywczych. W rezultacie rozwój zrównoważonych linii produktów (np. organicznych, bio, funkcjonalnych) dla szerokiej gamy towarów (takich jak herbata, kawa, soja, owoce i warzywa, soki, mleko, mięso itp.) w ostatnich latach uległ wzmocnieniu. Wybuch pandemii COVID-19 na początku 2020 roku w sposób istotny zmienił również uwarunkowania rozwoju wymiany handlowej wyrobami rolno-spożywczymi. Żywność stała się produktem pierwszej potrzeby, tak jak leki czy suplementy diety. Wciąż nie bez znaczenia jest fakt, iż ludność świata boryka się z różnymi problemami, a jednym z nich jest brak żywności. Często pod wpływem czynników fizykochemicznych lub biologicznych dochodzi do psucia się artykułów spożywczych na wielu etapach łańcucha, a także ich braku lub mniejszej dostępności w różnych miejscach i poza sezonem. Z powodu wahań temperatury podczas transportu, nieracjonalnego zarządzania, źle dobranej technologii i infrastruktury, niewłaściwie przeprowadzonego procesu utrwalania, następuje ogromna strata jakościowa i ilościowa, a produkty nie mogą odpowiednio dotrzeć do konsumenta (Amit i in., 2017; Petrescu i in., 2020; Bhat, 2021; Chitrakar i in., 2021; Burlacu i in., 2022).

W rezultacie te wszystkie wydarzenia, zachęcają do poszukiwania innowacyjnych rozwiązań, które są odpowiedzią na obecne dylematy i przyszłe wyzwania. Nowatorskie technologie nietermicznego przetwarzania i konserwacji odgrywają kluczową rolę w minimalizowaniu problemów. Stanowią one alternatywę dla tradycyjnych technik termicznych (pasteryzacji, sterylizacji), które chociaż pozostają podstawowymi metodami utrwalania w przemyśle spożywczym, mogą wpływać na wygląd, smak, wartość odżywczą żywności i niekoniecznie spełniać zapotrzebowanie współczesnego społeczeństwa. Konsumenty oczekują bowiem świeżych i wygodnych produktów spożywczych o najwyższej wartości żywieniowej, a dodatkowo o określonych właściwościach prozdrowotnych.

W technologiach nietermicznych wykorzystywane są nietradycyjne formy energii, między innymi podwyższone ciśnienie, pole elektryczne, zimna plazma, jako czynniki umożliwiające inaktywację patogenów przenoszonych przez żywność i organizmów powodujących psucie się, jednocześnie zmniejszając ekspozycję termiczną produktu. Żywność jest przetwarzana w temperaturze zbliżonej do temperatury pokojowej, więc nie następuje uszkodzenie wrażliwych na ciepło składników odżywczych. Różne intensywności tych form energii i ich selektywne połączenia są unikalne, ponieważ sprawiają, że artykuły dłużej zachowują większość substancji aktywnych biologicznie. Technologie nietermiczne są ekologiczne, bezpieczne i przyjazne dla środowiska, stąd też istnieje duże pole do ich zastosowania w produkcji żywności zgodnej z Agendą 2030 i Celami Zrównoważonego Rozwoju. Aby jednak efektywnie zastosować te innowacyjne techniki utrwalania należy kontrolować parametry procesów (ciśnienie, natężenie ultradźwięków, system dystrybucji gazu procesowego, czas obróbki), które mają znaczący wpływ na jakość finalnie przetworzonych wyrobów (Picart-Palmade i in., 2019; Chakka i in., 2021; Galanakis, 2021).

6. WYBRANE INNOWACYJNE SPOSOBY PRZEDŁUŻANIA TRWAŁOŚCI PRODUKTÓW SPOŻYWCZYCH

Konsumenci coraz bardziej preferują żywność naturalną i świeżą, wygodną, zdrową, smaczną, bezpieczną mikrobiologicznie, wolną od konserwantów i dodatków z czystą etykietą i wydłużonym terminem przydatności do spożycia. Aby produkt zachował pożądaną jakość, należy go poddać obróbce, zatrzymując fizjologiczne starzenie się i zmiany enzymatyczne oraz rozwój mikroorganizmów.

Tradycyjnie techniki przetwarzania stosowane w przemyśle spożywczym mogą powodować niekorzystne zmiany zapachu, barwy czy smaku. W niektórych produktach wysoka termotolerancja mikroorganizmów, głównie zarodników bakterii pociąga za sobą stosowanie ekstremalnych obróbek cieplnych, które zmieniają właściwości odżywcze, fitochemiczne i organoleptyczne żywności (Daher i in., 2017; Dwivedi i in., 2017; Knorr i Augustin, 2021).

Pomimo szerokiej wiedzy na temat utrwalania artykułów rolno-spożywczych poprzez użycie wysokich temperatur i ciągłych prób poprawy jakości przetworzonej żywności, w dalszym ciągu istnieje zapotrzebowanie na technologie minimalizujące destrukcyjny wpływ ciepła na cenne składniki żywności. Coraz większe zainteresowanie środowiska naukowego i przemysłu poświęca się wdrażaniu niekonwencjonalnych metod konserwacji żywności, takich jak: ozonowanie, obróbka wysokociśnieniowa, pulsacyjne pole elektryczne czy zimna plazma.

Ich użycie daje szansę na spełnienie trendu w kierunku koncepcji zrównoważonego rozwoju, oferującej korzyści w postaci krótkiego czasu obróbki, nietermicznych, opłacalnych operacji, nietoksycznych efektów, zmniejszonego zużycia wody i możliwości zwiększania skali procesów. Generalnie wprowadzanie unowocześnień produktowych czy procesowych na rynek to wynik zmieniających się trendów rynkowych oraz wymagań i preferencji klientów. Stąd też, nowe technologie, muszą zdobyć zaufanie konsumentów, aby ich finalna realizacja komercyjna była możliwa i opłacalna (Chemat i in., 2017; Martindale, 2017).

6.1. Pole elektryczne – pulsacyjne pole elektryczne (PEF)

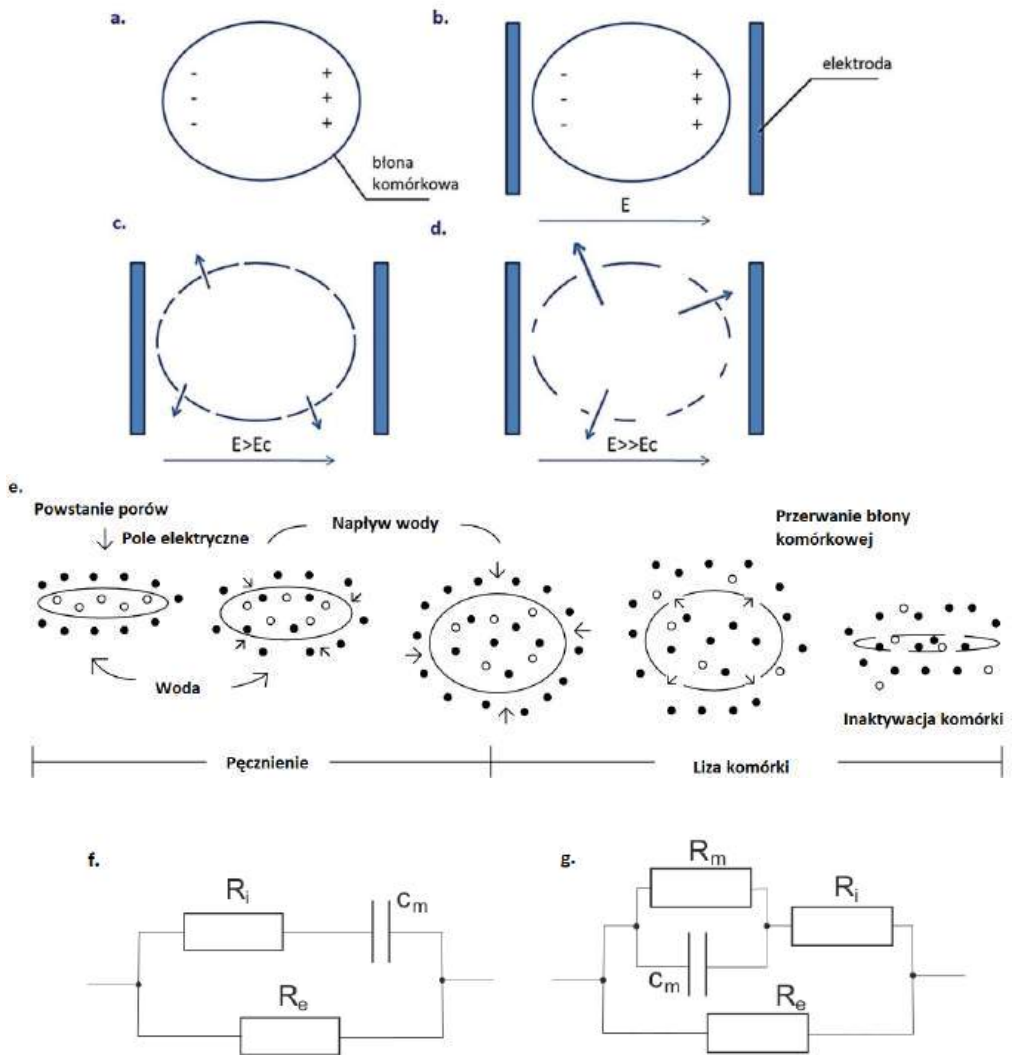
Historia prób zastosowania prądu elektrycznego do obróbki żywności liczy ponad 100 lat. „ElectroPure Process” z 1920 roku polegał na wykorzystaniu prądu zmiennego o niskiej częstotliwości do pasteryzacji mleka (Anderson i Finkelstein, 1919). W latach 60. tego ubiegłego wieku wpływem pola elektrycznego na materiał biologiczny, w tym na żywność zainteresowało się wiele grup badawczych (Stampfli, 1958; Doevenspeck, 1960; Lazarenko i Reshetko, 1968; Sitzmann i in., 2016). Od ponad dwu dekad rozwiązania technologiczne oparte o zastosowanie Pulsacyjnych Pól Elektrycznych (PEF- *Pulsed Electric Field*) na stałe zagościły w przemyśle spożywczym i stosowane są między innymi do inaktywacji mikroorganizmów i wydłużenia przydatności do spożycia, ekstrakcji, tłoczenia, odwadniania osmotycznego, suszenia i zamrażania, kontroli aktywności enzymatycznej, i tym podobne (Toepfl i in., 2006).

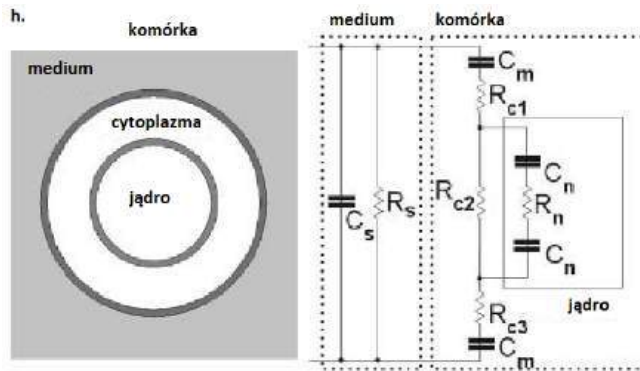
W przypadku komórek biologicznych, można założyć, że stanowią one kondensator o niskiej wartości stałej dielektrycznej. Cytoplazma zawarta w komórkach jest przewodnikiem elektrycznym, otoczonym cienką warstwą dielektryka w postaci błony komórkowej. Jeśli komórka zostanie umieszczona w polu elektrycznym (w ośrodku przewodzącym między dwoma elektrodami) i zadany zostanie impuls napięciowy jednopolarny do elektrod – powstanie ruch jonów zgodnie z kierunkiem przyłożonego pola – zarówno wewnątrz komórki, jak i na zewnątrz. Co za tym idzie, po obu stronach błony komórkowej zaczną gromadzić się wolne, przeciwnie naładowane ładunki elektryczne powodując napięcie transbłonowe prowadzące do lokalnych zmian ciśnienia i grubości błony. Przy jego odpowiedniej wysokości przekraczającej wartość krytyczną (~0,5 - 1V) może dojść do zmiany układu cząsteczek fosfolipidów i w efekcie do modyfikacji struktury błony komórkowej, zmian jej ciągłości, powstania lub powiększenia się już istniejących porów, co prowadzi do zwiększenia przepuszczalności i do utraty jej funkcji barierowej (Zimmerman, 1986; Weaver, 1995; Deng i in., 2003; Ngadi i in., 2003, Frey i in., 2013, Wiktor i Witrowa-Rajchert, 2012). Proces ten nazywany jest elektroporacją (elektropermeabilizacją, elektroprzepuszczalnością), zaś jego przebieg schematycznie zobrazowano na rysunku 8.

Kluczowymi parametrami mającymi wpływ na przebieg obróbki materiału biologicznego przy użyciu PEF oraz na odwracalności elektroporacji są:

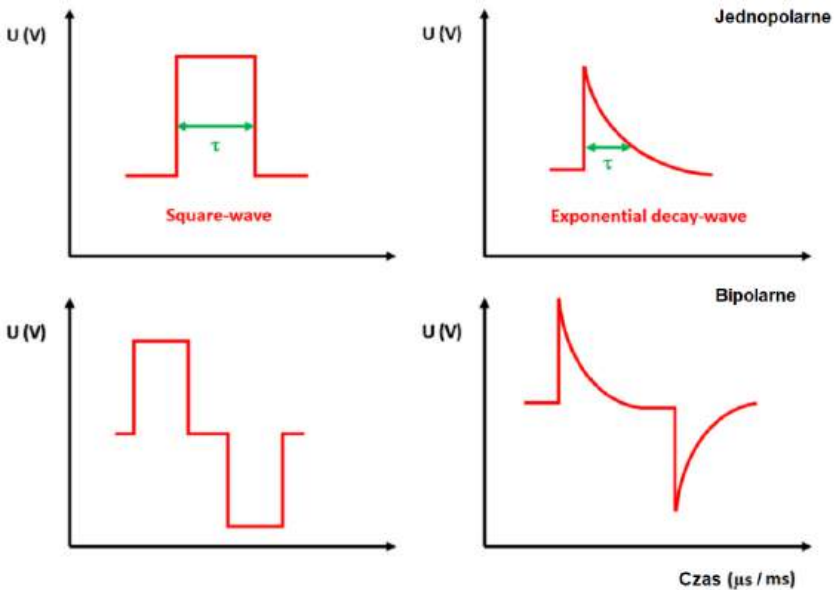
- natężenie pola elektrycznego,
- liczba zastosowanych impulsów
- czas trwania impulsu i ekspozycji próbki,
- kształt impulsu (rys. 9),
- energia dostarczona do obrabianego materiału,
- właściwości fizykochemiczne obrabianego materiału,
- przewodność i skład ośrodka (elektrolitu)
- geometria reaktora (odległość pomiędzy elektrodami, wielkość komory/kanalu)
- sposób obróbki (stacjonarny/w przepływie)
- temperatura otoczenia.

W zależności od celu obróbki PEF odpowiednio dobierane są parametry procesu. Przekroczenie pewnej krytycznej wartości potencjału błony komórkowej (około 1V) podczas tego typu traktowania może powodować trwałe uszkodzenie i utratę ciągłości błony komórkowej, wypływ materii wewnątrzkomórkowej do ośrodka, czyli nieodwracalne skutki prowadzące do śmierci komórkowej. Zwykle proces taki stosowany jest w przypadku dekontaminacji mikrobiologicznej, ekstrakcji cennych z punktu widzenia przemysłu substancji chemicznych czy ablacji guzów nowotworowych. W przypadku podkrytycznych wartości natężenia pola elektrycznego i ograniczonego czasu trwania impulsu zwiększona przepuszczalność błony może być odwracalna, a komórka przetrwa. Ten efekt jest często wykorzystywany w zastosowaniach biomedycznych (w elektrochemioterapii, używaniu wektorów chemicznych i wirusowych podczas modyfikacji genetycznych) (Deng i in., 2003, Aycock i Davalos, 2019; Dev i in., 2000; Brooks i in., 2022).





Rys. 8. Zobrazowanie wpływu pola elektrycznego na komórki (E - natężenie pola elektrycznego, E_c - krytyczne natężenie pola elektrycznego) (a-e); uproszczone elektryczne schematy zastępcze komórki (f-g); Przekrój poprzeczny znajdującej się w danym ośrodku kulistej komórki z jądrem umieszczonym centralnie wraz ze schematem zastępczym C_m - kondensatory reprezentujące zewnętrzną błonę komórkową; C_n - błonę jądrową, R_{c1-3} - rezystory reprezentujące cytoplazmę; oraz R_n -nukleoplazmę, C_s i R_s reprezentują pojemność i opór ośrodka (h) (Tsong, 1990; Foster, 2000; Deng i in., 2003; Vega-Mercado i in., 2007; Wiktor i Witrowa- Rajchert, 2012; Zelmat i in., 2017; Skowron i Wantuch, 2020)



Rys. 9. Najczęściej stosowane kształty impulsów podczas obróbki PEF w mleku i przetworach mlecznych (Cavalcanti i in., 2023)

Nieodwracalna elektroporacja zachodzi gdy powodujące ją krytyczne natężenie pola elektrycznego E_c wyniesie (Zimmerman i in., 1974; Zimmerman, 1986; Schoenbach i in., 1997):

$$E_c = \frac{V_c}{f_{kom} r_{kom}} \text{ (kV/cm)}$$

gdzie:

- V_c – napięcie krytyczne, (V)
- f_{kom} – współczynnik kształtu komórki, (-)
- r_{kom} – promień komórki, (μm)

W przypadku komórek sferycznych/kulistych f_{kom} wynosi 1,5 zaś dla komórek wydłużonych obliczany jest on z następującego wzoru:

$$f_{kom} = l_{kom} \left(l_{kom} - \frac{d_{kom}}{3} \right) \text{ (-)}$$

gdzie:

- l_{kom} – długość komórki, (m)
- d_{kom} – średnica komórki, (m)

Przyjmując wartość krytycznego napięcia na błonie komórkowej w wysokości 1V, dla komórek prokariotycznych o wymiarach 1- 10 μm krytyczne natężenie pola elektrycznego E_c wyniesie około 12-50 kV/cm dla impulsów o czasie trwania od kilkunastu mikrosekund do milisekund. Większe komórki eukariontów o wymiarach 10 do 40 μm są znacznie bardziej podatne na pola elektryczne w porównaniu do bakterii (Huelsheger i in., 1981; Fellows, 2000; Oziembłowski i in., 2016; Skowron i Wantuch, 2020). Dla komórek roślinnych o rozmiarach 40 – 200 μm wartość natężenia krytycznego wynosi 1- 3 kV/cm. Uproszczone elektryczne schematy zastępcze komórki przedstawiono na rysunku 8. W celu porównania różnych geometrii i reżimów układu PEF można obliczyć parametr PPV odzwierciedlający liczbę impulsów na jednostkę objętości:

$$PPV = \frac{nfV}{v}$$

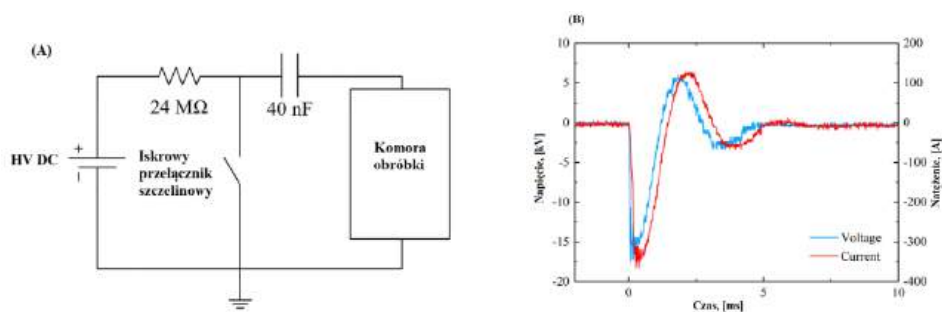
gdzie:

- n – liczba komór oddziaływań PEF,
- f – częstotliwość impulsów PEF, (Hz)
- V – objętość komory oddziaływań, (ml)
- v – przepływ produktu, (ml/s)

Zazwyczaj stosowane są częstotliwości do 1 kHz, w niektórych przypadkach jednak są one wyższe. W celu obróbki PEF wykorzystywane są różne rozwiązania konstrukcyjne, takie jak: elektroplazmolizery zbudowane w oparciu o generatory pulsacyjnych pól elektrycznych wraz z baterią kondensatorów, układem elektrod w komorze reakcyjnej/kanale, elementami opomiarowania i kontroli procesu (jednostka sterująca, oscyloskop, sondy prądowo-napięciowe, kontrolery przepływu, termopary, itp.) (Ngadi i in., 2003).

W związku z wieloletnią obecnością technologii PEF na rynku w dalszej części podane zostaną przykłady nowych kierunków badań z wykorzystaniem PEF z ostatnich lat.

Qin i in. (2023) badali wpływ różnych parametrów PEF posługując się układem schematycznie zaprezentowanym na rysunku 10 na kiełkowanie zarodników *Aspergillus niger*, wytwarzającego szereg istotnych gospodarczo enzymów np. glukoamylazę, lipazę, pektynazę, oksydazę glukozową i biorącego udział w produkcji kwasu cytrynowego i glukonowego. Dla próbki zawierającej $3,5 \times 10^6$ jtk/ml, pole elektryczne o natężeniu od 5 do 15 kV/cm aplikowane przez 1 - 7,5 ms powodowało zwiększenie szybkości kiełkowania oraz aktywności lipazy i glukoamylazy. W przypadku 10 kV/cm natężenia pola elektrycznego i 5 ms aplikacji uzyskano wzrost powyższych parametrów o odpowiednio 217%, 25,6% i 31,3%. Pole elektryczne o maksymalnym natężeniu 20 kV/cm spowodowało wzrost temperatury próbki średnio o 5,9°C w czasie 10 ms aplikacji.



Rys. 10. Schemat obwodu układu generującego PEF (A), wykres przebiegu napięcia i prądu podczas eksperymentu z systemem PEF (B) (Qin i in., 2023)

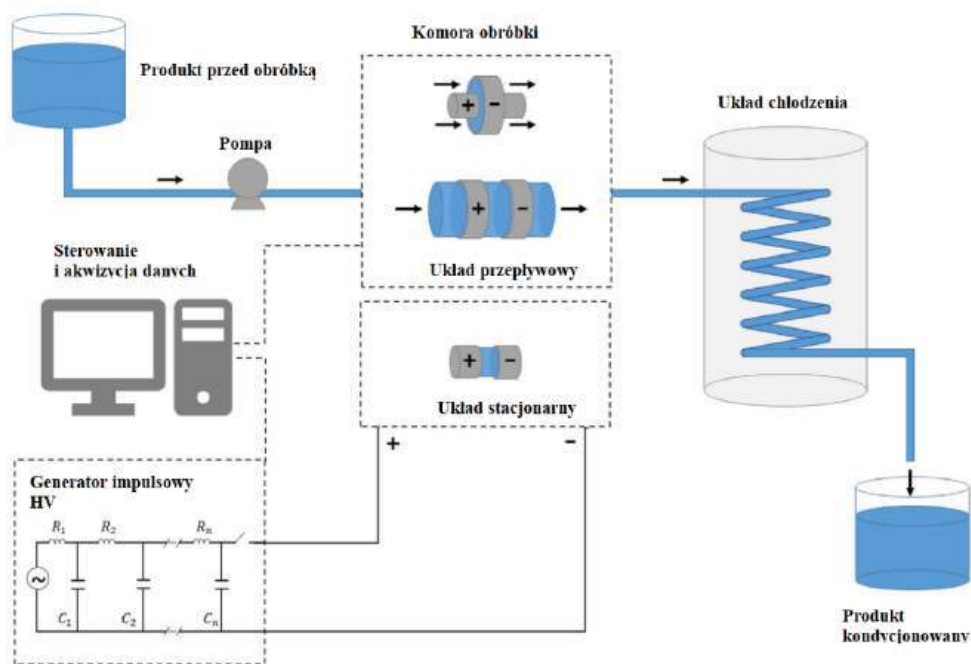
Obróbka produktów mlecznych była jednym z pierwszych historycznych zastosowań PEF w sektorze żywnościowym. Cavalcanti i in. (2023) przeprowadzili krytyczną analizę dotychczas prowadzonych prac w celu dalszego udoskonalenia tej technologii. Podstawowy schemat układu do obróbki materiałów płynnych przedstawiono na rysunku 11.

Moraís i in. (2023) użyli PEF o natężeniu 16 kV/cm przez 6 lub 31 μ s w temperaturze 4°C i 23°C w celu modyfikacji struktury kazein w izolacie micelarnym kazeiny uzyskując istotne zmiany w strukturze (reorganizację miceli) w zależności od zastosowanych parametrów, co zwiększyło wartość odżywczą i możliwość pozyskania bioaktywnych peptydów.

Zastosowana obróbka poprawiła również właściwości emulgujące wysoko stabilnych białek-koniugatów albuminy surowicy bydlęcej/glukozy poprzez przyspieszenie reakcji glikacji podczas ogrzewania do 90°C, przy zmniejszonych brunatnieniu i zawartości wolnych związków tiolowych (Xu i in., 2024).

Yao i in. (2023) badała wpływ odpowiednio stałoprądowego (CC-T) oraz stałonapięciowego (CV-T) pulsacyjnego pola elektrycznego na charakterystyki elektryczne, rozkład temperatury i jakość mięśnia najdłuższego grzbietu świń w aspekcie rozmrażania powietrzem (AT) i rozmrażania w zanurzeniu w wodzie (WT) używając świeżego mięsa (FM) w charakterze kontroli. Wyższa częstotliwość sprzyjała obniżeniu impedancji i przyspieszeniu rozmrażania. PEF skrócił czas rozmrażania o max. 85%. Bardziej jednorodny roz-

kład temperatury, istotne ograniczenie migracji wody, uszkodzeń mięśni, utleniania białek i tłuszczów w trakcie procesu, wiązań krzyżowych, agregacji i sedymentacji białek miofibrilli przy jednoczesnym zachowaniu barwy, zdolności zatrzymywania wody i właściwości teksturalnych mięśni uzyskano stosując CC-T PEF. Co ważne, metoda nie miała istotnego wpływu na straty w procesie gotowania.



Rys. 11. Schemat układu przepływowego i stacjonarnego wykorzystującego PEF

(Cavalcanti i in., 2023)

Wstępną obróbkę pulsacyjnym polem elektrycznym w charakterze wspomagającej fazy przy suszeniu świerszczy domowych w temperaturze 60°C w celu pozyskania z nich mączki zastosowali (Psarianos i in., 2023). PEF pozwolił na skrócenie czasu suszenia i zmniejszenie zużycia energii o 14,22%. Skojarzenie obróbki elektrohydrodynamicznej (EHD) oraz konwencjonalnego suszenia zredukowało nakłady energetyczne o ponad 50%. W porównaniu do próbki kontrolnej, PEF zwiększyło rozpuszczalność białka oraz aktywność przeciwutleniającą o odpowiednio 53,07% i 24,05% dla próbek suszonych w piekarniku oraz zmniejszyło zawartość histaminy w próbkach suszonych metodą EHD (o 25,87%).

Badania nad dekontaminacją mikrobiologiczną wody kokosowej przy użyciu PEF o natężeniu 22,5 kV/cm przy gęstości energii 119 kJ/l, połączonego z łagodnym ogrzewaniem do 40°C prowadzili Tongdonyod i in. (2023). Osiągnięto redukcję kolonii bakterii *Escherichia coli* K12 i *Listeria innocua* o odpowiednio 6,60 i 5,90 log jtk/ml spełniając założone

dla produktu wymagania stawiane przez normy (U.S. FDA). Otrzymane rezultaty były porównywalne do pasteryzacji termicznej ($85\pm 2^{\circ}\text{C}$ przez 10 minut), co skutkowało przedłużeniem okresu przydatności do spożycia o ponad 35 dni w temperaturze $8 \pm 2^{\circ}\text{C}$, przy jednoczesnym zachowaniu właściwości fizykochemicznych (szczególnie polifenoli i profilu związków lotnych), sensorycznych, podobnych do tych zaobserwowanych w próbce nieutrwalanej.

Zespół Morales'a (2023) zastosował PEF o umiarkowanym natężeniu (1-10 kV/cm, 30 jednopolarnych impulsów o długości 4 μs i częstotliwości 0,1 Hz) do kondycjonowania napoju roślinnego na bazie mleka sojowego i soku z opuncji figowej. Przy niskich natężeniach pola (1 kV/cm) zaobserwowano wzrost stężenia związków fenolowych (16%), betalain (7,2%) i izoflawonów (7,4%) w stosunku do próbki kontrolnej. PEF o tych parametrach nie wpłynęło negatywnie na pozostałe atrybuty fizykochemiczne napoju.

PEF wykorzystano również do efektywnego odzyskiwania związków funkcjonalnych, poprawy kinetyki i selektywności ekstrakcji chlorofilu z mikroalg *Chlorella pyrenoidosa* (Katsimichas i in., 2024). Porównano efektywność ekstrakcji biomas alg: poddanej wstępnej obróbce PEF (4,6 kV/cm, 0–179,2 kJ/kg) oraz kontroli, które zostały zawieszone w roztworach etanowych i inkubowane w temperaturze $30\text{--}60^{\circ}\text{C}$ przez maksymalnie 6 godzin. Wyższe gęstości energii PEF prowadziły do większego odzysku barwników i przeciwutleniaczy (chlorofilu i luteiny).

Lin i in. (2024) zaproponowali obróbkę PEF o natężeniu 25, 50 i 100 kV/m w celu zbadania potencjału redukcji mięknięcia persymonów po zbiorze. Po 28 dniach zaobserwowano 87,6% utratę jędrności grupy kontrolnej w porównaniu do 58,40% przy zastosowaniu PEF o natężeniu 50 kV/m. PEF wpłynęło na zmniejszenie respiracji o 12,5–31,22 ml $\text{CO}_2/\text{h/kg}$, co zahamowało proces deterioracji teksturalnej owoców i wydłużyło ich okres przydatności do spożycia w temperaturze chłodniczej o nawet 14 dni w porównaniu z próbką nieobrabianą tym sposobem.

Z kolei Kim i in. (2023) analizowali wpływ PEF na marynaty solankowe (10 g/ml i 15 g/ml NaCl) na bazie kapusty pekińskiej przechowywanej w temperaturze 25°C przez 12 godzin. Stwierdzili, iż PEF skróciło czas marynowania, zmniejszyło straty wody i pomogło zoptymalizować zużycie soli, znacząco wpływając na kinetykę transferu masy oraz mikrostrukturę próbek. Co więcej, autorzy pracy zaobserwowali poprawę tekstury wyrobu, co umożliwiło uzyskanie lepszej jakości kimchi. PEF (1,5 kV/cm i 2,0 kV/cm) zastosowano również do kondycjonowania zasolonych kiszzonek z rzodkwi (Kim i in., 2023a) skracając czas potrzebny na ten proces o około 56,6% dla PEF 1,5 kV/cm i 70% dla PEF 2,0 kV/cm w porównaniu z kontrolą. PEF wpłynęło hamująco (o około 1-2 log CFU/ml w porównaniu z kontrolą) na tempo wzrostu bakterii kwasu mlekowego, skutkując wydłużeniem okresu przechowywania tak przygotowanych warzyw o 2-5 dni.

Skojarzona metoda z wykorzystaniem PEF (1,33 kV/cm, 100 Hz) i ogrzewania omowe go została zastosowana do poprawy szybkości i homogeniczności podgrzewu podczas blanszowania marchwi (Astráin-Redín i in., 2023).

Czas blanszowania został skrócony o 60% bez wpływu na teksturę marchwi przy wzroście (3,9%) biodostępności β -karotenu.

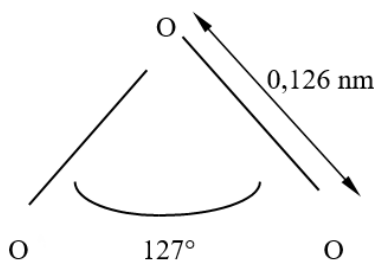
Shoqairan i in. (2023) porównywali skuteczność zastosowania PEF, mikrofal (MW) oraz promieniowania UV-C na poziom ochratoksyny A (zawartość początkowa 51,36 $\mu\text{g/kg}$) w sproszkowanej papryce. PEF, UV i MW wykazały detoksyfikację tego związku

odpowiednio o 42,31%, 39,19% i 37,05%. PEF poprawił także aktywność antyoksydacyjną, wykazał również mniejszy wpływ na parametry fizykochemiczne proszku paprykowego w porównaniu do kontroli i innych metod obróbki.

Podczas obróbki PEF w zależności od stosowanych parametrów może dojść do generowania reaktywnych form tlenu i azotu, co wielorako wpływa na obrabiany materiał (np. zwiększa efektywność dekontaminacji, wpływa na wartość odżywczą). PEF pozwala na stosunkowo szybką i elastyczną obróbkę żywności, zarówno w systemie stacjonarnym, jak i przepływowym. Technika ta uważana jest za jedną z bezpieczniejszych i łagodnych form utrwalania żywności. Wzrost temperatury próbki może być ograniczany dzięki sterowaniu parametrami procesu. Korzystnym skutkiem jest brak wymogu stosowania dodatkowych czynników chemicznych, co zapobiega zanieczyszczeniu próbki i sprzyja zachowaniu pierwotnych własności obrabianego materiału.

6.2. Ozonowanie

Ozon będący trójatomową, alotropową odmianą tlenu o gęstości $2,14 \text{ kg/m}^3$ jest jednym z najpotężniejszych znanych utleniaczy i często stosowany jest jako dezynfektant. Został odkryty w 1839 roku przez Schoenbeina, a w 1953 roku grupa Trambarulo ustaliła geometrię cząsteczki zaś Tanaka i Morino (1970) zmierzili długość wiązań w cząsteczce ozonu. Podstawowa struktura molekuly ozonu jest przedstawiona na rysunku 12, zaś wybrane właściwości ozonu zestawiono w tabeli 2 i 3.



Rys. 12. Podstawowy model cząsteczki ozonu

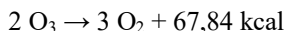
Tabela 1. Porównanie niektórych właściwości fizycznych ozonu i tlenu (Ozonek, 1993)

Parametr	Ozon	Tlen
Masa cząsteczkowa, (u)	48	32
Gęstość w temp.0°C, (kg/m ³)	2,14	1,429
Gęstość w temp.~180°C, (kg/m ³)	1,57	1,118
Temperatura zamarzania, (°C)	-192,8	-218,9
Temperatura wrzenia, (°C)	-111,9	-182,9
Barwa kondensatu	ciemnoniebieska	błękitna

Tabela 2. Barwa ozonu w zależności od fazy

Faza	Barwa
stała	czerwonopurpurowy
ciekła	ciemnoniebieski (nieprzezroczysty)
gazowa	błękitny (przezroczysty w cienkich warstwach)

Ozon w postaci gazowej jest niestabilny, a proces jego rozkładu przebiega bardzo szybko. Tempo procesu rozkładu wzrasta z rosnącym pH, temperaturą, obecnością zanieczyszczeń i stężeniem ozonu w roztworze. Ten proces jest znacznie wolniejszy w powietrzu niż w wodzie. Ozon degraduje w zależności od pH, pozostając dość stabilnym w pewnych warunkach przy pH 6 i natychmiastowym rozpadzie przy pH 10. Rozkład ozonu powoduje powstanie rodnika hydroksylowego, który jest jeszcze silniejszym czynnikiem utleniającym niż sam ozon (potencjał utleniający 2,80V w porównaniu do 2,07V) (Nalepa, 1997). Czysty ozon (bez zanieczyszczeń organicznych) podczas spalania (niebieski kolor płomienia) prowadzi do powstania czystego tlenu molekularnego, zgodnie z poniższą reakcją.



Ozon w stanie gazowym jest tylko częściowo rozpuszczalny w wodzie (do dziesięciu razy lepiej niż tlen). Rozpuszczalność ozonu w wodzie związana jest z ilością ozonu w strumieniu nośnym gazu. Dlatego ważne jest wytworzenie strumienia gazu zawierającego stosunkowo dużą ilość ozonu. Na przykład maksymalne rozpuszczalności przy 25°C dla strumieni gazowych zawierających 1% i 3% ozonu wynoszą odpowiednio 2,7 i 8,1 mg/dm³. Te maksymalne poziomy nie są osiągnięte w praktyce z powodu opuszczających układ gazów nośnych, które usuwają część rozpuszczonego ozonu. Rozpuszczalność ozonu maleje również wraz ze wzrostem temperatury (rys. 13) (Nalepa, 1997). Maksymalne teoretyczne stężenie ozonu w wodzie jest określane wzorem:

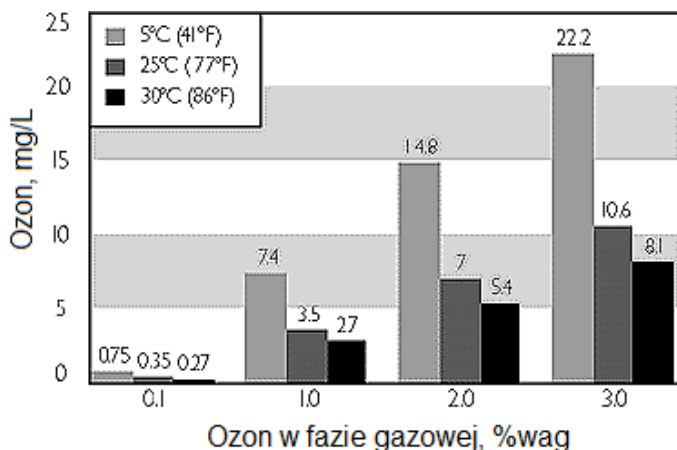
$$C_{nt} = \frac{D_1 R_z 100}{R_z + Q_0}, (\%)$$

gdzie:

- D_1 – dawka ozonu
- Q_0 – objętość gazu wprowadzonego do 1 m³ H₂O
- R_z – współczynnik rozpuszczalności

W warunkach normalnych przy niskich stężeniach (do 0,04 ppm) zapach ozonu kojarzy się ze świeżością, w wyższych stężeniach staje się on dość charakterystyczny i ostry (Ozonek, 1993). Wysokie stężenie ozonu troposferycznego (powyżej 0,1 mg/m³) jest bardzo niebezpieczne i mutagenne dla ludzi, zwierząt, roślin oraz powoduje korozję. Podwyższone stężenie ozonu w powietrzu może powodować senność, bóle głowy i znużenie oraz spadek ciśnienia tętniczego krwi; prowadzić do reakcji zapalnych oczu czy chorób dróg oddechowych, w tym do nasilenia chorób układu krążenia (Tseng, 2008; www.powietrze.gios.gov.pl). W Polsce w ramach działalności wojewódzkich inspektoratów ochrony środowiska funkcjonuje około 100 stanowisk do pomiaru ozonu przyziemnego. Pomiar jego stężenia

odbywają się w sposób zautomatyzowany, przez analizatory wykorzystujące metodę fotometrii w ultrafiolecie. Progowa wartość informowania o możliwości wystąpienia podwyższonych stężeń ozonu występuje gdy średnie jednogodzinne stężenie osiąga wartość $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, zaś poziom alarmowy stanowi średnie jednogodzinne stężenie $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

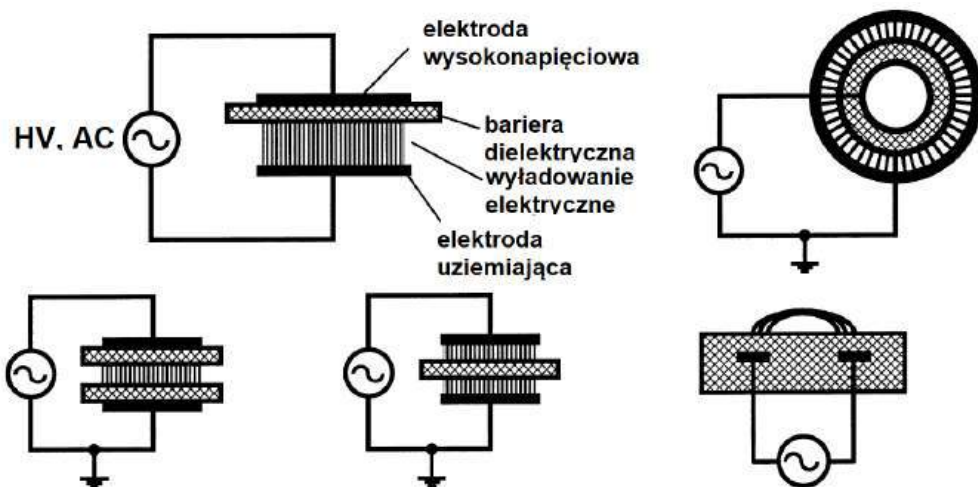


Rys. 13. Rozpuszczalność ozonu w zależności od temperatury (Nalepa, 1997)

Ozon w warunkach naturalnych powstaje w niewielkich ilościach ($0,05 \text{ mg}/\text{L}$) w górnej warstwie atmosfery zwanej ozonosferą, znajdującej się ona około 40 km nad ziemią i odgrywa bardzo ważną rolę. Ozon stratosferyczny posiada bowiem zdolność do absorpcji promieniowania w szerokim zakresie długości fal, dlatego ozonosfera pełni funkcję ochronną przed promieniowaniem UV dla dolnych warstw atmosfery. Warstwa ozonowa na tej wysokości ma 25 km grubości, ale pod wpływem ciśnienia atmosferycznego grubość ozonu w ozonosferze nie przekroczyłaby 3 mm. Przy powierzchni ziemi ozon powstaje w czasie smogu fotochemicznego jako jeden z niepożądanych, wtórnych produktów reakcji fotochemicznych.

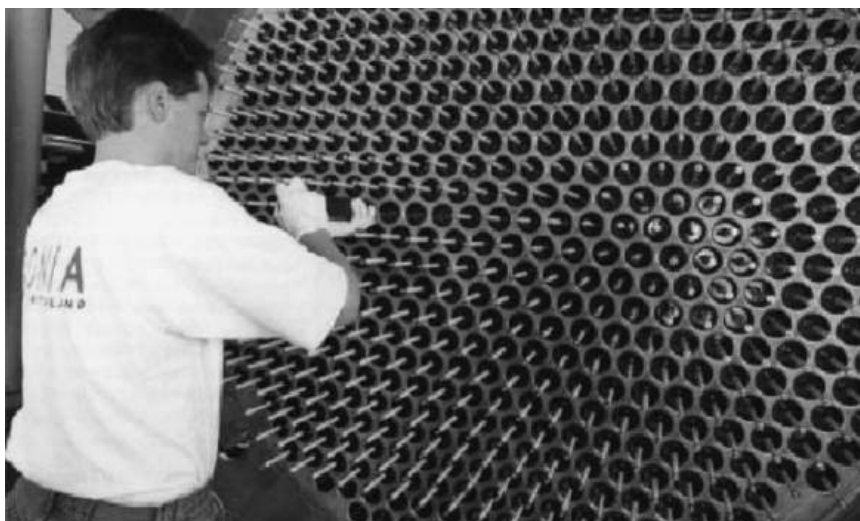
Ozon może powstawać w czasie użytkowania lamp UV oraz podczas reakcji katalitycznych, jednak do celów przemysłowych stosuje się głównie generatory ozonu (ozonatory). Stanowią one szczególny rodzaj reaktorów, w których zazwyczaj w wyniku wyładowań barierowych lub koronowych pod ciśnieniem atmosferycznym generowany jest ozon. Pierwszy ozonator został skonstruowany w 1875 roku przez Siemens.

Do generowania wyładowań barierowych w klasycznych konfiguracjach (rys. 14) wykorzystuje się płaskie lub cylindryczne układy elektrod z co najmniej jedną warstwą dielektryka umieszczoną między nimi. Typowe, wykorzystywane w ozonatorach materiały dielektryczne to szkło, kwarc, ceramika, a także polimery. Rozmiar szczeliny wyładowczej wynosi do około 1 mm. Zakresy częstotliwości źródła barierowych wyładowań elektrycznych wynoszą około 50-60 Hz lub 0,5-5,0 kHz (Kogelschatz, 1992; Kogelschatz i in., 1999; Kogelschatz, 2003). W takich ozonatorach gazem substratowym jest powietrze lub czysty tlen. Przykład wysokowydajnego generatora ozonu ($60 \text{ kg O}_3/\text{h}$) przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 14. Podstawowe typy ozonatorów z wyladowaniami barierowymi

(Kogelschatz i in., 1999)



Rys. 15. Wysokowydajny generator ozonu (Ozonía Ltd.; Kogelschatz i in., 1999)

Jednym z największych atutów technologii ozonowej jest jej korzystny wpływ na środowisko. Ozon rozkłada się na tlen, który sam w sobie nie jest szkodliwy. Podczas dekompozycji cząsteczki ozonu powstaje cząsteczka i atom tlenu, który szybko reaguje z różnymi związkami chemicznymi prowadząc do ich neutralizacji. Produkty reakcji ozonu z zanie-

czyszczeniami są zazwyczaj nietoksyczne i łatwo biodegradowalne. W celu zwiększenia skuteczności obróbki ozonowanie może być łączone z innymi technikami wykorzystującymi procesy katalityczne lub inne utleniające np. nadtlenek wodoru (H_2O_2) stanowiąc tym samym technologie zaawansowanego utleniania (AOT- *Advanced Oxidation Technology*) (Beltran, 1996; Pawłat, 2001; Kopacki i in., 2021).

Ze względu na łatwą w aplikacji formę gazową ozon jest często stosowany do oczyszczenia powietrza (inaktywacja mikroorganizmów, dezodoryzacja, rozkład zanieczyszczeń np. pochodzących z dymu papierosowego) w systemach wentylacji i klimatyzacji, głównie w budynkach użyteczności publicznej np. szpitalach, przychodniach, szkołach, hotelach i biurach oraz w samochodach (Bursa i in., 1985; Ozonok 1993).

Jednym z pierwszych i podstawowych zastosowań ozonu było oczyszczanie i dezynfekcja wody pitnej, przemysłowej i basenowej. Ozon reaguje ze związkami żelaza, manganu, amoniaku, siarkowodoru i innymi obecnymi w wodzie oraz eliminuje nieprzyjemne zapachy, smaki i barwę (Biń, 1995; Bai i in., 1997; Hoigne, 1998).

Ozonowanie może być jednym z etapów podczas oczyszczania ścieków. Ozon jest używany do eradykacji zanieczyszczeń, które nie mogą być usuwane tradycyjnymi metodami. Potrafi rozkładać duże cząsteczki (np. leków, pestycydów, pigmentów, detergentów) na mniejsze, łatwiejsze do przetworzenia w kolejnych etapach oczyszczania i możliwe do usunięcia. Może również prowadzić do zmniejszenia dawek innych stosowanych w procesach oczyszczania lub uzdatniania wody substancji np. koagulantów oraz zwiększenia trwałości filtrów. Ozon stosowano również do dezynfekcji gleby oraz w rekultywacji do rozkładu zanieczyszczeń po katastrofach przemysłowych (Ebihara i in., 2011).

Ozon oddziałuje na usuwane związki dwiema drogami:

- pośrednio, przez rozkład i produkcję nioselektywnych, silnie utleniających wolnych rodników oraz dalsze reakcje tych rodników z zanieczyszczeniami,
 - bezpośrednio jako słabszy, ale selektywny O_3 .
 - Wiadomo wiele o reakcjach ozonu z substancjami organicznymi i nieorganicznymi. Ozon reaguje szybko z następującymi substancjami (Nalepa, 1997):
 - substancje organiczne (etylen, fenol, związki poliaromatyczne),
 - substancje nieorganiczne (siarczki, siarczyny, nitryle, bromki).
- Zaś wolno wchodzi w reakcje z:
- prostymi związkami aromatycznymi i alifatycznymi (benzen, propan),
 - niektórymi chlorowcopochodnymi.

W przypadku przemysłu rolno-spożywczego ozon wykorzystuje się w formie gazowej; w postaci wody ozonowanej stosowanej do mycia, zanurzania, jako dodatek do rozcieńczenia lub rozpylanej w formie aerozolu. Technologia ozonowa znalazła zastosowanie głównie do obróbki mięsa i owoców morza, nabiału, ziarna, owoców i warzyw, soków, napojów alkoholowych, przypraw, orzechów oraz w kondycjonowaniu wody, do usuwania pestycydów i szkodliwych środków chemicznych, w dezynfekcji, dezynsekcji i deratyzacji pomieszczeń, narzędzi, obszarów przygotowawczych i linii produkcyjnych oraz przy pakowaniu żywności.

Na przebieg procesu ozonowania i jego skuteczność ma wpływ szereg parametrów m.in. metoda ozonowania, czas ekspozycji, stężenie utleniacza, prędkości przepływu, rodzaj zanieczyszczenia (stan fizjologiczny kultury) i produktu poddanego ozonowaniu,

obecność dodatków (cukry, surfaktanty), pH, temperatura, wilgotność. Ozon może mieć wpływ ma właściwości sensoryczne i teksturę żywności dlatego należy zawsze odpowiednio dobrać warunki prowadzenia procesu by osiągnąć pożądaný efekt.

Ozonowanie w przypadku produktów mięsnych pozwala na ich konserwację dzięki eliminacji szkodliwych mikroorganizmów i degradację nienasyconych lipidów, białek i enzymów, kwasów nukleinowych, peptydoglikanów w otoczce komórkowej, kapsydów wirusowych i osłon przetrwalników (Pandiselvam i in., 2022).

Giménez i in. (2021) w trakcie schładzania wołowiny zastosowali ozon gazowy o stężeniu 280 mg/m^3 w celu redukcji *Listeria monocytogens*. Skuteczniejsze w porównaniu do stałej 40 minut ekspozycji było ozonowanie impulsowe przez 5–10 minut w odstępie co 0,5 godziny. Dłuższe od 10 minut czasy obróbki wpływały niekorzystnie na barwę (utlenianie mioglobiny i oksymoglobiny do metmioglobiny) i jęczenie. Grupa Gertzou (2016) badała wpływ godzinnej ekspozycji na ozon gazowy o stężeniach 2–10 mg a następnie pakowania (poliamid/polietylen) w atmosferze powietrza lub próżniowo na okres trwałości i świeżość tekstury mięsa z nóżek kurczaka. W przypadku pakowania w atmosferze powietrza próbki traktowane dawką 10 mg/L zachowały odpowiednie parametry przez 8–10 dni, o 4 dni dłużej w porównaniu do kontroli. Pakowanie próżniowe wydłuża okres przechowywania po ozonowaniu do 16 dni w porównaniu do 12 dni w przypadku kontroli (Gertzou i in., 2016; 2017). Schłodzony, ozonowany kurczak miał porównywalne wartości organoleptyczne pod względem tekstury z krojonym na świeżo kurczakiem nawet w dziewiątym dniu przechowywania według El-Dahshan i in. (2013).

Cantalejo i in. (2016) dzięki ozonowaniu dwukrotnie (do 8 miesięcy) wydłużyli okres przechowywania w temperaturze $21 \pm 1^\circ\text{C}$ liofilizowanego i pakowanego próżniowo kurczaka, jednak dłuższy czas ekspozycji na ozon powyżej 30 minut spowodował nieakceptowalne, bo około 50% pogorszenie procesu rehydratacji. Sugerowane optymalne parametry procesu to stężenie $0,6 \text{ mgO}_3/\text{L}$ i 10 minutowa ekspozycja.

Owoce morza bogate w białka i lipidy posiadają relatywnie krótki okres przydatności do spożycia i szybko tracą swoją jakość z powodu działania drobnoustrojów i zachodzących procesów enzymatycznych (Liao i in., 2018). Mycie wodą ozonowaną hamuje aktywność proteazy i enzymów proteolitycznych (Zhang i in., 2013), zabezpieczając produkt przez zbytnim zmiękczeniem. Grupa Okpała (Okpała, 2014, 2015; Okpała i in., 2016) badała teksturę mrożonych krewetek pacyficznych poddanych myciu wodą ozonowaną i periodycznemu ozonowaniu w okresie przechowywania. Zastosowana obróbka nie wpłynęła negatywnie na parametry teksturalne, takie jak twardość, kleistość, sprężystość i kruchość produktu. Woda ozonowana i następnie pakowanie w modyfikowanej atmosferze krewetek pacyficznych pozwoliły na wydłużenie okresu przydatności do spożycia z 9 do 24 dni (Gonçalves i Santos, 2019). Ketkaew (2012) zaproponował wykorzystanie ozonu do zmniejszenia stężenia amoniaku w produkcji krewetek.

Ozon jest często wykorzystywany do całorocznej dezynfekcji powierzchni skorupki jaj w celu ochrony przed salmonellozą powodowaną przez *Salmonella enterica*. Ziyaina i Rasco (2021) nie stwierdzili negatywnego wpływu obróbki ozonem na jakość całego jajka, żółtka i białka jaj. Według Yüceer i in. (2016), 2–4 mgO_3/L wpłynęło pozytywnie na stabilność pH i lepkość oraz zdolność ubijania białka jaj, zaś dawki powyżej 6 mg/L miały działanie negatywne. Ozonowanie zwiększyło również zdolność zatrzymywania wody i zmniejszyło straty podczas gotowania (Khemakhem i in., 2019; Sun i in., 2021). Twar-

dość, żujność i gumowatość żółtka kurzego traktowanego ozonem ($1 \text{ gO}_3/\text{h}$) wzrosły wraz z czasem obróbki (max. do 20 minut) (Sun i in., 2021). Doniesienia grup badawczych dotyczące wpływu ozonowania na wytrzymałość skorupki jaj nie są jednoznaczne. Podczas 20 minutowej fumigacji ozonem o stężeniu 5-10 mg/L wytrzymałość na złamanie skorupki jaj wzrosła o 2,25% (Clímaco i in., 2018). Natomiast Yüceer i in. (2016) stwierdzili, że średnia wytrzymałość na złamanie i przebicie jajek zmniejszała się wraz ze wzrostem stężenia ozonu, czasem traktowania i okresem przechowywania.

Ozon stosowany był do konserwacji i poprawy parametrów spożywczych, takich jak mleko, serwatka, sery, kazeina, albumina, inwertaza, pektynaza, papaina, trypsyna, żelatyna, methemoglobina (Cataldo, 2003, 2004, 2007). Ozonowanie żelatyny może znaleźć zastosowanie do jej dekontaminacji lub bielenia przy niskiej dawce ozonu (stosunku molowym ozonu/do żelatyny między 0,1 a 0,35) powodując wtedy jedynie znikome zmiany w jej strukturze.

Segat i in. (2014) stosowali gazowy ozon produkowany z wydajnością 36 g/h do obróbki sproszkowanego izolatu białka serwatkowego w czasie od 30 do 480 minut. Wykazano zmiany w strukturze białka m.in. spadek wolnych grup sulfohydrylowych i wzrost hydrofobowości powierzchni. Powstała struktura bardziej elastyczna, wzrosła zdolność pianotwórcza i stabilność piany, zmalała jednak rozpuszczalność. W swej pracy Smith (2012) badał wpływ ozonu na odbarwianie serwatki. Suprpto i in. (2021) analizowali zaś wpływ ozonu o stężeniu 0,702 mg/L na właściwości fizykochemiczne oraz aktywność mikrobiologiczną świeżego mleka krowiego podczas różnych czasów ekspozycji (do 30 minut). Nie stwierdzono istotnego wpływu na gęstość, białko i tłuszcz w mleku krowim. Odnotowano wzrost wartości oporu elektrycznego oraz znaczący wzrost stężenia dialdehydu malonowego (z 0,0137 do 0,2809 $\mu\text{g}/\text{ml}$) oraz 30% spadek ogólnej liczby kolonii mikroorganizmów.

Długotrwałe ozonowanie zwiększyło twardość (rosła wraz z koncentracją ozonu) i poprawiło konsystencję ubitego masła. Jakość teksturalna i parametry barwy długotrwałego ozonowania poprawiły również jego konsystencję. Analiza kolorymetryczna wykazała zwiększenie współczynnika L^* i a^* , zaś zmniejszenie się udział barwy żółtej b^* . Dłuższa ekspozycja na ozon zwiększyła agregację tłuszczu. W przypadku ubijania z wodą ozonowaną wraz z koncentracją ozonu wielkość cząstek tłuszczu oraz stabilność oksydacyjna zmniejszyła się (Sert i in., 2020; Sert i Mercan, 2020).

Pozytywny wpływ ozonowania komory dojrzewalniczej podczas dojrzewania miękkiego sera na wzrost niekorzystnych mikroorganizmów na powierzchni produktu raportowali Tabla i Roa (2022). Ozon w stężeniu $2 \text{ mg}/\text{m}^3$ znacząco zredukował liczbę grzybów nitkowatych w skórce sera po 30 i 45 dniach dojrzewania w porównaniu z próbką kontrolną. Powierzchniowe działanie fungistatyczne nie wpływało na inne ogólne parametry mikrobiologiczne oraz sensoryczne sera. Ozon poprawiał wygląd skórki i zapobiegał jej przebarwieniom.

Zwalczanie różnego rodzaju mikroorganizmów i szkodników jest bardzo istotne w przypadku przechowalności ziarna, a fumigacja ozonem gazowym jest w tym przypadku jednym z rekomendowanych rozwiązań (Verma, 2018). Skrobia jest głównym składnikiem wielu ziaren. Niewielkie dawki ozonu wpływają na zdolność spęcznienia i zwiększenie przezroczystości i lepkości masy skrobiowej (Zhu, 2018), wysokie dawki przynoszą jednak odwrotny efekt. W przypadku ozonowania skrobi z batatów nie zanotowano istotnych zmian na poziomie granul (rozmiar, morfologia, struktura lamelarna), jednak potwierdzono

ogromne zmiany na poziomie molekularnym, w tym przekształcenia grup hydroksylowych w grupy karbonylowe i karboksylowe oraz depolimeryzację cząsteczek skrobi, co implikowało znaczące zmiany właściwości technologicznych, na przykład wzrost rozpuszczalności w wodzie i przejrzystości masy oraz spadek zdolności do pochłaniania wody, lepkości i sprężystości (He i in., 2023).

Obadi i in. (2018) badali wybrane własności mąki pełnoziarnistej po obróbce ozonem gazowym (5 g/h) w czasie od 5 do 45 minut. Wchłanianie wody i oleju, zdolność sęczenia oraz rozpuszczalność znacząco wzrosły wraz z wydłużaniem czasu ozonowania. Istotnej zmianie uległa również średnia wielkość cząstek mąki, zaś chleb przygotowany z mąki ozonowanej miał lepsze cechy jakościowe (większą objętość właściwą oraz jaśniejszą barwę).

Obróbka wodą ozonowaną podczas przygotowania oraz modyfikowana atmosfera pakowania wpłynęła pozytywnie na przedłużenie trwałości podsuszanych świeżych makaronów gryczanych (zawartość wilgoci $22,5 \pm 0,5\%$) przechowywanych w temperaturze 25°C . Zastosowanie wody zawierającej $2,21 \text{ mg/l}$ ozonu powodowało spadek początkowych obciążań mikrobiologicznych o $1,8 \log_{10} \text{ jtk/g}$, zmniejszenie tempa zakwaszania przy jednoczesnym utrzymaniu cech teksturalnych i sensorycznych przez cały okres badań (Bai i in., 2017). Również Guo i in. (2020) potwierdziła, że użycie wody ozonowanej zmniejszyło ilość bakterii, zawartość pleśni i drożdży w obrabianych makaronach odpowiednio o $1,26 \log_{10} \text{ jtk/g}$, $0,34 \log_{10} \text{ jkt/g}$ i $0,39 \log_{10} \text{ jtk/g}$. Trwałość podsuszanych świeżych makaronów w temperaturze pokojowej została wydłużona o prawie 24 godziny bez pogorszenia właściwości teksturalnych.

Ziarna parzonego ryżu traktowane ozonem wykazywały znaczną redukcję zanieczyszczenia mikotoksynami (do 60%), niezależnie od czasu i okresu aplikacji oraz badanej mikotoksyny. Pod względem właściwości technologicznych próbki traktowane ozonem przez 5 godzin moczenia wykazywały wyższą jasność, a także twardość, zdolność do pęcznienia i spoistość przy jednoczesnym skróceniu czasu gotowania, procentu wadliwych ziaren oraz rozpuszczalności białka (da Luz i in., 2022).

Ozon chętnie stosowany jest podczas przechowywania oraz obróbki owoców i warzyw by usunąć lub uniknąć zanieczyszczenia produktów spożywczych na różnych etapach cyklu produkcyjnego (Perez i in., 1999; Tzortzakis i in., 2007, Carletti i in., 2013; Kopacki i in., 2021). Mycie wodą ozonowaną może zredukować drożdże i pleśnie występujące w mrożonych truskawkach nawet o 98% (Krosowiak i in., 2007), pozwala na ograniczenie skali zakażeń powodowanych przez *Botrytis cinerea* w przypadku gruszek (Mari i in., 2003) i winogron nie wpływając negatywnie na barwę i zawartość chlorofilu (De Simone i in., 2020).

Celem badań Duarte-Sierra i zespołu (2022) było zbadanie wpływu ekspozycji różyczek brokułów na ozon o różnych stężeniach. Najlepsze wyniki, skutkujące aktywacją genów szlaku glukozynolanów oraz wzrostem poziomu metabolitów wtórnych, to jest kwasów hydroksycynamonowych i glukobrassycyny osiągnięto przy użyciu $5 \mu\text{LO}_3/\text{L}$ przez 60 minut.

Ozon pomógł wydłużyć okres przechowywania świeżych owoców i warzyw np. jabłek, winogron, pomarańczy, gruszek, malin, truskawek oraz brokułów, ogórków oraz sałaty (Beuchat, 1992). Chwaszcz i in. (2015) stosując technologie ozonowania wydłużyli także okres przechowywania malin do czterech dni.

Ozon często wykorzystuje się do eliminacji pozostałości pestycydów. Według Ong i in. (1996) mycie jabłek w wodzie zawierającej ozon (25 ppm) przez 30 minut znacząco zmniejszyło poziom pestycydów na ich powierzchni. de Souza i in. (2018) zdołali usunąć ponad 98% difenokonazolu i 95% linuronu z korzeni marchwi przy użyciu ozonu. W pracy Al. Dabbas i in. (2014) zbadano korzystny wpływ obróbki ozonowej przez 3, 5, 10, 15 i 30 minut przy stężeniu 0,4 ppm na usuwanie pozostałości pestycydów karbaminowych: metomilu, oksamylu i karbosulfanu w sztucznie zanieczyszczonym soku pomidorowym, zaś efekt był silnie uzależniony od czasu obróbki.

Laika i in. (2024) wykorzystali pozytywny wpływ obróbki gazem plazmowanym zawierającym głównie ozon, generowanym w reaktorze plazmowym z wyładowaniem powierzchniowym do dekontaminacji inokulowanych mikotoksynami (aflatoksynami B1 (AFB1), B2 (AFB2), G1 (AFG1), G2 (AFG2) oraz ochratoksyną A (OTA)) pistacji. Zaobserwowano dość nieoczekiwany rozkład mikotoksyn: AFB1: 5%, 20% i 20% odpowiednio dla pistacji całych, krojonych i miazgi pistacjowej. Natomiast OTA, 9%, 23% i 31% w stosunku do tak samo przygotowanych wyrobów. Wpływ matrycy żywnościowej miał więc znaczący wpływ na przebieg eksperymentu.

Chen i in. (2014) stwierdzili, że aflatoksyny w orzeszkach ziemnych o wilgotności na poziomie 5% (w/w) łatwo ulegały degradacji podczas 30 minutowej ekspozycji na 6,0 mg/L ozonu w temperaturze pokojowej. Podczas oceny jakości odżywczej orzeszków ziemnych po ozonowaniu nie stwierdzono istotnych różnic między próbkami ozonowanymi, a kontrolą pod względem zawartości polifenoli, resweratrolu, liczb kwasowej i nadtlenkowej.

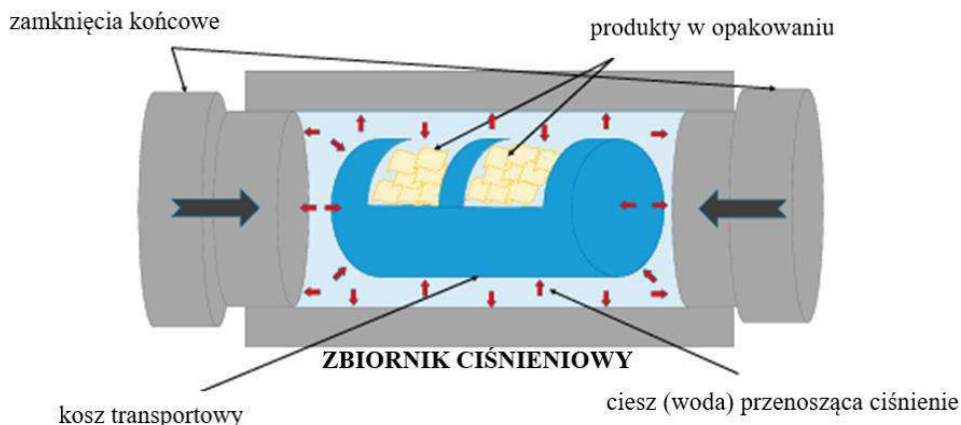
Na podstawie doniesień licznych grup badawczych można stwierdzić, że ozonowanie żywności pozytywnie wpływa na poprawę jego bezpieczeństwa i jakości, może przynieść wiele korzyści wpływając na wydłużenie trwałości i minimalizację strat, polepszenie właściwości mikrobiologicznych, sensorycznych oraz funkcjonalnych. Może też pomóc w dekontaminacji żywności z pozostałości związków chemicznych (pestycydów). W każdym przypadku należy prowadzić proces w kontrolowanych warunkach, po odpowiednich działaniach optymalizacyjnych (dobór dawki, czasu kontaktu oraz warunków ekspozycji na ozon) w celu uniknięcia rozkładu pożądaných substancji odżywczych.

6.3. Wysokie ciśnienie hydrostatyczne – technologia HPP

Obróbka wysokociśnieniowa (*High Pressure Processing*, HPP), pod wysokim ciśnieniem hydrostatycznym (*High Hydrostatic Pressure*, HHP) lub też proces znany jako utrwalanie pod ultrawysokim ciśnieniem (*Ultra High Pressure*, UHP) to terminy opisujące poddawanie żywności działaniu podwyższonego ciśnienia (6000 atmosfer, czyli 600 MPa) w temperaturze otoczenia lub schłodzonej.

Technika ta została nazwana na cześć Blaise'a Pascala, XVII-wiecznego francuskiego naukowca, którego opracowania naukowe obejmowały szczegółowe opisywanie wpływu ciśnienia na płyny. W późniejszym czasie proces ten był również znany jako bridgmanizacja, ponieważ Percy Williams Bridgman, amerykański fizyk, w 1946 roku otrzymał Nagrodę Nobla za pracę nad fizyką wysokich ciśnień (www.en.wikipedia.org/wiki/Pascalization).

Generalnie technologia HPP zrewolucjonizowała sposób utrwalania opakowanej żywności poprzez wykorzystanie wody pod wysokim ciśnieniem, co pozwoliło uniknąć podgrzewania produktu. W tej metodzie produkt pakowany jest w elastyczny pojemnik (worek lub plastikową butelkę), a następnie ładowany do kosza na próbki, jak pokazano na rysunku 16.



Rys. 16. Schemat procesu obróbki metodą HPP (Balakrishna i in., 2020)

Kosz na próbki jest następnie ładowany do komory wysokociśnieniowej wypełnionej płynem przesyłającym ciśnienie, takim jak woda. Płyn przesyłający ciśnienie w komorze jest kolejno poddawany działaniu pompy pod ciśnieniem, a ciśnienie przekazywane jest przez opakowanie do żywności. Podczas zwiększania ciśnienia następuje przejściowy wzrost temperatury żywności ($3^{\circ}\text{C}/100\text{ MPa}$) w wyniku ogrzewania adyabatycznego. Produkt jest utrzymywany pod ciśnieniem przez określony czas, zwykle 2-5 minut, zanim zostanie rozhermetyzowany. Co ważne, wysokie ciśnienie rozchodzi się w objętości produktu równomiernie i natychmiastowo, dzięki czemu nie uszkadza produktu, który powróci do swojego pierwotnego kształtu po zwolnieniu ciśnienia, zwanego izostatycznym. Po dekompresji, również temperatura utrwalonego wyrobu powraca do wartości bliskiej wartości początkowej. W końcowym etapie utrwalony produkt opuszcza komorę w stanie nie naruszonym i jest przechowywany w warunkach chłodniczych.

Pierwotnie wprowadzono orientację pionową tego typu urządzeń, jednak obecnie większość wysokociśnieniowych technologii wykorzystywanych na skalę komercyjną jest zorientowana poziomo. Pomaga to pomieścić większe rozmiary/objętości obrabianych próbek, a także zapewnia wyraźne oddzielenie stref surowców i produktów przetworzonych.

HPP pozwala na zniszczenie drobnoustrojów powodujących psucie się bez użycia ciepła, zachowując oryginalny smak, konsystencję i właściwości odżywcze produktu. Eksperymenty nad wpływem ciśnienia na mikroorganizmy odnotowano już w 1884 roku, a w 1899 roku Benjamin Harrison Hite jako pierwszy niezbicie wykazał inaktywację mikroorganizmów pod wpływem ciśnienia. Po tym czasie, szybko pojawiły się doniesienia na

temat zapobiegania psuciu się mleka, które poddane działaniu wysokiego ciśnienia pozostawało słodsze dłużej niż mleko niepoddane obróbce.

Mięso, owoce i warzywa, soki i napoje, dzemy, galaretki, żywność dla dzieci, to tylko niektóre reprezentatywne kategorie wyrobów poddawanych obróbce ciśnieniowej. Produkty HPP dostępne na całym świecie obejmują również skorupiaki (w tym ostrygi, homary i kraby), połówki awokado i guacamole, szynkę peklowaną, sałatki i dipy (między innymi coleslaw, salsa, hummus) i inne dania gotowe. Przyjmuje się jednak, że technologia HPP jest szczególnie przydatna do przetwarzania produktów kwaśnych ($\text{pH} < 4,6$).

Przepisy dotyczące analizy zagrożeń i krytycznych punktów kontroli (HACCP) stosowane przez Agencję ds. Żywności i Leków (FDA) uznają HPP za proces utrwalania zapewniający redukcję o 5 log odpowiednich patogenów w sokach. Podobnie HPP została uznana przez FDA za proces odkażania bakterii *Vibrio* w surowych ostrygach i owocach morza. Służba Inspekcji Bezpieczeństwa Żywności Departamentu Rolnictwa Stanów Zjednoczonych (USDA FSIS) uważa metodę HPP za odpowiednią do zwalczania *Listeria monocytogenes* obecna w gotowych do spożycia (RTE) produktach mięsnych. Health Canada, Komisja Europejska i inne agencje regulacyjne również uznały HPP za skuteczny proces dekontaminacji żywności.

Obróbka pod wysokim ciśnieniem stwarza wiele możliwości poprawy jakości żywności. Jedną z nich jest inaktywacja mikroorganizmów występujących w kostkach mango pod wpływem obróbki wysokociśnieniowej prowadzonej przez 1 minutę przy w 300 i 600 MPa. Podczas 9 tygodni przechowywania w temperaturze 3°C smak świeżego mango uległ zmianie, zaś barwa i inne cechy sensoryczne były porównywalne do próbek niepoddanych obróbce (Kader, 2008).

W innym doświadczeniu kostki ananasa w syropie cukrowym poddano obróbce wysokociśnieniowej, ogrzewaniu konwencjonalnemu i ogrzewaniu omowemu. Ostatnia z wymienionych metod spowodowała istotne zmiany w mikrostrukturze komórkowej i elektroporacji ściany komórkowej. Konwencjonalne ogrzewanie skutkowało obniżeniem resztkowej aktywności enzymatycznej. Natomiast obróbka HPP sprzyjała obecności rozpuszczalnych substancji stałych w syropie, a także nie wpływała na kształt i mikrostrukturę kostek ananasa. Niestety po jej zastosowaniu wykazano największe różnice kolorymetryczne (ΔE) (Rinaldi i in., 2020).

Rinaldi i in. (2023) ocenili barwę, konsystencję, całkowitą zdolność przeciwutleniającą, liczbę drobnoustrojów i mikrostrukturę kostek dyni poddanych obróbce HPP (100 do 600 MPa przez 3 minuty). Autorzy pracy nie zauważyli znaczących różnic pomiędzy próbkami nietraktowanymi i próbkami poddanymi obróbce w wartościach wilgotności, całkowitej zawartości rozpuszczalnych substancji stałych i pH. Tkanka dyni wykazywała jednak duże modyfikacje strukturalne, takie jak zmiany wielkości i kształtu komórek, uszkodzenie ściany komórkowej, zwiększenie grubości ściany komórkowej, oddzielenie i odwodnienie komórek oraz odkładanie się jonów wapnia, głównie w zakresie HPP od 300 do 600. Zaś próbki kontrolne charakteryzowały się bardziej regularną grubością ścianek komórek. Zauważono zauważalną różnicę barwy ΔE i twardości pomiędzy próbkami HPP600 i kontrolnymi, podczas gdy obróbka przy niższych ciśnieniach nie miała aż tak dużego wpływu na rozpatrywane parametry. Co ciekawe kostki dyni poddane ciśnieniu HPP200 i HPP400 posiadały najwyższą całkowitą zdolnością przeciwutleniającą. Obróbka wysoko-

ciśnieniowa od HPP400 do 600 pozwoliła w największym stopniu zniszczyć mikroorganizmy, ale negatywnie wpłynęła na teksturę i mikrostrukturę produktu.

Rastogi i in. (2000) zaobserwowali wyższy współczynnik dyfuzji w kostkach ananasa poddanych obróbce wstępnej pod wysokim ciśnieniem podczas odwadniania osmotycznego w porównaniu z kostkami ananasa niepoddanyymi obróbce ciśnieniowej.

Janowicz i Lenart (2015) stwierdzili, iż suszenie konwekcyjne kostek jabłek po obróbce wstępnej HHP spowodowało statystycznie istotne zmiany barwy tkanki w porównaniu do próbek kontrolnych, z tendencją do ciemnienia. Zastosowanie roztworu hipertonicznego podczas obróbki wstępnej pod ciśnieniami 0,1 i 300 MPa było przyczyną otrzymania niższych odpowiednio o 10,5% i 16% wartości ΔE w stosunku do tkanek jabłek poddanych wstępnej obróbce roztworem izotonicznym. Skurcz tkanki jabłek wahał się od 70 do 89% i był zależny od parametrów obróbki wstępnej HHP. Podobnie wartości porowatości próbek zmieniały się w zależności od zastosowanych parametrów procesu i mieściły się w bardzo szerokim zakresie od 1 do 66%.

Wpływ obróbki wstępnej wysokociśnieniowej (300-500 MPa przez 5-15 minut) na charakterystykę odwodnienia kostek aloesu suszonych w temperaturze 50-70°C i przy prędkości powietrza 1-2 m/s, był analizowany przez Swami Hull i Rao (2016). Autorzy pracy stwierdzili, że zastosowany proces doprowadził do skrócenia czasu suszenia w porównaniu z produktami niepoddanyymi obróbce. Na szybkość i czas suszenia największy wpływ miała temperatura, a następnie prędkość powietrza, poziom ciśnienia i czas przetwarzania. HPP zwiększyło twardość kostek aloesu maksymalnie o 21% dla próbki poddanej działaniu ciśnienia 500 MPa przez 15 minut. Analiza mikrostruktury przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) wykazała niejednorodne struktury we wstępnie obrobionych i wysuszonych próbkach.

Badanie zmian tekstury i szybkości suszenia plasterków ananasa poddanych wstępnej obróbce pod wysokim ciśnieniem przeprowadzili Kingsly i in. (2009). Autorzy zaobserwowali, że wysokie ciśnienie zmniejsza twardość, sprężystość i żujność próbek, natomiast na spójność nie wpływa znacząco. Badania wskazały, że obróbka wstępna plasterków owoców pod wysokim ciśnieniem może zminimalizować czas suszenia i utrzymać jakość produktów końcowych.

Obróbkę wysokociśnieniową można również stosować jako nietermiczną metodę utrwalania soków w celu zwiększenia ich stabilności poprzez inaktywację drobnoustrojów przy stosunkowo niewielkich zmianach jakości sensorycznej i odżywczej.

Świadczą o tym chociażby badania przeprowadzone przez McKay i in. (2011), którzy zauważyli zmniejszenie całkowitej liczby tlenowych mikroorganizmów mezofilnych, bakterii kwasu mlekowego, drożdży i pleśni w soku jabłkowym, stosując ciśnienie 300 MPa przez 1 minutę w temperaturze 20°C. Natomiast chcąc uzyskać całkowitą redukcję (poniżej granicy wykrywalności) rozpatrywanych drobnoustrojów zastosowali ciśnienia rzędu 500 - 600 MPa (1 minuta, 20°C).

Abid i in. (2014) stwierdzili, że sok jabłkowy poddany obróbce HPP (450 MPa, 10 minut, 20°C) charakteryzował się wyższą zawartością związków fenolowych i przeciwutleniaczy, w porównaniu do próbki kontrolnej i soku poddanego obróbce pod ciśnieniem 350 MPa.

Barbara i in. (2013) ocenili z kolei wpływ obróbki wysokociśnieniowej (200, 400 i 600 MPa) i czasu jej trwania (5, 9 i 15 minut) na wartości fizykochemiczne soku jagodowego.

Niezależnie od zastosowanych parametrów procesu, nie zaobserwowali znaczących zmian w pH i °Brix, a także barwie (a^* , b^* , L^* i ΔE). Zabiegi HPP spowodowały nieznaczną redukcję witaminy C nieprzekraczającą 8%. Natomiast całkowita zawartość polifenoli w soku uległa zwiększeniu, głównie po zastosowaniu HPP przy ciśnieniu 200 MPa dla wszystkich czasów obróbki. Wartości pojemności antyoksydacyjnej nie różniły się statystycznie istotnie dla zabiegów przy ciśnieniu 200 MPa przez 5-15 minut w porównaniu wartości otrzymanych dla świeżego soku. Natomiast pod wpływem zwiększonego ciśnienia (400 i 600 MPa) nastąpiła redukcja rozpatrywanej cechy w granicach od 8 do 16%.

Sok grejpfrutowy Aadil i in. (2017) poddali zmiennym procesom obróbki HPP (0, 150, 200 i 250 MPa), temperaturze (40, 50 i 60°C) i czasie przetwarzania trwającym 3 minuty. Autorzy pracy nie zaobserwowali różnic w wartościach °Brixa, pH i kwasowości pomiędzy próbkami kontrolnymi, a poddanymi różnym zabiegom z użyciem HPP. Po obróbce wysokociśnieniowej (250 MPa, 60°C, 3 minuty) prowadzącej do znacznej redukcji mikroorganizmów, zauważono wzrost wartości karotenoidów ogółem, antocyjanów ogółem, aktywności DPPH, całkowitej zdolności przeciwutleniającej, a także całkowitej zawartości polifenoli w porównaniu z próbką kontrolną. Średnie wartości współczynników barwy $L^*a^*b^*$ dla wyrobu niepoddanego obróbce wynosiły odpowiednio 6,65; 3,80 i 4,95. Odnotowano natomiast pociemnienie (zmniejszenie wartości parametru L^*) wyrobów poddanych przetwarzaniu. Współczynnik chromatyczności a^* , zmieniał się wraz ze zmianą parametrów procesu i zawierał się w granicach od 3,51 do 3,65. Zastosowana obróbka, wpłynęła również na obniżenie współczynnika charakteryzującego barwę żółtą b^* , którego wartości kształtowały się na poziomie 4,67-4,79.

Ze względu na to, iż tradycyjna metoda pasteryzacji ma zwykle negatywny wpływ na jakość soków, w kolejnym badaniu porównano obróbkę wysokociśnieniową (500 MPa, 10 minut) i termiczną (95°C, 3 minuty) monitorując ich wpływ na fizykochemiczne i mikrobiologiczne właściwości soku ananasowego podczas jego przechowywania w temperaturze 4°C. Zastosowane zabiegi pozwoliły wydłużyć okres przydatności do spożycia świeżo przygotowanego napoju do co najmniej 21 dni. Generalnie umożliwiły inaktywację ogólnej liczby drobnoustrojów, w tym drożdży i pleśni, a także bakterii z grupy coli. Obróbka HPP nie miała istotnego wpływu na właściwości fizykochemiczne soku ananasowego, natomiast stwierdzono wyraźną zmianę barwy i znaczne zmniejszenie zawartości fruktozy i glukozy w soku owocowym poddanym pasteryzacji (Wu i in., 2021).

W wielu badaniach donoszono również o zaletach HPP w porównaniu do tych poddanych pasteryzacji, w zachowaniu aromatu świeżych soków, w związku z tym soki HPP cieszyły się większą ogólną akceptacją (Chang i in., 2017; Aaby i in., 2018; Bansal i in., 2019; Hu i in., 2020; Song i in., 2023). Przedmiotem badań Sreedevi i in. (2020) był sok z trzciny cukrowej, który ma krótki okres przydatności do spożycia ze względu na szybkie psucie się enzymatyczne i fermentację mikrobiologiczną. Zmiany cech jakościowych soku przetworzonego pod wysokim ciśnieniem (523 MPa, 50°C, 11 minut) porównano z sokiem konwencjonalnie pasteryzowanym (90°C, 5 minut), pakowanym w dwa różne materiały opakowaniowe, takie jak alkohol etylenowo-winyłowy (EVOH) i wielowarstwowy (ML-PET) politereftalan etylenu. Akceptowalność sensoryczna soku poddanego HPP była lepsza niż próbek pasteryzowanych. W warunkach chłodniczych napoje umieszczone w butelce wykonanej z ML-PET i poddane działaniu wysokiego ciśnienia wykazywały trwałość do

100 dni w porównaniu z sokiem pasteryzowanym, dla którego okres przydatności do spożycia wynosił 45 dni.

Jeśli chodzi o patogeny występujące w sokach, bakteria *Escherichia coli* jako organizm wskaźnikowy, wymaga redukcji o co najmniej 5 log w połączeniu z czasem i ciśnieniem, aby zapewnić bezpieczeństwo wyrobom końcowym. W sokach owocowych i produktach warzywnych obróbka HPP może spowodować skuteczną redukcję tego drobnoustroju (Usaga i in., 2021; Nema i in., 2022; Gouvea i in., 2023).

Potwierdzają to badania Gouvea i in. (2020), którzy w soku z acai poddanym działaniu HPP przy 400 MPa przez 3 minuty zaobserwowali ponad 6-logarytmiczną redukcję bakterii *Escherichia coli*, *Salmonella* i *Listeria monocytogenes*. Najbardziej wrażliwym patogenem wśród analizowanych drobnoustrojów była *Listeria monocytogenes*, u której pomyślnie odnotowano spadek o 6 log przy 400 MPa w ciągu 1 minuty.

Pokhrel i in. (2019) zbadali zaś skuteczność działania wysokiego ciśnienia (200-500 MPa) lub w połączeniu z łagodną obróbką cieplną (35 i 50°C) i niziną (25 i 50 ppm) w inaktywacji *Listeria innocua* i *Escherichia coli* w soku marchwiowym. Przetwarzanie pod ciśnieniem 500 MPa w temperaturze 20°C przez 2 minuty bez nizyny spowodowało redukcję odpowiednio *L. innocua* i *E. coli* o 4 i 5 log₁₀ jtk/ml, przy włączeniu 25 ppm nizyny pod tym samym ciśnieniem i temperaturą redukcja wynosiła 7 log₁₀ jtk/ml. Co ważne, po 28 dniach przechowywania w lodówce soku z marchwi traktowanego kombinacją 300 MPa (w temperaturze 35°C) i 25 ppm nizyny całkowita liczba drobnoustrojów wyniosła <2 log₁₀ jtk/ml. Wszystkie kombinacje spowodowały mniej intensywne wykorzystanie ciśnienia, czyli bardziej energooszczędne i opłacalne procesy przy jednoczesnym uzyskaniu wysokiej jakości soków. Wyniki tego badania sugerują, że stosując odpowiedni poziom ciśnienia, temperatury i dodatku nizyny, można wytwarzać bezpieczne, wysokiej jakości soki z czystą etykietą.

Naukowcy zgodnie z zasadami zrównoważonej produkcji podejmują jeszcze inne działania prowadzące do minimalizacji kosztów przetwarzania. Rodrigues Petrus i in. (2020) sok pomarańczowy zaszczepili bakteriami *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* i *Listeria monocytogenes*, po czym próbki poddawali ciśnieniu w zakresie od 139 do 561 MPa przez czas wynoszący od 39 do 181 sekund. Stosując, ciśnienie powyżej 400 MPa uzyskali redukcję o ponad 5 log wszystkich patogenów, niezależnie od czasu prowadzenia procesu. Zauważyli jednak, że *Listeria monocytogenes* była bardziej wrażliwa na HPP już przy ciśnieniu 350 MPa i czasie przetwarzania równym lub przekraczającym 110 sekund. *Escherichia coli* O157:H7 i *Salmonella enterica* wykazywały podobną oporność, a liczba ich redukcji (350 MPa/110 s) wahała się od 2,2 do 3,7 log. Tym samym autorzy pracy dowiedli, że w celu zapewnienia bezpieczeństwa soku jabłkowego można z powodzeniem stosować stosunkowo umiarkowane ciśnienia, oszczędzając energię i minimalizując koszty utrwalania.

Do ciekawych wniosków doszli również Donsi i in. (2007) wskazując, że większą redukcję *Saccharomyces cerevisiae* w sokach ananasowych i pomarańczowych można uzyskać stosując wielopulsowe niż statyczne HPP. Również da Rocha Ferreira i in. (2009) zaobserwowali, że wieloimpulsowy HPP był bardziej skuteczny w redukcji *Byssoschlamys nivea* w soku ananasowym i nektarze niż statyczny HPP. Największą zaletą wieloimpulsowego HPP jest to, że występuje więcej niż jeden okres kompresji, utrzymywania i dekompresji, w porównaniu do trybu jednoimpulsowego charakteryzującego się kompresją,

utrzymywaniem przez pewien czas pod ciśnieniem docelowym i dekompresją do ciśnienia atmosferycznego.

Szczepańska i in. (2021) ocenili wpływ statycznej i wieloimpulsowej obróbki wysokociśnieniowej (HPP) na jakość świeżo tłoczonego soku jabłkowego podczas przechowywania w warunkach chłodniczych (4°C przez 12 tygodni). Obróbka przy 300 MPa (trzy impulsy po 5 minut każdy), 450 i 600 MPa (pojedynczy impuls przez 5 minut) spowodowała większą redukcję mikroorganizmów niż pojedynczy impuls przy 300 MPa trwający 5 minut. Obróbka HPP i czas przechowywania znacząco zwiększyły pozorną lepkość dynamiczną i zmętnienie. Każdy sok poddany obróbce HPP po 12 miesiącach przechowywania okazał się ciemniejszy w porównaniu do wyrobu kontrolnego, o czym świadczy spadek wartości L^* i wzrost wskaźnika brązowienia (BI). Odnotowano również spadek ilości witaminy C, kwercetyny, kwasu galusowego i katechin. Jednak ze względu na to, iż po 12 tygodniach przechowywania uzyskano dla soku poddanego działaniu 300 MPa x 3 cykle i 600 MPa porównywalną jakość, uznano, że wieloimpulsowe HPP może być dobrą alternatywą dla utrwalania soku, zwiększającą żywotność sprzętu.

Obróbkę wysokociśnieniową można również wykorzystać do modyfikacji wartości odżywczych przetworzonych produktów z owoców czy warzyw.

Mukhopadhyay i in. (2017) ocenili wpływ HPP (300-400-500 MPa, 5 minut) w dwóch temperaturach (8°C i 15°C) na zdolność przeciwutleniającą (test ORAC) puree z melona kantalupa podczas 10 dni przechowywania w temperaturze 4°C. Nie stwierdzono znaczących różnic w wartościach zdolności przeciwutleniającej pomiędzy próbkami świeżymi i poddanymi obróbce (w różnych badanych zakresach ciśnienia i temperatury). Ponadto wartości μmol ekwiwalentu troloksu/100 g świeżej masy poddanego obróbce przecieru były bardzo stabilne podczas 10 dni przechowywania.

Shen i in. (2016) stwierdzili, że obróbkę HPP można stosować jako alternatywę dla pasteryzacji termicznej mięszu jujuby. Traktowanie pod ciśnieniem 400 MPa lub wyższym przez 20 minut przyczyniło się do większej retencji kwasu askorbinowego i zwiększenia całkowitej zawartości fenoli, całkowitej zawartości flawonoidów i zdolności przeciwutleniającej. W porównaniu z obróbką cieplną, HPP (600 MPa, 20 min) umożliwiło zachowanie większej ilości składników odżywczych, jednak nieznacznie zmniejszyło zdolność przeciwutleniającą mięszu jujuby. Wraz ze wzrostem ciśnienia retencja kwasu askorbinowego nieznacznie wzrosła do 92,9 i 93,3% odpowiednio w próbkach 500 MPa i 600 MPa. W 40. dniu szybkość degradacji kwasu askorbinowego w próbkach jujuby traktowanych HPP wynosiła 11,9% (4°C) i 32,1% (15°C). Jednakże szybkość degradacji kwasu askorbinowego w próbkach poddanych obróbce termicznej przechowywanych w temperaturze 4°C i 15°C wyniosła odpowiednio 60,2% i 67,3%. Ponadto wyroby przechowywane w temperaturze 4°C zachowały więcej kwasu askorbinowego niż te przechowywane w temperaturze 15°C, a próbki poddane obróbce HPP zachowały więcej kwasu askorbinowego niż próbki poddane obróbce termicznej. Zdolność przeciwutleniająca próbek traktowanych HPP i TP spadła podczas przechowywania w temperaturach 4°C i 15°C. Jednakże w porównaniu do obróbki wysokociśnieniowej, zabieg termiczny spowodował większą zmianę badanego wyznacznika (28% vs. 42%).

Fernández i in. (2018) przygotowali smoothie o następującym składzie: sok pomarańczowy (59%), jabłka (15%), marchew (15%), liście buraków (6%) i łodygi buraków (5%), który potraktowali HPP (630 MPa przez 6 minut). Początkowo próbki poddane obróbce

charakteryzowały się wyższą zawartością kwasu askorbinowego (około 7%) niż próbki kontrolne. Wraz z czasem przechowywania nastąpił spadek zawartości witaminy C, najprawdopodobniej ze względu na jej utlenienie do kwasu dehydroaskorbinowego i nieodwracalną konwersję do kwasu 2,3-diketogulonowego. Produkty owocowo-warzywne poddane działaniu wysokiego ciśnienia początkowo wykazywały również wyższe wartości zdolności przeciwutleniających (5% w DPPH i 38,8% w metodzie FRAP) w porównaniu z próbką kontrolną. Następnie DPPH stopniowo malało w czasie, ale wartość FRAP nawet po 14 dniach utrzymywała się na poziomie zbliżonym do wartości początkowej.

Zaś Bi i in. (2020) zbadali wpływ obróbki wysokociśnieniowej (HPP) na właściwości fizykochemiczne smoothie z mango i inaktywację znajdujących się w nich mikroorganizmów, przy czym próbę kontrolną stanowił wyrób poddany obróbce cieplnej. Przeprowadzono analizę porównawczą zmian mikrobiologicznych w koktajlach z mango poddanych działaniu HPP pod ciśnieniem 400-600 MPa przez 0-15 minut. Stwierdzono, że całkowita liczba mikroorganizmów oraz liczba drożdży i pleśni uległa istotnej inaktywacji w wyniku wzrostu ciśnienia i czasu obróbki. Zatem wybrano warunki 90°C/20 minut (HT), 500 MPa/8 minut (HPP-500) i 600 MPa/5 minut (HPP-600) jako kolejną próbę sprawdzenia zmian jakości smoothie w czasie przechowywania w temperaturze 4°C przez 15 dni. Stwierdzono, że ogólna liczba drobnoustrojów wzrosła o 3,87, 3,54 i 3,36 log₁₀ jtk/ml w koktajlach z mango poddanych działaniu odpowiednio HT, HPP-500 i HPP-600, podczas gdy (we wszystkich próbkach) liczba drożdży i pleśni była poniżej granicy oznaczalności. Podczas przechowywania, nie wykazano zmian w lepkości czy barwie w próbkach traktowanych HT i HPP-600, w stosunku do produktów obrabianych przy ciśnieniu 500 MPa. Po obróbce HPP ogólna zawartość karotenoidów była lepiej zachowana w czasie przechowywania niż po procesie HT. Zastosowane techniki utrwalania nie miały wpływu na pH ani na całkowitą zawartość rozpuszczalnych substancji stałych (TSS) w próbkach wyrobów. W badaniu ustalono, że HPP-500 jest w stanie zapewnić zarówno bezpieczeństwo mikrobiologiczne, jak i jakość smoothie z mango skuteczniej niż HT i HPP-600.

Surowe mięso i przetwory mięsne uznawane są za żywność łatwo psującą się, o ograniczonym terminie przydatności do spożycia. Przez wiele lat ze spożyciem skażonego mięsa i produktów mięsnych łączono kilka chorób przenoszonych przez żywność i uznawano je za jedną z głównych przyczyn epidemii (*Salmonelli* czy *Escherichia coli* związanych ze spożyciem produktów z wołowiny) (www.ecdc.europa.eu/en).

HPP, jako technologia inaktywacji bakterii chorobotwórczych, zapewnia przemysłowi mięsnemu doskonałe i niezawodne narzędzie zapobiegające występowaniu podobnych ognisk bez szkody dla jakości produktu. Niemniej jednak reakcja bakterii chorobotwórczych na zabiegi wysokociśnieniowe jest zmienna i zależy od zastosowanej temperatury. Faktycznie zaobserwowano, że bakterie wykazują największą odporność na ciśnienie w temperaturach pomiędzy 20 a 30°C. Inaktywacja *Escherichia coli* O157:H7 przeprowadzona na mięsie drobiowym wykazała redukcję o 1 log, gdy produkt poddano obróbce pod ciśnieniem 400 MPa i 20°C przez 15 minut. Gdy utrwalanie przeprowadzono pod ciśnieniem 400 MPa i połączono z temperaturą 50°C, uzyskano redukcję o 6 log (Patterson i Kilpatrick, 1998).

Największym wyzwaniem w stosowaniu wysokiego ciśnienia jest inaktywacja zarodników bakterii. Często występują różnice w odpowiedzi na tego typu utrwalanie między różnymi gatunkami i szczepami tego samego gatunku. Na przykład zarodniki *Clostridium*

sporogenes w świeżej piersi kurczaka wymagały ciśnienia od 680 MPa przez 1 godzinę, aby osiągnąć odpowiednią (5-log) inaktywację (Crawford i in., 1996), podczas gdy inni naukowcy wykazali, że traktowanie *Clostridium sporogenes* pod ciśnieniem 1500 MPa w medium płynnym doprowadziło jedynie do redukcji o 1,5 log. Uważa się, że zarodniki *Bacillus subtilis*, można zredukować przy zastosowaniu ciśnienia od 100 do 600 MPa (Maggi i in., 1996).

Wśród patogenów przenoszonych przez żywność związanych ze spożyciem mięsa, w tym drobiu poważnym problemem jest *Clostridium perfringens* typu A., która okazała się odporna na ciśnienie rzędu 100-200 MPa. Jednak Aktar i in. (2009) z powodzeniem zastosowali strategię, która obejmowała następujące po sobie etapy: pierwotną obróbkę cieplną (80°C, 10 minut) w celu pasteryzacji i denaturacji białek mięsnych oraz aktywacji zarodników *Clostridium perfringens*, chłodzenie produktu do 55°C przez 20 minut i dalszą inkubację w 55°C przez 15 minut w celu utrzymania korzystnych warunków dla zarodników, a także inaktywację zarodników poprzez obróbkę termiczną pod ciśnieniem (586 MPa w 73°C przez 10 minut). Skuteczność tej strategii wymagała biodostępności L-asparaginy i KCl niezbędnej do szybkiego namnażania się zarodników bakterii (Paredes-Sabja i in., 2007).

W ostatnim czasie ustalono, iż skuteczną kontrolę patogenów odpornych na ciśnienie i organizmów powodujących psucie się mięsa można osiągnąć poprzez połączenie wysokiego ciśnienia z zastosowaniem łagodnej temperatury i/lub środków przeciwdrobnoustrojowych i/lub konkurencyjnej mikroflory (Li i in., 2020; Nema i in., 2022; Rajendran i in., 2022).

Obróbka ciśnieniowa ma także wiele zastosowań wykraczających poza konserwację wyrobów spożywczych, ponieważ wspomaga między innymi procesy zmiękczenia mięsa (Bernardo i in., 2023), denaturacji i solubilizacji białek (Chen i in., 2018), infuzji składników odżywczych (Balakrishna i in., 2020), zamrażania i rozmrażania (Cartagena i in., 2020), co przynosi ogromne korzyści w różnych operacjach przetwarzania żywności. HPP zapewnia także wyjątkową możliwość tworzenia nowych tekstur żywności na bazie białka lub skrobi. W niektórych przypadkach można zastosować ciśnienie w celu wytworzenia żeli białkowych i zwiększenia lepkości produktu bez użycia ciepła. Badania sugerują, że zastosowanie HPP (100-500 MPa) powoduje obniżenie temperatury żelowania skrobi. Zazwyczaj skrobia pęcznieje i traci swoją strukturę oraz krystaliczność po podgrzaniu w wodzie, natomiast struktura ziaren skrobi jest utrzymywana poprzez żelatynizację techniką HPP. Co więcej, po obróbce wysokociśnieniowej żele skrobiowe wykazują lepszą stabilność po przechowywaniu w porównaniu z żelami poddanymi obróbce termicznej. Skrobia traktowana HPP posiadała również lepsze właściwości stabilizacji emulsji i wyższą strawność (Balakrishna i in., 2020; Sim i Moraru, 2020; Larrea-Wachtendorff i in., 2022). W zaskakujący sposób zastosowanie HPP w zakresie od 200 do 300 MPa (w temperaturze otoczenia przez 10 minut), poprawiło cechy jakościowe i wydłużyło okres przydatności do spożycia, przy akceptowalnym wpływie na funkcjonalność (żywość mikroorganizmów probiotycznych *Bifidobacterium bifidum* i *Lactobacillus casei*) jogurtu (Tsevdou i in., 2020).

Przetwórcy żywności powinni jednak przeprowadzić odpowiednie badania walidacyjne. Obróbka wysokociśnieniowa modyfikuje morfologię komórkową mikroorganizmów i uszkadza błony komórkowe, rybosomy i enzymy, w tym te biorące udział w replikacji

i transkrypcji DNA. Jednak niewystarczająca intensywność obróbki ciśnieniowej może zredukować jedynie część populacji drobnoustrojów. Uszkodzone bakterie w żywności przetworzonej HPP mogą następnie zregenerować się podczas przechowywania. Ogólnie rzecz biorąc, bakterie Gram-dodatnie są bardziej odporne na wysokie ciśnienie niż bakterie Gram-ujemne, co można przypisać ich grubszym ścianom komórkowym. Co więcej, obróbka HPP działa odmiennie dla różnych mikroorganizmów, na przykład komórki wegetatywne patogenu są rozrywane pod ciśnieniem 300 MPa w temperaturze pokojowej; formy przetrwalnikowe przy 600 MPa w temperaturze 60-70°C, a niektóre enzymy inaktywowane pod ciśnieniem 300 MPa. Należy jednak pamiętać, że redukcja mikroorganizmów w żywności o wilgotności poniżej 40% jest niewielka. Ze względu na to, produkty poddane tego typu przetwarzaniu powinny być dystrybuowane w warunkach chłodniczych (Wang i in., 2013; Huang i in., 2014; da Silva, 2017; Huang i in., 2017; Sehwat i in., 2021; EFSA, 2022).

Jak każda inna metoda przetwarzania, HPP nie może być uniwersalnie stosowana do wszystkich rodzajów żywności. Pokarmy zawierające pęcherze powietrzne, takie jak pieczywo, ciasta, musy, pianki typu marshmallow, mogą odkształcać się pod wpływem ciśnienia. Ponadto, żywność o niskiej wilgotności, taka jak przyprawy, proszki i suszone owoce również nie nadają się do tego typu utrwalania, ponieważ śmiertelność drobnoustrojów pod ciśnieniem zmniejsza się w warunkach niskiej aktywności wody (Nath i in., 2021; Wason i in., 2021; www.hiperbaric.com).

Podczas obróbki ciśnieniowej objętość żywności i opakowań może zostać zmniejszona o około 15%, jednak po rozhermetyzowaniu powróci do swojej pierwotnej postaci. Stąd też, opakowanie musi być wystarczająco elastyczne, aby wytrzymać przejściowe zmniejszenie objętości pod ciśnieniem, a jednocześnie charakteryzować się wysoką barierowością w stosunku do przenikania wilgoci i tlenu. Produkty HPP są zazwyczaj pakowane próżniowo przy użyciu elastycznych torebek lub pojemników wykonanych z politereftalanu etylenu (PET), polietylen (PE), polipropylen (PP) i kopolimeru etylenu i alkoholu winylowego (EVOH). Do tego typu przetwarzania nie można stosować butelek szklanych lub puszek blaszanych, ze względu na brak możliwości przekazania ciśnienia na produkt spożywczy (Bull i in., 2010; Júnior i in., 2019; Serment-Moreno i Tonello-Samson, 2020).

Inne ograniczenia obejmują konieczność inwestycji w specjalistyczne urządzenia i dostęp do odpowiedniej infrastruktury. Urządzenia HPP są dość kosztowne i wymagają odpowiedniego zaplecza technicznego. Rozwiązaniem dla producentów, którzy nie chcą ponosić kosztów zakupu własnego urządzenia HPP jest korzystanie z usług paskalizacji.

W porównaniu z tradycyjną technologią obróbki cieplnej, HPP przeprowadza się zazwyczaj w temperaturze pokojowej, co zmniejsza zużycie energii związanej z ogrzewaniem i późniejszym chłodzeniem. Dodatkowo żywność występuje w formie opakowanej i nie ma bezpośredniego kontaktu z urządzeniami przetwarzającymi, co zapobiega wtórnemu zanieczyszczeniu żywności po utrwaleniu. Dzięki zaletom niskiego zużycia energii i niskiego ryzyka powtórnej kontaminacji technologia HPP jest przyjazną dla środowiska (Muntean i in., 2016; Jung i Tonello-Samson, 2018; Cacace i in., 2020).

Najwcześniejszym produktem komercyjnym był szeroko dostępny w Japonii dżem poddany obróbce wysokociśnieniowej. Następnie w Europie i Ameryce Północnej wprowadzono na rynek różne produkty spożywcze HPP. W Czechach dużym zainteresowaniem konsumentów cieszą się soki owocowo-warzywne pod nazwą REFIT (brokułowy z jabłkiem,

marchwiowy, z czarnej rzepy, kapuściany z jabłkiem) utrwalane metodą HPP. Na polski rynek technologia HPP została wprowadzona pioniersko przez firmę Victoria Cymes. Tłoczone na zimno soki, utrwalone tym sposobem i przechowywane w warunkach chłodniczych są zdatne do spożycia nawet do 2 miesięcy. Wysokie ciśnienie działa więc niszcząco na niepożądane mikroorganizmy, jednocześnie zachowując wiele cennych właściwości odżywczych czy smakowych użytych warzyw i owoców. Napoje dostępne są obecnie w sześciu smakach pod nazwami: SUCKES (jabłko, ananas, truskawka i limonka), SZCZĘŚCIE (jabłko, mango, marchew), PASJA (jabłko, ogórek, seler naciowy, nać pietruszki), RADOŚĆ (jabłko, gruszka, wiśnia), ORZEŻWIENIE (jabłko, gruszka, szpinak i mięta), HARMONIA (jabłko, gruszka, borówka) (Chotyakul i Rungpichayapichet, 2018; www.stavyrefit.cz; www.cymes.pl).

W ostatnich latach coraz większa liczba producentów maszyn na całym świecie angażuje się w badania, rozwój i produkcję sprzętu HPP, co prowadzi do poprawy wydajności produkcji oraz długoterminowej, stabilnej pracy produkcyjnej. Avure Technologies Inc. (USA) i Hiperbaric Espana (Hiszpania), które zdobyły większość udziału w rynku, opracowały urządzenia HPP o pojemności 525 l i rocznej zdolności produkcyjnej około 60 mln ton. Inni znani producenci sprzętu HPP to Quintus Technologies i ThyssenKrupp (Stratakos i in., 2019; Tonello-Samson i in., 2020; Yamamoto, 2021; www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com).

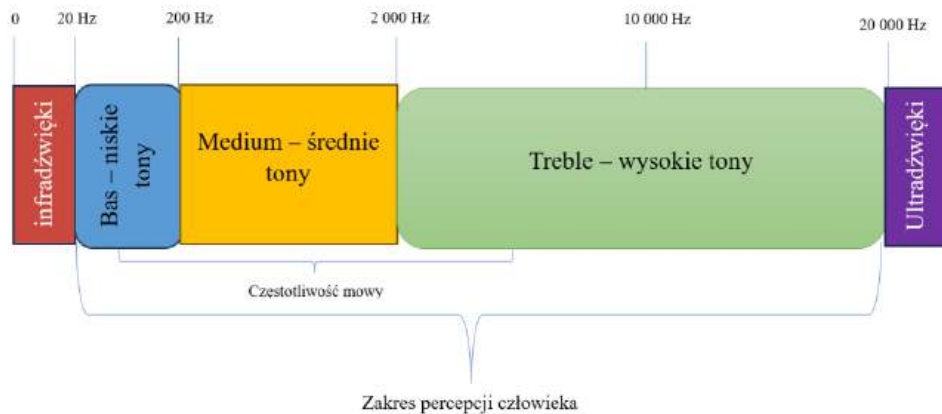
Podsumowując, wydłużenie trwałości produktów poddanych działaniu HPP zależy od parametrów procesu (ciśnienia, temperatury i czasu przetwarzania) oraz własności wyrobów (kwasowości, aktywności wody i składu chemicznego). Ze względu na to, iż HPP nie rozrywa wiązań kowalencyjnych w żywności, ma ograniczony wpływ, w porównaniu z procesami termicznymi, na związki o niskiej masie cząsteczkowej, takie jak związki smakowe, witaminy i barwniki. W rezultacie jakość żywności poddanej działaniu wysokiego ciśnienia jest podobna do świeżych produktów spożywczych, a na pogorszenie jej właściwości sensorycznych, jak i odżywczych większy wpływ ma przechowywanie i dystrybucja po przetworzeniu. Należy również wziąć pod uwagę wybór materiałów opakowaniowych. Co ważne, obróbka ciśnieniowa może wyeliminować lub zmniejszyć potrzebę stosowania syntetycznych dodatków w składzie produktu. Pomaga to przetwórcom żywności zaspokoić zapotrzebowanie konsumentów na produkty o czystej etykietce.

6.4. Ultradźwięki - sonikacja

Nauka o dźwięku jest stale rozwijającą się i obszerną dziedziną wiedzy. Zostało udokumentowane, że już w VI wieku p.n.e., grecki filozof i matematyk Pitagoras opracował matematyczne właściwości instrumentów strunowych. Fale dźwiękowe badano z wielu różnych powodów przez setki lat, ale rozwój ultradźwięków rozpoczął się w 1790 roku wraz z odkryciem echolokacji wykorzystywanej przez nietoperze. Biolog Lazzaro Spallanzani zauważył, że nawet jeśli nietoperz był oślepiony, nadal mógł pewnie latać w przestrzeni, jednakże gdy ogłuchł nawet na jedno ucho, w środowisku eksperymentalnym nie potrafił się bezpiecznie poruszać. Na podstawie tych ustaleń naukowiec postawił hipotezę, że nietoperze podczas nawigacji opierają się na dźwięku, a nie na wzroku. Najbardziej znaczący przełom nastąpił w 1880 roku, kiedy fizyk Pierre Curie i jego brat Jacques Curie

pogłębili swoją wiedzę na temat piroelektryczności, czyli potencjału elektrycznego generowanego przez materiał w odpowiedzi na zmianę temperatury. Zbadali także właściwości struktury kryształu, aby zademonstrować efekt piezoelektryczny, który był nauką podstawą pierwszego przetwornika. Urządzenie to generowało dźwięk o wysokiej częstotliwości, a następnie odbierało jego echo. W 1938 roku Donald Griffin i Robert Galambos ukończyli Harvard University i rozpoczęli badania nad metodą nawigacji nietoperzy, którą następnie nazwali echolokacją w 1944 roku. Podczas pierwszej wojny światowej technologia ultradźwiękowa była przedmiotem szczególnego zainteresowania wojska. Urządzenie sonarowe było pierwszym praktycznym zastosowaniem technologii ultradźwiękowej i piezoelektrycznej, opracowanej do wykrywania zanurzonych łodzi podwodnych.

Potencjał tej gałęzi fizyki i inżynierii obecnie znajduje zastosowanie w wielu różnych dziedzinach. Fale dźwiękowe, czy to słyszalne, czy o tak wysokiej częstotliwości, że nie są słyszalne przez ludzkie ucho (rys. 17), od lat są przedmiotem ciągłych badań naukowców, inżynierów, lekarzy i indywidualnych przedsiębiorców (Kaproth-Joslin i in., 2015; Ranjha i in., 2021).

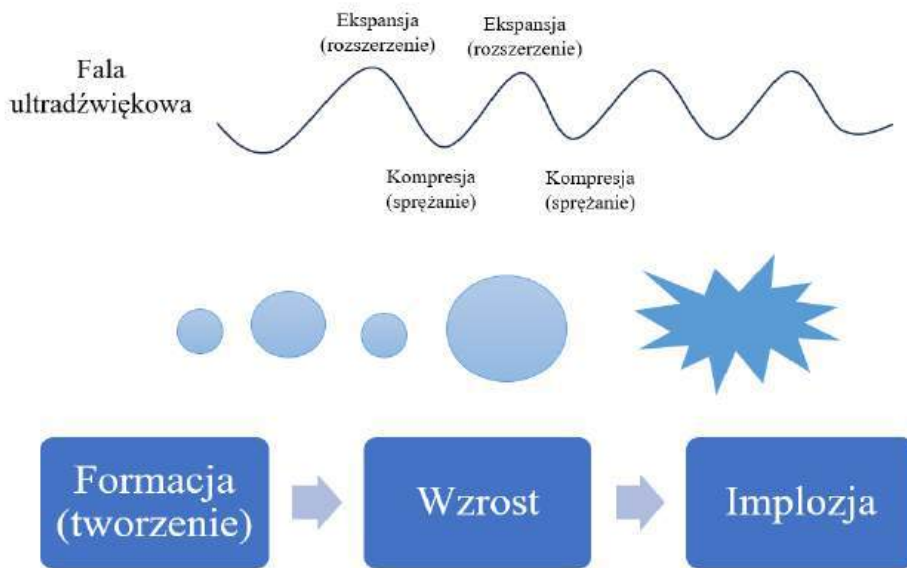


Rys. 17. Rodzaje dźwięków wyróżnione ze względu na ich częstotliwość

Typowe urządzenie ultradźwiękowe składa się z trzech głównych elementów: generatora, przetwornika i emitera. Generator przekształca sygnał elektryczny na określoną częstotliwość; przetwornik zmienia ten sygnał elektryczny o wysokiej częstotliwości w drgania mechaniczne, natomiast emiter generuje i wypromieniowuje drgania mechaniczne (Dolatowski i Stasiak, 2003; Mehta i in., 2022).

Funkcjonalność aparatu ultradźwiękowego opiera się na wytwarzaniu i uwalnianiu fal ultradźwiękowych o dużym natężeniu, przekraczającym częstotliwość 16 kHz. Operacje można prowadzić przy małej mocy ($<1 \text{ W/cm}^2$), skorelowanej z wysoką częstotliwością (100 kHz lub wyższą), jak również przy dużej mocy ($>1 \text{ W/cm}^2$), obejmującej niskie częstotliwości 20-100 kHz (Huang i in., 2020; Chavan i in., 2022). Tego typu parametry pozwalają w głównej mierze na dezaktywację mikroorganizmów (Pinela i in., 2019; Onyeaka i in., 2023). Generalnie skuteczność dekontaminacji wiąże się z procesem kawitacji, obejmującym powstawanie, powiększanie i zapadanie się pęcherzyków (Koshani i Jafari, 2019).

Emitowane fale ultradźwiękowe indukują naprzemienne strefy kompresji i rozszerzania. W cyklu sprężania cząstki są odpychane od siebie pod wpływem dodatniego ciśnienia wywieranego w środku (rys. 18).



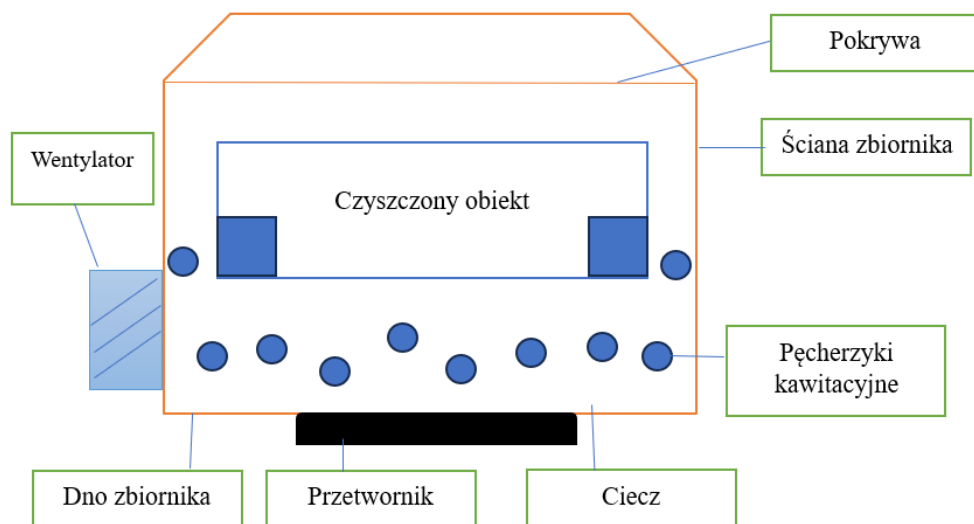
Rys. 18. Przebieg procesu kawitacji (www.kierunekpompy.pl)

Dodatkowo generowane są wolne rodniki, takie jak H^+ i OH^- , które dyfundują do pęcherzyków, uwalniając się po zapadnięciu (Dai i in., 2020). Podczas wytwarzania ultradźwięków, pojawiają się naprężenia mechaniczne, a także następuje dyssypacja energii wraz z całą gamą zjawisk pochodnych, a w szczególnych przypadkach, tak zwany rezonans komórkowy (Vernes i in., 2019; Córdova i in., 2020).

Na rysunku 19 przedstawiono schemat budowy myjki ultradźwiękowej, która służy głównie do skutecznego oczyszczania i utrzymania higieny podczas procesów przetwarzania produktów spożywczych.

Składa się ona z kilku kluczowych elementów, czyli zbiornika, przyjmującego postać wanny i pełniącego rolę komory roboczej, w którym odbywa się proces sonikacji. Kolejno generatora, przekształcającego standardowy prąd elektryczny na prąd o ultradźwiękowej częstotliwości, dostarczany do przetwornika. Ta część myjki ultradźwiękowej odpowiada za przetwarzanie energii elektrycznej w fale ultradźwiękowe. Przetwornik generuje fale o wysokiej częstotliwości, które tworzą obszary wysokiego i niskiego ciśnienia w cieczy, co inicjuje proces sonikacji. Podgrzewacz, umożliwi utrzymywanie roztworu w odpowiednio wysokiej temperaturze. Timer tradycyjnie pozwala na ustawienie czasu trwania cyklu czyszczenia, zaś zawór spustowy ułatwia opróżnianie zużytego płynu po zakończeniu cyklu mycia. Pokrywy, stosowane w zależności od potrzeb procesów, zapobiegają parowaniu roztworu czyszczącego oraz zmniejszaniu hałasu generowanego przez fale ultradźwiękowe. Inna część, czyli wentylator zapobiega przegrzewaniu się urządzenia podczas

długotrwałych cykli pracy. Dzięki panelowi sterowania użytkownik może dostosowywać różne ustawienia, takie jak czas trwania cyklu, temperaturę obróbki itp. (He i in., 2021; Starek i in., 2021; Yusoff i in., 2022; Kobus i in., 2023).

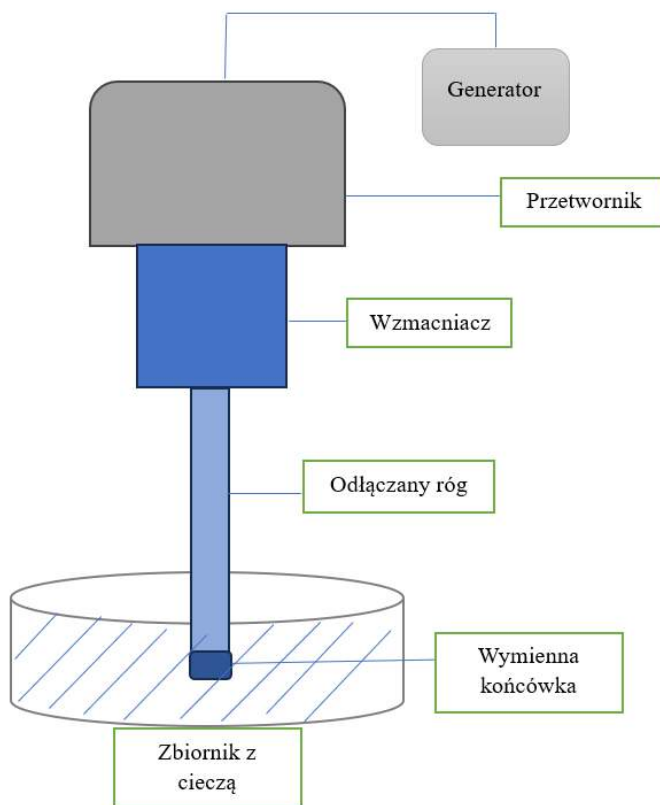


Rys. 19. Schemat myjki ultradźwiękowej

Sonda ultradźwiękowa to wyspecjalizowane urządzenie używane do przykładania wibracji ultradźwiękowych bezpośrednio do próbek (rys. 20) (Shen i in., 2019). Składa się ona z różnych elementów, w tym generatora, wytwarzającego sygnały elektryczne o określonej częstotliwości, które są następnie przekazywane do przetwornika ultradźwiękowego. Ta część z kolei przekształca energię elektryczną w wibracje mechaniczne o stałej częstotliwości, zwykle 20 kHz. Natomiast sonda przekazuje energię ultradźwiękową do próbki, a booster służy do zwiększenia intensywności wibracji ultradźwiękowych (Bhatta i in., 2018; Kobus i in., 2023).

Poza konstrukcją urządzeń ultradźwiękowych, na skuteczność działania tego typu przetwarzania wpływ ma stopień odporności drobnoustrojów na zadane parametry obróbki. Zarodniki trudniej wyeliminować w porównaniu do form wegetatywnych, znów bakterie Gram-dodatnie wykazują większą odporność na działanie ultradźwięków niż bakterie Gram-ujemne (Alarcon-Rojo i in., 2019; Nunes i in., 2022). Wiąże się to z grubością i strukturą ich ścian komórkowych. Dodatkowo obecność mostków międzypeptydowych lub krzyżowych wiązań bezpośrednich w peptydoglikanie ścian komórkowych bakterii warunkuje stopień ich usieciowania. W przypadku bakterii Gram-dodatnich wynosi on blisko 100%, zaś gorzej usieciowana jest ściana bakterii Gram-ujemnych (20-30%). Z kolei chemiczne związki wielkocząsteczkowe w polu ultradźwiękowym mogą ulegać przyśpieszonej degradacji i depolimeryzacji. Ultradźwięki mogą katalizować lub wywoływać reakcje, w których wyniku powstają nowe, złożone związki chemiczne. Zatem na całokształt zjawisk i efektów wynikających z oddziaływania fal ultradźwiękowych wpływać będą

parametry pola ultradźwiękowego (między innymi częstotliwość fal ultradźwiękowych, natężenie) oraz początkowe cechy fizykochemiczne materiałów (struktura i skład).



Rys. 20. Schemat sondy ultradźwiękowej

Istnieje wiele doniesień naukowych, które informują o pozytywnym wpływie tej nietermicznej metody obróbki na różne produkty spożywcze. Na przykład, Ruiz-De Anda i in. (2019), analizowali wpływ mocy ultradźwięków na właściwości fizykochemiczne i mikrobiologiczne mieszanki świeżego soku pomarańczowego i selera. Próbkę napojów zostały poddane sonikacji w kąpeli ultradźwiękowej (20 kHz, $5,57 \pm 0,87$ kW/m³, $20 \pm 5^\circ\text{C}$) przez różne okresy czasu: 0, 15, 30, 45, 60, 75 i 90 minut. W ten sposób obrobione wyroby przechowywano w zaciemnionym miejscu przez 24 godziny w temperaturze 4°C . Uzyskane wyniki wskazują, że obróbka ultradźwiękowa miała istotny wpływ na jakość soków już po najkrótszym czasie sonikacji (15 minut). Najlepsze wyniki osiągnięto jednak po 45 minutach działania ultradźwięków, gdzie zaobserwowano 13% wzrost zawartości polifenoli ogółem, dwukrotny wzrost zawartości flawonoidów oraz 17% wzrost aktywności antyoksydacyjnej. Zastosowana technika nie wpłynęła na wartości pH, kwasowości miareczkowej i rozpuszczalnych substancji stałych. Początkowa ilość tlenowych bakterii mezofilnych

w soku kontrolnym wynosiła $4,47 \pm 0,02$ jtk/ml, natomiast drożdży i pleśni $2,53 \pm 0,05$ jtk/ml. W końcowym czasie obróbki (90 minut) nastąpiło zmniejszenie rozpatrywanych mikroorganizmów, osiągając procent inaktywacji wynoszący odpowiednio 8% i 13%.

Badano również (Hasheminya i Dehghannya, 2022) wpływ procesu ultradźwiękowego (0, 4, 8 i 12 minut, 24 kHz) na cechy jakościowe świeżo tłoczonego soku z czarnej marchwi podczas przechowywania przez 15 dni w temperaturze otoczenia. Ustalono, iż zastosowana obróbka pozwoliła na zwiększenie ogólnej zawartości polifenoli, kwasu askorbinowego i właściwości przeciwutleniających. Obrazy ze skaningowego mikroskopu elektronowego wykazały bardziej nieregularną strukturę komórek ze zwiększoną liczbą dziur i mikroskopijnych kanałów w sokach poddanych obróbce ultradźwiękowej, co mogło przyczynić się do zwiększenia transferu tych dobroczynnych związków do homogenatu napoju. W przypadku pH, całkowitej zawartości rozpuszczalnych substancji stałych ($^{\circ}$ Brix), lepkości i zmętnienia próbek poddanych działaniu ultradźwięków nie zauważono znaczących zmian. Ogólna liczba drobnoustrojów, w tym drożdży i pleśni pod wpływem sonikacji wykazała znaczny spadek. Co ważne, podczas przechowywania efekt dekontaminacyjny został utrzymany, dzięki kawitacji, prowadzącej do wzrostu przepuszczalności i osłabienia błony komórkowej mikroorganizmów (Chitgar i in., 2017). Siły ścinające powstałe w wyniku ruchu pęcherzyków lub lokalne zmiany temperatury i nagły wzrost ciśnienia w wyniku marszczenia się pęcherzyków mogły być główną przyczyną przerwania komórek. Co więcej, wolne rodniki powstałe w wyniku sonolizy cząsteczek wody obecnych w sokach są współodpowiedzialne za powodowanie uszkodzeń oksydacyjnych, rozbijanie ścian komórkowych drobnoustrojów i hamowanie wzrostu drobnoustrojów poprzez inaktywację aktywności enzymatycznej mitochondriów (Kobus i in., 2023).

Kalsi i in. (2023) określili natomiast wpływ sonikacji na jakość soku z guawy poddane obróbce przy stałej częstotliwości 40 kHz i mocy ultradźwięków wynoszącej 200 W dla różnych czasów przetwarzania (2, 6 i 10 minut) w łaźni ultradźwiękowej. Po obróbce wartości pH i kwasowości miareczkowej różniły się nieistotnie, natomiast 6-minutowa sonikacja skutkowała znacznym spadkiem całkowitych rozpuszczalnych substancji stałych. Wartość zmętnienia, parametry barwy (a^* i b^*), wzrosły po tym czasie, natomiast brązowienie nieenzymatyczne uległo znacznemu zmniejszeniu. Ponadto obróbka ultradźwiękowa znacząco zwiększyła ilość kwasu askorbinowego (2,45%-4,70%) i ogólną zawartość polifenoli (3,50-4,35%), niezależnie od czasu przetwarzania. Zastosowana metoda utrwalania miała również znaczący wpływ na inaktywację ogólnej liczby drobnoustrojów oraz drożdży i pleśni, wynoszącą odpowiednio 38,18% i 33,20% po 10 minutach traktowania. Test sensoryczny wykazał, że sonikowane próbki soku z guawy charakteryzowały się dobrą akceptacją, podobnie jak świeży sok.

Zespół Margean'a (2020) analizował wpływ pasteryzacji (80°C, 2 minuty) i obróbki ultradźwiękowej dużej mocy (o amplitudzie 50% i 70% przez 5 i 10 minut) na jakość soku z czerwonych winogron. Badania obejmowały oznaczenia fizykochemiczne, ze szczególnym uwzględnieniem zawartości związków polifenolowych czy kwasu L-askorbinowego. Ponadto, autorzy zweryfikowali próbki pod względem mikrobiologicznym. Wyniki analiz wykazały, że napoje poddane pasteryzacji i sonikacji przez 10 minut z amplitudą 70% miały podobny poziom ogólnej zawartości polifenoli. Natomiast sonikowany sok wyróżniał się wyższą zawartością kwasu L-askorbinowego w porównaniu z sokiem utrwalonym termicznie. Podobne wyniki uzyskano w przypadku pH, całkowitej zawartości rozpuszczalnych

substancji stałych oraz kwasowości miareczkowej. Przeprowadzone analizy wskazały również, że sonikacja wpływała na inaktywację mikroorganizmów, co może stanowić alternatywną metodę zastępując tradycyjną pasteryzację w przemyśle sokowniczym. Ponadto, udowodniono, że w porównaniu z pasteryzacją, zabiegi ultradźwiękowe o amplitudzie 70% były bardziej efektywne niż te z amplitudą 50% pod względem inaktywacji rozpatrywanych drobnoustrojów. Generalnie autorzy pracy ustalili, że dla osiągnięcia wyższego poziomu flawonoidów, takich jak rutyna, kwercetyna, epikatechina, kempferol i resweratrol, zalecana jest obróbka z amplitudą 70% przez 5 minut. Natomiast proces ultradźwiękowy prowadzony przy amplitudzie 70% przez 10 min okazał się najskuteczniejszy w redukcji mikroorganizmów oraz osiągnięciu najwyższej zawartości kwasu L-askorbinowego i polifenoli ogółem, w tym kwasów hydroksycynamonowych (ferulowego i kawowego).

Sonikacji przy mocy 100 W i 140 W (przez 5, 10 i 15 minut) oraz obróbce cieplnej w temperaturach 70°C, 80°C i 90°C (przez 1 minutę) poddano również sok ananasowy. Wyniki wykazały niewielkie zmiany we właściwościach fizykochemicznych po sonikacji i obróbce termicznej, jednak obróbka z wykorzystaniem ultradźwięków pozwoliła lepiej zachować barwę napoju, w tym ograniczyć stopień zbrązowienia (browning index-BI). Co więcej, sonikacja znacząco zwiększyła zawartość związków bioaktywnych (całkowitą zawartość karotenoidów, polifenoli oraz kwasu askorbinowego) oraz aktywność przeciwutleniającą soku ananasowego w porównaniu z sokiem poddanym obróbce cieplnej. Chociaż wraz ze wzrostem czasu ekspozycji zmiany mikrobiologiczne zostały znacznie ograniczone, nie uzyskano całkowitej inaktywacji mikroorganizmów, tak jak podczas pasteryzacji (Hoque i in., 2024).

Choo i in. (2022) wskazują natomiast, że niezależnie od metody przetwarzania soku z owoców noni, czyli działaniu ultradźwięków przez 60 minut w stałej temperaturze 30°C i częstotliwości 37 kHz czy pasteryzacji w temperaturze 90°C przez 60 sekund poziom drobnoustrojów może mieścić się w zadowalającym zakresie. Przez 8 tygodni przechowywania w lodówce (4°C) nie wykryto drożdży i pleśni, podczas gdy całkowita liczba tlenowych bakterii mezofilnych utrzymywała się na poziomie poniżej 10^4 jtk/ml, co wskazuje, że sok nadawał się do spożycia. Jednak co ważne, w porównaniu ze świeżą próbką (kontrolną, niepoddaną obróbce), ilość kwasu jabłkowego i askorbinowego uległa zwiększeniu w próbce sonikowanej, ale została obniżona w próbce pasteryzowanej.

Zadawalające rezultaty badań uzyskali również Khandpur i Gogate (2016), kiedy oceniali skuteczność działania ultradźwięków w przetwarzaniu soków z pomarańczy, słodkiej limonki oraz marchwi i szpinaku, pod kątem wzrostu mikroorganizmów i zmian parametrów jakościowych podczas przechowywania. Jako optymalne parametry procesu przyjęli pracę ze stałą częstotliwością wynoszącą 20 kHz przez 15 minut w temperaturze poniżej 30°C.

Bhat i in. (2011) świeżo wyciśnięty sok z owoców limonki kasturi poddali obróbce ultradźwiękowej przez 0, 30 i 60 minut w temperaturze 20°C i częstotliwości wynoszącej 25 kHz w celu oceny mikrobiologicznej produktu poprzez analizę ogólnej liczby drobnoustrojów oraz drożdży i pleśni. Po 60 minutach przetwarzania uzyskali znaczącą redukcję większości drobnoustrojów w porównaniu z próbkami traktowanymi przez 30 minut i próbkami kontrolnymi (nietraktowanymi) wraz z osiągnięciem standardów bezpieczeństwa i jakości produktu finalnego-do 5 log redukcji, co jest obowiązkowym poziomem ustalonym przez FDA dla soków owocowych i warzywnych.

Sonikacyjna jest techniką przetwarzania, która charakteryzuje się zdolnością do dezaktywacji mikroorganizmów w płynnych produktach, unikając jednocześnie powszechnych skutków ubocznych związanych z tradycyjną obróbką cieplną. Potwierdzeniem tego są badania Monteiro i in. (2018), którzy przeprowadzili obróbkę ultradźwiękową o wysokiej intensywności ($0,3-3,0 \text{ kJ/cm}^3$) jako alternatywę dla tradycyjnej, krótkotrwałej pasteryzacji w wysokiej temperaturze (HTST; 72°C ; 15s) dla czekoladowego napoju mlecznego. Stosując ultradźwięki przy gęstości energii $3,0 \text{ kJ/cm}^3$, uzyskano redukcję całkowitej liczby tlenowych bakterii mezofilnych o 3,56 log. Dodatkowo, zastosowany proces ultradźwiękowy wpływał na cechy fizyczne napoju, takie jak rozkład wielkości kuleczek tłuszczu, reologię, a także na właściwości chemiczne, w tym aktywność przeciwtleniającą czy profil kwasów tłuszczowych. Stosowanie sonikacji tego typu jako nietermicznej metody utrwalaenia napoju, okazało się skuteczniejsze niż konwencjonalna pasteryzacja HTST. Poprawiła się jakość mikrobiologiczną, a także zachowały się związki bioaktywne i wartość odżywcza wyrobu.

Ze względu na to, że mięso należy do szybko psujących się produktów, coraz chętniej podlega utrwaleniu poprzez sonikację. Piñon i in. (2019) próbki mięsa kurczaka poddali różnym zabiegom ultradźwiękowym (20 kHz i $27,6 \text{ W/cm}^2$; 40 kHz i $10,3 \text{ W/cm}^2$; 850 kHz i $24,1 \text{ W/cm}^2$). Analizę liczby drobnoustrojów przeprowadzono przed zastosowaniem obróbki ultradźwiękowej, bezpośrednio po niej oraz po siedmiu dniach przechowywania w temperaturze 4°C . Wyniki wskazują, że ultradźwięki o wysokiej intensywności pomagają hamować rozwój bakterii kwasu mlekowego oraz bakterii mezofilnych i psychrofilnych obecnych w mięsie kurcząt przy poziomach częstotliwości ultradźwięków zastosowanych w tym badaniu. Podczas użycia sondy ultradźwiękowej o częstotliwości 20 kHz i mocy $27,6 \text{ W/cm}^2$ liczba bakterii mezofilnych uległa większej redukcji, w porównaniu do zabiegu z większą częstotliwością i mniejszą intensywnością. Dlatego tego typu zabiegi mogą być przydatne w utrwalaeniu produktów mięsnych i tym samym odgrywać ważną rolę w przemyśle spożywczym.

W ostatnim czasie nastąpił postęp techniki ultradźwiękowej w zakresie zależności pomiędzy modyfikacją struktury, a właściwościami funkcjonalnymi białek spożywczych. Wyniki badań wykazały (Gómez-Salazar i in., 2021; Chen i in., 2022), że proces sonikacji znacząco wpływa na konformację i strukturę białek poprzez efekt kawitacji, powodując poprawę rozpuszczalności, lepkości, żelowania itp. Podczas przetwarzania mięsa tym sposobem można modyfikować strukturę, a tym samym poprawiać właściwości funkcjonalne białka miofibrylarnego, prowadząc do poprawy jakości, rozwoju produktów o niskiej zawartości tłuszczu i/lub soli oraz wydłużenia okresu przydatności do spożycia. Zou i in. (2018) udowodnili, że rozpuszczalność i hydrofobowość powierzchniową aktomiozyny z kurczaka można znacznie poprawić poprzez obróbkę ultradźwiękową w zakresie $1,15-2,36 \text{ W/cm}^2$, podczas gdy polimery białkowe mogą tworzyć się przy intensywności wynoszącej $11,43 \text{ W/cm}^2$, prowadząc do zmniejszenia rozpuszczalności białka i hydrofobowości powierzchni. Dlatego sugeruje się, że grupy hydrofobowe wbudowane w białko można „odsłonić” poprzez umiarkowaną sonikację poprawiając hydrofobowość białka i interakcję białko-woda (Deng i in., 2021). Warto zauważyć, że nadmierna obróbka może powodować denaturację i agregację białek i skutkować utratą ich rozpuszczalności (Kang i in., 2021).

Fale ultradźwiękowe stosowane w badaniach ryb to zazwyczaj fale o wysokiej energii i niskiej częstotliwości w zakresie 20-100 kHz. Mikš-Krajnik i in. (2017), badali przeciw-

drobnoustrojowe działanie ultradźwięków w stosunku do filetów z łososia. Wyniki wykazały różne skutki dla każdego mikroorganizmu; *Listeia monocytogenes* i bakterie z grupy coli uległy zmniejszeniu odpowiednio o 0,4 i 0,3 log jtk/g, podczas gdy nie zaobserwowano znaczącego zmniejszenia całkowitej liczby bakterii oraz drożdży i pleśni. Jako przyczynę tych różnic spekulowano obecność nierówności na powierzchni filetu rybnego. W zakresie wskaźników jakościowych zaobserwowano podwyższoną wilgotność i nieznaczną zmianę barwy.

Co więcej, w przemyśle rybnym sugeruje się stosowanie ultradźwięków do odkażania noży używanych podczas operacji cięcia. Można to postrzegać jako kompleksowe podejście do poprawy jakości produktów rybnych (Brasil i in., 2017).

Połączenie ultradźwięków z innymi metodami przetwarzania zwiększa ich skuteczność działania, przy czym preferowane kombinacje obejmują termosonikację (Sotelo-Lara i in., 2023), a także zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego i ultradźwięków (Ostermeier i in., 2021) czy ozonowania i sonikacji (González-Balderas i in., 2020).

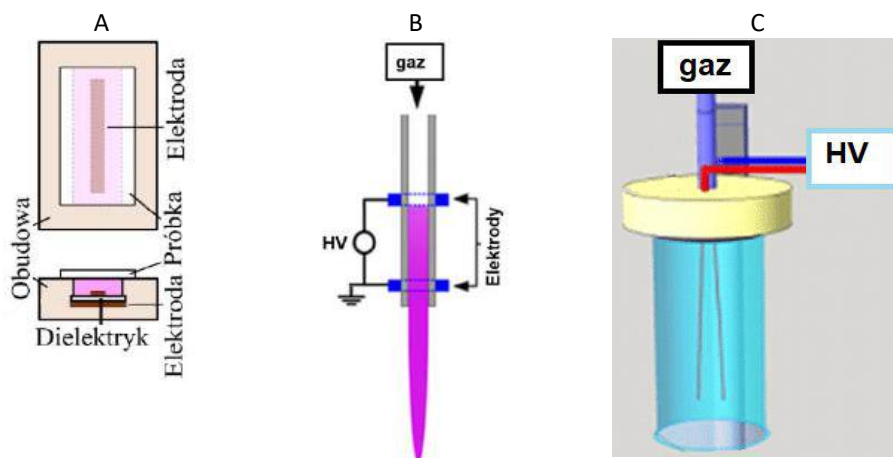
Biorąc pod uwagę znaczny potencjał technologii ultradźwiękowej, wydaje się, że jest ona obiecująca w zakresie zachowania jakości produktów rolno-spożywczych. Zalety tego podejścia wiążą się ze skróceniem czasu przetwarzania, skuteczną inaktywacją enzymów i mikroorganizmów oraz stabilnością składników bioaktywnych podczas przechowywania. Tego typu obróbka może skrócić czas przetwarzania, w porównaniu do tradycyjnych technologii. Sonikację charakteryzują niskie koszty operacyjne ze względu na niewielkie zużycie energii, dlatego też uznawana jest za zieloną technologię (More, i in., 2022; Nonglait i in., 2022).

6.5. Plazma nietermiczna

Plazma to zjonizowany gaz, w którym występują swobodne nośniki ładunków elektrycznych: jony dodatnie i elektrony (przy czym ładunek wypadkowy jest równy zeru) oraz szereg innych potencjalnie użytecznych w obróbce materiałowej czynników, takich jak aktywne formy tlenu i azotu, promieniowanie w różnym zakresie spektrum zaś przepływ gazu może powodować naprężenia materiału.

Plazma do celów przemysłowych generowana jest w reaktorach plazmowych zwanych plazmotronami, o różnej konstrukcji, zazwyczaj pracujących pod ciśnieniem atmosferycznym lub obniżonym. Wyładowania elektryczne (na przykład iskrowe, barierowe, koronowe, ślizgowe) mogą być wytwarzane przez zmienne, impulsowe i stacjonarne pola elektryczne. Stosuje się też inne układy zasilania, wykorzystujące m.in. mikrofałę, częstotliwości radiowe i sprzężenia indukcyjne bądź pojemnościowe układu (Brandenburg i in., 2018).

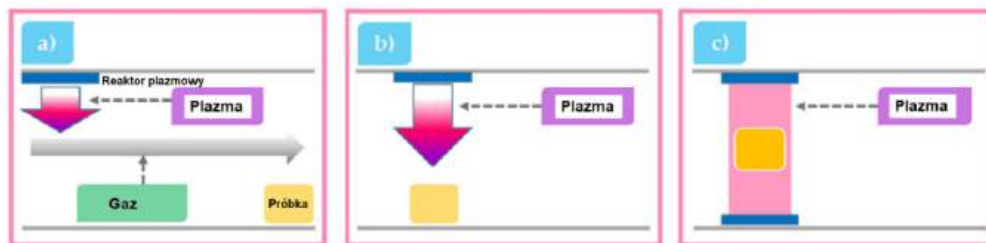
Przykłady reaktorów plazmowych (płaskiego, typu dysza plazmowa oraz typu glide arc) umieszczono na rysunku 21.



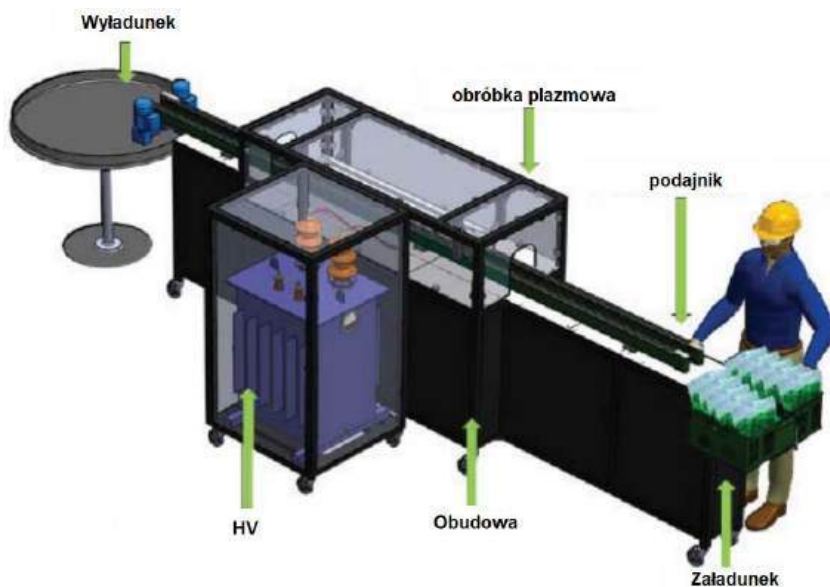
Rys. 21. Przykłady reaktorów plazmowych (A – reaktor płaski, B – dysza plazmowa, C – reaktor typu glide-arc)

W ciągu ostatniej dekady dokonano znacznych postępów umożliwiając generowanie plazmy nierównowagowej o niskiej temperaturze pozwalającej na obróbkę materiałów biologicznych, w tym żywności. W plazmotronach wykorzystuje się różne gazy substratowe, w tym również gazy szlachetne, takie jak argon i hel, jednak względy ekonomiczne przesądają o większym potencjale konstrukcji, które pozwalają na wykorzystanie powietrza atmosferycznego. Gazy plazmowane zawierające reaktywne pochodne tlenu lub azotu np.: O_2^- , 1O_2 , O_3 , $^{\bullet}OH$, NO^{\bullet} , i NO_2^{\bullet} wykazały swą skuteczność dekontaminacyjną, w tym zdolność do rozkładu zanieczyszczeń biologicznych (komórek i spor bakteryjnych, kapsydów wirusowych, prionów, drożdży, pleśni i biofilmów) oraz chemicznych (związki wielkocząsteczkowe np. leki, pestycydy, pigmenty, surfaktanty) (Pawłat, 2013). Wykorzystywane są do oczyszczania gazów odlotowych, wody, ścieków i gleby. Plazma może wpływać na powinowactwo powierzchni do wody, służy do aktywacji i obróbki powierzchni, na przykład w przemyśle półprzewodnikowym. W medycynie prowadzone są badania między innymi nad wykorzystaniem plazmy niskotemperaturowej w terapii trudno gojących się ran, chorób skóry, nowotworów; do stymulacji komórek, w produkcji materiałów biokompatybilnych oraz do dekontaminacji soczewek, implantów, ciała oraz pomieszczeń, narzędzi, a także sprzętu medycznego (Przekora i in., 2009; Przekora i in., 2020). W rolnictwie plazma znalazła zastosowanie między innymi do stymulacji kiełkowania nasion i wzrostu roślin, leczenia chorób roślin i zwierząt, kondycjonowania gleby oraz obróbki produktów rolnych (Pawłat i in., 2018a; 2018b; Kopacki i in., 2021).

Obróbka plazmowa, podczas której dochodzi do synergicznego oddziaływania wielu mechanizmów uważana jest za pro-ekologiczną technologię przyszłości, elastyczną i pozwalającą na jej samodzielne wykorzystanie lub w przypadku bardziej złożonych procesów wytwórczych - wkomponowanie jako etapu.



Rys. 22. Schematyczny przegląd powszechnie stosowanych systemów zimnej plazmy atmosferycznej rozważanych do zastosowania w przemyśle spożywczym: A – obróbka pośrednia (zdalna), gdzie próbka jest fizycznie oddzielona od punktu generowania plazmy; B – plazmowanie quasi-bezpośrednie, gdzie próbka jest umieszczona blisko elektrod generujących plazmę i omywa ją strumień gazu produktowego oraz C – plazmowanie bezpośrednie, gdzie próbka jest umieszczona między elektrodami generującymi plazmę (Hojnik i in., 2017)



Rys. 23. Prototypowe urządzenie SAFE BAG (Ziuzina i in., 2016)

Próbka może być poddana obróbce plazmowej w sposób bezpośredni, będąc umieszczoną w obszarze generowania plazmy pomiędzy elektrodami (rys. 22). Można poddać ją działaniu gazu plazmowanego umieszczając w bardzo bliskiej odległości od wylotu gazu dyszy plazmowej/obszaru generowania plazmy. Można też dokonać obróbki pośredniej poprzez użycie mediów poddanych wcześniej działaniu plazmy w fazie gazowej lub ciekłej (Pawlat, 2013; Hojnik i in., 2017). W ciekłym medium plazmowanym, np. wodzie destylowanej pod wpływem czynników generowanych w gazie, dyfundujących do cieczy

i podlegających w niej różnym przemianom chemicznym powstają w wyniku kaskady różnych reakcji chemicznych wtórne czynniki aktywne np. azotany, azotyny czy bardzo reaktywny nadtlenoazotyn (Brisset i Pawłat, 2016; Bruggeman i in., 2016). Ciecz plazmowa oprócz zastosowań w myciu, płukaniu czy namaczaniu można też rozpylić w formie kropel, aerozolu lub mgły.

W przemyśle rolno-spożywczym media plazmowane wykorzystywane są do pośredniej obróbki produktów, dekontaminacji warzyw, owoców, powierzchni, opakowań, sprzętu, narzędzi i linii podawczych.

Dasan i in. (2017) badali wpływ plazmy generowanej w mikroreaktorze ze ślizgającym się łukiem elektrycznym na dezynfekcję powierzchni ze stali nierdzewnej (SS), silikonu (Si) i poli(tereftalanu) etylenu (PET), sztucznie zanieczyszczonych bakteriami *Escherichia coli* ($8,15 \pm 0,28$ log jtk/ml) oraz *Staphylococcus epidermidis* ($6,18 \pm 0,21$ log jtk/ml). Gazami plazmotwórczym były mieszanka azotu (79%/21%) lub azot, czas obróbki wynosił od 1 do 10 minut. Znaczne redukcje ładunku mikroorganizmów: $3,76 \pm 0,28$, $3,19 \pm 0,31$ i $2,95 \pm 0,94$ log jtk/ml w przypadku *S. epidermidis* oraz $2,72 \pm 0,82$, $4,43 \pm 0,14$ i $3,18 \pm 0,96$ log jtk/ml dla *E. coli*, odpowiednio na powierzchniach SS, Si i PET, osiągnięto po 5 minutach plazmowania azotem, przy czym nie zaobserwowano degradacji materiału.

Toyokawa i in. (2017) opracowali plazmowy podajnik rolkowy w oparciu o wyładowanie barierowe. Obracające się, pokryte warstwą dielektryka rolki stanowiły elektrody wysokonapięciowe i uziemiające. Modelowym patogenem było *Xanthomonas campestris* naniesione na płyty aluminiowe i liście sałaty. Podajnik wykorzystano do inaktywacji *Penicillium venetum* i *Aspergillus brasiliensis* na powierzchni owoców cytrusowych (*Citrus unshiu* × *C. sinensis*, *C. natsudaikai*, *C. unshiu*), lub na kontrolnej płycie aluminiowej (Sakudo i Yagyu, 2021).

Podejmowano również próby dezynfekcji żywności bezpośrednio w zamkniętych szczelnie opakowaniach, co wpłynęło na wydłużenie czasu przechowywania produktu oraz zapobiegło ponownemu zanieczyszczeniu żywności (Katsigiannis i in., 2022).

Ziuzina i in. (2016) zbadali poziom dekontaminację pomidorów koktajlowych zapakowanych w folię PET wypełnioną powietrzem z kolonii *Escherichia coli* i *Listeria innocua* w prototypowym urządzeniu SAFE BAG (rys. 23) z wyładowaniem barierowym, pracującym w trybie ciągłym lub cyklicznie. Osiągnięto spadek liczby kolonii *E. coli* w czasie 150 s obróbki o ponad 5 log., zarówno w trybie statycznym, jak i ciągłym. *L. innocua* wykazywała większą odporność, osiągając maksymalny spadek o 3,5 log, przy czym nie zaobserwowano istotnej różnicy w barwie, twardości, pH ani całkowitej zawartości rozpuszczalnych substancji stałych (TSS) między próbkami kontrolnymi, a tymi poddanymi obróbce plazmowej. Wykazano również skuteczność w hamowaniu wzrostu aerobowych bakterii mezofilnych, drożdży i pleśni w przypadku obróbki krojonych gruszek plazmą generowaną wewnątrz opakowania (Zhang i in., 2021).

Zbadano dekontaminację plazmą pod ciśnieniem atmosferycznym obracającego się narzędzia tnącego używanego do krojenia w przemyśle mięsnym, zanieczyszczonego bakterią *Listeria innocua* (zamiast chorobotwórczej *Listeria monocytogenes*). Ostrze narzędzia stanowiło elektrodę uziemiającą. Po 340 sekundach obróbki otrzymano 5-logarytmową redukcję kolonii bakteryjnych (Leipold i in., 2010), przy czym temperatura narzędzia tnącego nie przekroczyła 30°C.

Pracę nad plazmowymi reaktorami ze złożem fluidalnym do obróbki orzechów laskowych prowadzili Dasan i in. (2017). Badali wpływ gazów substratowych (powietrze, azot) oraz średnicy reaktora i parametrów elektrycznych na inaktywację spor będących źródłami aflatoksyn: *Aspergillus flavus* i *Aspergillus parasiticus* naniesionych na orzechy. W czasie najskuteczniejszej, 5 minutowej obróbki powietrzem uzyskano spadek liczby kolonii *A. flavus* (4,17 log) i *A. parasiticus* (4,09 log). Całkowita inaktywacja naturalnej mikroflory orzechów laskowych została uzyskana po 2 minutach ekspozycji na działanie plazmy. Nie wykazano aktywności spor podczas przechowywania w temperaturze 25°C przez 30 dni. Efektywność obróbki rosła wraz ze wzrostem napięcia i częstotliwości zasilania, zaś zmniejszała się w miarę wzrostu średnicy reaktora.

Plazmę wykorzystano również do dezynfekcji suszonych przypraw i orzechów. Niskociśnieniowy reaktor plazmowy częstotliwości radiowych (13,6 MHz) z tlenem jako gazem substratowym był stosowany do dekontaminacji pręcików szafranu. Największą redukcję: ogólnej liczby mikroorganizmów, liczebności bakterii typu coli oraz pleśni i drożdży o odpowiednio 3,52, 4,62, 2,38 i 4,12 log jtk/g stwierdzono przy mocy 110 W i 30 minutach ekspozycji. Ponadto obróbka plazmowa spowodowała znaczący wzrost parametrów barwy produktu w kierunku ciemnienia oraz zmniejszyła zawartość pikrokrocyny, szafranalu i krocyny, które jednak spełniały wymagane w normach ISO poziomy wartości dotyczące szafranu (Darvish i in., 2022). Hertwig i in. (2015) badali wpływ powietrza plazmowanego na nasiona pieprzu, rozdrobnione oregano i paprykę w proszku. Po 60 minutach ekspozycji naturalna mikroflora nasion pieprzu i papryki w proszku zmalała o ponad 3 log, zaś w przypadku oregano o 1,6 log. Obróbka nie wpłynęła znacząco na barwę pieprzu i oregano jednak w przypadku papryki już po 5 minutach obróbki odnotowano redukcję czerwonej barwy. Grabowski i in. (2015) w reaktorze DBD z argonem jako gazem substratowym otrzymali satysfakcjonujące rezultaty dekontaminacyjne podczas 5 minutowej ekspozycji czarnego pieprzu na plazmę.

Dasan i in. (2018) używała dyszy plazmowej oraz powietrza jako gazu procesowego (2000-3000 L/h) do inaktywacji *Salmonella enterica* (*Enteritidis*) znajdującej się na powierzchni skorupki jaj. Zastosowano 60-120 s czas ekspozycji, zaś odległość jaja od strumienia plazmy wynosiła 15 lub 40 mm. Najlepszy wynik uzyskano po 120 s obróbki przy mocy 655 W i częstotliwości 25 kHz, kiedy liczba kolonii *S. Enteritidis* zmalała poniżej granicy detekcji (z 10^7 jtk/jajo do 10^2 jtk/jajo). Temperatura jaj nie przekroczyła 35°C. Podwójną argonową, obrotową dyszę plazmową, która pozwalała na generowanie plazmy w większej objętości wykorzystano do usuwania *S. Enteritidis* (Lin i in., 2021) testując 26 różnych kombinacji parametrów operacyjnych. Uwzględniając zarówno efekt antybakteryjny, jak i wpływ na jakość produktu dobrano parametry pozwalające na redukcję liczby kolonii o ponad 4 log jtk/jajo przy jednoczesnej poprawie właściwości sensorycznych.

Mleko i jego przetwory należą do produktów łatwo ulegających zepsuciu. Do pozytywnych skutków działania plazmy niskotemperaturowej na produkty mleczne należy inaktywacja mikroorganizmów i enzymów (Nikmaram i Keener, 2022). W zależności od metody i czasu ekspozycji na plazmę inne czynniki, takie jak pH, składniki lotne, profile białkowy i lipidowy również mogą ulegać zmianie. Może znacząco zmieniać się zawartość aldehydów, takich jak 1-oktanol, 2-heptanon, 2-hexenal, trans-2-octenal, nonanal czy aldehyd benzoesowy (Korachi i in., 2015). Jednocześnie nie odnotowano wpływu plazmy na całkowitą zawartość ketonów czy alkoholi. Doniesienia naukowców nie są jednak jednoznaczne,

gdyż Gurol i in. (2012) uzyskali redukcję kolonii mikroorganizmów rzędu 4,15 log jtk/ml podczas 20 minutowej obróbki w reaktorze koronowym, przy czym nie zaobserwowano istotnych zmian w barwie i pH. 10 minutowa obróbka w reaktorze z wyładowaniem barierowym skutkowałą spadkiem liczby kolonii o 2,4 log jtk/ml jednak doszło do obniżenia się pH i parametru chromatycznego a^* przy jednoczesnym wzroście wartości parametrów L^* , b^* . Nie zaobserwowano znaczących zmian w przypadku zawartości tłuszczów (Kim i in., 2015). W przypadku odtuszczonego mleka w proszku, 20–120 s ekspozycja w reaktorze plazmowym ze złożem fluidalnym pozwoliła na max. 3,27 log₁₀ redukcję liczby kolonii *Cronobacter sakazakii* bez zauważalnych zmian barwy, struktury krystalicznej, składu aminokwasów ani zawartości związków fenolowych (Chen i in., 2019).

Wan i in. (2021) wykorzystali do obróbki 10 g sera Queso fresco zaszczeplonego *L. innocua* i *E. coli* K-12 zimną plazmę wysokonapięciową (od 60 do 100 kV) generowaną w powietrzu lub w mieszaninie 65% O₂, 30% CO₂, 5% N₂. Na stopień redukcji znaczący wpływ miała wielkość próbki sera oraz czas obróbki (Ott i in., 2022). Po 5 minutach obróbki przy zastosowaniu powietrza jako gazu substratowego oraz po przechowywaniu przez 24 godz. w 4°C uzyskano redukcję liczby kolonii wynoszące 1,4 log jtk/g oraz 3,5 log jtk/g odpowiednio dla *L. innocua* i *E. coli* K-12. Nie zaobserwowano zmian w teksturze, zaś zmiany pH, wilgotności, barwy oraz profilu tłuszczów były minimalne. Uscanga i in. (2022) badali wpływ plazmy generowanej w wyładowaniu barierowym na tradycyjny meksykański ser Adobera. 0,5 g sera zaszczeplono 10⁸ jtk/ml *Escherichia coli* ATCC 25922, *Salmonella* ATCC13076 i *Staphylococcus aureus* ATCC 6538, a następnie poddano obróbkę plazmowej w mieszaninie powietrza i helu i w czasie od 1 do 15 minut. Wykazano redukcję liczby kolonii o 5 cykli logarytmicznych. Niestety plazma powodowała silne utlenianie białek i lipidów przekładające się na walory smakowe i zapachowe produktu. W przypadkach plazmowania serów Kashar uzyskano redukcję liczby kolonii o 3-4 log dla *Aspergillus flavus* oraz *Penicillium crysogenum*. Wartości parametru b^* próbek wzrosły, podczas gdy L^* i a^* oraz pH zmalały (Akarca i in., 2023).

Analiza produktów (30 minut obróbki) - tłuszczów mlecznych i wołowych plazmą generowaną w powietrzu w reaktorze DBD wykazała powstawanie licznych nadtlenków kwasu oleinowego i linolowego oraz skutkowałą zmniejszeniem ilości tych kwasów wraz z palmitynowym (Sarangapani i in., 2017). Może to wskazywać na dominację w tym procesie mechanizmu Criegee, gdzie ozon i inne reaktywne czynniki reagują głównie z podwójnymi wiązaniami w łańcuchach nienasyconych kwasów tłuszczowych. Wśród produktów utleniania tłuszczów znalazły się również aldehydy (heksanal, pentanal i inne), nonenal oraz kwasy na przykład azelainowy, pelargonowy i kaprylowy. Zmiany oksydacyjne uznawane są niestety za jeden z wiodących procesów, które przyczyniają się do obniżenia jakości produktów mięsnych (Starek i Pawłat, 2020; 2022) prowadząc m.in. do pogorszenia się ich walorów smakowych i zapachowych. Jest to rezultatem utleniania kwasów tłuszczowych (głównie polienowych). Zjełczały tłuszcz w kontakcie z pozostałymi produktami może wchodzić w reakcje z innymi ważnymi składnikami, takimi jak witaminy (ryboflawina, biotyna, kwasy askorbinowy i pantotenowy). Jednocześnie, jak w przypadku innych produktów żywnościowych, obróbka plazmowa prowadzi do redukcji mikroorganizmów odpowiedzialnych za psucie świeżego mięsa i jego produktów i po dobraniu odpowiednich warunków generowania i ekspozycji próbki może służyć do przedłużenia jego trwałości.

W przypadku mięsa drobiowego Noriega i in. (2011) stosując przez 8 minut plazmę helowo-tlenową uzyskał odmienne stopnie redukcji kolonii *Listeria innocua*: odpowiednio 3 log i 1 log dla powierzchni mięsa i skóry kurzej. Dowodzi to istotnej roli jaką dla uzyskania efektywności obróbki odgrywają właściwości samej powierzchni w tym jej topografia, chropowatość i energia powierzchni. Lee i in. (2011) zbadali skuteczność inaktywacji *Listeria monocytogenes* podczas 2 minutowej ekspozycji na plazmę generowaną z różnymi kombinacjami gazów procesowych (He, He+O₂, N₂, N₂+O₂) dla plastrów gotowanej piersi z kurczaka i szynki. Skuteczność obróbki w zależności od użytego gazu procesowego wynosiła od 1,37 do 6,52 jednostek logarytmicznych przy czym najlepsze efekty uzyskano dla mieszaniny azotu i tlenu. Liczba kolonii bakterii tlenowych pozostawała na bardzo niskim poziomie nawet po przechowywaniu w 10°C przez 7 dni. Dirks i in. (2012) wykonali obróbkę piersi kurczaka i uda kurczaka ze skórą inokulowaną *Salmonella enterica* oraz *Campylobacter jejuni*. Plazma była generowana w reaktorze z barierą dielektryczną. Po 3 minutach obróbki w przypadku *S. enterica* uzyskano maksymalne poziomy redukcji wynoszące 2,54 log oraz 1,31 log odpowiednio na piersi i skórze z kurczaka, zaś dla *C. jejuni* wynosiły one 2,45 log oraz 3,11 log. W innym badaniu 5 minutowa ekspozycja piersi kurczaka na wysokonapięciową (100 kV) plazmę atmosferyczną spowodowała spadek liczebności mikroorganizmów o około 2 log jtk/g po 24 h przechowywania. W porównaniu z grupą kontrolną po wydłużeniu czasu przechowywania do 24 dni liczba mezofilów, psychrofilów i Enterobacteriaceae była odpowiednio o 1,5, 1,4 oraz 0,5 log niższa niż w grupie kontrolnej (Moutiq i in., 2020).

Sammanee i in. (2022) przeprowadzili 15 minutową kąpiel w cieczy plazmowanej, w której w wyniku działania plazmy znajdowało się 60 ppm H₂O₂ do obróbki próbek kurczaka ze skórą i wieprzowiny inokulowanych *Salmonella Enteritidis*, *Salmonella Typhimurium*, *Escherichia coli*, *Campylobacter jejuni*, *Staphylococcus aureus* i *Pseudomonas aeruginosa*. W procesie obróbki cieczy użyto dyszy plazmowej (15 kV, 50 Hz), gazem procesowym był argon. Stopień redukcji kolonii mikroorganizmów zależał od rodzaju bakterii i najlepsze rezultaty osiągnięto dla *C. jejuni*. Po 3 dniach przechowywania (w temperaturze 4-6°C) od obróbki skuteczność dekontaminacyjna dla *Staphylococcus aureus* była niższa, zaś najtrudniejsza była inaktywacja *P. aeruginosa*. Stwierdzono niewielkie zmiany jeśli chodzi o barwę, pH i aktywność wodną a_w mięsa w porównaniu do grupy kontrolnej. Wartości współczynników chromatyczności a* i b* spadły, jedynie dla próbek mięsa wieprzowego nastąpił wzrost wartości jasności L*.

Plastry szynki inokulowane *L. monocytogenes* eksponowano na działanie plazmy helowej generowanej w reaktorze z regulacją mocy (do 150 W) przez czas do 2 minut, dla których liczba kolonii została zmniejszona o około 1,73 log jtk/g (Song i in., 2009). Schab wieprzowy zaszczerpiony *E. coli* dekontaminowano plazmowo przy użyciu reaktora z wyładowaniem barierowym (Kim i in., 2013) oraz helu i mieszanki hel-tlen jako gazów substratowych zmniejszając liczbę kolonii bakterii o zaledwie 0,55 log po 10 minutach. Boczek (Kim i in., 2011) inokulowany *L. monocytogenes*, *E. coli* i *S. typhimurium* obrabiano plazmowo przez 60 i 90 s przy użyciu plazmotronu z regulacją mocy (do 125 W). Dla helu jako gazu procesowego uzyskano redukcje do 2 cykli logarytmicznych, zaś dla mieszanki helu z tlenem do 3 cykli logarytmicznych. Przy czym jedyną istotną zmianą był wzrost parametru barwy L* na powierzchni boczku. Zmniejszenie ilości kolonii *E. coli* i *L. mono-*

cytogenes w połędwiczkach wieprzowych poddanych obróbce plazmą generowaną w wyładowaniu koronowym raportowali również Choi i in. (2016).

Barierowe wyładowanie powierzchniowe oraz różne mieszanki gazów (80% Ar/20% O₂ lub 80% N₂/20% O₂) użyto do dekontaminacji świeżych fileatów z dorady (*Sparus aurata*) (Tappi i in., 2023) zawierających endogenną mikroflorę oraz inokulowanych *E.coli* i *L.innocua*. Po 20 minutach obróbki uzyskano redukcję rzędu 1 log jtk/g dla mieszaniny argonu z tlenem, przy czym zaobserwowano utlenianie lipidów (od 0,5 mg MDA/kg do max. 4 mg MDA/kg). Doświadczenia z procesem trawienia fileatów *in vitro* nie wykazały wpływu obróbki na ten proces. Grupa badawcza Mozzon'a (2023) użyła wody plazmowanej przy użyciu impulsowego generatora koronowego (18 kV, 5 kHz) do zmniejszenia naturalnej mikroflory sardynek (*Sardina pilchardus*) o odpowiednio 0,22 i 0,20 jednostki logarytmiczne dla mezofilnych bakterii aerobowych oraz *Pseudomonas* spp. Tak niewielkie wartości redukcji mikroflory nie miały wpływu na wydłużenie czasu przydatności do spożycia produktów rybnych przy przechowywaniu chłodniczym. 30 minutowa obróbka inicjowała proces utleniania tłuszczów zwłaszcza kwasów wielonienasyconych, o więcej niż jednym podwójnym połączeniu pomiędzy atomami węgla (PUFA) oraz wzrost stężenia substancji lotnych. Przeanalizowane produkty utleniania cholesterolu wskazywały, że odbywało się ono głównie za sprawą wolnych rodników, ozonu, nadtlenu wodoru oraz nadtlenoazotynu.

Obróbka plazmowa warzyw i owoców, zwłaszcza tych świeżo krojonych była analizowana przez wiele grup badawczych. Wpływ sekwencyjnej ekspozycji na plazmę generowaną w reaktorze DBD na krojonego melona *Cucumis melo* L. var. *Reticolatus* cv. 'Raptor' badali Tappi i in. (2016). Traktowanie plazmą próbek w dwóch cyklach (15+15 minut) spowolniło rozwój psychrofilnej i mezofilnej mikroflory przez co znacznie wydłużyło okres przydatności do spożycia melona przechowywanego przez okres 4 dni w temperaturze 10°C. Plazmowanie nie wpłynęło istotnie na parametry jakościowe, takie jak kwasowość, zawartość substancji rozpuszczalnych, masa sucha, barwa czy tekstura. Zaobserwowano zahamowanie aktywności enzymów: peroksydazy o około 17% oraz metylo-transferazy pektynowej o blisko 7%. W pracy Namin i in. (2021) zbadano wpływ plazmy generowanej w reaktorze z wyładowaniem barierowym na krojone świeże gruszki przez okres od 2 do 6 minut, przy czym najistotniejszy był wpływ dłuższego okresu obróbki na zmniejszenie parametru barwy a*. Wskaźnik brunatnienia (BI) był najwyższy w przypadku próbki kontrolnej.

Wpływ 5, 10 i 15 min ekspozycji na plazmę atmosferyczną generowaną w reaktorze DBD na właściwości mechaniczne śliwek w czasie przechowywania (do 20 dnia) badali Rashvand i in. (2022). Odnotowano negatywny wpływ obróbki w czasie 5 i 15 minut. Według autorów 10 minutowe plazmowanie zwiększało odporność śliwek na deformacje poprzez spadek parametrów związanych z objętością stłuczenia i podatnością na stłuczenie, zaś wartości modułu Younga, naprężenia plastycznego oraz modułu styczności w trakcie przechowywania utrzymały się w akceptowalnych granicach. Zmodyfikowanego reaktora DBD z podwójnym wyładowaniem barierowym (Ramazzina i in., 2016) użyto do obróbki jabłek Pink Lady powodując niewielkie zmniejszenie zawartości przeciwutleniaczy (głównie o charakterze amfifilowym) i aktywności przeciwutleniającej (do 10%). Obróbka truskawek plazmą generowaną w reaktorze koronowym z elektrodą wieloigłową pozwoliła na zachowanie ich świeżości nawet 4 dni dłużej w porównaniu do kontroli poprzez redukcję

liczby mikroorganizmów, a jednocześnie pozwoliła na zachowanie właściwości sensorycznych (Hozak i in., 2021). Owoce jagód poddano obróbce plazmą niskotemperaturową (12 kV, 5 kHz) od 30 do 90 s i przechowywano przez 40 dni w temperaturze 4°C. Całkowita liczba bakterii tlenowych i pleśni zmalała w zależności od długości czasu ekspozycji odpowiednio (1,24 i 0,87 log jtk/g). Podczas 60 s obróbki o 11,7% zahamowano proces gnicia owoców oraz utratę jędrności. Po obróbce zaobserwowano również wzrost zawartości związków fenolowych, antocyjanów i kwasu askorbinowego oraz aktywności dysmutazy ponadtlenkowej, katalazy i peroksydazy. Podobnie pozytywne rezultaty obróbki plazmowej zanotowano w przypadku przechowywania pokrojonej kantalupy (Zhou i in., 2022).

Mycie wodą po 5 minutach ekspozycji na plazmę generowaną przy wartościach napięć od 6 do 10 kV okazało się obiecującą techniką utrwalania świeżo krojonych gruszek przechowywanych potem w temperaturze 4°C przez 12 dni. Wyniki wykazały znaczne spowolnienie wzrostu bakterii aerobowych, drożdży i pleśni, przy czym otrzymane rezultaty były uzależnione od wartości napięcia. Do korzystnych skutków obróbki zaliczyć można ograniczenie mięknięcia świeżo krojonych gruszek (dla 6 kV), istotne zmniejszenie utraty masy i całkowitej zawartości fenoli (dla 8 KV). Negatywny wpływ wody plazmowanej na zawartość kwasu askorbinowego i aktywność przeciwutleniającą w porównaniu do kontroli przestał być widoczny po 8 dniach przechowywania. Obróbka taka okazała się skuteczniejsza w eliminacji mikroorganizmów w porównaniu do zastosowania podchlorynu sodu (Chen i in., 2019). Perinban i in. (2022) oceniała wpływ 5 minut mycia świeżo krojonych jabłek w wodzie plazmowanej przez 10-60 minut. Użycie wody po 20 i 30 minutach ekspozycji na plazmę pozwoliło na zachowanie jakości świeżo krojonych jabłek podczas przechowywania w temperaturze 4°C przez 12 dni. Czasy aktywacji od 20 minut powodowały istotne obniżenia ogólnej liczby mikroorganizmów. Bezpośrednio po umyciu wodą plazmowaną zaobserwowano obniżenie aktywności polifenolooksydazy i wzrost aktywności peroksydazy. Mycie w wodzie plazmowanej przez 45 i 60 minut wpłynęło niekorzystnie na jakość świeżo krojonych jabłek. Z kolei według Yang i in. (2023), 2 minutowe zanurzenie truszkawek w wodzie plazmowanej powodowało wydłużenie ich świeżości a jednocześnie owoce zachowywały odpowiednią jędrność, zawartość przeciwutleniaczy, w tym witaminy C oraz najniższe stężenie dialdehydu malonowego jako markera stresu oksydacyjnego.

Abouelenein i in. (2021) zaproponowali obróbkę liści rukoli poprzez zanurzenie w wodzie plazmowanej (2, 5, 10 i 20 minut). Woda plazmowana powodowała pewne zmiany w profilu związków lotnych. Jedynie dla czasu wynoszącego 10 minut nie odnotowano istotnego spadku zawartości steroli: beta-sitosterolu i kamposterolu. Najkrótszy, 2 minutowy czas zanurzenia powodował istotny wzrost zawartości beta-karotenu, luteoliny i chlorofilu b (którego zawartość malała dla 20 minutach immersji).

Pulpa z owoców jagód camu-camu bogatych w terpeny i seskwiterpeny była traktowana plazmą generowaną w reaktorze barierowym o regulowanej częstotliwości (200-30000 Hz). Zaobserwowano zmiany w profilu wielu związków odpowiedzialnych za aromat. Campelo i in. (2020) zasugerowali, że obróbka plazmowa mogłaby być narzędziem do regulacji właściwości smakowych i zapachowych po odpowiednim doborze parametrów ekspozycji.

Tarabowa i in. (2021) poddali obróbce świeżo wyciśnięty sok jabłkowy w reaktorze iskrowym pozwalającym na ciągłą obróbkę bezpośrednią (gdy sok przepływał wewnątrz elektrody i był rozpylany w formie elektrostrajy) oraz w systemie wsadowym gdy wyła-

dowanie iskrowe miało miejsce nad powierzchnią soku. Nie odnotowano większych zmian w pH, barwie, przewodności, stopniu Brix i transmitancji oraz w zawartości cukrów, kwasów organicznych i polifenoli. Po obróbce nie zaobserwowano przekroczenia bezpiecznego stężenia dla azotanów, zaś w przypadku azotynów i nadtlenu wodoru początkowo było ono wyższe niż dopuszczalne limity, ale zmniejszyło się w ciągu 24 godzin po działaniu plazmy. W przypadku *E. coli* wstąpił największy efekt dekontaminacyjny (6 log) w porównaniu do drożdży *Saccharomyces cerevisiae*. Autorzy przedłużyli trwałość soku maksymalnie do 26 dni przy przechowywaniu chłodniczym.

Obróbka świeżo tłoczonego soku pomidorowego trwająca 300-600 s przy użyciu reaktora plazmowego ze ślizgającym się łukiem (Glide-arc) posiadała wysoki potencjał dekontaminacyjny i jednocześnie nie spowodowała zmian w właściwościach fizykochemicznych soku pomidorowego. Krótszy czas przetwarzania skutkował znaczną poprawą jakości mikrobiologicznej soku i wydłużeniem jego okresu przydatności do spożycia do 10 dni. Dłuższy czas działania zimnej plazmy (600 s) prowadził do dalszego zmniejszenia liczby mikroorganizmów w porównaniu do obróbki 300 s. Całkowita liczba mikroorganizmów, tj. bakterie kwasu mlekowego, bakterie coli i drożdże, zostały zredukowane poniżej granicy oznaczalności (Starek i in., 2020, Starek-Wójcicka i in., 2023a). Stwierdzono wzrost całkowitej zawartości karotenoidów (o 13%) i likopenu (o 11%) zaś maksymalna utrata witaminy C wyniosła 5% po 5 minutach obróbki (Starek i in., 2019). Ta sama grupa zbadała wpływ plazmy generowanej w reaktorze typu glide-arc z powietrzem jako gazem substratowym na cechy jakościowe świeżo tłoczonego soku z marchwi. W tym przypadku czas obróbki wyniósł od 10 do 30 minut, przy czym po 20 minutach zawartość całkowitej liczby tlenowych mikroorganizmów mezofilnych osiągnęła poziom dopuszczalny (Codex Standards) w odniesieniu do zawartości całkowitej liczby tlenowych mikroorganizmów mezofilnych w soku pasteryzowanym. W stosunku do kontroli odnotowano wzrost zawartości ekstraktu, karotenoidów, polifenoli i stabilności koloidalnej oraz niewielki spadek jasności L^* oraz parametrów chromatyczności a^* i b^* (Starek-Wójcicka i in., 2023b). W przypadku obróbki plazmowej soku z buraków stwierdzono m.in. wzrost zawartości związków fenolowych, co pozwoliło uzyskać bardzo korzystne właściwości odżywcze soku. Nie działał on cytotoksycznie na komórki śródbłonna mikronaczyniowego jelit (HIMEC) a jednocześnie hamował proliferację linii komórkowej gruczolakoraka nabłonka jelita grubego Caco-2 (Dzimitrowicz i in., 2021).

Bezpośrednia, 5 minutowa obróbka czerwonego wina plazmą niskotemperaturową (He/N_2) spowodowała niewielki wzrost zawartości fenoli (3,1%). Plazma przyczyniła się również do spadku stężenia amin biogennych (Niedźwiedz i in., 2022).

Mąkę pszenną poddano obróbce plazmowej z powietrzem jako gazem substratowym przez 1 lub 2 minuty (Bahrami i in., 2016). W tym przypadku nie zaobserwowano jednak wpływu na całkowitą liczbę bakterii tlenowych oraz pleśni jak również na substancje nieskrobiowe czy glikolipidy. Procesy utleniania tłuszczów nasilały się wraz ze wzrostem czasu ekspozycji i napięcia. W zależności od warunków obróbki zmniejszyła się zawartość całkowitych wolnych kwasów tłuszczowych i fosfolipidów. Plazma nie wpłynęła zasadniczo na zawartość białka ogólnego, jednak zauważalne było pojawienie się wyższych frakcji wagowych, co wskazywało na utlenianie białek, zaś otrzymane z takiej mąki ciasto miało lepsze parametry fizykochemiczne.

Reaktor ze ślizgającym się łukiem zastosowano do plazmowania chlebów bezglutennego i mieszanego pszenno-żytniego przez 2 i 10 minut i przechowywano przez 3 i 6 dni. Ekspozycja plazmy trwająca 10 minut eliminowała bakterie mezofilne i grzyby, a już 2 minuty obróbki wystarczały do całkowitego zahamowania wzrostu drożdży i pleśni. Chleb po tego typu przetwarzaniu charakteryzował się jednak zmniejszoną wilgotnością, znacznym wzrostem twardości i niewielkim zwiększeniem sprężystości (Starek-Wójcicka i in., 2022). Podobny wzrost twardości produktu po obróbce plazmowej zaobserwowano w przypadku świeżego makaronu (Chen i in., 2020).

Obróbka plazmą niskotemperaturową stanowi ciekawą alternatywę umożliwiającą dekontaminację mikrobiologiczną żywności. Odpowiedni dobór parametrów plazmotronu, jak i samej ekspozycji umożliwia poprawę właściwości odżywczych oraz promowanie powstawania pożądanych cech jakościowych i strukturalnych w granicach akceptowalnych przez konsumentów. Prace optymalizacyjne dotyczące poszczególnych kategorii produktów wymagają jednak dalszych badań.

7. SZANSE I ZAGROŻENIA WYNIKAJĄCE ZE STOSOWANIA NIEKONWENCJONALNYCH METOD UTRWALANIA ŻYWNOŚCI

Ostatnie osiągnięcia w technologiach przetwarzania żywności zrewolucjonizowały przemysł rolno-spożywczy, oferując liczne korzyści i nowe możliwości (Kucharyk i in., 2019; Pycia i in., 2020). Metody te mogą znacznie wydłużyć okres przydatności do spożycia łatwo psującej się żywności, zmniejszając przy tym jej marnotrawstwo i zapewniając bardziej zrównoważony łańcuch dostaw żywności (Huho, 2020). Ponadto umożliwiają zwiększenie bezpieczeństwa produktów poprzez wyeliminowanie lub ograniczenie występowania szkodliwych mikroorganizmów, takich jak bakterie, pleśnie i grzyby, które mogą powodować choroby przenoszone wraz z żywnością. Innowacyjne metody zapewniają również możliwość poprawy wartości odżywczej i walorów sensorycznych surowców i artykułów rolno-spożywczych, czyniąc je bardziej atrakcyjnymi dla konsumentów. Większość z nich opiera się bowiem na obróbce żywności w temperaturze otoczenia lub nawet niższej, często prowadząc do nadania wyrobom cech funkcjonalnych. Takie sposoby obróbki zmniejszają również ilość energii cieplnej potrzebnej do produkcji żywności podczas konwencjonalnego przetwarzania. Nie bez znaczenia jest również możliwość tworzenia nowych tekstur artykułów żywnościowych, które są ważnym elementem projektowania i marketingu (Loveday i in., 2013).

Mimo to, innowacje procesowe czy produktowe mogą spotkać się z różnym odbiorem konsumentów, którzy będą doszukiwać się w nich potencjalnych zagrożeń (Devlieghere i in., 2004; Zhou i in., 2022). Często wyroby finalne nie są jeszcze tak dokładnie przebadane, jak na przykład te poddane obróbce termicznej, czyli pasteryzacji. Jak wskazują badania analityczne przeprowadzone wśród 225 potencjalnych konsumentów żywności przetworzonej przy użyciu nowych technologii, termin „konserwowanie na zimno” miał pozytywne skojarzenia dla wszystkich grup respondentów (pracowników laboratoriów, kupujących w centrum handlowym czy żołnierzy), ale hasło „minimalnie przetworzone” wywoływało negatywne odczucia (Cardello i in., 2007). Generalnie brak jest długoterminowych analiz nad bezpieczeństwem i potencjalnymi skutkami ubocznymi tych metod. Ich stosowanie może więc budzić obawy dotyczące chociażby skuteczności dekontaminacji żywności o różnym poziomie wilgotności czy pH. Pewne ograniczenia pojawiają się również w przypadku zarodników bakterii, które wymagają bardzo wysokich temperatur do całkowitej inaktywacji. Nie bez znaczenia jest również enzymatyczna i oksydacyjna degradację niektórych składników żywności pod wpływem niewłaściwie zadanych parametrów procesów. Większość świeżo przygotowanych wyrobów poddanych innowacyjnym procesom przetwarzania wymaga przechowywania i dystrybucji w warunkach chłodniczych. W przyszłych pracach warto również przeprowadzić ocenę ryzyka toksycznych pozostałości. Co więcej, niektóre procesy wymagają wykorzystania specjalistycznego sprzętu i wyszkolonego personelu, stąd skalowanie tych technologii pozostaje największym wyzwaniem do rozwiązania (Cardello i in., 2007; Majid i in., 2018; Khezerlou i in., 2023).

W tabeli 4 przedstawiono główne szanse i zagrożenia wynikające ze stosowania niekonwencjonalnych metod utrwalania żywności.

Tabela 3. Szanse i zagrożenia wynikające ze stosowania niekonwencjonalnych metod utrwalania żywności (Devlieghere i in., 2004; Ekezie i in., 2017; Kucharyk i in., 2019)

<u>Szansa</u>	<u>Zagrożenie</u>
<p><i>Innowacyjność jako narzędzie rozwoju zrównoważonego:</i></p> <p>Innowacje w sektorze rolno-spożywczym przekładają się na zmniejszenie szkodliwości dla środowiska oraz obniżkę materiałochłonności i energochłonności niekonwencjonalnych procesów utrwalania. Wiele z nich zalicza się do tak zwanych „zielonych technologii”.</p>	<p><i>Brak badań na temat bezpieczeństwa i nieprzewidywalne skutki długoterminowe:</i></p> <p>Niekonwencjonalne metody mogą być niewystarczająco przebadane pod względem wpływu na zdrowie ludzkie, co może stanowić potencjalne zagrożenie dla konsumentów. Długoterminowe skutki spożywania żywności poddanej niekonwencjonalnym metodom obróbki mogą być trudne do przewidzenia.</p>
<p><i>Dłuższy okres przydatności do spożycia:</i></p> <p>Większość nowatorskich metody obróbki zwiększa trwałość żywności, co pozwala na jej dłuższe przechowywanie w postaci świeżej i aromatycznej (pozbawionej sztucznych konserwantów).</p>	<p><i>Zmiany mikrobiologiczne i fizykochemiczne:</i></p> <p>Niewystarczająca obróbka eliminująca zarówno formy drobnoustrojów wegetatywne oraz przetrwalnikowe, może powodować psucie się żywności, a tym samym obniżać jej wartość odżywczą.</p>
<p><i>Poprawa wartości odżywczej i zdrowy styl życia:</i></p> <p>Wiele produktów spożywczych poddanych działaniu nowoczesnym metodom przetwarzania charakteryzuje się wysoką zawartością substancji biologicznie aktywnych i/lub ograniczoną ilości soli, co jest szczególnie ważne w kontekście utrzymania zdrowego stylu życia.</p>	<p><i>Brak akceptacji społecznej:</i></p> <p>Czynniki osobiste, a także płeć, wiek, zainteresowania, charakter czy stosunek do ryzyka mogą wpływać na akceptację bądź niechęć do wybieranych produktów, na przykład utrwalonych ciśnieniowo, zimną plazmą czy pulsacyjnym polem elektrycznym.</p>
<p><i>Ekonomiczność:</i></p> <p>Skuteczne metody obróbki mogą zmniejszyć straty żywności i poprawić ogólną ekonomiczność produkcji (zmniejszyć ilość odpadów).</p>	<p><i>Brak szczegółowych regulacji:</i></p> <p>Brak jednolitych standardów i regulacji dotyczących niekonwencjonalnych metod obróbki żywności może prowadzić do problemów związanych z ich komercjalizacją.</p>

Przyszłość innowacyjnych metod utrwalania żywności jest bardzo obiecująca. Wraz z postępem badań i rozwojem pojawiają się bardziej wydajne i skuteczne techniki. Integracja nowych technologii, takich jak *blockchain*, może zwiększyć identyfikowalność i przejrzystość w łańcuchu dostaw żywności. Rozwój spersonalizowanych metod konserwacji w oparciu o indywidualne potrzeby i preferencje konsumentów to kolejne aspekty do odkrycia. Możliwości są ogromne, jednak kluczowe jest zachowanie równowagi między innowacyjnością, a bezpieczeństwem. Dokładne badania, rygorystyczne testy i solidne ramy regulacyjne są niezbędne, aby sprostać potencjalnym zagrożeniom i wyzwaniom związanym z wdrożeniem tych nowatorskich metod obróbki produktów na skalę przemysłową i otrzymać akceptację konsumentów (Pietrzak i in., 2010; Settanni i Moschetti, 2014; Kuzniar i in., 2016; Kucharyk i in., 2019).

8. PODSUMOWANIE

Sektory rolnictwa i przetwórstwa spożywczego charakteryzują się dużą niepewnością, wynikającą ze zmienności warunków atmosferycznych, plonów i zbiorów roślin uprawnych oraz reakcji konsumentów i producentów rolnych na układ elementów rynku. W ostatnim czasie również pandemia COVID-19 zachwiała rynkami towarów, zakłóciła przepływy handlowe, a nawet w wielu częściach świata doprowadziła do niedoborów żywności. Stąd też, za istotne dla rozwoju tych gałęzi przemysłu należy uznać rozmiary konsumpcji produktów żywnościowych, na którą wpływają nie tylko dochody konsumentów, ale i elastyczne funkcjonowanie mechanizmu rynkowego, a także jego zdolność do szybkiego reagowania na wszelkie zmiany. Właściwe postępowanie z wytworzonymi produktami, uwzględniające ochronę środowiska, kwestie gospodarcze i interesy społeczne staje się obecnie istotnym elementem budowania stabilnej, silnej marki. Zagadnienia te są coraz ważniejsze z punktu widzenia zaspokojenia oczekiwań uczestników rynku, organów regulacyjnych i władz państwowych, a także konsumentów. Wiele firm skupia się więc na szeroko pojętym zrównoważonym rozwoju metod przetwarzania surowców i produktów pochodzenia zwierzęcego oraz roślinnego, które są przyjazne dla środowiska, ekonomiczne i łatwe w użyciu. Obróbka wysokociśnieniowa, ultradźwięki, pulsacyjne pole elektryczne, a ostatnio plazma nietermiczna to jedne z nich. Wymienione technologie wykorzystują efekty fizyczne i chemiczne do modyfikowania żywności bez jej przegrzania, zmniejszając szkodliwy wpływ na składniki odżywcze i naturalny smak. W wielu przypadkach umożliwiają uzyskanie żywności funkcjonalnej i o wydłużonym okresie przydatności do spożycia. Chociaż potrzebne są dalsze badania, aby dokładniej scharakteryzować wpływ tych metod na produkty spożywcze i zdrowie ludzkie, ogólnie uważa się je za bezpieczne, jeśli są właściwie stosowane.

BIBLIOGRAFIA

- Aaby K., Grimsbo I. H., Hovda M. B., & Rode T. M.** (2018). Effect of high pressure and thermal processing on shelf life and quality of strawberry purée and juice. *Food Chemistry*, 260, 115-123.
- Aadil R. M., Zeng X. A., Jabbar S., Nazir A., Mann A. A., Khan M. K. I., & Ramzan A.** (2017). Quality evaluation of grapefruit juice by thermal and high pressure processing treatment. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 30(3), 249-257.
- Abid M., Jabbar S., Hu B., Hashim M. M., Wu T., Wu Z., ... & Zeng X.** (2014). Synergistic impact of sonication and high hydrostatic pressure on microbial and enzymatic inactivation of apple juice. *LWT-Food Science and Technology*, 59(1), 70-76.
- Abouelenein D., Angeloni S., Caprioli G., Genovese J., Mustafa A. M., Nzekoue F. K., ... & Vittori S.** (2021). Effect of plasma activated water on selected chemical compounds of rocket-salad (*Eruca sativa mill.*) leaves. *Molecules*, 26(24), 7691.
- Adamczyk S.** (2019). Jakość a bezpieczeństwo żywności. *Nauki Ekonomiczne*, 29, 37–54.
- Adekunte A. O., Tiwari B. K., Cullen P. J., Scannell A. G. M., & O'donnell C. P.** (2010). Effect of sonication on colour, ascorbic acid and yeast inactivation in tomato juice. *Food Chemistry*, 122(3), 500-507.
- Aguilar Uscanga B. R., Calderón Santoyo M., Ragazzo Sánchez J. A., Alemán Duarte M. I., Pérez Montaña J. A., Balcázar-López E., & Solís Pacheco J. R.** (2022). Effect of the application of cold plasma energy on the Inactivation of microorganisms, proteins, and lipids deterioration in Adobera Cheese. *Journal of Food Quality*, Article ID 82309555.
- Agus P., Ratna Setyowati P., Arman H. A., Masduki A., Innocentius B., Priyono Budi S., & Otta Breman S.** (2020). The effect of implementation integrated management system ISO 9001, ISO 14001, ISO 22000 and ISO 45001 on Indonesian food industries performance. *Test Engineering and Management*, 82(20), 14054-14069.
- Akarca G., Atik A., Atik İ., & Denizkara A. J.** (2023). The use of cold plasma technology in solving the mold problem in Kashar cheese. *Journal of Food Science and Technology*, 60(2), 752-760.
- Akhtar S., Paredes-Sabja D., Torres J. A., & Sarker M. R.** (2009). Strategy to inactivate Clostridium perfringens spores in meat products. *Food Microbiology*, 26(3), 272-277.
- Alarcon-Rojo A. D., Carrillo-Lopez L. M., Reyes-Villagrana R., Huerta-Jiménez M., & Garcia-Galicia I. A.** (2019). Ultrasound and meat quality: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 55, 369-382.
- Al-Dabbas M. M., Shaderma A. M., & Al-Antary T. M.** (2014). Effect of ozonation treatment on methomyl, oxamyl and carbosulfan residues removal in tomato juice. *Life Science Journal*, 11(2), 68-73.
- Allata S., Valero A., & Benhadja L.** (2017). Implementation of traceability and food safety systems (HACCP) under the ISO 22000: 2005 standard in North Africa: The case study of an ice cream company in Algeria. *Food Control*, 79, 239-253.
- Alshannaq A., & Yu J. H.** (2021). Analysis of EU rapid alert system (RASFF) notifications for aflatoxins in exported US food and feed products for 2010–2019. *Toxins*, 13(2), 90.
- Al-Tit A. A.** (2015). The effect of service and food quality on customer satisfaction and hence customer retention. *Asian social science*, 11(23), 129.
- Amit S. K., Uddin M. M., Rahman R., Islam S. R., & Khan M. S.** (2017). A review on mechanisms and commercial aspects of food preservation and processing. *Agriculture & Food Security*, 6, 1-22.
- Anderson A. K., & Finkelstein R.** (1919). A study of the electro-pure process of treating milk. *Journal of Dairy Science*, 2(5), 374-406.
- Ariyamuthu R., Albert V. R., & Je S.** (2022). An overview of food preservation using conventional and modern methods. *J. Food Nutr. Sci*, 10(3), 70-79.

- Astráin-Redín L., Raso J., Álvarez I., Kirkhus B., Meisland A., Borge G. I. A., & Cebrián G.** (2023). New pulsed electric fields approach to improve the blanching of carrots. *LWT*, 189, 115468.
- Augusto P. E., Soares B. M., & Castanha N.** (2018). Conventional technologies of food preservation. In *Innovative technologies for food preservation*. Academic Press. 3-23.
- Awuchi C. G.** (2023). HACCP, quality, and food safety management in food and agricultural systems. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1), 2176280.
- Aycock, K. N., & Davalo R. V.** (2019). Irreversible electroporation: background, theory, and review of recent developments in clinical oncology. *Bioelectricity*, 1(4), 214-234.
- Aydin A. E., & Yildirim P.** (2021). Understanding food waste behavior: The role of morals, habits and knowledge. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124250.
- Bahrami N., Bayliss D., Chope G., Penson S., Pehinec T., & Fisk I. D.** (2016). Cold plasma: A new technology to modify wheat flour functionality. *Food chemistry*, 202, 247-253.
- Bai Y. P., Guo X. N., Zhu, K. X., & Zhou, H. M.** (2017). Shelf-life extension of semi-dried buckwheat noodles by the combination of aqueous ozone treatment and modified atmosphere packaging. *Food Chemistry*, 237, 553-560.
- Bajan B., Łukasiewicz J., & Smutka L.** (2021). Similarity and Competition of Polish Agri-food Export with the Largest Agricultural Producers in the EU. Analysis of EU, US and China Market. *Agris on-line Papers in Economics and Informatics*, 13(1), 29-47.
- Balakrishna A. K., Wazed M. A., & Farid M.** (2020). A review on the effect of high pressure processing (HPP) on gelatinization and infusion of nutrients. *Molecules*, 25(10), 2369.
- Balakrishna A. K., Wazed M. A., & Farid M.** (2020). A review on the effect of high pressure processing (HPP) on gelatinization and infusion of nutrients. *Molecules*, 25(10), 2369.
- Balon U., Dziadkowiec J. M., & Sikora T.** (2016). *Cechy jakości żywności a decyzje zakupowe polskich konsumentów soków owocowych*. Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, Katedra Zarządzania Jakością, Kraków.
- Bansal V., Jabeen K., Rao P. S., Prasad P., & Yadav S. K.** (2019). Effect of high pressure processing (HPP) on microbial safety, physicochemical properties, and bioactive compounds of whey-based sweet lime (whey-lime) beverage. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 454-465.
- Barba F. J., Esteve M. J., & Frigola A.** (2013). Physicochemical and nutritional characteristics of blueberry juice after high pressure processing. *Food Research International*, 50(2), 545-549.
- Başaran B.** (2021). The past, present and future ISO 9001 quality management system standard. *Business & Management Studies: An International Journal*, 9(1), 227-247.
- Beltrán F. J.** (1997). Theoretical aspects of the kinetics of competitive first reactions of ozone in the O₃/H₂O₂ and O₃/UV oxidation processes. *Ozone: Science & Engineering*, 22, 109-127.
- Bernardo Y. A. D. A., do Rosario D. K. A., & Conte-Junior C. A.** (2023). Principles, application, and gaps of high-intensity ultrasound and high-pressure processing to improve meat texture. *Foods*, 12(3), 476.
- Beuchat L.R.** (1992) Surface disinfection of raw produce. *Dairy, Food and Environmental Sanitation*, 12, 69.
- Bhat R.** (2021). Sustainability challenges in the valorization of agri-food wastes and by-products. In *Valorization of agri-food wastes and by-products*. Academic Press. 1-27.
- Bhat R., Kamaruddin N. S. B. C., Min-Tz L., & Karim A. A.** (2011). Sonication improves kasturi lime (*Citrus microcarpa*) juice quality. *Ultrasonics sonochemistry*, 18(6), 1295-1300.
- Bhatta A. K., Keyal U., & Liu Y.** (2018). Application of high frequency ultrasound in dermatology. *Discovery medicine*, 26(145), 237-242.
- Bi X., Zhou Z., Qin T., Wang X., Ma Y., Xing Y., & Che Z.** (2020). Effects of high pressure processing (HPP) on microorganisms and the quality of mango smoothies during storage. *RSC advances*, 10(52), 31333-31341.

- Biń A.** (1995). Zastosowanie ozonu w oczyszczaniu wody i uzdatnianiu ścieków. *Polski Instalator*, 6, 28–31.
- Bojnc Š., & Fertő I.** (2015). Agri-food export competitiveness in European Union countries. *JCMS: Journal of Common Market Studies*, 53(3), 476-492.
- Brandenburg R., Bogaerts A., Bongers W., Fridman A., Fridman G., Locke B. R., Miller V., Reuter S., Schiorlin M., & Ostrikov K. K.** (2018). White paper on the future of plasma science in environment, for gas conversion and agriculture. *Plasma Processes and Polymers*, 1700238.
- Brasil C. C. B., Barin J. S., Jacob-Lopes E., Menezes C. R., Zepka L. Q., Wagner R., ... & Cichoski A. J.** (2017). Single step non-thermal cleaning/sanitation of knives used in meat industry with ultrasound. *Food research international*, 91, 133-139.
- Brečić R., Mesić Ž., & Cerjak M.** (2017). Importance of intrinsic and extrinsic quality food characteristics by different consumer segments. *British Food Journal*, 119(4), 845-862.
- Brisset J. L., & Pawlat J.** (2016). Chemical effects of air plasma species on aqueous solutes in direct and delayed exposure modes: discharge, post-discharge and plasma activated water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 36(2), 355-381.
- Brooks J. R., Ikhlās M., Siamak M., Quint J. P., Paul D., Jaberi A., Park J. S., Yang R.** (2022). An equivalent circuit model for localized electroporation on track etched membranes. *Biosensors & Bioelectronics*, 199, 113862.
- Bruggeman P. J., Kushner M. J., Locke B. R., Gardeniers J. G., Graham W. G., Graves D. B., ... & Zvereva G.** (2016). Plasma–liquid interactions: a review and roadmap. *Plasma sources science and technology*, 25(5), 053002.
- Bryła P.** (2017). The perception of EU quality signs for origin and organic food products among Polish consumers. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 9(3), 345-355.
- Bull M. K., Steele R. J., Kelly M., Olivier S. A., & Chapman B.** (2010). Packaging under pressure: Effects of high pressure, high temperature processing on the barrier properties of commonly available packaging materials. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(4), 533-537.
- Burlacu O., Crețu C. R., Crețu R. F., Spiridon C. E., & Gombos S. P.** (2022). Lack of Economic and Food Security on a Global Scale. *Revista de Management Comparat International*, 23(5), 686-693.
- Bursa S., Stanisław Lewicka M., Kicińska M., & Kośmider J.** (1985). Dezodoryzacja gazów i ścieków część I: Dezodoryzacja na drodze ozonowania. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin.
- Cacace F., Bottani E., Rizzi A., & Vignali G.** (2020). Evaluation of the economic and environmental sustainability of high pressure processing of foods. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 60, 102281.
- Calín-Sánchez Á., Lipan L., Cano-Lamadrid M., Kharaghani A., Masztalerz K., Carbonell-Barrachina Á. A., & Figiel A.** (2020). Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs. *Foods*, 9(9), 1261.
- Campelo P. H., Alves Filho E. G., Silva L. M., de Brito E. S., Rodrigues S., & Fernandes F. A.** (2020). Modulation of aroma and flavor using dielectric barrier discharge plasma technology in a juice rich in terpenes and sesquiterpenes. *Lwt*, 130, 109644.
- Cardello A. V., Schutz H. G., & Leshner L. L.** (2007). Consumer perceptions of foods processed by innovative and emerging technologies: A conjoint analytic study. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8(1), 73-83.
- Carletti L., Botondi R., Moscetti R., Stella E., Monarca D., Cecchini M., & Massantini R.** (2013). Use of ozone in sanitation and storage of fresh fruits and vegetables. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 11(3-4), 585-589.

- Cartagena L., Puértolas E., & de Marañón I. M.** (2020). Application of high pressure processing after freezing (before frozen storage) or before thawing in frozen albacore tuna (*Thunnus alalunga*). *Food and Bioprocess Technology*, 13(10), 1791-1800.
- Cataldo F.** (2007). On the action of ozone on gelatin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 41(2), 210-216.
- Cataldo F.** (2003). On the action of ozone on proteins. *Polymer Degradation and Stability*, 82(1), 105-114.
- Cataldo F.** (2004). On the action of ozone on methaemoglobin. *Polymer Degradation and Stability*, 86(3), 473-481.
- Cavalcanti R. N., Balthazar C. F., Margalho L. P., Freitas M. Q., Sant'Ana A. S., & Cruz A. G.** (2023). Pulsed electric field-based technology for microbial inactivation in milk and dairy products. *Current Opinion in Food Science*, 101087.
- Chakka A. K., Sriraksha M. S., & Ravishankar C. N.** (2021). Sustainability of emerging green non-thermal technologies in the food industry with food safety perspective: A review. *Lwt*, 151, 112140.
- Chang Y. H., Wu S. J., Chen B. Y., Huang H. W., & Wang C. Y.** (2017). Effect of high-pressure processing and thermal pasteurization on overall quality parameters of white grape juice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(10), 3166-3172.
- Chavan P., Sharma P., Sharma S. R., Mittal T. C., & Jaiswal A. K.** (2022). Application of high-intensity ultrasound to improve food processing efficiency: A review. *Foods*, 11(1), 122.
- Chemat F., Rombaut N., Meullemiestre A., Turk M., Perino S., Fabiano-Tixier A. S., & Abert-Vian M.** (2017). Review of green food processing techniques. Preservation, transformation, and extraction. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 357-377.
- Chen C., Liu C., Jiang A., Guan Q., Sun X., Liu S., ... & Hu W.** (2019). The effects of cold plasma-activated water treatment on the microbial growth and antioxidant properties of fresh-cut pears. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1842-1851.
- Chen D., Peng P., Zhou N., Cheng Y., Min M., Ma Y., ... & Ruan R.** (2019). Evaluation of *Cronobacter sakazakii* inactivation and physicochemical property changes of non-fat dry milk powder by cold atmospheric plasma. *Food chemistry*, 290, 270-276.
- Chen H., Liou B. K., Chen C. S., & Chuang P. T.** (2020). Risk analysis method used in small-and medium-sized food enterprises implementing ISO 22000: 2018 and HACCP to conditionally determine "inspection-acceptance" as a critical control point. *Accreditation and Quality Assurance*, 25, 339-354.
- Chen R., Ma F., Li P. W., Zhang W., Ding X. X., Zhang Q. I., ... & Xu B. C.** (2014). Effect of ozone on aflatoxins detoxification and nutritional quality of peanuts. *Food chemistry*, 146, 284-288.
- Chen W., Ma H., & Wang Y. Y.** (2022). Recent advances in modified food proteins by high intensity ultrasound for enhancing functionality: Potential mechanisms, combination with other methods, equipment innovations and future directions. *Ultrasonics sonochemistry*, 85, 105993.
- Chen X., Tume R. K., Xiong Y., Xu X., Zho G., Chen C., & Nishiumi T.** (2018). Structural modification of myofibrillar proteins by high-pressure processing for functionally improved, value-added, and healthy muscle gelled foods. *Critical reviews in food science and nutrition*, 58(17), 2981-3003.
- Chen Y., Zhang Y., Jiang L., Chen G., Yu J., Li S., & Chen Y.** (2020). Moisture molecule migration and quality changes of fresh wet noodles dehydrated by cold plasma treatment. *Food chemistry*, 328, 127053.
- Chitrakar B., Zhang M., & Bhandari B.** (2021). Improvement strategies of food supply chain through novel food processing technologies during COVID-19 pandemic. *Food Control*, 125, 108010.

- Choi S., Puligundla P., & Mok C.** (2016). Corona discharge plasma jet for inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 and *Listeria monocytogenes* on inoculated pork and its impact on meat quality attributes. *Annals of Microbiology*, 66(2), 685-694.
- Cholewicka-Goździk K.** (2016). Struktura normy ISO 9001: 2015: podstawowe wymagania. *Problemy jakości*, (1), 25-30.
- Choo Y. X., Teh L. K., & Tan C. X.** (2022). Effects of sonication and thermal pasteurization on the nutritional, antioxidant, and microbial properties of noni juice. *Molecules*, 28(1), 313.
- Chotkowski J., & Rembeza J.** (2010). Kierunki doskonalenia instytucji rynkowych sektora rolno-spożywczego w Polsce. *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu*, 12(4).
- Chotyakul N., & Rungpichayapichet P.** (2018). Commercialization of high pressure processed foods: a consumer choice for quality and safety products. *Science, Engineering and Health Studies*, 139-148.
- Chwaszcz B.; Józefczyk R.; Bilek M.; Balawajder M.** (2015). Ozonowanie jako metoda przedłużania trwałości przechowalniczej owoców maliny w warunkach niechłodniczych. kształtowanie jakości żywności, 15. 25-28.
- Chylek E. K., Kujawiński W., & Niepytalski T.** (2016). Innowacje i ich wpływ na zrównoważony rozwój sektora rolno-spożywczego w Polsce. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego*, 86(4), 7-25.
- Climaco W. L. D. S., Melo É. D. F., Vaz D. P., Saldanha M. M., Pinto M. F. V. D. S., Fernandes L. C. C., ... & Lara L. J. C.** (2018). Eggshell microbiology and quality of hatching eggs subjected to different sanitizing procedures. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53, 1177-1183.
- Córdova A., Astudillo-Castro C., Ruby-Figueroa R., Valencia P., & Soto C.** (2020). Recent advances and perspectives of ultrasound assisted membrane food processing. *Food Research International*, 133, 109163.
- Crawford Y. J., Murano E. A., Olson D. G., & Shenoy K.** (1996). Use of high hydrostatic pressure and irradiation to eliminate *Clostridium sporogenes* spores in chicken breast. *Journal of Food Protection*, 59(7), 711-715.
- da Luz S. R., Villanova F. A., Rockembach C. T., Ferreira C. D., Dallagnol L. J., Monks J. L. F., & de Oliveira M.** (2022). Reduced of mycotoxin levels in parboiled rice by using ozone and its effects on technological and chemical properties. *Food chemistry*, 372, 131174.
- da Rocha Ferreira E. H., Rosenthal A., Calado V., Saraiva J., & Mendo S.** (2009). *Byssoschlamys nivea* inactivation in pineapple juice and nectar using high pressure cycles. *Journal of Food Engineering*, 95(4), 664-669.
- da Silva F. V. M.** (2017). High-pressure processing effect on microorganisms in fruit and vegetable products. In *High pressure processing of fruit and vegetable products*. CRC Press. 3-38.
- Daher D., Le Gourrierec S., & Pérez-Lamela C.** (2017). Effect of high pressure processing on the microbial inactivation in fruit preparations and other vegetable based beverages. *Agriculture*, 7(9), 72.
- Dai J., Bai M., Li C., Cui H., & Lin L.** (2020). Advances in the mechanism of different antibacterial strategies based on ultrasound technique for controlling bacterial contamination in food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 211-222.
- Darvish H., Ramezan Y., Khani M. R., & Kamkari A.** (2022). Effect of low-pressure cold plasma processing on decontamination and quality attributes of Saffron (*Crocus sativus* L.). *Food Science & Nutrition*, 10(6), 2082-2090.
- Dasan B. G., Boyaci I. H., & Mutlu M.** (2017). Nonthermal plasma treatment of *Aspergillus* spp. spores on hazelnuts in an atmospheric pressure fluidized bed plasma system: Impact of process parameters and surveillance of the residual viability of spores. *Journal of Food Engineering*, 196, 139-149.

- Dasan B. G., Onal-Ulusoy B., Pawlat J., Diatczyk J., Sen Y., & Mutlu M.** (2017). A new and simple approach for decontamination of food contact surfaces with gliding arc discharge atmospheric non-thermal plasma. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 650-661.
- Dasan B. G., Yildirim T., & Boyaci I. H.** (2018). Surface decontamination of eggshells by using non-thermal atmospheric plasma. *International journal of food microbiology*, 266, 267-273.
- De Simone N., Pace B., Grieco F., Chimienti M., Tyibilika V., Santoro V., ... & Russo P.** (2020). Botrytis cinerea and table grapes: A review of the main physical, chemical, and bio-based control treatments in post-harvest. *Foods*, 9(9), 1138.
- de Souza L. P., Faroni L. R. D. A., Heleno F. F., Pinto F. G., de Queiroz M. E. L. R., & Prates L. H. F.** (2018). Ozone treatment for pesticide removal from carrots: Optimization by response surface methodology. *Food chemistry*, 243, 435-441.
- Deng J., Schoenbach K. H., Buescher E. S., Hair P. S., Fox P. M., & Beebe S. J.** (2003). The effects of intense submicrosecond electrical pulses on cells. *Biophysical journal*, 84(4), 2709-2714.
- Deng X., Ma Y., Lei Y., Zhu X., Zhang L., Hu L., ... & Zhang J.** (2021). Ultrasonic structural modification of myofibrillar proteins from *Coregonus peled* improves emulsification properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 76, 105659.
- Dev S. B., Rabussay D. P., Widera G., & Hofmann G. A.** (2000). Medical applications of electroporation. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28(1), 206-223.
- Devlieghere F., Vermeiren L., & Debevere J.** (2004). New preservation technologies: possibilities and limitations. *International dairy journal*, 14(4), 273-285.
- Dirks B. P., Dobrynin D., Fridman G., Mukhin Y., Fridman A., & Quinlan J. J.** (2012). Treatment of raw poultry with nonthermal dielectric barrier discharge plasma to reduce *Campylobacter jejuni* and *Salmonella enterica*. *Journal of food protection*, 75(1), 22-28.
- Djekic I., Jankovic D., & Rajkovic A.** (2017). Analysis of foreign bodies present in European food using data from Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF). *Food control*, 79, 143-149.
- Doevenspeck H.** (1960). Verfahren und Vorrichtung zur Gewinnung der einzelnen Phasen aus dispersen Systemen. German Patent, DE 1237541
- Dolata M., & Hadryjańska B.** (2013). Konkurencyjność przedsiębiorstw sektora rolno-spożywczego: Companies competitiveness of the agri-food sector. *Zeszyty Naukowe UwS seria Administracja i Zarządzanie*, 26(99), 187-199.
- Dolatowski Z. J., & Stasiak D. M.** (2002). Czystość mikrobiologiczna mięsa i szynki parzonej po obróbce ultradźwiękowej. *ACTA Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 1, 55-65.
- Dolatowski Z. J., & Stasiak D. M.** (2003). Ultradźwięki w przetwórstwie żywności. *Inżynieria Rolnicza*, 7.
- Donsi G., Ferrari G., & Maresca P.** (2007). Pulsed high pressure treatment for the inactivation of *Saccharomyces cerevisiae*: the effect of process parameters. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 984-990.
- Drożdż J., & Mroczek R.** (2022). Przemysł spożywczy w Polsce podczas pandemii COVID-19 oraz wojny w Ukrainie. *Przemysł Spożywczy*, 76(8), 14-22.
- Drożdż J., Mroczek R., & Staszczak A.** (2021). Przemysł spożywczy po turbulencjach spowodowanych pandemią COVID-19. *Przemysł Spożywczy*, 75(8), 12-19.
- Duarte-Sierra A., Forney C. F., Thomas M., Angers P., & Arul J.** (2022). Phytochemical Enhancement in Broccoli Florets after Harvest by Controlled Doses of Ozone. *Foods*, 11(15), 2195.
- Duczowska-Malysz K.** (2009). Miejsce doradztwa w innowacyjności sektora rolno-spożywczego. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego*, 4, 19-32.
- Dwivedi S., Prajapati P., Vyas N., Malviya S., & Kharia A.** (2017). A review on food preservation: methods, harmful effects and better alternatives. *Asian Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 3(6), 193-199.

- Ebihara K., Stryczewska H., Ikegami T., Mitsugi F., & Pawlat J.** (2011). On-site ozone treatment for agricultural soil and related applications. *Przegląd Elektrotechniczny*, 87(7), 148-152.
- Echour S., & Nbigui T.** (2021). ISO 9001 Quality Approach and Performance Literature Review. *European Scientific Journal*, 17, 128-145.
- EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ Panel), Koutsoumanis K., Alvarez-Ordóñez A., Bolton D., Bover-Cid S., Chemaly M., ... & Allende A.** (2022). The efficacy and safety of high-pressure processing of food. *EFSA Journal*, 20(3), e07128.
- Ekezie F. G. C., Sun D. W., & Cheng J. H.** (2017). A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. *Trends in food science & technology*, 69, 46-58.
- Farhadi Chitgar M., Aalami M., Maghsoudlou Y., & Milani E.** (2017). Comparative study on the effect of heat treatment and sonication on the quality of barberry (*Berberis vulgaris*) juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), e12956.
- Fellows P. J.** (2022). *Food processing technology: principles and practice*. Woodhead publishing.
- Fernandez M. V., Denoya G. I., Agüero M. V., Jagus R. J., & Vaudagna S. R.** (2018). Optimization of high pressure processing parameters to preserve quality attributes of a mixed fruit and vegetable smoothie. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 47, 170-179.
- Firlej K.** (2015). *Przemysł spożywczy—makrootoczenie, inwestycje, ekspansja zagraniczna*. Fundacja Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie.
- Foster K. R.** (2000). Thermal and nonthermal mechanisms of interaction of radio-frequency energy with biological systems. *IEEE Trans. Plasma Science*. 28,15–23.
- Fung F., Wang H. S., & Menon S.** (2018). Food safety in the 21st century. *Biomedical journal*, 41(2), 88-95.
- Galanakis C. M.** (2021). Functionality of food components and emerging technologies. *Foods*, 10(1), 128.
- Garlińska-Bielawska J., & Jakóbiak K.** Polski eksport artykułów żywnościowych do UE przed przystąpieniem i po przystąpieniu do Wspólnoty. *Współczesne determinanty stosunków międzynarodowych*, 63-70.
- Gertzou I. N., Drosos P. E., Karabagias I. K., & Riganakos K. A.** (2016). Combined effect of ozonation and packaging on shelf-life extension of fresh chicken legs during storage under refrigeration. *Journal of Food Science & Technology*, 53(12), 4270–4277.
- Gertzou I. N., Karabagias I. K., Drosos P. E., & Riganakos K. A.** (2017). Effect of combination of ozonation and vacuum packaging on shelf-life extension of fresh chicken legs during storage under refrigeration. *Journal of Food Engineering*, 213, 18–26.
- Gimenez B., Graiver N., Giannuzzi L., & Zaritzky N.** (2021). Treatment of beef with gaseous ozone: Physicochemical aspects and antimicrobial effects on heterotrophic microflora and *Listeria monocytogenes*. *Food Control*, 121, 107602.
- Głodowska M., & Gałazka A.** (2017). Wpływ rolnictwa ekologicznego na środowisko w koncepcji rozwoju zrównoważonego. *Więś i Rolnictwo*, (2 (175)), 147-165.
- Gonçalves A. A., & Santos T. C. L.** (2019). Improving quality and shelf-life of whole chilled Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by ozone technology combined with modified atmosphere packaging. *LWT—Food Science and Technology*, 99, 568–575.
- González-Balderas R. M., Velásquez-Orta S. B., Valdez-Vázquez I., & Ledesma M. O.** (2020). Intensified recovery of lipids, proteins, and carbohydrates from wastewater-grown microalgae *Desmodesmus sp.* by using ultrasound or ozone. *Ultrasonics sonochemistry*, 62, 104852.
- Gouvea F. S., Koutchma T., Ferreira E. H. R., Walter E. H. M., & Rosenthal A.** (2023). Resistance of *Escherichia coli*, *Salmonella spp.*, and *Listeria monocytogenes* in high and low-acidity juices processed by high hydrostatic pressure. *International Journal of Food Microbiology*, 395, 110189.

- Gouvea F. S., Padilla-Zakour O. I., Worob R. W., Xavier B. M., Walter E. H., & Rosenthal A.** (2020). Effect of high-pressure processing on bacterial inactivation in açai juices with varying pH and soluble solids content. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 102490.
- Gómez-Salazar J. A., Galván-Navarr A., Lorenzo, J. M., & Sosa-Morales M. E.** (2021). Ultrasound effect on salt reduction in meat products: a review. *Current opinion in food science*, 38, 71-78.
- Grabowski M., Holub M., Balcerak M., Kalisiak S., & Dąbrowski W.** (2015). Black pepper powder microbiological quality improvement using DBD systems in atmospheric pressure. *The European Physical Journal Applied Physics*, 71(2), 20811.
- Grzelak M. M., & Roszko-Wójtowicz E.** (2015). Development of Polish foreign trade in agri-food products after Poland's accession to the EU. *Acta Scientiarum Polonorum. Oeconomia*, 14(4).
- Guo X. N., Jiang Y., Xing J. J., & Zhu K. X.** (2020). Effect of ozonated water on physicochemical, microbiological, and textural properties of semi-dried noodles. *Journal of food processing and preservation*, 44(4), e14404.
- Hać-Szymańczuk E., Cegiłka A., & Piwowarek K.** (2019). Obróbka termiczna surowców i produktów mięsnych gwarantem ich bezpieczeństwa mikrobiologicznego. *Gospodarka Mięsna*, (5), 18-20.
- Hajizadeh Namin A., Abbaszadeh R., & Pouraghdam A.** (2021). Investigation of the effect of non-thermal plasma on increasing the shelf life of fresh-cut pears. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*, 4 (Special Issue-Fresh-cut Products), 91-102.
- Hasheminya S. M., & Dehghannya J.** (2022). Non-thermal processing of black carrot juice using ultrasound: Intensification of bioactive compounds and microbiological quality. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(9), 5848-5858.
- Hassoun A., Prieto M. A., Carpena M., Bouzembrak Y., Marvin H. J., Pallarés N., ... & Bono G.** (2022). Exploring the role of green and Industry 4.0 technologies in achieving sustainable development goals in food sectors. *Food Research International*, 162, 112068.
- He Q., Liu D., Ashokkumar M., Ye, X., Jin T. Z., & Guo M.** (2021). Antibacterial mechanism of ultrasound against *Escherichia coli*: Alterations in membrane microstructures and properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105509.
- He Y., Ye F., Tao J., Zhang Z., & Zhao G.** (2023). Ozone exposure tunes the physicochemical properties of sweet potato starch by modifying its molecular structure. *International Journal of Biological Macromolecules*, 236, 124002.
- Hertwig C., Reineke K., Ehlbeck J., Erdoğdu B., Rauh C., & Schlüter O.** (2015). Impact of remote plasma treatment on natural microbial load and quality parameters of selected herbs and spices. *Journal of Food Engineering*, 167, 12-17.
- Hoigné J.** (1998). *The Handbook of Environmental Chemistry*; Springer: Berlin, Germany, 5, 83-141.
- Hojnik N., Cvelbar U., Tavčar-Kalcher G., Walsh J. L., & Križaj I.** (2017). Mycotoxin decontamination of food: Cold atmospheric pressure plasma versus "classic" decontamination. *Toxins*, 9(5), 151.
- Hoque M., Talukdar S., Roy K. R., Hossain M. A., & Zzaman W.** (2024). Sonication and thermal treatment of pineapple juice: Comparative assessment of the physicochemical properties, antioxidant activities and microbial inactivation. *Food Science and Technology International*, 30(1), 37-48.
- Hozák P., Jirešová J., Khun J., Scholtz V., & Julák J.** (2022). Shelf life prolongation of fresh strawberries by nonthermal plasma treatment. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(9), e16150.
- Hu Y. H., Wang C. Y., & Chen B. Y.** (2020). Effects of high-pressure processing and thermal pasteurization on quality and microbiological safety of jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) juice during cold storage. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 3334-3344.

- Huang D., Men K., Li D., Wen T., Gong Z., Sunden B., & Wu Z.** (2020). Application of ultrasound technology in the drying of food products. *Ultrasonics Sonochemistry*, 63, 104950.
- Huang H. W., Lung H. M., Yang B. B., & Wang C. Y.** (2014). Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing. *Food Control*, 40, 250-259.
- Huang H. W., Wu S. J., Lu J. K., Shy Y. T., & Wang, C. Y.** (2017). Current status and future trends of high-pressure processing in food industry. *Food control*, 72, 1-8.
- Huhu J. M.** (2020). Reducing food loss and waste through innovative food preservation technologies applied by women in rural areas in Kenya. *International Journal of Latest Research in Humanities and Social Science*, 3(1), 76-82.
- Hülshager H., Potel J., & Niemann E. G.** (1981). Killing of bacteria with electric pulses of high field strength. *Radiation and environmental biophysics*, 20, 53-65.
- Janowicz M., & Lenart A.** (2015). Selected physical properties of convection dried apples after HHP treatment. *LWT-Food Science and Technology*, 63(2), 828-836.
- Jeziński A.** (2022). Zarządzanie łańcuchami dostaw żywności w czasie pandemii COVID-19 – wybrane problemy. *Ekonomika i Organizacja Logistyki*, 7(2), 51-66.
- Ji Y., Hu W., Liao J., Jiang A., Xiu Z., Gaowa S., ... & Liu C.** (2020). Effect of atmospheric cold plasma treatment on antioxidant activities and reactive oxygen species production in postharvest blueberries during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(15), 5586-5595.
- Joardder M. U., Hasan Masud M., Joardder M. U., & Masud M. H.** (2019). A brief history of food preservation. *Food Preservation in Developing Countries: Challenges and Solutions*, 57-66.
- Jung S., & Tonello-Samson C.** (2018). High hydrostatic pressure food processing: Potential and limitations. *Green Chemistry*, Royal Society of Chemistry Press.
- Júnior L. M., Cristianini M., Padula M., & Anjos C. A. R.** (2019). Effect of high-pressure processing on characteristics of flexible packaging for foods and beverages. *Food research international*, 119, 920-930.
- Kapierska E.** (2015). Are Polish agri-food products competitive on the EU market?. *Problems of World Agriculture/Problemy Rolnictwa Światowego*, 15(30), 89-100.
- Kader A. A.** (2008). Fresh-cut mangos as a value-added product (literature review and interviews). Postharvest horticulture consultant, Kader consulting service. Davis CA, USA, 1-42.
- Käferstein F., & Abdussalam M.** (1999). Food safety in the 21st century. *Bulletin of the World Health Organization*, 77(4), 347.
- Kalsi B. S., Singh S., & Alam M. S.** (2023). Influence of ultrasound processing on the quality of guava juice. *Journal of Food Process Engineering*, 46(6), e14163.
- Kan D., Zhang W., Lorenzo J. M., & Chen X.** (2021). Structural and functional modification of food proteins by high power ultrasound and its application in meat processing. *Critical reviews in food science and nutrition*, 61(11), 1914-1933.
- Kaproth-Joslin K. A., Nicola R., & Dogra V. S.** (2015). The history of US: from bats and boats to the bedside and beyond: RSNA centennial article. *Radiographics*, 35(3), 960-970.
- Karwacka M., Ciużyńska A., Lenart A., & Janowicz M.** (2020). Sustainable development in the agri-food sector in terms of the carbon footprint: A Review. *Sustainability*, 12(16), 6463.
- Katsigiannis A. S., Bayliss D. L., & Walsh J. L.** (2022). Cold plasma for the disinfection of industrial food-contact surfaces: An overview of current status and opportunities. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21, 1086-1124.
- Katsimichas A., Stath S., Dimopoulos G., Giannakourou M., & Taoukis P.** (2024). Kinetics of pulsed electric fields assisted pigment extraction from *Chlorella pyrenoidosa*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 91, 103547.
- Ketkaew S.** (2012). Plasma ozonizer using micro-converter for ammonia (NH₃) decreasing in shrimp food production. *Procedia Engineering*, 32, 148-154.

- Khandpur P., & Gogate P. R.** (2016). Evaluation of ultrasound based sterilization approaches in terms of shelf life and quality parameters of fruit and vegetable juices. *Ultrasonics sonochemistry*, 29, 337-353.
- Khemakhem M., Attia H., & Ayadi M. A.** (2019). The effect of pH, sucrose, salt and hydrocolloid gums on the gelling properties and water holding capacity of egg white gel. *Food Hydrocolloids*, 87, 11–19.
- Khezerlou A., Zolfaghari H., Forghani S., Abedi-Firoozjah R., Alizadeh Sani M., Negahdari B., ... & McClements D. J.** (2023). Combining non-thermal processing techniques with edible coating materials: an innovative approach to food preservation. *Coatings*, 13(5), 830.
- Kielbasa M.** (2015). Przyszłość sektora rolno–spożywczego w Polsce w odniesieniu do stanu obecnego. *Progress in Economic Sciences*, (2), 236-248.
- Kim B., Yun H., Jung S., Jung Y., Jung H., Choe W., & Jo C.** (2011). Effect of atmospheric pressure plasma on inactivation of pathogens inoculated onto bacon using two different gas compositions. *Food microbiology*, 28(1), 9-13.
- Kim H. J., Yong H. I., Park S., Choe W., & Jo C.** (2013). Effects of dielectric barrier discharge plasma on pathogen inactivation and the physicochemical and sensory characteristics of pork loin. *Current Applied Physics*, 13(7), 1420-1425.
- Kim H. J., Yong H. I., Park S., Kim K., Choe W., & Jo C.** (2015). Microbial safety and quality attributes of milk following treatment with atmospheric pressure encapsulated dielectric barrier discharge plasma. *Food Control*, 47, 451-456.
- Kim S. Y., Gu H. L., Ju H., Jeon J., Jeong S. H., & Lee D. U.** (2024). Effects of pulsed electric fields on controlling fermentation rate of brined *Raphanus sativus*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 92, 103553.
- Kim S., Jeong S. H., Choi H. S., Yeo H., & Lee D. U.** (2023). Accelerated brining kinetics and NaCl distribution of Chinese cabbage (*Brassica rapa ssp. pekinensis*) using pulsed electric field. *LWT*, 179, 114634.
- King T., Col M., Farber, J. M., Eisenbrand G., Zabarás D., Fox E. M., & Hill J. P.** (2017). Food safety for food security: Relationship between global megatrends and developments in food safety. *Trends in Food Science & Technology*, 68, 160-175.
- Kingsly A. R. P., Balasubramaniam V. M., & Rastogi N. K.** (2009). Effect of high-pressure processing on texture and drying behavior of pineapple. *Journal of Food Process Engineering*, 32(3), 369-381.
- Knorr D., & Augustin M. A.** (2021). Food processing needs, advantages and misconceptions. *Trends in Food Science & Technology*, 108, 103-110.
- Kobus Z., Osmólska E., Starek-Wójcicka A., & Krzywicka M.** (2023). Effect of high-powered ultrasound on bioactive compounds and microbiological stability of juices. *Applied Sciences*, 13(19), 10961.
- Kogelschatz U.** (1992). Silent discharges and their applications—invited lecture. In proceedings of the 10th international conference on gas discharges and their applications, Swansea, UK. 13-18.
- Kogelschatz U.** (2003). Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma chemistry and plasma processing*, 23(1), 1-46.
- Kogelschatz U., Eliasson B., & Egli W.** (1999). From ozone generators to flat television screens: history and future potential of dielectric-barrier discharges. *Pure and Applied Chemistry*, 71(10), 1819-1828.
- Kopaćki M., Pawłat J., Skwaryło-Bednarz B., Jamiolkowska A., Stępniać P. M., Kiczorowski P., & Golan K.** (2021). Physical crop postharvest storage and protection methods. *Agronomy*, 11(1), 93.
- Korachi M., Ozen F., Aslan N., Vannini L., Guerzoni M. E., Gottardi D., & Ekinçi F. Y.** (2015). Biochemical changes to milk following treatment by a novel, cold atmospheric plasma system. *International Dairy Journal*, 42, 64–69.

- Koshani R., & Jafari S. M.** (2019). Ultrasound-assisted preparation of different nanocarriers loaded with food bioactive ingredients. *Advances in Colloid and Interface Science*, 270, 123-146.
- Kotsanopoulos K. V., & Arvanitoyannis I. S.** (2017). The role of auditing, food safety, and food quality standards in the food industry: A review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 16(5), 760-775.
- Kowalczyk S.** (2020). Sektor żywnościowy w czasach pandemii. *Kwartalnik nauk o przedsiębiorstwie*, 56(3), 43-53.
- Kowalczyk S., & Kwasek M.** (2020). Jakość żywności na polskim rynku – zagrożenia i sposoby ich eliminacji. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej*, 3(364), 75-100.
- Kowalski A.** (2009). Polish food sector five years after the accession. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej*, 320(3), 3-14.
- Krosowiak K., Śmigieński K., Dziugan P.** (2007). Zastosowania ozonu w przemyśle spożywczym. *Przemysł Spożywczy*, 11, 26–29
- Krzywinski T., & Tokarczyk G.** (2013). Przetwarzanie i utrwalanie mięsa w dziejach świata (część I). *Gospodarka Mięsna*, 65(02), 36-41.
- Kucharyk S., Rudy M., Gil M., Stanisławczyk R., & Mroczek K.** (2019). Niekonwencjonalne metody utrwalania produktów mięsnych oraz ich wpływ na zdrowie człowieka i środowisko. *Polish Journal for Sustainable Development*. 23(2), 53–62.
- Kuzniar W., Kawa M., & Kuzniar P.** (2016). Konsumentów wobec bezpiecznych rozwiązań w zakresie produkcji żywności. *Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Problemy Rolnictwa Światowego*, 16(3), 243-250.
- Laika J., Viteritti E., Molina-Hernandez J. B., Sergi M., Neri L., Laurita R., ... & Chaves-López C.** (2024). Efficiency of cold atmospheric plasma under ozone (O₃) and nitrogen oxide (NO_x) regimes on the degradation of aflatoxins and ochratoxin A in solid state and in spiked pistachio kernels. *Food Control*, 159, 110286.
- Larrea-Wachtendorff D., Del Grosso V., & Ferrari G.** (2022). Evaluation of the physical stability of starch-based hydrogels produced by high-pressure processing (HPP). *Gels*, 8(3), 152.
- Lazarenko B., Reshetko., E.V.** (1968). Enhancement of juice extraction process electrical pulses, *Canning and Vegetable Drying Industry*, 8, 9-11.
- Lee H. J., Jung H., Choe W., Ham J. S., Lee J. H., & Jo C.** (2011). Inactivation of *Listeria monocytogenes* on agar and processed meat surfaces by atmospheric pressure plasma jets. *Food microbiology*, 28(8), 1468-1471.
- Lee S. H., Choi W., & Jun S.** (2016). Conventional and emerging combination technologies for food processing. *Food engineering reviews*, 8, 414-434.
- Li H., Sun X., Liao X., & Gänzle M.** (2020). Control of pathogenic and spoilage bacteria in meat and meat products by high pressure: Challenges and future perspectives. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 3476-3500.
- Liao X., Su Y., Liu D., Chen S., Hu Y., Ye X., Wang J., & Ding T.** (2018). Application of atmospheric cold plasma-activated water (PAW) ice for preservation of shrimps (*Metapenaeus ensis*). *Food Control*, 94, 307–314.
- Lin C. M., Herianto S., Chen H. L., Chiu Y. C., & Hou C. Y.** (2021). The application of a novel non-thermal plasma device with double rotary plasma jets for inactivation of *Salmonella Enteritidis* on shell eggs and its effects on sensory properties. *International Journal of Food Microbiology*, 355, 109332.
- Lin, S. H., Chang C. K., Lin C. T., Gavahian M., Li P. H., Tsai S. Y., ... & Hsieh C. W.** (2024). Pulse electric field pretreatment delays the texture deterioration of sweet persimmon (*Diospyros kaki* L.) during postharvest storage. *LWT*, 191, 115711.
- Loveday S. M., Sarkar A., & Singh H.** (2013). Innovative yoghurts: Novel processing technologies for improving acid milk gel texture. *Trends in food science & technology*, 33(1), 5-20.

- Maggi A., Gola S., Rovere P., Miglioli L., Dall'Aglio G., & Loenneborg N. G.** (1996). Effects of combined high pressure-temperature treatments on *Clostridium sporogenes* spores in liquid media. *Industria Conserve*, 71(1), 8-14.
- Mahendran R., Ramanan K. R., Barba F. J., Lorenzo J. M., López-Fernández O., Munekata P. E., ... & Tiwari B. K.** (2019). Recent advances in the application of pulsed light processing for improving food safety and increasing shelf life. *Trends in food science & technology*, 88, 67-79.
- Majewski M., & Dziubdziela L.** (2018). Analiza powiadomień dotyczących żywności pochodzenia zwierzęcego zgłoszonych do RASFF przez Polskę. *Życie Weterynaryjne*, 93(03).
- Majid I., Nayik G. A., Da S. M., & Nanda, V.** (2018). Novel food packaging technologies: Innovations and future prospective. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(4), 454-462.
- Margean A., Lupu M. I., Alexa E., Padureanu V., Canja C. M., Cocan I., ... & Poiana M. A.** (2020). An overview of effects induced by pasteurization and high-power ultrasound treatment on the quality of red grape juice. *Molecules*, 25(7), 1669.
- Mari M., Bertolini P., & Pratella G. C.** (2003). Non-conventional methods for the control of post-harvest pear diseases. *Journal of Applied Microbiology*, 94(5), 761-766.
- Martindale, W. (2017). The potential of food preservation to reduce food waste. *Proceedings of the Nutrition Society*, 76(1), 28-33.
- McKay A. M., Linton M., Stirling J., Mackle A., & Patterson M. F.** (2011). A comparative study of changes in the microbiota of apple juice treated by high hydrostatic pressure (HHP) or high pressure homogenisation (HPH). *Food Microbiology*, 28(8), 1426-1431.
- Mehta N., Kumar P., Verma A. K., Umaraw P., Khatkar S. K., Khatkar A. B., ... & Sazili A. Q.** (2022). Ultrasound-assisted extraction and the encapsulation of bioactive components for food applications. *Foods*, 11(19), 2973.
- Mikš-Krajnik M., Feng L. X. J., Bang W. S., & Yuk H. G.** (2017). Inactivation of *Listeria monocytogenes* and natural microbiota on raw salmon fillets using acidic electrolyzed water, ultraviolet light or/and ultrasounds. *Food Control*, 74, 54-60.
- Mizik T.** (2021). Agri-food trade competitiveness: A review of the literature. *Sustainability*, 13(20), 11235.
- Monteiro S. H., Silva E. K., Alvarenga V. O., Morae J., Freitas M. Q., Silva M. C., ... & Cruz A. G.** (2018). Effects of ultrasound energy density on the non-thermal pasteurization of chocolate milk beverage. *Ultrasonics Sonochemistry*, 42, 1-10.
- Morais A. T., Morais S. T., Feitor J. F., Cavalcante K. N., Catunda L. G., Walkling-Ribeiro M., ... & Ahrné L. M.** (2023). Physico-chemical and structural modifications of caseins in micellar casein isolate induced by pulsed electric field. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 89, 103476.
- Morales-De la Peña M., Arredondo-Ochoa T., Welti-Chanes J., & Martín-Belloso O.** (2023). Application of moderate intensity pulsed electric fields in red prickly pears and soymilk to develop a plant-based beverage with potential health-related benefits. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 88, 103421.
- More P. R., Jambak A. R., & Arya S. S.** (2022). Green, environment-friendly and sustainable techniques for extraction of food bioactive compounds and waste valorization. *Trends in Food Science & Technology*, 128, 296-315.
- Moutiq R., Misra N. N., Mendonça A., & Keener K.** (2020). In-package decontamination of chicken breast using cold plasma technology: Microbial, quality and storage studies. *Meat Science*, 159, 107942.
- Mozzon M., Mannozi C., Foligni R., Osimani A., Galdenzi F., Laurita R., ... & Dalla Rosa M.** (2023). Assessment of lipid oxidation and microbial decontamination of sardine (*Sardina pilchardus*) fillets processed by plasma-activated water (PAW). *LWT*, 188, 115401.

- Mukhopadhyay S., Sokorai K., Ukuku D., Fan X., & Juneja V.** (2017). Effect of high hydrostatic pressure processing on the background microbial loads and quality of cantaloupe puree. *Food Research International*, 91, 55-62.
- Muntean M. V., Marian O., Barbier V., Cătunescu, G. M., Ranta O., Drocas I., & Terhes S.** (2016). High pressure processing in food industry—characteristics and applications. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 10, 377-383.
- Nagyová E., Andocsová A., Géci A., Zajác P., Palkovič J., Košičiarová I., & Golian J.** (2019). Consumers' awareness of food safety. *Potravinárstvo*, 13(1), 8-17.
- Nalepa C.** (1997). Oxidizing biocides: Properties and applications. In *Association of Water Technologies Fall Meeting*; Association of Water Technologies (AWT): Traverse City, MI, USA.
- Natarajan D.** (2017). ISO 9001 Quality management systems. Springer International Publishing.
- Nath K. G., Pandiselvam R., & Sunil C. K.** (2023). High-pressure processing: Effect on textural properties of food-A review. *Journal of Food Engineering*, 111521.
- Nema P. K., Sehrawat R., Ravichandran C., Kaur B. P., Kumar A., & Tarafdar A.** (2022). Inactivating food microbes by high-pressure processing and combined nonthermal and thermal treatment: a review. *Journal of Food Quality*.
- Ngadi M.O., Bazhal M.I., Raghaven G.S.V.** (2003). Engineering aspects of pulsed electroporation of vegetable tissues. *Agricultural Engineering International: the CIGR J. Scient. Res. Devel.*, 5, 1-10.
- Niedźwiedz I., Plotka-Wasyłka J., Kapusta I., Simeonov V., Stój A., Waško A., ... & Polak-Berecka M.** (2022). The impact of cold plasma on the phenolic composition and biogenic amine content of red wine. *Food Chemistry*, 381, 132257.
- Nikmaram N., & Keener K. M.** (2022). The effects of cold plasma technology on physical, nutritional, and sensory properties of milk and milk products. *Lwt*, 154, 112729.
- Nonglait D. L., Chukkan S. M., Arya S. S., Bhat M. S., & Waghmare R.** (2022). Emerging non-thermal technologies for enhanced quality and safety of fruit juices. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(10), 6368-6377.
- Noriega E., Shama G., Laca A., Díaz M., & Kong M. G.** (2011). Cold atmospheric gas plasma disinfection of chicken meat and chicken skin contaminated with *Listeria innocua*. *Food microbiology*, 28(7), 1293-1300.
- Nosecka B., Krasowicz S., Pawlak K., Kita K., & Zaremba Ł.** (2012). Czynniki konkurencyjności sektora rolno-spożywczego we współczesnym świecie. Instytut Ekonomiki Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej. Warszawa.
- Nowastowski J.** (2020). Aktualny system normalizacji w Polsce w obszarze elektryki. *Energetyka*, (3), 140-143.
- Nowosad K.** (2022). Zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego (PEF) jako zabiegu wspomagającego ekstrakcję. *Wiadomości Chemiczne*, 76, 3-4.
- Nunes B. V., da Silva C. N., Bastos S. C., & de Souza V. R.** (2022). Microbiological inactivation by ultrasound in liquid products. *Food and Bioprocess Technology*, 15(10), 2185-2209.
- Obadi M., Zhu K. X., Peng W., Sulieman A. A., Mohammed K., & Zhou H. M.** (2018). Effects of ozone treatment on the physicochemical and functional properties of whole grain flour. *Journal of Cereal Science*, 81, 127-132.
- Ochwanowska E., Czarny-Działak M., Żeber-Dzikowska I., Wójtowicz B., Gworek B., Król H., ... & Chmielewski J.** (2019). Substancje chemiczne w żywności jako zagrożenie zdrowotne. *Przemysł Chemiczny*, 98(10), 1614-1618.
- Okpała C. O. R.** (2014). Investigation of quality attributes of ice-stored Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) as affected by sequential minimal ozone treatment. *LWT—Food Science and Technology*, 57(2), 538–547.
- Okpała C. O. R.** (2015). Physicochemical changes in minimal ozone-treated fresh shrimp stored on ice tandem with microbiological efficacy of treatment. *Nigerian Food Journal*, 33(2), 74–87.

- Okpala C. O. R., Bono G., Geraci M. L., Sardo G., Vitale S., & Schaschke C. J.** (2016). Lipid oxidation kinetics of ozone-processed shrimp during iced storage using peroxide value measurements. *Food Bioscience*, 16, 5–10.
- Ong K. C., Cash J. N., Zabik M. J., Siddiq M., & Jones A. L.** (1996). Chlorine and ozone washes for pesticide removal from apples and processed apple sauce. *Food chemistry*, 55(2), 153-160.
- Onyeaka H., Miri T., Hart A., Anumudu C., & Nwabor O. F.** (2023). Application of Ultrasound Technology in Food Processing with emphasis on bacterial spores. *Food Reviews International*, 39(7), 3663-3675.
- Ostermeier R., Hill K., Dingis A., Töpfl S., & Jäger H.** (2021). Influence of pulsed electric field (PEF) and ultrasound treatment on the frying behavior and quality of potato chips. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 67, 102553.
- Ott L. C., Jochum J., Burrough L., Clark S., Keener K., & Mellata M.** (2022). High voltage atmospheric cold plasma inactivation of *Listeria monocytogenes* in fresh Queso Fresco cheese. *Food Microbiology*, 105, 104007.
- Oziembłowski M., Drózd T., & Wrona P.** (2013). Oddziaływanie Pulsacyjnych Pól Elektrycznych (PEF) na mikroorganizmy w kontekście technologii żywności. *Przegląd Elektrotechniczny*, 12(89), 222-225.
- Ozonek J.** (1993). *Laboratorium syntezy ozonu: podstawy procesowe, pomiary elektryczne, ekotechnologie*, Wydawnictwa Uczelniane.
- Pagán R., Manas P., Raso J., & Condón S.** (1999). Bacterial resistance to ultrasonic waves under pressure at nonlethal (manosonication) and lethal (manothermosonication) temperatures. *Applied and environmental microbiology*, 65(1), 297-300.
- Pandiselvam R., Singh A., Agriopoulou S., Sachadyn-Król M., Aslam R., Lima C. M. G., ... & Khaneghah A. M.** (2022). A comprehensive review of impacts of ozone treatment on textural properties in different food products. *Trends in Food Science & Technology*, 127, 74-86.
- Panghal A., Chhikara N., Sindhu N., & Jaglan S.** (2018). Role of Food Safety Management Systems in safe food production: A review. *Journal of food safety*, 38(4), e12464.
- Paredes-Sabja D., Gonzalez M., Sarke M. R., & Torres, J. A.** (2007). Combined effects of hydrostatic pressure, temperature, and pH on the inactivation of spores of *Clostridium perfringens* type A and *Clostridium sporogenes* in buffer solutions. *Journal of Food Science*, 72(6), M202-M206.
- Patterson M. F., & Kilpatrick D. J.** (1998). The combined effect of high hydrostatic pressure and mild heat on inactivation of pathogens in milk and poultry. *Journal of food protection*, 61(4), 432-436.
- Pawlak K.** (2018). Comparative advantages of the Polish agri-food sector on the US market. In *Proceedings of the International Scientific Conference "Economic Sciences for Agribusiness and Rural Economy"* (No. 2).
- Pawlak K., & Kołodziejczak M.** (2020). The role of agriculture in ensuring food security in developing countries: Considerations in the context of the problem of sustainable food production. *Sustainability*, 12(13), 5488.
- Pawlak K., & Poczta W.** (2008). Pozycja konkurencyjna polskiego sektora rolno-spożywczego na jednolitym rynku europejskim. *Village and Agriculture (Więś i Rolnictwo)*, 4(141).
- Pawlat J., Starek A., Sujak A., Kwiatkowski M., Terebun P., & Budzeń M.** (2018a). Effects of atmospheric pressure plasma generated in GlidArc reactor on *Lavatera thuringiaca* L. seeds' germination. *Plasma Processes and Polymers*, 15(2), 1700064.
- Pawlewicz A., & Brodziński Z.** (2017). Zmiany potencjału wytwórczego w sektorze rolno-spożywczym w Polsce. *Roczniki (Annals)*, 2017(1230-2019-3571).
- Pawlikowska E., & Kręgiel D.** (2018). Naturalne konserwanty pochodzenia drobnoustrojowego. *Przemysł Spożywczy*, 72(7), 26-29.
- Pawlat J.** (2001). *Foaming system properties, generation of oxidants for environmental purposes using electrical discharge in foam*, PhD Thesis, Saga University.

- Pawlat J.** (2013). Electrical discharges in humid environments. Generators, effects, application Lublin: Politechnika Lubelska, 141 s.- ISBN 978-83-63569-37-2.
- Pawlat J., Diatczyk J., Gunaydin-Dasan B., Onal-Ulusoy B., & Mok Y. S.** (2017). Mini glide-arc plasma reactor for biological decontamination. *EJMT*, 1, 14.
- Pawlat J., Starek A., Sujak A., Terebun P., Kwiatkowski M., Budzeń M., & Andrejko D.** (2018b). Effects of atmospheric pressure plasma jet operating with DBD on *Lavatera thuringiaca* L. seeds' germination. *PLoS one*, 13(4).
- Pérez A. G., Sanz C., Ríos J. J., Ollas R., & Ollas J. M.** (1999). Effects of ozone treatment on postharvest strawberry quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(4), 1652-1656.
- Perinban S., Orsat V., & Raghavan V.** (2022). Influence of plasma activated water treatment on enzyme activity and quality of fresh-cut apples. *Food Chemistry*, 393, 133421.
- Petrescu D. C., Vermeir I., & Petrescu-Mag R. M.** (2020). Consumer understanding of food quality, healthiness, and environmental impact: A cross-national perspective. *International journal of environmental research and public health*, 17(1), 169.
- Picart-Palmade L., Cunault C., Chevalier-Lucia D., Belleville M. P., & Marchesseau S.** (2019). Potentialities and limits of some non-thermal technologies to improve sustainability of food processing. *Frontiers in nutrition*, 5, 130.
- Pietrzak D.** (2010). Perspektywy stosowania wysokich ciśnień w produkcji żywności wygodnej z mięsa drobiowego. *Żywność Nauka Technologia Jakość*, 17(2), 16-28.
- Pinela J., Prieto M. A., Pereira E., Jabeur L., Barreiro M. F., Barros L., & Ferreira I. C.** (2019). Optimization of heat-and ultrasound-assisted extraction of anthocyanins from *Hibiscus sabdariffa* calyces for natural food colorants. *Food chemistry*, 275, 309-321.
- Pinon M., Alarcon-Rojo A., Paniwnyk L., Mason T., Luna L., & Renteria A.** (2018). Ultrasound for improving the preservation of chicken meat. *Food Science and Technology*, 39, 129-135.
- Plaza G.** (2017). Zarządzanie bezpieczeństwem produkcji żywności w kierunku poprawy jakości produktu. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji*, 6(8), 27-36.
- Poczta W., & Pawlak K.** (2011). Potential competitiveness and competitive position of the Polish agri-food sector on the Single European Market. *Berichte über Landwirtschaft*, 89(1), 134-169.
- Pokhrel P. R., Toniazzo T., Boulet C., Oner M. E., Sablani S. S., Tang J., & Barbosa-Canovas G. V.** (2019). Inactivation of *Listeria innocua* and *Escherichia coli* in carrot juice by combining high pressure processing, nisin, and mild thermal treatments. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 54, 93-102.
- Polak E.** (2007). Utrwalanie żywności metodą zamrażania lub chłodzenia. *Chłodnictwo: organ Naczelnej Organizacji Technicznej*, 42(3), 42-43.
- Popkin B. M.** (2017). Relationship between shifts in food system dynamics and acceleration of the global nutrition transition. *Nutrition reviews*, 75(2), 73-82.
- Przekora A., Pawlat J., Terebun P., Duday D., Canal C., Hermans S., ... & Ginalska G.** (2019). The effect of low temperature atmospheric nitrogen plasma on MC3T3-E1 preosteoblast proliferation and differentiation in vitro. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(27), 275401.
- Psarianos M., Iranshahi K., Rossi S., Gottardi D., & Schlüter O.** (2024). Quality evaluation of house cricket flour processed by electrohydrodynamic drying and pulsed electric fields treatment. *Food Chemistry*, 441, 138276.
- Psomas E. L., & Kafetzopoulos D. P.** (2015). HACCP effectiveness between ISO 22000 certified and non-certified dairy companies. *Food Control*, 53, 134-139.
- Purwanto A.** (2019). Influence of leadership, motivation, competence, commitment and culture on ISO 9001: 2015 performance in packaging industry. *Scholars Journal of Economics, Business and Management*.
- Pycia K.** (2020). Innowacyjne, niekonwencjonalne, ale współczesne metody konserwowania żywności-przegląd, charakterystyka i możliwości aplikacyjne. *Laboratorium-Przegląd Ogólnopolski*, 1, 32-37.

- Qin S., Zhou M., Wang Z., Li P., Huang S., & Meng J.** (2023). Effect of pulsed electric field on spore germination rate and enzyme activity of *Aspergillus niger*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 89, 103473.
- Rajendran S., Mallikarjunan P. K., & O'Neill E.** (2022). High pressure processing for raw meat in combination with other treatments: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10), e16049.
- Ramazgina I., Tappi S., Rocculi P., Sacchetti G., Berardinelli A., Marseglia A., & Rizzi F.** (2016). Effect of cold plasma treatment on the functional properties of fresh-cut apples. *Journal of agricultural and food chemistry*, 64(42), 8010-8018.
- Ranjha M. M. A., Irfan S., Lorenzo J. M., Shafique B., Kanwal, R., Pateiro M., ... & Aadil R. M.** (2021). Sonication, a potential technique for extraction of phytoconstituents: A systematic review. *Processes*, 9(8), 1406.
- Rashvand M., Hajizadeh A., Akbarnia A., Abbaszadeh R., Nikzadfar M., & Pathare P. B.** (2022). Effect of dielectric barrier discharge cold plasma on the bruise susceptibility of plum fruit. *Journal of Food Process Engineering*, 45(12), e14182.
- Raso J., Heinz V., Alvarez I., & Toepfl S.** (2022). *Pulsed electric fields technology for the food industry*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Rastogi N. K., Angersbach A., & Knorr D.** (2000). Synergistic effect of high hydrostatic pressure pretreatment and osmotic stress on mass transfer during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 45(1), 25-31.
- Režek Jambrak A., Nutrizio M., Djekić I., Pleslić S., & Chemat F.** (2021). Internet of nonthermal food processing technologies (Iontp): Food industry 4.0 and sustainability. *Applied Sciences*, 11(2), 686.
- Rinaldi M., Dhenge R., Rodolfi M., Bertani G., Bernini V., Dall'Acqua S., & Ganino T.** (2023). Understanding the impact of high-pressure treatment on physico-chemical, microstructural, and microbiological aspects of pumpkin cubes. *Foods*, 12(6), 1280.
- Rinaldi M., Littardi P., Ganino T., Aldini A., Rodolfi M., Barbanti D., & Chiavaro E.** (2020). Comparison of physical, microstructural, antioxidant and enzymatic properties of pineapple cubes treated with conventional heating, ohmic heating and high-pressure processing. *LWT*, 134, 110207.
- Rodrigues Petrus R., Joseph Churey J., & William Worobo R.** (2020). High pressure processing of apple juice: the most effective parameters to inactivate pathogens of reference. *British Food Journal*, 122(12), 3969-3979.
- Rogała P.** (2012). Przegląd zarządzania jakością jako mechanizm doskonalenia systemu zarządzania jakością ISO 9001. *Nauki o Zarządzaniu*, (10), 126-132.
- Rosak-Szyrocka J., & Abbase A. A.** (2020). Quality management and safety of food in HACCP system aspect. *Production Engineering Archives*, 26(2), 50-53.
- Ruiz-De Anda D., Ventura-Lara M. G., Rodríguez-Hernández G., & Ozuna C.** (2019). The impact of power ultrasound application on physicochemical, antioxidant, and microbiological properties of fresh orange and celery juice blend. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 3140-3148.
- Rye J. F., & Scott S.** (2018). International labour migration and food production in rural Europe: a review of the evidence. *Sociologia Ruralis*, 58(4), 928-952.
- Sakudo A., & Yagyu Y.** (2021). Application of a roller conveyor type plasma disinfection device with fungus-contaminated citrus fruits. *AMB Express*, 11, 1-8.
- Sammanee P., Ngamsanga P., Jainonthee C., Chupia V., Sawangrat C., Kerdjana W., ... & Pichpol D.** (2022). Decontamination of pathogenic and spoilage bacteria on pork and chicken meat by liquid plasma immersion. *Foods*, 11(12), 1743.
- Sapa A.** (2010). Bezpieczeństwo żywnościowe w krajach rozwijających się. *Roczniki Ekonomiczne Kujawsko-Pomorskiej Szkoły Wyższej w Bydgoszczy*, (3), 231-244.

- Sarangapani C., Keogh D. R., Dunne J., Bourke P., & Cullen P. J.** (2017). Characterisation of cold plasma treated beef and dairy lipids using spectroscopic and chromatographic methods. *Food Chemistry*, 235, 324-333.
- Schoenbach K. H., Peterkin F. E., Alden R. W., & Beebe S. J.** (1997). The effect of pulsed electric fields on biological cells: Experiments and applications. *IEEE transactions on plasma science*, 25(2), 284-292.
- Segat A., Misra N. N., Fabbro A., Buchini F., Lippe G., Cullen P. J., & Innocente N.** (2014). Effects of ozone processing on chemical, structural and functional properties of whey protein isolate. *Food Research International*, 66, 365-372.
- Shrawat R., Kaur B. P., Nem P. K., Tewari S., & Kumar L.** (2021). Microbial inactivation by high pressure processing: Principle, mechanism and factors responsible. *Food Science and Biotechnology*, 30, 19-35.
- Serment-Moreno V., & Tonello-Samson C.** (2020). An introduction to packaging for commercial high-pressure processing (HPP) applications. In *Present and Future of High Pressure Processing*. Elsevier.381-404.
- Sert D., & Mercan E.** (2020). Effects of churning with different concentrations of ozonated water on particle size, texture, oxidation, melting and microbiological characteristics of butter. *International Dairy Journal*, 111, 104838.
- Sert D., Mercan E., & Kara Ü.** (2020). Butter production from ozone-treated cream: Effects on characteristics of physicochemical, microbiological, thermal and oxidative stability. *LWT - Food Science and Technology*, 131, 109722.
- Settanni L., & Moschetti G.** (2014). New trends in technology and identity of traditional dairy and fermented meat production processes: preservation of typicality and hygiene. *Trends in food science & technology*, 37(1), 51-58.
- Sharif Z. M., Mustapha F. A., Jai J., & Zaki N. A. M.** (2017). Review on methods for preservation and natural preservatives for extending the food longevity. *Chemical Engineering Research Bulletin*, 19.
- Shen C., Lyu L., Wang G., & Wu J.** (2019). A method for ultrasound probe calibration based on arbitrary wire phantom. *Cogent Engineering*, 6(1), 1592739.
- Shen J., Gou Q., Zhang Z., & Wang M.** (2016). Effects of high hydrostatic pressure on the quality and shelf-life of jujube (*Ziziphus jujuba Mill.*) pulp. *Innovative food science & emerging technologies*, 36, 166-172.
- Shoqairan Y. I., Ahmed I. A. M., Almaiman S. A., Al Juhaimi F. Y., Babiker E. E., Alsulami T. S., ... & Ali A. A.** (2023). Effect of microwave, ultraviolet and pulsed electric field treatments on ochratoxin A level and physicochemical quality attributes of paprika powder. *LWT*, 188, 115397.
- Sim S. Y., & Moraru C. I.** (2020). High-pressure processing of pea protein–starch mixed systems: Effect of starch on structure formation. *Journal of food process engineering*, 43(2), e13352.
- Sitzmann W., Vorobiev E., & Lebovka N.** (2016). Applications of electricity and specifically pulsed electric fields in food processing: Historical backgrounds. *Innovative food science & emerging technologies*, 37, 302-311.
- Skowron M., & Wantuch A.** (2020). Nowe technologie utrwalania żywności–badania modelowe. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1, 127-130.
- Smith T. J., Li X. E., & Drake M. A.** (2014). Norbixin and bixin partitioning in Cheddar cheese and whey. *Journal of dairy science*, 97(6), 3321-3327.
- Soares N. F., Vicente A. A., & Martins C. M.** (2016). *Food safety in the seafood industry: A practical guide for ISO 22000 and FSSC 22000 Implementation*. John Wiley & Sons.
- Soczewka I., & Ginter A.** (2013). Handel międzynarodowy artykułami rolno-spożywczymi w Polsce w latach 2007-2011. *Journal of Agribusiness and Rural Development*, 28(2), 225-234.
- Sokolowski Ł. M.** (2018). Nowa żywność a współczesne wyzwania żywnościowe–wybrane aspekty prawne. *Przegląd Prawa Rolnego*, 1(22), 123-132.

- Soman R., & Raman M.** (2016). HACCP system—hazard analysis and assessment, based on ISO 22000: 2005 methodology. *Food control*, 69, 191-195.
- Song H. P., Kim B., Choe J. H., Jung S., Moon S. Y., Choe W., & Jo C.** (2009). Evaluation of atmospheric pressure plasma to improve the safety of sliced cheese and ham inoculated by 3-strain cocktail *Listeria monocytogenes*. *Food Microbiology*, 26(4), 432-436.
- Song Q., Rune C. J. B., Thybo A. K., Clausen M. P., Orlén V., & Giacalone D.** (2023). Sensory quality and consumer perception of high pressure processed orange juice and apple juice. *LWT*, 173, 114303.
- Sotelo-Lara, D. M., Amador-Espejo G. G., Zamora-Gasga V. M., Gutiérrez-Martínez P., & Velázquez-Estrada R. M.** (2023). Effect of thermosonication on bioactive compounds, enzymatic and microbiological inactivation in nectar with strawberry by-products. *Journal of Food Science and Technology*, 60(5), 1580-1589.
- Sreedevi P., Jayachandran L. E., & Srinivasa Rao P.** (2020). Application of high-pressure processing for extending the shelf life of sugarcane juice under refrigerated conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(12), e14957.
- Stampfli R.** (1958). Reversible electrical breakdown of the excitable membrane of a Ranvier node. *Academia Brasileira de Ciências*, 30(1), 57-61.
- Starek A., Kobus Z., Sagan A., Chudzik B., Pawłat J., Kwiatkowski M., ... & Andrejko D.** (2021). Influence of ultrasound on selected microorganisms, chemical and structural changes in fresh tomato juice. *Scientific reports*, 11(1), 3488.
- Starek A., Pawłat J.** (2020). Niskotemperaturowe utrwalanie żywności pochodzenia zwierzęcego. *Ogólnopolski Informator Masarski*. 9(301), 8-30.
- Starek A., Pawłat J.** (2022). Kontrolowanie wyzwań związanych z bezpieczeństwem mikrobiologicznym mięsa za pomocą zimnej plazmy, ogólnopolski informator masarski, *Ogólnopolski Informator Masarski*. 6(322), 4-24.
- Starek A., Pawłat J., Chudzik B., Kwiatkowski M., Terebun P., Sagan A., & Andrejko D.** (2019). Evaluation of selected microbial and physicochemical parameters of fresh tomato juice after cold atmospheric pressure plasma treatment during refrigerated storage. *Scientific Reports*, 9(1), 8407.
- Starek A., Sagan A., Andrejko D., Chudzik B., Kobus Z., Kwiatkowski M., ... & Pawłat J.** (2020). Possibility to extend the shelf life of NFC tomato juice using cold atmospheric pressure plasma. *Scientific Reports*, 10(1), 20959.
- Starek-Wójcicka A., Grządka E., Sagan A., Terebun P., Kwiatkowski M., Zarzeczny D., ... & Pawłat J.** (2023). Wpływ obróbki zimną plazmą atmosferyczną na jakość świeżego soku tłoczonego z marchwi. *Żywność, Nauka, Technologia, Jakość*, 30(3), 181-197.
- Starek-Wójcicka A., Różyło R., Niedźwiedz I., Kwiatkowski M., Terebun P., Polak-Berecka M., & Pawłat J.** (2022). Pilot study on the use of cold atmospheric plasma for preservation of bread. *Scientific reports*, 12(1), 22003.
- Starek-Wójcicka A., Sagan A., Terebun P., Kwiatkowski M., Osmólska E., Krajewska M., ... & Pawłat J.** (2022). Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. *Applied Sciences*, 13(1), 578.
- Stratakos A. C., Inguglia E. S., Linton M., Tollerton J., Murphy L., Corcionivoschi N., ... & Tiwari B. K.** (2019). Effect of high pressure processing on the safety, shelf life and quality of raw milk. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 325-333.
- Sun Y., Wang Q., Jin H., Li Z., & Sheng L.** (2021). Impact of ozone-induced oxidation on the textural, moisture, micro-rheology and structural properties of egg yolk gels. *Food Chemistry*, 361(1), 130075.
- Suprpto D., Radiati L. E., Mahdi C., & Evanuarini H.** (2021). Physicochemical Quality and Microbial Activity of Dairy Milk with Ozonation. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Ternak (JI-TEK)*, 16(2), 117-124.

- Swami Hulle N. R., & Rao P. S.** (2016). Effect of high pressure pretreatments on structural and dehydration characteristics of aloe vera (*Aloe barbadensis Miller*) cubes. *Drying Technology*, 34(1), 105-118.
- Szajner P., & Szczepaniak I.** (2020). The evolution of the agri-food sector in terms of economic transformation, membership in the EU and globalization of the world economy. *Problems of Agricultural Economics/Zagadnienia Ekonomiki Rolnej*, 61-85.
- Szczepaniak I., & Wigier M.** (2020). Polski biznes rolno-spożywczy wczoraj i dzisiaj-czynniki sukcesu. In *Instytucjonalne i strukturalne aspekty rozwoju rolnictwa i obszarów wiejskich. Księga poświęcona pamięci dr hab. Adama Sadowskiego Profesora Uniwersytetu w Białymstoku*, red. nauk. R. Przygodzka, E. Gruszewska (233-256). Wydawnictwo Uniwersytetu w Białymstoku.
- Szczepaniak I., Ambroziak L., & Drożdż J.** (2020). Wpływ pandemii COVID-19 na przetwórstwo spożywcze i eksport rolno-spożywczy Polski. *Ubezpieczenia w Rolnictwie-Materiały i Studia*, 1(73), 117-139.
- Szczepańska J., Pinto C. A., Skąpska S., Saraiva J. A., & Marszałek K.** (2021). Effect of static and multi-pulsed high pressure processing on the rheological properties, microbial and physico-chemical quality, and antioxidant potential of apple juice during refrigerated storage. *LWT*, 150, 112038.
- Szkiel A.** (2016). Orientacja na klienta w wymaganiach normy ISO 9001: 2015. *Marketing i Zarządzanie*, 44(3), 83-93.
- Szosland-Faltyn A., Krolasik J., & Polak E.** (2013). Ozonowanie, czy promieniowanie ultrafioletowe? Niekonwencjonalne techniki utrwalania żywności zapewniające bezpieczeństwo mikrobiologiczne. *Chłodnictwo: organ Naczelnej Organizacji Technicznej*, 48(5), 38-42.
- Świdorski F., Dybkowska E., Wrońska A., & Kluszczyńska D.** (2012). Minimalne przetwarzanie żywności-korzyści i zagrożenia. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, (2), 108-115.
- Tabla R., & Roa I.** (2022). Use of gaseous ozone in soft cheese ripening: Effect on the rind microorganisms and the sensorial quality. *LWT*, 170, 114066.
- Takahashi N., Kumagai T., Shimizu M., Suzuki T., & Ohtsuki T.** (2007). Removal of dissolved organic carbon and color from dyeing wastewater by pre-ozonation and subsequent biological treatment using test-scale plant. *Ozone: Science and Engineering*, 29(2), 139-145.
- Tanaka T., & Morino Y.** (1970). Coriolis interaction and anharmonic potential function of ozone from the microwave spectra in the excited vibrational states. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 33(3), 538-551.
- Tappi S., Gozzi G., Vannini L., Berardinelli A., Romani S., Ragni L., & Rocculi P.** (2016). Cold plasma treatment for fresh-cut melon stabilization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 225-233.
- Tappi S., Nissen L., Casciano F., Antonelli G., Chiarello E., Picone G., ... & Rocculi P.** (2023). Effect of cold plasma generated with different gas mixtures on safety, quality and nutritional aspects of fresh sea bream fillets. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 89, 103477.
- Tarabová B., Tampieri F., Maran E., Marotta E., Ostrihoňová A., Krewing M., & Machala Z.** (2021). Chemical and antimicrobial effects of air non-thermal plasma processing of fresh apple juice with focus on safety aspects. *Foods*, 10(9), 2055.
- Tonello-Samson C., Queirós R. P., & González-Angulo M.** (2020). Advances in high-pressure processing in-pack and in-bulk commercial equipment. In *Present and future of high pressure processing* (pp. 297-316). Elsevier.
- Tongdonyod S., Thikham S., Kittiwachana S., Wichaphon J., & Klangpetch W.** (2023). Optimization of pulsed electric fields combined with mild heat treatment on microbial inactivation of tender coconut water and evaluation of quality attributes during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 90, 103507.

- Toyokawa Y., Yagyu Y., Misawa T., & Sakudo A.** (2017). A new roller conveyer system of non-thermal gas plasma as a potential control measure of plant pathogenic bacteria in primary food production. *Food Control*, 72, 62-72.
- Trambarulo R., Ghosh S. N., Burrus Jr C. A., & Gordy W.** (1953). The molecular structure, dipole moment, and g factor of ozone from its microwave spectrum. *The Journal of Chemical Physics*, 21(5), 851-855.
- Tseng C., & Li C.** (2008). Inactivation of surface viruses by gaseous ozone. *Journal of environmental health*, 70(10), 56-63.
- Tsevdou M., Ouli-Rousi M., Soukoulis C., & Taoukis P.** (2020). Impact of high-pressure process on probiotics: Viability kinetics and evaluation of the quality characteristics of probiotic yoghurt. *Foods*, 9(3), 360.
- Tzortzakis N., Borland A., Singleton I., & Barnes J.** (2007). Impact of atmospheric ozone-enrichment on quality-related attributes of tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 45(3), 317-325.
- Usag J., Acosta, Ó., Churey J. J., Padilla-Zakou, O. I., & Worobo, R. W.** (2021). Evaluation of high pressure processing (HPP) inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella enterica*, and *Listeria monocytogenes* in acid and acidified juices and beverages. *International Journal of Food Microbiology*, 339, 109034.
- Vega-Mercado H., Gongora-Nieto M. M., Barbosa-Canovas G. V., & Swanson B. G.** (2007). Pulsed electric fields in food preservation. In *Handbook of food preservation*. CRC Press. 801-832.
- Verma V. C.** (2018). Applications and investigations of ozone in cereal grain storage and processing: Benefits and potential drawbacks. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7, 5034-5041.
- Vernes L., Abert-Vian M., El Maâtaoui M., Tao Y., Bornard I., & Chemat F.** (2019). Application of ultrasound for green extraction of proteins from spirulina. Mechanism, optimization, modeling, and industrial prospects. *Ultrasonics sonochemistry*, 54, 48-60.
- Waghmare R., Kumar M., Yadav R., Mhatre P., Sonawane S., Sharm S., ... & Lorenzo, J. M.** (2023). Application of ultrasonication as pre-treatment for freeze drying: An innovative approach for the retention of nutraceutical quality in foods. *Food Chemistry*, 404, 134571.
- Wan Z., Misra N. N., Li G., & Keener K. M.** (2021). High voltage atmospheric cold plasma treatment of *Listeria innocua* and *Escherichia coli* K-12 on Queso Fresco (fresh cheese). *LWT*, 146, 111406.
- Wang C. Y., Huang H. W., Hsu C. P., Shyu Y. T., & Yang B. B.** (2013). Inactivation and morphological damage of *Vibrio parahaemolyticus* treated with high hydrostatic pressure. *Food Control*, 32(2), 348-353.
- Wason S., Verma T., & Subbiah J.** (2021). Validation of process technologies for enhancing the safety of low-moisture foods: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(5), 4950-4992.
- Weaver J. C.** (2000). Electroporation of cells and tissues. *IEEE transactions on plasma science*, 28(1), 24-33.
- Wiktoria A., & Witrowa-Rajchert D.** (2012). Zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego do wspomaganie procesów usuwania wody z tkanek roślinnych. *Żywność Nauka Technologia Jakość*, 2(81), 22-32.
- Wisniewska J.** (2010). Globalizacja polskiego sektora rolno-spożywczego po wejściu do Unii Europejskiej. *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu*, 12(1), 263-269.
- Wu D., Tu M., Wang Z., Wu C., Yu, C., Battino M., ... & Du M.** (2020). Biological and conventional food processing modifications on food proteins: Structure, functionality, and bioactivity. *Biotechnology advances*, 40, 107491.

- Wu T., Y X., Hu, A., Zhang L., Jin Y., & Abid M.** (2015). Ultrasonic disruption of yeast cells: Underlying mechanism and effects of processing parameters. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 28, 59-65.
- Wu W., Xiao G., Yu Y., Xu Y., Wu J., Peng J., & Li L.** (2021). Effects of high pressure and thermal processing on quality properties and volatile compounds of pineapple fruit juice. *Food Control*, 130, 108293.
- Xu X., Xiao S., Wang L., Niu D., Gao W., Zeng X. A., ... & Wang R.** (2024). Pulsed electric field enhances glucose glycation and emulsifying properties of bovine serum albumin: Focus on polarization and ionization effects at a high reaction temperature. *International Journal of Biological Macromolecules*, 257, 128509.
- Yamamoto K.** (2021). High hydrostatic pressure in food industry applications. In *Nontraditional Activation Methods in Green and Sustainable Applications* (pp. 559-574). Elsevier.
- Yang X., Zhang C., Li Q., & Cheng J. H.** (2023). Physicochemical properties of plasma-activated water and its control effects on the quality of strawberries. *Molecules*, 28(6), 2677.
- Yao H., Jin Y., Zhang X., Yang N., & Xu X.** (2023). Influence of pulsed electric field on thawing of frozen pork: Physical properties, fat oxidation and protein structure. *Food Bioscience*, 56, 103175.
- Yüceer M., Aday M. S., & Caner C.** (2016). Ozone treatment of shell eggs to preserve functional quality and enhance shelf life during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(8), 2755–2763.
- Yusuf I. M., Taher, Z. M., Rahmat Z., & Chua L. S.** (2022). A review of ultrasound-assisted extraction for plant bioactive compounds: Phenolics, flavonoids, thymols, saponins and proteins. *Food research international*, 157, 111268.
- Zelmat A., Hadi H., Amiali M., Gashovska T., & Tilmatine A.** (2017). Determination and analysis of the electrical components of a PEF treated equivalent circuit of potato tissue. *International journal of environmental studies*, 74(2), 262-274.
- Zhang W., Xiao S., & Ahn D. U.** (2013). Protein oxidation: Basic principles and implications for meat quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(11), 1191–1201.
- Zhang Y., Zhang J., Zhang Y., Hu H., Luo S., Zhang L., ... & Li P.** (2021). Effects of in-package atmospheric cold plasma treatment on the qualitative, metabolic and microbial stability of fresh-cut pears. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(11), 4473-4480.
- Zhang Z. H., Wang L. H., Zeng X. A., Ha Z., & Brennan, C. S.** (2019). Non-thermal technologies and its current and future application in the food industry: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(1), 1-13.
- Zhou D., Li T., Cong K., Suo A., & Wu C.** (2022). Influence of cold plasma on quality attributes and aroma compounds in fresh-cut cantaloupe during low temperature storage. *LWT*, 154, 112893.
- Zhou R., Rezaeimotlagh A., Zhou R., Zhang T., Wang P., Hong J., ... & Cullen P. J.** (2022). In-package plasma: From reactive chemistry to innovative food preservation technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 120, 59-74.
- Zhu F.** (2018). Effect of ozone treatment on the quality of grain products. *Food Chemistry*, 264, 358-366.
- Zimmerman U.** (1968). Electric breakdown, electroporabilization and electrofision. *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology*, 105, 196-256.
- Zimmermann U., Pilwat G., & Riemann F.** (1974). Dielectric breakdown of cell membranes. *Biophysical journal*, 14(11), 881-899.
- Ziuzina D., Misra N. N., Cullen P. J., Keener K. M., Mosnier J. P., Vilaró I., ... & Bourke P.** (2016). Demonstrating the potential of industrial scale in-package atmospheric cold plasma for decontamination of cherry tomatoes. *Plasma Medicine*, 6(3-4).
- Ziyaina M., & Rasco B.** (2021). Inactivation of microbes by ozone in the food industry: A review. *African Journal of Food Science*, 15(3), 113–120.

- Zou Y., Kang D., Liu R., Qi J., Zhou G., & Zhang W.** (2018). Effects of ultrasonic assisted cooking on the chemical profiles of taste and flavor of spiced beef. *Ultrasonics Sonochemistry*, 46, 36-45.
- Zuba-Ciszewska M.** (2020). Rola przemysłu spożywczego w gospodarce Polski. *Nierówności społeczne a wzrost gospodarczy*, 64, 69-86.
- Żakowska-Biemans S.** (2009). Bezpieczeństwo żywności w opinii polskich konsumentów. *Bromatologia i Chemia Toksykologiczna*, 3(42), 1000-1005.
- Żywica R., Smoczyński S. S., Banach J. K., & Modzelewska-Kapituła M.** (2017). Techniques and technologies ensuring food safety. *Towaroznawcze Problemy Jakości*, (4), 33-41.

SPIS STRON INTERNETOWYCH

<https://www.pekao.com.pl/analizy-makroekonomiczne/analizy-sektorowe/opracowania-na-temat-poszczeg%C3%B3lnych-bran%C5%BC/sektor-rolno-spozywczy0.html>
<https://holstein.pl/rekordowy-eksport-zywnosci-z-polski-w-2021-r/>
<https://www.kierunekpompy.pl/arttykul,57520,suchobieg-kawitacja-i-pierscien-cieczowy.html>
<http://rada-zywnosc.pfpz.pl/charakterystyka-branzy-spozywczej-17134>
https://www.paih.gov.pl/dlaczego_polska/sektory/spozywczy/
<https://www.spozywcetechnologie.pl/miesne-technologie/wiadomosci-branzowe/669/przemysl-rolno-spozywczy-polsce-analiza-ryнку>
<https://www.gov.pl/web/wsse-gdansk/akty-prawne>
<https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/high-pressure-processing/en/hpp-process>
<https://www.stavyrefit.cz/>
<https://cymes.pl/>
<https://www.ecdc.europa.eu/en>
<https://www.hiperbaric.com/en/high-pressure-processing-hpp-suitable-and-not-suitable-products/>

NIEKONWENCJONALNE METODY UTRWALANIA PRODUKTÓW ROLNO-SPOŻYWCZYCH

Streszczenie. Obecnie konsumenci zwracają coraz większą uwagę na świeżą, minimalnie przetworzoną żywność o wysokiej zawartości substancji biologicznie aktywnych. Konwencjonalnie stosowana pasteryzacja może powodować zmiany jakości wyrobów, wpływając na ich negatywny odbiór przez konsumentów. Optymalny sposób utrwalania musi więc zapewniać bezpieczeństwo mikrobiologiczne, a także walory odżywcze. Nie bez znaczenia jest również stan środowiska naturalnego, jaki pozostawimy przyszłym pokoleniom. Dodatkowo, należy prowadzić działania pozwalające ograniczyć problem marnowania jedzenia. Aby zrealizować te cele można, stosować niekonwencjonalne zabiegi przetwarzania, wydłużające czas przydatności do spożycia wielu artykułów żywnościowych. Ze względu na różnorodność biologiczną poszczególnych z nich, odmienne właściwości urządzeń oraz możliwość zastosowania obróbki na różnych etapach produkcji, w niniejszej pracy opisano mechanizmy i potencjalne perspektywy wykorzystania pulsacyjnego pola elektrycznego, ozonowania, wysokich ciśnień hydrostatycznych, sonikacji, a także plazmy nietermicznej.

UNCONVENTIONAL METHODS OF PRESERVATION AGRI-FOOD PRODUCTS

Summary. Nowadays, consumers pay more and more attention to fresh, minimally processed food with a high content of biologically active substances. Conventionally used pasteurization may cause changes in the quality of products, affecting their negative reception by consumers. The optimal method of preservation must therefore ensure microbiological safety as well as nutritional value. The condition of the natural environment that we leave to future generations is also important. Additionally, actions should be taken to reduce the problem of food waste. To achieve these goals, unconventional processing procedures can be used to extend the shelf life of many food products. Due to the biological diversity of each of them, different properties of devices and the possibility of using processing at various stages of production, this work describes the mechanisms and potential prospects for the use of pulsed electric field, ozonation, high hydrostatic pressures, sonication, and nonthermal plasma.

SPIS RYSUNKÓW

- Rys. 1. Najważniejsze branże polskiego sektora rolno-spożywczego
Rys. 2. Struktura towarowa polskiego eksportu rolno-spożywczego w 2021 roku
Rys. 3. Procentowy wskaźnik wolumenu w obrotach handlu zagranicznego w Polsce w latach 2019-2020
Rys. 4. Ramy systemu zarządzania jakością skupione wokół podejścia proceduralnego
Rys. 5. Kluczowe obszary normy ISO 22000
Rys. 6. Zasady systemu HACCP
Rys. 7. Tradycyjne metody konserwacji żywności
Rys. 8. Zobrazowanie wpływu pola elektrycznego na komórki
Rys. 9. Najczęściej stosowane kształty impulsów podczas obróbki PEF w mleku i przetworach mlecznych
Rys. 10. Schemat obwodu układu generującego PEF (A), wykres przebiegu napięcia i prądu podczas eksperymentu z systemem PEF (B).
Rys. 11. Schemat układu przepływowego i stacjonarnego wykorzystującego PE
Rys. 12. Podstawowy model cząsteczki ozonu
Rys. 13. Rozpuszczalność ozonu w zależności od temperatury
Rys. 14. Podstawowe typy ozonatorów z wyładowaniami barierowymi
Rys. 15. Wysokowydajny generator ozonu
Rys. 16. Schemat procesu obróbki metodą HPP
Rys. 17. Rodzaje dźwięków wyróżnione ze względu na ich częstotliwość
Rys. 18. Przebieg procesu kawitacji
Rys. 19. Schemat myjki ultradźwiękowej
Rys. 20. Schemat sondy ultradźwiękowej
Rys. 21. Przykłady reaktorów plazmowych (A-reaktor płaski, B-dysza plazmowa, C- reaktor typu glide-arc)
Rys. 22. Schematyczny przegląd powszechnie stosowanych systemów zimnej plazmy atmosferycznej rozważanych do zastosowania w przemyśle spożywczym.
Rys. 23. Prototypowe urządzenie SAFE BAG

SPIS TABEL

Tabela 1. Wykaz wybranych aktów prawnych Unii Europejskiej i krajowych dotyczących bezpieczeństwa żywności, żywienia oraz materiałów i wyrobów przeznaczonych do kontakt

Tabela 2. Porównanie niektórych właściwości fizycznych ozonu i tlenu

Tabela 3. Barwa ozonu w zależności od fazy

Tabela 4. Szanse i zagrożenia wynikające ze stosowania niekonwencjonalnych metod utrwalania żywności

ZALĄCZNIK 1

Tabela 1. Wykaz wybranych aktów prawnych Unii Europejskiej i krajowych dotyczących bezpieczeństwa żywności, żywienia oraz materiałów i wyrobów przeznaczonych do kontaktu (opracowanie własne na podstawie www.gov.pl)

ROZPORZĄDZENIA/USTAWY/DECYZJE		
	Akty prawne Unii Europejskiej	Krajowe ustawy i rozporządzenia
Żywność – urzędowa kontrola	Rozporządzenie (WE) nr 178/2002 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 28 stycznia 2002 r. ustanawiające ogólne zasady prawa żywnościowego, powołujące Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności oraz ustanawiające procedury w zakresie bezpieczeństwa żywności (Dz. Urz. L 31 z 1.2.2002, str. 1—24; Polskie wydanie specjalne: Rozdział 15 Tom 06 P. 463 – 486 ze zm.).	Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 26 lipca 2016 r. w sprawie grup środków spożywczych przeznaczonych do sprzedaży dzieciom i młodzieży w jednostkach systemu oświaty oraz wymagań, jakie muszą spełniać środki spożywcze stosowane w ramach żywienia zbiorowego dzieci i młodzieży w tych jednostkach (Dz. U z 2016 r., poz. 1154).
	Rozporządzenie (WE) nr 852/2004 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 kwietnia 2004 r. w sprawie higieny środków spożywczych (Dz. Urz. L 139/1 z 30.4.2004; Polskie wydanie specjalne: Rozdział 13 Tom 34 P. 319-337 ze zm.).	Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 6 czerwca 2007 r. w sprawie dostaw bezpośrednich środków spożywczych (Dz. U. Nr 112, poz. 774).
	Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) nr 828/2014 z dnia 30 lipca 2014 r. w sprawie przekazywania konsumentom informacji na temat nieobecności lub zmniejszonej zawartości glutenu w żywności (Dz. Urz. UE L 228/5 z 31.7.2014).	Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 kwietnia 2007 r. w sprawie pobierania i przechowywania próbek żywności przez zakłady żywienia zbiorowego typu zamkniętego (Dz. U. Nr 80, poz. 545).
	Rozporządzenie Komisji (UE) nr 210/2013 z dnia 11 marca 2013 r. w sprawie zatwierdzania zakładów produkujących kiełki zgodnie z rozporządzeniem (WE) nr 852/2004 Parlamentu Europejskiego i Rady (Dz. Urz. UE L 68/24 z 12.3.2013).	Rozporządzenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 17 października 2002 r. w sprawie nadania funkcjonariuszom organów Państwowej Inspekcji Sanitarnej uprawnień do nakładania grzywnien w drodze mandatu karnego (t. j. Dz. U. z 2020 r. poz. 1364).
	Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) nr 208/2013 z dnia 11 marca 2013 r. w sprawie wymogów dotyczących możliwości śledzenia kiełków i nasion przeznaczonych do produkcji kiełków (Dz. Urz. UE L 68/16 z 12.3.2013)	Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 29 maja 2007 r. w sprawie wzorów dokumentów dotyczących rejestracji i zatwierdzania zakładów produkujących lub wprowadzających do obrotu żywność podlegających urzędowej kontroli Państwowej Inspekcji Sanitarnej (Dz. U. Nr 106, poz. 730 ze zm.).

	<p>Decyzja Wykonawcza Komisji nr 2013/63/UE z dnia 24 stycznia 2013 r. przyjmująca wytyczne dotyczące wdrażania szczegółowych warunków dotyczących oświadczeń zdrowotnych określonych w art. 10 rozporządzenia (WE) nr 1924/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady (Dz. Urz. L 22/25 z 25.1.2013).</p>	<p>Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 5 października 2017 r. w sprawie opłat za czynności wykonywane przez organy Państwowej Inspekcji Sanitarnej w ramach urzędowych kontroli żywności (Dz. U. z 2017, poz. 2012 ze zm.).</p>
<p>Żywność – znakowanie</p>	<p>Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 1169/2011 z dnia 25 października 2011r. w sprawie przekazywania konsumentom informacji na temat żywności, zmiany rozporządzeń Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1924/2006 i (WE) nr 1925/2006 oraz uchylenia dyrektywy Komisji 87/250/EWG, dyrektywy Rady 90/496/EWG, dyrektywy Komisji 1999/10/WE, dyrektywy 2000/13/WE Parlamentu Europejskiego i Rady, Dyrektyw Komisji 2002/67/WE i 2008/5/WE oraz rozporządzenia Komisji (WE) nr 608/2004 (Dz. Urz. UE L 304/18 z 22.11.2011 ze zm.).</p>	<p>Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 lutego 2009 r. w sprawie ogólnych odstępstw od wymagań higienicznych w zakładach produkujących żywność tradycyjną niezwierzęcego pochodzenia (Dz. U. z 2009 nr 37 poz. 294)</p>
<p>Żywność – oświadczenia żywieniowe i zdrowotne</p>	<p>Rozporządzenie (WE) nr 1924/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 grudnia 2006 roku w sprawie oświadczeń żywieniowych i zdrowotnych dotyczących żywności (Dz. Urz. L 404/9 z 30.12.2006; Sprostowanie Dz. Urz. UE L 12 z 18.1.2007, str. 3-18 ze zm.).</p>	
<p>Żywność – oświadczenia żywieniowe i zdrowotne</p>	<p>Rozporządzenie Komisji (UE) Nr 432/2012 z dnia 16 maja 2012 r. ustanawiające wykaz dopuszczonych oświadczeń zdrowotnych dotyczących żywności, innych niż oświadczenia odnoszące się do zmniejszenia ryzyka choroby oraz rozwoju i zdrowia dzieci (Dz. Urz. UE L 136/1 z 25.5.2012 ze zm.).</p>	
<p>Substancje dodatkowe, aromaty, enzymy i rozpuszczalniki</p>	<p>Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1333/2008 z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie dodatków do żywności (Dz. Urz. L 354/16 z 31.12.2008 ze zm.).</p>	<p>Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 4 września 2008 r. w sprawie rozpuszczalników ekstrakcyjnych, które mogą być stosowane w produkcji żywności (t. j. Dz. U. z 2020, poz. 1011).</p>
	<p>Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1332/2008 z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie enzymów spożywczych, zmieniające dyrektywę Rady 83/417/EWG, rozporządzenie Rady (WE) nr 1493/1999, dyrektywę 2000/13/WE, dyrektywę Rady 2001/112/WE oraz rozporządzenie (WE) 258/97 (Dz. Urz. L 354/7 z 31.12.2008 ze zm.).</p>	
	<p>Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) nr 872/2012 z dnia 1 października 2012 r. w sprawie przyjęcia wykazu substancji aromatycznych prze-</p>	

	<p>widzianego rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 2232/96, włączenia go do załącznika I do rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1334/2008 oraz uchylecia rozporządzenia Komisji (WE) nr 1565/2000 i decyzji Komisji 1999/217/WE (Dz. Urz. L 267 z 2.10.2012, str. 1 – 161 ze zm.).</p>	
	<p>Rozporządzenie (WE) nr 2065/2003 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 10 listopada 2003 r. w sprawie środków aromatyzujących dymu wędzarniczego używanych lub przeznaczonych do użycia w środkach spożywczych lub na ich powierzchni (Dz. Urz. L 309 z 26.11.2003, str. 1 – 8; Polskie wydanie specjalne: Rozdział 13 Tom 32 P. 661-669 ze zm.).</p>	
	<p>Rozporządzenie Komisji (UE) nr 231/2012 z dnia 9 marca 2012 r. ustanawiające specyfikacje dla dodatków do żywności wymienionych w załącznikach II i III do rozporządzenia (WE) nr 1333/2008 Parlamentu Europejskiego i Rady. (Dz. Urz. L 83/1 z 22.3.2012)</p>	
Genetycznie zmodyfikowana żywność – GMO	<p>Rozporządzenie Komisji (WE) nr 641/2004 z dnia 6 kwietnia 2004r. w sprawie szczegółowych zasad wykonywania rozporządzenia (WE) nr 1829/2003 Parlamentu Europejskiego i Rady odnoszącego się do wniosków o zatwierdzenie nowego typu żywności i paszy genetycznie zmodyfikowanej, powiadamiania o istniejących produktach oraz przypadkowym lub technicznie nieuniknionym występowaniu materiału genetycznie zmodyfikowanego, który pomyślnie przeszedł ocenę ryzyka (Dz. Urz. L 102 z 7.4.2004, str. 14 – 25; Polskie wydanie specjalne: Rozdział 13 Tom 34 P. 36 – 47)</p>	
	<p>Rozporządzenie (WE) nr 1829/2003 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 22 września 2003 roku w sprawie genetycznie zmodyfikowanej żywności i paszy (Dz. Urz. L 268/1 z 18.10.2003 ze zm.).</p>	
Nowa żywność	<p>Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2015/2283 z dnia 25 listopada 2015 r. w sprawie nowej żywności, zmieniające rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 1169/2011 oraz uchylające rozporządzenie (WE) nr 258/97 Parlamentu Europejskiego i Rady oraz rozporządzenie Komisji (WE) nr 1852/2001 (Dz. Urz. UE L 327/1 z 11.12.2015).</p>	
	<p>Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2017/2470 z dnia 20.12.2017 r. ustanawiające unijny wykaz nowej żywności zgodnie z rozporządzeniem PEiR (UE) 2015/2283 w sprawie nowej żywności (Dz. Urz. UE L 351/72 z 20.12.2017 ze zm.).</p>	

P4. Pawłat, J., Starek-Wójcicka, A., Krajewska, M., Sagan, A., Andrejko, D., Zdybel, B., **Osmólska, E.** (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243354. (MNiSW=75).

URZĄD PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ

DOKUMENT PATENTOWY

Na podstawie przepisów ustawy z dnia 30 czerwca 2000 r. Prawo własności przemysłowej (Dz. U. z 2023 r. poz. 1170) został udzielony na rzecz:

POLITECHNIKA LUBELSKA, Lublin, Polska; UNIWERSYTET PRZYRODNICZY W LUBLINIE, Lublin, Polska

PATENT

NR 243354

NA WYNAŁAZEK PT.

Sposób kondycjonowania soku sumakiem

*przedstawiony w opisie patentowym
włączonym do niniejszego dokumentu*

Patent trwa od dnia: **2022-09-02**

Warszawa, dnia 2023-08-08

Z upoważnienia Prezesa
Urzędu Patentowego

Monika Russek
SPECJALISTA

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10) **PL 243354 B1**

(12)

Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **442178**

(22) Data zgłoszenia: **2022.09.02**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2023.01.30 BUP 05/2023**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2023.08.07 WUP 32/2023**

(51) MKP:

A23L 2/02 (2006.01)

A23L 2/44 (2006.01)

A23L 3/3454 (2006.01)

(73) Uprawniony z patentu:

POLITECHNIKA LUBELSKA, Lublin, PL
UNIwersytet PRZYRODNICZY W LUBLINIE,
Lublin, PL

(72) Twórca(-y) wynalazku:

JOANNA PAWŁAT, Zemborzyce Podleśne, PL
AGNIESZKA STAREK-WÓJCICKA, Lublin, PL
MARTA KRAJEWSKA, Lublin, PL
AGNIESZKA SAGAN, Zakrzówek, PL
DARIUSZ ANDREJKO, Lublin, PL
BEATA ZDYBEL, Lublin, PL
EMILIA OSMÓLSKA, Lublin, PL

(74) Pełnomocnik:

Maciej Nowicki, Lublin, PL

(54) Tytuł:

Sposób kondycjonowania soku sumakiem

PL 243354 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób kondycjonowania świeżo tłoczonego soku poprzez dodatek przyprawy sumak ze sproszkowanego owocu sumaka (*Rhus coriaria* L), który to sposób przedłuża przydatność do spożycia przy stabilnej zawartości karotenoidów.

W publikacji da Silva, N. K. V., de Sousa Sabino, L. B., de Oliveira, L. S., de Vasconcelos Torres, L. B., & de Sousa, P. H. M. (2016). Effect of food additives on the antioxidant properties and microbiological quality of red guava juice. *Revista Ciência Agronômica*, 47(1), strony 77–85 oraz Pandey, L, Mogra, R., & Kumar, A. (2020). Effect of Preservative and Storage Temperatures on Total Soluble Solids and Antioxidant Activity of Carrot Based RTS Beverages. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(11), strony 2108–2123, a także pracy naukowej autorstwa Kaur, G., Aggarwal, P., & Javed, M. (2014). Effect of chemical additives on the shelf life of cucumber juice. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(1), strony 206–209 opisano wpływ dodatku sztucznych konserwantów (pirosiarczynu sodu, sorbinianu potasu, benzoesu sodu) na właściwości przeciwutleniające i jakość mikrobiologiczną nektaru z czerwonej guawy, całkowitą zawartość substancji rozpuszczalnych i działanie przeciwutleniające napojów na bazie marchwi, a także wydłużenie okresu przydatności do spożycia soku z ogórków podczas przechowywania.

W artykule naukowym autorstwa Pandey, A., & Negi, P. S. (2018). Use of Natural Preservatives for Shelf Life Extension of Fruit Juices. In *Fruit Juices*, Academic Press, strony 571–605 wykorzystano naturalne konserwanty w celu przedłużenia trwałości soków owocowych i warzywnych.

W badaniach naukowych Thongsona, C., Davidsona, P. M., Mahakarnchanakula, W., & Vibulsrestha, P. (2005), pt.: Antimicrobial effect of Thai spices against *Listeria monocytogenes* and *Salmonella typhimurium* DT104. *Journal of food protection*, 68(10), strony 2054–2058 wykorzystano przeciwdrobnoustrojowe działanie ekstraktów i olejków eterycznych przypraw: imbiru (*Zingiber officinale*), imbiru chińskiego „paluszka” (*Boesenbergia pandurata*) i kurkumy (*Curcuma longa*) w stosunku do soku jabłkowego.

W publikacji naukowej autorstwa Hashemi, J. M., & Qashqari, R. J. (2018). The shelf life stability of mixed fruit and vegetable juice with *Moringa oleifera* leaves extract. *Journal of Biochemical Technology*, 9(2), strony 21–31; Hashemi, J. M., Haridy, L. A., & Qashqari, R. J. (2018). Total Phenolic, Flavonoid and Antioxidant Compounds of Guava Whey Juice Fortified by *Moringa oleifera* Aqueous Extract to Extend Shelf-life. *International Journal of Pharmaceutical Research & Allied Sciences*, 7(2), strony 86–100, jak też publikacji Hashemi, J. M., Haridy, L. A., & Qashqari, R. J. (2018). The effect of *Moringa oleifera* leaves extract on extending the shelf life and quality of freshly sweet orange juice. *Journal of Biochemical Technology*, 9(4), strony 63–76 opisano działanie środka konserwującego w postaci ekstraktu z liści moringi olejodajnej odpowiednio na: właściwości przeciwutleniające napojów ananasowo-marchwiowo-imbrowych (łączonych w różnych proporcjach), soku z guawy oraz wydłużenie okresu przydatności do spożycia i jakość soku pomarańczowego.

W publikacji Larrosa, M., Llorach, R., Espín, J. C., & Tomás-Barberán, F. A. (2002). Increase of antioxidant activity of tomato juice upon functionalisation with vegetable byproduct extracts. *LWT-Food Science and Technology*, 35(6), strony 532–542 przedstawiono sposób zwiększenia aktywności przeciwutleniającej soku pomidorowego po funkcjonalizacji ekstraktami roślinnymi produktów ubocznych (liści i mniejszych głów kalafiora, przylistków karczocha, łusek i zewnętrznych pierścieni cebuli itp.).

Inne analizy przedstawione przez Silva, T. V. D., Iwassa, I. J., Sampaio, A. R., Ruiz, S. P., & Barros, B. C. B. (2021). Physicochemical, antioxidant, rheological, and sensory properties of juice produced with guava pulp and peel flour. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 93(4), strony 1–13 dotyczyły badania jakości pulpy z guawy wzbogaconej mąką przygotowaną ze skórek tego owocu będących produktem ubocznym.

Znana jest przyprawa sumak (*Rhus coriaria* L.) wykorzystywana do poprawy jakości mięsa i chleba opisana w publikacjach: Naseri Khalkhali, F., & Rahati Noveir, M. (2018). Effect of Sumac (*Rhus coriaria*) and Rosemary (*Rosmarinus officinalis*) Water extracts on microbial growth changes in ground beef meat. *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 1(2), strony 127–132; El Khatib, S., & Salame, A. (2019). Sumac (*Rhus coriaria*) extracts to enhance the microbiological safety of the red meat. *Food Science and Technology*, 7(4), strony 41–52; Sakhr, K., & El Khatib, S. (2019). The use of Syrian Sumac (*Rhus coriaria*) as a meat tenderizer: effect on fat, protein and collagen profiles on *pectoralis superficialis* cut. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 7(8), strony

1203–1215, a także Al-Marazeeq, K. M., Al-Rousan, W., Al-obaidy, K., & Al-obaidy, M. (2019). The effect of using water sumac (*Rhus coriaria* L.) extract on wheat pan bread quality characteristics. *Cereal Chemistry*, 96(5), strony 847–855 i Dziki, D., Cacak-Pietrzak, G., Hassoon, W. H., Gawlik-Dziki, U., Sułek, A., Różyło, R., & Sugier, D. (2021). The fruits of sumac (*Rhus coriaria* L.) as a functional additive and salt replacement to wheat bread. *LWT*, 136, 110346.

Celem wynalazku jest kondycjonowanie świeżo tłoczonego soku poprzez dodatek owocu sumaka (*Rhus coriaria*) przedłużające jego przydatność do spożycia z jednoczesnym zachowaniem ilości karotenoidów.

Istotą sposobu kondycjonowania soku jest to, że do wytłoczonego świeżego soku dodaje się zmielony owoc sumaka w ilości od 1 do 30 g na 1 l produktu.

Korzystnym skutkiem sposobu według wynalazku jest dekontaminacja mikrobiologiczna łatwego psującego się soku przy zachowaniu cennych barwników karotenoidowych. Zastosowanie sposobu kondycjonowania pozwala na przedłużenie przydatności do spożycia świeżo tłoczonego soku oraz na redukcję mikroflory powodującej jego psucie, co w konsekwencji zmniejsza ilości odpadów spożywczych. Kondycjonowanie soku sumakiem daje w perspektywie realne oszczędności ekonomiczne, przyczynia się do poprawy jakości oferowanych na rynku soków oraz zwiększa udział innowacyjnych produktów polskiej gospodarki w rynku międzynarodowym.

W przykładach próbę kontrolną stanowił sok bez udziału sumaka. Wyroby zostały umieszczone w lodówce, w której panowała temperatura 6°C i badane po 24, 48 i 72 godzinach przechowywania.

Przykład 1

Kondycjonowanie świeżo tłoczonego soku, zawierającego naturalną mikroflorę odpowiedzialną za psucie wyrobu przeprowadzono w następujący sposób: do świeżego soku marchwiowego, wytłoczonego na wyciskarce wolnoobrotowej Sana EUJ-707, Omega Products, Korea Południowa o parametrach pH zawierających się w przedziale od 6,25 do 6,39 dodano sproszkowany owoc sumaka (*Rhus coriaria* L.) o maksymalnej ziarnistości 0,5 mm w ilości przedstawionej w tabeli 1 i przechowywano chłodniczo przez trzy doby.

W celu oceny skuteczności działania zastosowanego dodatku w dekontaminacji mikrobiologicznej próbki soku po 24, 48 i 72 godzinach chłodniczego przechowywania w 6°C analizowano pod kątem ogólnej liczby drobnoustrojów tlenowych. Czynności te przeprowadzono w komorze laminarnej CRUMA 670FL, El Prat de Llobregat, Barcelona, Hiszpania w warunkach aseptycznych. W celu zliczenia ogólnej liczby drobnoustrojów tlenowych wykonano seryjne rozcieńczenia dziesiętne próbek, a następnie posiewy po 100 µl na powierzchnię płytek z agarem odżywcym, które następnie inkubowano przez 72 godziny w temp. 30°C, według normy PN-EN ISO 4833-2:2013-12. Dla każdego soku analizy przeprowadzono dwukrotnie, a posiewy z każdej próbki wykonywano w trzech powtórzeniach. Wyniki podano jako wartości średnie ($n = 6$) \log_{10} jtk/g \pm odchylenie standardowe.

Przydatność do spożycia soku wzbogaconego sumakiem po 24, 48 i 72 godzinach ustalono na podstawie kryterium dopuszczalnej zawartości mezofilnych drobnoustrojów tlenowych dla pasteryzowanych soków owocowych i warzywnych, określonego w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 13 stycznia 2003 r., z późniejszymi zmianami, w sprawie maksymalnych poziomów zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych, które mogą znajdować się w żywności, składnikach żywności, dozwolonych substancjach dodatkowych, substancjach pomagających w przetwarzaniu albo na powierzchni żywności.

pH próbek świeżo tłoczonego soku mierzono za pomocą cyfrowego pehametru 780 pH Meter, Metrohm, Herisau, Szwajcaria. 50 ml produktu umieszczano w zlewce i mieszano w sposób ciągły za pomocą mieszadła magnetycznego. Pehametr skalibrowano za pomocą dostępnych w handlu roztworów buforowych o pH 7,0 i 4,0. Badania wykonano w trzech powtórzeniach przeprowadzając doświadczenia dwukrotnie. Wyniki podano jako wartości średnie ($n = 6$) pH \pm odchylenie standardowe.

Oznaczenie zawartości karotenoidów w soku marchwiowym kontrolnym oraz poddanym kondycjonowaniu sumakiem dokonano na spektrofotometrze UV-Vis Helios Omega 3, Waltham, Massachusetts, USA. Metoda polegała na wyekstrahowaniu związków mieszaniną: acetonu z 0,2% BHT, etanolu i heksanu w proporcjach 1:1:2 z badanej próbki i oznaczeniu ich zawartości przez pomiar absorbancji fazy heksanowej, wiązka światła o długości fali $\lambda = 450$ nm, wedle metodyki González-Casado, S., Martín-Belloso, O., Elez-Martínez, P., & Soliva-Fortuny, R. (2018). Enhancing the carotenoid content of tomato fruit with pulsed electric field treatments: Effects on respiratory activity and quality attributes.

Postharvest Biology and Technology, 137, strony 113–118. Badania wykonano w trzech powtórzeniach przeprowadzając doświadczenia dwukrotnie. Wyniki podano jako wartości średnie ($n = 6$) mg/100 g \pm odchylenie standardowe.

Wyniki analiz świeżo tłoczonych soków marchwiowych wzbogaconych sumakiem w zestawieniu z niekondycjonowanym produktem (kontrolnym) podano w tabeli 1.

Przykład 2

Kondycjonowanie świeżo tłoczonego soku, zawierającego naturalną mikroflorę odpowiedzialną za psucie wyrobu przeprowadzono w następujący sposób: do świeżego soku pomidorowego, wytłoczonego na wyciskarce wolnoobrotowej Sana EUJ-707, Omega Products, Korea Południowa, o parametrach pH zawierających się w przedziale od 3,97 do 4,52 dodano sproszkowany owoc sumaka (*Rhus coriaria* L.) o maksymalnej ziarnistości 0,5 mm w ilości przedstawionej w tabeli 2 i przechowywano chłodniczo przez trzy doby.

W celu oceny skuteczności działania zastosowanego dodatku w dekontaminacji mikrobiologicznej próbki soku po 24, 48 i 72 godzinach chłodniczego przechowywania w 6°C analizowano pod kątem ogólnej liczby drobnoustrojów tlenowych. Czynności te przeprowadzono w komorze laminarnej CRUMA 670FL, El Prat de Llobregat, Barcelona, Hiszpania w warunkach aseptycznych. W celu zliczenia ogólnej liczby drobnoustrojów tlenowych wykonano seryjne rozcieńczenia dziesiętne próbek, a następnie posiewy po 100 μ l na powierzchnię płytek z agarem odżywczym, które następnie inkubowano przez 72 godziny w temp. 30°C, według normy PN-EN ISO 4833-2:2013-12. Dla każdego soku analizy przeprowadzono dwukrotnie, a posiewy z każdej próbki wykonywano w trzech powtórzeniach. Wyniki podano jako wartości średnie ($n = 6$) \log_{10} jtk/g \pm odchylenie standardowe.

Przydatność do spożycia soku wzbogaconego sumakiem po 24, 48 i 72 godzinach ustalono na podstawie kryterium dopuszczalnej zawartości mezofilnych drobnoustrojów tlenowych dla pasteryzowanych soków owocowych i warzywnych, określonego w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 13 stycznia 2003 r., z późniejszymi zmianami, w sprawie maksymalnych poziomów zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych, które mogą znajdować się w żywności, składnikach żywności, dozwolonych substancjach dodatkowych, substancjach pomagających w przetwarzaniu albo na powierzchni żywności.

pH próbek świeżo tłoczonego soku mierzono za pomocą cyfrowego pehametru 780 pH Meter, Metrohm, Herisau, Szwajcaria. 50 ml produktu umieszczano w zlewce i mieszano w sposób ciągły za pomocą mieszadła magnetycznego. Pehametr skalibrowano za pomocą dostępnych w handlu roztworów buforowych o pH 7,0 i 4,0. Badania wykonano w trzech powtórzeniach przeprowadzając doświadczenia dwukrotnie. Wyniki podano jako wartości średnie ($n = 6$) pH \pm odchylenie standardowe.

Oznaczenie zawartości karotenoidów w soku pomidorowym kontrolnym oraz poddanym kondycjonowaniu sumakiem dokonano na spektrofotometrze UV-Vis Helios Omega 3, Waltham, Massachusetts, USA. Metoda polegała na wyekstrahowaniu związków mieszaniną: acetonu z 0,2% BHT, etanolu i heksanu w proporcjach 1 : 1 : 2 z badanej próbki i oznaczeniu ich zawartości przez pomiar absorbancji fazy heksanowej, wiązka światła o długości fali $\lambda = 450$ nm wedle metodyki González-Casado, S., Martín-Belloso, O., Elez-Martínez, P., & Soliva-Fortuny, R. (2018). Enhancing the carotenoid content of tomato fruit with pulsed electric field treatments: Effects on respiratory activity and quality attributes. Postharvest Biology and Technology, 137, strony 113–118. Badania wykonano w trzech powtórzeniach przeprowadzając doświadczenia dwukrotnie. Wyniki podano jako wartości średnie ($n = 6$) mg/100 g \pm odchylenie standardowe.

Wyniki analiz świeżo tłoczonych soków pomidorowych wzbogaconych sumakiem w zestawieniu z niekondycjonowanym produktem (kontrolnym) podano w tabeli 2.

Tabela 1. Ilość dodanego sumaka, zawartość mikroorganizmów, karotenoidów oraz przydatność do spożycia dla pierwszego przykładu wykonania

Lp.	Ilość dodanego do soku sumaka [g/L]	Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych po 24 godzinach [\log_{10} jtk/g] / Przydatność do spożycia [+/-]	Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych po 48 godzinach [\log_{10} jtk/g] / Przydatność do spożycia [+/-]	Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych po 72 godzinach [\log_{10} jtk/g] / Przydatność do spożycia [+/-]	Zawartość karotenoidów po 24 godzinach [mg/100 g]	Zawartość karotenoidów po 48 godzinach [mg/100 g]	Zawartość karotenoidów po 72 godzinach [mg/100 g]
1.	1	5,28±0,16 / -	6,31±0,17 / -	7,47±0,09 / -	15,71±0,05	15,35±0,06	10,50±0,35
2.	10	5,08±0,17 / -	5,33±0,18 / -	5,70±0,13 / -	15,70±0,20	15,22±0,07	10,38±0,32
3.	20	4,83±0,13 / -	4,66±0,24 / -	3,53±0,06 / -	15,83±0,43	15,55±0,23	15,88±0,26
4.	30	4,40±0,12 / -	3,38±0,16 / -	2,84±0,19 / +	15,03±0,32	15,21±0,10	12,44±0,09
X	0 (kontrola)	5,22±0,40 / -	6,52±0,13 / -	7,76±0,17 / -	15,73±0,12	15,54±0,11	11,21±0,09

Tabela 2. Ilość dodanego sumaka, zawartość mikroorganizmów, karotenoidów oraz przydatność do spożycia dla drugiego przykładu wykonania

Lp.	Ilość dodanego do soku sumaka [g/L]	Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych po 24 godzinach [\log_{10} jtk/g] / Przydatność do spożycia [+/-]	Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych po 48 godzinach [\log_{10} jtk/g] / Przydatność do spożycia [+/-]	Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych po 72 godzinach [\log_{10} jtk/g] / Przydatność do spożycia [+/-]	Zawartość karotenoidów po 24 godzinach [mg/100 g]	Zawartość karotenoidów po 48 godzinach [mg/100 g]	Zawartość karotenoidów po 72 godzinach [mg/100 g]
1.	1	3,12±0,17 / -	2,76±2,11 / +	2,12±0,09 / +	4,57±0,06	3,87±0,09	3,91±1,1
2.	10	2,79±0,21 / +	2,15±0,18 / +	1,91±0,09 / +	4,62±0,21	4,06±0,18	4,18±0,07
3.	20	2,12±0,15 / +	1,53±0,05 / +	1,12±0,07 / +	4,87±0,16	4,32±0,07	4,25±0,15
X	0 (kontrola)	3,24±0,21 / -	4,11±0,18 / -	6,41±0,19 / -	5,15±0,13	4,89±0,09	4,85±0,05
					4,51±0,08	3,62±0,07	3,17±0,14

Zastrzeżenie patentowe

1. Sposób kondycjonowania soku sumakiem **znamienny tym**, że do świeżo tłoczonego soku dodawany jest sproszkowany owoc sumaka (*Rhus coriaria* L.) w ilości od 1 do 30 g na 1 L produktu.

P5. Pawłat, J., Starek-Wójcicka, A., Kwiatkowski, M., Terebun, P., Zarzeczny, D., Krajewska, M., **Osmólska, E.** (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem i plazmą w systemie stacjonarnym. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243355.

URZĄD PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ

DOKUMENT PATENTOWY

Na podstawie przepisów ustawy z dnia 30 czerwca 2000 r. Prawo własności przemysłowej (Dz. U. z 2023 r. poz. 1170) został udzielony na rzecz:

POLITECHNIKA LUBELSKA, Lublin, Polska; UNIWERSYTET PRZYRODNICZY W LUBLINIE, Lublin, Polska

PATENT

NR 243355

NA WYNAŁAZEK PT.

Sposób kondycjonowania soku sumakiem i plazmą w systemie stacjonarnym

*przedstawiony w opisie patentowym
włączonym do niniejszego dokumentu*

Patent trwa od dnia: **2022-09-02**

Warszawa, dnia 2023-08-08

Z upoważnienia Prezesa
Urzędu Patentowego

Monika Russek
SPECJALISTA

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10)

PL 442179 A1

(12)

Opis zgłoszeniowy wynalazku (z daty zgłoszenia)

(21) Numer zgłoszenia: **442179**

(22) Data zgłoszenia: **2022.09.02**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2023.01.30 BUP 05/2023**

(51) MKP:

A23L 2/02 (2006.01)

A23L 2/44 (2006.01)

A23L 2/50 (2006.01)

A23L 3/32 (2006.01)

A23L 3/3454 (2006.01)

H05H 1/24 (2006.01)

(71) Zgłaszający:

POLITECHNIKA LUBELSKA, Lublin, PL
UNIwersytet PRZYRODNICZY
W LUBLINIE, Lublin, PL

(72) Twórca(-y):

JOANNA PAWŁAT, Zemborzyce Podleśne, PL
AGNIESZKA STAREK-WÓJCICKA, Lublin, PL
MICHAŁ KWIATKOWSKI, Lublin, PL
PIOTR TEREbUN, Lublin, PL
DAWID ZARZECZNY, Lublin, PL
MARTA KRAJEWSKA, Lublin, PL
EMILIA OSMÓLSKA, Lublin, PL

(74) Pełnomocnik:

Maciej Nowicki, Lublin, PL

(54) Tytuł:

Sposób kondycjonowania soku sumakiem i plazmą w systemie stacjonarnym

(57) Skrót opisu:

Przedmiotem zgłoszenia jest sposób kondycjonowania soku, który charakteryzuje się tym, że do reaktora typu glidearc o częstotliwości f od 10 do 200 Hz i o napięciu U od 3,7 do 17 kV podaje się gaz procesowy i po przejściu przez łuk elektryczny kieruje się strumień gazu opuszczający reaktor na sok wzbogacony sumakiem w ilości od 1 g do 30 g na L soku umieszczony na podajniku przez czas od 30 do 1200 s. Korzystnie, zastosowanym gazem procesowym jest powietrze.

Sposób kondycjonowania soku sumakiem i plazmą w systemie stacjonarnym

Przedmiotem wynalazku jest sposób kondycjonowania świeżo tłoczonego soku, który to sposób przedłuża przydatność do spożycia przy stabilnej zawartości karotenoidów.

W artykułach naukowych autorstwa Malletroit, V., Guinard, J. X., Kunkee, R. E., & Lewis, M. J. (1991). Effect of pasteurization on microbiological and sensory quality of white grape juice and wine. *Journal of food processing and preservation*, 15(1), strony 19-29; Hallmann, E., Sikora, M., Rembiałkowska, E., Marszałek, K., & Lipowski, J. (2011). Wpływ procesu pasteryzacji na wartość odżywczą soku marchwiowego z produkcji ekologicznej i konwencjonalnej. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 56(3), strony 133-137; Hallmann, E., Sikora, M., Rembiałkowska, E., Lipowski, J., & Marszałek, K. The effect of pasteurization on the nutritional value of Carnot juice from organic and conventional production. *New Concept of food evaluation*, publ. Perlan Techn, 200(2), strony 94-103 oraz Marx, M., Stuparic, M., Schieber, A., & Carle, R. (2003). Effects of thermal processing on trans–cis-isomerization of β -carotene in carrot juices and carotene-containing preparations. *Food Chemistry*, 83(4), strony 609-617 wykorzystano pasteryzację soków.

W pracach naukowych autorstwa Foley, D. M., Pickett, K., Varon, J., Lee, J., Min, D. B., Caporaso, R., & Prakash, A. (2002). Pasteurization of fresh orange juice using gamma irradiation: microbiological, flavor, and sensory analyses. *Journal of food science*, 67(4), strony 1495-1501; Wang, Z., Ma, Y., Zhao, G., Liao, X., Chen, F., Wu, J., ... & Hu, X. (2006). Influence of gamma irradiation on enzyme, microorganism, and flavor of cantaloupe (*Cucumis melo* L.) juice. *Journal of food science*, 71(6), M215-M220, a także Niemira, B. A., Sommers, C. H., & Boyd, G. (2003). Effect of freezing, irradiation, and frozen storage on survival of Salmonella in concentrated orange juice. *Journal of food protection*, 66(10), strony 1916-1919 opisano obróbkę soków przy użyciu promieniowania gamma.

W publikacjach Huang, H. W., Chang, Y. H., & Wang, C. Y. (2015). High pressure pasteurization of sugarcane juice: evaluation of microbiological shelf life and quality evolution during refrigerated storage. *Food and Bioprocess Technology*, 8(12), strony 2483-2494; Queirós, R. P., Rainho, D., Santos, M. D., Fidalgo, L. G., Delgadillo, I., & Saraiva, J. A. (2015). High pressure and thermal pasteurization effects on sweet cherry juice microbiological stability and physicochemical properties. *High Pressure Research*, 35(1), strony 69-77; Hu, Y. H., Wang, C. Y., & Chen, B. Y. (2020). Effects of high-pressure processing and thermal pasteurization on quality and microbiological safety of jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) juice during cold storage. *Journal of Food Science and Technology*, 57(9), strony 3334-3344 zastosowano paskalizację, czyli metodę obróbki soków za pomocą wysokiego ciśnienia (HPP).

W artykułach Rivas, A., Rodrigo, D., Martinez, A., Barbosa-Cánovas, G. V., & Rodrigo, M. (2006). Effect of PEF and heat pasteurization on the physical–chemical characteristics of blended orange and carrot juice. *LWT-Food Science and Technology*, 39(10), strony 1163-1170; Akin, E., & Evrendilek, G. A. (2009). Effect of pulsed electric fields on physical, chemical, and microbiological

properties of formulated carrot juice. *Food Science and Technology International*, 15(3), strony 275-282; jak również Timmermans, R. A. H., Mastwijk, H. C., Berendsen, L. B. J. M., Nederhoff, A. L., Matsers, A. M., Van Boekel, M. A. J. S., & Groot, M. N. (2019). Moderate intensity Pulsed Electric Fields (PEF) as alternative mild preservation technology for fruit juice. *International Journal of Food Microbiology*, 298, strony 63-73 zaprezentowano traktowanie soków pulsacyjnym polem elektrycznym (PEF).

W kolejnych pracach naukowych autorstwa Martínez-Flores, H. E., Garnica-Romo, M. G., Bermúdez-Aguirre, D., Pokhrel, P. R., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2015). Physico-chemical parameters, bioactive compounds and microbial quality of thermo-sonicated carrot juice during storage. *Food chemistry*, 172, strony 650-656; Nadeem, M., Ubaid, N., Qureshi, T. M., Munir, M., & Mehmood, A. (2018). Effect of ultrasound and chemical treatment on total phenol, flavonoids and antioxidant properties on carrot-grape juice blend during storage. *Ultrasonics sonochemistry*, 45, 1-6 oraz Starek, A., Kobus, Z., Sagan, A., Chudzik, B., Pawłat, J., Kwiatkowski, M., ... & Andrejko, D. (2021). Influence of ultrasound on selected microorganisms, chemical and structural changes in fresh tomato juice. *Scientific Reports*, 11(1), strony 1-12 opisano sonikację.

Znana już również obróbka soków przy użyciu zimnej plazmy opisana w następujących pracach naukowych: Hou, Y., Wang, R., Gan, Z., Shao, T., Zhang, X., He, M., & Sun, A. (2019). Effect of cold plasma on blueberry juice quality. *Food chemistry*, 290, 79-86; Starek, A., Pawłat, J., Chudzik, B., Kwiatkowski, M., Terebun, P., Sagan, A., & Andrejko, D. (2019). Evaluation of selected microbial and physicochemical parameters of fresh tomato juice after cold atmospheric pressure plasma treatment during refrigerated storage. *Scientific reports*, 9(1), 1-11; Starek, A., Sagan, A., Andrejko, D., Chudzik, B., Kobus, Z., Kwiatkowski, M., ... & Pawłat, J. (2020). Possibility to extend the shelf life of NFC tomato juice using cold atmospheric pressure plasma. *Scientific Reports*, 10(1), 1-13.

Stosowane są również metody poprawy jakości soków podczas przechowywania, w których wykorzystuje się nie jeden czynnik utrwalający: zakwaszanie i sonikację; pulsacyjne pole elektryczne wraz z sonikacją; sonikację połączoną z obróbką zimną plazmą wysokonapięciową, a także pulsacyjne pole elektryczne w skojarzeniu z temperaturą i naturalnymi konserwantami. Wyniki z przeprowadzonych na ten temat badań zawarto w następujących publikacjach naukowych: Jabbar, S., Abid, M., Hu, B., Muhammad Hashim, M., Ali, S., Wu, T., ... & Zeng, X. (2014). Study on Combined Effects of Acidification and Sonication on Selected Quality Attributes of Carrot Juice during Storage. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 36(4), 582-589; Aadil, R. M., Zeng, X. A., Sun, D. W., Wang, M. S., Liu, Z. W., & Zhang, Z. H. (2015). Combined effects of sonication and pulsed electric field on selected quality parameters of grapefruit juice. *LWT-Food Science and Technology*, 62(1), 890-893; Umair, M., Jabbar, S., Senan, A. M., Sultana, T., Nasiru, M. M., Shah, A. A., ... & Jianhao, Z. (2019). Influence of combined effect of ultra-sonication and high-voltage cold plasma treatment on quality parameters of carrot juice. *Foods*, 8(11), 593; Li, L., Yang, R., & Zhao, W. (2021). The Effect of Pulsed Electric Fields (PEF) Combined with Temperature and Natural Preservatives on the Quality and Microbiological Shelf-Life of Cantaloupe Juice. *Foods*, 10(11), 2606.

Znany jest reaktor plazmowy typu glidearc pracujący pod ciśnieniem atmosferycznym z użyciem gazu procesowego w postaci azotu lub powietrza opisany w publikacji Mazurek P., Pawłał J., Kwiatkowski M., Badanie zaburzeń przewodzących w torze zasilania reaktorów DBD i GlidArc, Przegląd Elektrotechniczny 2015, 11, strony 50-53. Reaktor typu glidearc zastosowano również do obróbki soku co opisano w patencie - P.427021 Sposób obróbki soku warzywnego J. Pawłał, A. Starek, B. Chudzik, M. Kwiatkowski, P. Terebun, A. Sagan, D. Andrejko, M. Kopacki oraz patencie P.427019 Sposób obróbki soku warzywnego J. Pawłał, A. Starek, B. Chudzik, M. Kwiatkowski, P. Terebun, A. Sagan, D. Andrejko, M. Kopacki.

Celem wynalazku jest skojarzona stacjonarna obróbka przedłużająca przydatność do spożycia świeżo tłoczonego soku z jednoczesnym zachowaniem ilości karotenoidów przy zastosowaniu dodatku w postaci przyprawy sumak ze sproszkowanego owocu sumaka (*Rhus coriaria* L.) i użyciu nietermicznej plazmy atmosferycznej.

Istotą sposobu obróbki jest to, że do reaktora typu glidearc o częstotliwości od 10 do 200 Hz i o napięciu od 3,7 do 17 kV podaje się gaz procesowy, korzystnie w postaci powietrza i po przejściu przez łuk elektryczny kieruje się strumień gazu opuszczający reaktor na sok wzbogacony wcześniej sumakiem w ilości od 1 do 30 g na L soku, umieszczony na podajniku przez okres od 30 do 1200 s.

Korzystnie, zastosowanym gazem procesowym jest powietrze.

Korzystnym skutkiem sposobu według wynalazku jest dekontaminacja mikrobiologiczna łatwo psującego się soku przy zachowaniu cennych barwników karotenoidowych. Zastosowanie sposobu obróbki soku ma wysoką skuteczność w eliminacji mikroorganizmów naturalnie zanieczyszczających produkt i potencjał do uzyskania niepasteryzowanego artykułu spożywczego o wydłużonym terminie przydatności do spożycia. Suplementacja soku sumakiem połączona z obróbką zimną plazmą daje w perspektywie wiele korzyści: powstrzymuje psucie się tego typu żywności i jej marnotrawienie, przynosi oszczędności ekonomiczne, przyczynia się do poprawy jakości oferowanych na lokalnym rynku soków oraz zwiększa udział innowacyjnych produktów polskiej gospodarki w segmencie rynków międzynarodowych.

W przykładach wykorzystano świeżo tłoczony sok, do którego dodano zmielony sumak (*Rhus coriaria* L.) w ilości przedstawionej w tabelach.

Przykład 1

Obróbkę świeżo tłoczonego soku marchwiowego przygotowanego przy użyciu wolnoobrotowej wyciskarki, Sana EUJ-707, Omega Products, Korea Południowa o pH w przedziale od 6,18 do 6,27, zawierającego naturalną mikroflorę odpowiedzialną za psucie wzbogacono sproszkowanym owocem sumaka *Rhus coriaria* L. o maksymalnej ziarnistości 0,5 mm w ilości przedstawionej w tabeli 1, a następnie poddano obróbce zimną plazmą w następujący sposób: do reaktora typu glidearc zasilanego prądem o zadanej częstotliwości f i zadany napięciu U podano powietrze o przepływie

440 l/h i skierowano strumień gazu opuszczającego reaktor na sok marchwiowy w ilości 20 ml o temperaturze wejściowej równej 26°C umieszczony na podajniku przez zadany czas t . Po ekspozycji na plazmę sok posiadał temperaturę wynoszącą 33°C.

W celu oceny skuteczności działania zastosowanego dodatku w połączeniu z obróbką zimną plazmą w dekontaminacji mikrobiologicznej próbki soku po 24, 48 i 72 godzinach chłodniczego przechowywania w 6°C analizowano pod kątem ogólnej liczby drobnoustrojów tlenowych. Czynności te przeprowadzano w komorze laminarnej CRUMA 670FL, El Prat de Llobregat, Barcelona, Hiszpania w warunkach aseptycznych. W celu zliczenia ogólnej liczby drobnoustrojów tlenowych wykonano seryjne rozcieńczenia dziesiętne próbek, a następnie posiewy po 100 μ l na powierzchnię płytek z agarem odżywczym, które następnie inkubowano przez 72 godziny w temp 30°C według normy PN-EN ISO 4833-2:2013-12. Dla każdego soku analizy przeprowadzano dwukrotnie, a posiewy z każdej próbki wykonywano w trzech powtórzeniach. Wyniki podano jako wartości średnie ($n=6$) \log_{10} jtk/g \pm odchylenie standardowe.

Przydatność do spożycia soku wzbogaconego sumakiem po 24, 48 i 72 godzinach ustalono na podstawie kryterium dopuszczalnej zawartości mezofilnych drobnoustrojów tlenowych dla pasteryzowanych soków owocowych i warzywnych, określonego w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 13 stycznia 2003 r., z późniejszymi zmianami, w sprawie maksymalnych poziomów zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych, które mogą znajdować się w żywności, składnikach żywności, dozwolonych substancjach dodatkowych, substancjach pomagających w przetwarzaniu albo na powierzchni żywności.

pH próbek świeżo tłoczonego soku mierzono za pomocą cyfrowego pehametru 780 pH Meter, Metrohm, Herisau, Szwajcaria. 50 ml produktu umieszczano w zlewce i mieszano w sposób ciągły za pomocą mieszadła magnetycznego. Pehametr skalibrowano za pomocą dostępnych w handlu roztworów buforowych o pH 7,0 i 4,0. Badania wykonano w trzech powtórzeniach przeprowadzając doświadczenia dwukrotnie. Wyniki podano jako wartości średnie ($n=6$) pH \pm odchylenie standardowe.

Oznaczenie zawartości karotenoidów w soku marchwiowym kontrolnym oraz poddanym kondycjonowaniu sumakiem i plazmą dokonano na spektrofotometrze UV-Vis Helios Omega 3, Waltham, Massachusetts, USA. Metoda polegała na wyekstrahowaniu związków mieszaniną: acetonu z 0,2% BHT, etanolu i heksanu w proporcjach 1:1:2 z badanej próbki i oznaczeniu ich zawartości przez pomiar absorbancji fazy heksanowej, wiązka światła o długości fali $\lambda=450$ nm, wedle metodyki González-Casado, S., Martín-Belloso, O., Elez-Martínez, P., & Soliva-Fortuny, R. (2018). Enhancing the carotenoid content of tomato fruit with pulsed electric field treatments: Effects on respiratory activity and quality attributes. *Postharvest Biology and Technology*, 137, strony 113-118. Badania wykonano w trzech powtórzeniach przeprowadzając doświadczenia dwukrotnie. Wyniki podano jako wartości średnie ($n=6$) mg/100 g \pm odchylenie standardowe.

Wyniki analiz świeżo tłoczonych soków wzbogaconych sumakiem i obrabianych zimną plazmą w zestawieniu z nieobrobionym sokiem kontrolnym podano w Tabeli 1.

Przykład 2

Obróbkę świeżo tłoczonego soku pomidorowego przygotowanego przy użyciu wolnoobrotowej wyciskarki, Sana EUJ-707, Omega Products, Korea Południowa o pH w przedziale od 3,97 do 4,52 zawierającego naturalną mikroflorę odpowiedzialną za psucie wzbogacono sproszkowanym owocem sumaka *Rhus coriaria* L. o maksymalnej ziarnistości 0,5 mm w ilości przedstawionej w tabeli 1, a następnie poddano obróbce zimną plazmą w następujący sposób: do reaktora typu glidearc zasilanego prądem o zadanej częstotliwości f i zadanim napięciu U podano powietrze o przepływie 440 l/h i skierowano strumień gazu opuszczającego reaktor na sok pomidorowy w ilości 20 ml o temperaturze wejściowej równej 26°C umieszczony na podajniku przez zadany czas t . Po ekspozycji na plazmę sok posiadał temperaturę wynoszącą 33°C.

W celu oceny skuteczności działania zastosowanego dodatku w połączeniu z obróbką zimną plazmą w dekontaminacji mikrobiologicznej próbki soku po 24, 48 i 72 godzinach chłodniczego przechowywania w 6°C analizowano pod kątem ogólnej liczby drobnoustrojów tlenowych. Czynności te przeprowadzono w komorze laminarnej CRUMA 670FL, El Prat de Llobregat, Barcelona, Hiszpania w warunkach aseptycznych. W celu zliczenia ogólnej liczby drobnoustrojów tlenowych wykonano seryjne rozcieńczenia dziesiętne próbek, a następnie posiewy po 100 μ l na powierzchnię płytek z agarem odżywczym, które następnie inkubowano przez 72 godziny w temp 30°C według normy PN-EN ISO 4833-2:2013-12. Dla każdego soku analizy przeprowadzono dwukrotnie, a posiewy z każdej próbki wykonywano w trzech powtórzeniach. Wyniki podano jako wartości średnie ($n=6$) \log_{10} jtk/g \pm odchylenie standardowe.

Przydatność do spożycia soku wzbogaconego sumakiem po 24, 48 i 72 godzinach ustalono na podstawie kryterium dopuszczalnej zawartości mezofilnych drobnoustrojów tlenowych dla pasteryzowanych soków owocowych i warzywnych, określonego w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 13 stycznia 2003 r., z późniejszymi zmianami, w sprawie maksymalnych poziomów zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych, które mogą znajdować się w żywności, składnikach żywności, dozwolonych substancjach dodatkowych, substancjach pomagających w przetwarzaniu albo na powierzchni żywności.

pH próbek świeżo tłoczonego soku mierzono za pomocą cyfrowego pehametru 780 pH Meter, Metrohm, Herisau, Szwajcaria. 50 ml produktu umieszczano w zlewce i mieszano w sposób ciągły za pomocą mieszadła magnetycznego. Pehametr skalibrowano za pomocą dostępnych w handlu roztworów buforowych o pH 7,0 i 4,0. Badania wykonano w trzech powtórzeniach przeprowadzając doświadczenia dwukrotnie. Wyniki podano jako wartości średnie ($n=6$) pH \pm odchylenie standardowe.

Oznaczenie zawartości karotenoidów w soku pomidorowym kontrolnym oraz poddanym kondycjonowaniu sumakiem i plazmą dokonano na spektrofotometrze UV-Vis Helios Omega 3, Waltham, Massachusetts, USA. Metoda polegała na wyekstrahowaniu związków mieszaniną: acetonu z 0,2% BHT, etanolu i heksanu (1:1:2) z badanej próbki i oznaczeniu ich zawartości przez pomiar absorbancji fazy heksanowej (wiązka światła o długości fali $\lambda=450$ nm) wedle metodyki González-Casado, S., Martín-Belloso, O., Elez-Martínez, P., & Soliva-Fortuny, R. (2018). Enhancing the carotenoid content of tomato fruit with pulsed electric field treatments: Effects on respiratory activity

and quality attributes. Postharvest Biology and Technology, 137, strony 113-118. Badania wykonano w trzech powtórzeniach przeprowadzając doświadczenia dwukrotnie. Wyniki podano jako wartości średnie (n=6) mg/100 g ± odchylenie standardowe.

Wyniki analiz świeżo tłoczonych soków wzbogaconych sumakiem i obrabianych zimną plazmą w zestawieniu z nieobrobionym sokiem kontrolnym podano w Tabeli 2.

Tabela 1. Parametry, ilość dodanego sumaka, zawartość mikroorganizmów, karotenoidów oraz przydatność do spożycia dla pierwszego przykładu wykonania

Lp.	Czas obróbki plazmą [s]	Częstotliwość zasilania f [kHz]	Napięcie U [kV]	Ilość dodanego do soku sumaka [g/L]	Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych po 24 godzinach [\log_{10} jtk/ml] Przydatność do spożycia [+/-]	Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych po 48 godzinach [\log_{10} jtk/ml] Przydatność do spożycia [+/-]	Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych po 72 godzinach [\log_{10} jtk/ml] Przydatność do spożycia [+/-]	Zawartość karotenoidów po 24 godzinach [mg/100 g]	Zawartość karotenoidów po 48 godzinach [mg/100 g]	Zawartość karotenoidów po 72 godzinach [mg/100 g]
1.	30	10	17,0	1	5,17±0,21 / -	6,34±0,12 / -	6,47±0,05 / -	15,80±0,05	15,39±0,08	11,28±0,03
2.	300	50	6,5	5	5,04±0,34 / -	4,69±0,17 / -	3,68±0,04 / -	15,23±0,38	14,06±0,71	12,48±0,21
3.	600	200	3,7	15	3,29±0,40 / -	2,31±0,06 / +	2,23±0,07 / +	14,93±0,11	14,05±0,11	12,72±0,33
4.	1200	50	7,2	30	0 / +	0 / +	0 / +	16,86±0,18	13,78±0,05	13,99±0,11
X	0	0	0	0	5,09±0,12 / -	6,50±0,07 / -	7,63±0,11 / -	15,82±0,06	15,49±0,08	11,16±0,05

Tabela 2. Parametry, ilość dodanego sumaka, zawartość mikroorganizmów, karotenoidów oraz przydatność do spożycia dla drugiego przykładu wykonania

Lp.	Czas obróbki plazmą [s]	Częstotliwość zasilania f [kHz]	Napięcie U [kV]	Ilość dodanego do soku sumaka [g/L]	Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych po 24 godzinach [\log_{10} jtk/ml] Przydatność do spożycia [+/-]	Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych po 48 godzinach [\log_{10} jtk/ml] Przydatność do spożycia [+/-]	Ogólna liczba drobnoustrojów tlenowych po 72 godzinach [\log_{10} jtk/ml] Przydatność do spożycia [+/-]	Zawartość karotenoidów po 24 godzinach [mg/100 g]	Zawartość karotenoidów po 48 godzinach [mg/100 g]	Zawartość karotenoidów po 72 godzinach [mg/100 g]
1.	30	10	17,0	1	2,48±0,27 / +	1,85±0,15 / +	1,12±0,27 / +	4,62±1,12	3,79±0,09	3,85±0,05
2.	300	50	6,6	5	2,13±0,18 / +	1,15±0,23 / +	0,87±0,31 / +	4,65±0,08	4,27±1,15	3,81±0,07
3.	600	200	3,7	15	1,12±0,21 / +	0,92±0,15 / +	0 / +	4,89±0,08	4,55±1,12	4,12±0,09
4.	1200	50	7,2	30	0 / +	0 / +	0 / +	5,26±1,12	4,76±1,18	4,39±0,05
X	0	0	0	0	3,24±0,21 / -	4,11±0,18 / -	6,41±0,19 / -	4,51±0,08	3,62±0,07	3,17±0,14

Zastrzeżenie patentowe

Sposób kondycjonowania soku **znamienny tym, że** do reaktora typu glidearc o częstotliwości f od 10 do 200 Hz i o napięciu U od 3,7 do 17 kV podaje się gaz procesowy, korzystnie w postaci powietrza i po przejściu przez łuk elektryczny kieruje się strumień gazu opuszczający reaktor na sok wzbogacony sumakiem w ilości od 1 g do 30 g na L soku, umieszczony na podajniku przez czas od 30 do 1200 s.

P6. Osmólska, E., Stoma, M., Sagan, A., Chudzik, B., & Starek-Wójcicka, A. (2022). Effect of Supplementation of Freshly Pressed Carrot Juice with *Rhus coriaria* L. on Changes in Juice Quality. *Sustainability*, 15(1), 719. **(IF=3,300, MNiSW=100).**

Article

Effect of Supplementation of Freshly Pressed Carrot Juice with *Rhus coriaria* L. on Changes in Juice Quality

Emilia Osmólska ¹, Monika Stoma ^{1,*}, Agnieszka Sagan ^{2,*}, Barbara Chudzik ³
and Agnieszka Starek-Wójcicka ²

¹ Department of Power Engineering and Transportation, Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin, Akademicka 13 Str., 20-612 Lublin, Poland

² Department of Biological Bases of Food and Feed Technologies, University of Life Sciences in Lublin, Akademicka 13 Str., 20-612 Lublin, Poland

³ Department of Biological and Environmental Education with Zoological Museum, Maria Curie-Skłodowska University, Akademicka 19 Str., 20-033 Lublin, Poland

* Correspondence: monika.stoma@up.lublin.pl (M.S.); agnieszka.sagan@up.lublin.pl (A.S.)

Abstract: The creation of an environmentally friendly food system involves, e.g., the production of safe and healthy food and the reduction of its waste. Therefore, the main aim of this research was to determine the effect of the addition of ground sumac powder (in the amount of 0.5, 1.5, and 3.0 g/100 mL) on the physicochemical properties of freshly pressed carrot (*Daucus carota* L.) juice and to obtain a product with extended shelf life. The analyses revealed the multiplication of microorganisms in the control juice samples during storage and the inhibition of the multiplication in the sumac-enriched samples. After 72 h, the addition of sumac in the amount of 0.5, 1.5, and 3 g reduced the total number of microorganisms by 1.7, 2.9, and 3.1 log₁₀ CFU/g, respectively, compared to the control. The supplementation of carrot juice with sumac in the amount of 3% increased the content of carotenoids and polyphenolic compounds on the first day of storage by 23% and 40%, respectively, compared to the control sample. The addition of sumac to the carrot juice extended the shelf life of the product with a simultaneous significant increase in polyphenols classified as health-promoting substances.

Keywords: sustainable food production; natural preservative; *Rhus coriaria* L.; carrot juice; quality



check for updates

Citation: Osmólska, E.; Stoma, M.; Sagan, A.; Chudzik, B.; Starek-Wójcicka, A. Effect of Supplementation of Freshly Pressed Carrot Juice with *Rhus coriaria* L. on Changes in Juice Quality. *Sustainability* **2023**, *15*, 719. <https://doi.org/10.3390/su15010719>

Academic Editors: Jih-Ying Ciou, Chuan-Liang Hsu, Chih-Yao Hou and Ada Margarida Correia Nunes Da Rocha

Received: 16 October 2022

Revised: 29 November 2022

Accepted: 29 December 2022

Published: 31 December 2022



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Sustainable food systems start with the development of sustainable agricultural practices, more sustainable food distribution systems, a balanced diet, food safety, and the reduction of food waste worldwide [1–3]. In addition, sustainable food systems are at the heart of political agendas (e.g., the European Green Deal) aimed at the reduction of food waste worldwide [4,5].

One-day juices produced from fresh fruits and vegetables should be an integral part of a balanced diet. Since they are not subjected to enzymatic treatment, clarification, filtering, or pasteurization, they are a valuable source of biologically active compounds. Contrary to their counterparts prepared from concentrates, no water, concentrated juice, sugar, artificial colors, or preservatives should be added to one-day juices. The carrot raw material is characterized by a particularly high content of carotenoids, which give an orange color to beverages. The presence of vitamins effectively supports the proper functioning of the organism, and antioxidant ingredients contribute to the protection of cells against the harmful effects of free radicals [6–8].

Unfortunately, non-thermally fixed juices constitute a reservoir of natural microflora and may be a carrier of unwanted pathogenic microorganisms. Microbiological contamination occurs at the stage of the cultivation of raw material plants, wherein fruits or vegetables are exposed to contamination from soil, water, and air. It has been proven that a natural

fertilizer, which is increasingly being used in the cultivation of fruits and vegetables on organic farms, is a source of pathogens in many cases. Despite food safety systems, cases of poisoning caused by the consumption of microbiologically contaminated juices are still recorded in the world. These products are mainly colonized by microorganisms that can grow at low pH values. When present in large numbers, non-pathogenic microorganisms mainly cause changes in the taste and smell of juice and finally lead to its complete spoilage [9–12].

Therefore, a significant problem for producers in the juice industry may be the microbiological instability of such products during longer storage manifested by unfavorable organoleptic and sensory changes and, most importantly, posing a danger to the consumer.

Natural plant powders or extracts have recently become an attractive subject for scientists. Due to their properties, plant powders or extracts can be used to extend the shelf life of freshly pressed juices. Essential oil components derived from plant extracts can preserve juices. It has been found that the process of natural acidification of watermelon juice (with a mixture of apple–lemon juice) in combination with antibacterial plant extracts effectively prolongs the shelf life of fruit juices with a minimal impact on quality/sensory parameters [13]. Green tea extracts have been reported to have antibacterial, antiviral, antifungal, and antioxidant activity. Nivea et al. [14] evaluated the ability of various combinations of natural antimicrobial agents, green tea extract (GTE), and citric acid to preserve the quality of fruit and vegetable smoothie blends and extend their shelf life. Their results suggest that the addition of GTE (0.2%) together with the antimicrobial agents yielded a product with enhanced antioxidant properties (more than 10 times higher than the control), meeting the consumer requirements for natural products. Studies have shown that tea tree oil added to cucumber juice successfully inhibited *L. monocytogenes* and *E. coli* growth at room temperature and in a refrigerator (25 °C and 4 °C), respectively, demonstrating its good preservative activities in the food system [15]. A study conducted by Dhiman et al. [16] compared the antimicrobial activities of spices, (*Curcuma longa*, *Zingiber officinale*, *Mentha arvensis*) and medicinal herbs (*Withania somnifera*, *Rauwolfia serpentina*, *Embllica officinalis*, *Terminalia arjuna*, *Centella asiatica*). The study confirmed the potential of selected extracts of spices as effective natural food preservatives in juices.

Spices can be a natural alternative to synthetic preservatives used in the food industry. One of them is sumac *Rhus coriaria* L. (Anacardiaceae), which is one of the most characteristic elements of Turkish, Iranian, Syrian, Lebanese, and Sicilian cuisines. Research on the identification of the main components of *Rhus coriaria* and its bioactive compounds has shown that sumac is rich in valuable vitamins, minerals, omega-3 acids, and many antioxidants. These include polyphenols and flavonoids, such as gallic acid, methyl gallate, kaempferol, and quercetin. The accumulation of valuable nutrients means that this spice has great health-promoting properties, including anti-inflammatory, antifungal, antibacterial, and antioxidant properties. Recently, the phytochemical structure of sumac has been extensively studied, and it has been established that sumac extract has high potential in the treatment of COVID-19 [17–21].

Researchers have been analyzing its potential as a meat preservative and an antioxidant [22–26]. The hypothesis that Syrian sumac (*Rhus coriaria*) could have a meat-tenderizing effect was supported by the results reported by Sakhr and Khatib [27] showing a significant decrease in shear stress and protein content with an increase in collagen solubility. Moreover, an effect on the content of meat fat was detected, as the aqueous sumac extract decreased the fat percentage in meat significantly. Özcan [28] investigated the effect of sumac extracts and butylated hydroxyanisole (BHA) applied in various concentrations on the peroxide value of peanut oil. He found that sumac extracts generally inhibited the formation of hydroperoxides. However, after prolonged storage (28 days), their antioxidant activity decreased significantly, compared to BHA. The author explained the decrease in the antioxidant activity of the extracts by a decrease in the content of polyphenols. In addition, Dziki et al. [29] included sumac flour in a wheat bread recipe. Its addition enhanced the antioxidant activity of the product. In general, the authors of the study found that sumac

flour (used in an appropriate amount) can be used to produce good quality bread with reduced salt content.

In order to explore all the promising potentials of this spice, more research has to be done into its wider application in sustainable food science. The aim of the present study was to evaluate the effect of *Rhus coriaria* L. supplementation on the quality of freshly pressed carrot juice during refrigerated storage.

2. Materials and Methods

2.1. Raw Material

Carrots (*Daucus carota* L.), Nerac F1 variety, obtained from a Polish farm from the 2021 harvest, were the experimental material. The vegetables were characterized by a cylindrical shape of the root; they were healthy, without visible mechanical damage. Tannery sumac (*Rhus coriaria* L.) was purchased from a health-food store. Before adding to juices, the product was ground in a ChemLand laboratory mill, model FW 100 (Stargard, Poland).

2.2. Juice Preparation

The carrots were washed and blotted dry with laboratory tissue paper. To speed up and facilitate the pressing process, the roots were divided into smaller parts. Fresh juice was obtained using a Sana EUJ-707 slow-speed juicer (Seul, South Korea). Ground sumac was added to the prepared juice in an amount of 0.5, 1.5, and 3.0 g per 100 mL of the product. Juice without the spice was the control sample. All juices were placed in a refrigerator (6 °C) and tested after 24, 48, and 72 h of storage.

2.3. Characterization of Juice Quality

2.3.1. pH Measurement

A digital pH meter (780 pH meter from Metrohm, Herisau, Switzerland) with a built-in magnetic stirrer was used to measure the pH of the juices. The control material and the sumac-enriched samples were collected in a sufficient volume to immerse the electrode with the diaphragm thoroughly. Before the measurement, the device was properly calibrated according to the manufacturer's instructions. Then, the samples with the test material were placed in a designated place, and the pH was measured (for each sample in three replications).

2.3.2. Determination of Total Acidity (TA)

The carrot juice acidity test was performed using a potentiometric titrator TitraLab AT1000 (Ames, IA, USA). A total of 25 mL of juice was poured into a beaker, and the volume was increased to 60 mL with distilled water. Then, the vessel was placed on the designated measuring field with the measuring electrode. A total of 0.1 M NaOH—analytical grade (POCH, Gliwice, Poland) was used as the titrant. The obtained results were converted automatically into citric acid [g/L]. The tests were carried out in three repetitions.

2.3.3. Sugar Content

The extract content in the juices was determined using a PAL-1 Atago pocket refractometer (Tokyo, Japan). The values are expressed in Brix degrees, i.e., the ratio of the weight of sugar to the weight of water in which a fixed volume of sugar was dissolved. The samples were applied three times to the clean field of the measuring prism, which was washed with distilled water after each use and dried with laboratory tissue paper.

2.3.4. Determination of Carotenoid Content

The carotenoid content in the carrot juice was determined on a Thermo Scientific UV-vis Helios Omega 3 spectrophotometer (Massachusetts, USA). The method consisted of extracting the compounds with a 100 mL mixture (1:1:2) of acetone (analytical grade) (STANLAB, Lublin, Poland) with 0.2% butylated hydroxytoluene (BHT) (analytical grade) (POCH, Gliwice, Poland), ethanol (analytical grade) (POCH, Gliwice, Poland), and hexane

(analytical grade) (POCH, Gliwice, Poland) from the tested sample (1 g) and determining their content by measuring the absorbance of the hexane phase (wavelength light beam $\lambda = 450$ nm) according to the methodology described by Gonzales-Casado [30]. The tests were carried out in three repetitions.

2.3.5. Determination of Total Polyphenolic Compounds (TPC)

Total polyphenols were determined with the Folin–Ciocalteu method [31]. An aliquot (0.1 mL) of juice was mixed with 2 mL of distilled water, 0.2 mL of Folin–Ciocalteu phenol reagent (analytical grade) (CHEMPUR, Piekary Śląskie, Poland), and 2 mL of sodium carbonate (analytical grade) (POCH, Gliwice, Poland) solution (20%). The mixture was incubated for 1 h in darkness. The absorbance was measured at 765 nm on a UV–vis spectrophotometer (Helios Omega, Massachusetts, USA). Total polyphenolic compounds were expressed as milligrams of gallic acid per 100 mL.

2.3.6. Color Parameters

The color indicators were tested with the use of the SF80 spectrophotometer by 3 Color (Marcq-en-Barœul, France). Measurements of all components were made in the CIE $L^*a^*b^*$ system using the illuminant D65 and 10° observer. The instrument was standardized each time with a white and black ceramic plate (L^* : 92.37, a^* : -0.82 , b^* : 1.82). The total color difference (ΔE) was calculated as well. It showed a numerical difference in the color of the carrot juice samples supplemented with sumac compared to the control sample (without the addition) according to Equation (1):

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (1)$$

where L_0 , a_0 , and b_0 are the color values of the control juice samples.

Determination of the total number of aerobic microorganisms and the number of yeasts and molds

The total number of aerobic microorganisms and the number of yeasts and molds in the juice samples were determined according to the PN-EN ISO 4833-1: 2013 standard and the PN-ISO 21527 standard, respectively. In order to conduct the research, it was necessary to make a series of 10-fold dilutions in an exponential process. For this purpose, 1 mL of juice was transferred to a falcon containing 9 mL of peptone water with the use of a sterile pipette. Then, 1 mL was withdrawn from the first dilution (1:10) into 9 mL of the diluting fluid, yielding a 1:100 dilution. Further progress was made in the same way. Each prepared sample was inoculated with 0.5 mL onto the surface of solid agar medium located on 60 mm diameter Petri dishes. This procedure was performed in sterile conditions—in a laminar chamber with a CRUMA 670FL UV lamp (El Prat de Llobregat, Barcelona, Spain). The plates were incubated at 30°C in a POL-EKO incubator type CLN 115 SMART (Wodzisław Śląski, Poland) for three days to determine the total number of microorganisms and at 25°C for five days in the case of yeasts and molds. The number of microorganisms per gram of sample was calculated from the number of colonies obtained on plates containing less than 300 colonies. Microbiological inoculations were made after 24, 48, and 72 h of storage of the juice in cooling conditions at 6°C . The tests were performed in four repetitions; mean values were given with standard deviation.

2.3.7. Statistical Analysis of Research Results

All the results were subjected to a statistical analysis performed using the statistical package Statistica 10, StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA. First, the mean and standard deviation were calculated to determine the measure of the variability of the observed results. The ANOVA analysis of variance was performed to test the significance of differences between the values obtained in the individual trials. The inference was made at the significance level of 0.05. Tukey's test was employed for a thorough analysis of the mean confidence intervals.

3. Results and Discussion

The acidity of food products, including drinking juices, mainly proves their quality and freshness. Table 1 shows the changes in the acidity of the products converted into citric acid. The highest amounts, i.e., 3.31 g/L, 3.40 g/L, and 3.80 g/L, were observed in carrot juice with a 3 g addition of sumac after 24, 48, and 72 h of storage, respectively. In the control sample, the TA parameter had the lowest values ranging from 0.43 g/L to 0.86 g/L throughout the storage period.

Table 1. Effect of sumac supplementation on the chemical properties of carrot juice stored for 72 h.

Chemical Parameters	Sumac Content in the Juice (g/100 mL)	Time Storage (Hours)		
		24	48	72
Acidity (pH)	0 (control)	6.38 ± 0.03 ^e	6.34 ± 0.02 ^e	5.88 ± 0.01 ^f
	0.5	5.57 ± 0.01 ^b	5.57 ± 0.01 ^b	5.50 ± 0.07 ^b
	1.5	4.81 ± 0.01 ^a	4.83 ± 0.00 ^a	4.88 ± 0.03 ^a
	3.0	4.34 ± 0.04 ^c	4.38 ± 0.01 ^{cd}	4.42 ± 0.01 ^d
Total acidity (g/L)	0 (control)	0.43 ± 0.01 ^b	0.52 ± 0.01 ^{bc}	0.85 ± 0.01 ^{abc}
	0.5	0.93 ± 0.04 ^a	1.00 ± 0.01 ^a	1.07 ± 0.05 ^a
	1.5	1.97 ± 0.19 ^d	2.06 ± 0.07 ^d	2.25 ± 0.04 ^d
	3.0	3.31 ± 0.26 ^e	3.40 ± 0.25 ^{ef}	3.80 ± 0.38 ^f
Extract (°Brix)	0 (control)	8.90 ± 0.17 ^{ab}	8.87 ± 0.06 ^{ab}	8.73 ± 0.38 ^a
	0.5	9.23 ± 0.31 ^{abc}	8.87 ± 0.21 ^{ab}	8.83 ± 0.06 ^a
	1.5	9.50 ± 0.17 ^c	9.63 ± 0.21 ^c	9.23 ± 0.23 ^{abc}
	3.0	9.27 ± 0.15 ^{abc}	9.43 ± 0.15 ^{bc}	9.43 ± 0.06 ^{bc}
Carotenoids (mg/100 g)	0 (control)	15.81 ± 0.06 ^c	14.33 ± 0.00 ^g	11.03 ± 0.16 ^b
	0.5	16.02 ± 0.04 ^a	16.00 ± 0.05 ^a	11.62 ± 0.06 ^e
	1.5	17.32 ± 0.04 ^a	16.39 ± 0.04 ^d	11.27 ± 0.02 ^b
	3.0	20.47 ± 0.07 ⁱ	16.69 ± 0.02 ^h	12.13 ± 0.05 ^f
Total polyphenolic compounds (mg/100 mL)	0 (control)	22.26 ± 1.04 ^a	21.96 ± 1.56 ^a	20.85 ± 0.09 ^a
	0.5	23.49 ± 0.26 ^{ab}	22.51 ± 0.17 ^{ab}	22.57 ± 0.26 ^{ab}
	1.5	25.43 ± 1.17 ^{bc}	27.08 ± 0.39 ^c	26.65 ± 0.04 ^c
	3.0	31.79 ± 0.71 ^d	34.70 ± 0.85 ^d	33.45 ± 0.64 ^d

The results are expressed as a mean ± standard deviation. Different letters mean statistically significant differences ($p < 0.05$).

Similarly, the products differed in terms of pH. This parameter had a value of 6.38 in the control carrot juice analyzed after 24 h of storage and 5.57 in the product with the 0.5 g sumac supplementation. In turn, the enrichment of the juice with the highest amount of this additive resulted in a 32% decrease in pH (compared to the control sample).

Sumac fruits are characterized by high content of organic acids, with malic acid as the dominant acid. Its content can reach 1.5 g/kg [17]. The addition of dried sumac to carrot juice increased the natural acidity of this product.

An increase in acidity expressed by pH during storage was found only in the control juice sample. After 72 h of storage, the value of this parameter decreased by about 8% in relation to the juice tested after 24 h. A statistically significant increase in the total acid content (converted into citric acid) was observed for the juice containing 3 g of sumac after 72 h storage. This may be related to the extraction of organic acids from the spice.

The extract content in the tested juices ranged from 8.73 to 9.63 °Brix. In the case of the drink without the additives, the total extract content was determined at the level of 8.73–8.90 °Brix. Products enriched with sumac in the amount of 1.5 and 3.0 g per 100 mL were characterized by higher extract content. The mean values of the parameter assessed

during the several research days ranged from 9.23 to 9.63 °Brix. No effect of the addition of the spice on the total extract content was found in the juices stored for 24 h.

Another assessed quality factor was the content of carotenoids, which are of great importance both for nutritional and sensory reasons. They capture free radicals and active atomic oxygen, thereby preventing oxidative stress. They exert, e.g., anti-cancer, rejuvenating, and regenerating effects. The content of these substances in vegetables and fruits gives them their characteristic orange, red, or yellow color. The greatest amount of these beneficial compounds, i.e., 20.47 mg/100 g, was found on the first research day in carrot juice with the 3 g addition of sumac. The control product was characterized by approximately 23% lower content of these dyes. The storage time resulted in a statistically significant decrease in the content of carotenoids. After 72 h, the carotenoid content in all analyzed samples was at the level of 10.84–12.14 mg/100 g.

Plant polyphenols are secondary metabolites characterized by one or more hydroxyl groups binding to one or more aromatic rings. They belong to natural antioxidants that prevent heart or cancer diseases and help to stop the aging process. This makes polyphenol-rich plant raw materials particularly attractive to food producers due to the increasing consumer demand for natural and safe food ingredients [32–35]. The total content of polyphenols determined in the control sample of the carrot juice ranged from 20.85 mg/100 mL to 22.26 mg/100 mL. This amount was similar to that reported by Szczepańska et al. [36]. The content of polyphenolic compounds in the tested juices increased with the amount of added sumac. The supplementation of the carrot juice with sumac in the amount of 1.5% and 3% increased TPC in the juices on the first day of storage by 14% and 42%, respectively, compared to the control sample. After 72 h, the differences were 28% and 60%, respectively. This confirms previous reports that *Rhus coriaria* fruits are a good source of these bioactive compounds [37,38]. However, no effect of the storage time on the total content of polyphenols was observed.

The examination of the color of the juices and the assessment of the scale of changes gave full information not only about their sensory quality but also about the influence of the additive used on the rate of occurrence of the changes. All measured color parameters of the juices are shown in Table 2. On the first day of the research, a decrease in the color values (L^* , a^* , and b^*) was observed in the sumac-supplemented carrot juice samples supplemented. The addition of the natural preservative led to a slight darkening of the samples, compared to the control juice ($p < 0.05$) after 48 and 72 h of refrigerated storage. Moreover, the sumac-containing juices were less red and yellow than the control carrot juice on the study days.

The calculated coefficient, known as the total color difference (ΔE), in most cases was within the range of $2 < \Delta E < 3.5$, which meant that the changes were evident even to inexperienced observers. There are several scientific reports describing the effect of sumac addition on the color of various food products. The effect of sumac extract and BHT (butylated hydroxytoluene) addition on the quality of sucuk (Turkish dry-fermented sausage) was investigated by Bozkurt [39] during the ripening period. The author found that the control recipe was the worst sample with respect to overall sensory quality and that the addition of either the sumac extract or BHT increased the overall sensory quality of sucuk. The color attributes of sucuk were not significantly different between samples with the addition of the sumac extract or BHT. The study demonstrated that the sumac extract had a greater effect on the quality of sucuk during the ripening period; hence, it can be added to sucuk to enhance the quality of the product. In investigations carried out on sea bream (*Sparus aurata* L.), the highest L^* value was determined in the sumac-oil-supplemented product, while the highest value of the a^* parameter was recorded in meat with the addition of the sumac spice. Sumac influenced the marinade redness values. As in the case of L^* , meat supplemented with sumac oil had the highest value of the b^* index, [40].

Table 2. Effect of sumac supplementation on the coloring-index of carrot juice stored for 24, 48, and 72 h.

Sumac Content in the Juice (g/100 mL)	Time Storage (Hours)	Coloring-Index			ΔE
		L*	a*	b*	
0 (control)	24	34.76 ± 0.08 ^e	11.34 ± 0.06 ^h	11.83 ± 0.06 ^d	---
0.5		33.98 ± 0.08 ^c	12.07 ± 0.16 ^b	13.22 ± 0.13 ^f	1.77 ± 0.14 ^d
1.5		33.93 ± 0.10 ^c	12.05 ± 0.09 ^b	12.48 ± 0.37 ^e	1.29 ± 0.17 ^d
3.0		35.26 ± 0.11 ^f	12.96 ± 0.13 ⁱ	13.95 ± 0.14 ^g	2.72 ± 0.17 ^a
0 (control)	48	39.53 ± 0.07 ^{ab}	16.22 ± 0.11 ^{fg}	19.89 ± 0.03 ^a	---
0.5		39.58 ± 0.08 ^{ab}	16.58 ± 0.03 ^{ag}	19.66 ± 0.07 ^a	0.43 ± 0.08 ^c
1.5		38.06 ± 0.10 ^g	15.87 ± 0.05 ^{ef}	17.48 ± 0.15 ^b	2.85 ± 0.13 ^{ab}
3.0		38.49 ± 0.09 ^h	14.98 ± 0.07 ^c	17.48 ± 0.13 ^b	2.91 ± 0.15 ^{ab}
0 (control)	72	39.32 ± 0.10 ^a	16.87 ± 0.20 ^a	20.16 ± 0.24 ^a	---
0.5		39.68 ± 0.08 ^b	16.91 ± 0.17 ^a	20.04 ± 0.20 ^a	0.38 ± 0.03 ^c
1.5		37.33 ± 0.11 ^d	15.34 ± 0.18 ^{cd}	16.92 ± 0.20 ^c	4.10 ± 0.48 ^d
3.0		37.53 ± 0.08 ^d	15.70 ± 0.25 ^{de}	17.32 ± 0.24 ^{bc}	3.57 ± 0.52 ^{bd}

The results are expressed as a mean ± standard deviation from three independent experiments. Different letters mean statistically significant differences ($p < 0.05$).

On the basis of the results presented in Figure 1, it was found that the average level of contamination of the control samples of carrot juice with mesophilic aerobic microorganisms after the first day of refrigerated storage was, on average, 6.11 log₁₀ CFU/g. However, in the juice samples with the addition of sumac in the amount of 3 g/100 mL, the total number of aerobic microorganisms decreased on average by 0.28 log₁₀ CFU/g, compared to the control. After 48 h of storage of the juice samples, a clear bacteriostatic effect of the additive was found, as the number of aerobic bacteria in the control samples increased and, on average, reached the value of 7.30 log₁₀ CFU/g. In turn, the number of CFU/g in the samples enriched with sumac in the amount of 1.5 and 3.0 g/100 mL was lower by about 2 log than in the control and about 0.5 log₁₀ CFU/g lower than that in the samples tested after 24 h of storage. After 72 h storage, the bacteria in the control juice had multiplied in a fairly large amount (8.30 log₁₀ CFU/g), while the use of sumac in the amount of 0.5, 1.5, and 3 g reduced the total number of microorganisms by 1.7, 2.9, and 3.1 log₁₀ CFU/g, respectively, compared to the control. In the samples with the addition of sumac in the amount of 1.5 and 3.0 g/100 mL, the complete inhibition of the multiplication of aerobic bacteria during storage was observed, as the number of CFU/100 mL was lower than in the juice tested after 24 h of storage, which contributed to the extension of the shelf life of this product.

The contamination of the control carrot juice with yeasts and molds after 24 h of refrigeration was on average 2.3 log₁₀ CFU/g (Figure 2). The addition of sumac caused only a slight reduction in the number of these microorganisms, with the highest average reduction by 0.4 log₁₀ CFU/g in samples with the sumac addition dose of 3.0 g/100 mL. After 48 and 72 h of storage, the number of yeasts and molds in the control samples increased significantly, reaching 4.3 and 5.8 log₁₀ CFU/g, respectively, which made the juice unsuitable for consumption. The addition of the spice significantly slowed down the multiplication of microscopic fungi. The use of 0.5 g/100 mL sumac after 72 h of storage reduced the number of yeasts and molds by an average of 1.7 log₁₀ CFU/g, compared to the control. An even more pronounced reduction by 2.8 and 3.1 log₁₀ CFU/g was obtained after adding 1.5 and 3.0 g/100 mL of sumac, respectively, compared to the control.

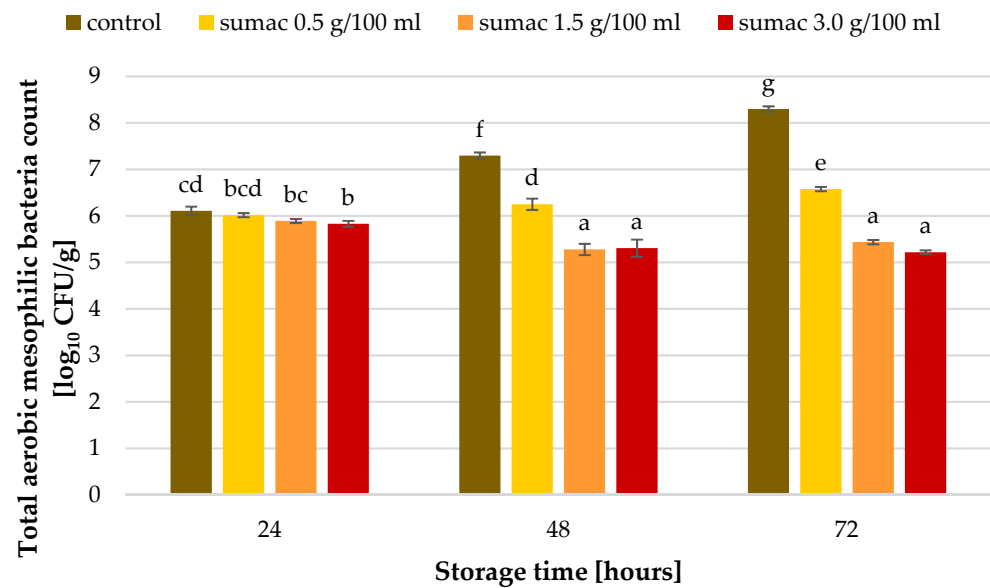


Figure 1. Effect of sumac supplementation on the total number of mesophilic aerobic bacteria in carrot juice stored chilled for 24, 48, and 72 h. The mean values are given with standard deviation. Different letters means statistically significant differences ($p < 0.05$).

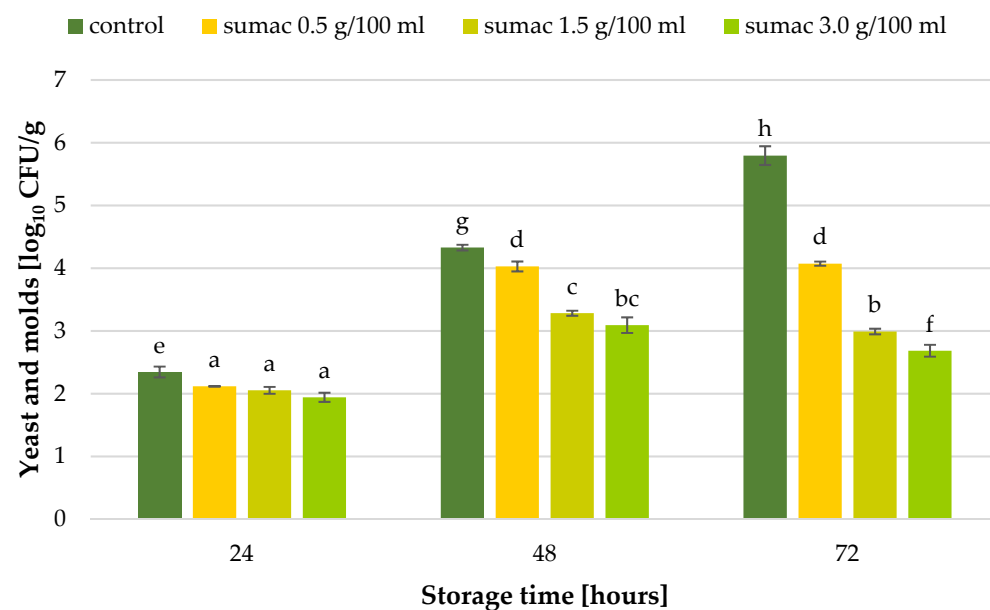


Figure 2. Effect of sumac supplementation on the content of yeasts and molds in carrot juice kept chilled for 24, 48, and 72 h. The mean values are given with standard deviation. Different letters means statistically significant differences ($p < 0.05$).

The obtained results indicate that sumac exhibits bacteriostatic properties, i.e., it inhibits the multiplication of bacteria, yeasts, and molds. The inhibition of the multiplication of microorganisms as a result of the addition of sumac powder significantly extended the shelf life of the juice.

Numerous scientific studies report the bactericidal and bacteriostatic properties of aqueous or alcoholic extracts of sumac fruit. The available tests were carried out on isolated specific strains of bacteria in an optimal medium with the method of micro-dilution in a liquid medium or by disc diffusion in an agar medium. The results of these studies showed high antibacterial efficacy of alcoholic sumac fruit extracts against strains of Gram-positive and Gram-negative bacteria isolated from food products. *Staphylococcus aureus* and

Salmonella enteric turned out to be the most sensitive of the tested strains. For *S. aureus*, a minimum inhibitory concentration (MIC) of 0.125–0.5 mg/mL and a minimum bactericidal concentration (MBC) value of 0.25–1 mg/mL were achieved [41,42].

A study of a 1.0% aqueous sumac fruit extract with the disc diffusion method to determine its activity of against food-borne bacteria, including pathogenic bacteria, showed its high effectiveness in inhibiting the growth of Gram-positive bacteria, such as *Bacillus* spp. and *Staphylococcus aureus*, and Gram-negative bacteria, including *Salmonella* spp., *Escherichia coli*, *Proteus vulgaris*, and *Hafnia alvei*. Some of the bacterial strains tested, e.g., *Listeria monocytogenes* and *Citrobacter freundii*, turned out to be insensitive to the aqueous sumac extract [43]. Using the viable count technique, the same authors demonstrated that, after an hour of treatment with the 1.0% aqueous solution of the sumac fruit extract, the number of CFU/mL was reduced by 4–5 log₁₀ in the case of *Bacillus* spp. and by 2–3 log₁₀ in the other strains tested.

The effectiveness of treatment with an aqueous sumac fruit extract in extending the shelf life of raw meat, e.g., broiler wings, was also investigated. The results showed that 10 min decontamination of the raw wings reduced the number of CFU/g by about 1 log₁₀ and extended the shelf life from 7 to 14 days without degrading the taste and aroma properties of the meat, unlike treatment with a lactic acid solution [44].

The supplementation of the juice with ground sumac powder (in appropriate amounts) extended the shelf life with a significant increase in the content of carotenoids and polyphenols (Figure 3). To the best of our knowledge, there are currently no published articles regarding the use of sumac powder or extract as a preservative for fruit or vegetable juice. Perhaps this is caused by the specific spicy–sour taste of this additive, which nevertheless may enhance the taste of carrot juice.

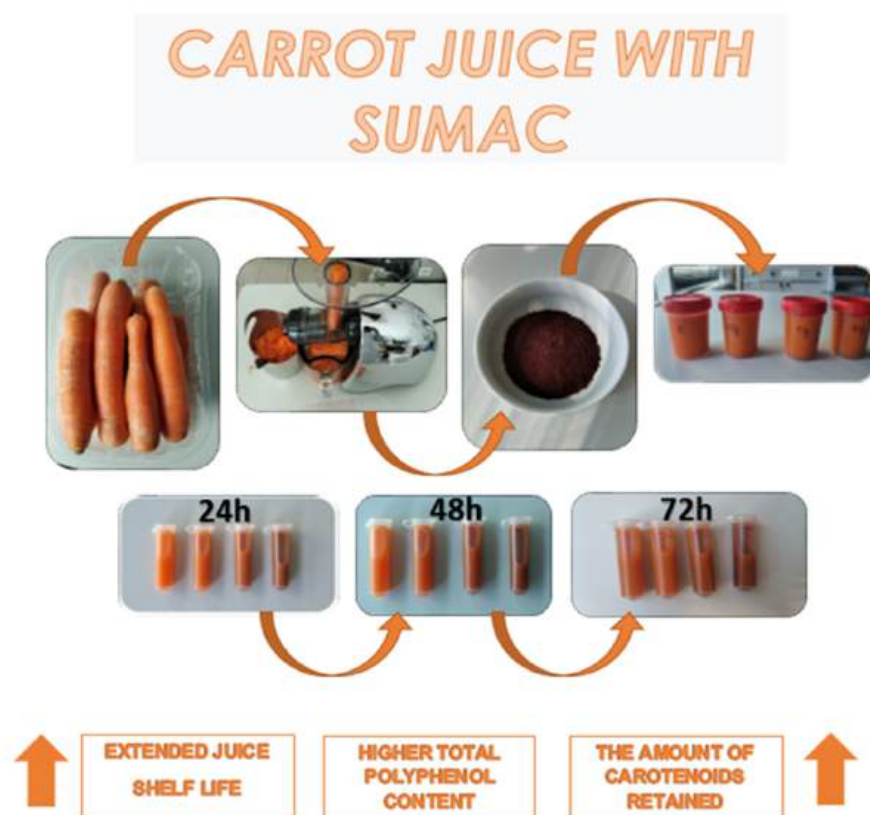


Figure 3. Diagram showing the process of making carrot juice with sumac.

4. Conclusions

Currently, consumers are demanding natural products that help prevent many diseases and that are safe and environmentally friendly. Freshly pressed juices are undoubtedly

characterized by many health-promoting substances. Unfortunately, if they are not heat-treated, they deteriorate very quickly. On the other hand, the content of biologically active substances may decrease during the processing and storage of these products. Sumac is one of the spices with high antioxidant and antimicrobial potential. In this study, it was found that the enrichment of freshly pressed carrot juice with sumac in an amount not exceeding 3% contributed to the inhibition of the multiplication of microorganisms in the juice during storage. Generally, the natural sumac spice provided better preservation and shelf life to the perishable vegetable juice.

The use of the spice resulted in the better preservation of carotenoids in the final product, thus increasing its nutritional value. Importantly, the sumac-enriched juices were characterized by a higher content of total polyphenols, even after 72 h of storage. This study demonstrated that sumac (*Rhus coriaria*) can be easily used to enhance the quality of carrot juice.

Author Contributions: Conceptualization, E.O., M.S., A.S., B.C. and A.S.-W.; methodology, E.O. and A.S.-W.; validation, E.O., M.S., A.S., B.C. and A.S.-W.; formal analysis, E.O., A.S. and B.C.; investigation, E.O. and A.S.-W.; resources, E.O., A.S. and M.S.; data curation, E.O.; writing—original draft preparation, E.O., M.S., A.S., B.C. and A.S.-W.; writing—review and editing, E.O., M.S. and A.S.-W.; visualization, E.O., A.S. and A.S.-W.; project administration E.O., M.S. and A.S.-W.; supervision, A.S.-W. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Kuhnlein, H.; Eme, P.; de Larrinoa, Y. Indigenous Food Systems: Contributions to Sustainable Food Systems and Sustainable Diets. In *Sustainable Diets: Linking Nutrition and Food Systems*; CABI: Wallingford, UK, 2019; pp. 64–78.
- Lindgren, E.; Harris, F.; Dangour, A.D.; Gasparatos, A.; Hiramatsu, M.; Javadi, F.; Loken, B.; Murakami, T.; Scheelbeek, P.; Haines, A. Sustainable Food Systems—A Health Perspective. *Sustain. Sci.* **2018**, *13*, 1505–1517. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Sobczak, P.; Zawislak, K.; Starek, A.; Żukiewicz-Sobczak, W.; Sagan, A.; Zdybel, B.; Andrejko, D. Compaction Process as a Concept of Press-Cake Production from Organic Waste. *Sustainability* **2020**, *12*, 1567. [[CrossRef](#)]
- Dudziak, A.; Zajac, G.; Kuranc, A.; Słowik, T.; Stoma, M.; Szyszlak-Bargłowicz, J. Preferences of the Consumers of Cold Meat Market in Lights of A Survey Research in the Region of Lublin. *Carpathian J. Food Sci. Technol.* **2018**, *10*, 106–116.
- Żukiewicz, K.; Dudziak, A.; Słowik, T.; Mazur, J.; Łusiak, P. Analysis of the Problem of Waste in Relation to Food Consumers. *Sustainability* **2022**, *14*, 11126. [[CrossRef](#)]
- Abdelmaksoud, T.G.; Mohsen, S.M.; Duedahl-Olesen, L.; Elnikeety, M.M.; Feyissa, A.H. Optimization of Ohmicsonication for Overall Quality Characteristics of NFC Apple Juice. *J. Food Process. Preserv.* **2019**, *43*, 14087. [[CrossRef](#)]
- Reyes-De-Corcuera, J.I.; Goodrich-Schneider, R.M.; Barringer, S.A.; Landeros-Urbina, M.A. Chapter 15: Processing of Fruit and Vegetable Beverages. In *Food Processing: Principles and Applications*, 2nd ed.; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2014; p. 339.
- Singh, M.N.; Srivastava, R.; Yadav, I. Study of Different Varieties of Carrot and Its Benefits for Human Health: A Review. *J. Pharmacogn. Phytochem.* **2021**, *10*, 1293–1299. [[CrossRef](#)]
- Balali, G.I.; Yar, D.D.; Afua Dela, V.G.; Adjei-Kusi, P. Microbial Contamination, an Increasing Threat to the Consumption of Fresh Fruits and Vegetables in Today's World. *Int. J. Microbiol.* **2020**, 3029295. [[CrossRef](#)]
- Park, S.; Szonyi, B.; Gautam, R.; Nightingale, K.; Anciso, J.; Ivanek, R. Risk Factors for Microbial Contamination in Fruits and Vegetables at the Preharvest Level: A Systematic Review. *J. Food Prot.* **2012**, *75*, 2055–2081. [[CrossRef](#)]
- Snyder, A.B.; Worobo, R.W. The Incidence and Impact of Microbial Spoilage in the Production of Fruit and Vegetable Juices as Reported by Juice Manufacturers. *Food Control* **2018**, *85*, 144–150. [[CrossRef](#)]
- Kaczmarek, M.; Avery, S.V.; Singleton, I. Microbes Associated with Fresh Produce: Sources, Types and Methods to Reduce Spoilage and Contamination. *Adv. Appl. Microbiol.* **2019**, *107*, 29–82. [[PubMed](#)]
- Yen, P.P.-L.; Kitts, D.D.; Pratap Singh, A. Natural Acidification with Low-PH Fruits and Incorporation of Essential Oil Constituents for Organic Preservation of Unpasteurized Juices. *J. Food Sci.* **2018**, *83*, 2039–2046. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

14. Nieva, S.G.; Jagus, R.J.; Agüero, M.V.; Fernandez, M.V. Fruit and Vegetable Smoothies Preservation with Natural Antimicrobials for the Assurance of Safety and Quality. *LWT* **2022**, *154*, 112663. [[CrossRef](#)]
15. Shi, C.; Zhang, X.; Guo, N. The Antimicrobial Activities and Action-Mechanism of Tea Tree Oil against Food-Borne Bacteria in Fresh Cucumber Juice. *Microb. Pathog.* **2018**, *125*, 262–271. [[CrossRef](#)]
16. Dhiman, R.; Aggarwal, N.; Aneja, K.R.; Kaur, M. In Vitro Antimicrobial Activity of Spices and Medicinal Herbs against Selected Microbes Associated with Juices. *Int. J. Microbiol.* **2016**, 9015802. [[CrossRef](#)]
17. Kossah, R.; Nsabimana, C.; Zhao, J.; Chen, H.; Tian, F.; Zhang, H.; Chen, W. Comparative Study on the Chemical Composition of Syrian Sumac (*Rhus coriaria* L.) and Chinese Sumac (*Rhus typhina* L.) Fruits. *Pak. J. Nutr.* **2009**, *8*, 1570–1574. [[CrossRef](#)]
18. Ahmadian-Attari, M.M.; Amin, G.H.; Fazeli, M.R.; Jamalifar, H. A Review on Antimicrobial Activities of Sumac Fruit (*Rhus coriaria* L.). *J. Med. Plants* **2008**, *7*, 1–11.
19. Korkmaz, H. Could Sumac Be Effective on COVID-19 Treatment? *J. Med. Food* **2021**, *24*, 563–568. [[CrossRef](#)]
20. Belhassan, A.; Zaki, H.; Chtita, S.; Alaqrbeh, M.; Alsakhen, N.; Benlyas, M.; Lakhlifi, T.; Bouachrine, M. Camphor, Artemisinin and Sumac Phytochemicals as Inhibitors against COVID-19: Computational Approach. *Comput. Biol. Med.* **2021**, *136*, 104758. [[CrossRef](#)]
21. Sherif, Y.E.; Gabr, S.A.; Hosny, N.M.; Alghadir, A.H.; Alansari, R. Phytochemicals of *Rhus* spp. as Potential Inhibitors of the SARS-CoV-2 Main Protease: Molecular Docking and Drug-Likeness Study. *Evid.-Based Complement. Altern. Med.* **2021**, *2021*, 8814890. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
22. Aliakbarlu, J.; Mohammadi, S. Effect of Sumac (*Rhus coriaria* L.) and Barberry (*Berberis vulgaris* L.) Water Extracts on Microbial Growth and Chemical Changes in Ground Sheep Meat. *J. Food Process. Preserv.* **2015**, *39*, 1859–1866. [[CrossRef](#)]
23. El Khatib, S.; Salame, A. Sumac (*Rhus coriaria*) Extracts to Enhance the Microbiological Safety of the Red Meat. *Food Sci. Technol.* **2019**, *7*, 41–52. [[CrossRef](#)]
24. Khalkhali, F.N.; Noveir, M.R. Effect of Sumac (*Rhus coriaria*) and Rosemary (*Rosmarinus officinalis*) Water Extracts on Microbial Growth Changes in Ground Beef Meat. *J. Food Bioprocess Eng.* **2018**, *33*, 40.
25. Ibrahim, F.; El-Shehawy, S. The Antimicrobial and Antioxidant Effects of Aquous Thyme and Sumac Extracts in Refrigerated Minced Beef Meat. *J. Product. Dev.* **2013**, *18*, 23–35.
26. Hamza, R.A.T.; Osheba, A.S.; Sobhy, H.M.; Hekal, S.H.A. Antioxidant and Antimicrobial Activities of Galangal and Sumac to Improve Quality Attributes of Beef Burger. *Adv. Anim. Vet. Sci.* **2022**, *10*, 1202–1210.
27. Sakhr, K.; El Khatib, S. The Use of Syrian Sumac (*Rhus coriaria*) as a Meat Tenderizer: Effect on Fat, Protein and Collagen Profiles on Pectoralis Superficialis Cut. *Turk. J. Agric.-Food Sci. Technol.* **2019**, *7*, 1203–1215. [[CrossRef](#)]
28. Özcan, M. Antioxidant Activities of Rosemary, Sage, and Sumac Extracts and Their Combinations on Stability of Natural Peanut Oil. *J. Med. Food* **2003**, *6*, 267–270. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
29. Dziki, D.; Cacak-Pietrzak, G.; Hassoon, W.H.; Gawlik-Dziki, U.; Sulek, A.; Różyło, R.; Sugier, D. The Fruits of Sumac (*Rhus coriaria* L.) as a Functional Additive and Salt Replacement to Wheat Bread. *LWT* **2021**, *136*, 110346. [[CrossRef](#)]
30. González-Casado, S.; Martín-Belloso, O.; Elez-Martínez, P.; Soliva-Fortuny, R. Enhancing the Carotenoid Content of Tomato Fruit with Pulsed Electric Field Treatments: Effects on Respiratory Activity and Quality Attributes. *Postharvest Biol. Technol.* **2018**, *137*, 113–118. [[CrossRef](#)]
31. Lachowicz, S.; Kolniak-Ostek, J.; Oszmiański, J.; Wiśniewski, R. Comparison of Phenolic Content and Antioxidant Capacity of Bear Garlic (*Allium ursinum* L.) in Different Maturity Stages. *J. Food Process. Preserv.* **2017**, *41*, 12921. [[CrossRef](#)]
32. Olszowy, M. What Is Responsible for Antioxidant Properties of Polyphenolic Compounds from Plants? *Plant Physiol. Biochem.* **2019**, *144*, 135–143. [[CrossRef](#)]
33. Yan, Z.; Zhong, Y.; Duan, Y.; Chen, Q.; Li, F. Antioxidant Mechanism of Tea Polyphenols and Its Impact on Health Benefits. *Anim. Nutr.* **2020**, *6*, 115–123. [[CrossRef](#)]
34. Potì, F.; Santi, D.; Spaggiari, G.; Zimetti, F.; Zanotti, I. Polyphenol Health Effects on Cardiovascular and Neurodegenerative Disorders: A Review and Meta-Analysis. *Int. J. Mol. Sci.* **2019**, *20*, 351. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Stagos, D. Antioxidant Activity of Polyphenolic Plant Extracts. *Antioxidants* **2019**, *9*, 19. [[CrossRef](#)]
36. Szczepańska, J.; Barba, F.J.; Skapska, S.; Marszałek, K. High Pressure Processing of Carrot Juice: Effect of Static and Multi-Pulsed Pressure on the Polyphenolic Profile, Oxidoreductases Activity and Colour. *Food Chem.* **2020**, *307*, 125549. [[CrossRef](#)]
37. Abu-Reida, I.M.; Jamous, R.M.; Ali-Shtayeh, M.S. Phytochemistry, Pharmacological Properties and Industrial Applications of *Rhus coriaria* L. (Sumac). *Jordan J. Biol. Sci.* **2014**, *7*, 233–244. [[CrossRef](#)]
38. Batiha, G.E.-S.; Ogunyemi, O.M.; Shaheen, H.M.; Kutu, F.R.; Olaiya, C.O.; Sabatier, J.-M.; De Waard, M. *Rhus coriaria* L. (Sumac), a Versatile and Resourceful Food Spice with Cornucopia of Polyphenols. *Molecules* **2022**, *27*, 5179. [[CrossRef](#)]
39. Bozkurt, H. Investigation of the Effect of Sumac Extract and BHT Addition on the Quality of Sucuk (Turkish Dry-Fermented Sausage). *J. Sci. Food Agric.* **2006**, *86*, 849–856. [[CrossRef](#)]
40. Çorapçı, B.; Köstekli, B.; Eyüboğlu, A.; Kocatepe, D. The Effect of Different Application Methods of Sumac (*Rhus coriaria*) and Tarragon (*Artemisia dracunculoides*) on Some Quality Properties of Marinated Sea Bream (*Sparus aurata* L., 1758). *J. Food Process. Preserv.* **2020**, *44*, 14751. [[CrossRef](#)]
41. Ghane, M.; Babaeekhou, L.; Shams, M. Antimicrobial Activity of *Rhus coriaria* L. and *Salvia urmiensis* Bunge against Some Food-Borne Pathogens and Identification of Active Components Using Molecular Networking and Docking Analyses. *Food Sci. Technol.* **2022**, *42*, e08221. [[CrossRef](#)]

42. Mahdavi, S.; Hesami, B.; Sharafi, Y. Antimicrobial and Antioxidant Activities of Iranian Sumac (*Rhus coriaria* L.) Fruit Ethanolic Extract. *J. Appl. Microbiol. Biochem.* **2018**, *2*, 5. [[CrossRef](#)]
43. Nasar-Abbas, S.M.; Halkman, A.K. Antimicrobial Effect of Water Extract of Sumac (*Rhus coriaria* L.) on the Growth of Some Food Borne Bacteria Including Pathogens. *Int. J. Food Microbiol.* **2004**, *97*, 63–69. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
44. Gulmez, M.; Oral, N.; Vatansever, L. The Effect of Water Extract of Sumac (*Rhus coriaria* L.) and Lactic Acid on Decontamination and Shelf Life of Raw Broiler Wings. *Poult. Sci.* **2006**, *85*, 1466–1471. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

P7. Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Żukiewicz-Sobczak, W., Lachowicz-Wiśniewska, S., & Sobczak, P. (2024). Effects of the powdered fruit of *Rhus coriaria* L. addition on quality attributes based on total polyphenols content of smoothie during storage. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 69(1), 4. (IF=0,000, MNiSW=20).

Article citation info:

Osmólska E., Starek-Wójcicka A., Żukiewicz-Sobczak W., Lachowicz-Wiśniewska S., Sobczak P. 2024. Effects of the powdered fruit of *Rhus coriaria* L. addition on quality attributes based on total polyphenols content of smoothie during storage. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 69 (1): 5–10. <https://doi.org/10.53502/IVMB7729>




Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering

Journal website: <https://tech-rol.eu/>




Effects of the powdered fruit of *Rhus coriaria* L. addition on quality attributes based on total polyphenols content of smoothie during storage

Emilia Osmólska^a 

Agnieszka Starek-Wójcicka^{b*} 

Wioletta Żukiewicz-Sobczak^{b, c} 

Sabina Lachowicz-Wiśniewska^c 

Paweł Sobczak^d 

^a Department of Power Engineering and Transportation, Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin, Lublin, Poland

^b Department of Biological Bases of Food and Feed Technologies, Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin, Lublin, Poland

^c Department of Nutrition and Food, Faculty of Health Sciences, Calisia University, Kalisz, Poland

^d Department of Food Engineering and Machines, Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin, Lublin, Poland

*Corresponding author: Agnieszka Starek-Wójcicka agnieszka.starek@up.lublin.pl

Article info

Received: 22 August 2023

Accepted: 20 March 2023

Published: 16 April 2024

Keywords

natural additives
sumac *Rhus coriaria* L.
antimicrobial
storage durability
smoothie quality

The effects of sumac (5, 15, and 30 g/L) addition on the quality attributes of fruit and vegetable smoothies were investigated over refrigerated storage. A slight decrease in pH was observed in the samples of the sumac-fortified drink, compared to the control smoothie (without the spice). On the third day of the study, the addition of 5, 15, and 30 g/L of sumac reduced the total number of microorganisms by 1.46, 2.07, and 2.95 log₁₀ CFU/ml, respectively, compared to the control. The supplementation of the smoothie with 30 g/L of sumac increased the content of polyphenolic compounds on the first day of storage by 54%, compared to the control sample. This indicates that natural sumac can be used for enrichment of foodstuffs with healthy food ingredients.

DOI: <https://doi.org/10.53502/IVMB7729>

This is an open access article under the CC BY 4.0 license:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>

1. Introduction

Fruit and vegetable smoothies, regarded as functional drinks, have been gaining acceptance and rapidly growing popularity among consumers, as they have turned out to be a good source of vitamins, phenolic compounds, carotenoids, and other bioactive substances [1-3]. Unfortunately, these types of products must be consumed soon after preparation or within 24 hours to avoid spoilage during storage. Thermal preservation methods used to control the growth of

microorganisms are not a suitable solution for this-type of products, because such treatments may reduce their quality attributes [4-6].

The application of novel natural antimicrobials (especially herbs and spices) to assure the safety of smoothies and prevent quality loss is a promising alternative [7, 8]. Sumac (*Rhus coriaria* L.) represents the cashew family (Anacardiaceae). The shrub grows up to 3 m high and has spirally arranged deciduous

leaves. Its greenish-yellow flowers are gathered in a long and dense panicle. The fruits are lenticular drupes, slightly fleshy, surrounded by short glandular hairs, with one seed. The finished spice is a granular, red-burgundy powder. It is distinguished by a characteristic smell and a sour and slightly fruity aftertaste, which gives the dishes a distinct character [9, 10]. Sumac has potential antiviral properties and can be used in complementary therapy to prevent infections and enhance immunity [11-13]. The plant is rich in various classes of phytochemicals (flavonoids, anthocyanins, phenolic and organic acids), vitamins (C, B₆, B₁, B₂) and minerals (Ca, P, Mg). Many scientists have reported that aqueous and alcohol extracts of sumac fruit used in meat and its products as well as fish or oils exhibit strong antioxidant and/or antibacterial activity [14-17]. To the best of our knowledge, sumac has not been used as a smoothie ingredient to date. Therefore, the aim of this study was to assess the effect of powder sumac fruit addition on the quality attributes of fruit and vegetable smoothies.

2. Materials and Methods

2.1. Smoothie Preparation Enriched with Sumac

The smoothie was prepared from freshly pressed juice of good quality carrots cv. Nerac (85%) and bananas cv. Cavendish (15%). Juice was pressed using a slow juicer (Sana EUJ-707, Omega Products, South Korea). The bananas were peeled and cut into small pieces. The products were obtained from a local supermarket. The ingredients were then mixed in a homogenizer (JTC OmniBlend, Guangdong, China) for 60 seconds. Tanner's sumac (*Rhus coriaria* L.) was purchased from a health-food store (Lublin, Poland). The product was ground in a ChemLand laboratory mill, model FW 100 (Stargard, Poland). Powdered sumac fruit with a maximum grain size of 0.5 mm was added to the smoothie in the amount of 5 (sample code S 5), 15 (sample code S 15), and 30 g/L (sample code S 30) and stored refrigerated (6°C) for three days, with daily analyses of the product quality. A smoothie without spices was the control sample (code C).

2.2. Microbiological Analysis

The number of aerobic mesophilic microorganisms was determined in Plate Count Agar (PCA; BioMaxima, Lublin, Poland) after incubation at 30°C for 72 h [18]. Sabouraud Dextrose with Chloramphenicol (BioMaxima, Lublin, Poland) was used to assess the presence of yeast and molds after incubation for 5 days at 25°C [19]. The procedures were performed

in sterile conditions provided by a laminar chamber with a CRUMA 670FL UV lamp (El Prat de Llobregat, Barcelona, Spain), and incubation was carried out in a POL-EKO type CLN 115 SMART incubator (Wodzislaw Śląski, Poland). Typical colonies were counted, and the results were expressed as Log colony forming units per milliliter (Log CFU/mL) of sample.

2.3. Physicochemical Analysis

The pH was measured by direct reading at 25±1°C in a 780 pH Meter Metrohm (Herisau, Switzerland), which was calibrated with commercial buffer solutions at pH 7.0 and 4.0. The amount of total polyphenols in the analysed samples was determined with the Folin-Ciocalteu method, reading the results in a UV/Vis Helios Omega 3 spectrophotometer (Massachusetts, MA, USA). The absorbance of the mixture was measured at 765 nm after 90 minutes of storage in the dark at room temperature. The results were expressed as milligrams of gallic acid per 100 mL sample. The color of the samples was measured using a 3Color spectrophotometer SF80 (Marcq-en-Barœul, France) and the D65° illuminant with an angle of observation of 10°. The instrument was calibrated using the black and white tiles provided. The colour was recorded using the CIE colour scale to measure the parameters of L*(lightness/darkness), a*(redness/greenness), and b*(yellowness/blueness).

2.4. Statistical Analysis

Statistica software package, Version 10 was employed for data analysis (StatSoft Inc., Tulsa, OK., U.S.A.). Two-way analysis of variance was performed using ANOVA procedures. Comparison of means was carried out by Tukey's test. A *p* value of 0.05 or less was regarded as significant. Microbiological analysis was performed in three repetitions, and the physicochemical determinations were carried out in four repetitions.

3. Results And Discussion

As shown by the results presented in Figures 1a and b, the average level of contamination of the fresh fruit and vegetable smoothie samples with aerobic mesophilic microorganisms and yeasts after storage day 1 was 6.06 log₁₀ CFU/mL and 2.24 log₁₀ CFU/mL, respectively. On the consecutive days, the total number of microorganisms increased to 6.31 log₁₀ CFU/mL with a further increase to 6.94 log₁₀ CFU/mL. Similarly, the content of yeast colonizing the control products (C) was 2.88 log₁₀ CFU/mL on day 2 and increased to 4.26 log₁₀ CFU/mL on day 3. The addition of the sumac powder to the freshly prepared beverage

was effective in reducing microbial growth, but this effect was clearly dependent on the amount of the spice used. Noteworthy, considering the multiplication of microorganisms in the control smoothie samples during storage and the inhibition of their growth in the sumac-supplemented samples, the greatest reduction in the number of microorganisms was recorded after 3 days of storage. The total number of aerobic microorganisms in samples S 5 and S 15 declined by 1.46 and 2.07 \log_{10} CFU/mL, respectively, in comparison with the control (C). The number of yeasts and molds in the smoothie samples supplemented with 5 g/L of sumac decreased to 4.16 \log_{10} CFU/mL. At the supplementation dose of 15 g/L, the average number of the analysed microorganisms was reduced to 2.29 \log_{10} CFU/mL. The addition of 30 g/L of sumac provided the best results and decreased the total number of microorganisms to an average level of 3.66 \log_{10} CFU/mL (43% reduction of their number, compared with the control). Similarly, satisfactory results were obtained in the case of yeasts present in the smoothie, as the sumac supplementation contributed to 48% reduction of their number in samples S 30 on day 3, compared with the control. Our findings and results reported by other scientists [20-22] suggest the potential of *Rhus coriaria* L. fruits to be used as a new source of natural antimicrobial substances for the food industry.

A sumac dose-dependent decrease in the average values of active acidity was found in the analysed fruit and vegetable smoothies (Fig. 2a). During the refrigerated storage period, the value of the parameter in samples C (control), S 5, and S 15 slightly decreased or did not change. In turn, a 6% increase in the pH value of sample S 30 was noted between day 1 and 3. These changes (confirmed by the statistical test) were induced by the presence of acids in the sumac fruit, e.g. malic, citric, fumaric, tartaric, and ascorbic acids [23, 24].

The content of total polyphenolic compounds in the analysed smoothie samples differed statistically significantly ($p < 0.05$) (Fig. 2b). Their highest content was found in the samples supplemented with the highest sumac dose. The differences between C (non-supplemented sample) and S 30 on experimental days 1, 2, and 3 were 54%, 63%, and 65%, respectively. Several scientific studies confirm that sumac is rich in polyphenols and can be used as an innovative ingredient for maintenance and improvement of food quality. In their study, Dziki et al. [25] replaced wheat flour with 1, 2, 3, 4, and 5 g/100 g of sumac flour,

which not only helped to reduce the salt content but also enriched the bread with phenolic compounds. Sumac extracts contributed to a statistically significant ($p < 0.05$) increase in total phenolics in Cheddar cheese in a dose-dependent manner (doses from 0.5 to 3.0%) [26].

The value of the L^* parameter, which indicated the lightness of the smoothie, ranged from 42.09 to 44.96. The highest value, i.e. the lightest colour, was recorded for the control drink (C) on experimental day 1, whereas the lowest value (the darkest colour) was determined in the 30 g/L sumac-supplemented samples (S 30) on day 2. The values of the a^* parameter changed depending on the amount of sumac added to the smoothie. At the higher doses of the spice in the beverage, the value of the parameter declined (the level of redness decreased). The values of this parameter on day 1 ranged from 14.20 to 16.21. After three days, the control smoothie had a darker red colour, while the sumac-enriched samples did not show such a change (14.41-17.31). The lower values of the b^* parameter in the sumac-enriched products, compared with the non-supplemented smoothie samples, indicated a lower level of yellowness. The highest value of the parameter was determined for the control sample (the most yellow), whereas the product supplemented with 15 g/L of sumac on day 3 had the lowest value (Tab. 1).

6. Summary

Juices are beverages chemically enriched with various additives, such as citric acid or synthetic vitamin C. The use of sumac is a new, natural alternative to products made of perishable or browning fruits and vegetables. Supplementing the smoothie with powdered *Rhus coriaria* L. fruit improves the nutritional value and microbiological safety of the final product. On the first day of storage, the content of polyphenolic compounds increased by 54% in the product containing 30 g/L of sumac compared to the control sample. During three days of storage, the total number of aerobic mesophilic bacteria increased in the control samples, while the growth of these microorganisms was inhibited in the sumac-supplemented smoothie. Future research should cover a larger number of products made from fruit and vegetables, which will be supplemented with sumac fruit *Rhus coriaria* L. in various amounts and forms of fragmentation, which will additionally be subjected to sensory analysis.

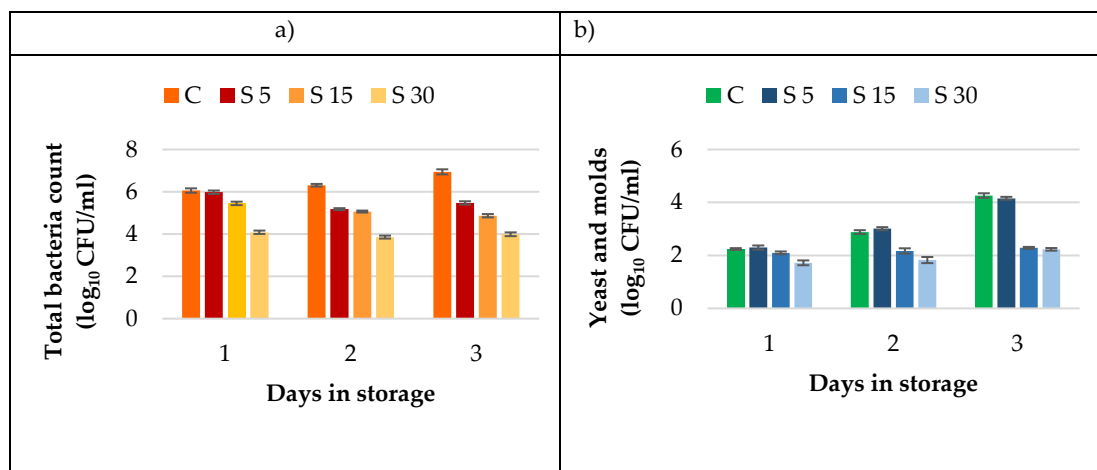


Fig. 1. Effect of powder sumac fruit addition on: a) the total content of microorganisms and b) yeast and mold in smoothie samples stored under refrigerated conditions for 3 days; mean values ($n = 4$) with standard deviation are given

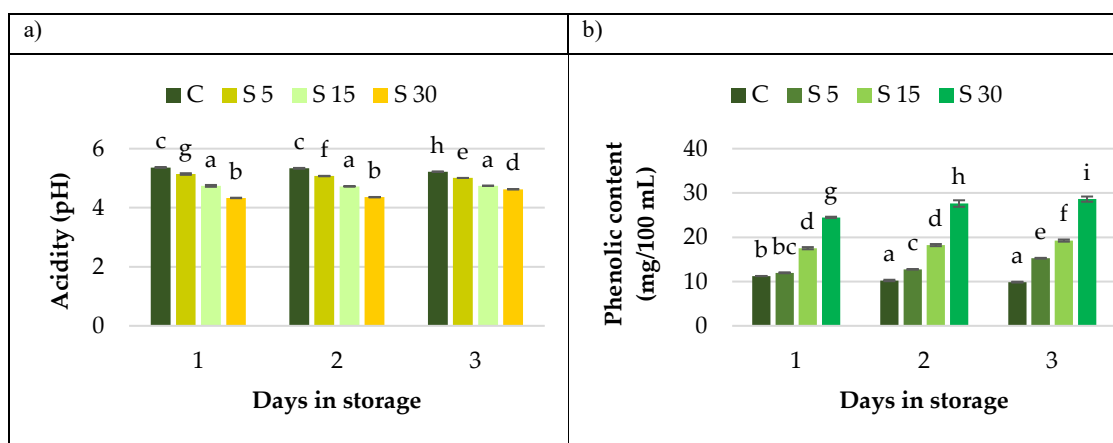


Fig. 2. Effect of powder sumac fruit addition on: a) pH and b) total phenolic content in a smoothie stored under refrigerated conditions for 3 days; the results are expressed as a mean \pm standard deviation; different letters next to the mean values in the figures mean statistically significant differences ($p < 0.05$).

Table 1. Effect of the addition of sumac fruit powder on colour parameters of smoothie stored refrigerated for 3 days

Smoothie samples code	Time storage (days)	Color parameters		
		L*	a*	b*
C	1	44.94 \pm 0.02 ^h	16.23 \pm 0.02 ^{gh}	20.63 \pm 0.04 ^e
S 5		44.80 \pm 0.04 ^h	16.12 \pm 0.05 ^g	20.58 \pm 0.05 ^e
S 15		43.07 \pm 0.57 ^{df}	15.03 \pm 0.06 ^d	19.32 \pm 0.14 ^d
S 30		43.05 \pm 0.06 ^{df}	14.22 \pm 0.03 ^b	18.32 \pm 0.05 ^c
C	2	44.80 \pm 0.03 ^h	16.42 \pm 0.05 ^h	20.91 \pm 0.05 ^{ef}
S 5		44.18 \pm 0.03 ^g	15.62 \pm 0.18 ^f	20.52 \pm 0.02 ^c
S 15		42.18 \pm 0.05 ^{bc}	14.29 \pm 0.08 ^{bc}	17.52 \pm 0.44 ^b
S 30		42.11 \pm 0.02 ^b	14.38 \pm 0.03 ^{bc}	18.57 \pm 0.41 ^c
C	3	44.62 \pm 0.04 ^{hi}	17.26 \pm 0.06 ⁱ	21.22 \pm 0.05 ^f
S 5		43.31 \pm 0.09 ^g	15.35 \pm 0.07 ^e	19.31 \pm 0.03 ^d
S 15		42.83 \pm 0.07 ^a	14.18 \pm 0.03 ^a	17.68 \pm 0.09 ^a
S 30		42.61 \pm 0.07 ^{de}	14.46 \pm 0.06 ^c	18.26 \pm 0.06 ^c

The results are expressed as a mean \pm standard deviation from three independent experiments. Different letters in the same row means statistically significant differences ($p < 0.05$)

References

- [1] Sharma K. D., Karki S., Thakur N.S., Attri S.: Chemical Composition, Functional Properties and Processing of Carrot - a review. *Journal of Food Science and Technology*, 2012, 49(1), 22–32. doi: [10.1007/s13197-011-0310-7](https://doi.org/10.1007/s13197-011-0310-7)
- [2] Castillejo N., Martínez-Hernández G. B., Gómez P. A., Artés F., Artés-Hernández F.: Red Fresh Vegetables Smoothies with Extended Shelf Life as an Innovative Source of Health-Promoting Compounds. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(3), 1475–1486. doi: [10.1007/s13197-015-2143-2](https://doi.org/10.1007/s13197-015-2143-2)
- [3] Formica-Oliveira A. C., Martínez-Hernández G. B., Aguayo E., Gómez P. A., Artés F., Artés-Hernández F.: A Functional Smoothie from Carrots with Induced Enhanced Phenolic Content. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10, 491–502. doi: [10.1007/s11947-016-1829-4](https://doi.org/10.1007/s11947-016-1829-4)
- [4] Wang S., Lin T., Man G., Li H., Zhao L., Wu J., Liao X.: Effects of Anti-Browning Combinations of Ascorbic Acid, Citric Acid, Nitrogen and Carbon Dioxide on the Quality of Banana Smoothies. *Food Bioprocess Technology*, 2014, 7, 161–173. doi: [10.1007/s11947-013-1107-7](https://doi.org/10.1007/s11947-013-1107-7)
- [5] Markowski J., Celejewska K., Rosłonek A., Kosmala M.: Impact of Different Thermal Preservation Technologies on the Quality of Apple-Based Smoothies. *LWT*, 2017, 85, 470–473. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.004>
- [6] Ribeiro L. D. O., Barbosa I. D. C., Sá D. D. G. C. F. D., Silva J. P. L. D., Matta V. M. D. & Freitas, S. P.: Stability Evaluation of Juçara, Banana and Strawberry Pasteurized Smoothie during Storage. *Food Science and Technology*, 2020, 40(2), 387–393. doi: <https://doi.org/10.1590/fst.01319>
- [7] Jolayemi O. S., Adeyeye O. A.: Assessment of Nutrient and Storage Stabilizing Potential of Ginger and Garlic on Composite Fruit Smoothies. *Asian Food Science Journal*, 2018, 4, 1–15. doi: [10.9734/AFSJ/2018/44109](https://doi.org/10.9734/AFSJ/2018/44109)
- [8] Kumar A., Aggarwal P., Kumar V., Babbar N., Kaur S.: Melon-Based Smoothies: Process Optimization and Effect of Processing and Preservation on the Quality Attributes. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16, 4121–4136. doi: <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01466-3>
- [9] Sakhr K., El Khatib S.: Physicochemical Properties and Medicinal, Nutritional and Industrial Applications of Lebanese Sumac (Syrian Sumac-*Rhus Coriaria*): A Review. *Heliyon* 2020, 6, e03207. doi: [10.1016/j.heliyon.2020.e03207](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03207)
- [10] Perrone A., Yousefi S., Basile B., Corrado G., Giovino A., Salami S.A., Papini A., Martinelli F.: Phytochemical, Antioxidant, Anti-Microbial, and Pharmaceutical Properties of Sumac (*Rhus Coriaria* L.) and Its Genetic Diversity. *Acta Horti* 2022, 8, 1168. doi: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8121168>
- [11] Korkmaz H.: Could Sumac Be Effective on COVID-19 Treatment? *Journal of Medical Food* 2021, 24, 563–568. doi: <https://doi.org/10.1089/jmf.2020.0104>
- [12] Belhassan A., Zaki H., Chtita S., Alaqarbeh M., Alsakhen N., Benlyas M., Lakhli T., Bouachrine M.: Camphor, Artemisinin and Sumac Phytochemicals as Inhibitors against COVID-19: Computational Approach. *Computers in Biology and Medicine*, 2021, 136, 104758. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104758>
- [13] Alsamri H., Athamneh K., Pintus G., Eid A.H., Iratni R.: Pharmacological and Antioxidant Activities of *Rhus Coriaria* L. (Sumac). *Antioxidants*, 2021, 10, 73. doi: [10.3390/antiox10010073](https://doi.org/10.3390/antiox10010073)
- [14] Aliakbarlu, J., Mohammadi, S.: Effect of Sumac (*Rhus Coriaria* L.) and Barberry (*Berberis Vulgaris* L.) Water Extracts on Microbial Growth and Chemical Changes in Ground Sheep Meat. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39, 1859–1866. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12423>
- [15] Naseri Khalkhali, F., Rahati Noveir, M.: Effect of Sumac (*Rhus Coriaria*) and Rosemary (*Rosmarinus Officinalis*) Water Extracts on Microbial Growth Changes in Ground Beef Meat. *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 2018, 1, 127–132.
- [16] Özcan M.: Antioxidant Activities of Rosemary, Sage, and Sumac Extracts and Their Combinations on Stability of Natural Peanut Oil. *Journal of Medical Food*, 2003, 6, 267–270. doi: [10.1089/10966200360716698](https://doi.org/10.1089/10966200360716698)
- [17] Fadiloglu E.E., Çoban M.Z.: The Effect of Glazing with Sumac (*Rhus Coriaria*, L.) Extract on the Quality of Frozen Rainbow Trout (*Oncorhynchus Mykiss*) Fillets. *Ecological Life Sciences*, 2019, 14, 129–138. doi: [10.12739/NWSA.2019.14.4.5A0126](https://doi.org/10.12739/NWSA.2019.14.4.5A0126)
- [18] PN-EN ISO 4833 (2013). Mikrobiologia łańcucha żywnościowego-Horyzontalna metoda oznaczania liczby drobnoustrojów. Oznaczanie liczby metodą posiewu zalewowego w temperaturze 30 stopni C.
- [19] PN ISO 21527 (2009). Mikrobiologia żywności i pasz-Horyzontalna metoda oznaczania liczby drożdży i pleśni. Metoda liczenia kolonii w produktach o aktywności wody wyższej niż 0,95.
- [20] Rad A.H., Iraj Z., Kafil H.S., Servat H.: Antioxidant and antimicrobial effect of sumac (*Rhus Coriaria* L.) Powder on *E. Coli* and *Penicillium Notatum* in prebiotics low fat yoghurt. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 2020, 12, 40-51. doi: <https://doi.org/10.34302/crpfjst/2020.12.1.4>
- [21] Var I., Uzunlu S., Değirmenci I.: Antimicrobial Effects of Fruit Sauces on Some Pathogenic Bacteria in Vitro and on Chicken Breast Meat. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, 2021, 72, 2703–2712. doi: <https://doi.org/10.12681/jhvms.26755>
- [22] Hamza R. A. T., Osheba A. S., Sobhy H. M., Hekal S. H. A.: Antioxidant and Antimicrobial Activities of Galangal and Sumac to Improve Quality Attributes of Beef Burger. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 2022, 10, 1189-1422. doi: <https://dx.doi.org/10.17582/journal.aavs/2022/10.6.1202.1210>

- [23] Abu-Reida I. M., Jamous R. M., Ali-Shtayeh M. S.: Phytochemistry, Pharmacological Properties and Industrial Applications of *Rhus Coriaria* L.(Sumac). JJBS , 2014, 7, 233-244. doi:[10.12816/0008245](https://doi.org/10.12816/0008245)
- [24] Mavlyanov S. M., Islambekov, S. Y., Karimdzhano A. K., Ismaikov A. I.: Anthocyanins and Organic Acids of the Fruits of Some Species of Sumac. Chemistry of Natural Compounds, 1997, 33, 209–209. doi:[10.1007/BF02291544](https://doi.org/10.1007/BF02291544)
- [25] Dziki D., Cacak-Pietrzak G., Hassoon W. H., Gawlik-Dziki U., Sułek A., Różyło R., Sugier D.: The Fruits of Sumac (*Rhus Coriaria* L.) as a Functional Additive and Salt Replacement to Wheat Bread. LWT 2021, 136, 110346. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110346>
- [26] Wang S., Nie S., Gan R.-Y., Zhu F.: Properties of Cheese and Ground Beef in the Presence of Staghorn Sumac. eFood, 2023, 4, e74. doi: <https://doi.org/10.1002/efd2.74>

P8. Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., Kwiatkowski, M., **Osmólska, E.**, Krajewska, M., ... & Pawlat, J. (2022). Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. *Applied Sciences*, 13(1), 578. **(IF=2,500, MNiSW=100).**

Article

Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment

Agnieszka Starek-Wójcicka ¹, Agnieszka Sagan ^{1,*}, Piotr Terebun ², Michał Kwiatkowski ²,
Emilia Osmólska ³, Marta Krajewska ¹, Elżbieta Grządka ⁴, Narumol Matsuyama ⁵, Nobuya Hayashi ⁶
and Joanna Pawlat ^{2,*}

¹ Department of Biological Bases of Food and Feed Technologies, University of Life Sciences in Lublin, 20-612 Lublin, Poland

² Chair of Electrical Engineering and Electrotechnologies, Lublin University of Technology, 20-618 Lublin, Poland

³ Department of Power Engineering and Transportation, University of Life Sciences in Lublin, 20-612 Lublin, Poland

⁴ Faculty of Chemistry, Institute of Chemical Sciences, Maria Curie-Skłodowska University, 20-031 Lublin, Poland

⁵ Faculty of Science and Engineering, Saga University, Saga 840-8502, Japan

⁶ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, Fukuoka 816-8580, Japan

* Correspondence: agnieszka.sagan@up.lublin.pl (A.S.); j.pawlat@pollub.pl (J.P.)

Abstract: This paper presents the results of an experiment based on using a Glide-arc type plasma reactor operating at atmospheric pressure for the quality of fresh pressed tomato juice, variety Bekas. The impact of after-glow plasma gas (air) on the physicochemical, microbiological properties and morphology of the product's samples was investigated. Five groups of juices characterized by different exposure times (30, 60, 120, 300 and 600 s), as well as untreated juice (as control) were used. The juice quality was assessed on days 1, 3, 5, and 10 of refrigerated storage. Significant increases were observed when Cold Atmospheric Plasma (CAP)-treated tomato juice was tested against total soluble solids, pH, lycopene, and vitamin C in comparison to the control treatments. Moreover, changes in the tested physicochemical values during the storage of juice subjected to the action of cold plasma did not progress as quickly as in the case of the control juice. A significant decrease was observed in total plate count, yeast, and mold after 300–600 s CAP treatment. The findings of the current study suggested that CAP treatment is a promising technique that could provide improved quality and stability during the processing of tomato juice with better physicochemical properties and bioavailable nutrients.

Keywords: atmospheric pressure plasma; Glide-arc reactor; microbial bio-decontamination; physicochemical and morphological properties; fresh pressed tomato juice; electrotechnology for food



Citation: Starek-Wójcicka, A.; Sagan, A.; Terebun, P.; Kwiatkowski, M.; Osmólska, E.; Krajewska, M.; Grządka, E.; Matsuyama, N.; Hayashi, N.; Pawlat, J. Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 578.

<https://doi.org/10.3390/app13010578>

Academic Editor: Suyong Lee

Received: 13 December 2022

Revised: 23 December 2022

Accepted: 27 December 2022

Published: 31 December 2022



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Currently, consumers are eager to buy products that exert a positive effect on their health and wellbeing and protect their bodies against diseases. A healthy human diet should contain large amounts of raw or processed fruit and vegetables. NFC (Not From Concentrate) juices are part of the currently promoted so-called healthy lifestyle. They are made only from fresh raw material without the addition of water, concentrated juice, or artificial ingredients; hence, they are definitely more valuable than 'From Concentrate' juices. They provide the organism with substantially higher amounts of vitamins, minerals, dietary fiber, pectins, and many substances that are essential for health, e.g., antioxidants (flavonoids or carotenoids) [1–3]. Most of these juices are pasteurized to eliminate microorganisms present in the products. Elimination of bacteria protects the products against spoilage, thereby extending their storage stability over a long time. However, this treatment

process can destroy not only microorganisms but also many valuable biologically active substances [4–6].

Therefore, there is a need to devise methods for juice preservation that will induce the smallest possible changes in the physicochemical properties of the material without compromising its microbiological safety. The application of cold atmospheric plasma (CAP), classified as a low-temperature treatment contributing to the preservation of thermolabile substances in juice, seems to be a promising approach. A properly designed experimental plasma system and properly selected process parameters can yield very high-quality products. Cold plasma has become a novel option as a disinfecting and preserving agent, which can also improve the quality of certain food parameters [7–9]. Many research groups reported that relatively low temperatures allowed the treatment of a variety of samples, including biological material, such as seeds and food, and including juices and nectars [10–16]. Plasma is generated in electrical discharges, and depending on the operational parameters of the device, and many factors, such as free electrons and electromagnetic radiation, species such as RONS (reactive oxygen and nitrogen species) can be generated within plasmatrons and transported to the sample via working gas [17–20].

The aim of the current work was to investigate the impact of low temperature plasma on tomato juice. Air, as the most affordable option, was selected as a substrate gas.

2. Materials and Methods

2.1. Juice Preparation

Fresh red tomatoes vs. Bekas harvested from eastern Poland were classified, washed, and pressed to make juice by using a Philips slow juicer (Model HR1889/70, Amsterdam, Holland). A portion of the juice was treated with cold plasma for a specified period of time, while the untreated drink was the control. The pH, total soluble solids (Brix), lycopene, ascorbic acid, color (L^* , a^* , b^* and ΔE), and microbial activity were analyzed. The juice was refrigerated at 6 °C for 10 days.

2.2. Cold Plasma Treatment

Two-electrode atmospheric pressure GlidArc reactor (GAD) with AC power supply (50 Hz discharge frequency, 3.8 kV of applied voltage, 40 W of mean power) was used [17].

An amount of 440 L/h of air was supplied to the discharge zone via flow controller, and 50 mL of juice in a sterile glass container was placed on the magnetic stirrer AREX (VELP Scientifica, Usmate, Italy). The distance between the electrodes and the juice surface was 10 mm, and stirring speed was set at 120 RPM. Schema of the experimental set-up is presented in Figure 1. Juice samples were treated with plasma for 0 (control), 30, 60, 120, 300, 600 s. The highest temperature of the sample, measured after 600 s treatment with K-type thermocouple connected to the DT-847U meter (Maxtech, Taipei, Taiwan) was 29.6 °C.

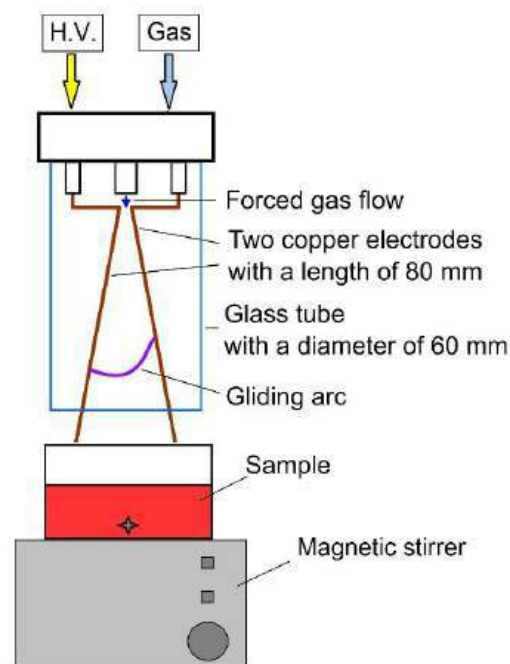


Figure 1. Experimental set-up.

2.3. Determination of Total Soluble Solids and pH

Total soluble solids (°Brix) and pH were measured using a handheld refractometer (LLG-uniREFRACTO, Meckenheim, Germany), and a pH meter (780 pH Meter Metrohm, Herisau, Switzerland) calibrated at 4.0 and 7.0 pH with standard buffers, respectively. The analysis was performed at 25 ± 1 °C.

2.4. Determination of Lycopene

The lycopene content was determined using the spectrophotometric method extracting the compound with a mixture of acetone with 0.2% BHT, ethanol and hexane (1: 1: 2) from the tested sample. Absorbance was measured at 503 nm using a UV/Vis Helios Omega 3 spectrophotometer (Massachusetts, MA, USA).

2.5. Determination of Ascorbic Acid

The content of vitamin C (L-ascorbic acid) was determined using 2,6-dichlorophenolindophenol (Tillmans dye) in accordance with Hallmann (2012). The sample was extracted in 2% oxalic acid. The solution was filtered. The filtrate was collected and then titrated with the Tillmans dye until a permanent pink color was reached.

2.6. Determination of Color Parameters in Tomatoes Juice

The color of the tomato juices was measured using a 3Color spectrophotometer SF80 (Marcq-en-Barœul, France). The results were expressed in accordance with the CIE $L^*a^*b^*$ system, using illuminant D65 and 10° observer. The color parameters were L^* value (lightness, ranging from 0, black, to 100, white), a^* value (positive values for reddish colors and negative value for greenish ones), and b^* value (positive for yellowish colors and negative for bluish ones). A standard white plate ($L^* = 92.37$, $a^* = -0.82$ and $b^* = 1.82$) was used to calibrate the instrument. Moreover, the tomato juice was critically evaluated for the total color difference (ΔE), which showed a numerical difference in this parameter of the samples after CAP treatment compared to the control sample, according to Equation (1).

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (1)$$

where, L_0 , a_0 , and b_0 are the color values of untreated juice samples.

The following criterion was used in the analysis of the results: the absolute color differences (ΔE) between 0 and 1 were regarded as unrecognizable (indiscernible deviation), values from 1 to 2 denoted a slight deviation recognizable by a person experienced in discriminating color nuances, values in the range of 2–3.5 indicated a deviation recognized even by a non-expert, 3.5–5 represented a clear deviation, and ΔE above 5 denoted a substantial color deviation.

2.7. Microbiological Analysis

The total numbers of aerobic microorganisms of treated and control tomato juice samples were carried out by following PN-EN ISO 4833–2, and the number of yeasts and molds as recommended by the international standard PN-ISO 21527–2, respectively. The microorganisms present in test samples were diluted and applied to the center of a previously prepared agar plate. Procedures were performed in sterile conditions—a laminar chamber with a CRUMA 670FL UV lamp (El Prat de Llobregat, Barcelona, Spain). Incubation was carried out in a POL-EKO type CLN 115 SMART (Wodzislav Ślaski, Poland) incubator at 30 °C for 72 h for microorganisms on PCA medium (agar with casein, glucose, yeast extract hydrolyzate) and at 25 °C for 5 days for yeasts and molds on a medium containing agar with a mixture of peptones, glucose, and chloramphenicol. Bacterial colonies were counted in the juice samples as CFU/mL of tomato juice and expressed as log CFU/mL of the sample.

2.8. Microscopic Analysis

The control and plasma-treated samples were observed using VK-X1000 laser microscope (Keyence Int., Osaka, Japan), which combines white light with a laser light source. The droplet of juice was put onto the microscopic glass. Non-contact profile and 3D depth analysis were performed to observe the microstructure of the juice and microscopic photos of the samples were taken.

2.9. Statistical Analysis

The individual physicochemical properties were analyzed in triplicate and presented as mean values with standard deviation (SD). In turn, the microbiological analysis results were presented as the mean values of four inoculations of each sample together with standard deviation (SD).

Additionally, the Tukey test (Statistica 10, StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA) was used to determine the effect of the factors on the physicochemical properties of the tomato juice. Particular attention was paid to the comparison of the control group with the individual levels of factors on the analyzed storage days (1, 3, 5, and 10). It was equally important to determine the effect of the cold plasma treatment time (30, 60, 120, 300, and 600 s) on changes in the analyzed parameters in comparison with the unprocessed samples.

3. Results and Discussion

3.1. Effect of CAP on Physicochemical Properties

Plasma technology uses plasma active species including radicals, neutral species, UV photons, and charged particles; therefore, interaction with some food components is possible. Evaluation of physicochemical properties after processing of the food material would help to reveal the effect of plasma, since any change may indicate a possible chemical reaction with one or more food components.

Acidity is one of the key parameters of juice quality, as it has an impact on the preservation method used for the maintenance of product safety. Moreover, any changes in this parameter may have an adverse effect on the texture, taste, and shelf life of products [21]. Tomatoes are acidic foods; hence, pH value of the tomato juices determined in the present study ranged from 3.35 to 4.57. The pH value in the control sample decreased during storage. The active acidity in the cold-plasma-treated juices was unchanged or increased slightly with the storage time. A statistically significant increase in pH value was found in

the cold-plasma-treated juice samples in comparison with the control. On the first storage day, pH of the juice exposed to cold plasma for 600 s slightly increased to 4.45, compared to 3.89 in the control sample (Table 1).

Table 1. Effect of cold plasma treatment on the chemical properties of tomato juice stored for 10 days.

Chemical Parameters	Time of Plasma Treatment (s)	Storage Time (Days)			
		1	3	5	10
pH	0 (control)	3.89 ± 0.02 ^{Ac}	3.65 ± 0.06 ^{Ab}	3.35 ± 0.05 ^{Aa}	NP
	30	4.41 ± 0.00 ^{Ba}	4.41 ± 0.00 ^{Ba}	4.42 ± 0.00 ^{Ba}	4.43 ± 0.00 ^{Aa}
	60	4.42 ± 0.01 ^{Ba}	4.43 ± 0.01 ^{Ba}	4.43 ± 0.00 ^{Ba}	4.44 ± 0.00 ^{Aa}
	120	4.46 ± 0.00 ^{Ba}	4.46 ± 0.00 ^{Ba}	4.48 ± 0.00 ^{B^aCa}	4.48 ± 0.00 ^{Aa}
	300	4.46 ± 0.00 ^{Ba}	4.55 ± 0.00 ^{Cb}	4.54 ± 0.03 ^{Cb}	4.55 ± 0.01 ^{Bb}
	600	4.45 ± 0.00 ^{Ba}	4.53 ± 0.04 ^{Cb}	4.52 ± 0.01 ^{Cb}	4.57 ± 0.02 ^{Bb}
Total Soluble Solids (°Brix)	0 (control)	3.67 ± 0.06 ^{Aa}	3.57 ± 0.06 ^{Aa}	3.33 ± 0.06 ^{Ab}	NP
	30	3.67 ± 0.06 ^{Aa}	3.70 ± 0.00 ^{Aa}	3.70 ± 0.00 ^{Ba}	4.10 ± 0.00 ^{Bb}
	60	3.70 ± 0.00 ^{Aa}	3.70 ± 0.00 ^{Aa}	3.87 ± 0.12 ^{Bb}	4.00 ± 0.10 ^{Bb}
	120	3.67 ± 0.06 ^{Aa}	3.67 ± 0.06 ^{Aa}	3.83 ± 0.06 ^{BCab}	3.87 ± 0.06 ^{Ab}
	300	3.80 ± 0.00 ^{Aab}	3.70 ± 0.00 ^{Aa}	3.93 ± 0.06 ^{BCb}	3.83 ± 0.06 ^{Aab}
	600	3.83 ± 0.06 ^{Aab}	3.87 ± 0.06 ^{Bab}	3.97 ± 0.15 ^{Cb}	3.77 ± 0.06 ^{Aa}
Lycopene (mg/100 g)	0 (control)	66.70 ± 1.20 ^{Ab}	65.00 ± 0.23 ^{Ab}	62.38 ± 0.24 ^{Aa}	NP
	30	67.37 ± 0.14 ^{Aa}	67.36 ± 0.14 ^{Aa}	67.37 ± 0.71 ^{Ba}	65.96 ± 0.14 ^{Aa}
	60	66.48 ± 0.78 ^{Aa}	65.15 ± 0.49 ^{Aa}	66.64 ± 0.42 ^{Ba}	65.35 ± 0.49 ^{Aa}
	120	65.20 ± 0.85 ^{Aa}	64.79 ± 0.71 ^{Aa}	64.19 ± 0.57 ^{Aa}	64.86 ± 0.57 ^{Aa}
	300	66.09 ± 0.21 ^{Aa}	66.09 ± 1.13 ^{Aa}	66.51 ± 0.49 ^{Ba}	66.43 ± 0.07 ^{Aa}
	600	66.50 ± 0.00 ^{Aa}	65.86 ± 0.07 ^{Aa}	66.74 ± 0.49 ^{Ba}	66.43 ± 0.04 ^{Aa}
Ascorbic acid (mg/100 g)	0 (control)	277.45 ± 0.49 ^{Bc}	261.90 ± 0.71 ^{Ab}	238.55 ± 0.64 ^{Aa}	NP
	30	275.60 ± 0.28 ^{Ac}	273.15 ± 0.92 ^{BCbc}	271.40 ± 0.14 ^{Bb}	266.40 ± 0.42 ^{Aa}
	60	273.55 ± 0.64 ^{Ab}	272.20 ± 2.12 ^{BCb}	271.80 ± 0.28 ^{Bb}	266.60 ± 0.28 ^{Aa}
	120	274.35 ± 0.64 ^{Ab}	271.20 ± 0.14 ^{Ba}	273.75 ± 0.92 ^{BCb}	268.30 ± 0.85 ^{Aa}
	300	273.30 ± 1.27 ^{Aa}	272.35 ± 0.49 ^{BCa}	273.25 ± 0.21 ^{BCa}	270.05 ± 0.07 ^{Ba}
	600	273.80 ± 2.12 ^{Ab}	275.05 ± 0.92 ^{Cb}	276.05 ± 0.21 ^{Cb}	268.55 ± 0.78 ^{ABa}

The results are expressed as a mean ± standard error. ^{a, b, c}—statistically significant differences between the means in the columns ($p < 0.05$). ^{A, B, C}—statistically significant differences between the means in the rows ($p < 0.05$). NP = designation not performed.

The decrease in the acidity of the cold-plasma-treated products can be explained by the formation of oxidized compounds as a result of the collision of energetic electrons with the molecular oxygen and nitrogen present in the working gas. This results in an increase in pH value; however, research in [21–23] found no changes in pH value in cold-plasma-treated grape and tomato juices. The effect of this type of treatment on pH value of food is often modified by several factors, e.g., the process parameters, the buffering capacity of the processed material, and the physiological functions of the living tissue [21].

Brix degrees were used to express the content of Total Soluble Solids (TSS). The content of TSS in the tested juices ranged from 3.33 °Brix in the control sample on experiment day 5 to 3.87 °Brix in juice exposed to 10 min treatment on day 3. The TSS value was slightly higher in the cold-plasma-treated juices on storage days 1–5, with a statistically significant increase in this parameter in all cold-plasma-treated samples versus the control sample noted on day 5 of the experiment. At that time point, the TSS value in the 600 s plasma treatment variant was almost 20% higher than in the control sample. After ten days of storage, the TSS content was higher in the juices exposed to the shorter (30 and 60 s) plasma

treatments than in the longer (120, 300, and 600 s) exposure variants. The increase in TSS can be explained by water loss induced by the cold plasma treatment of the juices (Table 1).

The human body has many defense mechanisms that neutralize the harmful effects of reactive oxygen species. Carotenoids play an important role in reducing oxidative damage. Among them, the main pigment responsible for the characteristic deep red color of ripe tomato fruits is lycopene, which is not synthesized by the human body and should be supplied with food. This compound is absorbed to the greatest extent from preserves, including juices. Lycopene in improperly processed tomato products can be quite unstable. The main causes of lycopene destruction at higher temperatures are isomerization and oxidation. Additionally, light, temperature, and storage time may change the impact rates of these two processes on lycopene content in tomato products. However, mild thermal treatment causes increased solubility and better absorption of lycopene without lowering its antioxidant potential. A technology, which meets the requirements of non-thermal methods and is of interest to the food industry is the low-temperature (cold) plasma treatment. The present study has shown lycopene content of 66.70 and 65.00 mg/100 g on days 1 and 3 of refrigerated storage of the tomato juice, respectively. These values were not statistically different ($p < 0.05$) from those obtained for the juice treated with cold plasma for 30 to 600 s. In turn, the lycopene content in the control juice on experiment day 5 decreased by approximately 6%, compared with the value recorded on day 1. The cold-plasma-treated tomato juices were characterized by unchanged content of this valuable pigment throughout the storage period (Table 1). Some previous reports also demonstrated that the lycopene content increased significantly in samples subjected to High-Voltage Electric Field Cold Plasma (HVCP) using Dielectric Barrier Discharge (DBD) treatments or to the combined effect of HVCP and Ultra-Sonication (US), which resulted in better retention of lycopene compared to fresh untreated carrot juice samples [24,25]. In a study conducted by Paixão et al. [26], seriguela juice was subjected to the plasma treatment using a glow discharge plasma generator (with nitrogen as the process gas). The lycopene content was found to increase in most of the experimental assays. Furthermore, the prominent increase in the content of carotenoid pigments is also in agreement with previous studies, in which the effect of CAP was observed in the acerola juice [27]. The better retention of lycopene during processing is mainly related to the conversion of the trans-isomer to the more bioavailable form (cis-isomer) [28].

Tomato juice contains vitamin C, which has the ability to deactivate peroxide radicals generated both during the preparation of food and as a result of metabolic processes in the organism. The content of ascorbic acid in the analyzed tomato juices ranged from 266.40 mg/100 g to 277.45 mg/100 g. The greatest losses of this compound during storage were recorded in the control sample. After five days, the content of vitamin C was approximately 17% lower than in the juice sample analyzed on day 1. These losses in the cold-plasma-treated juices were substantially lower (approximately 2–3% between days 1 and 10 of the experiment).

Ascorbic acid was not significantly destroyed by the cold plasma effect on the tomato juice; however, the content of vitamin C on the first day of storage was statistically significantly lower in the cold-plasma-treated juices than in the control sample. However, these were small differences (up to 2%). Wang et al. [29] examined the physicochemical properties of cold-plasma-treated fruits and vegetables and reported only a slight decrease in vitamin C content (less than 4%). These losses were explained by the authors by the oxidative effect of cold plasma and the potential vitamin C degradation through UV radiation generated by the plasma. Hou et al. [30] assessed the effect of cold plasma on the quality of blueberry juice. The authors used different treatment times (from 3 to 6 min) and suggested application of a shorter duration of cold plasma exposure in order to protect vitamin C (Table 1). Some authors noted an increase in vitamin C content in fruits and fruit juices caused by the action of cold plasma [31,32]. The oxidized form of ascorbic acid is dehydroascorbic acid, which is formed in the reaction with hydrogen, superoxide, hydrogen peroxide, or tocopheroxyl radical. Dehydroascorbate is regenerated by the dehydroascorbate reductase

enzyme, forming ascorbic acid. Cold plasma induces the hydrogenation of molecules, which can chemically transform dehydroascorbate into ascorbic acid, reversing the decay mechanism and increasing vitamin C content [33].

Color is an important quality characteristic of juices and a major factor affecting the sensory perception and consumer acceptance of foods. Various processing methods are used not only to increase the palatability of fruit or vegetable juices but also to prolong their shelf life. Cold plasma processing is an interesting alternative to the traditional food processing and preservation methods, due to its limited effects on changes in quality attributes in the juices. The effect of CAP on the color of the tomato juice is shown in Table 2.

Table 2. Effects of cold plasma processing on color attributes.

Time of Plasma Treatment (s)	Time Storage (Days)	Colour Attributes			ΔE
		L*	a*	b*	
0 (Control)	1	31.60 ± 0.09 ^g	6.68 ± 0.33 ^h	4.71 ± 0.22 ^f	NP
30		30.23 ± 0.02 ^e	4.94 ± 0.01 ^d	3.26 ± 0.01 ^{bcd}	2.65 ± 0.38 ^b
60		30.15 ± 0.03 ^{de}	4.87 ± 0.01 ^d	3.32 ± 0.02 ^{cd}	2.68 ± 0.37 ^b
120		30.07 ± 0.03 ^d	4.77 ± 0.04 ^{de}	3.26 ± 0.01 ^{bcd}	2.75 ± 0.38 ^g
300		29.77 ± 0.02 ^a	4.51 ± 0.02 ^{de}	3.09 ± 0.02 ^{be}	2.94 ± 0.37 ^c
600		29.78 ± 0.03 ^a	4.40 ± 0.02 ^{abc}	3.22 ± 0.03 ^{bc}	2.94 ± 0.37 ^c
0 (control)	10	29.75 ± 0.04 ^a	4.46 ± 0.01 ^{bc}	2.93 ± 0.02 ^e	NP
30		29.62 ± 0.03 ^{bc}	4.43 ± 0.02 ^{abc}	2.73 ± 0.02 ^a	0.72 ± 0.06 ^d
60		29.55 ± 0.04 ^b	4.15 ± 0.03 ^a	2.58 ± 0.01 ^a	1.14 ± 0.08 ^f
120		29.52 ± 0.02 ^b	4.18 ± 0.03 ^{ab}	2.70 ± 0.02 ^a	1.06 ± 0.09 ^e
300		29.36 ± 0.02 ^f	3.86 ± 0.06 ^g	3.86 ± 0.06 ^a	1.36 ± 0.12 ^a
600		29.70 ± 0.03 ^{ac}	2.96 ± 0.01 ^f	2.96 ± 0.01 ^d	1.38 ± 0.15 ^a

The results are expressed as a mean ± standard error. ^{a, b, c, d, e, f, g, h}—statistically significant differences between the means ($p < 0.05$). NP = designation not performed.

Compared with the untreated juice, a significant decline in the brightness of the cold-plasma-treated samples was recorded on day 1 of the experiment. In turn, during storage (after 10 days), no statistically significant differences in the parameter L* values were observed in the samples exposed to cold plasma for 600 s, compared with the control product.

The chromaticity index a* changed with the changing plasma treatment time. The longer the time of the tomato juice CAP treatment, the lower the values of this parameter. The storage time exerted an effect on this attribute.

The chromaticity index b* changed after the cold plasma treatment on day 1. The CAP treatment was shown to reduce the yellowness parameter by approximately 32% in the juice treated for 600 s and the control product. On day 10, the chromaticity parameter b* was slightly lower than the values recorded on day 1 of the experiment. On the other hand, there was only a 1% difference in the values of this parameter in the control juice and the sample subjected to the longest cold plasma exposure (600 s).

The total color difference ΔE in the plasma-treated juices analyzed on day 1 was 2.65–2.94 (taking into account samples with extreme parameters), which indicates an average color deviation recognizable even by a non-expert. The total color difference was calculated for samples analyzed on day 10 as well. In the case of samples subjected to the 30 s cold plasma treatment, the ΔE values were below 1, indicating an indiscernible deviation, and between 1 and 2 indicating slight differences recognizable by a person experienced in discriminating color nuances.

Several studies reported various results of color changes after CAP treatment. For example, pomegranate juice became lighter after 7 min of plasma treatment with a total

color change between 2.0 and 3.0 [34]. Tests of color change in berry juice did not show a visual color difference between samples exposed to 2 and 4 min cold plasma treatment and samples processed thermally for 15 min, as the ΔE value ranged between 0.63 and 2.63 and reflected an unrecognizable or slightly noticeable color difference. However, the absolute color difference exceeded 3.5 in the 6 min plasma treatment and thermal treatment, indicating a clear difference in the color of the analyzed juices [30]. In the case of tomato juice, no significant differences in color parameters were found in different plasma exposure variants (30–120 s) [16].

3.2. Effect of CAP on Microorganisms Eradication

The presence of microorganisms in the unpasteurized tomato juice is responsible for its spoilage and, after several days of storage, makes it unsuitable for consumption. The lower the initial total number of microorganisms in the juice, the longer its shelf life. The initial total number of microorganisms in freshly prepared tomato juice depends on the quality of the vegetables used and the hygienic conditions of the juicing process. In the following days of refrigerated storage, the number of microorganisms increases due to their proliferation, which leads to juice spoilage and makes it endanger health in case of consumption. The total number of aerobic mesophilic microorganisms in edible juice should not exceed 3–4 \log_{10} CFU/mL (Codex standards, 2005). It is assumed that the colony counts exceeding 4 \log_{10} CFU/mL are responsible for the spoilage of the juice. In the present study, tomatoes were washed under warm running water before being used for juicing but were not sterilized. Likewise, the juicer was washed with washing-up liquid, without any germicides. The results showed that after just one day of juice storage under refrigeration conditions, the average number of mesophilic aerobic microorganisms in the tested samples was 3.22 \log_{10} CFU/mL. With such a total number of microorganisms, the juice showed no signs of spoilage and was safe for consumption. After 3 days of refrigerated storage, a minor increase in the number of colonies formed by aerobic microorganisms (3.40 \log_{10} CFU/mL) was observed, however, after 5 days of storage, their number increased to a high level exceeding 5 \log_{10} CFU/mL, and after 10 days it was greater than 6 \log_{10} CFU/mL. From the fifth day, a change in the organoleptic features of the juice was noted, and after 10 days, clear signs of deterioration were visible, including mold development on the surface of the juice. The content of yeast and mold after 1 day of storage was at a very low level (less than 0.5 \log_{10} CFU/mL); however, their intensive proliferation during storage was noted, largely contributing to juice spoilage. After only 3 days their number increased to a level close to 3 \log_{10} CFU/mL, and after 10 days it reached the value of 3.66 \log_{10} CFU/mL. The results showed that, despite the low pH and low sugar content of tomato juice, the total number of aerobic microorganisms increased during refrigerated storage and after about 5 days made it unfit for consumption. The effectiveness of the treatment of freshly prepared juice samples with CAP in elimination of the total number of mesophilic aerobic microorganisms depended on the time of this treatment. The 30 s CAP treatment did not produce the desired effects as a reduction in the total number of microorganisms by less than 1 \log_{10} CFU/mL was achieved, and after 10 days of storage there was a reduction of about 2 \log_{10} CFU/mL in comparison to the untreated control (Figure 2). Similarly, the treatment with CAP for 60 and 120 sec had little effect of reducing the number of colonies counted after 1 and 3 days of storage, but the microorganisms in these samples proliferated much slower than in the control. Thus, after 5 and 10 days of storage a reduction in the number of microorganisms by more than 2 \log_{10} CFU/mL was observed compared to the control sample. The treatment with CAP for 300 s was found to be much more effective, the number of colony-forming units was reduced to an average of 1.83 \log_{10} CFU/mL and during the following days of storage it was kept at a low level of just over 2 \log_{10} CFU/mL, making the juice suitable for consumption even after 10 days of refrigerated storage. The greatest efficiency in erasing the microbial content was obtained by plasma treatment of the juice samples for 600 s. In this case, the number of colony-forming units dropped to less than 0.5 \log_{10} CFU/mL and did not increase during the 10 days of storage (Figure 2). It can

therefore be concluded that CAP treatment for 600 s is an effective method of erasing the total number of aerobic microorganisms in tomato juice, extending its shelf life to 10 days, without heat treatment.

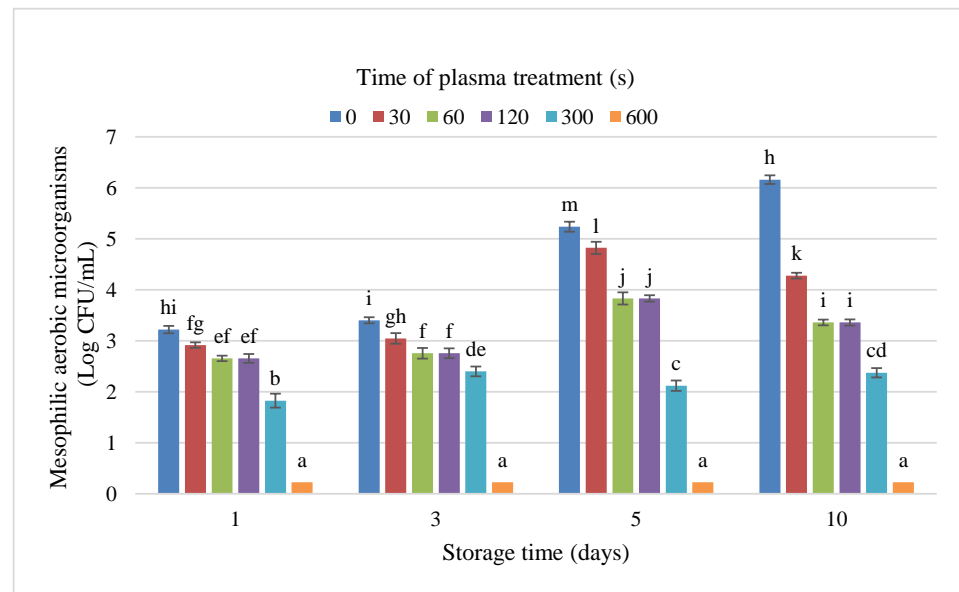


Figure 2. Number of mesophilic aerobic bacteria counts in control and CAP treated samples of unpasteurized tomato juice during refrigerated storage. Mean values ($n = 4$) with SD are shown a–m—statistically significant differences between the means ($p < 0.05$).

In case of erasing yeast and molds, the CAP treatment for 30, 60, and 120 s was much less effective. The number of yeasts and molds increased in these samples over the following days of storage, similar to the untreated control. In contrast, treatment with CAP for 300 and 600 s proved to be very efficient, since in these samples the number of yeasts and molds did not increase until the 10th day of storage and remained below $0.5 \log_{10}$ CFU/mL Figure 3. Visually, no mold growth was observed on these samples until day 10 of storage.

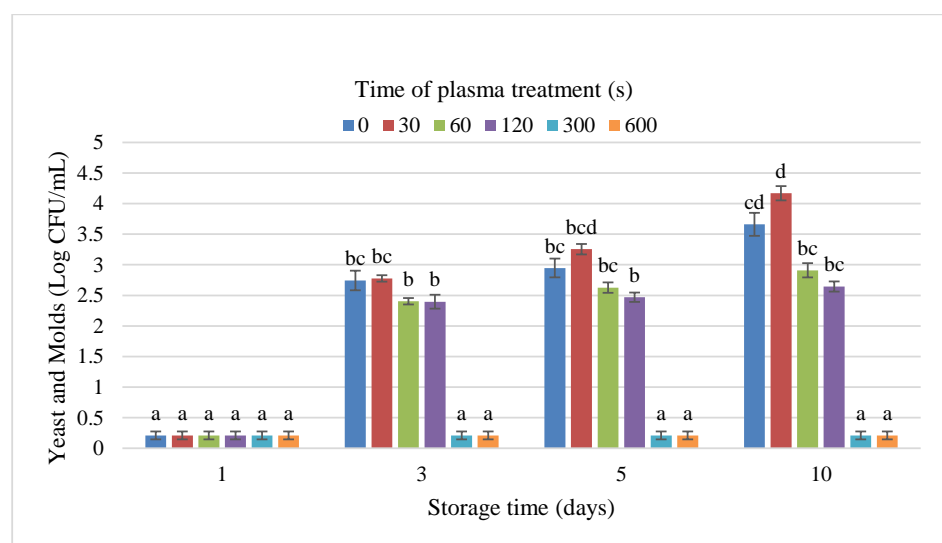


Figure 3. Number yeast and molds counts in control and CAP treated samples of unpasteurized tomato juice during refrigerated storage. Mean values ($n = 4$) with SD are shown. a–d—statistically significant differences between the means ($p < 0.05$).

As shown by the results of the latest studies published by other authors, the effectiveness of CAP in erasing sensitive strains of microorganisms in fruit juice is very high, even allowing a reduction by $8.2 \log_{10}$ of the pathogenic strain of *Enterococcus faecalis*. Such results were obtained by CAP treatments for 300 s with plasma jet and 420 s with SDBD in pineapple juice [35]. The results of studies by the other authors also indicate the high efficiency of plasma in the reduction in pathogenic strains of microorganisms in fruit juices [8,11,30,36]. Dasan and Boyaci [16] investigated the inactivation effect of CAP on *E. coli*, and the highest significant reductions (after 120 s) were achieved in apple juice ($4.02 \pm 0.03 \log \text{CFU}/\text{mL}$) followed by sour cherry ($3.34 \pm 0.09 \log \text{CFU}/\text{mL}$), while the values in orange ($1.59 \pm 0.17 \log \text{CFU}/\text{mL}$) and tomato juices ($1.43 \pm 0.22 \log \text{CFU}/\text{mL}$) were lower, which could be attributed to the food matrix. Our research results are in line with the mentioned report because 120 s CAP treatment was ineffective in erasing the total number of aerobic microorganisms as well as yeast and molds, but extending this time had satisfactory results in reducing microbial content.

3.3. Effect of CAP on the Structure of Tomato Juice

The microstructure of the juice was observed before and after plasma treatment. Figure 4 depicts the example of a parenchymal cell with organoids embed within the cell, which is surrounded by the juice homogenate. Treatment for 600 s did not cause distinctive fracturing of the cell wall and the cell membrane. The latter would result in the presence of lycopene crystals, chromoplasts, and cell organoids in the surrounding homogenate. Thus, plasma allows for relatively mild treatment of juice, which can help maintain its original textural properties.

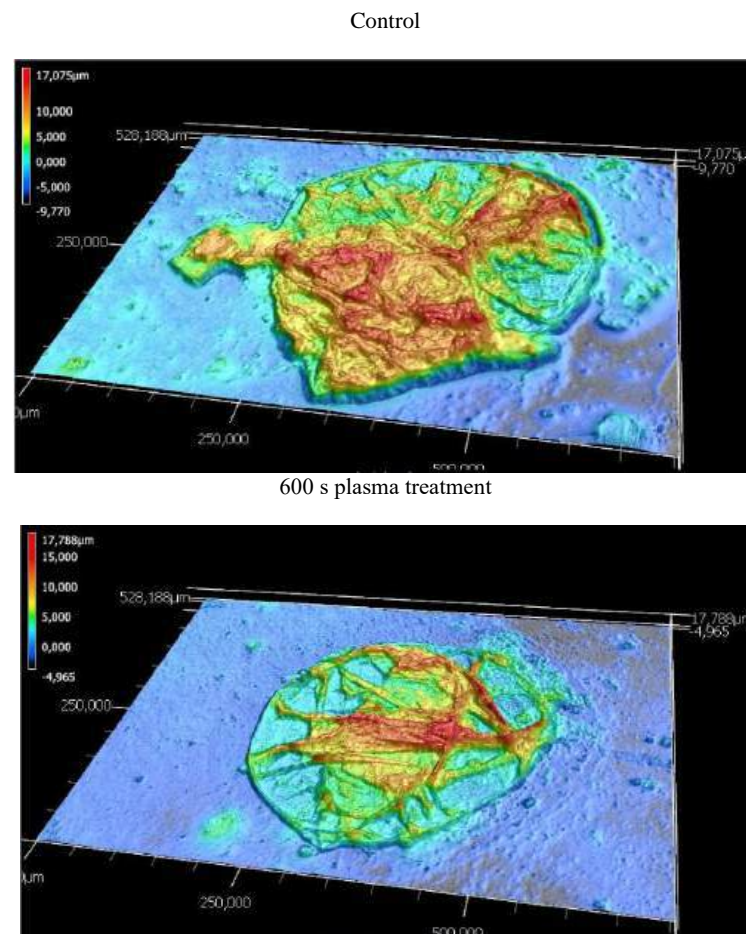


Figure 4. Comparison of the juice's sample before and after plasma treatment, depth analysis with Keyence VK-X1000 laser microscope.

4. Conclusions

Currently, the microbiological safety of food is the main task to be fulfilled by the food market. An extremely important issue is the ability to create systemic mechanisms ensuring an appropriate quality of freshly pressed fruit and vegetable juices, which are a particularly unstable food material. Products of this type should not only provide essential nutrients but should also exhibit high storage stability and availability facilitating trading in the retail chains.

Non-thermal air plasma generated in a Glide-arc reactor resulted in the significant improvement in the microbiological quality of tomato juice after just 300 s. Extending the treatment time to 600 s made it possible to further reduce the number of microorganisms to $< 1 \log$ CFU/mL, i.e., below the quantification limit. Properties, such as pH, Brix, lycopene, and vitamin C, were slightly increased by cold plasma treatment. During storage time, the CAP juice was more stable, while the untreated juice (control) showed gradual changes in physicochemical properties. The CAP treatment may better preserve the original color of the tomato juice, especially after time storage, since the samples tested on day 10 were characterized by the lowest absolute value of color difference (ΔE).

The application of the analyzed processing technique has many advantages in terms of both the microbiological quality and the nutritional value of products. The results presented in this study may contribute to the use of this method on an industrial scale. Despite its several aforementioned negative effects on the quality traits of products or the restrictions on its commercial use, the popularity of plasma treatment is growing rapidly, and the method arouses interest among technologists. Given the number of recent studies and the progress in plasma science, this technique has the potential to help food producers to improve product safety in the near future.

Author Contributions: Conceptualization, A.S.-W., J.P., M.K. (Michał Kwiatkowski) and P.T.; methodology, A.S.-W., A.S., J.P. and M.K. (Marta Krajewska); investigation, A.S.-W., J.P., M.K. (Michał Kwiatkowski), P.T., M.K. (Marta Krajewska), E.O.; data curation A.S.-W., J.P., A.S., E.G., E.O., M.K. (Marta Krajewska), N.M. and N.H.; writing—original draft preparation, A.S.-W. and J.P.; writing—review and editing, A.S.-W., A.S., N.M., N.H.; visualization, J.P. and A.S.-W.; founding acquisition, J.P., A.S.-W. and E.G., supervision, J.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was founded from ZUL (Union of Lublin Universities) “INTERPROJEKT” grant no. INT/004/2022/I-N.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data available upon justified request after contact with authors.

Acknowledgments: We would like to thank Wojciech Mika (Keyence International) for help in evaluation of morphology of the samples. We are grateful the fruitful discussions in the following cooperative initiatives: COST Actions CA19110 (Plasma applications for smart and sustainable agriculture), CA20114 (Therapeutical applications of Cold Plasmas); CEEPUS CIII-AT-0063, Inkubator Innowacyjności Politechnika Lubelska, and Polish-Slovak Bilateral Cooperation Programme (PlasmaBioAgro) PPN/BIL/2018/1/00065, SK-PL-18-0090.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Benton, D.; Young, H.A. Role of fruit juice in achieving the 5-a-day recommendation for fruit and vegetable intake. *Nutr. Rev.* **2019**, *77*, 829–843. [[CrossRef](#)]
2. Brunda, G.; Kavyashree, U.; Shetty, S.S.; Sharma, K. Comparative study of not from concentrate and reconstituted from concentrate of pomegranate juices on nutritional and sensory profile. *Food Sci. Technol. Int.* **2022**, *28*, 93–104. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Ivanova, N.N.; Khomich, L.M.; Beketova, N.A. Tomato juice nutritional profile. *Vopr. Pitan.* **2018**, *87*, 53–64. [[PubMed](#)]
4. Saeeduddin, M.; Abid, M.; Jabbar, S.; Wu, T.; Hashim, M.M.; Awad, F.N.; Zeng, X. Quality assessment of pear juice under ultrasound and commercial pasteurization processing conditions. *LWT-Food Sci. Technol.* **2015**, *64*, 452–458. [[CrossRef](#)]

5. Moussa-Ayoub, T.E.; Jäger, H.; Knorr, D.; El-Samahy, S.K.; Kroh, L.W.; Rohn, S. Impact of pulsed electric fields, high hydrostatic pressure, and thermal pasteurization on selected characteristics of *Opuntia dillenii* cactus juice. *LWT-Food Sci. Technol.* **2017**, *79*, 534–542. [[CrossRef](#)]
6. Tian, Y.; Sun, L.; Yang, Y.; Gou, X.; Niu, P.; Guo, Y. Changes in the physicochemical properties, aromas and polyphenols of not from concentrate (NFC) apple juice during production. *CYTA J. Food.* **2018**, *16*, 755–764. [[CrossRef](#)]
7. Asl, P.J.; Rajulapati, V.; Gavahian, M.; Kapusta, I.; Putnik, P.; Khaneghah, A.M.; Marszałek, K. Non-thermal plasma technique for preservation of raw or fresh foods: A review. *Food Control.* **2021**, *134*, 108560. [[CrossRef](#)]
8. Ozen, E.; Singh, R.K. Atmospheric cold plasma treatment of fruit juices: A review. *Trends Food Sci. Technol.* **2020**, *103*, 144–151. [[CrossRef](#)]
9. Laroque, D.A.; Seo, S.T.; Valencia, G.A.; Laurindo, J.B.; Carciofi, B.A.M. Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application. *J. Food Eng.* **2022**, *312*, 110748. [[CrossRef](#)]
10. Pawlat, J.; Starek-Wójcicka, A.; Kopacki, M.; Terebun, P.; Kwiatkowski, M.; Sujak, A.; Pascuzzi, S.; Santoro, F.; Andrejko, D. Germination Energy, Germination Capacity and Microflora of *Allium cepa* L. Seeds after RF Plasma Conditioning. *Energies* **2022**, *15*, 7687. [[CrossRef](#)]
11. Almeida, F.D.; Cavalcante, R.S.; Cullen, P.J.; Frías, J.M.; Bourke, P.; Fernandes, F.A.; Rodrigues, S. Effects of atmospheric cold plasma and ozone on prebiotic orange juice. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2015**, *32*, 127–135. [[CrossRef](#)]
12. Illera, A.E.; Chaple, S.; Sanz, M.T.; Lu SNg, P.; Jones, J.; Carey, E.; Bourke, P. Effect of cold plasma on polyphenol oxidase inactivation in cloudy apple juice and on the quality parameters of the juice during storage. *Food Chem.* **2019**, *3*, 100049. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Terebun, P.; Kwiatkowski, M.; Hensel, K.; Kopacki, M.; Pawlat, J. Influence of Plasma Activated Water Generated in a Gliding Arc Discharge Reactor on Germination of Beetroot and Carrot Seeds. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 6164. [[CrossRef](#)]
14. Tarabová, B.; Tampieri, F.; Maran, E.; Marotta, E.; Ostrihoňová, A.; Krewing, M.; Machala, Z. Chemical and Antimicrobial Effects of Air Non-Thermal Plasma Processing of Fresh Apple Juice with Focus on Safety Aspects. *Foods* **2021**, *10*, 2055. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
15. Kučerová, K.; Henselová, M.; Slováková, L.; Bačovčinová, M.; Hensel, K. Effect of Plasma Activated Water, Hydrogen Peroxide, and Nitrates on Lettuce Growth and Its Physiological Parameters. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 1985. [[CrossRef](#)]
16. Dasan, B.G.; Boyaci, I.H. Effect of cold atmospheric plasma on inactivation of *Escherichia coli* and physicochemical properties of apple, orange, tomato juices, and sour cherry nectar. *Food Bioproc. Tech.* **2018**, *11*, 334–343. [[CrossRef](#)]
17. Pawlat, J.; Terebun, P.; Kwiatkowski, M.; Tarabová, B.; Kovalova, Z.; Kučerová, K.; Machala, Z.; Janda, M.; Hensel, K. Evaluation of Oxidative Species in Gaseous and Liquid Phase Generated by Mini-Gliding Arc Discharge. *Plasma Chem. Plasma. Process.* **2019**, *39*, 627–642. [[CrossRef](#)]
18. Brisset, J.L.; Pawlat, J. Chemical Effects of Air Plasma Species on Aqueous Solutes in Direct and Delayed Exposure Modes: Discharge, Post-discharge and Plasma Activated Water. *Plasma Chem. Plasma Process.* **2016**, *36*, 355–381. [[CrossRef](#)]
19. Bruggeman, P.J.; Kushner, M.J.; Locke, B.R.; Gardeniers, J.G.E.; Graham, W.G.; Graves, D.B.; Hofman-Caris, R.C.H.M.; Maric, D.; Reid, J.R.; Ceriani, E.; et al. Plasma-liquid interactions: A review and roadmap. *Plasma Sources Sci. Technol.* **2016**, *25*, 053002. [[CrossRef](#)]
20. Kučerová, K.; Machala, Z.; Hensel, K. Transient Spark Discharge Generated in Various N₂/O₂ Gas Mixtures: Reactive Species in the Gas and Water and Their Antibacterial Effects. *Plasma Chem. Plasma Process.* **2020**, *40*, 749–773. [[CrossRef](#)]
21. Sruthi, N.U.; Josna, K.; Pandiselvam, R.; Kothakota, A.; Gavahian, M.; Khaneghah, A.M. Impacts of cold plasma treatment on physicochemical, functional, bioactive, textural, and sensory attributes of food: A comprehensive review. *Food Chem.* **2022**, *368*, 130809. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
22. Pankaj, S.K.; Wan, Z.; Colonna, W.; Keener, K.M. Effect of high voltage atmospheric cold plasma on white grape juice quality. *J. Sci. Food Agric.* **2017**, *97*, 4016–4021. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. Ali, M.; Cheng, J.H.; Sun, D.W. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma treatments on degradation of anilazine fungicide and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) juice. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2021**, *56*, 69–75. [[CrossRef](#)]
24. Umair, M.; Jabbar, S.; Nasiru, M.M.; Sultana, T.; Senan, A.M.; Awad, F.N.; Zhang, J. Exploring the potential of high-voltage electric field cold plasma (HVCP) using a dielectric barrier discharge (DBD) as a plasma source on the quality parameters of carrot juice. *Antibiotics* **2019**, *8*, 235. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Umair, M.; Jabbar, S.; Senan, A.M.; Sultana, T.; Nasiru, M.M.; Shah, A.A.; Jianhao, Z. Influence of combined effect of ultrasonication and high-voltage cold plasma treatment on quality parameters of carrot juice. *Foods* **2019**, *8*, 593. [[PubMed](#)]
26. Paixão, L.; Fonteles, T.V.; Oliveira, V.S.; Fernandes, F.A.; Rodrigues, S. Cold plasma effects on functional compounds of siriguela juice. *Food Bioproc. Tech.* **2019**, *12*, 110–121. [[CrossRef](#)]
27. Fernandes, F.A.; Santos, V.O.; Rodrigues, S. Effects of glow plasma technology on some bioactive compounds of acerola juice. *Food Res. Int.* **2019**, *115*, 16–22. [[CrossRef](#)]
28. Jabbari, S.S.; Jafari, S.M.; Dehnad, D.; Shahidi, S.A. Changes in lycopene content and quality of tomato juice during thermal processing by a nanofluid heating medium. *J. Food Eng.* **2018**, *230*, 1–7. [[CrossRef](#)]
29. Wang, R.X.; Nian, W.F.; Wu, H.Y.; Feng, H.Q.; Zhang, K.; Zhang, J.; Zhu, W.D.; Becker, K.H.; Fang, J. Atmospheric-pressure cold plasma treatment of contaminated fresh fruit and vegetable slices: Inactivation and physicochemical properties evaluation. *Eur. Phys. J.* **2012**, *66*, 276. [[CrossRef](#)]






30. Hou, Y.; Wang, R.; Gan, Z.; Shao, T.; Zhang, X.; He, M.; Sun, A. Effect of cold plasma on blueberry juice quality. *Food Chem.* **2019**, *290*, 79–86. [[CrossRef](#)]
31. Castro, D.R.G.; Mar, J.M.; Da Silva, L.S.; Da Silva, K.A.; Sanches, E.A.; Bezerra, J.D.A.; Rodrigues, S.; Fernandes, F.A.N.; Campelo, P.H. Improvement of the Bioavailability of Amazonian Juices Rich in Bioactive Compounds Using Glow Plasma Technique. *Food Bioproc. Tech.* **2020**, *13*, 670–679. [[CrossRef](#)]
32. Sarangapani, C.K.; O'Toole, G.; Cullen, P.; Bourke, P. Atmospheric cold plasma dissipation efficiency of agrochemicals on blueberries. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2017**, *44*, 235–241. [[CrossRef](#)]
33. Fernandes, F.A.N.; Rodrigues, S. Cold Plasma Processing on Fruits and Fruit Juices: A Review on the Effects of Plasma on Nutritional Quality. *Processes* **2021**, *9*, 2098. [[CrossRef](#)]
34. Kovačević, D.B.; Putnik, P.; Dragović-Uzelac, V.; Pedisić, S.; Jambrak, A.R.; Herceg, Z. Effects of cold atmospheric gas phase plasma on anthocyanins and color in pomegranate juice. *Food Chem.* **2016**, *190*, 317–323. [[CrossRef](#)]
35. Sohbatzadeh, F.; Yazdanshenas, H.; Soltani, A.H.; Shabannejad, A. An innovative strategy to rapidly inactivate 8.2-log *Enterococcus faecalis* in fresh pineapple juice using cold atmospheric plasma. *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 16010. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
36. Liao, X.; Li, J.; Muhammad, A.I.; Suo, Y.; Chen, S.; Ye, X.; Ding, T. Application of a dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma (Dbd-Acp) for *Eshcherichia coli* inactivation in apple juice. *J. Food Sci.* **2018**, *83*, 401–408. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

P9. Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., & Pawłat, J. (2024). The Effect of the Addition of Powdered Sumac (*Rhus coriaria* L.) and Cold Plasma Treatment on the Quality of Carrot Juice. Applied Sciences, 14(3), 1263. (IF=2,500, MNiSW=100).

Article

The Effect of the Addition of Powdered Sumac (*Rhus coriaria* L.) and Cold Plasma Treatment on the Quality of Carrot Juice

Emilia Osmólska ¹, Agnieszka Starek-Wójcicka ^{2,*}, Agnieszka Sagan ², Piotr Terebun ³
and Joanna Pawłat ^{3,*}

- ¹ Department of Power Engineering and Transportation, Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin, 20-612 Lublin, Poland; emilia.osmolska@up.lublin.pl
- ² Department of Biological Bases of Food and Feed Technologies, Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin, 20-612 Lublin, Poland; agnieszka.sagan@up.lublin.pl
- ³ Institute of Electrical Engineering and Electrotechnologies, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, Poland; p.terebun@pollub.pl
- * Correspondence: agnieszka.starek@up.lublin.pl (A.S.-W.); j.pawlat@pollub.pl (J.P.)

Abstract: The aim of the study was to investigate the effect of cold atmospheric plasma (CAP) and sumac powder (*Rhus coriaria* L.) on the pH, total soluble solids, color, content of phytochemicals (carotenoids and polyphenols), and microbiological quality of freshly pressed carrot juice. Experiments were carried out with sumac powder concentrations of 0.5 and 3%, which were added before or after 20 min plasma treatment using a gliding arc reactor. The combination of CAP and 3% sumac powder resulted in very effective microbial reduction (to an undetectable level on each day of testing). These juices were characterized by an extended microbiological shelf life of up to 72 h. Additionally, the juice which was first enriched with 3% sumac and then treated with cold plasma, even on the last day of testing, contained 34.36 mg/100 mL of polyphenols and 3.49 mg/100 g more carotenoids than the control samples. The total effect of the application of these method is highly important for the improvement of the quality and safety of carrot juice.

Keywords: fresh carrot juice; natural additives; sumac; cold plasma; high quality; safety



Citation: Osmólska, E.; Starek-Wójcicka, A.; Sagan, A.; Terebun, P.; Pawłat, J. The Effect of the Addition of Powdered Sumac (*Rhus coriaria* L.) and Cold Plasma Treatment on the Quality of Carrot Juice. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 1263. <https://doi.org/10.3390/app14031263>

Academic Editors: Deepika Dave and Hossain Abul

Received: 29 December 2023

Revised: 31 January 2024

Accepted: 1 February 2024

Published: 2 February 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The greatest risk associated with the possibility of microbiological contamination of juices is due to the lack of thermal processing. They are usually pasteurized [1–3]. However, in recent decades, the possibility of applying cold atmospheric pressure plasma—CAP (a mixture of electrons and ions, positively and negatively charged atoms and molecules, generated during an electric discharge at atmospheric pressure)—for food treatment has been investigated [4–6]. From the microbial inactivation point of view, the hydroxyl group (OH•) plays the most important role. It attracts H⁺ ions from the structural proteins of a bacterium's cell wall [7]. Plasma also leads to the degradation of microbial DNA. Ultraviolet rays, also generated during an electric discharge, are characterized by a high energy value and a high degree of absorbance by DNA and RNA molecules, which leads to the formation of thymine dimers and fragmentation of the nucleoid [8–13].

From the point of view of promoting a healthy lifestyle, an important issue is the availability of food containing phytochemicals, i.e., substances with biological activity (clean label products) [14]. The spice prepared from the fruit of a shrub plant belonging to the genus *Rhus coriaria* L. has strong antioxidative and antibacterial properties. It contains flavonoids such as gallic acid, methyl gallate, kaempferol, fustine, fisetin, sulfuretin, butein, quercetin and myrcetin. Sumac also contains mainly monounsaturated oleic acid (omega-9) and polyunsaturated linolenic acid (omega-6). Micronutrients include certain amounts of vitamins C, B₁, B₂ and B₆, as well as potassium, calcium, magnesium, iron, zinc, manganese and copper [15–19]. This combination of nutrients could have beneficial

properties supporting the defense against free radicals, which, according to the published literature, are partly responsible for formation of diseases such as cancer, diabetes or heart problems [20]. Consuming this oriental spice ensures proper blood sugar levels and regulates cholesterol levels [21]. Sumac fruit is also used as a natural diuretic, which helps in the proper elimination of toxins and cleansing the whole body [22,23]. Several positive effects of using sumac in meat dishes, fish, cooking oils or dairy products have been described in the literature [24–28].

In this study, the addition of sumac powder combined with cold plasma treatment was used for juice products for the first time. The aim of the study was to investigate the effect of using this type of treatment on the number of microorganisms and the nutritional value of carrot juice during refrigerated storage.

2. Materials and Methods

2.1. Equipment and Materials

Fresh carrots (*Daucus carota*) of the variety Nerac, from the spring harvest of 2023, and tannery sumac (*Rhus coriaria* L.) were obtained from a local supermarket (Lublin, Poland). PCA (plate count agar) media and nutrient agar media with chloramphenicol were obtained from BIOMAXIMA (Lublin, Poland). Chemical reagents for juice qualitative analysis were purchased from POCH (Gliwice, Poland) and STANLAB (Lublin, Poland). The following reagents were used: acetone with 0.2% BHT, ethanol and hexane to determine the total content of carotenoids. To determine the total polyphenol content, the Folin–Ciocalteu phenol reagent and sodium carbonate were used. A cold atmospheric plasma (CAP), as shown in Figure 1, was used to treat carrot juice.

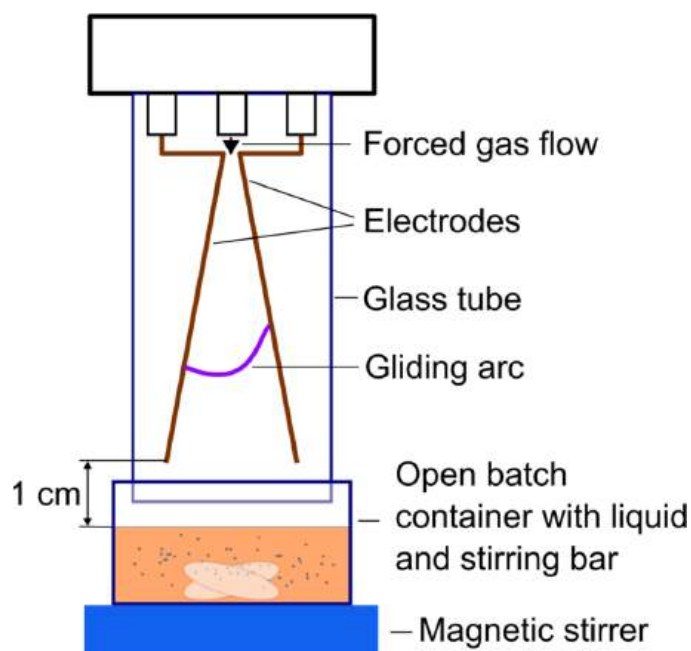


Figure 1. Schematic representation of the experimental set-up using CAP gliding arc for juice treatment.

2.2. Carrot Juice Preparation, CAP Application and Sumac Powder Addition

Freshly pressed carrot juice was prepared in a laboratory using a slow juicer (Sana EUJ-707, Omega Products, České Budějovice, Czech Republic). Then, the juice was enriched with powdered *Rhus coriaria* L. sumac fruit with a maximum granularity of 0.5 mm in the selected order (before or after plasma treatment) and at the amount shown in Table 1. The samples were exposed to plasma-treated gas. Air at 440 NL/h was used as a substrate gas for the two-electrode AC gliding arc plasma reactor [29], which operated at a mean power of 40 W. Furthermore, 25 mL of the juice sample was placed in a sterile glass container

positioned beneath GAD electrodes at a 1 cm distance between the electrodes and the liquid surface. The samples were mixed with a magnetic stirrer at 100 rpm speed. The maximum temperature of the samples were measured using the DT-847U meter (Yu Ching Technology, Taipei City, Taiwan) with a K-type thermocouple ranged 35 °C. The evaluation of the quality of the prepared juices was carried out after 24, 48 and 72 h of refrigerated storage at 6 °C.

Table 1. The method of sample preparation and time of treatment in gliding arc reactor ($V = 3.8$ kV, $f = 50$ Hz).

Probe Code	Plasma Treatment Time (min)	Sumac Powder: Quantity (%) and Order of Addition into the Juice
C	0	0
S05	0	0.5
S3	0	3.0
P	20	0
SP05	20	0.5 (before plasma treatment)
SP3	20	3.0 (before plasma treatment)
P+05S	20	0.5 (after plasma treatment)
P+3S	20	3.0 (after plasma treatment)

2.3. Microbiological Analysis—Methodology

Aerobic mesophilic microorganisms were measured according to the following Polish Standard PN-EN ISO 4833–2 [30] spread plate method. Moreover, 50 μ L of inoculum was placed on each agar plate. The plates were incubated at 30 °C for 72 h after adding the juice samples into the plate count agar media. Yeasts and mold counts (PN-ISO 21527–2 [31]) were determined by adding the juice sample into sabouraud dextrose with chloramphenicol agar and incubating the plates at 25 °C for 5 days. Serial dilutions were made, and colonies were counted for the dilution, on which several or a dozen colonies grew, and the result was presented in log CFUs (colony-forming units) per mL of juice. If nothing grew in the sample in several repetitions, the number of microorganisms was assumed to be below the limit of detection (1 \log_{10} CFU/mL). The shelf life of the juice enriched with sumac was determined after 24, 48 and 72 h on the basis of the Regulation of the Minister of Health of 13 January 2003 (Poland) [32] with later amendments, which establishes the maximum levels of chemical and biological contaminants that may be present in food ingredients, permitted additives, processing aids or on the surface of food.

2.4. Juice Qualitative Analysis

2.4.1. pH and Total Soluble Solids Measurement

The pH was determined using the digital 780 pH Meter Metrohm (Herisau, Switzerland) at 25 ± 1 °C. A hand refractometer of LLG-uniREFRACTO (Meckenheim, Germany) was used to measure the total soluble solids in the juices (°Brix) at 25 ± 1 °C.

2.4.2. Determination of Color Attributes

The color attributes were calculated using the spectrophotometer SF80 (3Color, Marcq-en-Barœul, France). Following the CIE (color space defined by the International Commission on Illumination) recommendations, illuminant D65 (daylight source) and a 10° standard observer (perception of a human observer) were used. Color values were expressed as L^* (lightness or darkness), a^* (redness/greenness) and b^* (yellowness/blueness). Total color difference (ΔE) was evaluated as follows:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

where L_0^* , a_0^* , b_0^* are the control juice (C) values.

2.4.3. Determination of Phytochemicals

The total phenolic compounds were determined using the Folin–Ciocalteu reagent [33]. Moreover, 5 mL of juice and 5 mL of 80% methanol were shaken for 5 min using the orbital shaker S-3.02 20M (ELMI Ltd., Riga, Latvia) at 250 rpm. Furthermore, 100 µL of this blend was mixed with 2.0 mL of water and subsequently with 200 µL of the Folin–Ciocalteu reagent. After that, 1 mL of sodium carbonate (20%) was added and the reaction started. The absorbance was measured after 60 min of reaction at 765 nm on a UV–VIS spectrophotometer (Helios Omega, Waltham, MA, USA). A blank sample was also prepared using water instead of juice. A calibration curve was prepared with standard solutions of gallic acid, following the same colorimetric method.

The total carotenoid content was determined using the method described by Canan et al. [34]. This method is based on extracting carotenoids from the test sample with a mixture of ethanol, acetone and hexane (1:1:2) and on their spectrophotometric determination at a wavelength of 450 nm using the Thermo Scientific UV–VIS Helios Omega 3 spectrophotometer (Waltham, MA, USA). A calibration curve was prepared with standard solutions of β-carotene.

2.5. Microscopic Analysis

The juice uniformity and morphology was observed with the KEYENCE VHX-5000 digital microscope (Osaka, Japan). The control juice and plasma-treated juice samples were kept refrigerated at 6 °C for 1 h in closed sterile containers. Then, each sample was manually mixed for 30 s, and a 2 mL drop of the juice was collected from the container using an automatic pipette and placed on the microscopic slide. In order to achieve the most beneficial conditions for the observation of the sample, several conditions for the microscope settings were tested and the option of transmitted light and 1000× magnification was selected.

2.6. Statistical Analysis

Measurements of pH, soluble solids and phytochemicals were performed in 3 replicates and microbiological analyzes in 4 replicates. Obtained data were presented as the mean value ± standard deviation (SD). Significant differences between mean values were determined via the Tukey test (analysis of variance ANOVA) at a *p*-value ≤ 0.05. Statistical analyses were determined using the Statistica software package (Version 10, StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA).

3. Results and Discussion

3.1. Reduction in Microbial Counts and Shelf Life of Juice

The average levels of contamination of fresh samples of carrot juice with aerobic mesophilic microorganisms and yeast were 3.6 and 0.73 log₁₀ CFU/mL, respectively. In the present study, the shelf life of juices after 24, 48, and 72 h was determined on the basis of the criterion of the permissible content of mesophilic aerobic microorganisms in pasteurized fruit and vegetable juices, as specified in the Regulation of the Polish Minister of Health of 13 January 2003 [32]. In accordance with the Regulation, the allowable number of mesophilic aerobic microorganisms should be lower than or equal to 3.0 log₁₀ CFU/mL and in the range of 3.0–4.0 log₁₀ CFU/mL in a maximum of two out of five samples from one batch. A microbial count exceeding 4.0 log₁₀ CFU/mL disqualifies the entire batch of the product. It is also assumed that the allowable yeast and mold content in pasteurized juices can be equal to or lower than 1 log₁₀ CFU/mL.

The results of the microbiological analyses of cold-stored fresh carrot juice treated with cold atmospheric plasma and/or supplemented with sumac powder are shown in Table 2.

Table 2. Evaluation of the total number of microorganisms and yeasts of control carrot juice and juice samples treated with cold atmospheric plasma and/or supplemented with sumac after 24, 48, and 72 h of refrigerated storage (6 °C).

Quality Parameters	Juice Sample Codes	Time Storage (h)		
		24	48	72
Total mesophilic aerobic microorganisms (log ₁₀ CFU/mL)	C	5.27 ± 0.16 ^{A c}	6.45 ± 0.24 ^{B f}	7.36 ± 0.22 ^{C d}
	S05	5.13 ± 0.05 ^{A bc}	5.43 ± 0.10 ^{B e}	6.24 ± 0.12 ^{C c}
	S3	4.62 ± 0.20 ^{A bc}	4.32 ± 0.15 ^{A c}	4.58 ± 0.08 ^{A b}
	P	4.46 ± 0.26 ^{A b}	4.70 ± 0.05 ^{A d}	4.35 ± 0.22 ^{A b}
	SP05	2.69 ± 0.58 ^{A a}	2.64 ± 0.09 ^{A b}	2.60 ± 0.07 ^{A a}
	SP3	ND	ND	ND
	P+05S	2.79 ± 0.40 ^{B a}	2.25 ± 0.11 ^{A a}	2.36 ± 0.15 ^{AB a}
	P+3S	ND	ND	ND
Yeast and molds (log ₁₀ CFU/mL)	C	2.19 ± 0.07 ^{A c}	4.30 ± 0.13 ^{B d}	5.34 ± 0.13 ^{C d}
	S05	1.88 ± 0.06 ^{A b}	3.54 ± 0.27 ^{B c}	4.21 ± 0.09 ^{C c}
	S3	1.68 ± 0.22 ^{A b}	2.27 ± 0.15 ^{B b}	2.54 ± 0.06 ^{B b}
	P	1.36 ± 0.11 ^{AB a}	1.50 ± 0.14 ^{B a}	1.17 ± 0.06 ^{A a}
	SP05	1.13 ± 0.04 ^a	ND	ND
	SP3	ND	ND	ND
	P+05S	1.14 ± 0.07 ^a	ND	ND
	P+3S	ND	ND	ND

The results are expressed as a mean ± standard deviation, ND—not detected; different letters mean statistically significant differences ($p \leq 0.05$); ^{A,B,C}—effect of storage time, ^{a,b,c,d,e,f}—effect of treatment.

The comparison of the results of microbiological cultures with the permissible levels specified in the legal regulations on the microbiological quality of pasteurized juices indicates that the total number of aerobic microorganisms in the fresh carrot juice was exceeded at 24 h after pressing. A further increase in the number of microorganisms was observed during the subsequent hours of storage; therefore, the analyzed carrot juice was unsuitable for consumption [32].

The addition of sumac powder and the plasma treatment of the freshly squeezed juice samples proved to be effective in limiting microbial growth, but this effect was clearly dependent on the sumac concentration and plasma treatment time.

The analyses showed that the supplementation of the carrot juice with 0.5% and 3.0% of sumac powder and the plasma treatment reduced the number of microorganisms. The total number of aerobic microorganisms in juice samples S05 and S3 detected at the specified time points decreased on average by 0.14–2.78 log₁₀ CFU/mL in comparison with the corresponding control samples. The number of bacteria in the plasma treatment variant (sample code P) decreased on average by 0.81–3.01 log₁₀ CFU/mL. In turn, the amount of yeasts decreased by a maximum of 1.11 log₁₀ CFU/mL in sample S05, 2.80 log₁₀ CFU/mL in sample S3, and 4.17 log₁₀ CFU/mL after the plasma treatment. The largest decrease was observed after 72 h of refrigerated storage. The data shown in Table 2 indicated a high level of significant (according to the statistical test) reduction in the microbial count induced by the experimental treatments. However, these juices did not meet the requirements specified in the Polish Minister's Regulation [32].

The supplementation of the juice with 0.5% of sumac powder and the plasma treatment (SP05) or the use of the additive after the plasma exposure yielded in better results (2.58–4.76 log reduction in aerobic mesophilic microorganisms), although they were not satisfactory in terms of extending the microbiological shelf life of the juice at 24 h after pressing, due to the presence of yeast above 1 log₁₀ CFU/mL [32]. What is noteworthy is that given the microbial growth in the control samples during storage and the inhibition of the growth of microorganisms in the plasma-treated samples (before or after the sumac powder addition), the greatest reduction in the number of microorganisms was recorded

after 72 h of storage. Compared to the control, the total number of aerobic microorganisms decreased in samples SP05 and P+05S by 4.76 and 5.00 log₁₀ CFU/mL, respectively, and the yeast count after this storage time was reduced below the limit of detection.

The application of the higher amount of sumac powder in the SP3 and P+3S combinations extended the microbiological shelf life of the unpasteurized carrot juice to 72 h. The total number of microorganisms and yeasts after 24, 48 and 72 h of refrigerated storage was below the limit of detection (1 log₁₀ CFU/mL).

The present results clearly indicate that the cold plasma treatment and the natural sumac powder addition have a decontaminating effect on the microbial load of carrot juice. Similar research results reporting the ability of cold plasma to inactivate harmful microorganisms in beverages have been described in many publications [12,35–38]. In the Starek et al. [12] publication, 5 minutes of plasma treatment generated in the GlidArc reactor (where the process gas was air) enabled 3.45, 3.55 log and 3.32 log₁₀ CFU/mL reductions just after the treatment for the total aerobic mesophilic bacteria colonies, yeast and molds, respectively. It has also been proved that sumac (*Rhus coriaria* L.) fruit extract has inhibitory activity against the growth of food spoilage and/or pathogenic bacteria, especially *Bacillus cereus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus aureus*, *Penicillium* sp., and *Aspergillus niger* [39–42]. Sumac can be considered a natural antimicrobial protectant against a number of microorganisms found in food. Mardoukhi and Alizadeh [43] used aqueous sumac extracts to improve the microbiological quality of silver carp fillets. After 18 days of refrigerated storage, they observed a decrease in the amount of total viable organism from 9.01 to 7.34 log₁₀ CFU/g and total psychrophilic count from 8.97 to 7.21 log₁₀ CFU/g in products treated with 5% sumac extract in comparison with control samples. Carrot juice supplementation with ground sumac in amounts of 0.5, 1.5 and 3 g/100 mL caused (at 72 h of testing) a reduction in the total number of microorganisms by 1.7, 2.9 and 3.1 log₁₀ CFU/g, respectively, compared to the control [44].

The quality of juice during storage can be improved with methods based on the use of more than one preserving factor: acidification with sonication, pulsed electric field with sonication, sonication with high-voltage cold plasma treatment, and pulsed electric field combined with temperature and natural preservatives [45–48].

Importantly, the combination of plasma treatment with the sumac powder addition to the freshly pressed carrot juice was analyzed here for the first time and yielded high-quality products that were suitable for consumption (from the microbial load point of view), even after 72 h refrigerated storage.

3.2. The Acidity (pH) and Total Soluble Solids Values (°Brix)

The active acidity of the carrot juices ranged from 6.33 to 4.21. The analyses carried out after 24 h revealed that the sumac powder addition and the cold plasma treatment increased the acidity of the juices in comparison with the control sample. The lowest pH was exhibited by samples supplemented with 3% of sumac powder. Sumac is rich in organic acids [49]; hence, the supplementation increased the acidity of the product. The time-point of the addition of sumac powder (before or after the cold plasma treatment) had no impact on the pH value. The lowest reduction in this parameter in relation to the control sample was observed in the plasma-treated juice without the sumac supplementation (P); in this case, an increase by approximately 0.6 units was observed. These changes are comparable with observations reported by other authors who found only a slight decrease in the pH of cold plasma-treated juices [50,51]. This was probably associated with the generation of a small amount of acidogenic radicals during the cold plasma treatment.

A statistically significant decrease in the pH value during storage was observed in the control sample. After 72 h, the value of this parameter decreased by 0.4, which could be related to the growth and acidifying effect of the juice microflora (Table 3) [52].

Table 3. Effect of sumac supplementation and plasma treatment on the pH and total soluble solid values of carrot juice stored in a refrigerator for 72 h.

Quality Parameters	Juice Sample Codes	Time Storage (hours)		
		24	48	72
Acidity (pH)	C	6.32 ± 0.01 ^{C e}	6.25 ± 0.03 ^{B e}	5.92 ± 0.01 ^{A d}
	S05	5.41 ± 0.01 ^{B c}	5.22 ± 0.02 ^{A c}	5.35 ± 0.05 ^{B c}
	S3	4.24 ± 0.01 ^{A a}	4.23 ± 0.01 ^{A a}	4.23 ± 0.01 ^{A a}
	P	5.76 ± 0.06 ^{A d}	5.86 ± 0.06 ^{A d}	5.91 ± 0.01 ^{A d}
	SP05	5.14 ± 0.00 ^{A b}	5.14 ± 0.01 ^{A b}	5.15 ± 0.01 ^{A b}
	SP3	4.21 ± 0.00 ^{A a}	4.22 ± 0.01 ^{A a}	4.22 ± 0.00 ^{A a}
	P+05S	5.20 ± 0.00 ^{A b}	5.35 ± 0.30 ^{A c}	5.19 ± 0.00 ^{A b}
	P+3S	4.37 ± 0.01 ^{A a}	4.37 ± 0.02 ^{A a}	4.38 ± 0.00 ^{A a}
Total soluble solids (°Brix)	C	8.40 ± 0.17 ^{A a}	8.43 ± 0.06 ^{A a}	8.37 ± 0.12 ^{A a}
	S05	8.30 ± 0.26 ^{A a}	8.75 ± 0.21 ^{A a}	8.75 ± 0.07 ^{A ab}
	S3	8.73 ± 0.06 ^{A a}	8.90 ± 0.00 ^{B ab}	9.45 ± 0.21 ^{B b}
	P	8.27 ± 0.06 ^{A a}	8.70 ± 0.14 ^{B a}	8.85 ± 0.07 ^{B ab}
	SP05	10.33 ± 0.06 ^{A c}	10.67 ± 0.21 ^{B d}	10.37 ± 0.15 ^{B c}
	SP3	11.13 ± 0.25 ^{A d}	11.20 ± 0.17 ^{A d}	11.50 ± 0.26 ^{A d}
	P+05S	9.17 ± 0.15 ^{A b}	9.40 ± 0.17 ^{A bc}	9.40 ± 0.17 ^{A bc}
	P+3S	9.63 ± 0.23 ^{A b}	9.80 ± 0.20 ^{A c}	9.90 ± 0.26 ^{A c}

The results are expressed as the mean ± standard deviation; different letters mean statistically significant differences ($p \leq 0.05$); ^{A,B,C}—effect of storage time, ^{a,b,c,d,e}—effect of treatment.

The Brix degree (°Brix) is traditionally used in vegetable and fruit industries. After 24 h of storage, the mean value of this index was 8.40 for the unprocessed carrot juices and 8.27–8.73 for the CAP-treated products (P) or samples supplemented with the sumac powder (S05 and S3). Higher indices of total soluble solids were observed in samples P+05S and P+3S. The addition of 0.5% of sumac powder combined with the plasma treatment proved to be a significant factor, as it contributed to an increase in the parameter on average to 10.33 °Brix. The highest value of total soluble solids, which was 25% higher than that in the control (C), was obtained in the variant supplemented with the maximum sumac powder concentration combined with the CAP treatment (SP3). The increase in total soluble solids may be due to the dissolution of compounds from sumac and probably the hydrolysis of insoluble compounds under the influence of energy supplied during processing. In general, the storage time did not exert a significant effect on this parameter (in most cases). Many researchers have reported a similar insignificant change in the level of total soluble solids in response to the cold plasma treatment of orange or apple juices [50,53,54]. As reported by Liao et al. [53], soluble solids present in juices are mainly composed of carbohydrates, and it is difficult for active molecules produced in the plasma to reach these macromolecules within their short lifetime. In contrast to the above results, a significant increase in total soluble solids was noted in samples of freshly cut pears treated with plasma-activated water (PAW), where the increase was related to the conversion of starches to sugars [54]. In turn, Ma et al. [55] reported a decrease in total soluble solids in PAW-treated Chinese blueberries.

3.3. Color

Color is a visual attribute that consumers use to evaluate a product before making a purchase decision, as it can help determine such qualities as freshness. The presence of natural pigments and the apparent chemical reactions during processing are significant factors of the notable color appearance of fruits and vegetables. As shown in Table 4, the highest mean values of the L* parameter (after 24 h of storage), thus the lightest colors, were determined in the control carrot juice (39.91), in the samples enriched with higher or lower sumac powder concentrations (39.28 and 39.78, respectively), and in the cold

plasma-treated juice, without sumac powder addition (39.29). In turn, the lowest values of the parameter and hence the darkest color were observed in products supplemented with 3% of sumac powder before or after the plasma treatment (36.28 and 37.85, respectively). The storage time induced only slight changes in this parameter. The value of the L^* parameter in the control juice (C) after 72 h decreased to 38.48, i.e., by 4% of the value noted three days before. A difference in the L^* values was also observed during the storage of the SP3 sample, i.e., the values decreased from 36.28 (after 24 h) to 34.33 (after 72 h). The other products did not exhibit such significant changes in the lightness parameter during storage.

Table 4. Effect of sumac supplementation and plasma treatment on the color parameters of carrot juice stored in a refrigerator for 72 h.

Parameters	Juice Samples Code	Time Storage (hours)		
		24	48	72
L^*	C	39.91 ± 0.18 ^{Be}	38.86 ± 0.23 ^{Acd}	38.49 ± 0.05 ^{Acd}
	S05	39.58 ± 0.56 ^{Ae}	38.68 ± 0.12 ^{Acd}	39.26 ± 0.12 ^{Ad}
	S3	39.78 ± 0.08 ^{Ae}	39.55 ± 0.01 ^{Ad}	39.38 ± 0.03 ^{Ad}
	P	39.29 ± 0.83 ^{Ade}	38.76 ± 0.03 ^{Acd}	39.23 ± 0.08 ^{Ad}
	SP05	38.30 ± 0.04 ^{Bbc}	38.06 ± 0.01 ^{Abc}	38.22 ± 0.01 ^{Bc}
	SP3	36.28 ± 0.02 ^{Ba}	35.58 ± 0.10 ^{Ba}	34.33 ± 0.21 ^{Aa}
	P+05S	38.80 ± 0.04 ^{Bcd}	38.19 ± 0.02 ^{Bc}	37.16 ± 0.11 ^{Ab}
	P+3S	37.85 ± 0.16 ^{Cb}	37.18 ± 0.01 ^{Ab}	37.22 ± 0.02 ^{Bb}
a^*	C	15.87 ± 0.17 ^{Bc}	15.30 ± 0.25 ^{Ac}	15.18 ± 0.08 ^{Acd}
	S05	15.73 ± 0.59 ^{Ac}	15.69 ± 0.03 ^{Ac}	16.26 ± 0.08 ^{Ad}
	S3	15.74 ± 0.17 ^{Ac}	15.65 ± 0.30 ^{Ac}	15.46 ± 0.02 ^{Acd}
	P	14.72 ± 0.11 ^{Bbc}	14.37 ± 0.05 ^{Abc}	14.56 ± 0.04 ^{Acd}
	SP05	14.86 ± 0.10 ^{Bbc}	14.23 ± 0.01 ^{Abc}	14.19 ± 0.05 ^{Ac}
	SP3	12.35 ± 0.00 ^{Ca}	10.76 ± 0.05 ^{Ba}	8.65 ± 0.11 ^{Aa}
	P+05S	14.38 ± 0.06 ^{Cbc}	14.57 ± 0.03 ^{Bbc}	12.06 ± 0.04 ^{Ab}
	P+3S	13.60 ± 0.42 ^{Ab}	12.72 ± 0.02 ^{Ab}	14.04 ± 2.07 ^{Ac}
b^*	C	20.58 ± 0.20 ^{Ce}	19.53 ± 0.30 ^{Be}	18.96 ± 0.07 ^{Af}
	S05	21.26 ± 0.16 ^{Cf}	19.54 ± 0.08 ^{Be}	20.09 ± 0.15 ^{Ag}
	S3	19.78 ± 0.18 ^{Bd}	19.73 ± 0.16 ^{Be}	19.12 ± 0.01 ^{Aef}
	P	19.09 ± 0.16 ^{Bc}	18.81 ± 0.05 ^{Ad}	18.72 ± 0.06 ^{Ae}
	SP05	18.96 ± 0.08 ^{Cc}	18.06 ± 0.00 ^{Bc}	17.81 ± 0.04 ^{Ad}
	SP3	14.96 ± 0.08 ^{Ca}	12.82 ± 0.08 ^{Ba}	10.13 ± 0.16 ^{Aa}
	P+05S	18.54 ± 0.01 ^{Cc}	18.29 ± 0.04 ^{Bcd}	15.05 ± 0.11 ^{Ab}
	P+3S	16.98 ± 0.40 ^{Cb}	16.11 ± 0.01 ^{Bb}	15.95 ± 0.01 ^{Ac}
ΔE	S05	1.64 ± 0.09	0.48 ± 0.15	1.74 ± 0.08
	S3	0.86 ± 0.45	0.89 ± 0.50	0.95 ± 0.05
	P	2.04 ± 0.14	1.19 ± 0.33	1.00 ± 0.06
	SP05	2.51 ± 0.43	3.06 ± 0.63	1.55 ± 0.17
	SP3	7.56 ± 0.43	8.75 ± 0.32	11.75 ± 0.14
	P+05S	2.76 ± 0.32	1.59 ± 0.48	5.18 ± 0.01
	P+3S	4.74 ± 0.89	4.60 ± 0.46	3.75 ± 0.71

The results are expressed as the mean ± standard deviation; different letters mean statistically significant differences ($p \leq 0.05$); ^{A,B,C}—effect of storage time, ^{a,b,c,d,e,f,g}—effect of treatment.

The low values of the a^* parameter determined in the sumac powder-supplemented and CAP-treated juice (SP3) indicate a lower proportion of redness. In comparison with the control product (15.89), the value of this parameter declined to 12.35 and continued to decrease, as evidenced by the a^* value of 8.65 after 72 h of storage. The b^* parameter also changed after the cold plasma treatment and supplementation of the carrot juice with the sumac powder. On the first day of the study (24 h), the supplementation of the juice with sumac combined with the CAP treatment (SP3) reduced the yellow color factor by approximately 27%, compared to the control product (C). At 72 h of refrigerated storage, the

chromaticity parameter b^* in this treatment variant had the lowest value (10.13), compared with the value recorded after 24 h (14.96). The total color difference (ΔE) describes the color distance in the three-dimensional color space and refers to the difference between the color parameters of the control juice and the juice treated with cold plasma and/or supplemented with sumac powder. Depending on the value of ΔE , differences in perceivable color can be analytically classified as very distinct ($\Delta E > 3$), distinct ($1.5 < \Delta E < 3$), and small difference ($\Delta E < 1.5$). Throughout the study period, the treatment of the carrot juice with cold plasma (P) or the supplementation with sumac powder (S05 and S3) resulted in inconsiderable or distinct visual differences in the color, compared with the control sample (C). After 72 h of storage, distinct or highly distinct changes in the color compared with the control sample (C) were observed in the juice samples supplemented with the sumac powder and exposed to the cold plasma treatment (SP05; P+05S; SP3; P+3S). Ali et al. [56] observed that, after plasma treatment, tomato juice samples turned slightly yellow, which was observed by changes in the hue angle. They found that this change occurred due to the breakdown of carotenoid pigments by the plasma species. The application of sumac extract to bread resulted in a decrease in the L^* parameter value by approximately 21%, the a^* parameter by approximately 33%, and the b^* value by almost 55%. The authors of these studies [57,58] attributed the changes in the color to the content of phenolic pigments, mainly anthocyanins, in sumac.

3.4. Characteristics of Phytochemicals

The total content of polyphenols in the control carrot juice ranged from 11.18 mg/100 mL to 13.46 mg/100 mL. The sumac powder supplementation clearly increased the content of these bioactive compounds in the juice. Sumac fruits are rich sources of polyphenols [59,60]; hence, they can be an attractive additive for the enrichment of juices with these pro-health ingredients. The total content of polyphenols in the cold plasma-treated carrot juice (P) was only slightly lower than that in the control sample. The greatest difference (2.24 mg/100 mL) was noted after 72 h, but it was not statistically significant. The effect of cold plasma on the content of polyphenols is not clear-cut. Their amount may decrease due to the degradation process accompanying the exposure of the product to reactive radicals released during plasma generation. In turn, the action of charged particles and UV radiation may result in a more intense rupture of raw material tissues as well as the disintegration and disruption of cell membranes, which facilitates the extraction of phenolic compounds [61]. This dual effect of cold plasma treatment was evidenced by the present results. The cold plasma treatment of carrot juice supplemented with 0.5% of sumac contributed to an increase in the total content of polyphenols, whereas a decline in the content was observed in juice samples enriched with 3% of the additive (Table 5). Carotenoids are important components of all orange/red fruits and vegetables, as they are responsible for the attractive color and pro-health properties. Some of these natural antioxidants are used for the synthesis of vitamin A in the human organism. Therefore, the content of carotenoids should be taken into account while processing carotenoid-rich raw materials. The total content of carotenoids in the analyzed carrot juices ranged from 11.13 mg/100 g to 18.90 mg/100 g. After 24 h, it was observed that the 3% addition of sumac powder resulted in a 15% increase in the content of these pigments. After 24 h, it was observed that the 3% addition of sumac powder increased the content of these pigments by 2.41 mg/100 g. In turn, the cold plasma treatment of carrot juice samples resulted in a significant decrease in the content of carotenoids compared to the untreated samples (by 0.74 mg/100 g in the sample without added sumac and by 0.65 mg/100 g in the variant with the 3% addition) (Table 5).

Table 5. Effect of sumac supplementation and plasma treatment on the phytochemicals content of carrot juice stored in a refrigerator for 72 h.

Phytochemicals	Juice Sample Codes	Time Storage (hours)		
		24	48	72
Total polyphenol content (mg/100 mL)	C	13.40 ± 0.42 ^{Ba}	11.18 ± 0.26 ^{Aa}	13.46 ± 0.20 ^{Ba}
	S05	30.71 ± 0.41 ^{Bc}	27.55 ± 0.33 ^{Bc}	25.50 ± 0.26 ^{Ac}
	S3	103.16 ± 2.04 ^{Cg}	85.49 ± 0.73 ^{Bf}	66.98 ± 0.79 ^{Af}
	P	11.40 ± 0.28 ^{Aa}	10.41 ± 0.46 ^{Aa}	11.22 ± 0.46 ^{Aa}
	SP05	35.78 ± 1.38 ^{Cd}	23.22 ± 0.33 ^{Bb}	18.29 ± 0.46 ^{Ab}
	SP3	74.74 ± 1.79 ^{Cf}	57.54 ± 0.20 ^{Be}	47.82 ± 0.53 ^{Ae}
	P+05S	18.34 ± 0.26 ^{Ab}	23.45 ± 0.26 ^{Bb}	18.29 ± 0.20 ^{Ab}
	P+3S	58.14 ± 1.50 ^{Ce}	48.33 ± 0.95 ^{Bd}	42.05 ± 0.35 ^{Ad}
Total carotenoids content (mg/100 mL)	C	15.84 ± 0.05 ^{Cb}	15.55 ± 0.05 ^{Bc}	11.13 ± 0.02 ^{Aa}
	S05	15.89 ± 0.15 ^{Ab}	17.70 ± 0.04 ^{Be}	17.99 ± 0.01 ^{Cf}
	S3	18.25 ± 0.05 ^{Be}	17.98 ± 0.04 ^{Af}	18.90 ± 0.28 ^{Cg}
	P	15.15 ± 0.05 ^{Ba}	15.06 ± 0.14 ^{Bb}	14.76 ± 0.05 ^{Ac}
	SP05	16.01 ± 0.10 ^{Bb}	15.11 ± 0.04 ^{Ab}	14.84 ± 0.04 ^{bAc}
	SP3	17.60 ± 0.08 ^{Bd}	17.16 ± 0.02 ^{Ad}	17.16 ± 0.02 ^{Ae}
	P+05S	16.28 ± 0.11 ^{Bc}	15.57 ± 0.02 ^{Ac}	15.57 ± 0.02 ^{Ad}
	P+3S	16.32 ± 0.02 ^{Bc}	14.62 ± 0.02 ^{Aa}	14.62 ± 0.02 ^{Ab}

The results are expressed as the mean ± standard deviation; different letters mean statistically significant differences ($p \leq 0.05$); ^{A,B,C}—effect of storage time, ^{a,b,c,d,e,f,g}—effect of treatment.

As shown in the other studies of the effect of cold plasma on juices, the content of carotenoids increased in some cases. The use of a dielectric barrier discharge (DBD) plasma reactor at a voltage of 70 kV for 4 min allowed an increase in the amount of carotenoids in carrot juice compared to the control sample [47]. Also, cold plasma treatment carried out using the laboratory PE-100 plasma system (with nitrogen as the process gas) using an electric field with a frequency of 80 kHz resulted in an increase in the content of these compounds in acerola juice. The greatest increase in carotenoids was observed at a gas flow rate of 10 mL/min and a treatment duration of 10 min [62]. The increase in the content of these bioactive compounds through the action of cold plasma can be explained by the increased extraction thereof from the juice matrix. The bioavailability of some compounds in cold plasma-treated juices may be increased as a result of cell disruption as well as the dissociation of aggregates and association of bioactive substances with the cell wall [61]. During the storage of the carrot juices, the greatest losses in the total content of carotenoids were detected in the control sample. After 72 h, their content was approximately 30% lower than in the juice analyzed after 24 h.

3.5. Description of the Juice Microstructure

Rheological properties and the structure of carrot juice without (Figure 2) and with added sumac (Figure 3) were observed using a digital microscope. As presented in Figure 2, the aggregation of solid fractions in carrot juice was visible. It was also observed that cold plasma treatment resulted in the homogenization of the juice.

The structure of sumac microparticles distributed in carrot juice can be clearly distinguished (Figure 3). As in the case of juice without the addition of sumac, plasma treatment resulted in slight homogenization. However, plasma impact on the sumac particles was negligible. This kind of treatment can be considered as mild in the terms of its influence on the juice morphology.

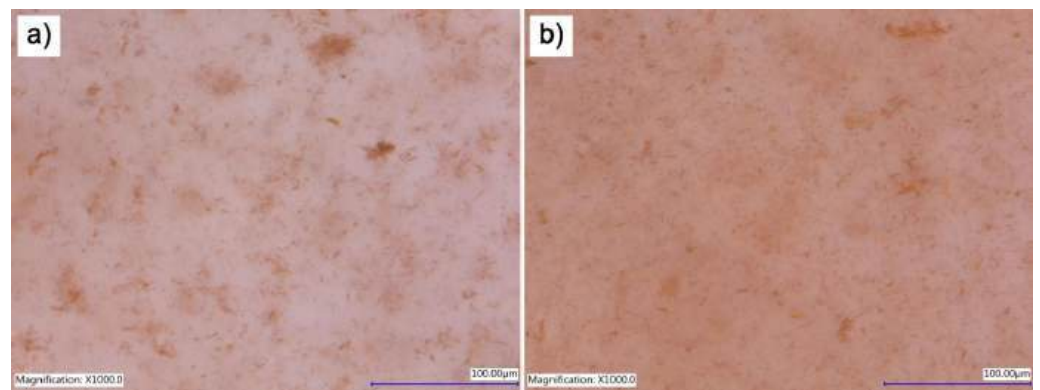


Figure 2. Images of juice (magnification: 1000×) before (a) and after (b) plasma treatment.

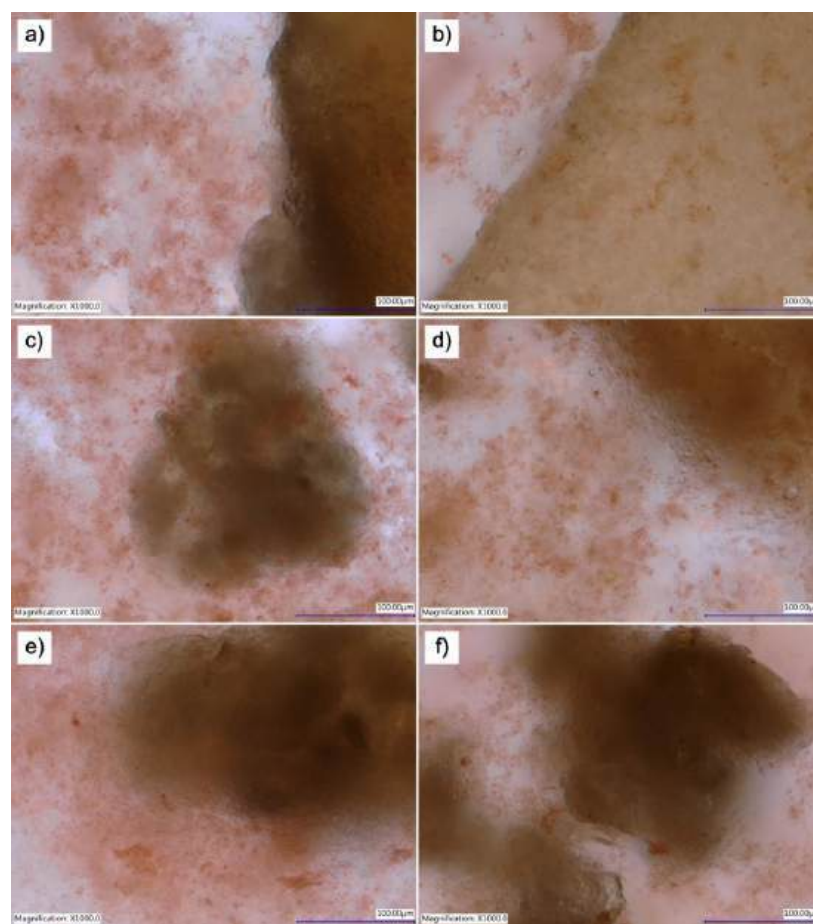


Figure 3. Images of juice (1000× magnification) for different treatments with sumac: (a) sumac only (0.5%); (b) sumac only (3%); (c) plasma treatment after adding sumac (0.5%); (d) plasma treatment after adding sumac (3%); (e) plasma treatment before adding sumac (0.5%); (f) plasma treatment before adding sumac (3%).

4. Conclusions

In the present study, it was demonstrated that both CAP and sumac (*Rhus coriaria* L.) fruit powder have high potential to ensure microbiological safety and desirable physico-chemical properties of carrot juice.

The data obtained in this study clearly indicate that the total effect of the innovative SP3 method's application is highly important for improvement of the quality and safety of Nerac carrot juice, and the technique has the potential for practical application in the

industrial production of juices and other beverages. It has been proved that this type of treatment reduces the content of mesophilic aerobic microorganisms and increases the stability of carrot juice, which additionally has a very good nutritional value (exceeding the value of the control juice).

Such treatments are effective in eliminating natural microbiological contamination of carrot juice and allow us to obtain an unpasteurized food product with an extended shelf life and increased nutritional value.

Author Contributions: E.O.: conceptual work, participation in experimental work (work on plasma influence on physicochemical properties), participation in manuscript's writing and correcting; A.S.-W.: conceptual work, participation in measurement of physicochemical properties, participation in manuscript's writing and manuscript's formatting, gathering of founding, advisory remarks; A.S.: participation in experimental work (physicochemical analysis of samples), performing statistical analysis, participation in manuscript's writing; P.T.: participation in experimental work (plasma set-up and action of plasma onto juice samples), taking and providing description of microscopic images; J.P.: conceptual work, participation in experimental work (plasma set-up and reaction with samples), taking and providing description of microscopic images, participation in manuscript's writing and correcting. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was founded from ZUL (the Union of Lublin Universities) "INTERPROJEKT" grant no. INT/002/2023/II-N and the University of Life Sciences in Lublin.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Datasets from the time of this study are available from the respective authors upon reasonable request.

Acknowledgments: We are grateful the fruitful discussions in the following cooperative initiatives: COST Actions CA19110 (Plasma Applications for Smart and Sustainable Agriculture), CA20114 (Therapeutical Applications of Cold Plasmas); CEEPUS CIII-AT-0063, Innovation Incubator of the Lublin University of Technology, and ZUL (Union of Lublin Universities) "INTERPROJEKT" grant no. INT/002/2023/II-N.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Rabie, M.A.; Soliman, A.Z.; Diaconeasa, Z.S.; Constantin, B. Effect of Pasteurization and Shelf Life on the Physicochemical Properties of Physalis (*Physalis Peruviana* L.) Juice: Quality of Fresh and Pasteurized Physalis Juice. *J. Food Process. Preserv.* **2015**, *39*, 1051–1060. [[CrossRef](#)]
2. Vegara, S.; Martí, N.; Mena, P.; Saura, D.; Valero, M. Effect of Pasteurization Process and Storage on Color and Shelf-Life of Pomegranate Juices. *LWT Food Sci. Technol.* **2013**, *54*, 592–596. [[CrossRef](#)]
3. Gouma, M.; Álvarez, I.; Condón, S.; Gayán, E. Pasteurization of Carrot Juice by Combining UV-C and Mild Heat: Impact on Shelf-Life and Quality Compared to Conventional Thermal Treatment. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2020**, *64*, 102362. [[CrossRef](#)]
4. Nwabor, O.F.; Onyeaka, H.; Miri, T.; Obileke, K.; Anumudu, C.; Hart, A. A Cold Plasma Technology for Ensuring the Microbiological Safety and Quality of Foods. *Food Eng. Rev.* **2022**, *14*, 535–554. [[CrossRef](#)]
5. Bora, J.; Khan, T.; Mahnot, N.K. Cold Plasma Treatment Concerning Quality and Safety of Food: A Review. *Curr. Res. Nutr. Food Sci. J.* **2022**, *10*, 427–446. [[CrossRef](#)]
6. Misra, N.N.; Roopesh, M.S. Cold Plasma for Sustainable Food Production and Processing. In *Green Food Processing Techniques*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 431–453.
7. Ekonomou, S.I.; Boziaris, I.S. Non-Thermal Methods for Ensuring the Microbiological Quality and Safety of Seafood. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 833. [[CrossRef](#)]
8. Misra, N.N.; Jo, C. Applications of Cold Plasma Technology for Microbiological Safety in Meat Industry. *Trends Food Sci. Technol.* **2017**, *64*, 74–86. [[CrossRef](#)]
9. Varilla, C.; Marcone, M.; Annor, G.A. Potential of Cold Plasma Technology in Ensuring the Safety of Foods and Agricultural Produce: A Review. *Foods* **2020**, *9*, 1435. [[CrossRef](#)]
10. Han, J.-Y.; Song, W.-J.; Eom, S.; Kim, S.B.; Kang, D.-H. Antimicrobial Efficacy of Cold Plasma Treatment against Food-Borne Pathogens on Various Foods. *J. Phys. Appl. Phys.* **2020**, *53*, 204003. [[CrossRef](#)]

11. Mahnot, N.K.; Siyu, L.-P.; Wan, Z.; Keener, K.M.; Misra, N.N. In-Package Cold Plasma Decontamination of Fresh-Cut Carrots: Microbial and Quality Aspects. *J. Phys. Appl. Phys.* **2020**, *53*, 154002. [[CrossRef](#)]
12. Starek, A.; Pawlat, J.; Chudzik, B.; Kwiatkowski, M.; Terebun, P.; Sagan, A.; Andrejko, D. Evaluation of Selected Microbial and Physicochemical Parameters of Fresh Tomato Juice after Cold Atmospheric Pressure Plasma Treatment during Refrigerated Storage. *Sci. Rep.* **2019**, *9*, 8407. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Mandal, R.; Singh, A.; Singh, A.P. Recent Developments in Cold Plasma Decontamination Technology in the Food Industry. *Trends Food Sci. Technol.* **2018**, *80*, 93–103. [[CrossRef](#)]
14. Delgado-Pando, G.; Ekonomou, S.I.; Stratakos, A.C.; Pintado, T. Clean Label Alternatives in Meat Products. *Foods* **2021**, *10*, 1615. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
15. Perrone, A.; Yousefi, S.; Basile, B.; Corrado, G.; Giovino, A.; Salami, S.A.; Papini, A.; Martinelli, F. Phytochemical, Antioxidant, Anti-Microbial, and Pharmaceutical Properties of Sumac (*Rhus Coriaria* L.) and Its Genetic Diversity. *Horticulturae* **2022**, *8*, 1168. [[CrossRef](#)]
16. Tohma, H.; Altay, A.; Köksal, E.; Gören, A.C.; Gülçin, İ. Measurement of Anticancer, Antidiabetic and Anticholinergic Properties of Sumac (*Rhus Coriaria*): Analysis of Its Phenolic Compounds by LC–MS/MS. *J. Food Meas. Charact.* **2019**, *13*, 1607–1619. [[CrossRef](#)]
17. Sakhr, K.; El Khatib, S. Physicochemical Properties and Medicinal, Nutritional and Industrial Applications of Lebanese Sumac (Syrian Sumac-*Rhus Coriaria*): A Review. *Heliyon* **2020**, *6*, e03207. [[CrossRef](#)]
18. Ozcan, A.; Susluoglu, Z.; Nogay, G.; Ergun, M.; Sutyemez, M. Phytochemical Characterization of Some Sumac (*Rhus coriaria* L.) Genotypes from Southern Part of Turkey. *Food Chem.* **2021**, *358*, 129779. [[CrossRef](#)]
19. Alsamri, H.; Athamneh, K.; Pintus, G.; Eid, A.H.; Iratni, R. Pharmacological and Antioxidant Activities of *Rhus coriaria* L.(Sumac). *Antioxidants* **2021**, *10*, 73. [[CrossRef](#)]
20. Umeno, A.; Biju, V.; Yoshida, Y. In Vivo ROS Production and Use of Oxidative Stress-Derived Biomarkers to Detect the Onset of Diseases Such as Alzheimer’s Disease, Parkinson’s Disease, and Diabetes. *Free Radic. Res.* **2017**, *51*, 413–427. [[CrossRef](#)]
21. Khoshkham, M.; Shahrajabian, M.H.; Singh, R.B.; Sun, W.; Magadlela, A.; Khatibi, M.; Cheng, Q. Sumac: A Functional Food and Herbal Remedy in Traditional Herbal Medicine in the Asia. In *Functional Foods and Nutraceuticals in Metabolic and Non-Communicable Diseases*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2022; pp. 261–266.
22. Korkmaz, H. Could Sumac Be Effective on COVID-19 Treatment? *J. Med. Food* **2021**, *24*, 563–568. [[CrossRef](#)]
23. Forouzanfar, F.; Ahmadpoor, M.; Farahi, M.M.; Hadianfar, A.; Sahebkar, A.; Esmaily, H.; Nematy, M.; Rakhshandeh, H. The Effect of Pomegranate Juice and Sumac Consumption in the Treatment of Outpatients with COVID-19. *Mediat. Inflamm.* **2022**, *2022*, 6850342. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Rahmati, S.; Bazargani-Gilani, B.; Aghajani, N. Effect of Extraction Methods on the Efficiency of Sumac (*Rhus Coriaria* L.) Fruit Extract in Soybean Oil Quality during Accelerated Conditions. *Food Sci. Nutr.* **2022**, *10*, 3302–3313. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. El Khatib, S.; Salame, A. Sumac (*Rhus coriaria*) Extracts to Enhance the Microbiological Safety of the Red Meat. *Food Sci. Technol.* **2019**, *7*, 41–52. [[CrossRef](#)]
26. Hamza, R.A.T.; Osheba, A.S.; Sobhy, H.M.; Hekal, S.H.A. Antioxidant and Antimicrobial Activities of Galangal and Sumac to Improve Quality Attributes of Beef Burger. *Adv. Anim. Vet. Sci.* **2022**, *10*, 1202–1210.
27. Abdul-Jalil, T.Z. *Rhus coriaria* (Sumac): A Magical Spice. In *Herbs Spices*; IntechOpen: Rijeka, Croatia, 2020; pp. 39–48.
28. Rad, A.H.; Iraj, Z.; Kafil, H.S.; Servat, H. Antioxidant And Antimicrobial Effect Of Sumac (*Rhus coriaria* L.) Powder on *E. coli* and *Penicillium Notatum* In Prebiotics Low Fat Yoghurt. *Carpathian J. Food Sci. Technol.* **2020**, *12*, 40–51.
29. Pawlat, J.; Terebun, P.; Kwiatkowski, M.; Tarabová, B.; Kovaľová, Z.; Kučerová, K.; Machala, Z.; Janda, M.; Hensel, K. Evaluation of Oxidative Species in Gaseous and Liquid Phase Generated by Mini-Gliding Arc Discharge. *Plasma Chem. Plasma Process.* **2019**, *39*, 627–642. [[CrossRef](#)]
30. PN-EN ISO 4833-1:2013-12; Mikrobiologia Łańcucha Żywnościowego—Horyzontalna Metoda Oznaczania Liczby Drobnoustrojów—Część 1: Oznaczanie Liczby Metodą Posiewu Zalewowego w Temperaturze 30 Stopni C. Polish Committee for Standardization: Warsaw, Poland, 2013.
31. PN ISO 21527-2: 2009; Mikrobiologia Żywności i Pasz—Horyzontalna Metoda Oznaczania Liczby Drożdży i Pleśni—Część 1: Metoda Liczenia Kolonii w Produktach o Aktywności Wody Niższej Lub Równnej 0,95. Polish Com-Mittee for Standardization: Warsaw, Poland, 2009; Szukaj w Google. Available online: <https://www.google.com/search?q=PN+ISO+21527> (accessed on 31 January 2023).
32. Polish Minister of Health. Regulation of the Polish Minister of Health of 13 January 2003 on the Maximum Levels of Chemical and Biological Impurities Which May Be Found in Food, Food Ingredients, Permitted Additives, Processing Aids or on the Surface of Foods. 2003. Available online: <https://www.prawo.pl/akty/dz-u-2005-2-9,17148879.html> (accessed on 28 December 2023).
33. Lachowicz, S.; Kolniak-Ostek, J.; Oszmiański, J.; Wiśniewski, R. Comparison of Phenolic Content and Antioxidant Capacity of Bear Garlic (*Allium ursinum* L.) in Different Maturity Stages. *J. Food Process. Preserv.* **2017**, *41*, e12921. [[CrossRef](#)]
34. Canan, I.; Gündoğdu, M.; Seday, U.; Oluk, C.A.; Karaşahin, Z.; Eroğlu, E.Ç.; Yazici, E.; ÜNLÜ, M. Determination of Antioxidant, Total Phenolic, Total Carotenoid, Lycopene, Ascorbic Acid, and Sugar Contents of Citrus Species and Mandarin Hybrids. *Turk. J. Agric. For.* **2016**, *40*, 894–899. [[CrossRef](#)]
35. Bourke, P.; Ziuzina, D.; Han, L.; Cullen, P.J.; Gilmore, B.F. Microbiological Interactions with Cold Plasma. *J. Appl. Microbiol.* **2017**, *123*, 308–324. [[CrossRef](#)]

36. Mao, L.; Mhaske, P.; Zing, X.; Kasapis, S.; Majzoobi, M.; Farahnaky, A. Cold Plasma: Microbial Inactivation and Effects on Quality Attributes of Fresh and Minimally Processed Fruits and Ready-to-Eat Vegetables. *Trends Food Sci. Technol.* **2021**, *116*, 146–175. [[CrossRef](#)]
37. Niedźwiedz, I.; Waško, A.; Pawlat, J.; Polak-Berecka, M. The State of Research on Antimicrobial Activity of Cold Plasma. *Pol. J. Microbiol.* **2019**, *68*, 153–164. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
38. Dasan, B.G.; Onal-Ulusoy, B.; Pawlat, J.; Diatczyk, J.; Sen, Y.; Mutlu, M. A New and Simple Approach for Decontamination of Food Contact Surfaces with Gliding Arc Discharge Atmospheric Non-Thermal Plasma. *Food Bioprocess Technol.* **2017**, *10*, 650–661. [[CrossRef](#)]
39. Aal-Tay, A.F.R. Natural Phenolic Extracts from Cardamom (*Elettaria cardamomum*), Sumac (*Rhus coriaria*) and Pomegranate (*Punica Granatum*)-Potential Application to Control Pathogenic Bacteria in Foods. Master's Thesis, University of Plymouth Research Theses, Plymouth, UK, 2014.
40. Atwaa, E.S.H.; Shahein, M.R.; Radwan, H.A.; Mohammed, N.S.; Aloraini, M.A.; Albezrah, N.K.A.; Alharbi, M.A.; Sayed, H.H.; Daoud, M.A.; Elmahallawy, E.K. Antimicrobial Activity of Some Plant Extracts and Their Applications in Homemade Tomato Paste and Pasteurized Cow Milk as Natural Preservatives. *Fermentation* **2022**, *8*, 428. [[CrossRef](#)]
41. Ahmadi, R.; Eskandani, M.A.; Saadati, D. Evaluation of Antimicrobial Effect of Iranian Sumac on *Bacillus cereus* in a Commercial Barley Soup. *Slov. Vet. Res.* **2017**, *54*, 65.
42. Pajohi-Alamoti, M.R.; Yadollahi-Baghloyi, M.; Bazargani-Gillani, B. The Effect of Water Extract of *Rhus coriaria* L. on the Pathogenic Bacteria at Different Temperatures. *J. Babol Univ. Med. Sci.* **2016**, *18*, 41–47.
43. Mardoukhi, S.; Alizadeh, E. Effect of Aqueous Extract of Iranian Sumac (*Rhus coriaria* L.) on the Shelf Life of Hypophthalmichthys Molitrix Fillet during Storage at 4 °C. *Iran. J. Fish. Sci.* **2021**, *20*, 615–627.
44. Osmólska, E.; Stoma, M.; Sagan, A.; Chudzik, B.; Starek-Wójcicka, A. Effect of Supplementation of Freshly Pressed Carrot Juice with *Rhus coriaria* L. on Changes in Juice Quality. *Sustainability* **2022**, *15*, 719. [[CrossRef](#)]
45. Jabbar, S.; Abid, M.; Hu, B.; Muhammad Hashim, M.; Ali, S.; Wu, T.; Lei, S.; Xie, M.; Zeng, X. Study on Combined Effects of Acidification and Sonication on Selected Quality Attributes of Carrot Juice during Storage. *J. Chem. Soc. Pak.* **2014**, *36*, 582–589.
46. Aadil, R.M.; Zeng, X.-A.; Sun, D.-W.; Wang, M.-S.; Liu, Z.-W.; Zhang, Z.-H. Combined Effects of Sonication and Pulsed Electric Field on Selected Quality Parameters of Grapefruit Juice. *LWT-Food Sci. Technol.* **2015**, *62*, 890–893. [[CrossRef](#)]
47. Umair, M.; Jabbar, S.; Senan, A.M.; Sultana, T.; Nasiru, M.M.; Shah, A.A.; Zhuang, H.; Jianhao, Z. Influence of Combined Effect of Ultra-Sonication and High-Voltage Cold Plasma Treatment on Quality Parameters of Carrot Juice. *Foods* **2019**, *8*, 593.
48. Li, Y.; Wu, K.; Wang, B.; Li, X. Colorimetric Indicator Based on Purple Tomato Anthocyanins and Chitosan for Application in Intelligent Packaging. *Int. J. Biol. Macromol.* **2021**, *174*, 370–376. [[CrossRef](#)]
49. Kossah, R.; Nsabimana, C.; Zhao, J.; Chen, H.; Tian, F.; Zhang, H.; Chen, W. Comparative Study on the Chemical Composition of Syrian Sumac (*Rhus coriaria* L.) and Chinese Sumac (*Rhus typhina* L.) Fruits. *Pak. J. Nutr.* **2009**, *8*, 1570–1574. [[CrossRef](#)]
50. Wang, Y.; Wang, Z.; Zhu, X.; Yuan, Y.; Gao, Z.; Yue, T. Application of Electrical Discharge Plasma on the Inactivation of *Zygosaccharomyces rouxii* in Apple Juice. *LWT* **2020**, *121*, 108974. [[CrossRef](#)]
51. Dzimitrowicz, A.; Jamroz, P.; Cyganowski, P.; Bielawska-Pohl, A.; Klimczak, A.; Pohl, P. Application of Cold Atmospheric Pressure Plasmas for High-Throughput Production of Safe-to-Consume Beetroot Juice with Improved Nutritional Quality. *Food Chem.* **2021**, *336*, 127635. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
52. Laosee, W.; Kantachote, D.; Chansuwan, W.; Sirinupong, N. Effects of Probiotic Fermented Fruit Juice-Based Biotransformation by Lactic Acid Bacteria and *Saccharomyces boulardii* CNCM I-745 on Anti-Salmonella and Antioxidative Properties. *J. Microbiol. Biotechnol.* **2022**, *32*, 1315. [[CrossRef](#)]
53. Liao, X.; Li, J.; Muhammad, A.I.; Suo, Y.; Chen, S.; Ye, X.; Liu, D.; Ding, T. Application of a Dielectric Barrier Discharge Atmospheric Cold Plasma (Dbd-Acp) for *Eshcherichia coli* Inactivation in Apple Juice. *J. Food Sci.* **2018**, *83*, 401–408. [[CrossRef](#)]
54. Chen, C.; Liu, C.; Jiang, A.; Guan, Q.; Sun, X.; Liu, S.; Hao, K.; Hu, W. The Effects of Cold Plasma-Activated Water Treatment on the Microbial Growth and Antioxidant Properties of Fresh-Cut Pears. *Food Bioprocess Technol.* **2019**, *12*, 1842–1851. [[CrossRef](#)]
55. Ma, R.; Yu, S.; Tian, Y.; Wang, K.; Sun, C.; Li, X.; Zhang, J.; Chen, K.; Fang, J. Effect of Non-Thermal Plasma-Activated Water on Fruit Decay and Quality in Postharvest Chinese Bayberries. *Food Bioprocess Technol.* **2016**, *9*, 1825–1834. [[CrossRef](#)]
56. Ali, M.; Cheng, J.; Sun, D. Effects of Dielectric Barrier Discharge Cold Plasma Treatments on Degradation of Anilazine Fungicide and Quality of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) Juice. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2021**, *56*, 69–75. [[CrossRef](#)]
57. Wang, S.; Zhu, F. Chemical Composition and Biological Activity of Staghorn Sumac (*Rhus typhina*). *Food Chem.* **2017**, *237*, 431–443. [[CrossRef](#)]
58. Wang, S.; Zhu, F. Quality Attributes of Bread Fortified with Staghorn Sumac Extract. *J. Texture Stud.* **2018**, *49*, 129–134. [[CrossRef](#)]
59. Batiha, G.E.-S.; Ogunyemi, O.M.; Shaheen, H.M.; Kutu, F.R.; Olaiya, C.O.; Sabatier, J.-M.; De Waard, M. *Rhus Coriaria* L.(Sumac), a Versatile and Resourceful Food Spice with Cornucopia of Polyphenols. *Molecules* **2022**, *27*, 5179. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
60. Morshedloo, M.R.; Fereydouni, S.; Ahmadi, H.; Hassanpouraghdam, M.B.; Aghaee, A.; Mehrabani, L.V.; Maggi, F. Natural Diversity in Fatty Acids Profiles and Antioxidant Properties of Sumac Fruits (*Rhus coriaria* L.): Selection of Preferable Populations for Food Industries. *Food Chem.* **2022**, *374*, 131757. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

61. Pohl, P.; Dzimitrowicz, A.; Cyganowski, P.; Jamroz, P. Do We Need Cold Plasma Treated Fruit and Vegetable Juices? A Case Study of Positive and Negative Changes Occurred in These Daily Beverages. *Food Chem.* **2022**, *375*, 131831. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
62. Fernandes, F.A.; Santos, V.O.; Rodrigues, S. Effects of Glow Plasma Technology on Some Bioactive Compounds of Acerola Juice. *Food Res. Int.* **2019**, *115*, 16–22. [[CrossRef](#)]

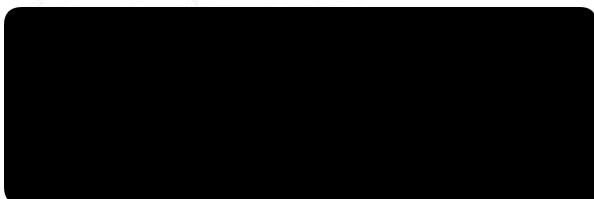
Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORÓW

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Emilia Osmólska



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska E., Stoma M., & Starek-Wójcicka A. (2023). Juice Quality Evaluation with Multisensor Systems—A Review. Sensors, 23(10), 4824*, mój udział polegał na stworzeniu koncepcji, przygotowaniu oryginalnej wersji roboczej, zaprojektowaniu struktury maszynopisu, napisaniu treści oraz edycji tekstu.

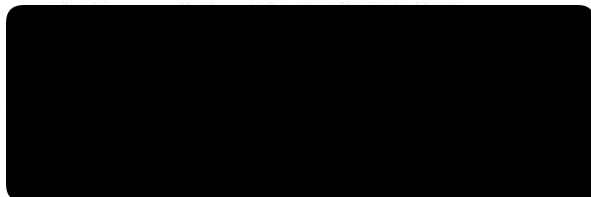
A handwritten signature in cursive script that reads "Emilia Osmólska".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Monika Stoma



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska E., Stoma M., & Starek-Wójcicka A. (2023). Juice Quality Evaluation with Multisensor Systems—A Review. Sensors, 23(10), 4824*, mój udział polegał na przygotowaniu oryginalnej wersji roboczej, napisaniu treści oraz edycji tekstu.

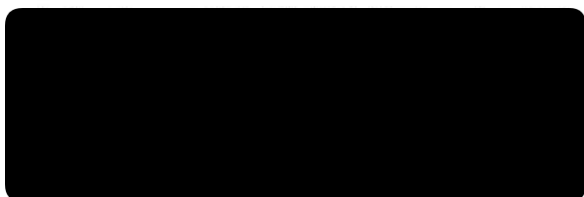
Monika
Stoma

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Agnieszka Starek-Wójcicka



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska E., Stoma M., & Starek-Wójcicka A. (2023). Juice Quality Evaluation with Multisensor Systems—A Review. Sensors, 23(10), 4824*, mój udział polegał na przygotowaniu oryginalnej wersji roboczej, napisaniu treści, edycji tekstu oraz wizualizacji.

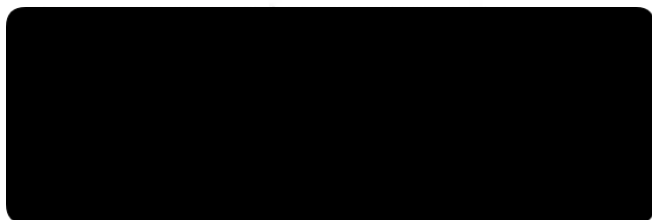
A. Starek-Wójcicka

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Zbigniew Kobus



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Kobus Z., Osmólska E., Starek-Wójcicka A., & Krzywicka M. (2023). Effect of High-Powered Ultrasound on Bioactive Compounds and Microbiological Stability of Juices. Applied Sciences, 13(19), 10961*; mój udział polegał na stworzeniu koncepcji, przeprowadzeniu analizy stanu wiedzy, przygotowaniu oryginalnej wersji roboczej, analizie formalnej, recenzji i redakcji, nadzorze oraz pozyskaniu funduszy.

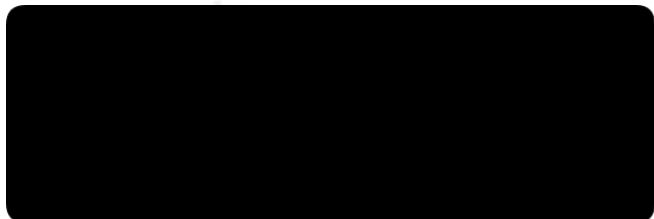
Zbigniew Kobus

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Emilia Osmólska



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Kobus Z., Osmólska E., Starek-Wójcicka A., & Krzywicka M. (2023). Effect of High-Powered Ultrasound on Bioactive Compounds and Microbiological Stability of Juices. Applied Sciences, 13(19), 10961*, mój udział polegał na koncepcji, analizie i interpretacji publikowanych danych, przygotowaniu graficznych elementów pracy, opiece nad danymi, sprawdzeniu tekstu pod względem treściowym, merytorycznym i przedmiotowym.

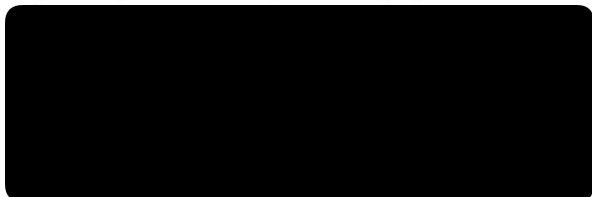
A handwritten signature in blue ink that reads "Emilia Osmólska".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Agnieszka Starek-Wójcicka



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Kobus Z., Osmólska E., Starek-Wójcicka A., & Krzywicka M. (2023). Effect of High-Powered Ultrasound on Bioactive Compounds and Microbiological Stability of Juices. Applied Sciences, 13(19), 10961*, mój udział polegał na przeprowadzeniu analizy stanu wiedzy, pisaniu i przygotowaniu oryginalnej wersji roboczej, wizualizacji oraz nadzorze.

A. Starek-Wójcicka

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Monika Krzywicka

Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Kobus Z., Osmólska E., Starek-Wójcicka A., & Krzywicka M. (2023). Effect of High-Powered Ultrasound on Bioactive Compounds and Microbiological Stability of Juices. Applied Sciences, 13(19), 10961*, mój udział polegał na stworzeniu koncepcji, metodologii, analizie formalnej, przeprowadzeniu analizy stanu wiedzy, opiece nad danymi, recenzji i redakcji oraz wizualizacji.

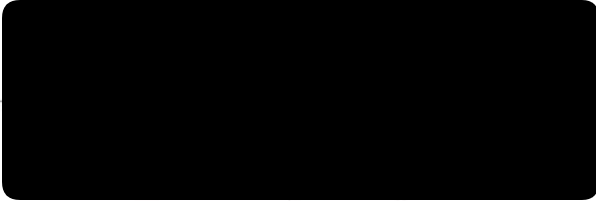
Monika Krzywicka

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Emilia Osmólska



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska E., Starek-Wójcicka A., Pawłat J. (2024). Niekonwencjonalne metody utrwalania produktów rolno-spożywczych. Wydawnictwo Inżynieria Rolnicza, Kraków, 105 s, 978-83-64377-58-7*, mój udział polegał na stworzeniu koncepcji, przygotowaniu oryginalnej wersji roboczej, zaprojektowaniu struktury monografii, wizualizacji, napisaniu treści (charakterystyce sektora rolno-spożywczego w Polsce, opisie rozdziału dotyczącego bezpieczeństwa i jakości żywności; opracowaniu podrozdziału na temat sonikacji) oraz edycji tekstu.

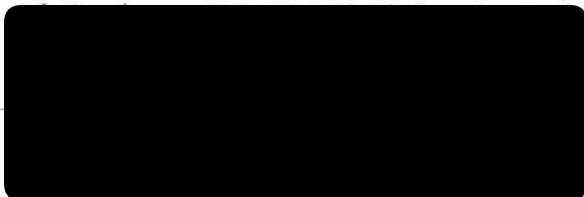
Emilia Osmólska

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Agnieszka Starek-Wójcicka



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska E., Starek-Wójcicka A., Pawlat J. (2024). Niekonwencjonalne metody utrwalania produktów rolno-spożywczych. Wydawnictwo Inżynieria Rolnicza, Kraków, 105 s, 978-83-64377-58-7*, mój udział polegał na przygotowaniu oryginalnej wersji roboczej, napisaniu treści (wstępu, przedstawieniu zarysu historycznego i znaczenia stosowania konwencjonalnych metod utrwalania żywności, charakterystyce niekonwencjonalnych sposobów obróbki żywności, w tym metody HPP, opisie szans i zagrożeń wynikających ze stosowania niekonwencjonalnych metod utrwalania), edycji tekstu, wizualizacji oraz udzieleniu odpowiedzi na uwagi recenzentów.

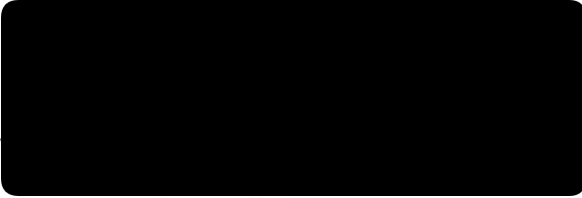
A handwritten signature in blue ink that reads "A. Starek-Wójcicka".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Joanna Pawłat



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska E., Starek-Wójcicka A., Pawłat J. (2024). Niekonwencjonalne metody utrwalania produktów rolno-spożywczych. Wydawnictwo Inżynieria Rolnicza, Kraków, 105 s, 978-83-64377-58-7*, mój udział polegał na napisaniu rozdziałów monografii dotyczących ozonowania, obróbki zimną plazmą i polem elektrycznym oraz wykonaniu wybranych graficznych elementów pracy.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized initial 'J' followed by a long horizontal stroke.

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 04.10.2024

Joanna Pawłat



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Pawłat J., Starek-Wójcicka A., Krajewska M., Sagan A., Andrejko D., Zdybel B., Osmólska E. (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243354*, mój udział polegał na zebraniu i analizie danych empirycznych, przygotowaniu dokumentacji.

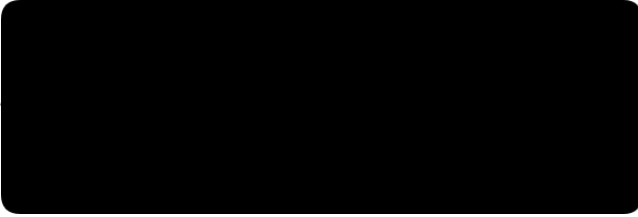
A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'R' followed by a horizontal line.

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 04.10.2024

Agnieszka Starek-Wójcicka



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Pawłat J., Starek-Wójcicka A., Krajewska M., Sagan A., Andrejko D., Zdybel B., Osmólska E. (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243354*, mój udział polegał na wyborze problemu badawczego, jego analizie, opracowaniu nowej koncepcji, nadzorze nad częścią doświadczalną, napisaniu wniosku patentowego.

A handwritten signature in blue ink that reads "A. Starek-Wójcicka".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 04.10.2024

Marta Krajewska



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

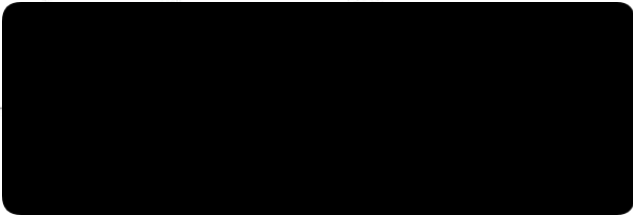
Niniejszym oświadczam, że w pracy *Pawłat J., Starek-Wójcicka A., Krajewska M., Sagan A., Andrejko D., Zdybel B., Osmólska E. (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243354*, mój udział polegał na wykonaniu analiz mikrobiologicznych.

Krajewska Marta
Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Agnieszka Sagan



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Pawłat J., Starek-Wójcicka A., Krajewska M., Sagan A., Andrejko D., Zdybel B., Osmólska E. (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243354*, mój udział polegał na zebraniu i analizie danych empirycznych oraz wykonaniu badań spektrofotometrycznych.

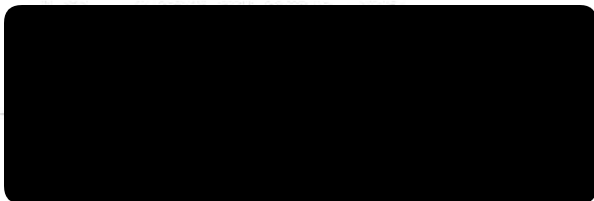
A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'A. Sagan'.

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 04.10.2024

Dariusz Andrejko



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy . *Pawła J., Starek-Wójcicka A., Krajewska M., Sagan A., Andrejko D., Zdybel B., Osmólska E. (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243354*, mój udział polegał na pozyskaniu środków na przeprowadzenie badań, zebraniu i analizie danych empirycznych.

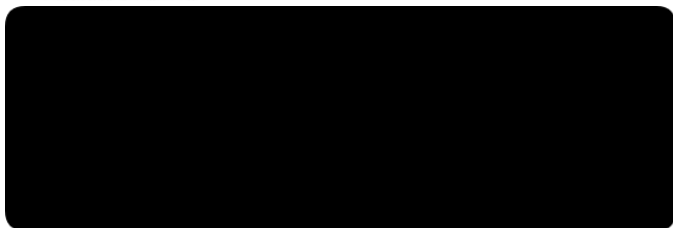


Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 04.10.2024

Beata Zdybel



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Pawła J., Starek-Wójcicka A., Krajewska M., Sagan A., Andrejko D., Zdybel B., Osmólska E. (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243354*, mój udział polegał na przygotowaniu zaplecza technicznego do przeprowadzenia analiz laboratoryjnych, analizie uzyskanych danych.

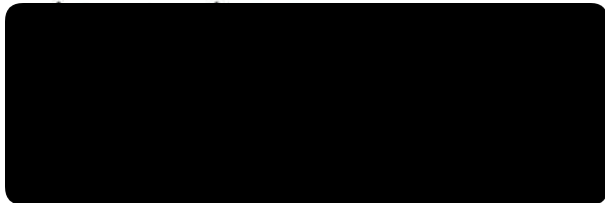
Beata Zdybel

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 04.10.2024

Emilia Osmólska



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Pawłat J., Starek-Wójcicka A., Krajewska M., Sagan A., Andrejko D., Zdybel B., Osmólska E. (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243354*, mój udział polegał na opracowaniu nowej koncepcji, współudziale w zaprojektowaniu badań, wykonaniu części analiz spektrofotometrycznych.

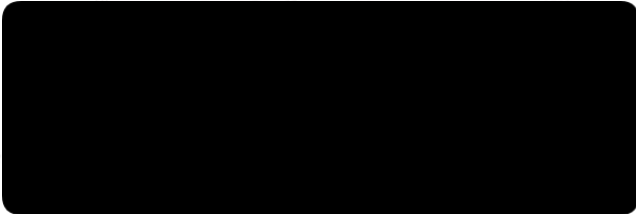
Emilia Osmólska

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Joanna Pawłat



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Pawłat J., Starek-Wójcicka A., Kwiatkowski M., Terebun P., Zarzeczny D., Krajewska M., Osmólska E. (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem i plazmą w systemie stacjonarnym. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243355*, mój udział polegał na opracowaniu nowej koncepcji, zaprojektowaniu reaktora do obróbki zimną plazmą, doborze parametrów układu zasilającego, nadzorze nad częścią eksperymentalną badań, przygotowaniu dokumentacji patentowej.

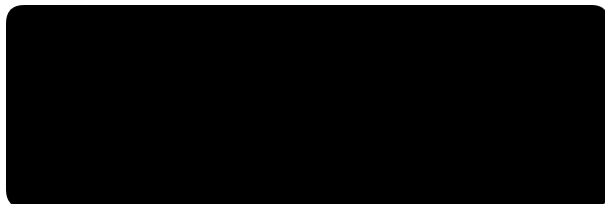
A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'P' followed by a horizontal line.

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Agnieszka Starek-Wójcicka



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Pawlat J., Starek-Wójcicka A., Kwiatkowski M., Terebun P., Zarzeczny D., Krajewska M., Osmólska E. (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem i plazmą w systemie stacjonarnym. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243355*, mój udział polegał na wyborze problemu badawczego, jego analizie, opracowaniu nowej koncepcji, nadzorze nad częścią doświadczalną, napisaniu wniosku patentowego.

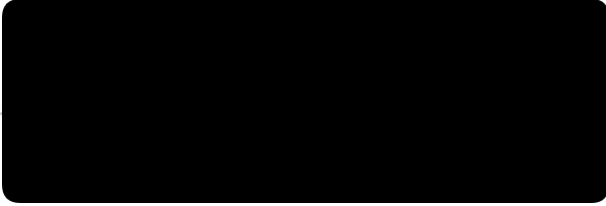
A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'A. Starek-Wójcicka'.

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Michał Kwiatkowski



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Pawłat J., Starek-Wójcicka A., Kwiatkowski M., Terebun P., Zarzeczny D., Krajewska M., Osmólska E. (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem i plazmą w systemie stacjonarnym. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243355*, mój udział polegał na przygotowaniu zaplecza technicznego, zaprojektowaniu stanowiska badawczego, optymalizacji parametrów obróbki zimną plazmą.

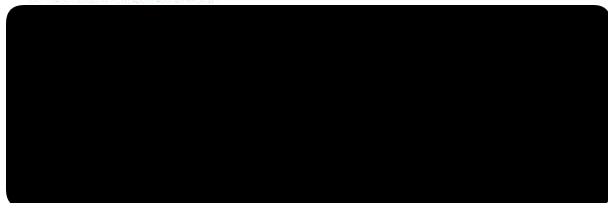
Michał Kwiatkowski

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Piotr Terebun



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Pawlat J., Starek-Wójcicka A., Kwiatkowski M., Terebun P., Zarzeczny D., Krajewska M., Osmólska E. (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem i plazmą w systemie stacjonarnym. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243355*, mój udział polegał na konceptualizacji problemu, współudziale w zaprojektowaniu badania, opracowaniu pomysłu, wykonaniu stanowiska badawczego i badań, kontrolowaniu parametrów obróbki zimną plazmą.

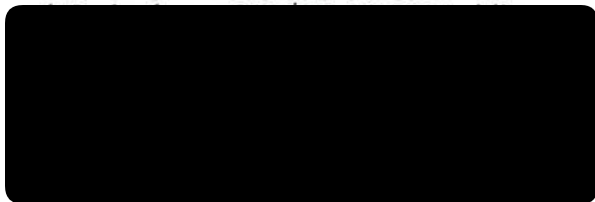
A handwritten signature in blue ink that reads "Piotr Terebun".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Dawid Zarzeczny



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

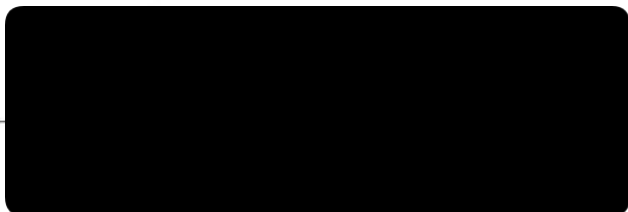
Niniejszym oświadczam, że w pracy *Pawlat J., Starek-Wójcicka A., Kwiatkowski M., Terebun P., Zarzeczny D., Krajewska M., Osmólska E. (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem i plazmą w systemie stacjonarnym. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243355*, mój udział polegał na współudziale w zaprojektowaniu badania, opracowaniu pomysłu i kontrolowaniu pracy generatora do obróbki zimną plazmą.


Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Marta Krajewska



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

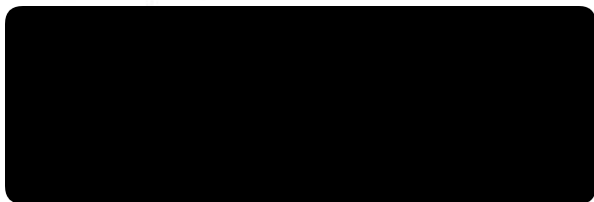
Niniejszym oświadczam, że w pracy *Pawłat J., Starek-Wójcicka A., Kwiatkowski M., Terebun P., Zarzeczny D., Krajewska M., Osmólska E. (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem i plazmą w systemie stacjonarnym. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243355*, mój udział polegał na wykonaniu analiz mikrobiologicznych.

Marta Krajewska
Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Emilia Osmólska



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Pawłat J., Starek-Wójcicka A., Kwiatkowski M., Terebun P., Zarzeczny D., Krajewska M., Osmólska E. (2023). Sposób kondycjonowania soku sumakiem i plazmą w systemie stacjonarnym. Urząd Patentowy RP. Numer patentu 243355*, mój udział polegał na współtworzeniu koncepcji, współudziale w zaprojektowaniu badań laboratoryjnych, wykonaniu części analiz spektrofotometrycznych.

A handwritten signature in blue ink that reads "Emilia Osmólska".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Emilia Osmólska

Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska, E., Stoma, M., Sagan, A., Chudzik, B., & Starek-Wójcicka, A. (2022). Effect of Supplementation of Freshly Pressed Carrot Juice with *Rhus coriaria* L. on Changes in Juice Quality. Sustainability, 15(1), 719*, mój udział polegał na opracowaniu koncepcji, metodologii, walidacji, analizie formalnej, prowadzeniu badań, zapewnieniu zasobów do badań, pisaniu i przygotowaniu oryginalnego draftu, przegląd i edycja, wizualizacja oraz administrowanie badaniem.



Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Monika Stoma



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska, E., Stoma, M., Sagan, A., Chudzik, B., & Starek-Wójcicka, A. (2022). Effect of Supplementation of Freshly Pressed Carrot Juice with Rhus coriaria L. on Changes in Juice Quality. Sustainability, 15(1), 719*, mój udział polegał na opracowaniu koncepcji, walidacji, zapewnieniu zasobów oraz wizualizacji.

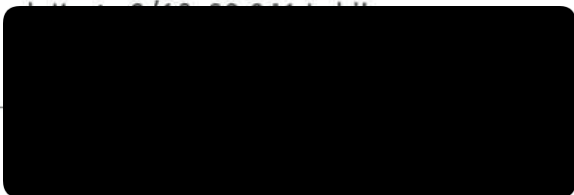
Monika
Stoma

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Agnieszka Sagan



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska, E., Stoma, M., Sagan, A., Chudzik, B., & Starek-Wójcicka, A. (2022). Effect of Supplementation of Freshly Pressed Carrot Juice with *Rhus coriaria* L. on Changes in Juice Quality. *Sustainability*, 15(1), 719*, mój udział polegał na współudziale w zaprojektowaniu badań, wykonaniu analiz laboratoryjnych, gromadzeniu danych i statystycznej analizie wyników oraz wizualizacji.

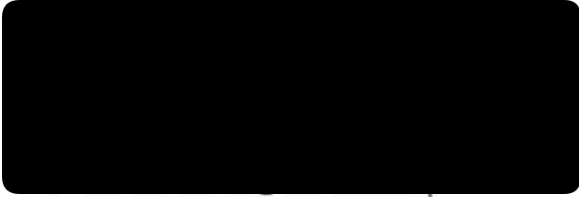
Handwritten signature of Agnieszka Sagan in blue ink.

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Barbara Chudzik



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy . *Osmólska, E., Stoma, M., Sagan, A., Chudzik, B., & Starek-Wójcicka, A. (2022). Effect of Supplementation of Freshly Pressed Carrot Juice with Rhus coriaria L. on Changes in Juice Quality. Sustainability, 15(1), 719*, mój udział polegał na zebraniu i analizie danych empirycznych oraz opisanu wyników badań mikrobiologicznych.

A handwritten signature in blue ink that reads "Barbara Chudzik".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Agnieszka Starek-Wójcicka



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska, E., Stoma, M., Sagan, A., Chudzik, B., & Starek-Wójcicka, A. (2022). Effect of Supplementation of Freshly Pressed Carrot Juice with *Rhus coriaria* L. on Changes in Juice Quality. Sustainability, 15(1), 719*, mój udział polegał na opracowaniu pomysłu artykułu, konceptualizacji problemu, współudziale w zaprojektowaniu badań, prowadzeniu analiz, pisaniu, przeglądzie i edycji, wizualizacji oraz administrowaniu.

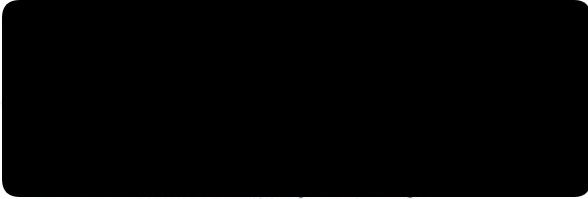
A. Starek-Wójcicka

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Emilia Osmólska



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Żukiewicz-Sobczak, W., Lachowicz-Wiśniewska, S., & Sobczak, P. (2024). Effects of the powdered fruit of *Rhus coriaria* L. addition on quality attributes based on total polyphenols content of smoothie during storage. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 69(1), 4*, mój udział polegał na opracowaniu pomysłu artykułu, konceptualizacji problemu, współudziale w zaprojektowaniu badań, prowadzeniu analiz, pisaniu, przeglądzie i edycji oraz wizualizacji.

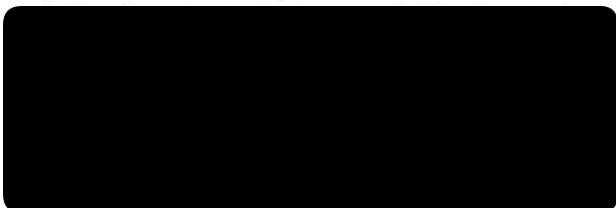
A handwritten signature in blue ink that reads "Emilia Osmólska".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Agnieszka Starek-Wójcicka



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Żukiewicz-Sobczak, W., Lachowicz-Wiśniewska, S., & Sobczak, P. (2024). Effects of the powdered fruit of *Rhus coriaria* L. addition on quality attributes based on total polyphenols content of smoothie during storage. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 69(1), 4*, mój udział polegał na opracowaniu nowego ujęcia problemu, współudziale w zaprojektowaniu badań laboratoryjnych, wykonaniu części analiz spektrofotometrycznych, walidacji oraz administrowaniu.

A handwritten signature in blue ink, reading "Agnieszka Starek-Wójcicka".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Wioletta Żukiewicz-Sobczak

Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Żukiewicz-Sobczak, W., Lachowicz-Wiśniewska, S., & Sobczak, P. (2024). Effects of the powdered fruit of *Rhus coriaria* L. addition on quality attributes based on total polyphenols content of smoothie during storage. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 69(1), 4* mój udział polegał na wyborze odpowiedniej metodologii ujęcia problemu badawczego, ustaleniu dotychczasowego dorobku w zakresie analizowanej tematyki, zgromadzeniu dostępnej literatury i materiałów źródłowych.

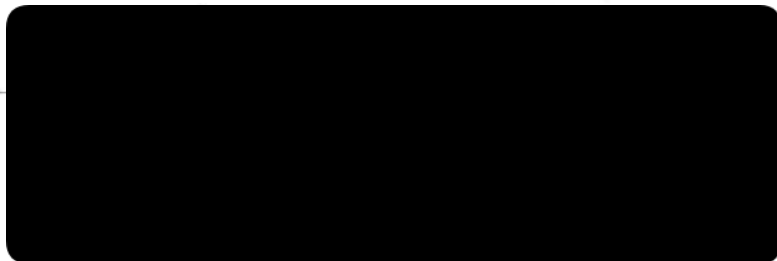
Wioletta Żukiewicz-Sobczak

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 03.10.2024

Sabina Lachowicz-Wiśniewska



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Żukiewicz-Sobczak, W., Lachowicz-Wiśniewska, S., & Sobczak, P. (2024). Effects of the powdered fruit of *Rhus coriaria* L. addition on quality attributes based on total polyphenols content of smoothie during storage. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 69(1), 4*, mój udział polegał na współudziale w zaprojektowaniu badań, wykonaniu i analizie pomiarów, przygotowaniu pracy do druku.



Signed by /
Podpisano przez:

Sabina
Lachowicz-
Wiśniewska

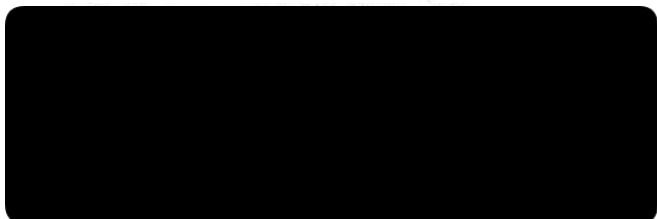
Date / Data:
2024-10-03 21:21

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Paweł Sobczak



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Żukiewicz-Sobczak, W., Lachowicz-Wiśniewska, S., & Sobczak, P. (2024). Effects of the powdered fruit of Rhus coriaria L. addition on quality attributes based on total polyphenols content of smoothie during storage. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 69(1), 4*, mój udział polegał na zebraniu i analizie danych empirycznych, sprawdzeniu tekstu pod względem treściowym, merytorycznym i przedmiotowym oraz zredagowaniu wybranej literatury przedmiotu.

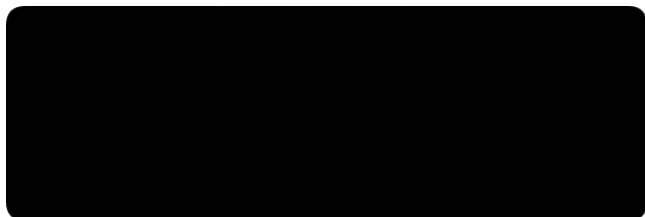
A handwritten signature in blue ink that reads "Sobczak Paweł".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Agnieszka Starek-Wójcicka



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., Kwiatkowski, M., Osmólska, E., Krajewska, M., ... & Pawlat, J. (2022). Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. Applied Sciences, 13(1), 578*, mój udział polegał na opracowaniu koncepcji, metodologii, gromadzeniu danych, recenzji i edycji, wizualizacji oraz nadzorze.

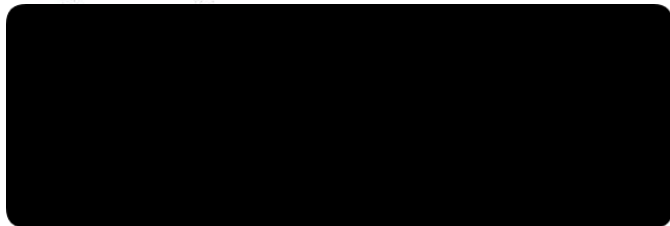
A. Starek-Wójcicka

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Agnieszka Sagan



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., Kwiatkowski, M., Osmólska, E., Krajewska, M., ... & Pawlat, J. (2022). Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. Applied Sciences, 13(1), 578*, mój udział polegał na metodologii, gromadzeniu danych, recenzji i edycji.

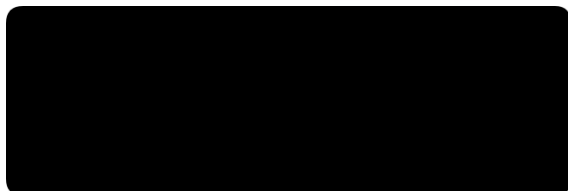
A. Sagan

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Piotr Terebun



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., Kwiatkowski, M., Osmólska, E., Krajewska, M., ... & Pawlat, J. (2022). Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. Applied Sciences, 13(1), 578*, mój udział polegał na współudziale w zaprojektowaniu badania, opracowaniu pomysłu i kontrolowaniu pracy generatora do obróbki zimną plazmą.

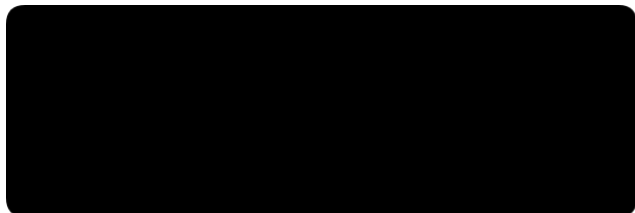
A handwritten signature in blue ink that reads "Piotr Terebun".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Michał Kwiatkowski



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., Kwiatkowski, M., Osmólska, E., Krajewska, M., ... & Pawlat, J. (2022). Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. Applied Sciences, 13(1), 578*, mój udział polegał na przygotowaniu zaplecza technicznego, zaprojektowaniu stanowiska badawczego, optymalizacji parametrów obróbki zimną plazmą.

Michał Kwiatkowski

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Emilia Osmólska



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., Kwiatkowski, M., Osmólska, E., Krajewska, M., ... & Pawlat, J. (2022). Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. Applied Sciences, 13(1), 578*, mój udział polegał na współtworzeniu koncepcji, prowadzeniu badań, gromadzeniu danych oraz redakcji manuskryptu.

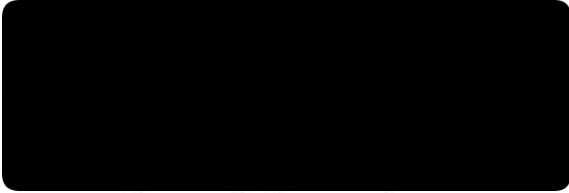
Emilia Osmólska

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Marta Krajewska



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., Kwiatkowski, M., Osmólska, E., Krajewska, M., ... & Pawlat, J. (2022). Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. Applied Sciences, 13(1), 578*, mój udział polegał na opracowaniu metodologii, prowadzeniu badań mikrobiologicznych oraz gromadzeniu danych.

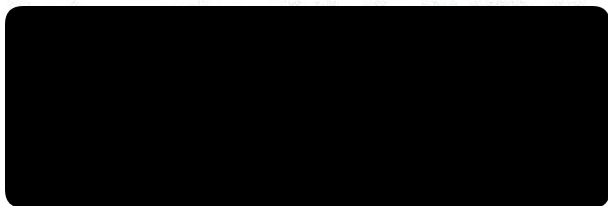
A handwritten signature in blue ink that reads "Marta Krajewska".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Elżbieta Grządka



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., Kwiatkowski, M., Osmólska, E., Krajewska, M., ... & Pawlat, J. (2022). Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. Applied Sciences, 13(1), 578*, mój udział polegał na wyborze odpowiedniej metodologii ujęcia problemu badawczego, ustaleniu dotychczasowego dorobku w zakresie analizowanej tematyki, analizie chemicznej próbek.

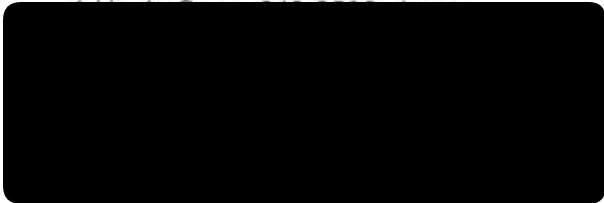


Podpis

Annex No. 7 - Declaration of co-authorship

Lublin, 14.10.2024

Matsuyama Narumol



Discipline Council Mechanical Engineering
of the University of Life Sciences
in Lublin

Declaration of co-authorship

I hereby declare that in the paper *Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., Kwiatkowski, M., Osmólska, E., Krajewska, M., ... & Pawlat, J. (2022). Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. Applied Sciences, 13(1), 578*, my contribution was consisted of writing and preparing the original draft, review and editing.

Matsuyama Narumol
Signature

Annex No. 7 - Declaration of co-authorship

Lublin, 14.10.2024

Hayashi Nobuya

Discipline Council Mechanical Engineering
of the University of Life Sciences
in Lublin

Declaration of co-authorship

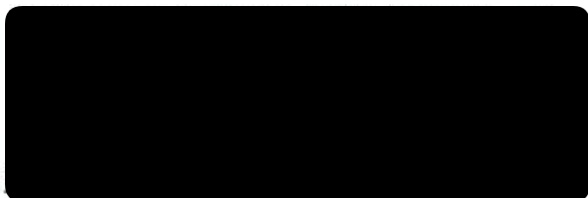
I hereby declare that in the paper *Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., Kwiatkowski, M., Osmólska, E., Krajewska, M., ... & Pawlat, J. (2022). Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. Applied Sciences, 13(1), 578*, my contribution was consisted of writing and preparing the original draft, review and editing.

Hayashi Nobuya
Signature

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Joanna Pawłat



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., Kwiatkowski, M., Osmólska, E., Krajewska, M., ... & Pawłat, J. (2022). Quality of Tomato Juice as Influenced by Non-Thermal Air Plasma Treatment. Applied Sciences, 13(1), 578*, mój udział polegał na opracowaniu koncepcji, metodologii, zaprojektowaniu reaktora do obróbki zimną plazmą, doborze parametrów układu zasilającego, nadzorze nad częścią eksperymentalną badań, gromadzeniu i opisie danych mikroskopowych oraz wizualizacji.

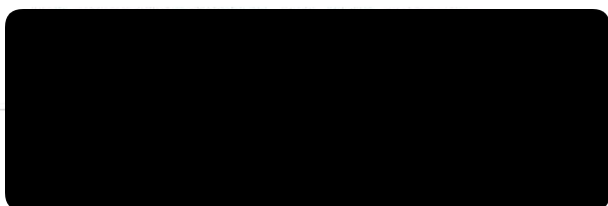
A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'J' followed by a horizontal line.

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Emilia Osmólska



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy . *Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., & Pawlat, J. (2024). The Effect of the Addition of Powdered Sumac (*Rhus coriaria* L.) and Cold Plasma Treatment on the Quality of Carrot Juice. *Applied Sciences*, 14(3), 1263*, mój udział polegał na pracach koncepcyjnych, udziale w pracach eksperymentalnych (prace nad wpływem plazmy na właściwości fizykochemiczne) oraz udziale w pisaniu i korekcie manuskryptu.

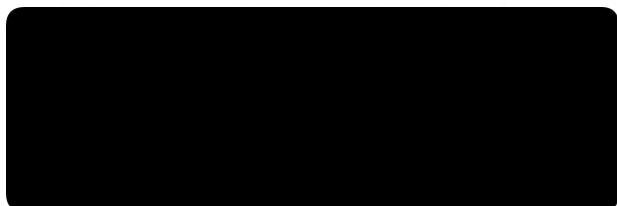
A handwritten signature in blue ink that reads "Emilia Osmólska".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Agnieszka Starek-Wójcicka



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., & Pawłat, J. (2024). The Effect of the Addition of Powdered Sumac (*Rhus coriaria* L.) and Cold Plasma Treatment on the Quality of Carrot Juice. *Applied Sciences*, 14(3), 1263*, mój udział polegał na pracy koncepcyjnej, udziale w pomiarach właściwości fizykochemicznych oraz w pisaniu i formatowaniu manuskryptu.

A handwritten signature in blue ink, reading "A. Starek-Wójcicka".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Agnieszka Sagan



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., & Pawłat, J. (2024). The Effect of the Addition of Powdered Sumac (*Rhus coriaria* L.) and Cold Plasma Treatment on the Quality of Carrot Juice. *Applied Sciences*, 14(3), 1263*, mój udział polegał na uczestnictwie w pracach eksperymentalnych (analiza fizykochemiczna próbek), wykonywaniu analiz statystycznych oraz w pisaniu manuskryptu.

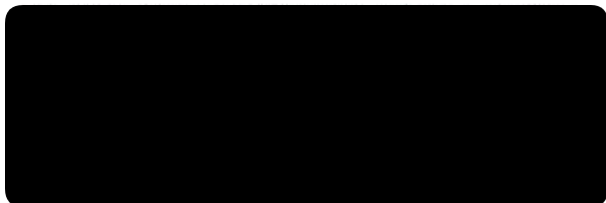
A. Sagan

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Piotr Terebun



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., & Pawłat, J. (2024). The Effect of the Addition of Powdered Sumac (*Rhus coriaria* L.) and Cold Plasma Treatment on the Quality of Carrot Juice. Applied Sciences, 14(3), 1263*, mój udział polegał na wykonaniu stanowiska badawczego i badań, optymalizacji parametrów obróbki zimną plazmą, wykonaniu i opisie zdjęć mikroskopowych.

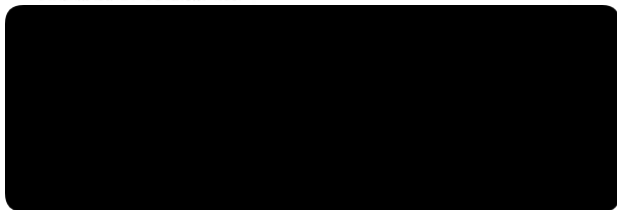
A handwritten signature in blue ink that reads "Piotr Terebun".

Podpis

Załącznik nr 7 – Oświadczenie o współautorstwie

Lublin, 14.10.2024

Joanna Pawłat



Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Uniwersytetu Przyrodniczego
w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy *Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., & Pawłat, J. (2024). The Effect of the Addition of Powdered Sumac (*Rhus coriaria* L.) and Cold Plasma Treatment on the Quality of Carrot Juice. Applied Sciences, 14(3), 1263*, mój udział polegał na pracach koncepcyjnych, udziale w pracach eksperymentalnych (zaprojektowaniu stanowiska do obróbki zimną plazmą, doborze parametrów procesu), wykonywaniu i opisywaniu obrazów mikroskopowych, udziale w pisaniu i korygowaniu manuskryptu.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'K' followed by a horizontal line.

Podpis