

**UNIwersYTET PRZYRODNICZY
W LUBLINIE**

Dyscyplina wiodąca: Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

Dyscyplina dodatkowa: Inżynieria mechaniczna

mgr inż. JAKUB SOJA

Rozprawa doktorska

**Możliwości zagospodarowania wybranych produktów
ubocznych przemysłu rolno-spożywczego z wykorzystaniem
techniki ekstruzji**

**Possibilities of the utilization of agri-food industry by-products using
extrusion-cooking technology**

Rozprawa doktorska wykonana w Katedrze Inżynierii Procesowej
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

PROMOTORZY

**prof. dr hab. inż. Tomasz Oniszczyk
dr hab. inż. Maciej Combrzyński, prof. uczelni**

Lublin 2025

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 24.09.2025r.

Podpis promotora.....Tomasz Oniszczuk.....

Data 24.09.2025r.

Podpis promotora.....Małgorzata Gombkiewicz.....

Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że:

- niniejsza rozprawa doktorska została przygotowana przez mnie samodzielnie pod kierunkiem Promotorów 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 płycie CD wersją elektroniczną.

Data 24.09.2025r.

Podpis.....Jakub Goja.....

PUBLIKACJE STANOWIĄCE ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ

Rozprawę doktorską stanowi spójny tematycznie cykl publikacji, w skład którego włączono następujące pozycje:

- P1. Jakub Soja, Özge Özmen, Marta Krajewska, Kamila Kasprzak-Drozd:** Effect of apple pomace (*Malus domestica* 'Gala') addition on the processing conditions and antioxidant potential of extruded snacks. *International Agrophysics*, 2023, 37, 401 – 413.
<https://doi.org/10.31545/intagr/171927> (IF 1,70; 100 pkt. MNiSW)
- P2. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszczyk, Marek Gancarz, Renata Różyło:** Analysis of the influence of different plasticizing systems in a single-screw extruder on the extrusion-cooking process and on selected physical properties of snack pellets enriched with selected oilseed pomace. *Processes*, 2025, 13, 4, 1247.
<https://doi.org/10.3390/pr13041247> (IF 2,80; 70 pkt. MNiSW)
- P3. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszczyk, Agnieszka Wójtowicz:** Management of selected fruit and vegetable pomace in fortified snack pellets through the single-screw extrusion-cooking under various process conditions. *Journal of Ecological Engineering*, 2025, 26, 11.
<https://doi.org/10.12911/22998993/207256> (IF 1,50; 70 pkt. MNiSW)
- P4. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszczyk, Marek Gancarz, Anna Oniszczyk:** Extrusion-cooking aspects and physical characteristics of snacks pellets with addition of selected plant pomace. *Applied Science*, 2024, 14, 19, 8754.
<https://doi.org/10.3390/app14198754> (IF 2,50; 100 pkt. MNiSW)
- P5. Jakub Soja, Tomasz Oniszczyk, Iryna Vaskina, Maciej Combrzyński, Agnieszka Wójtowicz:** Integration of plant pomace into extruded products: analysis of process conditions, post-production waste properties and biogas potential. *Energies*, 2024, 17, 24, 6476. <https://doi.org/10.3390/en17246476> (IF 3,20; 140 pkt. MNiSW)

Artykuły stanowiące osiągnięcie naukowe przedstawiono w kolejności odpowiadającej głównym tezom pracy. Punktację podano według listy czasopism punktowanych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW), a Impact Factor (IF) według Journal Citation Reports za rok 2025.

**Łączna punktacja opublikowanych prac wynosi 480 pkt. MNiSW,
łączny Impact Factor (IF) wynosi 11,70.**

Spis treści

STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM.....	6
STRESZCZENIE W JĘZYKU ANGIELSKIM	8
1. WPROWADZENIE.....	10
2. ZAŁOŻENIA BADAWCZE I CELE NAUKOWE	16
2.1. Problem naukowy, hipotezy badawcze i cele szczegółowe.....	16
3. MATERIAŁ I METODYKA BADAWCZA	18
3.1. Materiały badawcze	18
3.1.1. Surowce podstawowe	18
3.1.2. Funkcjonalne dodatki.....	19
3.1.3. Komponenty pomocnicze – dodatki technologiczne.....	20
3.2. Proces ekstruzji – przygotowanie mieszanek i przebieg procesu	21
3.2.1. Przygotowanie mieszanek surowcowych	21
3.2.2. Przebieg procesu ekstruzji	21
3.2.3. Rodzaje matryc formujących i system cięcia	23
3.3. Metodyka oceny wydajności i energochłonności procesu ekstruzji	24
3.3.1. Wydajność procesu ekstruzji	24
3.3.2. Energochłonność procesu ekstruzji	25
3.4. Metodyka oceny wybranych właściwości fizykochemicznych ekstrudatów.....	25
3.4.1. Wskaźnik ekspandowania ekstrudatów spożywczych.....	26
3.4.2. Wytrzymałość mechaniczna ekstrudatów.....	26
3.4.3. Gęstość nasypowa.....	27
3.4.4. Zawartość całkowita związków polifenolowych.....	27
3.4.5. Oznaczenie aktywności zmiatania wolnych rodników.....	28
3.4.6. Oznaczenie zdolności redukowania jonów żelaza w ekstrudatach.....	28
3.4.7. Wskaźnik absorpcji wody oraz rozpuszczalności w wodzie	29
3.5. Ocena potencjału biogazowego frakcji poprodukcyjnych.....	30
3.5.1. Określenie efektywności fermentacji beztlenowej	30

3.6.	Analiza statystyczna wyników.....	32
3.6.1.	Macierz korelacji Pearsona.....	32
3.6.2.	Jednoczynnikowa ANOVA - test post hoc - test Tukeya.....	32
3.6.3.	Metoda powierzchni odpowiedzi RSM	32
3.6.4.	Analiza głównych składowych	32
4.	OMÓWIENIE WYNIKÓW	34
5.	WNIOSKI	56
6.	LITERATURA POMOCNICZA	58
7.	OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORÓW	70
8.	KOPIE PUBLIKACJI.....	85

STRESZCZENIE

Celem pracy było opracowanie kompleksowego rozwiązania technologicznego, zgodnie z zastosowaniem zasad 6R, umożliwiającego zagospodarowanie wyłóków roślinnych jako dodatku funkcjonalnego w produkcji żywności. Zastosowanie wyłóków roślinnych pozwala zredukować zapotrzebowanie na wodę technologiczną oraz energochłonność procesu ekstruzji z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych oraz procesowych. W badaniach wykorzystano produkty uboczne przemysłu rolno-spożywczego pochodzące z tłoczenia owoców (jabłko, aronia), warzyw (dynia) oraz nasion roślin oleistych (czarnuszka, siemę lniane), które charakteryzują się wysoką zawartością składników odżywczych. Wymienione dodatki funkcjonalne wprowadzano w ilości 10, 20 i 30% do mieszanek surowcowych na bazie surowców skrobiowych, w tym skrobi ziemniaczanej i produktów ziemniaczanych, które następnie przetwarzano w procesie ekstruzji. W tym celu wykorzystano ekstruder jednoślismakowy typ EXP-45-32 (Zamak Mercator) wyposażony w zmodyfikowany układ plastyfikujący o $L/D=16$ oraz $L/D=20$. W badaniach zastosowano różne matryce formujące przy zróżnicowanej prędkości obrotowej ślimaka ekstrudera wynoszącej 40, 60 i 80 obr/min. Proces ekstruzji jest złożony i zależny od wielu czynników, parametrów technologiczno-środowiskowych oraz mechanicznych. W badaniach określono jego wydajność, energochłonność, stabilność temperaturową i procesową w zależności od zastosowanych dodatków (produktów ubocznych przemysłu rolno-spożywczego). Uzyskane ekstrudaty poddano badaniom wybranych cech fizykochemicznych określających ich funkcjonalności. Określono aktywność antyoksydacyjną wybranych ekstrudatów, gęstość nasypową, wskaźnik ekspandowania, wytrzymałość na uszkodzenia mechaniczne oraz wskaźniki rozpuszczalności WSI i chłonności wody WAI. Szczególną uwagę poświęcono wpływowi konstrukcji układu plastyfikującego ekstrudera na efektywność, zapotrzebowanie energetyczne i stabilność procesu przetwarzania mieszanek zawierających wyłoki roślinne. Równolegle dokonano identyfikacji potencjału energetycznego wykorzystania materiałów poprodukcyjnych powstających podczas rozruchu linii ekstruzyjnej, bądź też ekstrudatów niespełniających norm jakościowych. Dzięki wysokiej zawartości łatwofermentujących związków organicznych, materiały te zostały wykorzystane do fermentacji beztlenowej, umożliwiającej odzysk energii w postaci biogazu. Działanie tego typu wpisuje się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym oraz umożliwia ograniczenie ilości i uciążliwości środowiskowej pozostałości poprodukcyjnych. Przedstawiona koncepcja technologiczna łączy podejście środowiskowe, energetyczne i procesowe, umożliwiając tym samym kompleksowe zagospodarowanie

produktów ubocznych przemysłu rolno-spożywczego. Optymalizacja procesu ekstruzji i wykorzystanie produktów ubocznych w postaci wytlóków w kierunku produkcji żywności funkcjonalnej oraz bioenergii przyczyniają się do zwiększenia efektywności surowcowej i energetycznej, zmniejszając jednocześnie negatywne oddziaływanie przemysłu spożywczego na środowisko naturalne.

Wykonane badania, w ramach fazy wstępnej i fazy głównej, umożliwiły poznanie wpływu poszczególnych zmiennych, analizowanych w odniesieniu do sformułowanych problemów naukowych, na przebieg procesu ekstruzji i właściwości uzyskanych pelletów przekąskowych z dodatkiem wytlóków roślinnych. Uzyskane dane pozwoliły na opracowanie warunków przetwarzania oraz na poznanie i pogłębienie wiedzy z zakresu przemian właściwości uzyskanych produktów w wyniku zastosowania zmiennych warunków procesu ekstruzji zgodnie z ideą zrównoważonego rozwoju i ekoprojektowania procesów technologicznych. Otrzymane rezultaty mogą stanowić cenne wskazówki w konstruowaniu urządzeń przystosowanych do zrównoważonej produkcji ekstrudowanych pelletów przekąskowych z dodatkiem wybranych wytlóków roślinnych.

Słowa kluczowe: proces ekstruzji, wytloki roślinne, układ plastyfikujący, fermentacja beztlenowa, biogaz, efektywność energetyczna, gospodarka obiegu zamkniętego

SUMMARY

Possibilities of the utilization of agri-food industry by-products using extrusion-cooking technology

The aim of the study was to develop a comprehensive technological solution, in accordance with the 6R principles, enabling the management of plant pomace as a functional additive in food production. The use of plant pomace reduces the demand for technological water and the energy consumption of the extrusion-cooking process, taking into account environmental and process conditions. The study used by-products of the agri-food industry from the pressing of fruit (apple, chokeberry), vegetables (pumpkin) and oilseeds (nigella seed, flaxseed), which are characterized by high nutritional value. These functional additives were added in amounts of 10, 20 and 30% to raw materials mixtures based on starch, in particular potato starch and potato products, which were then processed by extrusion-cooking. For this purpose, a single-screw extruder EXP-45-32 (Zamak Mercator) equipped with a modified plasticizing system with $L/D=16$ and $L/D=20$ was used. The study used various forming dies and variable extruder screw speeds of 40, 60 and 80 rpm. The extrusion-cooking process is complex and depends on many factors, including technological, environmental and mechanical parameters. The study determined efficiency, specific energy consumption, temperature and process stability depending on the additives used (by-products of the agri-food industry). The extrudates obtained were tested for selected physicochemical properties determining their functionality. The antioxidant activity of selected extrudates, bulk density, expansion index, resistance to mechanical damage, water absorption (WAI) and solubility (WSI) indices were determined. Particular attention was paid to the impact of the design of the extruder-cooker plasticizing system on the efficiency and stability of the processing mixtures containing plant pomace. At the same time, the energy potential of using post-production materials generated during the start-up of the extrusion-cooking line or extrudates that do not meet quality standards was identified. Due to high contents of easily fermentable organic compounds, these materials were used for anaerobic fermentation, enabling energy recovery in the form of biogas. This type of activity is in line with the principles of the circular economy and makes it possible to reduce the amount and environmental impact of post-production residues. The presented technological concept combines environmental, energy and process approaches, thus enabling comprehensive management of by-products from the agri-food industry. The optimization of the extrusion process and the use of by-products in the production of functional foods and

bioenergy contribute to increased raw material and energy efficiency, while reducing the negative impact of the food industry on the natural environment.

The research conducted during the preliminary study and the main phase made it possible to determine the impact of individual variables, analyzed in relation to the scientific problems formulated, on the extrusion-cooking process and the properties of the snack pellets obtained with addition of selected plant by-products. The data obtained allowed for the development of processing conditions and for the acquisition and deepening of knowledge in the field of changes in the properties of the obtained products as a result of the application of variable extrusion-cooking process conditions in accordance with the idea of sustainable development and eco-design of technological processes. The results obtained may provide valuable guidance in the design of equipment adapted to the sustainable production of extruded snack pellets with the addition of selected plant pomace.

Keywords: extrusion-cooking process, plant pomace, plasticizing system, anaerobic fermentation, biogas, energy efficiency, circular economy

1. WPROWADZENIE

Przemysł rolno-spożywczy, będący istotnym elementem światowego systemu żywnościowego, jednocześnie odpowiada za powstawanie dużej ilości produktów ubocznych i odpadów [Mishra i in. 2024; Varzakas i in. 2024]. Ich obecność w dużej mierze stanowi efekt intensywnych procesów technologicznych, obejmujących cały cykl – od zbioru surowców po końcowe etapy przetwarzania [Ferdeš i in. 2022; Pandey i in. 2025]. Produkty uboczne powstające w tych etapach – m.in. wyłoki roślinne, otręby, makuchy, pestki czy pozostałości po tłoczeniu – stanowią poważne wyzwanie środowiskowe, gdy nie zostają odpowiednio zagospodarowane [Rału i in. 2023; Żukiewicz i in. 2022]. W tradycyjnych modelach gospodarki znaczna część takich produktów ubocznych nie jest odpowiednio zabezpieczona na końcowych etapach produkcji, nie spełniając tym samym obowiązujących norm. Odpady organiczne lub produkty uboczne przemysłu rolno-spożywczego bardzo często są spalane lub składowane w niewłaściwy sposób, powodując emisję gazów cieplarnianych, a co za tym idzie marnotrawi się cenne zasoby organiczne [Bhatia i in. 2023; Carrère i in. 2010]. W kontekście rosnącej presji społecznej i legislacyjnej dotyczącej zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym, działania tego typu stają się nieakceptowalne. Konieczne jest zatem opracowywanie innowacyjnych i efektywnych sposobów ponownego wykorzystania tego rodzaju produktów ubocznych [Sarangi i in. 2024].

Wyłoki roślinne, sklasyfikowane jako produkt uboczny procesów tłoczenia soków owocowo-warzywnych lub olejów roślinnych, do niedawna uznawane były za odpady przemysłowe o ograniczonym zastosowaniu, głównie na cele paszowe [Mironeasa i in. 2023; Shalini i in. 2010]. W ostatnich latach, wraz z rozwojem nauki, postępem technologicznym oraz rosnącym naciskiem na gospodarkę o obiegu zamkniętym, produkty te zyskały status surowców wtórnych o wysokim potencjale aplikacyjnym, zarówno w sektorze spożywczym, farmaceutycznym, jak i energii odnawialnej [Cassani i in. 2022; García-Lomillo i in. 2017].

Biorąc pod uwagę skład chemiczny, wyłoki roślinne stanowią źródło cennych składników odżywczych i bioaktywnych, których koncentracja często przewyższa poziomy występujące w surowcu wyjściowym [Berenguer i in. 2023; Râpă i in. 2024]. Należą do nich m.in. błonnik pokarmowy (zarówno frakcje rozpuszczalne, jak i nierozpuszczalne), wysokiej jakości białka roślinne, nienasycone kwasy tłuszczowe, związki mineralne, a także polifenole i inne substancje o działaniu przeciwutleniającym [Tama i Karaś 2025]. Skład wyłoków zależy przede wszystkim od rodzaju przetwarzanego surowca oraz metod przetwórczych, dzięki którym zostały pozyskane. Czynniki te wpływają na ich jakość, dzięki czemu surowce te mogą

wykazywać właściwości prebiotyczne, przeciwzapalne, hipolipemiczne oraz immunomodulujące [Mateus i in. 2024; Raŧu i in. 2023; Ueda i in. 2022]. Wprowadzenie wyŧłoków do produkcji żywności funkcjonalnej wpisuje się w aktualne trendy konsumenckie oraz strategię zrównoważonego rozwoju [Aït-Kaddour i in. 2024]. Wzrasta zainteresowanie żywnością, która nie tylko cechuje się akceptowalnością sensoryczną, ale także korzystnie wpływa na zdrowie, co czyni wyŧłoki atrakcyjnym składnikiem innowacyjnych receptur żywnościowych w wielu sektorach branży spożywczej. Wyŧłoki mogą pełnić funkcje naturalnych dodatków wzbogacając żywność w składniki funkcjonalne, ograniczając konieczność wprowadzania do receptur surowcowych sztucznych dodatków czy syntetycznych suplementów. Jednocześnie możliwe jest zagospodarowanie znacznych ilości produktów ubocznych generowanych w przetwórstwie rolno-spożywczym, realizując tym samym ideę gospodarki cyrkularnej i ograniczając negatywny wpływ produktów żywnościowych na środowisko [Mironeasa i in. 2023; Schmid i in. 2020].

Zastosowanie wyŧłoków w przemyśle spożywczym ma także wymiar ekonomiczny. Często są one dostępne lokalnie, relatywnie tanie, a w wielu przypadkach ich wykorzystanie pozwala ograniczyć koszty związane z ich utylizacją. Wyŧłoki roślinne mogą być wykorzystywane w postaci naturalnej, czyli o wysokiej wilgotności, jaką charakteryzują się bezpośrednio po procesie tłoczenia lub przetwarzania [Baglary i in. 2024; Chamorro i in. 2022]. Podwyższona zawartość wody stanowi jednak istotne wyzwanie technologiczne, ponieważ czyni te produkty nietrwałymi mikrobiologicznie. Z drugiej strony, obecność naturalnej wody może przynieść korzyści w niektórych gałęziach przemysłu spożywczego – na przykład w produkcji żywności ekstrudowanej – gdzie podwyższona wilgotność wsadu zawierającego mokrą frakcję wyŧłoków pozwala ograniczyć zużycie dodatkowej wody technologicznej, tym samym obniżając koszty procesu [Dushkova i in. 2024]. Długoterminowe przechowywanie wyŧłoków roślinnych wymaga ich odpowiedniego zabezpieczenia oraz przeprowadzenia dodatkowych procesów przetwórczych, które zapewnią stabilność mikrobiologiczną i zachowanie właściwości funkcjonalnych surowca [Borah i in. 2016]. Przekształcenie wyŧłoków w pełnowartościowe surowce wtórne najczęściej realizowane jest poprzez suszenie, mielenie oraz standaryzację ich składu chemicznego. Dzięki temu stają się one surowcem łatwym do zastosowania w przemysłowych recepturach żywnościowych. W tej perspektywie podkreśla się ich ponowne wykorzystanie, polegające na przekształceniu pozostałości po procesach produkcyjnych w materiał o określonych właściwościach użytkowych.

Wyŧłoki, klasyfikowane jako produkt uboczny procesów technologicznych, stanowią kategorię materiałów marginalizowanych w praktyce przemysłowej, pomimo iż charakteryzują

się istotnym potencjałem funkcjonalnym i aplikacyjnym [Galanakis 2012]. Wytłoki roślinne znajdują zastosowanie w wielu sektorach przemysłu spożywczego. Najczęściej wykorzystywane są do produkcji mieszanek herbat, w piekarnictwie jako dodatek do mąki lub ciasta, do produkcji makaronów, przekąsek, batonów zbożowych i napojów białkowych typu instant. Coraz częściej pełnią także funkcję nośników dla probiotyków lub substratów w procesach fermentacji przemysłowej. W sektorze paszowym stosowane są od lat jako źródło włókna pokarmowego i mikroelementów, stanowiąc stały element wielu mieszanek żywieniowych dla zwierząt [Asma i in. 2023].

Wśród wielu metod przetwórstwa żywności szczególną uwagę zwraca technologia ekstruzji, która wykazuje duży potencjał w wykorzystaniu wytlóków roślinnych [Luo i in. 2020]. Proces ten umożliwia produkcję szerokiej gamy wyrobów, takich jak chrupkie przekąski, galanteria śniadaniowa, żywność typu instant czy zamienniki mięsa, przy jednoczesnym wzbogaceniu ich składu o cenne związki bioaktywne obecne w wytlókach – m.in. błonnik pokarmowy oraz naturalne przeciwutleniacze. Z tego względu ekstruzja uznawana jest za jeden z najbardziej obiecujących kierunków rozwoju produkcji żywności w kontekście zagospodarowania produktów ubocznych przemysłu rolno-spożywczego. Niemniej jednak, skuteczne wdrażanie wytlóków do procesów produkcyjnych w tej technologii wymaga dalszego doskonalenia parametrów technologicznych oraz precyzyjnej optymalizacji składów surowcowych tak, aby zapewnić odpowiednią jakość, atrakcyjność sensoryczną i trwałość gotowych wyrobów [Offiah i in. 2019; Yağcı i in. 2020].

Proces ekstruzji (ang. extrusion-cooking process) to technologia, która od kilku dekad zajmuje istotne miejsce w przetwórstwie surowców roślinnych, szczególnie w kontekście produkcji żywności wygodnej typu convenience food, przekąski, teksturaty białkowe, produkty śniadaniowe, granulaty skrobiowe, ale także pasze i komponenty biodegradowalne [Ali i in. 2024]. Technologia ta łączy w sobie kilka etapów przetwarzania w jednej, zintegrowanej operacji jednostkowej, podczas której w jednym ciągłym cyklu produkcyjnym zachodzi proces mieszania, uplastyczniania, gotowania, ścinania i formowania przetwarzanego materiału. Działania te realizowane są w warunkach podwyższonej temperatury (zwykle w zakresie 80–200°C), ciśnienia oraz sił ścinających powodujących istotne zmiany fizykochemiczne w strukturze składników – m.in. skleikowanie skrobi, denaturację białek, inaktywację niektórych enzymów oraz redukcję aktywności mikrobiologicznej [Cotacallapa-Sucapuca i in. 2021; Sule i in. 2024].

Jedną z kluczowych zalet procesu ekstruzji jest jego elastyczność procesowa. Technologia ta umożliwia przetwarzanie zróżnicowanych materiałów pochodzenia roślinnego,

w tym także surowców uznawanych za trudne w obróbce technologicznej, takich jak produkty uboczne przemysłu owocowo-warzywnego czy tłuszczowego – np. wyłoki z jabłek, dyni, siemienia lnianego, aronii czy czarnuszki. W tradycyjnych warunkach składniki te często charakteryzują się niestabilnością mikrobiologiczną, wysoką wilgotnością oraz niejednorodną strukturą i składem wynikającymi z wcześniejszych procesów przetwórczych, co w dużym stopniu utrudnia ich bezpośrednie wykorzystanie. Proces ekstruzji pozwala na ich stabilizację i włączenie do produkcji pełnowartościowych wyrobów o kontrolowanej strukturze i wydłużonym okresie przydatności do spożycia [Pismag i in. 2024].

Ekstruzja jako wysokotemperaturowa obróbka w krótkim czasie (ang. HTST- high temperature short time) sprzyja także zachowaniu wielu cennych substancji bioaktywnych zawartych w surowcach roślinnych. Z punktu widzenia stabilności składników odżywczych, intensywna obróbka termiczna może prowadzić do obniżenia zawartości niektórych wrażliwych związków, takich jak witaminy. Jednakże precyzyjna optymalizacja warunków procesu pozwala ograniczyć te straty, a jednocześnie zapewnia równomierne rozmieszczenie substancji funkcjonalnych – w tym polifenoli, błonnika pokarmowego oraz białek roślinnych w matrycy produktu. Oprócz utrwalenia, strukturyzacji i teksturowania, proces ekstruzji wpływa również na właściwości sensoryczne – m.in. stopień ekspandowania, twardość, porowatość i barwę – co daje możliwość projektowania nowoczesnych produktów konsumenckich [Xu i in. 2025].

Z technologicznego punktu widzenia proces ekstruzji wymaga precyzyjnego doboru i kontroli wielu parametrów operacyjnych, takich jak:

- wilgotność surowca (najczęściej w zakresie 14–35%),
- temperatura w poszczególnych strefach cylindra ekstrudera,
- prędkość obrotowa ślimaka/ślimaków,
- ciśnienie wewnątrz cylindra,
- geometria układu plastyfikującego (w tym stosunek długości ślimaka do jego średnicy – L/D).

Niewłaściwy dobór parametrów produkcji może prowadzić do niestabilności procesu ekstruzji, częściowego lub całkowitego ograniczenia przepływu masy surowcowej przez cylinder i matrycę ekstrudera lub uzyskania niepożądanych zmian strukturalnych produktu końcowego. Z kolei optymalizacja warunków procesu ekstruzji – m.in. poprzez dostosowanie parametrów do właściwości fizykochemicznych surowców podstawowych i dodatków roślinnych – umożliwia uzyskanie ekstrudatów spełniających wymagania jakościowe przy

jednoczesnej minimalizacji zużycia energii i wody [Jiang i in. 2025; Juárez-Barrientos i in. 2025].

Z punktu widzenia zrównoważonego rozwoju technologia ekstruzji bywa postrzegana jako proces o podwyższonym zużyciu energii oraz potencjalnie związany z generowaniem odpadów produkcyjnych. Wysokotemperaturowa obróbka, duże siły ścinające oraz konieczność precyzyjnej kontroli parametrów technologicznych w poszczególnych sekcjach ekstrudera mogą przyczyniać się do zwiększenia śladu węglowego, szczególnie w warunkach przemysłowych [Lue-lue i in. 2009]. Jednak w odpowiedzi na te wyzwania podejmowane są działania mające na celu poprawę efektywności środowiskowej procesu ekstruzji. Przykładem jest wykorzystanie surowców o naturalnie wyższej wilgotności początkowej, co pozwala ograniczyć zużycie wody technologicznej i energii cieplnej. Istotne znaczenie ma również odpowiednie projektowanie receptur, uwzględniające właściwości fizykochemiczne składników – w tym surowców wtórnych, takich jak wytloki roślinne – które wspomaga osiągnięcie stabilności procesu i zmniejsza ilość generowanych odpadów [Yadav i in. 2025]. W efekcie, mimo, że ekstruzja może być klasyfikowana jako technologia wymagająca dostarczenia dużej ilości energii, rozwój innowacyjnych rozwiązań procesowych i surowcowych stopniowo zmienia jej charakter w kierunku bardziej zrównoważonym. Możliwość lokalnego przetwarzania produktów ubocznych przemysłu rolno-spożywczego oraz skracania łańcuchów dostaw dodatkowo wspiera odporność na zakłócenia logistyczne i wahania rynkowe w branży rolno-spożywczej, a także przyczynia się do realizacji celów gospodarki o obiegu zamkniętym. W związku z powyższym, ekstruzja stanowi nie tylko efektywną technikę przetwórstwa surowców roślinnych, lecz także jedno z kluczowych narzędzi w realizacji strategii gospodarki o obiegu zamkniętym oraz projektowania żywności funkcjonalnej i zgodnej z zasadami zrównoważonego rozwoju. Jej dalszy rozwój – zarówno w wymiarze technologicznym, jak i środowiskowym – jest istotnym kierunkiem dla przyszłości przetwórstwa rolno-spożywczego [Dey i in. 2021; Offiah i in. 2019].

W tradycyjnym modelu gospodarki materiałowej produkty powstające na etapie rozruchu linii do ekstruzji, a także te charakteryzujące się niejednorodnością składu mieszanek czy też produkty niespełniające norm jakościowych, są traktowane jako produkty o niskiej przydatności, przeznaczone do utylizacji lub kompostowania. Tymczasem ich skład chemiczny – szczególnie przy wysokim poziomie suchej masy i zawartości łatwostrawnych związków organicznych – sprawia, że mogą być wykorzystane jako substraty w biogazowniach rolniczych i przemysłowych [Pazera i in. 2015]. Proces fermentacji beztlenowej nie tylko umożliwia odzysk energii w postaci biogazu (zawierającego zwykle 50–70% metanu), lecz także pozwala

na istotne zmniejszenie masy i objętości powstających produktów oraz poprawę parametrów końcowego pofermentu, który może służyć jako nawóz organiczny [Qian i in. 2025; Vaskina i in. 2025]. Z perspektywy strategii zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym integracja technologii pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych z procesami przetwórstwa rolno-spożywczego stanowi jedno z kluczowych narzędzi optymalizacji zasobów w tej branży. Odpady powstające w trakcie produkcji żywności, które dotychczas stanowiły kosztowny problem logistyczny, mogą zostać skutecznie zagospodarowane jako źródło energii odnawialnej. Takie podejście umożliwia zamknięcie cyklu życia produktu, ograniczając zależność od paliw kopalnych, a także zmniejsza całkowity ślad węglowy sektora spożywczego [Bhatia i in. 2023; Kumar i in. 2022].

Na uwagę zasługuje także fakt, że biogazownie działające w pobliżu zakładów przetwórstwa spożywczego mogą w łatwy sposób integrować się z lokalnymi producentami żywności, tworząc tzw. „symbiozy przemysłowe”. Oznacza to, że produkty uboczne z jednego zakładu (np. z rozruchu linii produkcyjnej lub produkty niespełniające norm) mogą być w efektywny sposób przetwarzane w energię i ciepło oraz wykorzystywane następnie przez ten sam lub sąsiadujący obiekt – np. w procesach suszenia, uruchomienia i pracy linii produkcyjnej czy wytwarzania pary procesowej. Takie działania pozwalają na minimalizację strat energetycznych, redukują emisję gazów cieplarnianych i ograniczają zapotrzebowanie na zewnętrzne źródła energii [Albarracin i in. 2024]. Z punktu widzenia znaczenia środowiskowego fermentacja beztlenowa stanowi jedno z najbardziej przyjaznych środowisku rozwiązań w zakresie utylizacji odpadów organicznych. Proces ten nie tylko prowadzi do zmniejszenia emisji nieprzyjemnych zapachów, ale również ogranicza emisję metanu do atmosfery, który w warunkach składowania ulega niekontrolowanej dyfuzji. Przechwycenie i ukierunkowanie tego gazu jako źródła energii to przykład efektywnego i odpowiedzialnego zarządzania emisjami w sektorze rolniczo-spożywczym [Baglary i in. 2024; Chamorro i in. 2022].

2. ZAŁOŻENIA BADAWCZE I CELE NAUKOWE

2.1. Problem naukowy, hipotezy badawcze i cele szczegółowe

W świetle rosnącej presji środowiskowej, obejmującej konieczność racjonalnego gospodarowania zasobami naturalnymi oraz potrzeby zwiększania efektywności surowcowej przetwórstwa rolno-spożywczego, istotnym wyzwaniem staje się zagospodarowanie roślinnych produktów ubocznych – takich jak wytloki owocowe i olejarskie – umożliwiając tym samym ich pełne wykorzystanie w modelu gospodarki o obiegu zamkniętym. Dotychczasowe metody ich utylizacji (kompostowanie, spalanie lub składowanie) nie tylko nie wykorzystują ich pełnego potencjału funkcjonalnego i energetycznego, ale także generują dodatkowe koszty i wpływają negatywnie na środowisko.

Jednocześnie zastosowanie procesu ekstruzji jako metody przetwórstwa żywności otwiera nowe możliwości zagospodarowania tego typu produktów. Jednakże włączenie wtyłoków do matrycy skrobiowej wiąże się z licznymi wyzwaniami technologicznymi – m.in. wpływem na wydajność, energochłonność i przebieg procesu, stabilność termiczną oraz jakość ekstrudatów. Wpływ konstrukcji układu plastyfikującego na przebieg procesu ekstruzji mieszanek zawierających produkty uboczne przemysłu rolno-spożywczego wymaga analiz.

Na podstawie powyższych informacji i wykonanego przeglądu literatury z zakresu tematyki pracy sformułowano następujący problem naukowy:

Zagospodarowanie wybranych produktów ubocznych przetwórstwa rolno-spożywczego jako dodatków wzbogacających decyduje o przebiegu procesu ekstruzji i ma wpływ na kształtowanie wybranych właściwości fizykochemicznych i funkcjonalnych uzyskiwanych pelletów przekąskowych.

W odpowiedzi na przedstawiony problem naukowy sformułowano następujące hipotezy badawcze:

- H1: Zastosowanie procesu ekstruzji pozwala na zagospodarowanie produktów ubocznych w postaci wtyłoków owocowo-warzywnych i oleistych do uzyskania nowej gamy produktów ekstrudowanych w postaci pelletów przekąskowych ograniczając tym samym konieczność ich utylizacji.
- H2: Ilość i rodzaj dodatku wtyłoków roślinnych do mieszanek skrobiowych oraz konfiguracja układu plastyfikującego ekstrudera, prędkość obrotowa ślimaka i zastosowana matryca formująca determinują przebieg procesu ekstruzji oraz

kształtują wybrane właściwości fizykochemiczne i funkcjonalne ekstrudatów, co może przyczynić się do uzyskania nowych wyrobów o zdefiniowanych cechach przy minimalizacji zapotrzebowania energetycznego.

- H3: Materiały powstałe w procesie ekstruzji zawierają znaczną ilość łatworozkładalnych związków organicznych umożliwiających ich wykorzystanie jako substratu do przeprowadzenia fermentacji beztlenowej i produkcji biogazu, co przynosi pozytywny efekt środowiskowy.

Na podstawie tak sformułowanego problemu naukowego i wyznaczonych hipotez badawczych sformułowane następujące cele szczegółowe:

1. Ocena wpływu dodatku wyłoków jabłkowych w mieszance pszenno-kukurydzianej oraz różnych prędkości obrotowych ślimaka ekstrudera na przebieg procesu ekstruzji i właściwości antyoksydacyjne uzyskanych produktów [**P1**].
2. Ocena wpływu różnych układów plastyfikujących na przebieg procesu ekstruzji oraz wybrane właściwości fizyczne pelletów przekąskowych na bazie surowców ziemniaczanych, otrzymanych przy dodatku różnej ilości i rodzaju wyłoków roślinnych (jabłkowych, aroniowych, dyniowych, z nasion czarnuszki i siemienia lnianego) oraz w zależności od prędkości obrotowej ślimaka ekstrudera [**P2 i P3**].
3. Badanie przebiegu procesu ekstruzji i wybranych właściwości fizycznych pelletów przekąskowych na bazie surowców ziemniaczanych w zależności od ilości i rodzaju wyłoków roślinnych (jabłko, aronia, dynia, siemię lniane, czarnuszka) oraz prędkości obrotowej ślimaka ekstrudera [**P4**].
4. Badanie przebiegu procesu ekstruzji, ocena potencjału biogazowego i wybranych właściwości fizycznych pelletów przekąskowych na bazie surowców ziemniaczanych uzyskanych przy dodatku różnej ilości i rodzaju wyłoków roślinnych (jabłko, aronia, dynia, siemię lniane, czarnuszka) [**P5**].

3. MATERIAŁ I METODYKA BADAWCZA

Prace badawcze przeprowadzono w laboratoriach Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie, Uniwersytetu Medycznego w Lublinie oraz Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, wykorzystując dostępne zaplecze aparaturowe jednostek.

Opracowanie i przygotowanie mieszanek surowcowych, przeprowadzenie procesu ekstruzji, a także szczegółowa analiza parametrów przetwarzania oraz wybranych właściwości fizycznych uzyskanych ekstrudatów zostały wykonane w laboratoriach Katedry Inżynierii Procesowej Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie.

Ocena potencjału antyoksydacyjnego otrzymanych ekstrudatów, w tym oznaczenia zdolności zmiatania wolnych rodników oraz zawartości związków polifenolowych, została wykonana w Zakładzie Chemii Nieorganicznej Uniwersytetu Medycznego w Lublinie.

Badania potencjału biogazowego frakcji poprodukcyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem ich przydatności do procesów fermentacji metanowej, przeprowadzono w ramach prac realizowanych w Pracowni Ekotechnologii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu.

3.1. Materiały badawcze

3.1.1. Surowce podstawowe

W badaniach wykorzystano różne mieszanki surowcowe pełniące funkcję komponentu bazowego w procesie ekstruzji. Dobór ich składu zależał od specyfiki prowadzonego eksperymentu oraz planowanego zastosowania końcowego produktu.

W badaniach wstępnych [P1] zastosowano mieszankę pszenno-kukurydzianą składającą się z 82,5% mąki pszennej (Lubella, Lublin, Polska), 15% mąki kukurydzianej (EDMIR-POL, Chorzów, Polska), 2% soli (Culine, Janikowo, Polska) oraz 0,5% sody oczyszczonej (Gellwe, Zabierzów, Polska). Tego typu skład wymaga wysokiej temperatury przetwarzania (ok. 100°C) i jest typowy dla przekąsek ekstrudowanych.

W dalszych etapach prac [P2–P5] komponent bazowy stanowiły mieszanki skrobiowe oparte głównie na bazie ziemniaczanej, które wymagają niższych temperatur przetwarzania (do 100°C). Surowce podstawowe jakie wykorzystano to:

- skrobia ziemniaczana (SUPERIOR STANDARD pochodząca z Przedsiębiorstwa Przemysłu Ziemniaczanego Bronisław S.A., Strzelno, Polska) – jako główny komponent żelujący,
- płatki ziemniaczane (Zakłady Przemysłu Ziemniaczanego w Lublinie, Lublin, Polska) – jako składnik wpływający na teksturę produktu i efektywność procesu.

Udziały skrobi ziemniaczanej i płatków ziemniaczanych wynosiły odpowiednio 82% i 15%.

3.1.2. Funkcjonalne dodatki

W ramach prowadzonych badań zastosowano wybrane rodzaje wytlóków pochodzenia roślinnego jako dodatkowe, funkcjonalne składniki mieszanek surowcowych. Materiały te, uznawane za produkty uboczne przetwórstwa rolno-spożywczego, zostały wprowadzone do mieszanek w celu częściowego zastąpienia komponentów bazowych oraz zwiększenia wartości odżywczej produktów końcowych. Wprowadzenie dodatku w postaci wytlóków w ilości 10, 20 i 30% wiązało się z koniecznością częściowego zastąpienia skrobi ziemniaczanej, co skutkowało obniżeniem jej udziału w mieszance do 72%, 62% i 52%, przy zachowaniu stałej zawartości pozostałych składników.

Do badań wykorzystano wytloki roślinne pozyskane od lokalnego dostawcy z giełdy rolno-spożywczej w Elizówce (Lublin, Polska). Lokalny charakter pozyskania surowców pozwolił nie tylko na zachowanie ich właściwości technologicznych, lecz także wpisywał się w ideę skracania łańcuchów dostaw i ograniczenia śladu środowiskowego.

Do przygotowania mieszanek wykorzystano wytloki z:

- jabłek,
- aronii,
- dyni,
- nasion czarnuszki,
- nasion siemienia lnianego.

Wszystkie pozyskane wytloki zostały otrzymane metodą tłoczenia na zimno owoców, warzyw i nasion roślin oleistych. Bezpośrednio po procesach przetwórczych surowce te zostały zabezpieczone w warunkach kontrolowanej temperatury i atmosfery (zapakowane próżniowo i schłodzone), co pozwoliło na zachowanie ich właściwości fizycznych i ograniczenie rozwoju niepożądanego mikroflory. Przed ich włączeniem do receptur wytloki zostały rozdrobnione mechanicznie, a stopień rozdrobnienia był zbliżony do frakcji pozostałych składników mieszanki. Takie działanie miało na celu ujednolicenie struktury i umożliwienie dalszego

przetwarzania w ekstruderze. W zależności od rodzaju wyłoków wilgotność mieściła się w zakresie 20-65%.

Wyłoki wprowadzono do mieszanek w trzech wariantach udziału procentowego: 10, 20 i 30%. Pozwoliło to na ocenę wpływu zarówno rodzaju materiału roślinnego, jak i jego ilości na przebieg procesu ekstruzji oraz wybrane właściwości fizykochemiczne otrzymanych ekstrudatów. Ponadto, dla celów porównawczych, przygotowano jednorazowo próby kontrolne niezawierające dodatku wyłoków, co umożliwiło jednoznaczną ocenę efektów ich zastosowania względem produktu bazowego.

3.1.3. Komponenty pomocnicze – dodatki technologiczne

We wszystkich recepturach surowcowych, oprócz komponentów bazowych (skrobiowych) i dodatków funkcjonalnych (wyłoków), zastosowano również dodatki technologiczne pełniące istotne funkcje w zakresie modyfikacji właściwości reologicznych, smakowych oraz procesowych mieszanek ekstrudowanych. Do grupy tej należały:

- sól spożywcza (CENOS Sp. z o.o., Września, Polska) – dodawana w niewielkich ilościach jako składnik poprawiający profil smakowy, ale również jako czynnik stabilizujący strukturę i poprawiający retencję wilgoci w produktach ekstrudowanych, charakteryzujący się odczynem obojętnym (pH wynosiło około 7,0),
- cukier (Krajowa Grupa Spożywcza S.A., Toruń, Polska) – głównie wpływa na właściwości sensoryczne produktu końcowego; ponadto sacharoza może wpływać na intensyfikację reakcji Maillarda podczas ekstruzji, co przekłada się na ciemniejszą barwę i złożony aromat produktów końcowych,
- olej roślinny (Bunge Polska Sp. z o.o., Kruszwica, Polska) – ułatwiający przepływ masy (emulgator) w cylindrze ekstrudera oraz wpływający na teksturę i smak ekstrudatów,
- soda oczyszczona (Gellwe, Zabierzów, Polska) – wpływa na stabilizację pH oraz strukturę ekstrudatów.

Każdy z zastosowanych komponentów pomocniczych stanowił 1-2% całkowitej masy mieszanki surowcowej.

3.2. Proces ekstruzji – przygotowanie mieszanek i przebieg procesu

3.2.1. Przygotowanie mieszanek surowcowych

Mieszanki przygotowano z następujących komponentów takich jak: surowce podstawowe (mąki i produkty ziemniaczane), dodatki funkcjonalne (wytloki) oraz komponenty pomocnicze. Przygotowane i odważone składniki zostały dokładnie wymieszane w celu zapewnienia jednorodnej struktury i odpowiedniej charakterystyki fizycznej, każdą mieszankę przesiewano mechanicznie za pomocą sita laboratoryjnego uzyskując granulację o średnicy nieprzekraczającej 0,5 mm. W kolejnym etapie przygotowań określono zawartość wody w mieszankach, po czym zostały one dowilżone do docelowej wilgotności wynoszącej 34%. Wartość tę ustalono na podstawie aktualnej literatury naukowej i wniosków z wcześniej realizowanych prac badawczo-rozwojowych (LIDER/29/0158/L-10/18/NCBR/2019) oraz badań wstępnych. Taki poziom dowilżenia zapewnia optymalny poziom uplastyczniania przetwarzanej gęstwy w cylindrze ekstrudera i umożliwia kontrolowane ekspandowanie produktu końcowego. Mieszanki po dowilżeniu zostały umieszczone w szczelnie zamkniętych pojemnikach w warunkach chłodniczych (4–6°C) przez 24 godziny, co umożliwiło równomierne rozłożenie wilgoci i stabilizację struktury. Zastosowanie wytłoków pozwoliło na ograniczenie dodatku wody technologicznej od 32 do 76% w zależności od ich rodzaju i ilości wprowadzonych do mieszanki surowcowej.

3.2.2. Przebieg procesu ekstruzji

Proces ekstruzji prowadzono przy wykorzystaniu ekstrudera jednoślimakowego EXP-45-32 (Zamak Mercator, Skawina, Polska) z możliwością zmiany konfiguracji układu plastyfikującego (Rys. 1).



Rys. 1. Ekstruder jednoślimakowy EXP-45-32 (Zamak Mercator, Skawina, Polska).

W badaniach zastosowano dwie konfiguracje ekstrudera, różniące się długością układu plastyfikującego, określone stosunkiem L/D (stosunek długości ślimaka do jego średnicy) wynoszącym odpowiednio 16:1 oraz 20:1 (Rys. 2). W krótszej konfiguracji (L/D=16) wykorzystano konwencjonalny ślimak o jednolitym ciągłym zwoju, typowym dla standardowego przetwarzania. Natomiast w dłuższej wersji układu (L/D=20) zastosowano ślimak z dodatkowym elementem mieszającym.



Rys. 2. Ślimaki ekstrudera dla układu plastyfikującego L/D=16 oraz 20.

Przygotowane i dowlżone do poziomu 34% mieszanki surowcowe zostały podane do cylindra ekstrudera i przetwarzane przy trzech wariantach prędkości obrotowej ślimaka 60, 80 i 100 obr/min w przypadku prac wstępnych oraz 40, 60 i 80 obr/min w kolejnych etapach badań. Proces, w zależności od zastosowanej konfiguracji ślimaka, prowadzono w układzie grzewczym dla L/D=16 składającym się z czterech stref, a dla L/D=20 z pięciu stref grzewczo-chłodzących. Szczegółowe zakresy nastaw temperaturowych w poszczególnych sekcjach przedstawiono w tabeli 1. Zastosowany profil temperaturowy został zoptymalizowany na podstawie aktualnej literatury, dotychczasowych testów prowadzonych w jednostce naukowej i własnych badań wstępnych.

Tab. 1. Nastawy temperatur w poszczególnych sekcjach ekstrudera dla układu LD=16 oraz L/D=20 (*opracowanie własne*).

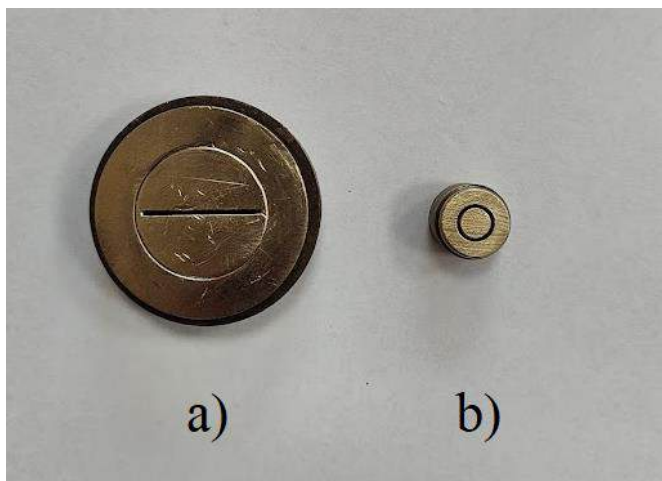
Rodzaj układu plastyfikującego	Temperatura sekcji I	Temperatura sekcji II	Temperatura sekcji III	Temperatura sekcji IV	Temperatura sekcji V
L/D=16	30°C	60°C	70°C	nie dotyczy	70°C
L/D=20	30°C	60°C	70°C	70°C	70°C

Podczas procesu ekstruzji monitorowano kluczowe parametry procesowe, takie jak rzeczywista temperatura w poszczególnych strefach cylindra, ciśnienie panujące w części uplastyczniającej oraz zapotrzebowanie energii mechanicznej. Rejestrowane wartości umożliwiły ocenę wpływu rodzaju surowców oraz konfiguracji układu plastyfikującego na przebieg procesu oraz efektywność energetyczną całego układu technologicznego.

3.2.3. Rodzaje matryc formujących i system cięcia

W zależności od etapu badań oraz planowanego kształtu produktu końcowego stosowano różne typy wkładek formujących (Rys. 3):

- dla próbek formowanych z wykorzystaniem matrycy płaskiej (Rys. 3a) zastosowano zaprojektowany i wykonany w Katedrze Inżynierii Procesowej zewnętrzny system cięcia SmartCut100L wykorzystujący rolkowy podajnik oraz układ noży umożliwiający natychmiastowe rozdzielanie masy na pojedyncze ekstrudaty o regularnym kształcie kwadratów 25×25 mm. Układ ten był zsynchronizowany z prędkością wypływu materiału z ekstrudera, co zapewniało jednorodność rozmiaru i kształtu. Zastosowanie takiego systemu cięcia wspomaganego wiatrakami chłodzącymi pozwoliło na ustabilizowanie temperatury masy, dzięki czemu uzyskiwano pellety o regularnym kształcie pozbawione uszkodzeń.
- dla próbek formowanych z użyciem wkładki pierścieniowej (Rys. 3b) stosowano matrycę o grubości szczeliny 0,6 mm, która umożliwiała wytwarzanie cylindrycznych pelletów ekstrudowanych. Dla tego rodzaju produktu, system cięcia wyposażony w nóż obrotowy z regulacją obrotów i własnym zasilaniem znajdował się bezpośrednio przy głowicy ekstrudera.



Rys. 3. Wkładki formujące: a) płaska o wymiarach szczeliny $25 \text{ mm} \times 0,6 \text{ mm}$; b) pierścieniowa o grubości szczeliny 0,6 mm.

Po zakończeniu procesu ekstruzji otrzymane produkty poddawano suszeniu w laboratoryjnej suszarni konwekcyjnej z wymuszonym obiegiem powietrza w kontrolowanej temperaturze (40°C). Taki zakres temperaturowy nie tylko minimalizuje nakłady energetyczne,

ale również zapewnia ochronę integralności strukturalnej oraz ograniczenie niekorzystnych zmian fizykochemicznych, takich jak pękanie pelletów, degradacja składników termowrażliwych czy nadmierna utrata lotnych związków aromatycznych. Po zakończeniu suszenia próbki zostały umieszczone w szczelnych, hermetycznie zamykanych pojemnikach chroniących przed wilgocią oraz ekspozycją na tlen i zanieczyszczenia zewnętrzne. Tak zabezpieczony materiał kierowano do dalszych badań.

3.3. Metodyka oceny wydajności i energochłonności procesu ekstruzji

W celu kompleksowej oceny zastosowania wyłoków roślinnych jako dodatku wzbogacającego w procesie ekstruzji pelletów przekąskowych przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych, obejmujących zarówno parametry procesu technologicznego, wybrane właściwości fizykochemiczne oraz analizę potencjału energetycznego frakcji poprodukcyjnych.

Ocena przebiegu procesu ekstruzji miała na celu określenie jego efektywności technologicznej, stanowiącej istotny wskaźnik zarówno jakości produkcji, jak i aspektów ekonomicznych oraz środowiskowych. W badaniach uwzględniono dwa kluczowe parametry: wydajność procesu (Q) oraz jednostkowe zapotrzebowanie energii mechanicznej (SME – ang. Specific Mechanical Energy).

3.3.1. Wydajność procesu ekstruzji

Wydajność procesową [**P1, P2, P3, P4, P5**] określono jako ilość materiału wytwarzaną w jednostce czasu [kg/h]. Pomiaru dokonywano w stanie ustabilizowanej pracy ekstrudera – po odpowiednim nagraniu poszczególnych sekcji oraz po fazie rozruchu – w warunkach stałego i stabilnego wypływu materiału przez matrycę. Wartość określono poprzez pomiar masy materiału wypływającego z matrycy ekstrudera w czasie 30 sekund [**P2, P3, P4, P5**] i 60 sekund [**P1**] pracy urządzenia, przy użyciu wagi laboratoryjnej DS-788 (Yakudo, Tokio, Japonia) o dokładności 0,001 kg. Wydajność procesową przeliczono zgodnie ze wzorem przedstawionym przez Matysiak i in. [2018], za końcowy wynik przyjęto średnią z trzech pomiarów:

$$Q = \frac{m}{t} \text{ [kg/h]} \quad (1)$$

gdzie:

Q – wydajność procesu ekstruzji [kg/h],

m – masa otrzymanego ekstrudatu w trakcie pomiaru [kg],

t – czas trwania pomiaru [h].

3.3.2. Energochłonność procesu ekstruzji

Energochłonność procesu ekstruzji [P1, P2, P3, P4, P5] została przedstawiona na podstawie wyliczenia wskaźnika jednostkowego zapotrzebowania energii mechanicznej. Zapotrzebowanie jednostkowe na energię mechaniczną określono na podstawie danych rejestrowanych bezpośrednio przez wbudowany system sterowania ekstrudera, przy uwzględnieniu obciążenia silnika, prędkości obrotowej oraz wydajności procesu. Parametr SME obliczono na podstawie wzoru przedstawionego przez Kręcisz [2016], za końcowy wynik przyjęto wartość średnią z trzech pomiarów:

$$SME = \frac{n}{n_m} \times \frac{O}{100} \times \frac{P}{Q} [\text{kWh/kg}] \quad (2)$$

gdzie:

SME – wskaźnik specyficznego zużycia energii mechanicznej [kWh/kg],

n – prędkość obrotowa ślimaka ekstrudera [obr/min],

n_m – znamionowa prędkość obrotowa ślimaka ekstrudera [obr/min],

O – obciążenie silnika w oparciu o moc znamionową [%],

P – moc znamionowa urządzenia [kW],

Q – wydajność procesu ekstruzji [Q].

3.4. Metodyka oceny wybranych właściwości fizykochemicznych ekstrudatów

W ramach badań przeprowadzono ocenę wybranych właściwości fizykochemicznych otrzymanych w procesie ekstruzji pelletów przekąskowych, mającą na celu określenie wpływu rodzaju oraz udziału procentowego wytlóków roślinnych, jak również parametrów procesu ekstruzji na jakość końcowego produktu. Analizy przeprowadzono dla próbek z dodatkiem wytlóków, jak również dla próbek kontrolnych niezawierających dodatku wzbogacającego.

Zakres badań obejmował wybrane właściwości fizyczne, istotne z punktu widzenia technologii ekstruzji i produkcji pelletów przekąskowych, jak i wybrane właściwości funkcjonalne świadczące o podwyższonym potencjale żywieniowym i prozdrowotnym otrzymanych ekstrudatów. Wśród parametrów fizycznych oznaczono: wskaźnik ekspandowania, odporność na uszkodzenia mechaniczne, gęstość nasypową, wskaźnik

absorpcji wody WAI (ang. Water Absorption Index) i wskaźnik rozpuszczalności w wodzie WSI (ang. Water Solubility Index).

Dodatkowo przeprowadzono ocenę potencjału antyoksydacyjnego ekstrudatów, obejmującą trzy metody uzupełniające:

- oznaczenie całkowitej zawartości związków polifenolowych (TPC) metodą Folina-Ciocalteu’a,
- ocenę zdolności zmiatania wolnych rodników z wykorzystaniem metody DPPH,
- oznaczenie zdolności redukujących jony żelaza metodą FRAP.

Wykorzystanie różnych metod analitycznych umożliwiło szczegółową charakterystykę zachodzących zmian jakościowych produktów ekstrudowanych z udziałem wyłoków roślinnych.

W ramach badań wstępnych pellety spożywcze z dodatkiem wyłoków z jabłek poddawano obróbce temperaturowej z wykorzystaniem frytownicy oraz mikrofal do ekspandowania do postaci przekąsek gotowych do spożycia.

3.4.1. Wskaźnik ekspandowania ekstrudatów spożywczych

Wskaźnik ekspandowania [P4] określa zdolność produktu ekspandowanego do zwiększania swojej objętości po opuszczeniu matrycy ekstrudera. W badaniach wyznaczono go jako stosunek grubości otrzymanych pelletów przekąskowych do grubości otworu matrycy ekstrudera. Wskaźnik ten obliczony został na podstawie wzoru przedstawionego przez Combrzyńskiego i in. [2023], za wynik końcowy przyjęto średnią z trzech pomiarów:

$$X = \frac{d}{D} [-] \quad (3)$$

gdzie:

X – współczynnik ekspandowania [-],

d – grubość pelletu przekąskowego [mm],

D – grubości matrycy ekstrudera [mm].

3.4.2. Wytrzymałość mechaniczna ekstrudatów

Wytrzymałość mechaniczna ekstrudatów [P4] została oceniona poprzez określenie ich odporności na działanie sił mechanicznych powstających podczas ruchu obrotowego, zgodnie z metodą przedstawioną przez Mitrusa i in. [2023]. Badanie przeprowadzono z wykorzystaniem aparatu typu Pfost, którego działanie opiera się na rotacyjnym przemieszczaniu próbek wewnątrz bębna o prostopadłościennym kształcie, w warunkach symulujących działania

transportowe lub magazynowe. Dla każdej grupy pelletów odważono po 100 g materiału, który następnie poddawano analizie przez 10 minut przy stałych obrotach pracy urządzenia wynoszących 50 obr/min. Po zakończeniu badania oceniano procent masy nieuszkodzonych lub niepokruszonych elementów do masy wyjściowej próbek. Pomiar wykonano w trzech niezależnych powtórzeniach, za wynik końcowy przyjęto średnią z wykonanych analiz.

3.4.3. Gęstość nasypowa

Gęstość nasypowa [P2, P3, P4, P5] pelletów została wykonana w celu określenia zależności między ich masą a objętością, co pośrednio odzwierciedla porowatość oraz strukturę wewnętrzną produktu. Parametr ten ma nie tylko istotne znaczenie przy projektowaniu i optymalizacji procesów pakowania i przechowywania, jak również podczas wytwarzania produktów końcowych w postaci przekąsek otrzymywanych w wyniku obróbki termicznej pelletów przekąskowych. Pomiar został wykonany w oparciu o określenie masy próbki wypełniającej cylindryczny pojemnik o objętości 0,001 m³. W tym celu wykorzystano wagę laboratoryjną DS-788 (Yakudo, Tokio, Japonia) wskazującą wyniki z dokładnością do 0,001 kg. Następnie gęstość nasypowa została obliczona jako stosunek masy próbki do objętości naczynia, zgodnie ze wzorem przedstawionym przez Wójtowicz i in. [2013]:

$$BD = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (4)$$

gdzie:

BD – gęstość nasypowa ekstrudatów [kg/m³],

m – masa próbki [kg],

V – objętość naczynia [m³].

Analizę przeprowadzono w trzech powtórzeniach dla każdego rodzaju pelletów, za końcowy wynik przyjęto średnią w zaokrągleniu do 0,01 kg/m³.

3.4.4. Zawartość całkowita związków polifenolowych

Całkowita zawartość związków polifenolowych TPC (ang. Total Polyphenolic Content) [P1] to analiza przeprowadzona z zastosowaniem zmodyfikowanej metody Folina-Ciocalteu'a, która została opracowana zgodnie z procedurą przedstawioną przez Kasprzak i in. [2018] uwzględniającą wspomaganie ekstrakcji ultradźwiękami. Ekstrakty wykonane ze zmielonych pelletów i ekspandowanych przekąsek zostały otrzymane poprzez zastosowanie metody ultradźwiękowej, a następnie przeprowadzono analizę fotometryczną. W tym celu zmieszano 200 µL ekstraktu z 1,8 mL wody destylowanej, a następnie dodano 200 µL odczynnika Folina-Ciocalteu'a i dokładnie wymieszano. Po odczekaniu 5 minut do mieszaniny dodano 2 mL 7%

roztworu węglanu sodu (Na_2CO_3). Tak otrzymaną mieszaninę inkubowano w temperaturze 40°C przez 60 minut. Po zakończeniu inkubacji, absorbancja została oznaczona z wykorzystaniem metody spektrofotometrycznej przy długości fali 760 nm z użyciem spektrofotometru UV-VIS (Genesys 20 UV-VIS Thermo Scientific, Waltham, MA, USA). Zawartość polifenoli wyrażono jako ekwiwalent kwasu galusowego (GAE) w przeliczeniu na gram suchej próbki (mg GAE/g d.m.). Za końcowy wynik przyjęto średnią z trzech niezależnych pomiarów.

3.4.5. Oznaczenie aktywności zmiatania wolnych rodników

Aktywność antyoksydacyjną ekstraktów [P1] określono metodą spektrofotometryczną wykorzystującą rodnik DPPH (2,2-difenylo-1-pikrylohydrazyl), zgodnie ze zmodyfikowaną procedurą przedstawioną przez Burdę i Oleszek [2001]. Metoda RSA (ang. Radical Scavenging Activity) umożliwia ocenę zdolności zmiatania wolnych rodników DPPH przez analizowaną próbkę. Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem spektrofotometru UV-VIS Genesys 20 UV-VIS (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA). Rejestracja absorbancji prowadzona była w odstępach pięciominutowych przy zastosowaniu fali o długości 517 nm, przez 30 min, w odniesieniu do próbki kontrolnej przygotowanej na bazie czystego metanolu. Wyniki wyrażono w postaci procentowej zdolności zmiatania rodników (RSA) oraz jako równoważność aktywności przeciwutleniającej TEAC (ang. Trolox Equivalent Antioxidant Capacity), w przeliczeniu na zawartość suchej masy (%). Za wynik końcowy przyjętą średnią z trzech pomiarów.

3.4.6. Oznaczenie zdolności redukowania jonów żelaza w ekstraktach

Analizę zdolności ekstraktów do redukcji jonów żelaza (III) [P1] wykonano w oparciu o metodę FRAP (ang. Ferric Reducing Antioxidant Power), zgodnie z procedurą zaprezentowaną przez Soję i in. [2023], która polega na pomiarze zdolności przeciwutleniaczy do redukcji kompleksu $\text{Fe}^3 - \text{TPTZ}$ do formy Fe^2 . Reagent FRAP przygotowano bezpośrednio przed analizą poprzez zmieszanie buforu (0,3 M, pH 3,6), roztworu chlorku żelaza (III) (0,02 M) oraz roztworu TPTZ (2,4,6-tri(2-pirydylo)-1,3,5-triazyna, 0,01 M), w stosunku objętościowym 10:1:1. Do analizy wykorzystano 500 μL ekstraktu, do którego dodawano 2,5 mL świeżo przygotowanego odczynnika FRAP. Próbki inkubowano w zamkniętych probówkach w łaźni wodnej o temperaturze 37°C przez 30 minut. Po inkubacji mierzono absorbancję przy długości fali 593 nm względem próby kontrolnej (na bazie czystego metanolu) za pomocą spektrofotometru UV-VIS Genesys 20 UV-VIS (Thermo Scientific, Waltham, MA,

USA). Za wynik końcowy przyjęto średnią z trzech pomiarów wyrażony jako wartość FRAP, czyli milimole równoważnika Troloxu na gram suchej masy próbki (mmol Trolox/g d.m.).

3.4.7. Wskaźnik absorpcji wody oraz rozpuszczalności w wodzie

Wskaźnik absorpcji wody WAI [P2, P3, P5] oznaczono zgodnie z metodyką opisaną przez Wójtowicz i Mościckiego [2014]. Parametr ten pozwala określić ilość wody, jaką może zaabsorbować produkt, co pośrednio świadczy o stopniu skleikowania skrobi oraz przetworzenia produktu. Do analizy wykorzystano zmieloną próbkę ekstrudatów w ilości 0,7 g, którą dokładnie wymieszano z 7 mL wody destylowanej. Proces mieszania prowadzono w sposób ciągły przez 20 minut, co zapewniło jednolite nawodnienie cząstek. Po zakończeniu etapu hydratacji otrzymaną zawiesinę poddano procesowi wirowania przez 10 minut z prędkością 15 000 obr/min przy wykorzystaniu wirówki laboratoryjnej Digicen 21 (Labsystem, Kraków, Polska). Tak otrzymaną klarowną ciecz (ciecz nadosadowa) odseparowano, a pozostały żel zważono za pomocą precyzyjnej wagi laboratoryjnej WPS 210/C (Radwag, Radom, Polska) z dokładnością do 0,001 g. Za wynik końcowy podano średnią wartość z trzech niezależnych pomiarów, które zostały wyliczone za pomocą wzoru:

$$WAI = \frac{m_g}{m_s} \text{ (g/g)} \quad (5)$$

gdzie:

WAI – wskaźnik absorpcji wody [g/g],

m_g – masa żelu [g],

m_s – masa suchej próbki [g].

Wskaźnik rozpuszczalności w wodzie WSI [P2, P3, P5] oznaczono na podstawie metodyki opisanej przez Wójtowicz i Mościckiego [2014]. Parametr ten pozwala na określenie ilości rozpuszczalnych w wodzie składników ekstrudatu, takich jak produkty częściowej degradacji skrobi czy białek i jest miarą intensywności przemian chemicznych zachodzących podczas procesu ekstruzji. Analizę przeprowadzono bezpośrednio po oznaczeniu wskaźnika WAI wykorzystując ciecz uzyskaną po wirowaniu próbki, którą odparowywano w laboratoryjnej suszarce konwekcyjnej SLW 53 STD (Pol-Eko Aparatura S.J., Wodzisław Śląski, Polska) w temperaturze 110°C aż do całkowitego usunięcia wody. Po zakończeniu procesu suszenia pozostałą stałą frakcję dokładnie zważono przy użyciu precyzyjnej wagi laboratoryjnej WPS 210/C (Radwag, Radom, Polska) z dokładnością do 0,001 g. Wskaźnik WSI obliczano na podstawie wzoru (6), za wynik końcowy przyjęto średnią z trzech pomiarów i wyrażono w procentach:

$$WSI = \frac{m_v - m_{dv}}{m_s} \times 100 [\%] \quad (6)$$

gdzie:

WSI – wskaźnik rozpuszczalności w wodzie [%],

m_v – masa naczynia przed procesem suszenia [g],

m_{dv} – masa naczynia po procesie suszenia [g],

m_s – masa suchej próbki [g].

3.5. Ocena potencjału biogazowego frakcji poprodukcyjnych

W kontekście dążenia do zrównoważonego rozwoju i ograniczenia marnotrawstwa zasobów istotnym elementem strategii gospodarki o obiegu zamkniętym jest odzysk energii z materiałów poprodukcyjnych, które powstają m.in. w procesie ekstruzji i zawierają znaczną ilość substancji organicznych pochodzących z komponentów roślinnych. W niniejszej części badań oceniono przydatność ekstrudatów wzbogaconych wyciekami roślinnymi jako substratów do fermentacji metanowej pod kątem wpływu na wydajność biogazu oraz zawartość metanu. Badania umożliwiły ocenę potencjału biogazowego różnych wariantów frakcji poprodukcyjnych oraz wskazanie rodzaju i stężenia wycieków szczególnie perspektywicznych dla efektywnej produkcji biogazu.

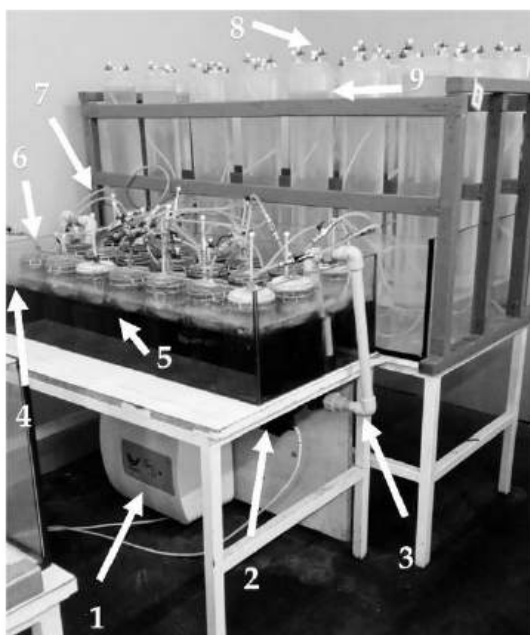
3.5.1. Określenie efektywności fermentacji beztlenowej

Proces fermentacji [P5] przeprowadzono na podstawie metodyki opracowanej przez Kupryaniuka i in. [2020] w warunkach mezofilowych (temperatura 39°C) z wykorzystaniem laboratoryjnego bioreaktora fermentacyjnego o objętości 2 dm³ (Rys. 4), umożliwiającego dokładną kontrolę kluczowych parametrów procesu tj. temperatura, pH i stężenie substratu. Do każdego reaktora wprowadzono 1187 g aktywnego inokulum, pochodzącego z funkcjonującej instalacji biogazowej, zawierającego optymalną ilość aktywnych mikroorganizmów metanogennych. Następnie wprowadzono 13 g całych ekstrudatów zawierających różne typy i poziomy udział wycieków roślinnych. Tak przygotowane reaktory szczelnie zamknięto i umieszczono w łaźni wodnej, która utrzymywała stałą temperaturę wynoszącą 39°C. Produkcja i skład ilościowy gazów fermentacyjnych był stale monitorowany w 24-godzinny cykl za pomocą analizatora gazów GA5000 (QED Environmental Systems Inc., USA). Pomiar obejmował analizę stężenia: metanu (CH₄), dwutlenku węgla (CO₂), tlenu (O₂), siarkowodoru (H₂S) oraz amoniaku (NH₃), a ciśnienia gazu mieściły się w zakresie od 4,182 do 4,927 kPa.

Proces fermentacji trwał do momentu, gdy dobowy przyrost objętości biogazu spadł poniżej 1%. Uzyskane dane przeanalizowano i przeliczono na jednostki:

- świeżej masy substratu - CBPFM (ang. Cumulative Methane Production in m^3 per Mg of Fresh Mass), CMPFM (ang. Cumulative Biogas Production in m^3 per Mg of Fresh Mass),
- suchej masy- CBPDM - (ang. Cumulative Methane Production in m^3 per Mg of Dry Mass), CMPDM- (ang. Cumulative Biogas Production in m^3 per Mg of Dry Mass),
- suchej masy organicznej - CBPDOM (ang. Cumulative Methane Production in m^3 per Mg of Dry Organic Matter, CMPDOM (ang. Cumulative Biogas Production in m^3 per Mg of Dry Organic Matter).

Ostateczne wyniki zostały przedstawione jako średnia z dwóch powtórzeń udziału procentowego metanu w biogazie stanowiący kluczowy wskaźnik jakości gazu fermentacyjnego. Całe badanie zostało przeprowadzone zgodnie z normą DIN 38 414/S8.



Rys. 4. Budowa biofermentora produkującego biogaz [P5-Fig. 3]: 1 – podgrzewacz wody z regulatorem temperatury, 2 – pompa wodna, 3 – izolowane przewody cieczy grzewczej, 4 – płaszcz wodny, 5 – fermentor o pojemności wsadu 2 dm^3 , 6 – rury do pobierania próbek, 7 – rura transportująca biogaz, 8 – zawór do pobierania próbek gazu i 9 – zbiornik objętościowy biogazu.

3.6. Analiza statystyczna wyników

W celu kompleksowej interpretacji otrzymanych wyników wykorzystano metody statystyczne umożliwiające ocenę istotności różnic między badanymi próbkami oraz zidentyfikowanie zależności między analizowanymi parametrami.

3.6.1. Macierz korelacji Pearsona

Identyfikację zależności pomiędzy analizowanymi wartościami przeprowadzono z wykorzystaniem współczynnika korelacji Pearsona [P1], przyjmując poziom ufności wynoszący 95%. Obliczenia przeprowadzono z użyciem oprogramowania Statistica 13.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA), co pozwoliło na określenie siły powiązań między wynikami oraz ocenę ich istotności.

3.6.2. Jednoczynnikowa ANOVA - test post hoc - test Tukeya

Zgromadzone wyniki poddano jednoczynnikowej analizie wariancji (ANOVA) [P5] z wykorzystaniem pakietu Statistica w wersji 13.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA). W celu określenia istotności różnic pomiędzy wartościami średnimi zastosowano test post hoc Tukeya, przyjmując poziom istotności statystycznej $\alpha = 0,05$.

3.6.3. Metoda powierzchni odpowiedzi RSM

Do opracowania wyników z przebiegu procesu ekstruzji oraz wybranych właściwości fizycznych ekstrudatów przeprowadzono analizę statystyczną wykorzystującą metodę powierzchni odpowiedzi RSM (ang. Response Surface Methodology) [P2, P3, P4], dopasowując wielomianowe modele regresyjne, w których zmiennymi niezależnymi były prędkość obrotowa ślimaka (SS) oraz udział procentowy wytlóków w recepturze (%). Na podstawie uzyskanych danych uzyskano równania kwadratowe opisujące badane właściwości w zależności od zastosowanych parametrów procesu. Dodatkowo wyznaczono współczynniki determinacji (R^2), pozwalające na ocenę stopnia dopasowania modeli do analizowanych danych.

3.6.4. Analiza głównych składowych

Analiza głównych składowych PCA (ang. Principal Component Analysis) [P1, P2, P4, P5] została przeprowadzona z wykorzystaniem oprogramowania Statistica w wersji 12.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA). Zastosowanie metody PCA umożliwiło identyfikację

zależności między badanymi parametrami oraz ograniczenie liczby zmiennych opisujących próbki. Dane wejściowe zostały automatycznie przeskalowane w celu zapewnienia porównywalności poszczególnych cech. Liczbę głównych składowych w każdym przypadku ustalono na podstawie kryterium Catella, co pozwoliło wyodrębnić te komponenty, które w największym stopniu wyjaśniały zmienność analizowanych danych.

4. OMÓWIENIE WYNIKÓW

Rosnące zainteresowanie wykorzystaniem surowców ubocznych pochodzących z branży rolno-spożywczej charakteryzujących się wysokim potencjałem technologicznym, żywieniowym i funkcjonalnym, wynika zarówno z potrzeby racjonalnego gospodarowania zasobami, jak i dążenia do zwiększenia wartości dodanej produktów. Do tego rodzaju komponentów należą m.in. wytloki roślinne, będące źródłem błonnika pokarmowego, związków polifenolowych oraz innych składników bioaktywnych, które mogą istotnie wpłynąć na wzrost wartości odżywczej żywności [Naseem i in. 2024; Raczkowska i Sarek, 2024]. Włączenie ich do mieszanek recepturowych daje możliwość otrzymania wyrobów o unikalnych właściwościach funkcjonalnych mających pozytywny wpływ na przebieg procesu ekstruzji przy jednoczesnym wpisaniu się w aktualne trendy technologiczne oraz koncepcję zrównoważonej produkcji żywności [Witeczak i in. 2025].

Badania wstępne [P1] miały na celu określenie potencjału zastosowania wytlóków owocowych po tłoczeniu soku jako dodatku wzbogacającego w procesie wytwarzania nowej gamy ekstrudatów na bazie mieszanki pszenno-kukurydzianej. Realizacja tego etapu badań podyktowana była koniecznością przetestowania założeń koncepcyjno-technologicznych w warunkach obróbki barotermicznej ze szczególnym uwzględnieniem wyższych temperatur, które wymagane są dla ekstruzji pelletów przekąskowych wytwarzanych na bazie mieszanek pszenno-kukurydzianych.

Na tym etapie badań zdecydowano się na użycie jednego dodatku roślinnego – świeżych, rozdrobnionych wtlóków jabłkowych. Ograniczenie liczby zmiennych w etapie wstępnym miało na celu sprawdzenie, jak przebiegać będzie proces przy różnej prędkości obrotowej ślimaka ekstrudera i jaki wpływ na ten przebieg będą miały różne poziomy dodatku wtlóków jabłkowych. Dodatkowo, oprócz procesu, analizie poddano także właściwości antyoksydacyjne gotowych produktów – pelletów przekąskowych. Badania te wykonano w celu wykazania, że istnieje potencjał funkcjonalny zastosowania dodatku wtlóków roślinnych w produkcji ekstrudowanych pelletów przekąskowych. Pozytywny wynik z przeprowadzonych analiz pozwolił na podjęcie decyzji o poszerzeniu w kolejnych badaniach zakresu dodatków wzbogacających o inne rodzaje wtlóków. Dodatkowo, przeprowadzone studia literaturowe wskazały, iż zdecydowanie korzystniejszym wyborem bazy skrobiowej będzie mieszanka surowcowa zawierająca surowce ziemniaczane. Komponenty ziemniaczane w procesie ekstruzji są przetwarzane w niższych temperaturach, co tym samym może pozytywnie wpływać na mniejszą degradację składników bioaktywnych, polifenoli czy

witamin co przekłada się na zwiększenie potencjał funkcjonalnego gotowych wyrobów i mniejsze nakłady energetyczne podczas przetwórstwa [Chen i in. 2017; Mironeasa i in. 2023; Zarski i in. 2021].

W ramach pracy **P1** do mieszanek dodano wytloki jablkowe w trzech wariantach udziału masowego: 10, 20 i 30%. Dodatkowo przygotowano próbke referencyjną bez dodatku wylotków. Surowiec pozyskano bezposrednio po procesie tlócenia soku od lokalnego producenta, zapakowano próżniowo i przechowywano w warunkach chłodniczych do momentu przygotowywania mieszanki surowcowej. W pracy [**P1-Tab. 1**] przedstawiono szczególowy sklad recepturowy mieszanek surowcowych, obejmujacy surowce podstawowe (maka pszenna, maka kukurydziana), surowce dodatkowe (sól i soda) oraz dodatek w postaci wylotków jablkowych w określonych udziałach procentowych. Przed przeprowadzeniem prób surowiec zostal rozdrobiony, wymieszany i przesiany do granulacji 0,5 mm oraz dowilżony do 34% wilgotności, co zapewnilo jednorodność mieszanek.

Proces ekstruzji prowadzono w zakresie temperatury od 50 do 105°C, co umozliwilo stabilizację przebiegu zarówno samego procesu, jak i otrzymanego produktu. Analizowano wydajność procesu ekstruzji oraz jednostkowe zapotrzebowanie energii mechanicznej podczas przetwarzania mieszanek przy różnych prędkościach obrotowych ślimaka (60, 80 i 100 obr/min). Wyniki tych oznaczeń przedstawiono na rysunkach w pracy **P1** [**Fig. 1, Fig. 2**]. Wydajność procesu ekstruzji mieszanek z dodatkiem wylotków jablkowych mieściła się w przedziale 19,20–32,88 kg/h, co wskazuje na zróżnicowany charakter tego parametru. Najwyższe wartości wydajności zarejestrowano dla próbek kontrolnych. W grupie mieszanek z dodatkiem wylotków najwyższe wartości wydajności uzyskiwano przy najwyższej zastosowanej prędkości obrotowej ślimaka ekstrudera oraz najwyższym udziale dodatku wzbogacającego w postaci wylotków jablkowych. Z kolei najniższą wydajność zarejestrowano podczas wytwarzania pelletów z większym udziałem masowym wylotków przetwarzanych przy prędkości obrotowej 60 obr/min. Wyniki te sugerują, że zarówno dobór parametrów pracy ekstrudera, jak i proporcje surowców w mieszance recepturowej odgrywają istotną rolę w optymalizacji procesu. Analiza uzyskanych danych wskazuje, że kluczowym czynnikiem determinującym wydajność procesu była prędkość obrotowa ślimaka – jej zwiększanie skutkowało wyraźnym wzrostem efektywności. W badaniach prowadzonych przez Matysiaka i in. [2018] również zaobserwowano najwyższą wydajność przy maksymalnej prędkości obrotowej ślimaka, wskazując, że optymalna wilgotność surowca wynosząca 34% sprzyja uzyskaniu najlepszych rezultatów w porównaniu z innymi poziomami dowilżenia mieszanek. Lisiecka i Wójtowicz [2020], stwierdziły, że zwiększanie ilości dodatków roślinnych może

prorowadzić do ograniczenia wydajności. Taką zależność potwierdzają również niniejsze badania, gdzie wykazano, że przy zastosowaniu dodatku 20% wytlóków jablkowych w połączeniu z najniższą zastosowaną prędkością obrotową ślimaka (60 obr/min) uzyskiwano najniższą wydajność procesu ekstruzji.

W przeprowadzonych badaniach wstępnych [P1] wykazano, że jednostkowe zapotrzebowanie energii mechanicznej (SME) w procesie ekstruzji mieszanek z dodatkiem wytlóków jablkowych podlegało wyraźnym zmianom w zależności od zastosowanych parametrów technologicznych oraz udziału tego komponentu funkcjonalnego w recepturze. Mieszanki z wyższym udziałem wytlóków oraz wytwarzane przy wyższej prędkości obrotowej ślimaka wykazywały niższe zapotrzebowanie na energię, natomiast mieszanki z niższą zawartością surowca roślinnego, przetwarzane przy wolniejszych obrotach generowały wyższe SME. Otrzymane wyniki pokazują, że kluczowym czynnikiem determinującym zapotrzebowanie na energię była prędkość obrotowa ślimaka – jej zwiększanie powodowało istotny spadek wartości tego wskaźnika. Wpływ dodatku wytlóków roślinnych na wartość wskaźnika SME był również istotny jak parametry pracy ekstrudera, gdyż zwiększanie udziału surowca roślinnego prowadziło do stopniowej redukcji zapotrzebowania jednostkowego energii. Zależność ta pozostaje zgodna z obserwacjami Lisieckiej i Wójtowicz [2019] dla ekstrudatów z dodatkiem świeżej marchwi. W analizowanych próbach efekt obniżania wartości SME przy wyższych prędkościach obrotowych ślimaka ekstrudera można tłumaczyć jednoczesnym działaniem takich czynników jak zastosowanie optymalnej wilgotności oraz strukturą i właściwościami fizykochemicznymi wytlóków, które w połączeniu ze stopniowym wzrostem temperatury w poszczególnych sekcjach wpływają na zmniejszenie lepkości przetwarzanej mieszanki i umożliwiają łatwiejszy przepływ masy. W konsekwencji proces wymagał mniejszego nakładu energii mechanicznej, co potwierdzają również wyniki Munazaha i in. [2018].

W trakcie procesu ekstruzji w mieszkankach z dodatkiem wytlóków odnotowano stabilny rozkład temperatur w poszczególnych sekcjach cylindra ekstrudera, mieszczący się w zakresie średnich wartości typowych dla tego typu procesu mieszający się w przedziale 50-105°C [Combrzyński i in. 2023]. Najwyższe temperatury zarejestrowano w piątej sekcji ekstrudera, w której następowało uplastycznienie i kompresja materiału przed jego formowaniem w matrycy, osiągając tym samym maksymalnie 94,2°C [P1-Tab. 4]. Utrzymanie takich warunków temperaturowych sprzyjało uzyskaniu jednnorodnej masy pozbawionej oznak przypalenia czy uszkodzenia struktury po opuszczeniu matrycy. Profil temperaturowy w całym cylindrze charakteryzował się zgodnością z ustawieniami zadanymi na początku procesu:

sekcja dozowania – 75 do 80°C, sekcja uplastycznienia – 85 do 95°C, sekcja chłodzenia – 50 do 60°C, matryca formująca – 65 do 75°C, co świadczyło o stabilnym przebiegu ekstruzji. Zastosowane zakresy temperatur zapewniły równomierny transport surowca przez cylinder oraz odpowiednie warunki do jego uplastycznienia, a jednocześnie pozwoliły uniknąć degradacji termicznej. Podobny rozkład temperatur, zbliżony do wartości uzyskanych podczas przebiegu procesu, zaobserwowali Lisiecka i in. [2021] podczas analizy wpływu dodatku świeżej marchwi na przebieg procesu ekstruzji i właściwości fizykochemicznych ziemniaczanych pelletów przekąskowych, gdzie zakres temperatur w sekcjach cylindra wynosił 50–105°C.

Zawartość całkowita związków polifenolowych w otrzymanych pelletach przekąskowych oznaczona metodą Folina-Ciocalteu (F-C) wykazała wyraźną tendencję wzrostową zawartości polifenoli wraz ze zwiększaniem udziału dodatku wzbogacającego [**P1-Tab. 6**]. Najwyższą zawartość polifenoli stwierdzono w świeżych wytlókach wynoszącą 0,31 mg GAE/g, natomiast najmniejszą w pelletach bez dodatku wytlóków, niezależnie od parametrów ekstruzji i metody obróbki końcowej. Uzyskane wyniki wskazują, że w badanych próbkach półproduktów (pellety) oraz wyrobów gotowych (przekąski ekspandowane) obserwowano tendencję wzrostową wraz ze zwiększaniem dodatku wytlóków jabłkowych. Najwyższe wartości TPC stwierdzono w wariantach z 30% udziałem wytlóków, niezależnie od zastosowanej prędkości obrotowej ślimaka oraz zastosowanej metody ekspandowania. Otrzymane wyniki dowodzą, że proces ekstruzji prowadzony w wysokiej temperaturze i przy podwyższonym ciśnieniu nie powodował degradacji związków polifenolowych, a wręcz sprzyjał zwiększeniu ich zawartości proporcjonalnie do ilości wytlóków w mieszance. Wynika to z faktu, że polifenole w surowcach roślinnych występują głównie w postaci związanej jako składniki ligniny, tanin, estrów czy glikozydów, a odpowiednio dobrane warunki ekstruzji mogą prowadzić do ich uwolnienia z wiązań chemicznych bez dezaktywacji aglikonów [Khanal i in. 2009; Neves i in. 2021; Schmid i in. 2020]. W swoich badaniach Alonso i in. [2000] podają, że kluczowymi czynnikami modyfikującymi strukturę surowca w procesie ekstruzji są wysoka temperatura oraz siły ścinające, których wartości rosną wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej ślimaka. Efektem jest zwiększenie udziału związków o mniejszej masie cząsteczkowej oraz uwolnienie niektórych biologicznie aktywnych monomerów i dimerów z polimerowych łańcuchów polifenoli. Mechanizm ten potwierdzają również badania Kasprzak-Drozd i in. [2022], wskazując na istotny wpływ rozbicia sztywnej struktury tkanek roślinnych przez działanie temperatury i ciśnienia.

Dodatkowym celem badań wstępnych była ocena wpływu sposobu przygotowania przekąsek z pelletów ekstrudowanych na zawartość związków fenolowych. Na podstawie

zrealizowanych badań stwierdzono, że otrzymywanie przekąsek w kuchence mikrofalowej przy mocy 800 W i czasie 30 sekund pozwoliło uzyskać wyższy poziom tych związków przy takim samym udziale dodatku i prędkości obrotowej ślimaka ekstrudera w porównaniu do pelletów poddawanych procesowi ekspandowania poprzez obróbkę termiczną (180°C) w tłuszczu roślinnym. Najmniejszą zawartość związków fenolowych odnotowano w półprodukcie (pelletach). Obie metody obróbki, zarówno mikrofalowa, jak i smażenie, korzystnie wpływały na uwalnianie polifenoli z ich naturalnych kompleksów w matrycy roślinnej, co skutkowało ich wyższą zawartością w produkcie końcowym niż w półprodukcie. Literatura podkreśla, że procesy cieplne mogą mieć niekorzystny wpływ na związki bioaktywne, szczególnie te rozpuszczalne w wodzie [Ramírez-Anaya i in. 2015]. Niemniej jednak, w przypadku technologii wykorzystujących medium niepolarne tj. olej, w procesie smażenia możliwe jest zwiększenie biodostępności składników oraz realny, korzystny wpływ na teksturę produktu [Szponar i in. 2018]. Co więcej, podczas smażenia może zachodzić proces przenikania do produktu części związków fenolowych obecnych w tłuszczu roślinnym [Ramírez-Anaya i in. 2015; Ramírez-Anaya i in. 2019]. Wzrost dostępności fenoli może być też efektem pęknięcia i zmiękczenia ścian komórkowych pod wpływem obróbki cieplnej. Należy jednak zaznaczyć, że metoda smażenia wiąże się z większym wchłanianiem tłuszczu, co znacznie podnosi kaloryczność produktu, a nadmierna obróbka termiczna może sprzyjać powstawaniu niekorzystnych zmian oksydacyjnych i hydrolitycznych w tłuszczu. W przeciwieństwie do tego ekspandowanie w mikrofalach umożliwia uzyskanie produktu o porównywalnych, a często nawet korzystniejszych cechach sensorycznych (niższa zawartość tłuszczu i większa ilość związków polifenolowych).

Kolejnym etapem badań [P1] była analiza właściwości przeciwutleniających w odniesieniu do zdolności zmiatania wolnych stabilnych rodników DPPH. Stwierdzono, że dodatek wyłoków wyraźnie zwiększał aktywność antyoksydacyjną w tym zakresie, niezależnie od zastosowanej prędkości ślimaka, metody ekspandowania pelletów czy też ich formy w postaci niewyeksponowanej [P1-Tab. 7]. Zaobserwowano jednoznaczny związek między udziałem dodatku wzbogacającego a potencjałem antyoksydacyjnym produktów. Istotny wpływ na zdolność zmiatania rodnika DPPH miała metoda ekspandowania pelletów. Produkty otrzymane metodą mikrofalową charakteryzowały się wyraźnie wyższą aktywnością antyoksydacyjną w porównaniu do pelletów, a także do przekąsek smażonych w głębokim tłuszczu. Wyniki z przeprowadzonych badań wstępnych potwierdzają, że zastosowanie metody mikrofalowej sprzyja lepszemu zachowaniu lub uwolnieniu aktywnych związków fenolowych w porównaniu z tradycyjnym smażeniem, gdzie często dochodzi do degradacji naturalnych

antyoksydantów. We wcześniejszych pracach naukowych wykazywano, że procesy technologiczne prowadzą do obniżenia zawartości i aktywności związków przeciwutleniających [Wu i in. 2024; Polak i in. 2024]. Wyniki dowodzą jednak, że wpływ obróbki na potencjał antyoksydacyjny żywności jest bardziej złożony i nie zawsze jednoznacznie negatywny [Gumul i in. 2005]. Obniżenie zawartości niektórych związków bioaktywnych może być bowiem kompensowane przez zwiększoną biodostępność pozostałych składników, a tym samym prowadzić do ogólnej poprawy aktywności antyoksydacyjnej produktu. Należy podkreślić, że zdolność zmiatania rodnika DPPH zależy nie tylko od ilości polifenoli, ale także od struktury chemicznej tych związków, zwłaszcza od liczby grup hydroksylowych (–OH) w cząsteczce.

W celu potwierdzenia właściwości przeciwutleniających badanych próbek oznaczono także ich zdolność redukcyjną metodą FRAP. Analiza polegała na ocenie zdolności ekstraktów do redukcji żelaza Fe^{3+} –TPTZ (iron-2,4,6-tripirydył-s-triazine complex) do formy Fe^{2+} –TPTZ. Otrzymane rezultaty były spójne z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu metody DPPH, zgodnie z którymi zwiększanie udziału wyłoków jabłkowych w recepturze prowadziło do zwiększenia aktywności antyoksydacyjnej oznaczonej tym testem [**P1-Tab 7**]. W literaturze wielokrotnie podkreślano, że aktywność przeciwutleniająca produktów spożywczych dodatnio koreluje z ilością polifenoli, przy czym aglikony wykazują silniejsze działanie antyoksydacyjne niż ich formy związane [Ramírez-Anaya i in. 2015]. Podobne zależności zaobserwowano także w badaniach nad innymi surowcami roślinnymi. Wykazano, że proces smażenia ziemniaków prowadził do wyraźnego wzrostu zdolności zmiatania wolnych rodników [Bellail i in. 2012], a w przypadku dyni zastosowanie obróbki termicznej pozytywnie wpływało na zwiększenie aktywności antyoksydacyjnej, która została oznaczona metodą FRAP.

Otrzymane wyniki dowodzą, że zarówno stężenie dodatku wyłoków jabłkowych, jak i metoda ekspandowania, mają kluczowe znaczenie dla kształtowania właściwości przeciwutleniających przekąsek. Co istotne, niezależnie od zastosowanej metody (DPPH czy FRAP), aktywność antyoksydacyjna wykazywała dodatnią i silną korelację z zawartością polifenoli w produktach [**P1-Tab. 8**]. Analiza PCA wykazała, iż największe znaczenie dla poprawy cech bioaktywnych ekstraktów miał dodatek wyłoków jabłkowych na poziomie 30%, przy czym nie powodował on większych zmian w parametrach procesowych.

Zmiana mieszanek pszenno-kukurydzianych [**P1**] na surowce bazujące na przetworach ziemniaczanych [**P2, P3, P4 i P5**] była związana z obniżeniem temperatury przetwarzania, co ograniczało degradację związków fenolowych oraz wpłynęło na zmniejszenie zapotrzebowania

na energię przez ekstruder. Zmiana ta umożliwiła uzyskanie bezglutenowych produktów dostępnych dla szerszej grupy odbiorców. Dodatkowo, w celu zmniejszenia energochłonności procesu oraz zapobiegnięcia pogorszeniu jakości ekstrudatów, badania prowadzono przy prędkości obrotowej ślimaka wynoszący 40, 60 i 80 obr/min. Takie podejście pozwoliło uzyskać bardziej jednolite produkty oraz zachować stabilność procesu ekstruzji [Combrzyński i in. 2023; Combrzyński i in. 2025; Jin i in. 2020; Šárka i in. 2021].

W pracy **P2** skoncentrowano się na porównaniu wpływu dwóch układów plastyfikujących ekstrudera ($L/D=16$ oraz $L/D=20$) wyposażonego w matrycę pierścieniową na przebieg procesu ekstruzji oraz wybrane właściwości fizyczne ekstrudatów wzbogaconych wyciekami z nasion roślin oleistych, tj. czarnuszki i siemienia lnianego. Otrzymane pellety przekąskowe charakteryzowały się pierścieniowym kształtem (Rys. 5). Zastosowanie dwóch układów plastyfikujących pozwoliło ocenić, w jakim stopniu konfiguracja ekstrudera wpływa na stabilność procesu, zapotrzebowanie energetyczne i jakość otrzymanych ekstrudatów z dodatkiem wycieków roślinnych, a także zweryfikować wyniki otrzymane w poprzednich etapach badań. Ponadto, kontrolowano stabilność temperatur w poszczególnych sekcjach ekstrudera, co stanowiło istotne informacje w kontekście zapotrzebowania procesu produkcyjnego na energię [**P2-Tab. 2**].



Rys. 5. Pellety przekąskowe otrzymane przy zastosowaniu pierścieniowej matrycy formującej (próba kontrolna).

Wydajność procesu ekstruzji [**P2-Fig. 1**] była ściśle uzależniona od prędkości obrotowej ślimaka oraz od długości układu plastyfikującego. Dla mieszanek kontrolnych wydajność zwiększała się wraz ze zwiększaniem obrotów ślimaka ekstrudera, przy czym zastosowanie krótszego układu ($L/D=16$) skutkowało osiągnięciem wyższych wartości przy maksymalnej

prędkości obrotowej ślimaka (80 obr/min) na poziomie 18,92 kg/h niż w przypadku dłuższego układu $L/D=20$ (14,36 kg/h). Wprowadzenie do mieszanki surowcowej wytlóków z nasion czarnuszki nasiliło tę tendencję. Przy 30% dodatku i zastosowaniu 80 obr/min zaobserwowano wydajność wynoszącą 23,0 kg/h ($L/D=16$), podczas gdy dla układu $L/D=20$ uzyskano wartość 16,32 kg/h. Wskazuje to, że krótszy cylinder oraz zastosowanie wkładki pierścieniowej zapewniają wyższą przepustowość materiału zawierającego podwyższoną ilość włókna i tłuszczu. Z kolei w przypadku mieszanki z wytlókami z siemienia lnianego obserwowano porównywalne wartości, przy czym udział 30% dodatku w mieszance przetwarzanej z zastosowaniem dłuższego układu i 80 obr/min skutkował uzyskaniem wydajności na poziomie 21,2 kg/h, co potwierdza korzystne właściwości przetwórcze tej kompozycji. Wyniki te są zgodne z obserwacjami Lewko i in. [2024], którzy stwierdzili niższe wydajności procesu ekstruzji mąki pszennej dla dłuższego układu plastyfikującego ekstrudera jednoślakowego względem krótszego L/D . Może to wskazywać, iż w przypadku produktów na bazie produktów zbożowych korzystniejsze są krótsze układy, zapewniające sprawniejszy przepływ materiału i większą stabilność procesu. Zwiększanie wydajności wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej ślimaka zostało również zaobserwowane w badaniach Lisieckiej i in. [2020] wskazując, że zależność ta związana jest z poprawą dynamiki przepływu materiału i zmniejszeniem oporów przetwarzanej gęstwy w cylindrze ekstrudera.

Analiza zapotrzebowania energii jednostkowej (SME) wykazała wyraźnie różnice między typami zastosowanych w mieszankach surowcowych wytlóków [P2-Fig. 2]. Podczas przetwarzania mieszanek zawierających wytloki z nasion czarnuszki zaobserwowano różnice w zapotrzebowaniu na energię. Przetwarzanie mieszanki zawierającej 10% wytlóków z nasion czarnuszki przy 40 obr/min powodowało zużycie energii w wysokości 0,099 kWh/kg, co wskazuje na znaczne opory przepływu w dłuższym układzie $L/D=20$. Jednocześnie, dodatek 30% wytlóków z nasion czarnuszki i zastosowanie prędkości ślimaka ekstrudera wynoszącej 80 obr/min powodowały zmniejszenie zapotrzebowania energii do 0,022 kWh/kg. Wynik ten wskazuje, że wyższa prędkość obrotowa ślimaka skraca czas przebywania materiału w cylindrze i redukuje opory odpowiedzialne za wzrost zapotrzebowania energii. W przypadku mieszanki z wytlókami z nasion siemienia lnianego uzyskano niższe wartości zapotrzebowania na energię, ponadto wykazano mniejszą zależność SME od układu plastyfikującego i udziału dodatku. Świadczy to o niższych oporach przepływu tej mieszanki podczas ekstruzji, a w konsekwencji powoduje mniejsze SME. Podobne zależności związane ze zmiennością zapotrzebowania energii podczas procesu ekstruzji, wynikające z zastosowanych parametrów procesu i ilości zastosowanego dodatku, zostały również zaobserwowane w badaniach

Kantronga i in. [2018], którzy analizowali efektywność energetyczną procesu ekstruzji prozdrowotnych przekąsek ekstrudowanych na bazie mąki ryżowej wzbogaconych boczniakami.

Gęstość nasypowa pelletów spożywczych wytwarzanych na dwóch wersjach ekstrudera zależała zarówno od rodzaju dodatku, jak i prędkości obrotowej ślimaka [P2-Fig. 3]. W przypadku mieszanki z dodatkiem wyłoków z nasion czarnuszki zaobserwowano istotne wahania – przy 20% dodatku wartości gęstości nasypowej obniżały się poniżej wartości uzyskanej dla próbki kontrolnej i wynosiły nawet $379,5 \text{ kg/m}^3$ ($L/D=16$) oraz $399,9 \text{ kg/m}^3$ ($L/D=20$), co sugeruje powstanie lepiej wyekspandowanej struktury. Z kolei przy 10 i 30% dodatku otrzymano produkt o słabiej wyekspandowanej strukturze. Przy 10% dodatku wyłoków z nasion czarnuszki zaobserwowano najwyższe wartości gęstości nasypowej, wynoszące nawet $425,49 \text{ kg/m}^3$ dla ekstrudatów otrzymanych przy wykorzystaniu dłuższego układu plastyfikującego ($L/D=20$). Dla pelletów z 30% dodatkiem wyłoków z siemienia lnianego zaobserwowano spadek gęstości, co świadczy o stabilizacji procesu. Gęstość nasypowa ekstrudatów z dodatkiem wyłoków z siemienia lnianego osiągnęła wartość wynoszącą nawet do $459,5 \text{ kg/m}^3$ ($L/D=20$) przy 30% dodatku i maksymalnej prędkości obrotowej ślimaka, co dowodzi dużej zdolności do tworzenia zwartej struktury. Analiza ta pokazuje, że zastosowanie dłuższego układu plastyfikującego sprzyja uzyskiwaniu wyższych wartości gęstości nasypowej, co wskazuje na mniejszy stopień ekspandowania oraz większy ciężar jednostkowy wynikający z większej liczby pelletów przekąskowych w tej samej objętości.

Wskaźniki absorpcji wody (WAI) oraz rozpuszczalności w wodzie (WSI) pelletów spożywczych wykazywały istotne różnice w zależności od zastosowanych dodatków. Najniższy dodatek wyłoków z nasion czarnuszki (10%) zwiększał wartość WAI, jednak przy 20 i 30% dodatku wodochłonność gwałtownie się obniżała ($<2,5 \text{ g/g}$). W przypadku użycia wyłoków z siemienia lnianego zaobserwowano stabilne obniżanie się WAI wraz z procentowym zwiększaniem zawartości dodatku w mieszance surowcowej, co potwierdza wcześniejsze obserwacje Drożdż i in. [2019] oraz Wójtowicz i in. [2023], gdzie zwiększanie ilości aronii w mieszance obniżało zdolność do wiązania wody. W przypadku wskaźnika WSI dodatek wyłoków z nasion czarnuszki (20 i 30%) powodował wyraźne zwiększenie wartości wskaźnika rozpuszczalności sięgające nawet 10-11%. W próbkach wzbogaconych wyłokami z siemienia lnianego zaobserwowano mniejszy wpływ tego dodatku na badaną zmienną, a uzyskane wartości wykazywały większą zależność od prędkości obrotowej ślimaka i długości układu plastyfikującego. Dla konfiguracji ekstrudera $L/D=20$ otrzymano niższe wartości przy

wysokich obrotach, co wskazuje, że wydłużony czas przebywania materiału może ograniczyć zdolność rozpuszczania składników [Combrzyński i in. 2023; Lisiecka i Wójtowicz 2021b].

W pracy **P3** zakres badań prezentowanych pracy **P2** rozszerzono o wyłoki jabłkowe, aroniowe i dyniowe charakteryzujące się odmiennym składem chemicznym, który w odmienny sposób może oddziaływać na przebieg procesu ekstruzji i wybrane właściwości fizyczne ekstrudatów. Zastosowanie analogicznych rozwiązań procesowych oraz matrycy formującej pozwoliło na bezpośrednie porównanie rezultatów uzyskanych dla innej grupy surowców oraz ocenę, w jakim stopniu rodzaj wybranych wyłoków roślinnych wpływa na badane parametry oraz zmiany temperatur w poszczególnych sekcjach ekstrudera [**P3-Tab. 2, Tab. 3**].

Analiza rezultatów wydajności procesu ekstruzji pelletów z dodatkiem wyłoków jabłkowych wykazała, że przy 10% koncentracji oba układy L/D charakteryzowały się oczekiwanym przebiegiem - wydajność była wyższa wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej ślimaka, jednak pozostawała niższa niż w próbkach kontrolnych. Jednak przy 20% dodatku zaobserwowano podwyższoną wydajność ekstruzji dla układu L/D=20 przy prędkości obrotowej 40 obr/min wynoszącą 24,0 kg/h – była to najwyższa wartość spośród wszystkich ekstrudowanych próbek. Przy najwyższym zastosowanym dodatku wyłoków jabłkowych najwyższą wydajność wynoszącą 19,2 kg/h otrzymano przy wykorzystaniu układu L/D=16, natomiast dla wersji L/D=20 obserwowano obniżenie wydajności procesu do 15,84 kg/h. W przypadku zastosowania w recepturze pelletów wyłoków z aronii 10% dodatek skutkowało wyraźnym obniżeniem wydajności, szczególnie dla układu L/D=16, gdzie wartości mieściły się w zakresie 6,96-16,80 kg/h. Najkorzystniejsze rezultaty uzyskano przy 20% udziale wyłoków z aronii, osiągając 19,44 kg/h (80 obr/min, L/D=16). Przy 30% udziale dodatku w recepturze pelletów spożywczych zaobserwowano obniżenie wydajności dla krótszego układu (9,12 kg/h), natomiast zastosowanie dłuższej wersji ślimaka pozwoliło uzyskać wartość sięgającą 17,04 kg/h. Wynik ten sugeruje, że przy podwyższonej ilości dodatku wyłoków w mieszance dłuższy układ plastyfikujący L/D=20 łatwiej przetwarza mieszkę bogatą w polifenole i błonnik [Combrzyński i in. 2025]. Dodatek wyłoków z dyni do mieszanki surowcowej powodował stabilniejszy przebieg procesu ekstruzji. W każdym wariancie układ L/D=16 zapewniał wyższe i bardziej regularne wydajności, nawet do 19,44 kg/h przy 30% dodatku i prędkości obrotowej 80 obr/min. Z kolei przy zastosowaniu układu plastyfikującego L/D=20 wydajność była wyraźnie niższa, uzyskując wartość 14,88 kg/h. Badania te dowodzą, że mieszanki surowcowe z dodatkiem wyłoków z dyni pod wpływem działania podwyższonej temperatury i intensywnych oddziaływań mechanicznych ulegają homogenizacji. Dzięki temu wpływają korzystnie na proces ekstruzji, który zachodzi w sposób bardziej stabilny [Atencio i in. 2021].

Uzyskane rezultaty potwierdzają, że pomimo iż układ plastyfikujący ma duży wpływ na efektywność procesu przetwarzania mieszanki surowcowej z wykorzystaniem ekstrudera, to rodzaj, jak i ilość dodatku roślinnego kształtują parametry procesu [Lisiecka i in. 2021c; Lisiecka i Wójtowicz 2019].

W pracach dotyczących ekstruzji pelletów spożywczych z zastosowaniem pierścieniowej matrycy formującej [**P2**, **P3**] wartości SME w próbkach kontrolnych mieściły się w zakresie 0,018 – 0,074 kWh/kg dla układu L/D=16 oraz 0,025 – 0,067 kWh/kg dla wersji L/D=20, przy czym wyższa prędkość obrotowa ślimaka ekstrudera w obu konfiguracjach generalnie obniżała zapotrzebowanie energii, szczególnie podczas przetwarzania mieszanek przy wykorzystaniu krótszego układu plastyfikującego. Dodatki wyłoków znacząco wpływały na ten parametr. Podczas ekstruzji mieszanki zawierającej 10% wyłoków jabłkowych zaobserwowano zwiększenie wartości SME, zwłaszcza dla dłuższego układu plastyfikującego, gdzie najwyższa wartość wynosiła 0,189 kWh/kg. Przy wyższych prędkościach oraz 30% udziale dodatku obserwowano zmniejszenie wartości SME dla układu L/D=16, podczas gdy przy wersji L/D=20 wartości te były znacznie wyższe. W przypadku dodatku wyłoków aroniowych wartości SME były bardziej wyrównane, lecz przy 30% dodatku dla konfiguracji L/D=16 zaobserwowano większe zużycie energii, co sugeruje ograniczenia wynikające ze składu chemicznego [Alija i in. 2025; Masli i in. 2018]. Dodatek wyłoków z dyni na poziomie 10 i 20% powodował, że w dłuższym układzie plastyfikującym (L/D=20) zapotrzebowanie energii osiągnęło wartość 0,139 kWh/kg, zaś przy udziale 30% zaobserwowano zwiększenie SME do 0,151 kWh/kg. Wyniki te są spójne z obserwacjami przedstawionymi w pracy **P2** oraz w badaniach przeprowadzonych przez Kantronga i in. [2018], gdzie wykazano, że wartość SME zwiększa się przy niskich prędkościach obrotowych ślimaka i dużym udziale dodatków, szczególnie podczas wykorzystywania dłuższego układu plastyfikującego.

Dodatek wyłoków roślinnych we wszystkich wariantach procesowych prowadził do wyraźnego zwiększenia gęstości nasypowej względem próbki kontrolnej. Największą gęstość uzyskano podczas badania pelletów spożywczych z dodatkiem wyłoków aroniowych, gdzie wartości dla wersji L/D=20 wynosiły od 578,45 do 690,25 kg/m³, co można wiązać z wysoką zawartością błonnika i fragmentów skórek ograniczających ekspandowanie materiału [Quiles i in. 2016]. Zastosowanie wyłoków jabłkowych powodowało zwiększenie gęstości nasypowej ekstrudatów, szczególnie przy 10% dodatku (458,23 kg/m³ dla L/D=20 oraz 527,87 kg/m³), natomiast przy wyższym udziale procentowym widoczny był trend spadkowy. Dodatek wyłoków dyniowych stabilniej wpływał na gęstość nasypową pelletów przekąskowych, przy czym wartości konsekwentnie obniżały się wraz ze zwiększaniem udziału dodatku, co związane

jest ze zwiększeniem stopnia ekspandowania i powstawaniem luźniejszej struktury produktów. Dla pelletów z dodatkiem wyłoków dyniowych (10%) maksymalną wartość wynoszącą 589,86 kg/m³ wyznaczono dla wersji L/D=20, a najniższą 425,77 kg/m³ dla układu L/D=16 (30%). Podobnie, jak wskazali w swoich pracach Dushkova i in. [2024] oraz Potter i in. [2013], skład surowcowy miał większe znaczenie dla kształtowania gęstości ekstrudatów niż prędkość obrotowa ślimaka. Dodatek roślinny stanowił główny czynnik determinujący te wartości.

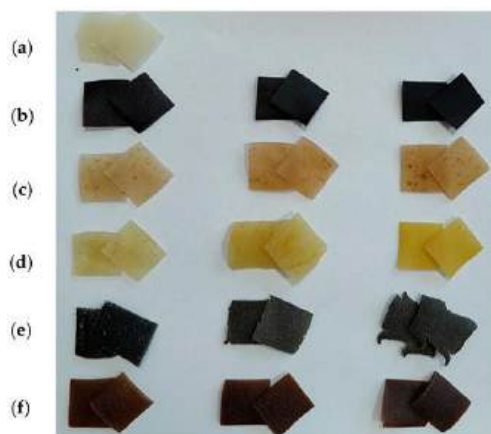
Wskaźnik absorpcji wody (WAI) w próbkach kontrolnych utrzymywał się na stabilnym poziomie, nieznacznie wyższym dla próbek wytwarzanych na układzie plastyfikującym L/D=20. Dodatek wyłoków powodował zróżnicowane efekty. Przy zastosowaniu dodatku wyłoków jabłkowych i dyniowych przy niskim udziale (10%) wartość WAI ekstrudatów była zbliżona do próbek kontrolnych. Natomiast dodatek 20 i 30% powodował obniżenie wartości WAI, które można wiązać z ograniczoną zdolnością do zatrzymywania wody w pelletach z tymi dodatkami. Odmienne efekty wykazywały wyłoki aroniowe, które dodawane w ilości 30% wpływały na osiąganie wyższych wartości WAI (6.01 g/g) w pelletach. Wskazuje to na silne właściwości sorpcyjne tego rodzaju wyłoków związane z obecnością frakcji pektynowych i polifenolowych [Blejan i in. 2025; Drożdż i in. 2019].

Z kolei wskaźnik rozpuszczalności w wodzie (WSI) pelletów spożywczych systematycznie zwiększał się wraz ze zwiększaniem udziału dodatków we wszystkich mieszankach surowcowych, osiągając najwyższe wartości przy 30% dodatku roślinnego. W pelletach z dodatkiem wyłoków jabłkowych zwiększenie wartości było stopniowe do 7,52%, co można wiązać z obecnością łatwo rozpuszczalnych kwasów organicznych i oligosacharydów [Schmid i in. 2020]. W przypadku wykorzystania wyłoków z aronii wartości WSI były niższe przy niskim udziale, natomiast w pelletach spożywczych z 30% dodatkiem ekstrudowanych na układzie L/D=20 WSI osiągnęło maksymalny poziom (7,92%). Wyłoki z dyni zastosowane w recepturach pelletów wykazywały efekt pośredni, co wskazuje na dobrą, choć mniej intensywną rozpuszczalność składników w wodzie niż w przypadku dodatku wyłoków aronii. Zwiększanie wartości WSI związane jest z intensywnym przetwarzaniem termomechanicznym, uszkodzeniem struktury wewnętrznej i wypłukiwaniem niezwiązanych komponentów oraz użyciem białkowo-włóknistych surowców, które są źródłem frakcji rozpuszczalnej [Sharifi i in. 2021; Shmid i in. 2021].

Przeprowadzone badania potwierdziły istotny wpływ konfiguracji układów plastyfikujących na przebieg procesu ekstruzji oraz na wybrane właściwości fizykochemiczne ekstrudatów z dodatkiem wyłoków owocowo-warzywnych. Zastosowanie układu plastyfikującego L/D=16 umożliwiło wyższą stabilność procesową, niższe i bardziej

wyrównane zapotrzebowanie energii oraz sprzyjało wytwarzaniu pelletów spożywczych o niższej gęstości nasypowej w porównaniu do układu $L/D=20$, co wskazuje na korzystniejszą strukturę produktu. Dodatkowo pellety otrzymane przy wykorzystaniu ekstrudera w konfiguracji układu plastyfikującego $L/D=16$ charakteryzowały się niższą wartością wskaźnika WSI. Obie konfiguracje układów plastyfikujących charakteryzowały się porównywalną wydajnością procesową.

W pracy **P4** przeanalizowano wpływ dodatków wyłoków roślinnych, tj. wyłoki z jabłka, aronii, dyni, nasion z siemienia lnianego i nasion z czarnuszki oraz zmiennych parametrów procesu na przebieg procesu ekstruzji oraz na właściwości fizyczne otrzymanych produktów w postaci pelletów spożywczych formowanych z użyciem matrycy płaskiej. Celem badań była ocena wydajności i energochłonności procesu ekstruzji oraz analiza jakości pelletów wzbogaconych wybranymi produktami ubocznymi przemysłu rolno-spożywczego (wyłoki roślinne), które mogą stanowić cenny nośnik związków bioaktywnych, poprawiających wartość odżywczą i atrakcyjność sensoryczną żywności. Podstawę mieszanek stanowiły skrobia ziemniaczana oraz płatki ziemniaczane zapewniające odpowiednią strukturę matrycy skrobiowej. Proces przeprowadzono z wykorzystaniem ekstrudera jednoślakowego wyposażonego w układ plastyfikujący $L/D=20$ przy trzech prędkościach obrotowych ślimaka wynoszących 40, 60 i 80 obr/min. Z wytłaczanego ciasta przy wykorzystaniu płaskiej wkładki formującej umieszczonej w głowicy ekstrudera formowano wstęgę o wymiarach o szerokości 25 mm i grubości 0,6 mm, którą następnie cięto na pellety o wymiarach 25×25 mm, które finalnie poddawano analizom (Rys. 6).



Rys. 6. Ekstrudaty bez dodatku (a) oraz od lewej z 10, 20 i 30% dodatkiem wyłoków z: (b) aronii; (c) jabłek; (d) dyni; (e) nasion czarnuszki; (f) siemienia lnianego [**P4-Fig. 1**].

Otrzymane wyniki wykazały, że dodatek wyłoków znacząco wpływał zarówno na przebieg procesu ekstruzji, jak i właściwości otrzymywanych ekstrudatów w formie pelletów płaskich. Obserwowano, że wydajność procesu zwiększała się od prędkości 60 obr/min, osiągając najwyższe wartości przy 80 obr/min, co było związane ze zwiększonym przepływem surowca przez cylinder ekstrudera. Najwyższą wydajność wyznaczono podczas ekstruzji mieszanek z 30% udziałem wyłoków z czarnuszki (26,00 kg/h), natomiast najniższą dla mieszanek z 20% dodatkiem wyłoków z dyni przetwarzanych przy 40 obr/min (6,76 kg/h). Wyniki te potwierdzają fakt, że obecność tłuszczu w wyłokach pełni rolę naturalnego plastyfikatora, ułatwiając przepływ masy i zwiększając wydajność procesu. Analogiczne zależności wskazywały Lisiecka i Wójtowicz [2020] w badaniach związanych z ekstruzją pelletów na bazie produktów ziemniaczanych z dodatkiem świeżych warzyw, gdzie prędkość obrotowa również determinowała wydajność. Podobne obserwacje przedstawili Mitrus i in. [2023] analizując mieszanki z dodatkiem brokułów, które przy wyższym udziale procentowym w mieszance (20-30%) poprawiały wydajność procesu.

Energochłonność procesu ekstruzji była uzależniona od rodzaju użytego surowca, ale również od prędkości obrotowej ślimaka, której zwiększanie powodowało obniżanie zapotrzebowania na energię jednostkową. Najwyższe wartości SME uzyskano podczas przetwarzania mieszanek z wyłokami z dyni (0,118 kWh/kg), jabłek (0,108 kWh/kg), czarnuszki (0,100 kWh/kg) i siemienia lnianego (0,083 kWh/kg), natomiast istotnie niższe SME zaobserwowano przy zastosowaniu dodatku wyłoków aroniowych, które wynosiło 0,034 kWh/kg. Taki rozkład wskazuje, że obecność surowców bogatych we włókno pokarmowe i polifenole może przyczynić się do obniżenia energochłonności procesu [Schmid i in. 2020]. Obserwacje te częściowo pokrywają się z wynikami Mitrusa i in. [2023] oraz Soi i in. [2023], którzy obserwowali nieregularne zmiany SME w zależności od rodzaju i poziomu dodatku roślinnego.

Istotnym parametrem technologicznym testowanym w pracy **P4** był także wskaźnik ekspandowania, który pozwala stwierdzić, jak surowiec zwiększa swoją objętość po procesie ekstruzji, co ma bezpośredni wpływ na gęstość, porowatość, kruchość oraz jakość i atrakcyjność sensoryczną otrzymanych ekstrudatów. Najwyższe wartości wskaźnika ekspandowania zaobserwowano dla pelletów wytwarzanych przy 40 obr/min z 10% dodatkiem wyłoków z aronii (3,17) oraz z 10% dodatkiem wyłoków z nasion czarnuszki (3,11), natomiast najniższe dla pelletów z 30% udziałem wyłoków z czarnuszki (1,65) oraz z aronii (2,37) przetwarzanych odpowiednio przy 80 i 60 obr/min. Analiza wyników wskazuje, że niższe prędkości obrotowe ślimaka sprzyjały uzyskaniu wyższych wartości wskaźnika

ekspandowania, natomiast wyższe prędkości obrotowe powodowały jego obniżenie, co również udowodnili Simons i in. [2012] w badaniach ekstrudatów na bazie różnych mąk fasolowych. Jest to związane z krótszym czasem przebywania materiału w cylindrze ekstrudera oraz mniejszym stopniem jego uplastycznienia przy wyższych prędkościach wytłaczania. Dodatkowo stwierdzono, że zwiększenie udziału wytlóków w mieszance prowadziło do obniżenia wskaźnika ekspandowania, co wiąże się z ograniczoną zdolnością do tworzenia porowatej struktury przy wysokiej zawartości włókna zawartego w wytlókach. Zależności te są zgodne z obserwacjami Alama i in. [2016], którzy wykazali negatywny wpływ wysokiej zawartości błonnika i likopenu na zdolność ekspandowania. Gumul i in. [2023] również wykazali, że obecność polifenoli i włókna w wytlókach owocowych (aroniowe i wiśniowe) ograniczała ekspandowanie przekąsek na bazie kukurydzy.

Z kolei rezultaty gęstości nasypowej pelletów wskazały na jej ścisły związek z poziomem dodatku i prędkością obrotową ślimaka ekstrudera. Najwyższą wartość uzyskano w pelletach z 20% wytlóków z nasion czarnuszki (392 kg/m^3) ekstrudowanych przy 40 obr/min, natomiast najniższą przy zastosowaniu w recepturze 30% wytlóków z aronii (262 kg/m^3) podczas stosowania prędkości ślimaka 60 obr/min. Wyniki te sugerują, że wyższy udział wytlóków prowadzi do obniżenia gęstości nasypowej, co jest podobną zależnością do tej przedstawionej przez Lisiecką i Wójtowicz [2021c] oraz Wójtowicz i in. [2023], którzy w badaniach z wykorzystaniem pulpy warzywnej i mączki z owadów zaobserwowali obniżenie gęstości nasypowej wraz ze zwiększaniem ilości dodatków bogatych w błonnik i tłuszcz.

Wraz ze zwiększaniem ilości wytlóków w mieszance surowcowej i prędkości obrotowej ślimaka ekstrudera zaobserwowano również obniżanie wartości wskaźnika wytrzymałości mechanicznej ekstrudatów, co jest związane ze zwiększoną porowatością produktu końcowego [P4-Fig. 7]. Próbkki kontrolne, niezawierające dodatku wytlóków roślinnych, wykazywały wartości bliskie 99,8%, podczas gdy przy 30% dodatku wytlóków z nasion czarnuszki czy siemienia lnianego wartości te obniżały się poniżej 99,1%, szczególnie przy stosowaniu 80 obr/min podczas ekstruzji pelletów spożywczych. Oznacza to, że zarówno zwiększona ilość dodatku roślinnego, jak i intensywniejsza obróbka mechaniczna, prowadzą do obniżenia wytrzymałości na uszkodzenia pelletów. Taka zależność została przedstawiona również w najnowszych badaniach Dushkovej i in. [2024] oraz Karkle i in. [2024], którzy wykazali, że wyższy udział dodatków roślinnych poprawia wartość odżywczą i aktywność antyoksydacyjną, ale jednocześnie może prowadzić do zmniejszenia trwałości i stabilności strukturalnej ekstrudatów.

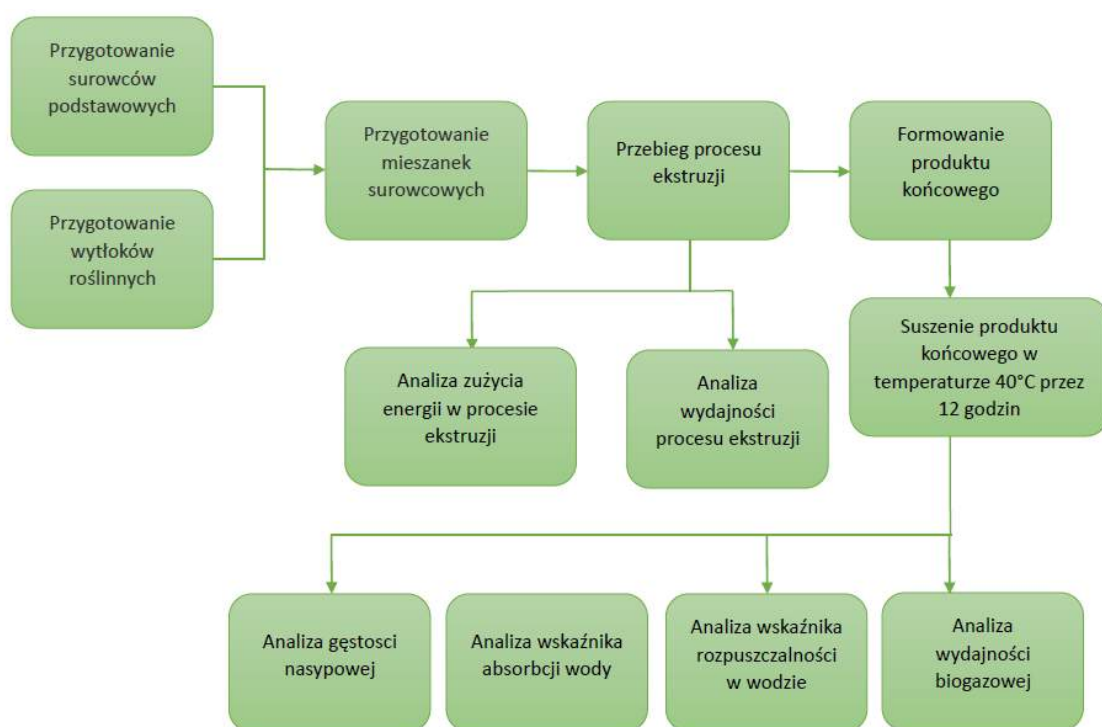
Analiza statystyczna wyników prezentowanych w publikacji **P4** pozwoliła jednoznacznie wskazać najważniejsze czynniki wpływające na zmienność badanych czynników. Stwierdzono silną dodatnią korelację pomiędzy gęstością nasypową i wskaźnikiem SME oraz ujemną pomiędzy wytrzymałością i wydajnością [**P4-Fig. 9**]. Co istotne, zastosowanie dodatków wyłoków z nasion czarnuszki i siemienia lnianego wpływały głównie na wydajność procesu, a dodatek pozostałych rodzajów wyłoków tj. z jabłka i dyni był związany z rezultatami gęstości nasypowej i SME. Analiza wpływu ilości dodatkowego składnika roślinnego wykazała, że największe znaczenie miał 30% dodatek wyłoków, który istotnie modyfikował wydajność procesu ekstruzji natomiast zastosowanie dodatku wyłoków w ilości 10% masy całkowitej mieszanki surowcowej wiązało się z większą wytrzymałością pelletów oraz wartością wskaźnika SME, natomiast udział 20% sprzyjał zwiększaniu gęstości nasypowej. W odniesieniu do prędkości ślimaka analiza statystyczna wykazała, że najniższa prędkość obrotowa ślimaka ekstrudera wynosząca 40 obr/min wpływała na wyższe wartości wskaźnika ekspandowania, energochłonności i gęstości nasypowej, natomiast najwyższa (80 obr/min) korelowała z najwyższą wydajnością procesu.

Uwzględniając powyższe wyniki oraz przeprowadzone analizy statystyczne potwierdzono istotne znaczenie udziału dodatku na poziomie 30%, rodzaju zastosowanego dodatku wyłoków oraz skrajnych wartości prędkości w kształtowaniu parametrów procesowych i jakościowych podczas procesu ekstruzji pelletów przekąskowych. Pozwoliło to na wskazanie kluczowych zależności między zmiennymi recepturowymi i technologicznymi a charakterystyką przebiegu procesu ekstruzji i właściwościami otrzymanych ekstrudatów, stanowiąc podstawę do dalszych analiz w zakresie procesu ekstruzji.

Badania w pracy **P4** przeprowadzono przy wykorzystaniu układu plastyfikującego o stosunku $L/D=20$, a uzyskane wyniki i obserwacje posłużyły jako punkt odniesienia do zaplanowania i zrealizowania analiz porównawczych z krótszym układem plastyfikującym ($L/D=16$).

Celem pracy **P5** było określenie wpływu rodzaju i udziału procentowego wyłoków roślinnych z jabłka, aronii, dyni, nasion siemienia lnianego i czarnuszki na wybrane parametry procesu ekstruzji, wybrane właściwości fizyczne ekstrudatów oraz możliwości wykorzystania frakcji poprodukcyjnych jako surowca energetycznego (Rys. 7). W badaniach zastosowano krótszy układ plastyfikujący $L/D=16$, przy czym rodzaj matrycy formującej oraz system cięcia pozostawał taki sam jak w pracy **P4**. Proces przeprowadzono wyłącznie przy prędkości obrotowej ślimaka wynoszącej 60 obr/min. Decyzja ta była oparta na wynikach wcześniejszych badaniach [**P4**], w których wykazano, że wartość ta pozwalała na uzyskanie odpowiednich

właściwości pelletów przy relatywnie wysokiej wydajności oraz niskim wskaźniku SME, podczas gdy skrajne prędkości (40 i 80 obr/min) prowadziły do pogorszenia stabilności procesu i niekorzystnych zmian w strukturze produktu. Zastosowanie wartości pośredniej pozwoliło zminimalizować zakłócenia procesowe i skupić się na ocenie wpływu rodzaju oraz ilości wycieków w mieszankach na właściwości fizyczne frakcji poprodukcyjnych i potencjał biogazowy ekstrudatów.



Rys. 7. Schemat blokowy prezentujący ramy metodologiczne badania w pracy **P5** (opracowanie własne).

Wydajność procesu ekstruzji pelletów przekąskowych zależała od rodzaju i udziału procentowego wycieków [P5-Tab. 2]. Próbkę kontrolną charakteryzowała się najwyższą wydajnością wynoszącą 18,0 kg/h, a wprowadzenie wycieków w większości analizowanych przypadków obniżyło wydajność procesu ekstruzji nawet do 11,42 kg/h dla mieszanek z 20% dodatkiem wycieków z dyni. Najkorzystniejsze efekty otrzymano przy zastosowaniu dodatku wycieków z nasion siemienia lnianego, gdzie przy 30% udziale w recepturze wydajność wzrosła powyżej wartości uzyskanej dla próbki kontrolnej i wynosiła 18,20 kg/h, co dowodzi wysokiej przydatności procesowej wycieków z nasion siemienia lnianego. Wykorzystanie wycieków z nasion czarnuszki również korzystnie wpłynęło na wydajność przy wyższych udziałach w recepturach pelletów, zwiększając się z 13,64 kg/h (przy 10% dodatku) do 16,80 kg/h dla mieszanki z 30% zawartością komponentu wzbogacającego. Wydajność procesu ekstruzji

mieszanek z dodatkiem wyłoków z jabłek i z aronii w większości utrzymywała niższą wartość, z częściową poprawą dopiero podczas ekstruzji mieszanki z 30% dodatku i wynosiła odpowiednio 16,00 kg/h i 14,16 kg/h. Przetwarzanie mieszanek z wyłokami dyni charakteryzowało się dużą zmiennością wydajności. Przy 10% dodatku wyłoków dyni uzyskano najwyższą wydajność (15,00 kg/h) w porównaniu z pozostałymi mieszankami z 10% udziałem komponentów funkcjonalnych. Jednak przy 20% udziale dodatku nastąpił wyraźny spadek wydajności do 11,42 kg/h, wskazując na pogorszenie stabilności przepływu masy w ekstruderze. Dalsze zwiększenie ilości dodatku do 30% spowodowało niewielkie zwiększenie wydajności (13,12 kg/h), co potwierdza nieregularny charakter oddziaływania dodatku wyłoków z dyni na przebieg procesu ekstruzji przy zastosowaniu układu plastyfikującego w wersji L/D=16. Jak pokazują dane literaturowe oraz wcześniejsze badania, surowce roślinne tj. wyłoki roślinne, świeże warzywa i owoce charakteryzują się wysoką zawartością włókna, pektyn, niekiedy także tłuszczu, co ma wpływ na przebieg procesu ekstruzji. Podobne obserwacje zostały przedstawione przez Lisiecką i in. [2021c] potwierdzając, że obecność pulpy warzywnej zwiększa lepkość przetwarzanej masy i utrudnia transport w cylindrze ekstrudera. W porównaniu do wyników z poprzednich badań, w pracy **P4** wykazano, że wydajność procesu ekstruzji uzależniona była przede wszystkim od prędkości obrotowej ślimaka ekstrudera, natomiast w pracy **P5** wyraźnie zaznaczył się wpływ rodzaju i ilości wyłoków w mieszance surowcowej. Świadczy to o tym, że przy zastosowaniu krótszego układu plastyfikującego (L/D=16) występują większe zależności wydajności procesu od zmian w składzie recepturowym.

Rezultaty zapotrzebowania na energię mechaniczną wykazały zróżnicowany wpływ w zależności rodzaju i ilości zastosowanego dodatku [**P5-Tab. 3**]. Dodatek wyłoków jabłkowych i aroniowych w recepturach pelletów przekąskowych obniżał wartość wskaźnika SME, osiągając niskie wartości już przy 10% udziału dodatku (odpowiednio 0,020 i 0,023 kWh/kg), a przy 30% osiągając nawet 0,015 kWh/kg. Proces przetwarzania mieszanek z wyłokami z dyni oraz z nasion czarnuszki charakteryzował się zwiększeniem SME przy 20% udziale, a dopiero przy 30% zaobserwowano istotne obniżenie tego parametru. Dodatek wyłoków z siemienia lnianego do mieszanki surowcowej wykazywał względnie stabilny przebieg, z redukcją SME do 0,033 kWh/kg przy 30% udziale. Podobny trend ukazujący obniżenie zapotrzebowania na energię wraz ze zwiększaniem ilości dodatku roślinnego w przetwarzanej mieszance przedstawiły Lisiecka i Wójtowicz [2019], które badały wpływ dodatku buraka, marchwi, pora i cebuli na energochłonność procesu ekstruzji. Badania te pokazują, że zależność ta jest powtarzalna w różnych układach i z zastosowaniem różnych

dotatków roślinnych, niezależnie od formy komponentu (pulpa owocowo-warzywna czy wytloki roślinne). W badaniach wstępnych (**P1**) również potwierdzono ten trend, gdzie najwyższe 30% stężenie dodatku wytlóków jablkowych sprzyjało zmniejszeniu zapotrzebowania na energię jednostkową. Z kolei pracy **P4** zaobserwowano, że wartość wskaźnika SME zmniejszała się wraz z wyższą prędkością obrotową ślimaka, natomiast w **P5** parametr ten miał zdecydowanie mniejszy wpływ. W praktyce oznacza to, że przy krótszym układzie plastyfikującym właściwości i skład surowców wywierają większy wpływ na zapotrzebowanie energii niż czynniki procesowe.

Gęstość nasypowa pelletów spożywczych wykazywała wyraźne zróżnicowanie w zależności od rodzaju i udziału procentowego wytlóków w mieszance [**P5-Tab. 4**]. Najwyższe wartości gęstości nasypowej zaobserwowano dla pelletów spożywczych z mieszanek z 20% udziałem wytlóków roślinnych, szczególnie wytlóków aroniowych ($369,75 \text{ kg/m}^3$), natomiast najniższe przy zastosowaniu dodatku wytlóków z aronii w udziale 30% ($255,53 \text{ kg/m}^3$). Wyniki te wskazują, że 20% dodatek wytlóków sprzyja zagęszczeniu masy, podczas gdy zwiększona ilość dodatków w postaci wytlóków obniża gęstość, ograniczając proces kleikowania skrobi. Podobne wnioski przedstawili w swoich pracach Mitrus i in. [2023] oraz Wójtowicz i in. [2023], wskazując, że znaczna ilość dodatków nieskrobiowych redukuje udział skrobi w mieszance, zmniejszając tym samym gęstość otrzymanego ekstrudatu. Porównując wyniki otrzymane w pracy **P4** i pracy **P5** zauważalne są różnice w zakresie wartości minimalnych i maksymalnych. W pracy **P4** gęstości nasypowe ekstrudatów otrzymanych z mieszanek przetwarzanych przy 60 obr/min ślimaka ekstrudera mieściły się w przedziale $262,47 - 374,34 \text{ kg/m}^3$, podczas gdy w pracy **P5** wynosiły $255,59 - 369,75 \text{ kg/m}^3$. Oznacza to, że w przypadku krótszego układu plastyfikującego uzyskano niższe wartości minimalne i maksymalne. Wynika z tego, że zastosowanie układu $L/D=16$ ze ślimakiem sprężającym gładko uzwojonym wpływa na intensywniejsze przetwarzanie masy w cylindrze ekstrudera i generuje wyższe ciśnienie wytłaczania, co poprawia zdolność do ekspandowania. W efekcie struktura jest lepiej napowietrzona, co przekłada się na niższą gęstość w porównaniu z układem $L/D=20$ opisanym w artykule **P4**, gdzie dłuższy układ plastyfikujący oraz ślimak z elementem mieszającym sprzyjał formowaniu bardziej zwartej struktury produktu poprzez redukcję ciśnienia gęstwy.

W pracy **P5** przeprowadzono również analizę wskaźnika absorpcji wody (WAI) oraz wskaźnika rozpuszczalności w wodzie (WSI) w celu sprawdzenia zależności między warunkami procesu a właściwościami hydrofilowymi ekstrudatów [**P5-Fig. 5, Fig. 6**]. Określenie wskaźnika absorpcji wody pozwala na ocenę zdolności materiału do wiązania wody

i pośrednio przedstawia stopień degradacji skrobi w procesie ekstruzji. Z kolei wskaźnik WSI przedstawiający rozpuszczalność w wodzie pozwala na określenie intensywności degradacji komponentów skrobiowych. Wyznaczenie tych parametrów umożliwia określenie zmian ilościowych i jakościowych zachodzących podczas przetwarzania mieszanki pod wpływem zmiennych warunków procesu. Wartości współczynnika WAI charakteryzowały się znacznym zróżnicowaniem w pelletach z dodatkiem wyłoków z nasion siemienia lnianego i czarnuszki oraz wyłoków dyniowych, gdzie wartości zmniejszały się wraz ze zwiększaniem ilości stosowanego dodatku w mieszankach recepturowych. Podobne zależności zostały zaobserwowane w pracach Altana i in. [2008] oraz Yağcı i in. [2022], którzy prowadzili badania związane z właściwościami hydrofilowymi ekstrudatów wzbogaconych wyłokami z pomidorów. W przypadku pelletów z dodatkiem wyłoków jabłkowych współczynnik WAI przy 10% udziale wynosił 3,35 g/g, co było wartością zbliżoną do próbki kontrolnej. Dodatek na poziomie 20% spowodował podwyższenie WAI do 4,06 g/g, wskazując na poprawę zdolności absorpcji wody. Przy 30% udziale wyłoków jabłkowych zaobserwowano niewielki spadek wartości (3,45 g/g). W przypadku ekstrudatów z dodatkiem 10, 20 i 30% wyłoków aroniowych wartości WAI na wynosiły odpowiednio 2,89, 2,73 oraz 2,89 g/g. Jak podaje Dushkova i in. [2024] wahania wskaźnika WAI są charakterystyczne dla surowców roślinnych zawierających zwiększoną liczbę składników zdolnych do absorpcji wody tj. włókna i białka.

W przypadku wskaźnika rozpuszczalności w wodzie najwyższe wartości WSI odnotowano w pelletach spożywczych z dodatkiem wyłoków z aronii (do 17,67% przy 30% dodatku) i z czarnuszki (10,23%), co wskazuje na silną degradację komponentów i zwiększoną rozpuszczalność składników. Podobne zależności opisywali Wójtowicz i in. [2023] dla ekstrudatów z dodatkiem świeżej aronii oraz Lisiecka i in. [2021b] w przypadku dodatku świeżych buraków, co wskazuje, że rodzaj surowca roślinnego może istotnie wpływać na przebieg procesu oraz kształtować właściwości technologiczne i funkcjonalne ekstrudatów.

Podczas rozruchu technologicznego do czasu ustabilizowania warunków procesu ekstruzji powstają frakcje poprodukcyjne, które często stanowią problem dla producentów. Podobnie jest z produktami, które nie spełniają wymaganych parametrów jakościowych. Frakcje te można zagospodarować jako wartościowy wsad do biogazowni, co wykazano prowadząc w pracy **P5** badania dotyczące wyznaczania efektywności biogazowej frakcji poprodukcyjnej z procesu ekstruzji pelletów przekąskowych wzbogacanych dodatkiem wyłoków roślinnych. Materiał z próbki kontrolnej wykazał efektywność produkcji metanu na poziomie 47,38%, a skumulowana produkcja metanu wynosiła 299,29 m³/Mg świeżej masy, przy jednoczesnej produkcji biogazu wynoszącej 631,68 m³/Mg [**P5-Tab. 7**]. Stanowiło to

punkt odniesienia do oceny wpływu rodzaju i udziału wyłoków roślinnych na wydajność fermentacji metanowej. Najbardziej korzystne rezultaty uzyskano dla frakcji poprodukcyjnej ekstrudatów z dodatkiem wyłoków z nasion czarnuszki, gdzie wraz ze zwiększaniem udziału dodatku systematycznie zwiększała się zarówno zawartość metanu do 51,39% przy 30% dodatku, jak i jego produkcja skumulowana (337,04 m³/Mg świeżej masy). Wyniki te pokrywają się wartościami otrzymanymi przez Soldano i in. [2021], którzy badali efektywność biogazową pszenicy skażonej mikotoksynami, a także zbliżoną do najwyższych wartości raportowanych dla odpadów komercyjnych [Lopez i in. 2016]. Tak wysoka wydajność biogazowa jest efektem obecności łatwostrawnych substancji oraz tłuszczu w wyłokach z nasion czarnuszki, pełniących rolę dogodnego substratu dla mikroorganizmów fermentacyjnych. Jednocześnie obecność związków organicznych w recepturze tj. włókno, białko, skrobia, sprzyja stabilności procesu i zapewnia optymalne warunki dla mikroflory metanogennej. Potwierdza to także, że frakcje poprodukcyjne z procesu ekstruzji wzbogacone wyłokami z czarnuszki mogą stanowić szczególnie efektywny substrat w procesie fermentacji poprawiając bilans energetyczny i stabilność produkcji biogazu. Podobne zależności zaobserwowano dla ekstrudatów z wyłokami z nasion z siemienia lnianego, choć w tym przypadku zawartość metanu była mniej zróżnicowana i w mniejszym stopniu zwiększała się wraz ze zwiększaniem udziału dodatku wyłoków w mieszance. Jest to związane z faktem, że surowiec ten charakteryzuje się podwyższoną zawartością lipidów i materiału lignocelulozowego i może potencjalnie prowadzić do akumulacji długołańcuchowych kwasów tłuszczowych LCFA (ang. Long-Chain Fatty Acids), które hamują aktywność organizmów metanogennych [Palatsi i in. 2012]. Z kolei dodatek wyłoków z aronii spowodował zmienne efekty. Fermentacja beztlenowa frakcji ekstrudatów z wyłokami aroniowymi początkowo powodowała zwiększanie zawartości metanu, lecz towarzyszył temu spadek skumulowanej produkcji, co wskazuje, że nadmierny udział tego dodatku organiczna ogólną wydajność procesu. Efekt ten można powiązać z obecnością polifenoli o działaniu antyoksydacyjnym, które w wysokich stężeniach hamują aktywność mikroorganizmów fermentacyjnych [Li i in. 2017]. Najbardziej neutralny charakter związany z potencjałem energetycznym miały frakcje poprodukcyjne ekstrudatów z dodatkiem wyłoków z jabłka i z dyni. Niezależnie od udziału procentowego w recepturze, zawartość metanu, jak i całkowita produkcja biogazu pozostawały bliskie próbie kontrolnej. Tym samym produkty te nie wprowadzały większych zakłóceń do procesu, co może być postrzegane jako atut w kontekście stabilności i przewidywalności działania bioreaktorów. Frakcje poprodukcyjne pelletów spożywczych z dodatkiem 20% wyłoków jabłkowych charakteryzowały się niższą zawartością metanu, przy czym dalsze

zwiększanie udziału komponentu funkcjonalnego nie przynosiło istotnych zmian. Wahania efektywności biogazowej dla frakcji z wyciekami jabłkowymi i dyniowymi, pomimo względnej stabilności procesowej, wynikają z faktu, że choć wycieki te ze względu na zawartość węglowodanów na ogół nie wykazują silnych efektów hamujących, to wysoka zawartość cukru z pektyn może prowadzić do szybkiego zakwaszenia substratu [Kalia i in. 1992; Liang i in. 2020; Timmermans i in. 2022].

Przeprowadzone badania jednoznacznie wskazują, że wycieki odgrywają istotną rolę w kształtowaniu potencjału biogazowego frakcji poprodukcyjnych z procesu ekstruzji. Wycieki z nasion czarnuszki mogą być sklasyfikowane jako komponent o wysokiej przydatności technologicznej, sprzyjający również optymalizacji wydajności metanowej frakcji poprodukcyjnych z procesu ekstruzji, podczas gdy wycieki aroniowe, mimo obserwowanych ograniczeń ilościowych, stanowią cenne źródło cennych związków bioaktywnych, których obecność w biomacie może jednak wpływać na ograniczenie intensywności procesu fermentacji metanowej. Otrzymane wyniki wpisują się w aktualne trendy i doniesienia dotyczące zagospodarowania poprodukcyjnych wyrobów rolno-spożywczych i podkreślają, że efektywność biogazowa w znacznym stopniu zależy od właściwego doboru rodzaju i stężenia wycieków.

Analiza statystyczna PCA w pracy **P5** wykazała, że największy wpływ na zmienność układu miały wskaźniki WAI i WSI oraz parametry wydajności fermentacji beztlenowej, natomiast nieco mniejsze znaczenie uzyskano dla wydajności procesu i gęstości nasypowej ekstrudatów [**P5- Fig. 4**]. Wskaźnik WAI był silnie dodatnio skorelowany z wydajnością, co sugeruje, że zdolność do wiązania wody wynikała z warunków przetwarzania. Z kolei SME dodatnio korelowało z produkcją biogazu i metanu, co wskazuje, że wyższe nakłady energii, a tym samym przetworzenie masy, mogą przekładać się na większy potencjał fermentacyjny.

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące wnioski końcowe stanowiące odpowiedzi na zdefiniowany problem naukowy oraz cele szczegółowe:

1. Wykazano możliwość zagospodarowania produktów ubocznych z przetwórstwa rolno-spożywczego w postaci wyłoków owocowo-warzywnych i z nasion roślin oleistych do wzbogacenia ekstrudowanych pelletów spożywczych w ilości do 30% składu recepturowego.
2. Zastosowane w badaniach różne ilości i rodzaje wyłoków roślinnych dodawane do mieszanek skrobiowych wpływają na przebieg procesu ekstruzji i na wybrane właściwości fizykochemiczne oraz funkcjonalne opracowanych ekstrudatów. W konsekwencji przynosi to pozytywny efekt środowiskowy w postaci niższej energochłonności procesu ekstruzji i niższego zapotrzebowania na wodę technologiczną.
3. Najwyższą wydajność procesu ekstruzji pelletów przekąskowych na bazie komponentów ziemniaczanych uzyskano przy zastosowaniu układu plastyfikującego $L/D=20$ oraz płaskiej matrycy formującej.
4. Najniższe jednostkowe zużycie energii w procesie ekstruzji zaobserwowano przy zastosowaniu krótszego układu plastyfikującego ($L/D=16$) z matrycą pierścieniową podczas ekstruzji przy najwyższej prędkości obrotowej ślimaka ekstrudera receptur z dodatkiem wyłoków aroniowych, co potwierdza istotny wpływ rodzaju i ilości surowców roślinnych na ograniczenie zapotrzebowania energetycznego procesu.
5. Zastosowanie układu plastyfikującego $L/D=16$ podczas przetwarzania mieszanek z dodatkiem wyłoków z aronii, nasion czarnuszki i siemienia lnianego sprzyjało obniżeniu jednostkowego zapotrzebowania energii przy wyższych prędkościach obrotowych ślimaka, co potwierdza znaczenie doboru warunków procesowych oraz rodzaju i udziału wyłoków roślinnych dla efektywności energetycznej procesu ekstruzji.
6. Najniższe wartości gęstości nasypowej uzyskano przy zastosowaniu wkładki płaskiej oraz krótszego układu plastyfikującego ($L/D=16$), natomiast matryca pierścieniowa wraz z dłuższą konfiguracją ekstrudera ($L/D=20$) doprowadziły do uzyskania wyraźnie wyższych wartości gęstości nasypowej pelletów przekąskowych. Potwierdza to istotny wpływ geometrii matrycy i rodzaju układ plastyfikującego na strukturę i stopień ekspandowania ekstrudatów.

7. Najniższe wartości wskaźnika WSI uzyskano w pelletach przekąskowych z dodatkiem wyłoków dyniowych ekstrudowanych przy zastosowaniu krótszego układu plastyfikującego ($L/D=16$) z wkładką pierścieniową, co wskazuje na niski stopień degradacji skrobi i stabilną strukturę ekstrudatów.
8. Frakcje poprodukcyjne powstałe w procesie ekstruzji zawierają znaczną ilość łatwo rozkładalnych związków organicznych, co umożliwia ich wykorzystanie jako wartościowego substratu do przeprowadzenia fermentacji beztlenowej i produkcji biogazu.
9. Dodatek wyłoków z nasion czarnuszki w ilości 30% w mieszance surowcowej umożliwił osiągnięcie zawartości metanu na poziomie 51,39%, co wskazuje na korzystny wpływ tego rodzaju wyłoków na proces fermentacji i potencjał energetyczny uzyskanego biogazu.
10. Najlepszy potencjał biogazowy i stabilność procesu umożliwia wykorzystanie frakcji poprodukcyjnych z ekstruzji pelletów przekąskowych z dodatkiem wyłoków z czarnuszki i siemienia lnianego.

Zasadne jest kontynuowanie badań nad możliwością wykorzystania frakcji poprodukcyjnych powstających podczas ekstruzji jako substratów do fermentacji metanowej w celu oceny ich potencjału energetycznego i środowiskowego. Istotne są również dalsze badania dotyczące konfiguracji układu plastyfikującego oraz matryc formujących, których konstrukcja bezpośrednio determinuje końcową postać fizyczną ekstrudatu oraz energochłonność procesu ekstruzji. Interakcje pomiędzy właściwościami surowców i dodatków oraz warunkami procesu stanowią istotny obszar badań z perspektywy optymalizacji jakości produktów oraz osiągnięcia powtarzalności procesu przetwórczego. Równocześnie warto podkreślić znaczenie badań nad potencjałem prozdrowotnym wyłoków roślinnych jako źródła związków fenolowych i związaną z nimi aktywnością antyoksydacyjną, które mogą umożliwić wykorzystanie innych produktów ubocznych jako wartościowych dodatków do żywności, pozwalając na ich ponowne wykorzystanie zgodnie z zasadami gospodarki cyrkularnej.

6. LITERATURA POMOCNICZA

1. Aït-Kaddour, A.; Hassoun, A.; Tarchi, I.; Loudiyi, M.; Boukria, O.; Cahyana, Y.; Ozogul, F.; Khwaldia, K. Transforming plant-based waste and by-products into valuable products using various “Food Industry 4.0” enabling technologies: A literature review. *Sci. Total Environ.* 2024, 955, 176872. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176872>
2. Alam, M.S.; Kaur, J.; Khaira, H.; Gupta, K. Extrusion and Extruded Products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: a review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2016, 56, 445–475. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568>
3. Albarracin, L.T.; Mas, I.R.; Fuess, L.T.; Rodriguez, R.P.; Volpi, M.P.C.; de Souza Moraes, B. The bioenergetic potential from coffee processing residues: towards an industrial symbiosis. *Resources* 2024, 13, 21. <https://doi.org/10.3390/resources13020021>
4. Ali, I.M.; Forsido, S.F.; Kuyu, C.G.; Ahmed, E.H.; Andersa, K.N.; Chane, K.T.; Regasa, T.K. Effects of extrusion process conditions on nutritional, anti-nutritional, physical, functional, and sensory properties of extruded snack: A review. *Food Sci. Nutr.* 2024, 12, 8755–8761. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4472>
5. Alija, D.; Olędzki, R.; Nikolovska Nedelkoska, D.; Pejcz, E.; Wojciechowicz-Budzisz, A.; Stamatovska, V.; Harasym, J. *Cucurbita maxima* plomo peel as a valuable ingredient for bread-making. *Foods* 2025, 14, 597. <https://doi.org/10.3390/foods14040597>
6. Alonso, R.; Grant, G.; Dewey, P.; Marzo, F. Nutritional assessment in vitro and in vivo of raw and extruded peas (*Pisum sativum* L.). *J. Agric. Food Chem.* 2000, 48, 6, 2286–2290. <https://doi.org/10.1021/jf000095o>
7. Altan, A.; McCarthy, K.L.; Maskan, M. Evaluation of snack foods from barley-tomato pomace blends by extrusion processing. *J. Food Eng.* 2008, 84, 231–242. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.05.014>
8. Ankathi, S.K.; Chaudhari, U.S.; Handler, R.M.; Shonnard, D.R. Sustainability of biogas production from anaerobic digestion of food waste and animal manure. *Appl. Microbiol.* 2024, 4, 418–438. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4010029>
9. Asma, U.; Morozova, K.; Ferrentino, G.; Scampicchio, M. Apples and apple by-products: antioxidant properties and food applications. *Antioxidants* 2023, 12, 1456. <https://doi.org/10.3390/antiox12071456>

10. Atencio, S.; Bernaerts, T.; Liu, D.; Reineke, K.; Hendrickx, M.; Von Loey, A. Impact of processing on the functionalization of pumpkin pomace as a food texturizing ingredient. *Innovative Food Sci. Emerg. Technol.* 2021, 69, 102669. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102669>
11. Baglary, G.R.; Kalita, S.; Islary, A.; Kumar, S. Sustainable extraction of bioactive compounds from aromatic plants and agro-food wastes for food preservation: A review. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 2024, 61, 103399. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103399>
12. Bellail, A.A.; Omayma, E.S.; Mohammed, M.Y.; Ahmed, M.; El-Gamal, A. Effect of home-cooking methods on phenolic composition and antioxidant activity of sweetpotato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) cultivars grown in Egypt. *Food Nutrition Sci.* 2012, 3, 4, 490-499. <https://doi.org/10.4236/fns.2012.34069>
13. Berenguer, C.V.; Andrade, C.; Pereira, J.A.M.; Perestrelo, R.; Câmara, J.S. Current Challenges in the Sustainable Valorisation of Agri-Food Wastes: A Review. *Processes* 2023, 11, 20. <https://doi.org/10.3390/pr11010020>
14. Bhatia, L.; Jha, H.; Sarkar, T.; Sarangi, P.K. Food waste utilization for reducing carbon footprints towards sustainable and cleaner environment: a review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2023, 20, 2318. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032318>
15. Blejan, A.M., Nour, V., Corbu, A.R., Codină, G.G. (2025). Corn-based extruded snacks supplemented with bilberry pomace powder: Physical, chemical, functional, and sensory properties. *Appl. Sci.* 15, 2468. <https://doi.org/10.3390/app15052468>
16. Borah, A.; Lata Mahanta, C.; Kalita, D. Optimization of process parameters for extrusion cooking of low amylose rice flour blended with seeded banana and carambola pomace for development of minerals and fiber rich breakfast cereal. *J. Food Sci. Technol.* 2016, 53, 221–232. <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2279705>
17. Burda, S.; Oleszek, W. Antioxidant and antiradical activities of flavonoids. *J. Agric. Food Chem.* 2001, 49(6), 2774-2779. <https://doi.org/10.1021/jf001413m>
18. Carrère, H.; Dumas, C.; Battimelli, A.; Batstone, D.J.; Delgenes, J.P.; Steyer, J.P.; Ferrer, I. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review. *J. Hazard. Mater.* 2010, 183, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.129>
19. Cassani, L.; Gomez-Zavaglia, A. Sustainable food systems in fruits and vegetables food supply chains. *Front. Nutr.* 2022, 9, 829061. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.829061>
20. Chamorro, F.; Carpena, M.; Fraga-Corral, M.; Echave, J.; Riaz Rajoka, M.S.; Barba, F.J.; Cao, H.; Xiao, J.; Prieto, M.A.; Simal-Gandara, J. Valorization of kiwi agricultural

- waste and industry by-products by recovering bioactive compounds and applications as food additives: A circular economy model. *Food Chem.* 2022, 370, 131315. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131315>
21. Chen, X.; Du, X.; Chen, P.; Guo, L.; Xu, Y.; Zhou, X. Morphologies and gelatinization behaviours of high-amylose maize starches during heat treatment. *Carbohydr. Polym.* 2017, 157, 637-642.
 22. Combrzyński, M.; Biernacka, B.; Wójtowicz, A.; Kupryaniuk, K.; Oniszczyk, T.; Mitrus, M.; Różyło, R.; Gancarz, M.; Stasiak, M.; Kasprzak-Drozd, K. Analysis of the extrusion-cooking process and selected physical properties of snack pellets with the addition of fresh kale. *Int. Agrophys.* 2023, 37, 353–364. <https://doi.org/10.31545/intagr/168434>
 23. Combrzyński, M.; Soja, J.; Oniszczyk, T.; Wojtunik-Kulesza, K.; Kręcisz, M.; Mołdoch, J.; Biernacka, B. The impact of fresh blueberry addition on the extrusion-cooking process, physical properties and antioxidant potential of potato-based snack pellets. *Appl. Sci.* 2025, 15, 5112. <https://doi.org/10.3390/app15095112>
 24. Combrzyński, M.; Wójtowicz, A.; Biernacka, B.; Oniszczyk, T.; Mitrus, M.; Soja, J.; Różyło, R.; Wojtunik-Kulesza, K.; Kasprzak-Drozd, K.; Oniszczyk, A. Possibility of water saving in processing of snack pellets by the application of fresh lucerne sprouts: selected aspects and nutritional characteristics. *J. Ecol. Eng.* 2023, 24, 12, 130-142. <https://doi.org/10.12911/22998993/173009>
 25. Comunian, T.A.; Silva, M.P.; Souza, C.J.F. The use of food by-products as a novel for functional foods: their use as ingredients and for the encapsulation process. *Trends Food Sci. Technol.* 2021, 108, 269–280. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.003>
 26. Cotacallapa-Sucapuca, M.; Vega, E.N.; Maieves, H.A.; Berrios, J.D.J.; Morales, P.; Fernández-Ruiz, V.; Cámara, M. Extrusion process as an alternative to improve pulses products consumption. A Review. *Foods* 2021, 10, 1096. <https://doi.org/10.3390/foods10051096>
 27. Dey, D.; Richter, J.K.; Ek, P.; Gu, B.-J.; Ganjyal, G.M. Utilization of food processing by-products in extrusion processing: a review. *Front. Sustain. Food Syst.* 2021, 4, 603751. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.603751>
 28. Dini, I.; Tenore, G.C.; Dini, A. Effect of industrial and domestic processing on antioxidant properties of pumpkin pulp. *LWT Food Sci. Technol.* 2013, 53, 1, 382-385. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.01.005>

29. Drożdż, W.; Boruckowska, H.; Boruckowski, T.; Tomaszewska-Ciosk, E.; Zdybel, E. Use of blackcurrant and chokeberry press residue in snack products. *Pol. J. Chem. Technol.* 2019, 21, 13–19. <https://doi.org/10.2478/pjct-2019-0003>
30. Dushkova, M.; Simitchiev, A.; Beleva, B.; Petrova, T.; Koleva, A. Extrusion of rice and aronia melanocarpa pomace: physical and functional characteristics of extrudates. *Appl. Sci.* 2024, 14, 4315. <https://doi.org/10.3390/app14104315>
31. Ferdeş, M.; Zăbavă, B.Ş.; Paraschiv, G.; Ionescu, M.; Dincă, M.N.; Moiceanu, G. Food waste management for biogas production in the context of sustainable development. *Energies* 2022, 15, 6268. <https://doi.org/10.3390/en15176268>
32. Galanakis, C.M. Recovery of high added-value components from food wastes: Conventional, emerging technologies and commercialized applications. *Trends Food Sci. Technol.* 2012, 26, 2, 68-87. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.03.003>
33. García-Lomillo, J.; González-SanJosé, M.L. Applications of wine pomace in the food industry: approaches and functions. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2017, 16, 3–22. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12238>
34. Gumul, D.; Berski, W.; Zięba, T. The influence of fruit pomaces on nutritional, pro-health value and quality of extruded gluten-free snacks. *Appl. Sci.* 2023, 13, 4818. <https://doi.org/10.3390/app13084818>
35. Gumul, D.; Korus, J.; Achremowicz, B. Effect of processing on antioxidant activity of raw materials of plant origin. *ŻNTJ* 2005, 12, 4, 45, 41-48. ISSN: 0973-7049.
36. Jiang, Y.; Bin Noor Azlee, N.I.; Ko, W.S.; Chen, K.; Lim, B.G.; Nelson, A.Z. Plant-based protein extrusion optimization: Comparison between machine learning and conventional experimental design. *Curr. Res. Food Sci.* 2025, 11, 101157. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101157>
37. Jin, Z.; Wang, M.; Wu, F.; Cai, H.Y.; Jin, W.P. Sun, W.; Chen, X.; Li, F.; Wang, Z.; Shen, W.Y. Effect of extrusion on the total antioxidant capacity and free phenolic compounds of wheat bran by response surface methodology. *Ital. J. Food Sci.* 2020, 32, 2. <https://doi.org/10.14674/IJFS-1626>
38. Juárez-Barrientos, J.M.; Hernández-Santos, B.; Torruco-Uco, J.G.; Martínez-Sánchez, C.E.; Herman-Lara, E.; Ramírez-Rivera, E.J.; Ramírez-Figueroa, E.; Avendaño-Apolinar, A.V.; Cabal-Prieto, A.; Rodríguez-Miranda, J. optimization of extrusion cooking for enhanced physicochemical properties in jackfruit seed (*artocarpus altilis*) and nixtamalized maize (*zea mays* l.) flour blend. *Processes* 2025, 13, 772. <https://doi.org/10.3390/pr13030772>

39. Kalia, V.C.; Kumar, A.; Jain, S.R.; Joshi, A.P. Biomethanation of plant materials. *Bioresour. Technol.* 1992, 41, 209–212. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(92\)90003-G](https://doi.org/10.1016/0960-8524(92)90003-G)
40. Kantrong, H.; Charunuch, C.; Limsangouan, N.; Pengpinit, W. Influence of process parameters on physical properties and specific mechanical energy of healthy mushroom-rice snacks and optimization of extrusion process parameters using response surface methodology. *J. Food Sci. Technol.* 2018, 55, 3462–3472. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3271-2>
41. Karkle, E.L.; Alavi, S.; Dogan, H.; Jain, S.; Waghray, K. Development and Evaluation of Fruit and Vegetable-Based Extruded Snacks. Online. AACC International Cereal Science Knowledge Database. 2009. Dostęp online: <https://www.cerealsgrains.org/publications/plexus/cfwplexus/library/webcasts/Pages/EKarkle.aspx> (dostęp 15 sierpnia 2024).
42. Kasprzak K.; Oniszczyk T.; Wójtowicz A.; Waksmundzka-Hajnos M.; Olech M.; Nowak R.; Polak R.; Oniszczyk A. Phenolic acid content and antioxidant properties of extruded corn snacks enriched with fresh feces. *J. Anal. Methods Chem.* 2018, 11, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2018/7830546>
43. Kasprzak-Drozd, K.; Oniszczyk, T.; Kowalska, I.; Mołdoch, J.; Combrzyński, M.; Gancarz, M.; Dobrzański, B., Jr.; Kondracka, A.; Oniszczyk, A. Effect of the production parameters and in vitro digestion on the content of polyphenolic compounds, phenolic acids, and antiradical properties of innovative snacks enriched with wild garlic (*allium ursinum* l.) Leaves. *Int. J. Mol. Sci.* 2022, 23, 14458. <https://doi.org/10.3390/ijms232214458>
44. Khanal, R.C.; Howard, L.R.; Prior, R.L. Procyanidin content of grape seed and pomace, and total anthocyanin content of grape pomace as affected by extrusion processing. *Int. J. Food Sci.* 2009, 74, 6, 174-182. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01221.x>
45. Kręcisz, M. Energy consumption during produciton of corn extrudates in relation to the process parameters. *Agric. Eng.* 2016, 20, 125–131. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2016-0034>
46. Kumar, V.; Sharma, N.; Umesh, M.; Maitra, S. Emerging challenges for the agro-industrial food waste utilization: A review on food waste biorefinery. *Bioresour. Technol.* 2022, 362, 127790. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127790>

47. Kupryaniuk, K.; Oniszczyk, T.; Combrzyński, M.; Czekala, W.; Matwijczuk, A. The influence of corn straw extrusion pretreatment parameters on methane fermentation performance. *Materials* 2020, 13, 3003. <https://doi.org/10.3390/ma13133003>
48. Lewko, P.; Wójtowicz, A.; Różańska-Boczula, M. Effect of extruder configuration and extrusion cooking processing parameters on selected characteristics of non-starch polysaccharide-rich wheat flour as hybrid treatment with xylanase addition. *Processes* 2024, 12, 1159. <https://doi.org/10.3390/pr12061159>
49. Li, P.; Shen, Y.; You, M.; Zhang, Y.; Yan, J.; Li, D.; Bai, S. Effect of grape pomace on fermentation quality and aerobic stability of sweet sorghum silage. *Anim. Sci. J.* 2017, 88, 1523–1530. <https://doi.org/10.1111/asj.12791>
50. Li, P.; Shen, Y.; You, M.; Zhang, Y.; Yan, J.; Li, D.; Bai, S. Effect of grape pomace on fermentation quality and aerobic stability of sweet sorghum silage. *Anim. Sci. J.* 2017, 88, 1523–1530. <https://doi.org/10.1111/asj.12791>
51. Liang, Z.; Su, H.; Lin, X.; He, Z.; Li, W.; Deng, D. Microbial communities and amino acids during the fermentation of Wuyi Hong Qu Huangjiu. *LWT-Food Sci. Technol.* 2020, 130, 109743. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109743>
52. Lisiecka K.; Wójtowicz, A. Possibility to save water and energy by application of fresh vegetables to produce supplemented potato-based snack pellets. *Processes* 2020, 8, 2, 153. <https://doi.org/10.3390/pr8020153>
53. Lisiecka, K.; Wójtowicz, A. Effect of fresh beetroot application and processing conditions on some quality features of new type of potato-based snacks. *LWT-Food Sci. Technol.* 2021 b, 141, 110919. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110919>
54. Lisiecka, K.; Wójtowicz, A. The production efficiency and specific energy consumption during processing of corn extrudates with fresh vegetables addition. *Agric. Eng.* 2019, 23, 15–23. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2019-0012>
55. Lisiecka, K.; Wójtowicz, A.; Bouasla, A.; Kasprzak, K. Design of new gluten-free extruded rice snack products supplemented with fresh vegetable pulps: The effect on processing and functional properties. *Int. Agroph.* 2021 c, 35, 41–60. <https://doi.org/10.31545/intagr/132121>
56. Lisiecka, K.; Wójtowicz, A.; Gancarz, M. Characteristics of newly developed extruded products supplemented with plants in a form of microwave-expanded snacks. *Materials* 2021 a, 14, 11, 2791. <https://doi.org/10.3390/ma14112791>

57. Lopez, V.M.; De la Cruz, F.B.; Barlaz, M.A. Chemical composition and methane potential of commercial food wastes. *Waste Manag.* 2016, 56, 477–490. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.024>
58. Lue-lue, H.; Min, Z.; ArunS, M.; Dong-feng, S.; Guan-wei, T.; Shameel, T. Studies on decreasing energy consumption for a freeze-drying process of apple slices. *Dry. Technol.* 2009, 27, 938–946. <https://doi.org/10.1080/07373930902901844>
59. Luo, S.; Chan, E.; Masatcioglu, M.T.; Erkinbaev, C.; Paliwal, J.; Koksel, F. Effects of extrusion conditions and nitrogen injection on physical, mechanical, and microstructural properties of red lentil puffed snacks. *Food Bioprod. Process.* 2020, 121, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.02.002>
60. Masli, M.D.P.; Gu, B.J.; Rasco, B.A.; Ganjyal, G.M. Fiber-rich food processing byproducts enhance the expansion of cornstarch extrudates. *J. Food Sci.* 2018, 83, 2500–2510. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14290>
61. Mateus, A.R.S.; Pena, A.; Sanches-Silva, A. Unveiling the potential of bioactive compounds in vegetable and fruit by-products: Exploring phytochemical properties, health benefits, and industrial. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 2024, 48, 100938. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100938>
62. Matysiak, A.; Wójtowicz, A.; Oniszczyk, T. Process efficiency and energy consumption during the extrusion of potato and multigram formulations. *Agric. Eng.* 2018, 22, 49–57. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2018-0015>
63. Mironeasa, S.; Coțovanu, I.; Mironeasa, C.; Ungureanu-Iuga, M. A review of the changes produced by extrusion cooking on the bioactive compounds from vegetal sources. *Antioxidants* 2023, 12, 1453. <https://doi.org/10.3390/antiox12071453>
64. Mishra, D.; Muduli, K.; Sevcik, L.; Jana, S.K.; Ray, M. Combating of associated issues for sustainable agri-food sectors. *Sustainability* 2023, 15, 10096. <https://doi.org/10.3390/su151310096>
65. Mitrus, M.; Combrzyński, M.; Biernacka, B.; Wójtowicz, A.; Milanowski, M.; Kupryaniuk, K.; Gancarz, M.; Soja, J.; Różyło, R. Fresh broccoli in fortified snack pellets: extrusion-cooking aspects and physical characteristics. *Appl. Sci.* 2023, 13, 8138. <https://doi.org/10.3390/app13148138>
66. Munazah M., Naik H.R., Reshi M., Mir S.A., Rouf A. Development and evaluation of extruded product of rice flour and apple pomace. *The Bioscan* 2018, 13, 1, 21-26.

67. Naseem, Z.; Bhat, N.A.; Mir, S.A. Valorisation of apple pomace for the development of high-fibre and polyphenol-rich wheat flour cookies. *Sci. Rep.* 2024, 14, 25912. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77377-8>
68. Neves, C.; Pinto, A.; Gonçalves, F.; Wessel, D.F. Changes in elderberry (*sambucus nigra* l.) juice concentrate polyphenols during storage. *Appl. Sci.* 2021, 11, 15, 6941. <https://doi.org/10.3390/app11156941>
69. Offiah, V.; Kontogiorgos, V.; Falade, K.O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2019, 59, 2979–2998. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1480007>
70. Palatsi, J.; Affes, R.; Fernandez, B.; Alves, M.M.; Flotats, X. Influence of adsorption and anaerobic granular sludge characteristics on long chain fatty acids inhibition proces. *Water Res.* 2012, 46,15, 5268-5278. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.07.008>
71. Pandey, A.K.; Thakur, S.; Mehra, R.; Kaler, R.S.S.; Paul, M.; Kumar, A. Transforming Agri-food waste: Innovative pathways toward a zero-waste circular economy. *Food Chem. X.* 2025, 28, 102604. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102604>
72. Pazera, A.; Slezak, R.; Krzystek, L.; Ledakowicz, S.; Bochmann, G.; Gabauer, W.; Helm, S.; Reitmeier, S.; Marley, L.; Gorga, F. Biogas in Europe: Food and beverage (FAB) waste potential for biogas production. *Energy Fuels* 2015, 29, 4011–4021. <https://doi.org/10.1021/ef502812s>
73. Pismag, R.Y.; Rivera, J.D.; Hoyos, J.L.; Bravo, J.E.; Roa, D.F. Effect of extrusion cooking on physical and thermal properties of instant flours: a review. *Front. Sustainable Food Syst.* 2024, 8, 1398908. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1398908>
74. Polak, N.; Kalisz, S.; Hać-Szymańczuk, E.; Kruszewski, B. Impact of conventional pasteurization, high temperature short time, ultra-high temperature, and storage time on physicochemical characteristics, bioactive compounds, antioxidant activity, and microbiological quality of fruit nectars. *Foods* 2024, 13, 3963. <https://doi.org/10.3390/foods13233963>
75. Potter, R.; Stojceska, V.; Plunkett, A. The use of fruit powders in extruded snacks suitable for Children’s diets. *LWT - Food Sci. Technol.* 2013, 51, 2, 537–544. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.015>
76. Qian, S.; Chen, L.; Xu, S.; Zeng, C.; Lian, X.; Xia, Z.; Zou, J. Research on methane-rich biogas production technology by anaerobic digestion under carbon neutrality: a review. *Sustainability* 2025, 17, 1425. <https://doi.org/10.3390/su17041425>

77. Quiles, A.; Campbell, G.M.; Struck, S.; Rohm, H.; Hernando, I. Fiber from fruit pomace: A review of applications in cereal-based products. *Food Rev. Int.* 2016, 34(2), 1–20. <https://doi.org/10.1080/87559129.2016.1261299>
78. Raczkowska, E.; Serek, P. Health-promoting properties and the use of fruit pomace in the food industry — a review. *Nutrients* 2024, 16, 2757. <https://doi.org/10.3390/nu16162757>
79. Ramírez-Anaya, J.P.; Castañeda-Saucedo, M.C.; Olalla-Herrera, M.; Villalón-Mir, M.; Serrana, H.G.; Samaniego-Sánchez, C. Changes in the antioxidant properties of extra virgin olive oil after cooking typical mediterranean vegetables. *Antioxidants* 2019, 8, 8, 246. <https://doi.org/10.3390/antiox8080246>
80. Ramírez-Anaya, J.P.; Samaniego-Sánchez, C.; Castañeda-Saucedo, M.C.; Villalón-Mir M.; López-García de la Serrana, H. Phenols and the antioxidant capacity of Mediterranean vegetables prepared with extra virgin olive oil using different domestic cooking techniques. *Food Chem.* 2015, 188, 430–438. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.124>
81. Ran, J.; Tang, Y.; Mao, W.; Meng, X.; Jiao, L.; Li, Y.; Zhao, R.; Zhou, H. Optimization of the fermentation process and antioxidant activity of mixed lactic acid bacteria for honeysuckle beverage. *Front. Microbiol.* 2024, 15, 1364448. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1364448>
82. Râpă, M.; Darie-Niță, R.N.; Coman, G. Valorization of fruit and vegetable waste into sustainable and value-added materials. *Waste* 2024, 2, 258–278. <https://doi.org/10.3390/waste2030015>
83. Rațu, R.N.; Veleșcu, I.D.; Stoica, F.; Usturoi, A.; Arsenoaia, V.N.; Crivei, I.C.; Postolache, A.N.; Lipșa, F.D.; Filipov, F.; Florea, A.M.; Chițea, M.A.; Brumă, I.S. Application of agri-food by-products in the food industry. *Agriculture* 2023, 13, 1559. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081559>
84. Sarangi, P.K.; Pal, P.; Singh, A.K.; Sahoo, U.K.; Prus, P. Food waste to food security: transition from bioresources to sustainability. *Resources* 2024, 13, 164. <https://doi.org/10.3390/resources13120164>
85. Šárka, E.; Sluková, M.; Henke, S. Changes in phenolics during cooking extrusion: a review. *Foods* 2021, 10, 2100. <https://doi.org/10.3390/foods10092100>
86. Schmid, V.; Steck, J.; Mayer-Miebach, E.; Behnlian, D.; Bunzel, M.; Karbstein, H.P., Emin, M.A. Extrusion processing of pure chokeberry (*Aronia melanocarpa*) pomace:

- impact on dietary fiber profile and bioactive compounds. *Foods* 2021, 10, 518. <https://doi.org/10.3390/foods10030518>
87. Schmid, V.; Steck, J.; Mayer-Miebach, E.; Behsnilian, D.; Briviba, K.; Bunzel, M.; Karbstein, H.P.; Emin, M.A. Impact of defined thermomechanical treatment on the structure and content of dietary fiber and the stability and bioaccessibility of polyphenols of chokeberry (*Aronia melanocarpa*) pomace. *Food Res. Int.* 2020, 134, 109232. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109232>
 88. Schmid, V.; Trabert, A.; Schäfer, J.; Bunzel, M.; Karbstein, H.P.; Emin, M.A. Modification of apple pomace by extrusion processing: Studies on the composition, polimer structures and functional properties. *Foods* 2020, 9, 10, 1385. <https://doi.org/10.3390/foods9101385>
 89. Shalini, R.; Gupta, D.K. Utilization of pomace from apple processing industries: a review. *J. Food Sci. Technol.* 2010, 47, 4, 365-371, <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0061-x>
 90. Sharifi, S.; Majzoobi, M.; Farahnaky, A. Development of health extruded maize snacks: Effect of soybean flour and feed moisture content. *Int. J. Food Sci. Technol.* 2021, 56, 7, 3179–3187. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14842>
 91. Simons, C.W.; Hall III, C.; Tulbek, M. Effects of extruder screw speeds on physical properties and in vitro starch hydrolysis of precooked pinto, navy, red, and black bean extrudates. *Cereal Chem.* 2012, 89, 176–181. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-08-11-0104>
 92. Soja, J.; Combrzyński, M.; Oniszczyk, T.; Biernacka, B.; Wójtowicz, A.; Kupryaniuk, K.; Wojtunik-Kulesza, K.; Bąkowski, M.; Gancarz, M.; Mołdoch, J.; et al. The effect of fresh kale (*brassica oleracea var. sabellica*) addition and processing conditions on selected biological, physical, and chemical properties of extruded snack pellets. *Molecules* 2023, 28, 1835. <https://doi.org/10.3390/molecules28041835>
 93. Soldano, M.; Pietri, A.; Bertuzzi, T.; Fabbri, C.; Piccinini, S.; Gallucci, F.; Aureli, G. Anaerobic digestion of mycotoxin-contaminated wheat: Effects on methane yield and contamination level. *Bioenergy Res.* 2021, 14, 313–321. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10161-4>
 94. Sule, S.; Okafor, G.I.; Momoh, O.C.; Gbaa, S.T.; Amonyeye, A.O. Applications of food extrusion technology. *MOJFPT* 2024, 12, 1, 74–84. <https://doi.org/10.15406/mojfpt.2024.12.00301>

95. Szponar, B.; Skrzypek, M.; Krzyszycha, R.; Marzec, A. The impact of selected food processing techniques used in food service technology on its nutritional value and health safety in the context of non-communicable chronic disease epidemics. *Problemy Higieny i Epidemiologii* 2018, 99, 4, 318-326. <http://www.phie.pl/pdf/phe-2018/phe-2018-4-318.pdf>
96. Tama, A.; Karaś, M. The health-promoting potential of fruit pomace and its application in the confectionery industry. *Appl. Sci.* 2025, 15, 5790. <https://doi.org/10.3390/app15105790>
97. Timmermans, E.; Bautil, A.; Brijs, K.; Scheirlinck, I.; Van der Meulen, R.; Courtin, C.M. Sugar levels determine fermentation dynamics during yeast pastry making and its impact on dough and product characteristics. *Foods* 2022, 11, 1388. <https://doi.org/10.3390/foods11101388>
98. Ueda, J.M.; Pedrosa, M.C.; Heleno, S.A.; Caroch, M.; Ferreira, I.C.F.R.; Barros, L. Food additives from fruit and vegetable by-products and bio-residues: a comprehensive review focused on sustainability. *Sustainability* 2022, 14, 5212. <https://doi.org/10.3390/su14095212>
99. Varzakas, T.; Smaoui, S. Global food security and sustainability issues: the road to 2030 from nutrition and sustainable healthy diets to food systems change. *Foods* 2024, 13, 306. <https://doi.org/10.3390/foods13020306>
100. Vaskina, I.; Vaskin, R.; Ostroha, R.; Yukhymenko, M.; Skydanenko, M.; Kupryaniuk, K.; Demkova, L.; Sydorenko, S. Fuel pelletization of digestate: a pathway to renewable and sustainable energy sources. *Fuels* 2025, 6, 32. <https://doi.org/10.3390/fuels6020032>
101. Wang, S.; Zhang, M.; Liu, Y.; Liu, J.; Zheng, T.; Li, Y.; He, S.; Jiang, M.; Wu, L.; Liu, F. Influence of fermentation with lactic bacteria on the structure, functional properties and antioxidant activity of flaxseed gum. *Int. J. Biol. Macromol.* 2024, 281, 136133. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136133>
102. Witczak, T.; Wójtowicz, A.; Witczak, M.; Wikiera, A.; Liszka-Skoczylas, M.; Smoleń, S.; Florkiewicz, A.; Gałkowska, D. Extruded chokeberry pomace as valuable by-product: Effect of extrusion-cooking conditions on composition and nutritional potential. *Ind. Crops Prod.* 2025, 229, 121009. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121009>
103. Wójtowicz, A.; Combrzyński, M.; Biernacka, B.; Oniszcuk, T.; Mitrus, M.; Różyło, R.; Gancarz, M.; Oniszcuk, A. Application of edible insect flour as a novel

- ingredient in fortified snack pellets: processing aspects and physical characteristics. *Processes* 2023, 11, 2561. <https://doi.org/10.3390/pr11092561>
104. Wójtowicz, A.; Combrzyński, M.; Biernacka, B.; Różyło, R.; Bąkowski, M.; Wojtunik-Kulesza, K.; Mołdoch, J.; Kowalska, I. Fresh chokeberry (*Aronia melanocarpa*) fruits as valuable additive in extruded snack pellets: Selected nutritional and physiochemical properties. *Plants* 2023, 12, 3276. <https://doi.org/10.3390/plants12183276>
 105. Wójtowicz, A.; Kolasa, A.; Mościcki, L. Influence of buckwheat addition on physical properties, texture and sensory characteristics of extruded corn snacks. *Pol. J. Food Nutr. Sci.* 2013, 63, 239–244. <https://doi.org/10.2478/v10222-012-0076-2>
 106. Wójtowicz, A.; Mościcki, L. Influence of legume type and addition level on quality characteristics, texture and microstructure of enriched precooked pasta. *LWT-Food Sci. Technol.* 2014, 59, 1175–1185. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.010>
 107. Wu, Y.; Liu, Y.; Jia, Y.; Feng, C.H.; Zhang, H.; Ren, F.; Zhao, G. Effects of thermal processing on natural antioxidants in fruits and vegetables. *Food Res. Int.* 2024, 192, 114797. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114797>
 108. Xu, Y.; Jia, F.; Wu, Y.; Jiang, J.; Zheng, T.; Zheng, H.; Yang, Y. The impact of extrusion cooking on the physical properties, functional components, and pharmacological activities of natural medicinal and edible plants: a review. *Foods* 2025, 14, 1869. <https://doi.org/10.3390/foods14111869>
 109. Yadav, N.; Suvedi, A.; Sharma, A.; Khanal, S.; Verma, R.; Kumar, D.; Khan, Z.; Peter, L. Extrusion technology in food processing: Principles, innovations and applications in sustainable product development. *Food and Humanity* 2025, 5, 100672. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100672>
 110. Yağcı, S.; Altan, A.; Doğan, F. Effects of extrusion processing and gum content on physicochemical, microstructural and nutritional properties of fermented chickpea-based extrudates. *LWT-Food Sci. Technol.* 2020, 124, 109150. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109150>
 111. Zarski, A.; Bajer, K.; Kapuśniak, J. Review of the most important methods of improving the processing properties of starch toward non-food applications. *Polymers* 2021, 13, 832. <https://doi.org/10.3390/polym13050832>
 112. 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. <https://doi.org/10.3390/su141811126>

7. OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORÓW

Lublin, 18.09.2025

mgr inż. Jakub Soja

Katedra Inżynierii Procesowej

Wydział Inżynierii Produkcji Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

ul. Głęboka 31, 20-612 Lublin

jakub.soja@up.lublin.pl

Rada Dyscypliny

Inżynieria Środowiska, górnictwo i energetyka

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

1. Jakub Soja, Özge Özmen, Marta Krajewska, Kamila Kasprzak-Drozd: The effect of apple pomace (*malus domestica* 'gala') addition on processing conditions and antioxidant potential of extruded snacks. *Int. Agrophys.* 2023, 37, 4, 401-413.
<https://doi.org/10.31545/intagr/171927>

mój udział polegał na opracowaniu koncepcji i metodologii badań, prowadzeniu części doświadczalnej, przygotowaniu i analizie danych, przygotowaniu przeglądu literatury, przygotowaniu finalnej wersji manuskryptu. Wkład w artykuł wynosił: **80%**.

2. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszczyk, Marek Gancarz, Renata Różyło: Analysis of the influence of different plasticizing systems in a single-screw extruder on the extrusion-cooking process and on selected physical properties of snack pellets enriched with selected oilseed pomace. *Processes*, 2025, 13, 4, 1247.
<https://doi.org/10.3390/pr13041247>

mój udział polegał na opracowaniu koncepcji badań i metodologii badań, prowadzeniu części doświadczalnej, przygotowaniu i analizie danych, przygotowaniu przeglądu literatury, przygotowaniu finalnej wersji manuskryptu. Wkład w artykuł wynosił: **70%**.

3. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszczyk, Agnieszka Wójtowicz: Management of selected fruit and vegetable pomace in fortified snack pellets through

the single-screw extrusion-cooking under various process conditions. *Journal of Ecological Engineering*, 2025, 26, 11. <https://doi.org/10.12911/22998993/207256>.

mój udział polegał na opracowaniu koncepcji i metodologii badań, prowadzeniu części doświadczalnej, przygotowaniu i analizie danych, przygotowaniu przeglądu literatury, przygotowaniu finalnej wersji manuskryptu. Wkład w artykuł wynosił: 70%.

4. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszcuk, Marek Gancarz, Anna Oniszcuk: Extrusion-cooking aspects and physical characteristics of snacks pellets with addition of selected plant pomace. *Applied Science*, 2024, 14, 19, 8754. <https://doi.org/10.3390/app14198754>

mój udział polegał na opracowaniu koncepcji i metodologii badań, prowadzeniu części doświadczalnej, przygotowaniu i analizie danych, przygotowaniu przeglądu literatury, przygotowaniu finalnej wersji manuskryptu. Wkład w artykuł wynosił: 70%.

5. Jakub Soja, Tomasz Oniszcuk, Iryna Vaskina, Maciej Combrzyński, Agnieszka Wójtowicz: Integration of plant pomace into extruded products: analysis of process conditions, post-production waste properties and biogas potential. *Energies*, 2024, 17, 24, 6476. <https://doi.org/10.3390/en17246476>

mój udział polegał na opracowaniu koncepcji i metodologii badań, prowadzeniu części doświadczalnej, przygotowaniu i analizie danych, przygotowaniu przeglądu literatury, przygotowaniu finalnej wersji manuskryptu. Wkład w artykuł wynosił: 65%.


.....
Podpis

Mersin, 18.09.2025

Özge Özmen

Development and Training Center

MTB Pulse Products Research

3 Ocak Mah. Turgut Özal Blv. Liman D Kaps Yan Akdeniz\ Mersin, Turkey

ozgeozmen15@gmail.com

Rada Dyscypliny

Inżynieria Środowiska, górnictwo i energetyka

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

1. Jakub Soja, Özge Özmen, Marta Krajewska, Kamila Kasprzak-Drozd: The effect of apple pomace (*malus domestica* 'gala') addition on processing conditions and antioxidant potential of extruded snacks. Int. Agrophys. 2023, 37, 4, 401-413.
<https://doi.org/10.31545/intagr/171927>

mój udział polegał na analizie danych oraz przygotowaniu recenzji. Wkład w artykuł wynosił: 5%.

.....

Podpis

Lublin, 18.09.2025

dr Marta Krajewska

Katedra Biologicznych Podstaw Technologii Żywności i Pasz

Wydział Inżynierii Produkcji Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

ul. Głęboka 28, 20-612

marta.krajewska@up.lublin.pl

Rada Dyscypliny

Inżynieria Środowiska, górnictwo i energetyka

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

1. Jakub Soja, Özge Özmen, Marta Krajewska, Kamila Kasprzak-Drozd: The effect of apple pomace (*malus domestica* 'gala') addition on processing conditions and antioxidant potential of extruded snacks. *Int. Agrophys.* 2023, 37, 4, 401-413.
<https://doi.org/10.31545/intagr/171927>

mój udział polegał na analizie wybranych danych oraz edycji finalnej wersji manuskryptu.

Wkład w artykuł wynosił: **10%**.


.....
Podpis

Lublin, 18.09.2025

dr n. med. i n. o zdr. Kamila Kasprzak-Drozd
Katedra Chemii
Zakład Chemii Nieorganicznej
Wydział Farmaceutyczny Uniwersytet Medyczny w Lublinie
ul. Chodźki 4a, 20-093 Lublin
kamilakasprzakdrozd@umlub.pl

Rada Dyscypliny
Inżynieria Środowiska, górnictwo i energetyka
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

1. Jakub Soja, Özge Özmen, Marta Krajewska, Kamila Kasprzak-Drozd: The effect of apple pomace (*malus domestica* 'gala') addition on processing conditions and antioxidant potential of extruded snacks. *Int. Agrophys.* 2023, 37, 4, 401-413.
<https://doi.org/10.31545/intagt/171927>

mój udział polegał na opracowaniu i analizie wybranych danych. Wkład w artykuł wynosił: 5%.

Kamila Kasprzak-Drozd

Podpis

Lublin, 18.09.2025

dr hab. inż. Maciej Combrzyński, prof. uczelni
Katedra Inżynierii Procesowej
Wydział Inżynierii Produkcji Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Głęboka 31, 20-612 Lublin
maciej.combrzynski@up.lublin.pl

Rada Dyscypliny
Inżynieria Środowiska, górnictwo i energetyka
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

1. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszczyk, Marek Gancarz, Renata Różyło:
Analysis of the influence of different plasticizing systems in a single-screw extruder on
the extrusion-cooking process and on selected physical properties of snack pellets
enriched with selected oilseed pomace. Processes, 2025, 13, 4, 1247.
<https://doi.org/10.3390/pr13041247>

mój udział polegał na współpracowaniu koncepcji i metodologii badań, prowadzeniu części
doświadczalnej, przygotowaniu i analizie części danych, przygotowaniu przeglądu literatury,
nadzorze w przygotowaniu manuskryptu. Wkład w artykuł wynosił: **10%**.

2. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszczyk, Agnieszka Wójtowicz:
Management of selected fruit and vegetable pomace in fortified snack pellets through
the single-screw extrusion-cooking under various process conditions. Journal of
Ecological Engineering, 2025, 26, 11. <https://doi.org/10.12911/22998993/207256>.

mój udział polegał na współpracowaniu koncepcji i metodologii badań, analizie części
danych, przygotowaniu przeglądu literatury, zatwierdzeniu manuskryptu. Wkład w artykuł
wynosił: **15%**.

3. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszczyk, Marek Gancarz, Anna Oniszczyk: Extrusion-cooking aspects and physical characteristics of snacks pellets with addition of selected plant pomace. *Applied Science*, 2024, 14, 19, 8754. <https://doi.org/10.3390/app14198754>

Mój udział polegał na współopracowaniu koncepcji i metodologii badań, przygotowaniu i analizie części danych, przygotowaniu przeglądu literatury i nadzorze nad przygotowaniem manuskryptu. Wkład w artykuł wynosił: **15%**.

4. Jakub Soja, Tomasz Oniszczyk, Iryna Vaskina, Maciej Combrzyński, Agnieszka Wójtowicz: Integration of plant pomace into extruded products: analysis of process conditions, post-production waste properties and biogas potential. *Energies*, 2024, 17, 24, 6476. <https://doi.org/10.3390/en17246476>

mój udział polegał na współopracowaniu koncepcji i metodologii badań, przygotowaniu i analizie części danych, przygotowaniu przeglądu literatury i nadzorze nad przygotowaniem manuskryptu. Wkład w artykuł wynosił: **15%**.

.....
Maciej Combrzyński
Podpis

Lublin, 18.09.2025

prof. dr hab. inż. Tomasz Oniszczyk
Katedra Inżynierii Procesowej
Wydział Inżynierii Produkcji Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Głęboka 31, 20-612 Lublin
tomasz.oniszczyk@up.lublin.pl

Rada Dyscypliny
Inżynieria Środowiska, górnictwo i energetyka
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

1. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszczyk, Marek Gancarz, Renata Różyło:
Analysis of the influence of different plasticizing systems in a single-screw extruder on the extrusion-cooking process and on selected physical properties of snack pellets enriched with selected oilseed pomace. *Processes*, 2025, 13, 4, 1247.
<https://doi.org/10.3390/pr13041247>
mój udział polegał na współpracowaniu koncepcji badań. Wkład w artykuł wynosił: **5%**.
2. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszczyk, Agnieszka Wójtowicz:
Management of selected fruit and vegetable pomace in fortified snack pellets through the single-screw extrusion-cooking under various process conditions. *Journal of Ecological Engineering*, 2025, 26, 11. <https://doi.org/10.12911/22998993/207256>.
mój udział polegał na współpracowaniu koncepcji badań. Wkład w artykuł wynosił: **5%**.
3. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszczyk, Marek Gancarz, Anna Oniszczyk:
Extrusion-cooking aspects and physical characteristics of snacks pellets with addition of selected plant pomace. *Applied Science*, 2024, 14, 19, 8754.
<https://doi.org/10.3390/app14198754>

mój udział polegał na współpracowaniu metodologii badań i nadzorze prac. Wkład w artykuł wynosił: 5%.

4. Jakub Soja, Tomasz Oniszcuk, Iryna Vaskina, Maciej Combrzyński, Agnieszka Wójtowicz: Integration of plant pomace into extruded products: analysis of process conditions, post-production waste properties and biogas potential. *Energies*, 2024, 17, 24, 6476. <https://doi.org/10.3390/en17246476>

mój udział polegał na współpracowaniu koncepcji badań. Wkład w artykuł wynosił: 5%.



Podpis

Kraków, 18.09.2025

dr hab. Marek Gancarz

Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, Polska

Instytut Agrofizyki Polskiej Akademii Nauk, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, Polska

Centrum Innowacji i Badań nad Prozdrowotną i Bezpieczną Żywnością, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, ul. Balicka 104, 30-149 Kraków, Polska

marek.gancarz@urk.edu.pl

Rada Dyscypliny

Inżynieria Środowiska, górnictwo i energetyka

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

1. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszcuk, Marek Gancarz, Renata Różyło:
Analysis of the influence of different plasticizing systems in a single-screw extruder on the extrusion-cooking process and on selected physical properties of snack pellets enriched with selected oilseed pomace. Processes, 2025, 13, 4, 1247.
<https://doi.org/10.3390/pr13041247>

Mój udział polegał na wykonaniu części analizy statystycznej. Wkład w artykuł wynosił: 5%.

2. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszcuk, Marek Gancarz, Anna Oniszcuk: Extrusion-cooking aspects and physical characteristics of snacks pellets with addition of selected plant pomace. Applied Science, 2024, 14, 19, 8754.
<https://doi.org/10.3390/app14198754>

Mój udział polegał na wykonaniu części analizy statystycznej. Wkład w artykuł wynosił: 5%.


.....
Podpis

Lublin, 18.09.2025

prof. dr hab. inż. Renata Różyło

Katedra Inżynierii i Maszyn Spożywczych

Wydział Inżynierii Produkcji Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin

renata.rozylo@up.lublin.pl

Rada Dyscypliny

Inżynieria Środowiska, górnictwo i energetyka

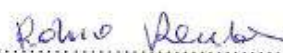
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

1. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszczyk, Marek Gancarz, Renata Różyło:
Analysis of the influence of different plasticizing systems in a single-screw extruder on
the extrusion-cooking process and on selected physical properties of snack pellets
enriched with selected oilseed pomace. Processes, 2025, 13, 4, 1247.
<https://doi.org/10.3390/pr13041247>

mój udział polegał na opracowaniu wybranych danych oraz nadzorze w przygotowaniu
manuskryptu. Wkład w artykuł wynosił: 10%.



.....
Podpis

Lublin, 18.09.2025

prof. dr hab. inż. Agnieszka Wójtowicz
Katedra Inżynierii Procesowej
Wydział Inżynierii Produkcji Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Głęboka 31, 20-612 Lublin
agnieszka.wojtowicz@up.lublin.pl

Rada Dyscypliny
Inżynieria Środowiska, górnictwo i energetyka
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

1. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszcuk, Agnieszka Wójtowicz: Management of selected fruit and vegetable pomace in fortified snack pellets through the single-screw extrusion-cooking under various process conditions. Journal of Ecological Engineering, 2025, 26, 11. <https://doi.org/10.12911/22998993/207256>.

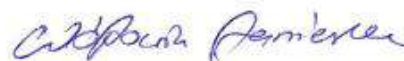
mój udział polegał na analizie części danych i przygotowaniu finalnej wersji manuskryptu.

Wkład w artykuł wynosił: **10%**.

2. Jakub Soja, Tomasz Oniszcuk, Iryna Vaskina, Maciej Combrzyński, Agnieszka Wójtowicz: Integration of plant pomace into extruded products: analysis of process conditions, post-production waste properties and biogas potential. Energies, 2024, 17, 24, 6476. <https://doi.org/10.3390/en17246476>

mój udział polegał na analizie części danych i przygotowaniu finalnej wersji manuskryptu.

Wkład w artykuł wynosił: **10%**.



.....
Podpis

Lublin, 18.09.2025

prof. dr hab. n. med. i n. o zdr. Anna Oniszczyk
Katedra Chemii
Zakład Chemii Nieorganicznej
Wydział Farmaceutyczny Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Chodźki 4a, 20-093
anna.oniszczyk@umlub.pl

Rada Dyscypliny
Inżynieria Środowiska, górnictwo i energetyka
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

1. Jakub Soja, Maciej Combrzyński, Tomasz Oniszczyk, Marek Gancarz, Anna Oniszczyk: Extrusion-cooking aspects and physical characteristics of snacks pellets with addition of selected plant pomace. Applied Science, 2024, 14, 19, 8754. <https://doi.org/10.3390/app14198754>

mój udział polegał na przygotowaniu przeglądu literatury oraz edycji finalnej wersji manuskryptu. Wkład w artykuł wynosił: **10%**.

Anna Oniszczyk
.....
Podpis

Poznań, 18.09.2025

dr Iryna Vaskina
Katedra Inżynierii Biosystemów
Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej
ul. Wojska Polskiego 50, 60-627 Poznań
iryna.vaskina@up.poznan.pl

Rada Dyscypliny
Inżynieria Środowiska, górnictwo i energetyka
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy:

1. Jakub Soja, Tomasz Oniszczyk, Iryna Vaskina, Maciej Combrzyński, Agnieszka Wójtowicz: Integration of plant pomace into extruded products: analysis of process conditions, post-production waste properties and biogas potential. *Energies*, 2024, 17, 24, 6476. <https://doi.org/10.3390/en17246476>

Mój udział polegał na prowadzeniu części prac laboratoryjnych i analizie danych. Wkład w artykuł wynosił: 5%.



Podpis

8. KOPIE PUBLIKACJI

Effect of apple pomace (*Malus domestica* ‘Gala’) addition on the processing conditions and antioxidant potential of extruded snacks

Jakub Soja¹, Özge Özmen², Marta Krajewska³, and Kamila Kasprzak-Drozd⁴

¹Department of Thermal Technology and Food Process Engineering, University of Life Sciences in Lublin, Głęboka 31, 20-612 Lublin, Poland

²Development and Training Center, MTB Pulse Products Research, 3 Ocak Mah. Turgut Özal Blv. Liman D Kaps Yan Akdeniz\ Mersin, Turkey

³Department of Biological Bases of Food and Feed Technologies, University of Life Sciences in Lublin, Głęboka 28, 20-950 Lublin, Poland

⁴Department of Inorganic Chemistry, Medical University of Lublin, Chodźki 4a, 21-093 Lublin, Poland

Received June 22, 2023; accepted September 6, 2023

Abstract. This article presents the results of an analysis of the extrusion-cooking process and of the antioxidant potential of extruded snack pellets and expanded snacks enriched with apple pomace. The use of pomace in the production of food extrudates has great processing potential as it not only contributes to reducing the negative impact of fruit industry by-products on the environment, but also allows for the enrichment of snack products with valuable nutrients. The purpose of this study was to determine the effect of the addition of apple pomace on the extrusion-cooking process and also to determine the antioxidant activity of the obtained products. In the research conducted it was observed that the addition of pomace has the effect of reducing the energy consumption of the extrusion-cooking process, and that the efficiency of the manufacturing process decreases slightly with an increase in the amount of pomace addition in the mixture. During the chemical analyses, it was noted that increases in the phenolic compound content is accompanied by increases in the functional additive content. The results obtained demonstrate that apple pomace is an additive with a functional nature with possible uses in the production of extruded snack pellets.

Key words: extrusion-cooking, apple pomace, extruded snack pellets, process parameters, antioxidant potential

1. INTRODUCTION

The extrusion-cooking process is considered to be a practical method of pressure-thermal processing. In this study, a raw material is subjected to high temperatures over

a short time period in the presence of shear forces and increased pressure (Singha and Muthukumarappan, 2018). This technology allows for the processing of various products of plant origin. This results in extrudates of various types, including breakfast foods, substrates used for biogas production, thermoplastic starch granules for environmentally friendly films, animal feeds and food snack pellets (Lisiecka *et al.*, 2021a).

During the extrusion-cooking process, as a result of thermomechanical interactions, raw materials undergo numerous physicochemical transformations including starch gelation and the denaturation of proteins and enzymes. Moreover, the formation of amylase and fat complexes occurs. Such transformations significantly affect the quality, shape and structure of the extrudates produced (Zaborowska *et al.*, 2015). The previously developed formulation with an appropriate moisture content is introduced into a machine with a high temperature and where it is processed into the final product due to the pressure and shear forces generated (Offiah *et al.*, 2018). In order to carry out this process, it is necessary to use extruder-cookers, which consist of working elements such as a screw and forming die. The screw may be divided into such sections as transport, compression and the elements responsible

for extrusion-cooking. Depending on the design of the plasticizing unit, we can distinguish between single-screw, twin-screw, and multi-screw extruders (Wójtowicz, 2018).

Although the extrusion-cooking process is considered to be rapid and relatively inexpensive, it nevertheless requires the prior analysis of many variables and their appropriate optimization. The main factors affecting the optimization of the process are the physical properties of the raw materials, the speed of the screw, the ratio of the diameter to the length of the entire screw, and also, the temperature and the moisture content of the processed mixture (Oniszczyk *et al.*, 2019). Achieving optimal processing and physico-chemical values can help to reduce the energy consumption of the extruder-cooker, which is a desirable feature in times of energy crisis. This gives the extrusion-process the potential of replacing other types of thermal processing which are characterized by high energy consumption (O'Shea *et al.*, 2014).

As the development of civilization proceeds, the agro-food industry is making significant contributions to the aggravation of environmental problems. The huge amount of post-production waste and by-products that are generated are often mismanaged and thus they negatively affect the environment. Some of the by-products of the agri-food industry are characterized by a high content of nutrients, *i.e.* vitamins, polyphenols or dietary fibre. Thus, such materials can be added to many food products, these include the snack pellets produced by extrusion-cooking. Such measures allow for the attainment of full-flavored products with beneficial environmental effects (Kawacka and Galus, 2021).

Apple pomace is a raw material with a high degree of application potential. It is produced as a by-product of the juice-pressing process. After the production process, about 20% of the raw material remains in the form of by-products, and these contain many valuable nutrients and health-promoting components, *i.e.* fibre, sugars, pectins, polyphenolic compounds, and many others (Borycka, 1999; Peschel *et al.*, 2006; Shalini and Gupta, 2010). It is, however, a microbiologically unstable raw material, but immediate on-site processing of the pomace may provide a solution to this problem. It may be stabilized through drying or freezing or perhaps pre-processing (*e.g.*, thermally). Pomace may be suitable for further use in other production processes (Tarko, 2009; Kawecka, 2021). Agri-food industry by-products, including apple pomace, could be used to make a significant contribution to the production of a new type of wholesome food product while simultaneously reducing the negative environmental impact of the processes involved in food processing (Wójtowicz *et al.*, 2014).

The aim of the study was to determine the ways in which the addition of apple pomace to a wheat and corn flour-based recipe mix affects the extrusion-cooking process and also to determine the amount of polyphenols in extruded snack pellets and finished snacks.

2. MATERIALS AND METHODS

Apple pomace (*Malus domestica* 'Gala' variety) purchased from a local supplier (Tomasz Rychlik, Elizówka Exchange, Lublin, Poland) was used for the study. The pomace was mixed proportionally with Type 450 wheat flour (Lubella, Lublin, Poland), corn flour (EDMIR-POL, Chorzów, Poland), salt (Culine, Janikowo, Poland), soda (Gellwe, Zabierzów, Poland) and sugar (Polski Cukier, Toruń, Poland) (Table 1). The pomace was added to make a concentration of 10, 20, and 30%. A mixture without the addition of pomace (the control sample) was also prepared. These particular concentrations of apple pomace were used because the composition of the resulting mixtures ensured the stability of the process, which allowed for an accurate comparison of antioxidant properties to be made *versus* a constant increase in apple pomace concentration. Before the initiation of the extrusion-cooking process, the moisture content of the prepared mixtures was assessed, and, if necessary, it was adjusted to 34%.

Table 1. Percentage content of individual components in mixtures

Raw material (%)	Control sample	Apple pomace (%)		
		10	20	30
Apple pomace	0	10	20	30
Wheat flour	82.5	72.5	62.5	52.5
Corn flour	15	15	15	15
Salt	2	2	2	2
Soda	0.5	0.5	0.5	0.5

The extrusion-cooking process was carried out on a prototype single-screw extruder-cooker Zamak Mercator EXP-45-32, the ratio of the length of the working part to the diameter of the screw being $L/D=20$. Trials were carried out at variable screw speeds of 60, 80, and 100 revolutions per minute. The dough was pressed through a single flat hole with dimensions of 0.3×25 mm. Immediately after leaving the die, the extrudate, in the form of a belt, was guided through a roller system equipped with a fan cooling system and leading to the cutting system, which formed the pellets to a size of 25×25 mm. The final extrudate obtained in this way was carefully spread on metal grids and placed in a shelf laboratory dryer in order to achieve the appropriate moisture content of 9.5-10.5%.

A portion of the pellets, were first properly dried in the laboratory dryer, and then fried in a 2-chamber electric fryer (Caterina Stalgast, Radom, Poland) with a power of 6 kW, in vegetable oil heated to 200°C for several seconds until expanded wheat-corn snacks were obtained. The products thus obtained in the frying process were drained on a previously prepared strainer and then placed on a paper towel to remove excess fat.

The remainder was expanded using a microwave oven (MCP 349/SL, Whirlpool, Benton Harbor, USA) with a power output of 800 W. The products were placed about 0.5 cm apart, on the outside of the plate, in a single row and expanded for 30 s.

The pellets and expanded snacks were then stored in sealed containers, from which samples were taken for individual tests in the subsequent testing phases. In order to carry out some of the tests, the pellets and expanded snacks were ground with an LMN100 laboratory grinder (TestChem, Radlin, Poland) into a uniform powder with particles smaller than 0.3 mm in diameter.

The moisture content of the raw material mixtures and the manufactured food pellets was tested using the drying method described by Wójtowicz and Mościcki (2008) and by applying PN-EN ISO 712:2012. Three measurements were taken for each recipe mixture. The moisture content was determined using the following formula:

$$W = (a - b) (a - c)^{-1} \times 100\%, \quad (1)$$

where: W is the moisture content of the test sample (%), a is the weight of the weighing container with the sample before drying (g g^{-1}), b is the weight of the weighing container with the sample after drying (g g^{-1}), c is the weight of the empty weighing container (g).

In order to obtain the assumed moisture content of the raw material mixtures (34%), the samples were prepared for the extrusion-cooking process according to the formula by Jurga (1985), given below. Measurements were taken in triplicate for each raw material mixture, and the arithmetic mean was considered as the final result, this was rounded to the nearest 0.1%:

$$m_w = (m_x (w_k - w_p)) (100 - w_k)^{-1}, \quad (2)$$

where: m_w is the amount of water to be added to increase the moisture content of a given sample (kg kg^{-1}), w_p is the initial moisture content of the test sample (%), w_k is the desired moisture content of the test sample (%) and m_x is the mass of the given sample (kg kg^{-1}).

The study of the efficiency of the extrusion-cooking process was carried out by determining the weight of the pellets produced at a specific time for all of the prepared raw material mixtures based on the process parameters used. The efficiency was determined using an electronic stopwatch and a balance (DS-788 YAKUDO, Tokyo, Japan) in triplicate for each series of tests. The final result was assumed to be the average of the measurements. The efficiency was calculated according to the formula given by Matysiak *et al.* (2018):

$$Q = m t^{-1}, \quad (3)$$

where: Q is the efficiency (kg h^{-1}), m is the mass of extrudate obtained during measurement (kg), and t is the measurement time (h).

Energy consumption was measured using a standard wattmeter which is an accessory to the extruder-cooker. After evaluating the parameters of the motor mounted in the extruder-cooker, selecting the motor load and the efficiency obtained in given tests, the obtained values were converted into coefficients of specific mechanical energy consumption (SME) according to a formula given by Matysiak *et al.* (2018):

$$SME = (n N^{-1}) (L 100^{-1}) (P Q^{-1}), \quad (4)$$

where: SME is the specific mechanical energy consumption rate (kWh kg^{-1}), n is the extruder-cooker screw speed (1 s^{-1}), N is the maximum screw speed (1 s^{-1}), L is the motor load relative to the maximum (A), P is the rated power (kW kW^{-1}) and Q is the process output (kg h^{-1}).

The stability of the extrusion-cooking process was registered and recorded continuously for each of the prepared mixtures. Temperature changes in each section of the extruder-cooker were recorded to an accuracy of 0.1°C . The measurements were made possible by the thermocouples built into the extruder-cooker cylinder and connected to a meter located in the device's control module. In addition, the temperature of the pellets produced was measured immediately after leaving the die (to the nearest 0.1°C) using an electronic thermometer (ST25 Raytek, Everest, USA). The measurement was carried out three times for each raw material mixture, and the average of the measurements was taken as the final result.

The total content of Polyphenolic Compounds (TPC) was measured (it was obtained using ultrasound-assisted extraction) by applying a modified method employing the Folin-Ciocalteu (FC) reagent that was suggested in Kasprzak *et al.* (2018). For this purpose, 200 μL of extract was blended with 1.8 mL of water, Folin reagent (200 μL) was then added, and the mixture was stirred vigorously. Five minutes after the reaction was initiated, 2 mL of 7% Na_2CO_3 was introduced. The sample was subsequently incubated at 40°C for 60 min. Absorbance was measured with the use of a UV-VIS spectrophotometer at 760 nm. The total polyphenolic content was expressed in terms of mg of gallic acid equivalents (GAE) per g of dry mass (d.m.).

Free Radical Scavenging Activity was ascertained using the DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) method in order to determine the free radical scavenging activity of the extracts. The studies were performed based on a modified method originated by Burda and Oleszek (2001) with the use of a UV-VIS spectrophotometer Genesys 20 UV-VIST (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA). The following parameters were used: 517 nm wavelength, measurements every 5 min for 30 min, and the calibration was based on pure methanol. All measurements were repeated three times. The obtained results are presented in terms of RSA and TEAC values.

The Ferric-Reducing Antioxidant Power FRAP reagent was made from solutions prepared in the following way. Acetate buffer (0.3 M, pH 3.6) was mixed with aqueous iron (III) chloride solution (0.02 M) and TPTZ solution (0.01 M) in a 10:1:1 ratio, respectively; then, 500 μL of each extract was placed into separate vials, and 2.5 mL of FRAP basic reagent was added. The vessels were closed, mixed, and placed in a 37°C water bath for 30 min. Absorbance was measured using a UV-VIS spectrophotometer set at 593 nm against a control, in which the extract was replaced with methanol. Each measurement was performed in triplicate. The obtained results are presented as FRAP units (mM of Trolox g^{-1} d.m.) (Soja *et al.*, 2023).

These analyses were carried out in order to check the extrusion-cooking process of the selected recipes in detail taking into account the energy consumption and stability of the process. In addition, the analyses were carried out to check the antioxidant potential of both semi-finished products (pellets) and finished products (snacks) in order to choose the best low energy requirement method for obtaining wholesome snacks with apple pomace.

A principal component analysis (PCA) and a determination of correlations were performed at a significance level of $\alpha = 0.05$. The principal component analysis was used to determine the relationship between the degree of apple pomace addition and the physical parameters describing the obtained products. Statistica software (version 13.0, StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA). The PCA data matrix for the statistical analysis of the test results was composed of 13 columns and 13 rows. The input matrix was scaled automatically. The optimal number of principal components was determined on the basis of the Cattell criterion.

3. RESULTS AND DISCUSSION

At the beginning of the study, the moisture content of the raw material mixtures prepared for the extrusion-cooking process was determined. Due to the examination of the moisture content it was possible to calculate the appropriate amount of water to moisten the mixtures to the assumed optimal moisture content of 34%, which is the optimum value for the mixtures to produce high-quality snack pellets (as determined through preliminary research).

It was observed that the moisture content of the mixtures increased by 6-7.5% with increasing proportions of apple pomace in the raw material mixture. To increase the moisture content of the mixtures with 0, 10, 20, and 30% additions of pomace, 1085, 732, 465, and 125 ml of water were added, respectively, to maintain a 34% moisture content.

The pellets obtained by extrusion-cooking, after temperature and moisture content stabilization in the laboratory dryer, had a moisture content of 9.6 to 10.4%, with the lowest moisture content obtained for pellets without the addition of pomace and the highest for pellets with the

addition of 30% apple pomace. The final moisture content values obtained were in accordance with production standards, which assume an optimal storage moisture content for pellets ranging from 9.5 to 11.5% (Standards and Recommendations of Jedność Ltd., 2022).

In the case of the research conducted by Lisiecka and Wójtowicz (2020), the addition of fruit and vegetable pulp had a very substantial effect on reducing water consumption during the extrusion-cooking process. Trials conducted with mixtures using a 30% addition of leek pulp almost completely eliminated the need to add water to the mixtures immediately before the extrusion-cooking process. A similar relationship was observed in the present study, where the need to add water to the recipe mixture with 30% apple pomace addition relative to the control mixture decreased by 9 times. This is a very good result relative to the results produced by dried fruit additives with reference to the possibility of using pomace in terms of reduced water addition. The possibility of reducing water consumption to add moisture to the mixtures is simultaneously associated with the management of full-value products in the form of pomace and can also produce a positive impact on the perception of the food industry, which, in recent years, has been perceived to have a substantial adverse impact on the environment.

The efficiency of the extrusion-cooking process of producing pellets with apple pomace additives ranged from 19.20 to 32.88 kg h^{-1} (Fig. 1). In considering the blends with additives and blends without additives, the lowest (14.64 kg h^{-1}) and highest efficiencies (38.88 kg h^{-1}) were observed for the extrusion-cooking of the control samples. For the pellets with apple pomace additives, the lowest value was registered for blends with 20 and 30% apple pomace additives and processed at a 60 rpm screw speed (19.20 kg h^{-1}). The highest degree of efficiency

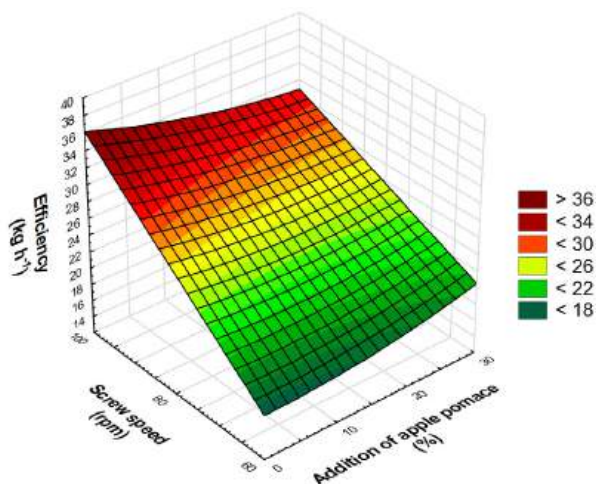


Fig. 1. Results of snack pellets processing efficiency depend on addition of apple pomace and screw speed.

Table 2. Response surface fitting models for extrusion-cooking process efficiency as a function of screw speed and the amount of apple pomace addition

Extruder-cooker plasticizing system	Response surface fitting model (quadratic polynomial)	Coefficient of correlation
L/D=20	$Q \text{ (kg h}^{-1}\text{)} = -10.787 + 0.4223x + 0.466y + 0.0036x^2 - 0.0071xy + 3.75^{E-5}y^2$	0.936

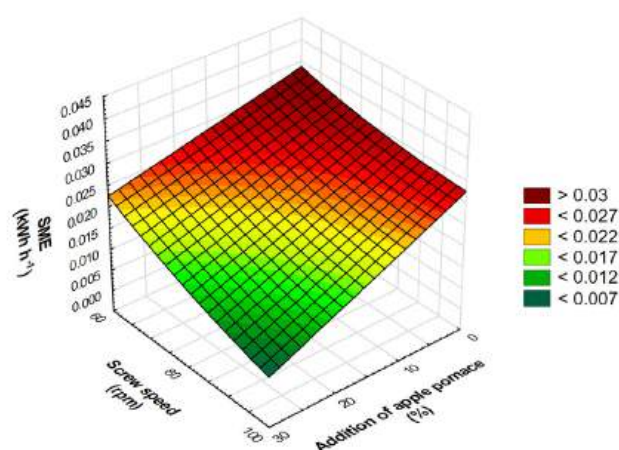
x – addition of apple pomace (%), y – screw speed (rpm).

(32.90 kg h⁻¹) was registered for the raw material mixture with the addition of 30% pomace obtained using the highest speed of the extruder-cooker screw (Table 2).

After analysing the results of the study, it was noted that the main factor influencing the performance of the extrusion-cooking process was the screw speed. In the case analysed, increasing the screw speed resulted in a higher process efficiency. A similar trend was observed by Matysiak *et al.* (2018), who obtained the highest efficiency value at the highest screw speed. In their study, they also showed that a mixture with a 34% moisture content had the highest degree of efficiency as compared to mixtures with other moisture contents. Moreover, the addition of apple pomace had a significant effect on the amount of extrudate produced. Lisiecka and Wójtowicz (2020) noted a decrease in the efficiency of the extrusion-process with increases in additional ingredients in the form of vegetables. During their ongoing research, they determined that increasing the addition of apple pomace resulted in a slight decrease in process efficiency.

Apple pomace is a raw material with a high processing potential, as it is characterized by its irregular shape and specific chemical composition, in particular, its high content of pectin, which is distinguished by its gelling, thickening, and stabilizing properties. Such traits can affect the course of the extrusion-cooking process in a beneficial way (Kawecka and Galus, 2021). The positive effect on performance was mainly due to the appropriate preparation of the mixture, wherein the hard parts of the pomace (seeds, peel, seed chamber and seed nest shells) were properly crushed with a food processor and formed a coherent part of the whole mixture.

During our study, the energy consumption of the extrusion-cooking process (*SME*) ranged from 0.007 to 0.042 kWh kg⁻¹ depending on the process parameters used, including the amount of apple pomace addition (Fig. 2). The lowest *SME* value was recorded for a mixture with 30% apple pomace addition at a screw speed of 100 rpm, while the highest power consumption was evident during the extrusion-cooking process of a mixture with a 10% apple pomace content processed at a screw speed of 60 rpm. Based on the results obtained, it was concluded that the energy consumption of the extrusion-process is substantially influenced by both the screw speed and the addition of apple pomace. In their study on corn extrudates with the addition of carrots, Lisiecka and Wójtowicz (2019)

**Fig. 2.** Results of snack pellets processing specific energy consumption depend on addition of apple pomace and screw speed.

observed a decrease in *SME* with the increasing share of the addition of this vegetable to the blend (%), and recorded energy consumption values in the range of 0.021–0.028 kWh kg⁻¹ (Lisiecka and Wójtowicz, 2019). Similar relationships were noted in the present study, in that the reduction in *SME* occurred after the addition of apple pomace was significant and in the range of 0.007–0.042 kWh kg⁻¹ (Table 3). However, it was observed that the *SME* value decreased at higher screw speeds, which was a different result from the studies of other authors, who observed in their work that when the screw speed was increased, the *SME* value also increased (Kręcis and Wójtowicz, 2017).

As the rotational speed increased for most of the processed raw material blends, the temperature of each section of the extruder-cooker also increased, this affected the viscosity of the processed formulation. These correlations ultimately affected the reduced *SME* value for the apple pomace blends that were processed at higher screw speeds. In considering the dependence of the cylinder temperature on the rotational speed, a similar result was presented in the work of Munazah *et al.* (2018), who also argued for a decrease in *SME* with higher extruder-cooker cylinder temperatures, this was due to a decrease in the viscosity of the processed blend.

The temperature that prevailed in the individual sections of the extruder-cooker (excluding the die) ranged from 55.6 to 94.2°C, with a higher temperature being recorded in the fifth section of the extruder-cooker, where material

Table 3. Response surface fitting models for the specific mechanical energy (*SME*) of the extrusion-cooking process as a function of screw speed and the amount of apple pomace addition

Extruder-cooker plasticizing system	Response surface fitting model (quadratic polynomial)	Coefficient of correlation
L/D=20	$SME \text{ (kWh kg}^{-1}\text{)} = 0.061 + 8.6374 \times 10^{-5} x - 0.0006 y + 4.8675 \times 10^{-7} x^2 - 7.9463 \times 10^{-6} x y + 2.995 \times 10^{-6} y^2$	-0.476

Explanations as in Table 2.

plasticization and compression took place before shaping occurred within the head of the device. At this location, the temperature ranged from 81.3 to 92.3°C (Table 4). Such a temperature range was used to obtain stabilized processing (pressure, intensity of raw material transport through the extruder-cooker barrel). The temperatures used made it possible to obtain a plasticized, homogeneous mass that had no physical damage or scorching after exiting the die. The temperatures in the various sections of the extruder-cooker were characterized by stability relative to the original settings. A similar temperature profile was noted in the study by Lisiecka *et al.* (2021b). During their research which was related to the determination of the effect of the addition of plant products to raw material mixtures on the course of the extrusion-cooking process and the physicochemical properties of the obtained snack pellets, the temperatures of the individual extruder-cooker sections were found to be in the range of 50-105°C.

The highest temperature of the finished product at the exit of the extruder-cooker die (101.7°C) was recorded for a sample with 10% apple pomace and a speed of 80 rpm. By contrast, the lowest temperature (72.1°C) was registered for the control sample, it was obtained at a screw speed of 60 rpm (Fig. 3). Based on the data obtained, it was concluded that the process was stable for all the process variables used (Table 5).

Based on the results of the measurements of product temperatures, it was found that the temperature of the pellets depended on the content of apple pomace additive in the processed raw material mixture and also on the speed of the extruder-cooker screw. In the study, it was observed that the temperature of the pellets gradually increased with increases in the screw speed. Moreover, depending on the amount of apple pomace addition introduced, the temperature increased for mixtures of 10 and 20% and then decreased for pellets with a 30% addition. It should also be noted that the relatively high product temperature was also affected by the small die opening gap (0.3×25 mm), which limited the possibility of free mass flow while leading to greater product heating while it was leaving the extruder-cooker die.

In their study, Trela and Mościcki (2007) showed that the temperature of an extruded product based mainly on grain raw materials was similar for all processed blends and was 90-100°C. In our work, similar temperature ranges

Table 4. Temperature measurements during the extrusion-cooking process of apple pomace pellets using an L/D=20 plasticizing system

Sample		Temperature (°C)				
Addition of apple pomace (%)	Screw speed (rpm)	Section				
		1	2	3	4	5
0	60	55.6	74.5	88.7	86.0	81.6
	80	58.4	75.4	86.5	83.8	82.1
	100	58.5	75.4	87.8	85.0	81.3
10	60	59.1	82.7	86.7	84.1	81.3
	80	60.2	80.3	86.7	84.7	81.5
	100	60.5	80.2	86.8	84.8	81.7
20	60	59.4	79.6	86.4	94.2	82.3
	80	60.1	80.1	86.6	84.7	81.4
	100	61.1	79.6	86.8	84.8	82.3
30	60	59.9	79.6	86.8	84.2	81.5
	80	61.0	80.2	86.4	83.7	82.1
	100	60.2	80.1	86.6	93.9	92.3

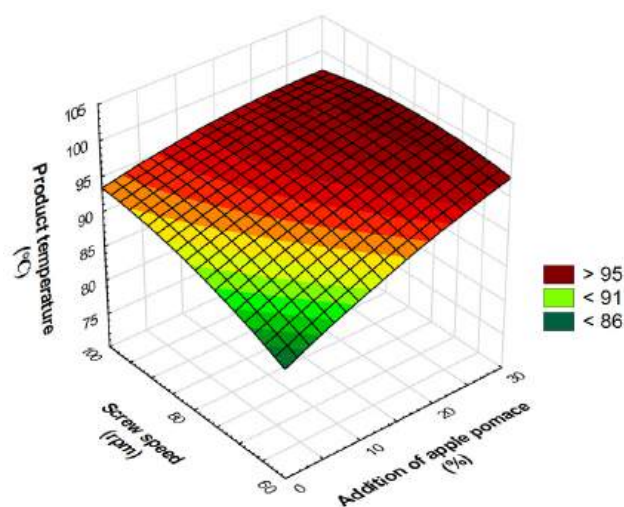
**Fig. 3.** Results of snack pellets temperature depend on addition of apple pomace and screw speed.

Table 5. Response surface fitting models for the temperature of the pellets emerging from the extruder-cooker as a function of screw speed and the amount of apple pomace addition

Extruder-cooker plasticizing system	Response surface fitting model (quadratic polynomial)	Coefficient of correlation
L/D=20	$T(^{\circ}\text{C}) = 100.315 + 0.2059x - 0.2039y - 0.0114x^2 + 0.002xy + 0.0017y^2$	0.456

Explanations as in Table 2.

Table 6. Polyphenol content per gallic acid (mg GAE g⁻¹ d.m. of product) in pellets and expanded snacks with apple pomace

Method of preparation	Screw speed (rpm)	Apple pomace addition (%)	Polyphenol concentration (mg GAE g ⁻¹ d.m.) ± RSD%
Pellet	60	10	0.052 ± 4.44
		20	0.055 ± 3.27
		30	0.071 ± 4.63
	80	10	0.048 ± 3.12
		20	0.065 ± 4.90
		30	0.074 ± 3.84
	100	10	0.046 ± 3.92
		20	0.070 ± 2.76
		30	0.089 ± 4.09
60 80 100	0	0.048 ± 3.19	
Expanding in a fryer	60	10	0.118 ± 4.68
		20	0.106 ± 1.48
		30	0.152 ± 3.97
	80	10	0.106 ± 2.29
		20	0.119 ± 1.28
		30	0.155 ± 3.11
	100	10	0.086 ± 3.74
		20	0.131 ± 3.45
		30	0.171 ± 2.35
60 80 100	0	0.100 ± 0.59	
Expanding in the microwave oven	60	10	0.124 ± 2.77
		20	0.169 ± 0.64
		30	0.156 ± 1.82
	80	10	0.120 ± 3.93
		20	0.127 ± 3.90
		30	0.137 ± 2.94
	100	10	0.118 ± 4.72
		20	0.142 ± 3.02
		30	0.166 ± 1.12
60 80 100	0	0.062 ± 2.37	
Apple pomace			0.313 ± 2.21

were observed, with the highest values being recorded for pellets based on blends with a 20% expeller addition and processed at the highest screw speed (100 rpm).

The Folin-Ciocalteu (F-C) method was used to determine the total polyphenol content, and the test result was converted to a GAE gallic acid equivalent (mg GAE g⁻¹ product dry mass).

In the vast majority of cases, as the content of the functional additive, apple pomace, increases, it was noted that the content of polyphenolic compounds increases (Table 6). Moreover, the polyphenol content retained a positive, and strong correlation with the increasing amount of apple pomace added. The correlation coefficients were found to range from 0.80 for pellets prepared at 60 rpm and using a deep fryer, to 0.97 for samples prepared at 100 rpm in a microwave.

The highest content of polyphenols was recorded in apple pomace (0.31 mg GAE g⁻¹ d.m.), while the lowest content was recorded in pellets without additives, all screw speeds and all preparation methods were considered. Based on the results obtained, it was concluded that the high-pressure and high-temperature extrusion-cooking process did not degrade the polyphenolic active compounds, the content of which increases in proportion to the addition of apple pomace to the pellet (Table 6).

In plants, polyphenols occur mainly in a bound form, as components of lignins and tannins, esters, and glycosides. It is known that the appropriate selection of extrusion-cooking conditions can release phenol acids and flavonoids from the chemical bonds they form with other compounds, but without destroying and deactivating the aglycones (Neves *et al.*, 2021; Schmid *et al.*, 2020; Khanal *et al.*, 2009). In this process, the intensive processing of raw materials takes place. From the research results published by Alonso *et al.* (2000), it is clear that the main factors contributing to the transformation of the input material during extrusion-cooking are related to high temperature and shear forces, which increase with increasing temperature and screw speed. Khanal *et al.* (2009) demonstrated the effects of this process on the content and profile of polyphenols in grape seeds and pomace from these fruits. The cited authors revealed that the application of extrusion-cooking caused a significant increase in the level of low-molecular-weight compounds and also released biologically active monomers and dimers from the polymer chains of polyphenols. In this case, the intensity of the changes taking place depended on

the properties of the raw material (matrix) and the production parameters used. The authors thus confirmed that the appropriate selection of process conditions (temperature, screw speed, moisture content, homogenization) can release phenols from the chemical bonds they form with other compounds, without deactivating the aglycones. This is due to the breaking of the rigid plant tissue components under the influence of this high-temperature and high-pressure process (Kasprzak-Drozd *et al.*, 2022). However, in the case of the experiment that we conducted, there was no clear effect of the auger speed on the content of polyphenolic compounds.

This stage of the research was designed to determine the effect of the snack preparation method on the content of polyphenolic compounds. The results showed that the process of expanding the pellets using a microwave oven guarantees a higher content of polyphenols than processing in a deep fryer, with an analogous additive content and auger speed. The lowest content of polyphenolic compounds was recorded for raw pellets. Both preparation methods, due to the applied microwave energy or traditional heating (in the case of frying), allow for the release of polyphenolic compounds contained in the extrudates from their molecular combinations, hence the increased content of polyphenols in ready-to-eat products as compared to raw pellets.

It has long been known that the preparation of products for consumption results in changes in the content of active compounds in food, including antioxidants. It is widely believed that the effects of high temperatures on food processing are destructive. Indeed, hydrothermal processes (*e.g.*, cooking) have an adverse effect on the content of water-soluble antioxidants, such as polyphenols (Ramírez-Anaya *et al.*, 2015). Different effects may be observed when using processes with non-polar media, such as deep-frying. Frying processes deactivate enzymes and microorganisms present in food and contribute to the removal of non-nutritive components. They also frequently increase the bioavailability of nutrients and improve the texture of products (Szponar *et al.*, 2018). In addition, some authors have described the penetration into food during frying of polyphenolic compounds present in absorbed vegetable oil (Ramírez-Anaya *et al.*, 2015; Ramírez-Anaya *et al.*, 2019). In addition, an increase in the availability of phenols has been demonstrated due to the cracking, or softening, of rigid cell walls and other components of plant cells (vacuoles and apoplasts) with which these plants are associated.

In fried products, however, an increased fat content was noted, thus increasing the caloric content. The amount of fat absorbed depends mainly on the ratio of the outer surface of the product to the inner surface. Chips or cutlets reach a fat content of about 40%, while products with a smaller surface area, such as French fries, reach a content of up to 25% fat. Another disadvantage of frying is the excessive dehydration of the product, as a result of which it becomes

hard and saturated with fat. In addition, during the storage of fats, due to the action of enzymes (lipases) contained in vegetable raw materials, hydrolysis and the formation of free fatty acids can occur. From a nutritional point of view, these are not dangerous, but they reduce the quality of food by causing hydrolytic rancidity. Taste, odour, and colour changes can also occur due to the oxidation of fatty acids under the influence of lipoxygenases (Szponar *et al.*, 2018).

During prolonged heating, under the influence of an elevated temperature, oxygen and the water contained in the fried product, fat breaks down and releases volatile (acrolein) and non-volatile compounds (hydroperoxide, acrylamide). These are toxic and impair the sensory quality of the products. However, it is possible to obtain a product with similar or even more favourable sensory qualities, but with a significantly lower caloric content and increased amounts of polyphenolic compounds by using microwave expansions.

Microwave energy arguably breaks the bonds by which polyphenols are linked to other compounds more effectively than the high temperatures found in frying, hence the increased content of these compounds. Taking steps toward more healthy ways of preparing food, including snacks, and lowering the caloric content of food, is important not only from the perspective of obesity prevention, but also from the point of view of preventing other non-communicable chronic diseases, such as diabetes, neurodegenerative diseases, and cancer. It is worth asking how true in this context Navarro's statement is that "science-based cooking can make a significant contribution to ensuring access to specific nutrients and other food components that generate health-promoting food functionality" (Navarro *et al.*, 2012).

The next step of the study was to analyse antioxidant properties in relation to the free stable radical DPPH. It was found that the free radical scavenging properties increased with the addition of apple pomace for all screw speeds, for both methods of preparing the pellets for consumption and for the raw product (Table 7).

It was also noted that the method used to prepare the pellets for consumption affected the scavenging capacity of the stable free radical DPPH. The product that was prepared in a microwave oven showed the best antioxidant activity. This was significantly greater than that of the raw pellets. Until recently, it was thought that processing contributed significantly to the degradation of natural antioxidants. However, studies conducted in recent years have revealed that the effect of processing on the activity of manufactured foods is inconclusive. Interestingly, a decrease in the content of some natural antioxidants may be accompanied by an increase in the antioxidant activity of the product, this is due to the increased availability of the remaining antioxidants. By contrast, in the processing of plant raw materials, the oxidation of antioxidants, the conversion of antioxidants from antioxidant to a pro-oxidant form, the complexation with other components, enzymatic

Table 7. Reducing power determined by the FRAP method per Trolox (mM Trolox g⁻¹ d.m.) and DPPH scavenging capacity (%) as determined for pellets and expanded snacks with and without apple pomace

Method of preparation	Screw speed (rpm)	Apple pomace addition (%)	Fe ³⁺ reduction capacity (mM Trolox g ⁻¹ d.m.) ± RSD % Fe ³⁺	DPPH scavenging capacity (%)
Pellet	60	10	0.751 ± 5.02	27.030 ± 2.46
		20	0.716 ± 4.20	27.979 ± 3.52
		30	1.289 ± 3.64	45.041 ± 2.12
	80	10	0.677 ± 3.96	23.330 ± 4.02
		20	1.020 ± 4.76	34.043 ± 3.07
		30	1.408 ± 4.83	50.310 ± 1.36
	100	10	0.679 ± 4.15	22.302 ± 1.48
		20	1.088 ± 3.26	35.252 ± 0.97
		30	1.645 ± 5.13	52.128 ± 3.15
	60 80 100	0	0.702 ± 0.48	23.836 ± 2.22
Expanding in a fryer	60	10	2.913 ± 3.76	52.586 ± 3.34
		20	2.883 ± 4.42	57.524 ± 4.01
		30	3.750 ± 3.30	76.459 ± 0.19
	80	10	3.212 ± 4.15	51.974 ± 1.25
		20	2.845 ± 3.79	54.728 ± 2.45
		30	3.455 ± 2.40	75.517 ± 3.72
	100	10	2.040 ± 4.50	43.165 ± 4.66
		20	3.155 ± 3.51	64.889 ± 3.90
		30	3.755 ± 2.12	86.742 ± 1.88
	60 80 100	0	2.463 ± 4.31	45.565 ± 5.03
Expanding in the microwave oven	60	10	3.044 ± 4.39	59.851 ± 0.15
		20	3.491 ± 4.76	81.706 ± 3.34
		30	3.880 ± 5.18	81.398 ± 1.98
	80	10	2.907 ± 4.13	52.012 ± 4.81
		20	2.982 ± 1.04	68.008 ± 2.43
		30	3.195 ± 4.56	68.410 ± 1.11
	100	10	2.293 ± 3.34	56.740 ± 4.89
		20	2.982 ± 4.28	69.316 ± 2.39
		30	4.236 ± 1.52	89.928 ± 0.78
	60 80 100	0	2.463 ± 3.56	30.820 ± 2.45
Apple pomace			867.204 ± 2.12	91.690 ± 2.34

modifications, and the increased oxidative potential of the environment all contribute to a decrease in the antioxidant potential of products (Gumul *et al.*, 2005). Previous work has demonstrated that the antioxidant activity of plant and food extracts depends not only on the quantitative content of polyphenolic compounds, but also on the number of -OH groups in the molecules of these compounds. Moreover,

this activity can be significantly modified by spherical effects, for example, compounds that are derivatives of cinnamic acid are more effective antioxidants than derivatives of benzoic acid (Zielinski *et al.*, 2012).

In order to confirm the antioxidant properties of the tested samples used in our work, the reducing properties of the tested extracts were also measured using a FRAP assay.

This is based on an evaluation of the ability to reduce the iron complex Fe^{3+} - TPTZ (iron-2,4,6-tripyridyl-s-triazine complex) to the Fe^{2+} complex. The results were found to coincide with those obtained for DPPH, *i.e.*, the reducing properties of the tested extracts that were determined using the FRAP method generally increase with increases in the functional additive to the pellet (Table 7) and are highest for apple pomace (4.34 mM Trolox g^{-1} d.m.). The samples without an additive showed the lowest degree of iron III complex to iron II complex reduction in their group (0.70, 2.46, and 1.9 mM Trolox g^{-1} d.m., for raw, fried, and microwave-treated samples, respectively). The treated pellets, both microwaved and fried, showed much higher antioxidant properties as measured by the FRAP method than the raw pellets.

Antioxidant activity most often retains a high degree of positive correlation with the content of polyphenolic compounds. Aglycones have a greater antioxidant potential than glycosides, and high-temperature expansion processes (both due to frying and under microwaves) have the potential to contribute greatly to the breakdown of glycosidic bonds in phenolic compounds. Ramírez-Anaya *et al.* (2015) noted that the free radical DPPH scavenging capacity of foods processed in oil increased significantly. Similarly, a significant increase in antioxidant capacity was confirmed by Bellail *et al.* (2012), who used DPPH to test the free radical scavenging potential of raw and deep-fried potatoes. An increase in the antioxidant capacity was also found by Dini *et al.* (2013) using the FRAP method for fried pumpkin (relative to the raw version). This was determined using various methods, the antioxidant activity of the snacks retains a positive, and generally high correlation with the addition of apple pomace and polyphenol content (Table 8).

After the PCA analysis was performed, 11 new variables were obtained, and the first two principal components describe 81.97% of the variability of the system. The parameters that are contained between the two red circles have the greatest impact on its volatility (Fig. 4a). Pellet Polyphenol concentration (PPC), Expanding fryer Polyphenol concentration (EFPC), Expanding microwave oven Polyphenol concentration (EMOPC), Pellet Fe^{3+} reduction capacity (P Fe^{3+} rc), Pellet DPPH scavenging capacity (P DPPH sc), Expanding fryer Fe^{3+} reduction capacity (EF Fe^{3+} rc), Expanding fryer DPPH scavenging capacity (EF DPPH sc), Expanding microwave oven Fe^{3+} reduction capacity (EMO Fe^{3+} rc), Expanding microwave oven DPPH scavenging capacity (EMO DPPH sc), *SME* and Product temperature (Product temp.) have the greatest influence over system variability. They had a slightly lesser effect on efficiency. A strong positive correlation has been shown between Pellet Polyphenol concentration (PPC), Expanding fryer Polyphenol concentration (EFPC), Expanding microwave oven Polyphenol concentration (EMOPC), Pellet Fe^{3+} reduction capacity (P Fe^{3+} rc), Pellet DPPH scavenging capacity (P DPPH sc), Expanding fryer

Table 8. Pearson's correlation coefficient for pellets and expanded snack as determined using two methods

Variable	Screw speed (rpm)	Pellet			Expanded snack in a fryer			Microwave oven expanded snack		
		Total polyphenols	% scavenging DPPH	FRAP	Total polyphenols	% scavenging DPPH	FRAP	Total polyphenols	% scavenging DPPH	FRAP
% of apple pomace addition		0.922	0.873	0.785	0.802	0.953	0.898	0.884	0.932	0.962
total polyphenols	60	-	0.994	0.964	-	0.936	0.981	-	0.993	0.956
% DPPH scavenging		-	-	0.987	-	-	0.977	-	-	0.976
% of apple pomace addition		0.947	0.785	0.929	0.932	0.974	0.776	0.888	0.938	0.886
total polyphenols	80	-	0.900	0.981	-	0.906	0.740	-	0.956	0.999
% DPPH scavenging		-	-	0.957	-	-	0.693	-	-	0.947
% of apple pomace addition		0.934	0.791	0.925	0.884	0.926	0.851	0.974	0.992	0.937
total polyphenols	100	-	0.949	0.991	-	0.995	0.991	-	0.989	0.859
% DPPH scavenging		-	-	0.963	-	-	0.977	-	-	0.925

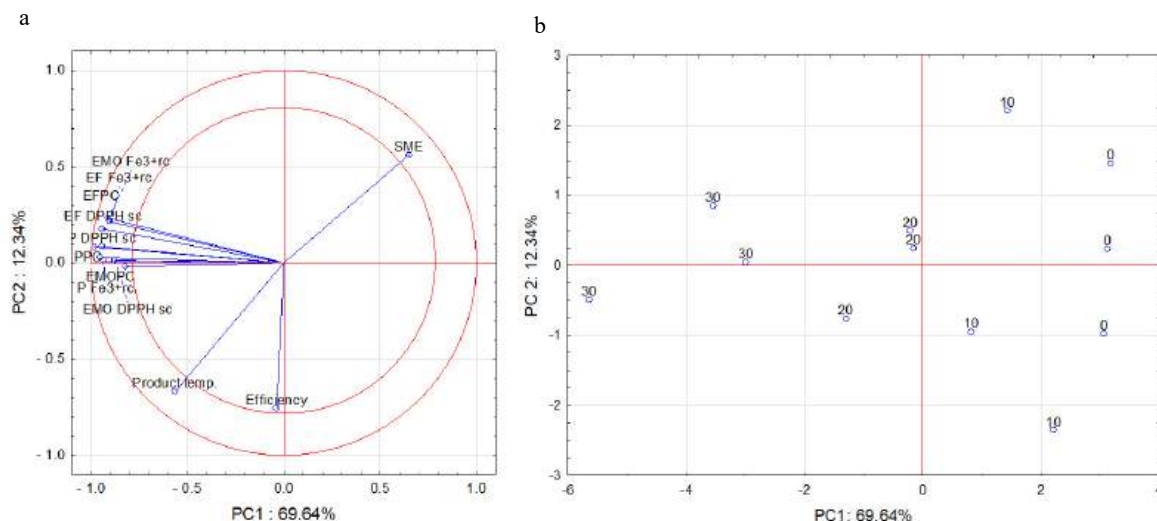


Fig. 4. Loading plot (a) and score plot (b) of the principal component analysis (PC1 and PC2) carried out for addition of apple pomace and tested parameters.

Fe^{3+} reduction capacity (EF Fe^{3+}rc), Expanding fryer DPPH scavenging capacity (EF DPPH sc), Expanding microwave oven Fe^{3+} reduction capacity (EMO Fe^{3+}rc) and Expanding microwave oven DPPH scavenging capacity (EMO DPPH sc). On the other hand, a substantially negative correlation was found between SME and Product temperature (Product temp.). There was no correlation found between Pellet Polyphenol concentration (PPC), Expanding fryer Polyphenol concentration (EFPC), Expanding microwave oven Polyphenol concentration (EMOPC), Pellet Fe^{3+} reduction capacity (P Fe^{3+}rc), Pellet DPPH scavenging capacity (P DPPH sc), Expanding fryer Fe^{3+} reduction capacity (EF Fe^{3+}rc), Expanding fryer DPPH scavenging capacity (EF DPPH sc), Expanding microwave oven Fe^{3+} reduction capacity (EMO Fe^{3+}rc), Expanding microwave oven DPPH scavenging capacity (EMO DPPH sc) and Efficiency.

The PCA analysis shows that the first main component of PC1 in as much as 69.64% of cases describes the use of the apple pomace supplement (Fig. 4b). The positive higher PC1 principal component values describe the results without any use of the apple pomace additive, and the negative PC1 principal component values describe the results with the use of the apple pomace additive.

The same relationship was observed for the first (PC1) and third (PC3) principal components (Fig. 5a, b). The first (PC1) and third (PC3) principal components describe 79.09% of the variability of the system. However, only the parameters of polyphenols and FRAP in this system have the greatest impact on its variability. They are the Pellets Polyphenol concentration (PPC), Expanding fryer Polyphenol concentration (EFPC), Expanding microwave oven Polyphenol concentration (EMOPC), Pellet Fe^{3+} reduction capacity (P Fe^{3+}rc), Pellet DPPH scavenging

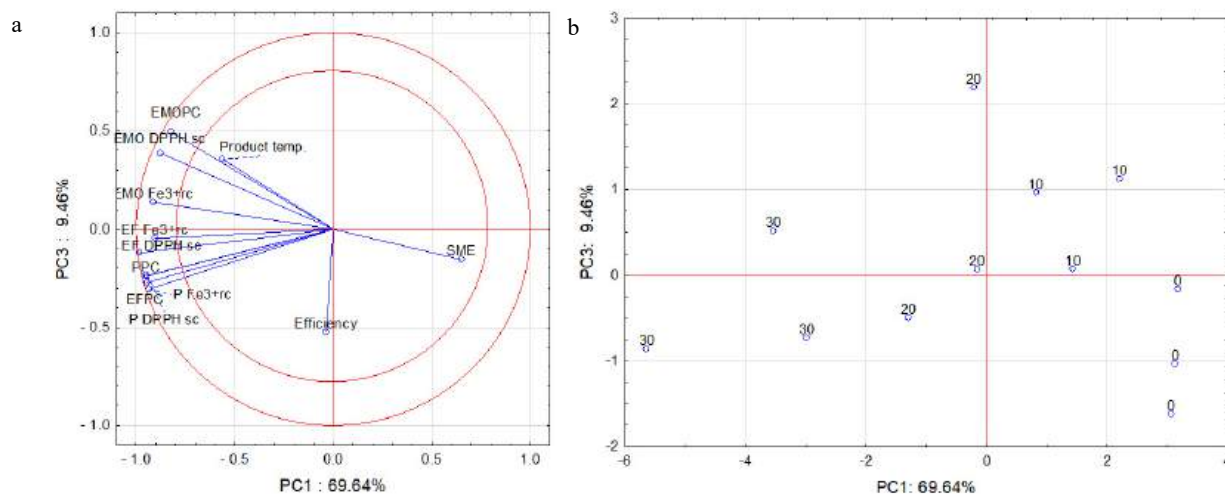


Fig. 5. Loading plot (a) and score plot (b) of the principal component analysis (PC1 and PC3) carried out for addition of apple pomace and tested parameters.

capacity (P DPPH sc), Expanding fryer Fe³⁺ reduction capacity (EF Fe3+rc), Expanding fryer DPPH scavenging capacity (EF DPPH sc), Expanding microwave oven Fe³⁺ reduction capacity (EMO Fe3+rc) and the Expanding microwave oven DPPH scavenging capacity (EMO DPPH sc) are substantially positively correlated with each other.

The pellet polyphenol concentration (PPC), expanding fryer polyphenol concentration (EFPC), expanding microwave oven polyphenol concentration (EMOPC), pellet Fe³⁺ reduction capacity (P Fe3+rc), pellet DPPH scavenging capacity (P DPPH sc), expanding fryer Fe³⁺ reduction capacity (EF Fe3+rc), expanding fryer DPPH scavenging capacity (EF DPPH sc), expanding microwave oven Fe³⁺ reduction capacity (EMO Fe3+rc), expanding microwave oven DPPH scavenging capacity (EMO DPPH sc) are all substantially correlated with the addition of apple pomace in a quantity of 30%, but *SME* is only positively correlated to a weak extent with no addition of apple pomace (Fig. 4a, b).

4. CONCLUSIONS

The responsible management of the by-products of the agri-food industry is an important element contributing to a reduction in the negative impact of the agri-food industry on the environment. The search for a way to process fruit industry by-products, allowing for the greatest possible recovery of the available and active substances in such products, has been a widely discussed topic in recent years.

The addition of apple pomace to food products is not only associated with the appropriate management of this type of product, which in turn is associated with a beneficial impact on the environment, but it also makes it possible to obtain a new type of product with a high nutritional potential due to the presence of health-promoting components (Kawecka and Galus, 2021).

Food products containing apple pomace can thus be classified as zero-waste products, which is consistent with the overall trends of the global market (Kaszuba and Pycia, 2022). Based on the research conducted, it may be concluded that apple pomace as a component of the raw material mixture of food pellets and added in the right amount, favourably affects the parameters of the extrusion-cooking process and significantly increases the antioxidant potential of snacks.

In our work, it was noted that the most favourable blends in terms of process parameters and antioxidant potential were those with 20 and 30% addition due to their high efficiency and relatively low specific mechanical energy values while showing a high antioxidant potential compared to the other blends.

Blends with a 20 and 30% addition had higher efficiency and lower specific mechanical energy values as compared to blends with a 10% addition. In addition, some blends with a 10% addition, and mixtures with a 20 and 30% addition showed a much lower polyphenol and 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl scavenging capacity by up to about 25-30%.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

5. REFERENCES

- Alonso R., Grant G., Dewey P., and Marzo F., 2000. Nutritional assessment *in vitro* and *in vivo* of raw and extruded peas (*Pisum sativum* L.). J. Agric. Food Chem., 48(6), 2286-2290. <https://doi.org/10.1021/jf000095o>
- Bellail A.A., Omayma E.S., Mohammed M.Y., Ahmed M., and El-Gamal A., 2012. Effect of home-cooking methods on phenolic composition and antioxidant activity of sweet-potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) cultivars grown in Egypt. Food Nutrition Sci., 3(4), 490-499. <https://doi.org/10.4236/fns.2012.34069>
- Borycka B., 1999. Utilization of selected waste products of the fruit and vegetable industry. Przem. Ferment. Owoc.-Warz., 11, 38-40.
- Burda S., and Oleszek W., 2001. Antioxidant and antiradical activities of flavonoids. J. Agric. Food Chem., 49(6), 2774-2779. <https://doi.org/10.1021/jf001413m>
- Dini I., Tenore G.C., and Dini A., 2013. Effect of industrial and domestic processing on antioxidant properties of pumpkin pulp. LWT Food Sci. Technol., 53(1), 382-385. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.01.005>
- Gumul D., Korus J., and Achremowicz B., 2005. Effect of processing on antioxidant activity of raw materials of plant origin. ŻNTJ, 12, 4(45), 41-48. ISSN: 0973-7049.
- Jurga R., 1985 Cereal Processing. Part 3. Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warsaw.
- Kasprzak K., Oniszczyk T., Wójtowicz A., Waksmundzka-Hajnos M., Olech M., Nowak R., Polak R., and Oniszczyk A., 2018. Phenolic acid content and antioxidant properties of extruded corn snacks enriched with fresh feces. J. Anal. Methods Chem., 11, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2018/7830546>
- Kasprzak-Drozd K., Oniszczyk T., Kowalska I., Mołdoch J., Combrzyński M., Gancarz M., Dobrzański B., Jr., Kondracka A., and Oniszczyk A., 2022. Effect of the production parameters and *in vitro* digestion on the content of polyphenolic compounds, phenolic acids, and antiradical properties of innovative snacks enriched with wild garlic (*Allium ursinum* L.) Leaves. Int. J. Mol. Sci., 23(22), 14458. <https://doi.org/10.3390/ijms232214458>
- Kawecka L., and Galus S., 2021. Fruit pomace - characteristics and management options. Technological Progress in Food Processing, 1, 156-167.
- Kaszuba J., and Pycia K., 2022. Management of Food Industry By-Products in The Production of Food with Health Possibilities of Potential. Food Industry, 76(9), 30-37. <https://doi.org/10.15199/65.2022.9.5>
- Khanal R.C., Howard L.R., and Prior R.L., 2009. Procyanidin content of grape seed and pomace, and total anthocyanin content of grape pomace as affected by extrusion processing. Int. J. Food Sci., 74(6), 174-182. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01221.x>
- Kręcis M., and Wójtowicz A., 2017. Evaluation of selected properties of gluten-free instant gruels processed under various extrusion-cooking conditions. Acta Sci. Pol. Technol. Aliment., 16(2), 135-147. <https://doi.org/10.17306/J.AFS.0459>

- Lisiecka K., and Wójtowicz A., 2019. The production efficiency and specific energy consumption during processing of corn extrudates with fresh vegetables addition. *Agric. Eng.*, 23(2), 15-23. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2019-0012>
- Lisiecka K., and Wójtowicz A., 2020. Possibility to save water and energy by application of fresh vegetables to produce supplemented potato-based snack pellets. *Processes*, 8(2), 153. <https://doi.org/10.3390/pr8020153>
- Lisiecka K., Wójtowicz A., Bouasla A., and Kasprzak K., 2021a. Design of new gluten-free extruded rice snack products supplemented with fresh vegetable pulps: the effect on processing and functional properties. *Int. Agrophys.*, 35(1), 41-60. <https://doi.org/10.31545/intagr/132121>
- Lisiecka K., Wójtowicz A., and Gancarz M., 2021b. Characteristics of newly developed extruded products supplemented with plants in a form of microwave-expanded snacks. *Mater.*, 14(11), 2791. <https://doi.org/10.3390/ma14112791>
- Matysiak A., Wójtowicz A., and Oniszczyk T., 2018. Process efficiency and energy consumption during the extrusion of potato and multigrain formulations. *Agric. Eng.*, 22, 49-57. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2018-0015>
- Munazah M., Naik H.R., Reshi M., Mir S.A., and Rouf A., 2018. Development and evaluation of extruded product of rice flour and apple pomace. *The Bioscan*, 13(1), 21-26.
- Navarro V., Serrano G., Lasa D., Aduriz A.L., and Ayo J., 2012. Cooking and nutritional science: Gastronomy goes further. *Int. J. Gastron. Food Sci.*, 1(1), 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2011.11.004>
- Neves C., Pinto A., Gonçalves F., and Wessel D.F., 2021. Changes in Elderberry (*Sambucus nigra* L.) Juice Concentrate Polyphenols during Storage. *Applied Sciences*, 11(15), 6941. <https://doi.org/10.3390/app11156941>
- Offiah V., Kontogiorgos V., and Falade K., 2018. Extrusion Processing of Raw Food Materials and by-products: A Review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 59(18), 2979-2998. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1480007>
- Oniszczyk T., Wójtowicz A., Combrzyński M., Mitrus M., Kupryaniuk K., Matysiak A., Kocira S., and Oniszczyk A., 2019. Selected properties of snacks extruded at various screw speeds supplemented with Moldavian dragonhead seed addition. *Int. Agrophys.*, 33(3), 363-371. <https://doi.org/10.31545/intagr/110842>
- O'Shea N., Arendt E., and Gallagher E., 2014. State of the Art in Gluten-Free Research. *Food Sci.*, 79(6), 1067-1230. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12479>
- Peschel W., Sanchez-Rabaneda F., Diekmann W., Gartzia I., Jimenez D., Lamuela-Raventos R., Buxaderas S., and Codina C., 2006. An industrial approach in the search of natural antioxidants from vegetable and fruit wastes. *Food Chem.*, 97(1), 137-150. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.03.033>
- Ramírez-Anaya J.P., Castañeda-Saucedo M.C., Olalla-Herrera M., Villalón-Mir M., Serrana H.G., and Samaniego-Sánchez C., 2019. Changes in the antioxidant properties of extra virgin olive oil after cooking typical mediterranean vegetables. *Antioxidants*, 8(8), 246. <https://doi.org/10.3390/antiox8080246>
- Ramírez-Anaya J.P., Samaniego-Sánchez C., Castañeda-Saucedo M.C., Villalón-Mir M., and López-García de la Serrana H., 2015. Phenols and the antioxidant capacity of Mediterranean vegetables prepared with extra virgin olive oil using different domestic cooking techniques. *Food Chem.*, 188, 430-438. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.124>
- Schmid V., Trabert A., Schäfer J., Bunzel M., Karbstein H.P., and Emin M.A., 2020. Modification of apple pomace by extrusion processing: Studies on the composition, polymer structures and functional properties. *Foods*, 9(10), 1385. <https://doi.org/10.3390/foods9101385>
- Shalini R., and Gupta D.K., 2010. Utilization of pomace from apple processing industries: a review. *J. Food Sci. Technol.*, 47(4), 365-371. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0061-x>
- Singha P., and Muthukumarappan K., 2018. Single screw extrusion of apple pomace-enriched blends: Extrudate characteristics and determination of optimum processing conditions. *Food Sci. Technol. Int.*, 24(5) 447-462. <https://doi.org/10.1177/1082013218766981>
- Soja J., Combrzyński M., Oniszczyk T., Biernacka B., Wójtowicz A., Kupryaniuk K., Wojtunik-Kulesza K., Bąkowski M., Gancarz M., Młodoch J., Szponar J., and Oniszczyk A., 2023. The effect of fresh kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica*) addition and processing conditions on selected biological, physical and chemical properties of extruded snack pellets. *Molecules*, 28(4), 1835. <https://doi.org/10.3390/molecules28041835>
- Standards and recommendations of the Company Jedność sp. zo.o. 2022. Recommendations for moisture content of pellets in industrial conditions, Wschowa.
- Szponar B., Skrzypek M., Krzyszycha R., and Marzec A., 2018. The impact of selected food processing techniques used in food service technology on its nutritional value and health safety in the context of non-communicable chronic disease epidemics (in Polish). *Problemy Higieny i Epidemiologii*, 99(4), 318-326. <http://www.phic.pl/pdf/phe-2018/phe-2018-4-318.pdf>
- Tarko T., Sobusiak J., and Duda-Chodak A., 2009. Ways of utilizing fruit and vegetable industry waste. *Przem. Ferment. Owoc.-Warz.*, 53(3), 21-31.
- Trela A., and Mościcki L., 2007. Effect of the extrusion process on selected quality characteristics of grain pellets. *ŻNTJ*, 5 (54), 43-54.
- Wójtowicz A., 2018. Extrusion - selected technical and technological aspects (in Polish). *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 595, 131-144. <https://doi.org/10.22630/ZPPNR.2018.595.42>
- Wójtowicz A., and Mościcki L., 2008. Energy consumption during extrusion-cooking of precooked pasta. *Teka Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture*, 8, 311-318.
- Wójtowicz A., Mościcki L., Oniszczyk T., Combrzyński M., and Mitrus M., 2014. The effect of fiber addition on the extrusion-cooking stability and quality of enriched corn snacks. *Teka Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture*, 14(3), 141-146. ISSN 1641-7739.
- Zaborowska Z., Korbas E., and Józwiak I., 2015. Effect of the extrusion process on the content of α -tocopherol in selected cereal products. *Proc. Sci. Technol. Agric. Food Industry*, 70, 4, 47-54.
- Zielinski H., Achremowicz B., and Przygodzka M., 2012. antioxidants of cereal grains. *ŻNTJ*, 1(80), 5-26. <https://doi.org/10.15193/zntj/2012/80/005-026>

Article

Analysis of the Influence of Different Plasticizing Systems in a Single-Screw Extruder on the Extrusion-Cooking Process and on Selected Physical Properties of Snack Pellets Enriched with Selected Oilseed Pomace

Jakub Soja ¹, Maciej Combrzyński ¹, Tomasz Oniszcuk ¹, Marek Gancarz ^{2,3,4} and Renata Różyło ^{5,*}

¹ Department of Food Process Engineering, University of Life Sciences in Lublin, Głęboka 31, 20-612 Lublin, Poland; jakub.soja@up.lublin.pl (J.S.); maciej.combrzynski@up.lublin.pl (M.C.); tomasz.oniszcuk@up.lublin.pl (T.O.)

² Faculty of Production and Power Engineering, University of Agriculture in Krakow, Balicka 116b, 30-149 Krakow, Poland; marek.gancarz@urk.edu.pl

³ Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, Poland

⁴ Centre for Innovation and Research on Pro-Healthy and Safe Food, University of Agriculture in Krakow, Balicka 104, 30-149 Krakow, Poland

⁵ Department of Food Engineering and Machines, University of Life Sciences in Lublin, 28 Głęboka, 20-612 Lublin, Poland

* Correspondence: renata.rozylo@up.lublin.pl

Abstract: By-products generated in the agri-food industry are frequently regarded as waste, despite their significant potential for reutilization as valuable raw materials with both nutritional and functional properties. Nigella and flaxseed pomace, as rich sources of bioactive compounds, have the capacity to enhance the nutritional profile and functional characteristics of extruded products while simultaneously contributing to the reduction in food waste. Uniquely, the present study analyzed the effect of extrusion-cooking process conditions on the efficiency, energy consumption, and selected physical properties of extrudates enriched with nigella and flaxseed pomace. The samples were made using a single-screw extruder-cooker. Two plasticizing (L/D 16 and 20) systems were compared. The highest efficiency, 23.16 kg/h, was reached using 20% nigella pomace with the L/D 16 system. During the whole process, the specific mechanical energy ranged from 0.006 to 0.105 kWh/kg. New information was obtained on the interaction between pomace content and the physical properties of the extrudates. The results showed that the use of 10% nigella pomace maximized the WAI 4.90 and WSI 11.73% for pellets with 30% of nigella seed pomace in the L/D 20 and influenced the change in bulk density, indicating a double innovation: an improvement in extrudate quality and the efficient use of by-products.

Keywords: extrusion-cooking process; process efficiency; plant pomace; processing parameters



Academic Editor: Timothy Langrish

Received: 31 March 2025

Revised: 16 April 2025

Accepted: 18 April 2025

Published: 20 April 2025

Citation: Soja, J.; Combrzyński, M.; Oniszcuk, T.; Gancarz, M.; Różyło, R. Analysis of the Influence of Different Plasticizing Systems in a Single-Screw Extruder on the Extrusion-Cooking Process and on Selected Physical Properties of Snack Pellets Enriched with Selected Oilseed Pomace.

Processes **2025**, *13*, 1247. <https://doi.org/10.3390/pr13041247>

Copyright: © 2025 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

Although the agri-food sector plays a critical role in global food security, it also presents significant environmental challenges [1]. Comprehensive operational framework, encompassing activities from agricultural production to industrial processing, results in the generation of significant volumes of by-products and waste [2,3]. In the absence of effective management strategies, these outputs have the potential to accelerate environmental degradation and compromise ecosystem stability [4]. Advances in technology and the

thorough analysis of by-products in the food industry, combined with initiatives promoting the zero-waste concept, have led to a significant rise in interest in their utilization within the sector [5]. These advancements have contributed to more efficient resource use, reduced waste, and the creation of sustainable and innovative solutions. Recent studies have increasingly explored the use of oilseed and other plant-based by-products in extrusion-cooking processes, demonstrating their potential to enhance the nutritional value, functional properties, and sustainability of extruded products [6,7]. By-products such as oilseed pomace are rich in nutrients and bioactive compounds that offer numerous health benefits [8–10]. They are a natural source of fiber, vitamins, and antioxidants and positively influence the body by improving digestion, boosting immune function, and providing protection against various diseases of the circulatory system [11,12]. Consequently, oilseed pomace holds significant potential beyond traditional use as feed or waste, serving as a valuable raw material in diverse food production processes and industrial applications [13–15].

Considering this potential, extrusion-cooking processing is an ideal method for transforming this type of pomace into functional food products [16]. This method is flexible and efficient because it continuously pushes raw material mixtures through a die, while controlling temperature, pressure, and shear [17–19]. The process shapes the material and enhances its texture, structure, and nutritional value. Adding nutrient-rich plant pomace enables the creation of food products with health benefits beyond basic nutrition [20–22]. This method helps retain and evenly distribute important bioactive compounds, such as fiber, vitamins, and antioxidants, in the final product [23].

Despite the wide potential of the extrusion-cooking process, achieving optimal conditions can be challenging due to the variable nature of plant-based extrudates. Unlike standard raw materials, pomace can differ greatly in terms of moisture content, particle size, fiber concentration, the quantity of fat, and the overall nutritional composition. These changes can influence process stability and the overall efficiency of the extrudates obtained. To ensure consistent results, the process settings must be precisely adjusted [24].

To achieve the desired product characteristics, adjustments often need to be made to major parameters, including screw speed, barrel temperature, and die configuration [25]. In some cases, modifications are required to the plasticization system and the overall application to manage the variability of extrudate properties. This iterative approach ensures the production of high-quality products that meet standards for texture, nutritional value, and sensory attributes [26].

Optimizing extrusion-cooking conditions is essential, not only for product quality but also for environmental and economic benefits. The efficient processing of pomace reduces waste, lowers energy and water consumption, and enhances the efficient use of raw materials, promoting sustainable production. Moreover, the ability to transform low-cost or underutilized by-products into nutritious food products offers significant economic advantages, establishing the extrusion-cooking process as a vital tool in sustainable food production [27].

The aim of this study was to analyze the effect of adding nigella seed (AN) and flaxseed (AF) pomace on the extrusion-cooking process and the properties of the extrudates obtained. Specifically, the study evaluated process efficiency, energy consumption, bulk density, and the functional properties of the extrudates, which were determined using the water absorption index (WAI) and the water solubility index (WSI). The research was conducted using two different plasticizing systems, L/D 16 and L/D 20, allowing for a comparative analysis of their impact on the parameters examined. The extrusion-cooking process was conducted using a ring-shaped forming die. The extrudates were cut immediately after passing through the extruder-cooker die. The results obtained provide insights into the relationships between raw material composition, process conditions, and the final

properties of the extrudates. The comparative analysis of the two plasticizing systems contributes to a better understanding of how technological parameters influence process efficiency and product quality. Importantly, the study represents a dual innovation by simultaneously focusing on enhancing extrudate quality and exploring the valorization of by-products, developments that together present a comprehensive approach to sustainable extrusion-cooking technology.

2. Materials and Methods

A research project was carried out at the Department of Food Process Engineering at the University of Life Sciences in Lublin. The studies focused on using an extrusion-cooking process to produce snack pellets enriched with by-products from the food industry. The aim was to create extrudates with better nutritional value and lower environmental impact. The recipes were based on previous work and included ingredients from local suppliers. The mixtures contained oilseed pomace, potato starch, potato flakes, canola oil, beet sugar, and salt. Food industry by-products were used to cut down the waste and improve sustainability. The extrusion-cooking process was carried out with two different plasticization systems, allowing researchers to analyze how varying process parameters affected the structure and quality of the pellets.

2.1. Extrudates Formulation and Production Using Extrusion-Cooking Process

At the initial stage of the work, mixtures were produced according to established recipes (Table 1). Each recipe included 10%, 20%, and 30% concentrations of nigella and flaxseed pomace. These concentrations were chosen based on the results of previous studies and a review of the available literature; we considered them sufficient to introduce the desired functional changes without negatively affecting the texture and sensory acceptance of the product [28]. The application of more than 30% additive in the mixture could lead to problems during production, such as unstable processing, changes in pressure or temperature, and lower-quality extrudates.

Table 1. The proportional shares of individual components in the mixtures.

Raw Materials	Control Sample	10% Pomace	20% Pomace	30% Pomace
Nigella seed, flaxseed pomace (%)	0	10	20	30
Potato starch (%)	82	72	62	52
Potato flakes (%)	15	15	15	15
Vegetable oil (%)	1	1	1	1
Sugar (%)	1	1	1	1
Salt (%)	1	1	1	1

The oilseed pomace was ground using Germin cup blender model CY-329 (Germin Berlinger, Jarosław, Poland). The mixtures were prepared in batches of 4.5 kg by precisely adjusting the proportions of the components according to the content of plant raw materials and moistured to 34%. To guarantee the consistent dispersion of the components and the correct moisture content, the samples were sieved using a 0.5 mm sieve. After that, blends were stored under controlled conditions for 24 h to stabilize and equalize the parameters of the mixtures.

The moisture content of each sample was determined using a precision moisture analyzer (Radwag, Radom, Poland) capable of measuring with an accuracy of 0.001%. Each mixture was moistured to a predetermined moisture level, as determined by previous research results and current technological recommendations. This stage was crucial to

ensuring that the parameters of the extrusion-cooking process were appropriate and that a product of the desired quality was obtained.

The manufacturing of extrudates containing oilseed pomace was conducted using a single-screw extruder-cooker (EXP-45-32, Zamak Mercator, Skawina, Poland). The extrusion-cooking system featured a plasticizing unit with total length-to-diameter (L/D) ratios of 16 and 20. The extrusion-cooking process was performed at 40, 60, and 80 rpm. The manufacturing of extrudates containing oilseed pomace was carried out using a single-screw extruder-cooker (EXP-45-32, Zamak Mercator, Skawina, Poland). The device was equipped with two plasticizing systems with different length-to-diameter (L/D) ratios—one at 16 and the other at 20. The extrusion-cooking process was conducted at screw speeds of 40, 60, and 80 rpm. The temperature in the various sections of the extruder-cooker was maintained between 30 and 95 °C (Table 2), ensuring optimal processing conditions throughout the extrusion-cooking process. In the case of the L/D 20 configuration, the plasticization system was equipped with an additional section (IV). The material exiting the extruder-cooker was shaped using a forming die in the shape of a ring with a slit thickness of 0.6 mm. Subsequently, the material was portioned using a cutting system located directly behind the extruder-cooker die. The extruded products were placed and dried in a laboratory shelf dryer at 40 °C for 12 h until their moisture content stabilized within the range of 8.5–9.5%. Following the drying process, the extrudates were sealed in ziplock bags to ensure proper storage until further processing.

Table 2. Temperature in different extruder-cooker sections for L/D 16 and 20.

Type of Plant Pomace	Content of the Additive [%]	Screw Speed [RPM]	Type of Plasticization System [L/D]	Temperature of Section I [°C]	Temperature of Section II [°C]	Temperature of Section III [°C]	Temperature of Section IV [°C]	Temperature of Section V [°C]
Control sample	0%	40	16 20	31.40 ± 0.00 30.50 ± 0.00	60.33 ± 0.67 60.03 ± 0.15	75.63 ± 0.50 64.90 ± 0.10	N/A 71.57 ± 0.06	81.80 ± 1.91 72.67 ± 0.06
Control sample	0%	60	16 20	31.80 ± 0.20 30.70 ± 0.00	61.80 ± 0.26 59.93 ± 0.25	77.77 ± 0.31 64.90 ± 0.20	N/A 71.67 ± 0.06	80.40 ± 0.20 72.97 ± 0.06
Control sample	0%	80	16 20	32.37 ± 0.12 30.97 ± 0.12	59.60 ± 1.01 59.83 ± 0.55	76.93 ± 1.34 64.90 ± 0.17	N/A 70.47 ± 0.31	79.37 ± 0.71 69.67 ± 0.31
Nigella seed pomace	10%	40	16 20	37.10 ± 0.36 31.80 ± 0.10	60.00 ± 0.46 31.67 ± 0.29	68.03 ± 1.33 67.27 ± 0.15	N/A 71.57 ± 0.06	70.17 ± 0.06 72.93 ± 0.12
Nigella seed pomace	10%	60	16 20	35.03 ± 0.51 31.50 ± 0.00	60.07 ± 1.08 60.37 ± 1.69	69.77 ± 0.38 66.57 ± 0.59	N/A 71.57 ± 0.15	70.13 ± 0.06 72.67 ± 0.23
Nigella seed pomace	10%	80	16 20	33.33 ± 0.23 31.30 ± 0.00	61.73 ± 0.25 58.73 ± 1.34	69.87 ± 0.29 67.80 ± 0.75	N/A 70.60 ± 0.46	71.70 ± 1.47 70.60 ± 1.05
Nigella seed pomace	20%	40	16 20	38.27 ± 0.06 32.13 ± 0.12	60.03 ± 0.06 60.90 ± 1.21	68.53 ± 0.12 65.30 ± 1.15	N/A 71.83 ± 0.06	70.07 ± 0.06 72.90 ± 0.00
Nigella seed pomace	20%	60	16 20	35.50 ± 0.00 32.40 ± 0.00	60.00 ± 0.75 59.47 ± 0.21	71.73 ± 0.12 68.07 ± 0.06	N/A 75.73 ± 0.12	74.40 ± 0.17 76.77 ± 0.06
Nigella seed pomace	20%	80	16 20	35.03 ± 0.06 32.40 ± 0.00	60.80 ± 1.10 59.47 ± 0.21	72.67 ± 0.40 68.07 ± 0.06	N/A 75.73 ± 0.12	74.47 ± 0.15 76.77 ± 0.06
Nigella seed pomace	30%	40	16 20	34.07 ± 0.06 32.70 ± 0.26	60.20 ± 0.10 69.00 ± 1.39	70.07 ± 0.38 74.30 ± 1.08	N/A 75.57 ± 0.32	78.70 ± 0.10 76.33 ± 0.23
Nigella seed pomace	30%	60	16 20	34.20 ± 0.00 32.20 ± 0.00	60.20 ± 0.00 61.33 ± 1.72	70.90 ± 0.17 69.37 ± 1.93	N/A 75.10 ± 0.10	74.33 ± 0.49 76.07 ± 0.15
Nigella seed pomace	30%	80	16 20	34.53 ± 0.15 32.20 ± 0.00	59.63 ± 0.06 60.03 ± 0.12	69.27 ± 3.06 67.97 ± 0.15	N/A 75.00 ± 0.00	74.43 ± 0.15 75.73 ± 0.06
Flaxseed pomace	10%	40	16 20	36.57 ± 0.06 33.47 ± 0.06	60.20 ± 0.70 69.33 ± 0.40	67.97 ± 0.25 76.50 ± 0.10	N/A 75.80 ± 0.00	73.30 ± 0.10 77.43 ± 0.12
Flaxseed pomace	10%	60	16 20	36.27 ± 0.06 33.53 ± 0.06	59.50 ± 1.08 69.67 ± 0.23	68.07 ± 0.29 75.67 ± 0.06	N/A 75.93 ± 0.06	73.27 ± 0.12 77.37 ± 0.06

Table 2. *Cont.*

Type of Plant Pomace	Content of the Additive [%]	Screw Speed [RPM]	Type of Plasticization System [L/D]	Temperature of Section I [°C]	Temperature of Section II [°C]	Temperature of Section III [°C]	Temperature of Section IV [°C]	Temperature of Section V [°C]
Flaxseed pomace	10%	80	16 20	35.60 ± 0.10 33.40 ± 0.00	59.77 ± 0.67 69.70 ± 0.66	68.37 ± 0.21 76.50 ± 0.26	N/A 76.23 ± 0.06	73.43 ± 0.15 77.63 ± 0.06
Flaxseed pomace	20%	40	16 20	36.70 ± 0.00 33.57 ± 0.06	60.73 ± 0.32 71.00 ± 1.35	67.80 ± 0.36 75.13 ± 0.12	N/A 76.03 ± 0.06	73.50 ± 0.10 77.30 ± 0.00
Flaxseed pomace	20%	60	16 20	36.90 ± 0.00 33.43 ± 0.06	60.03 ± 0.15 69.43 ± 1.05	68.17 ± 0.21 76.73 ± 0.46	N/A 76.10 ± 0.00	73.63 ± 0.06 77.57 ± 0.06
Flaxseed pomace	20%	80	16 20	37.33 ± 0.06 33.40 ± 0.00	59.77 ± 0.31 70.80 ± 0.60	68.60 ± 0.10 76.37 ± 0.58	N/A 76.13 ± 0.06	73.70 ± 0.00 77.70 ± 0.00
Flaxseed pomace	30%	40	16 20	39.80 ± 0.00 34.33 ± 0.06	60.40 ± 0.17 69.83 ± 0.06	68.03 ± 0.21 74.80 ± 0.17	N/A 76.10 ± 0.00	73.70 ± 0.00 77.27 ± 0.06
Flaxseed pomace	30%	60	16 20	38.87 ± 0.15 34.73 ± 0.06	60.00 ± 0.78 70.30 ± 0.17	68.46 ± 0.40 75.50 ± 0.10	N/A 76.03 ± 0.06	73.60 ± 0.10 77.37 ± 0.06
Flaxseed pomace	30%	80	16 20	38.87 ± 0.15 34.97 ± 0.06	60.00 ± 0.78 70.67 ± 0.15	68.46 ± 0.40 75.83 ± 0.31	N/A 76.30 ± 0.10	73.73 ± 0.06 77.60 ± 0.10

N/A—not applicable (section IV was not applicable in this setup).

2.2. Efficiency of the Extrusion-Cooking Process

The efficiency of the extrusion-cooking process (Q) was evaluated by systematically measuring the mass of the extruded material exiting the forming die at 30 s intervals. Processing parameters and feed rates were consistently maintained at stable levels throughout the trial to uphold result accuracy. Each measurement was repeated three times to improve accuracy. The processing time was recorded using an electronic stopwatch, while the extrudates were weighed with a precision balance (DS-788 Yakudo, Tokyo, Japan) accurate to 0.001 kg. Repeating the procedure helped reduce possible errors and ensured more reliable results. The average of the three measurements was used to determine the final process efficiency. The calculation of process efficiency was conducted in accordance with the methodology proposed by Matysiak et al. [29]:

$$Q = \frac{m}{t} \text{ (kg/h)} \quad (1)$$

where Q represents the extrusion-cooking process efficiency (kg/h), m is the extrudate mass obtained through measurement (kg), and t denotes time (h).

2.3. Energy Consumption of the Extrusion-Cooking Process

The power consumption of the extruder-cooker was tracked in real time using a built-in wattmeter, an integral part of the machine's standard monitoring system. To evaluate energy usage, motor load data and process efficiency were analyzed in conjunction with motor specifications and recorded operational parameters. These values were then used to compute the specific mechanical energy (SME) consumption. The final value was calculated as the average of three repetitions. The calculation was carried out following the methodology described by Kręcis [30], with measured data being systematically converted into SME according to a predefined formula:

$$SME = \frac{n}{n_m} \times \frac{O}{100} \times \frac{P}{Q} \text{ (kWh/kg)} \quad (2)$$

SME —specific mechanical energy (kWh/kg); n —extruder-cooker speed (rpm); n_m —max extruder-cooker speed (rpm); O —engine load (%) based on nominal power (kW); Q —extrusion-cooking process efficiency (kg/h).

2.4. Bulk Density of Snack Pellets

The bulk density (BD) of the snack pellets was measured based on the mass and volume of the sample. The mass was recorded using a precision balance (DS-788 Yakudo, Tokyo, Japan) with an accuracy of 0.001 kg. The sample was put into a 0.001 m³ container. Bulk density was calculated as the ratio of mass to volume. This parameter presents the relationship between product shape and weight. To ensure reliable results, the measurement was repeated three times, achieving a precision of 0.01 kg/m³. The average of the three repetitions values was used as the final measurement. The bulk density was derived using the formula provided by Wójtowicz et al. [31]:

$$BD = \frac{m}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3)$$

where *BD* is the bulk density (kg/m³), *m* is the measured mass of the sample (kg), and *V* represents the container's volume (m³).

2.5. Water Absorption Index (WAI)

The water absorption index (WAI) was evaluated following the procedure established by Bouasla et al. [32]. A precisely weighed 0.7 g sample of finely ground extrudates was suspended in 7 mL of distilled water and shaken for 20 min to obtain a homogeneous suspension. After this process, the suspension was centrifuged at a speed of 15,000 rpm for 10 min using a Digicen 21 centrifuge (Labsystem, Kraków, Poland). The supernatant was carefully decanted, and the rest of hydrated gel was weighed using a high-precision balance (WPS 210/C, Radwag, Radom, Poland) with an accuracy of 0.001 g. The final value was calculated as the average of three repetitions. The WAI was calculated using the following formula:

$$WAI = \frac{m_g}{m_s} \text{ (g/g)} \quad (4)$$

where *WAI* represents the water absorption index (g/g), *m_g* denotes the mass of the gel (g), and *m_s* refers to the mass of the dry sample (g).

2.6. Water Solubility Index (WSI)

The liquid fraction obtained after WAI analysis demonstrated evaporation at 110 °C in a laboratory dryer (SLW 53 STD, Pol-Eko Aparatura S.J., Wodzisław Śląski, Poland) until all the water content was completely evaporated. After drying, the solid residue was collected and weighed using a precise balance (WPS 210/C, Radwag, Radom, Poland) with an accuracy of 0.001 g. To ensure reliable results, the WSI was measured three times using the formula presented by Bouasla et al. [32]:

$$WSI = \frac{m_v - m_{dv}}{m_s} \times 100 \text{ (\%)} \quad (5)$$

where *WSI* means the water solubility index (%), *m_v* is the mass of the vessel before drying process (g), *m_{dv}* is the mass of the vessel after drying process (g), and *m_s* denotes the mass of the dry sample (g).

2.7. Principal Component Analysis (PCA)

Statistical calculations were performed using the Statistica application software (version 12.0, StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA). The methods applied included principal component analysis (PCA), analysis of variance (ANOVA), and correlation analysis. All analyses were carried out at a significance level of $\alpha = 0.05$. Principal component analysis was used to examine the relationships between selected process variables and measured extrudate characteristics. The variables included the type of additive, the amount of additive in the mixture, screw speed, and the length-to-diameter (L/D) ratio of the extrusion-cooking

system. To identify connections and patterns between tested factors, PCA was used along with separate data tables for each factor. The table for additive type included 5 columns, representing measured parameters, and 3 rows, each corresponding to a different additive. The table for additive amount had 5 columns and 4 rows, covering all tested concentration levels. For screw speed, the table also had 5 columns and 3 rows. The L/D ratio table included 5 columns and 4 rows. All data tables were automatically rescaled to allow for easy comparison between values. The number of principal components selected in each case was based on the Cattell criterion, which helps to identify the most meaningful components in the dataset.

3. Results and Discussion

This research presents the assessment of major processing parameters in the extrusion-cooking process, including efficiency and specific mechanical energy consumption, as well as an evaluation of the various physical properties of the extrudates obtained. The research compares two plasticizing system configurations (L/D 16 and L/D 20) and the effect of each on selected parameters. The results indicate the existence of differences in processing efficiency and specific mechanical energy consumption.

The extrusion-cooking process is a common method in food production that helps create expanded products with specific textures and properties. The extrudates analyzed in this study represent fully valuable products, offering potential alternatives to commercially available snack pellets. To enhance their nutritional and functional value, we use plant by-products in the form of oilseed pomace—specifically nigella seed and flaxseed. These ingredients not only contribute valuable bioactive compounds but also influence the physicochemical properties of the final product. The results show that changes in the L/D ratio, screw speed, and the amount of pomace have a significant impact on process efficiency and energy consumption. Additionally, the physical characteristics of the extrudates, including bulk density, water absorption index, and water solubility index, were analyzed. The findings show that bulk density varied depending on extrusion-cooking conditions, with structural differences observed between the two processing setups. The incorporation of oilseed pomace influenced WAI and WSI index values, suggesting that there are modifications in water retention capacity and solubility due to the presence of additional fiber, fat, and protein fractions. These differences are crucial for product texture and potential consumer applications.

3.1. Results of Extrusion-Cooking Efficiency and Energy Consumption

The data obtained were used to examine the effect of two different types of plant pomace (nigella seed and flaxseed), added at concentrations of 10%, 20%, and 30%, on the efficiency of the extrusion process. The efficiency was measured in kg/h at different screw speeds (40, 60, and 80 rpm) and two length-to-diameter (L/D) ratios of 16 and 20 (Figure 1).

For the control sample, increased efficiency was observed with increasing screw speed. At 40 rpm, the efficiency was 8.34 kg/h for L/D 16 and 8.48 kg/h for L/D 20. At 80 rpm, the efficiency reached 18.92 kg/h for L/D 16 and 14.36 kg/h for L/D 20, indicating a distinct increase in efficiency for the lower L/D ratio.

At a 10% concentration, Nigella seed pomace showed higher efficiency at lower rpm for L/D 16 compared to L/D 20. At 40 rpm, the efficiencies were 9.64 kg/h for L/D 16 and 9.52 kg/h for L/D 20. At 80 rpm, the material efficiency increased, reaching 17.88 kg/h for L/D 16 and 15.68 kg/h for L/D 20, indicating better process efficiency at a lower L/D ratio. At higher concentrations of nigella seed pomace, efficiency was also higher for L/D 16. At 20% pomace and 80 rpm, efficiency was 23.16 kg/h for L/D 16 and 19.20 kg/h for

L/D 20. A similar trend was observed at a 30% concentration. There was a higher amount of material at 80 rpm, with values of 23.00 kg/h for L/D 16 and 16.32 kg/h for L/D 20.

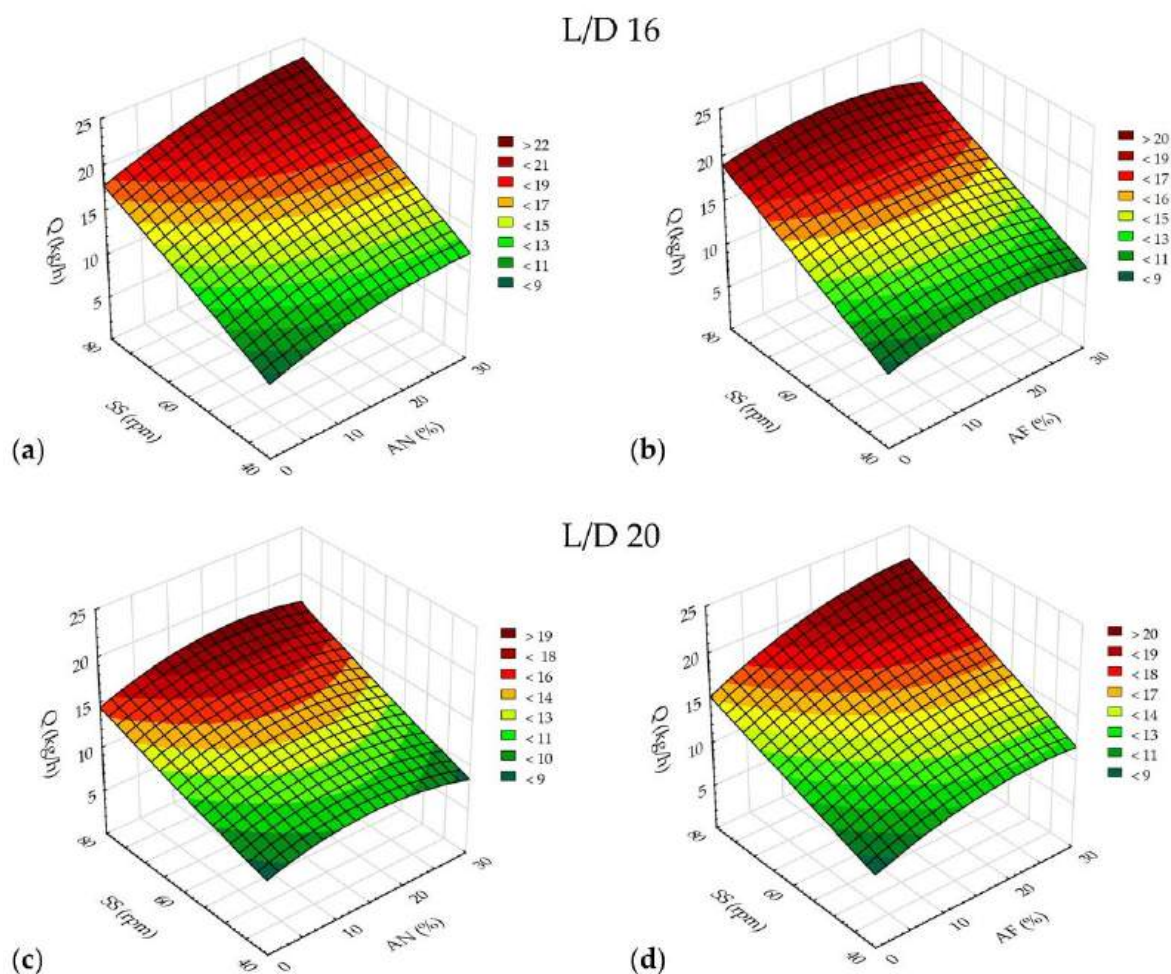


Figure 1. Trend plots of extrusion-cooking efficiency of snack pellets depending on selected plant pomace addition level, screw speed, and type of plasticizing system: (a) nigella seed pomace processed using L/D 16 plasticizing system; (b) flaxseed pomace processed using L/D 16 plasticizing system; (c) nigella seed pomace processed using L/D 20 plasticizing system; (d) flaxseed pomace processed using L/D 20 plasticizing system.

For flaxseed pomace, the efficiency generally increased with screw speed but shows a more balanced value across different concentrations. At 10% pomace, the efficiency at 40 rpm were 10.24 (L/D 16) and 9.84 kg/h (L/D 20), rising to 20.64 kg/h (L/D 16) and 19.24 kg/h (L/D 20) at 80 rpm. For 20% flaxseed pomace, the efficiency increased steadily from 10.84 kg/h (L/D 16) and 11.44 kg/h (L/D 20) at 40 rpm to 19.76 kg/h (L/D 16) and 20.64 kg/h (L/D 20) at 80 rpm. The highest efficiency for flaxseed pomace was recorded at a 30% concentration, with a maximum of 21.20 kg/h (L/D 20) at 80 rpm.

Statistical analysis indicates that while L/D 20 demonstrated higher efficiency at lower screw speeds (40 rpm) in some cases, L/D 16 generally ensured higher process efficiency, particularly at higher speeds (60 and 80 rpm). Similar findings were reported by Lewko et al. [33], who examined the extrusion of flour-based materials and observed a general decrease in efficiency for the L/D 20 plasticization system compared to L/D 16. The study also suggested that shorter plasticization systems may be more beneficial for processing flour-based products, as they provide improved material flow and processing stability. Similar to the findings of Lisiecka and Wójtowicz [34], an increase in efficiency

was observed at higher screw speeds, especially in the L/D 16 configuration. This suggests that higher screw speed enhances the efficiency of the extrusion-cooking process, likely by improving material flow dynamics and reducing processing resistance.

In conclusion, extrudates with nigella seed and flaxseed pomace contribute to improved process efficiency with increasing concentrations and screw speed, particularly at 80 rpm. Nigella seed pomace generally demonstrated a higher efficiency at L/D 16. The findings indicate that incorporating plant-based pomaces at different concentrations can significantly enhance the extrusion-cooking process, especially when operating at higher screw speeds and higher L/D ratios. However, efficiency declines at certain concentration levels and screw speeds, such as with nigella seed pomace at a 30% concentration and flaxseed pomace at 40 rpm, emphasizing the complex interaction between pomace concentration, screw speed, and overall process efficiency (Table 3).

Table 3. Response surface approximation models for evaluating the efficiency and specific mechanical energy consumption of the extrusion-cooking process of extrudates depending on the selected plant pomace addition level, screw speed, and type of plasticizing system.

L/D	Additive	Property	Model Equation	R ²
16	Nigella seed pomace	Q (kg/h)	$-2.653 + 0.214 \times AN + 0.302 \times SS - 0.005 \times AN^2 + 0.001 \times AN \times SS - 0.001 \times SS^2$	0.958
		SME (kWh/kg)	$0.047 - 0.002 \times AN - 0.0004 \times SS + 9.251 \times 10^{-5} \times AN^2 - 1.336 \times 10^{-5} \times AN \times SS + 2.939 \times 10^{-6} \times SS^2$	0.706
	Flaxseed pomace	Q (kg/h)	$-2.317 + 0.256 \times AF + 0.274 \times SS - 0.007 \times AF^2 - 0.001 \times AF \times SS - 0.0001 \times SS^2$	0.954
		SME (kWh/kg)	$0.078 - 0.002 \times AF - 0.001 \times SS + 1.706 \times 10^{-5} \times AF^2 + 1.937 \times 10^{-5} \times AF \times SS + 9.177 \times 10^{-6} \times SS^2$	0.729
20	Nigella seed pomace	Q (kg/h)	$4.063 + 0.1686 \times AN + 0.084 \times SS - 0.008 \times AN^2 + 0.002 \times AN \times SS + 0.001 \times SS^2$	0.940
		SME (kWh/kg)	$0.009 + 0.002 \times AN + 0.002 \times SS + 6.618 \times 10^{-5} \times AN^2 - 4.552 \times 10^{-5} \times AN \times SS - 1.561 \times 10^{-5} \times SS^2$	0.951
	Flaxseed pomace	Q (kg/h)	$0.818 + 0.199 \times AF + 0.189 \times SS - 0.006AF^2 + 0.002 \times AF \times SS - 0.0001 \times SS^2$	0.983
		SME (kWh/kg)	$0.143 + 0.001 \times AF - 0.004 \times SS + 8.592 \times 10^{-6} \times AF^2 - 2.089 \times 10^{-5} \times AF \times SS + 3.229 \times 10^{-5} \times SS^2$	0.930

During the analysis of energy consumption values (Figure 2) for the control sample, we observed that *SME* decreased as screw speed increased. Specifically, at 40 rpm, *SME* is 0.032 kWh/kg for the L/D 16 configuration and 0.036 kWh/kg for L/D 20. At 60 rpm, *SME* increases slightly to 0.042 kWh/kg for L/D 16 and 0.061 kWh/kg for L/D 20. However, at 80 rpm, *SME* decreases to 0.018 kWh/kg for L/D 16 and 0.048 kWh/kg for L/D 20. These results suggest that higher screw speeds lead to a reduction in *SME* for the control sample using L/D 16.

At 10% nigella pomace addition, the *SME* at 40 rpm were 0.024 kWh/kg for L/D 16 and 0.099 kWh/kg for L/D 20, indicating a fourfold increase for L/D 20, which suggests higher flow resistance in the longer system. At 60 rpm, the *SME* decreased to 0.020 kWh/kg (L/D 16) and 0.018 kWh/kg (L/D 20), implying that an increased screw speed reduces resistance and leads to lower mechanical energy consumption. However, at 80 rpm, the *SME* rose to 0.034 kWh/kg (L/D 16) but sharply declines to 0.010 kWh/kg (L/D 20), indicating that a longer screw zone at high speeds may reduce energy losses. Using 20% pomace, the highest *SME* was observed at 40 rpm for L/D 20 (0.035 kWh/kg), while the lowest *SME* occurred at 80 rpm and L/D 16 (0.010 kWh/kg), suggesting that at higher pomace

concentrations, increased screw speed can reduce energy consumption. Using 30% pomace, *SME* reached a peak at 40 rpm for L/D 20 (0.105 kWh/kg), whereas the lowest values were recorded at 80 rpm (0.040 kWh/kg for L/D 16 and 0.022 kWh/kg for L/D 20). This confirms that, at higher pomace concentrations, increasing the screw speed can effectively reduce the specific mechanical energy consumption.

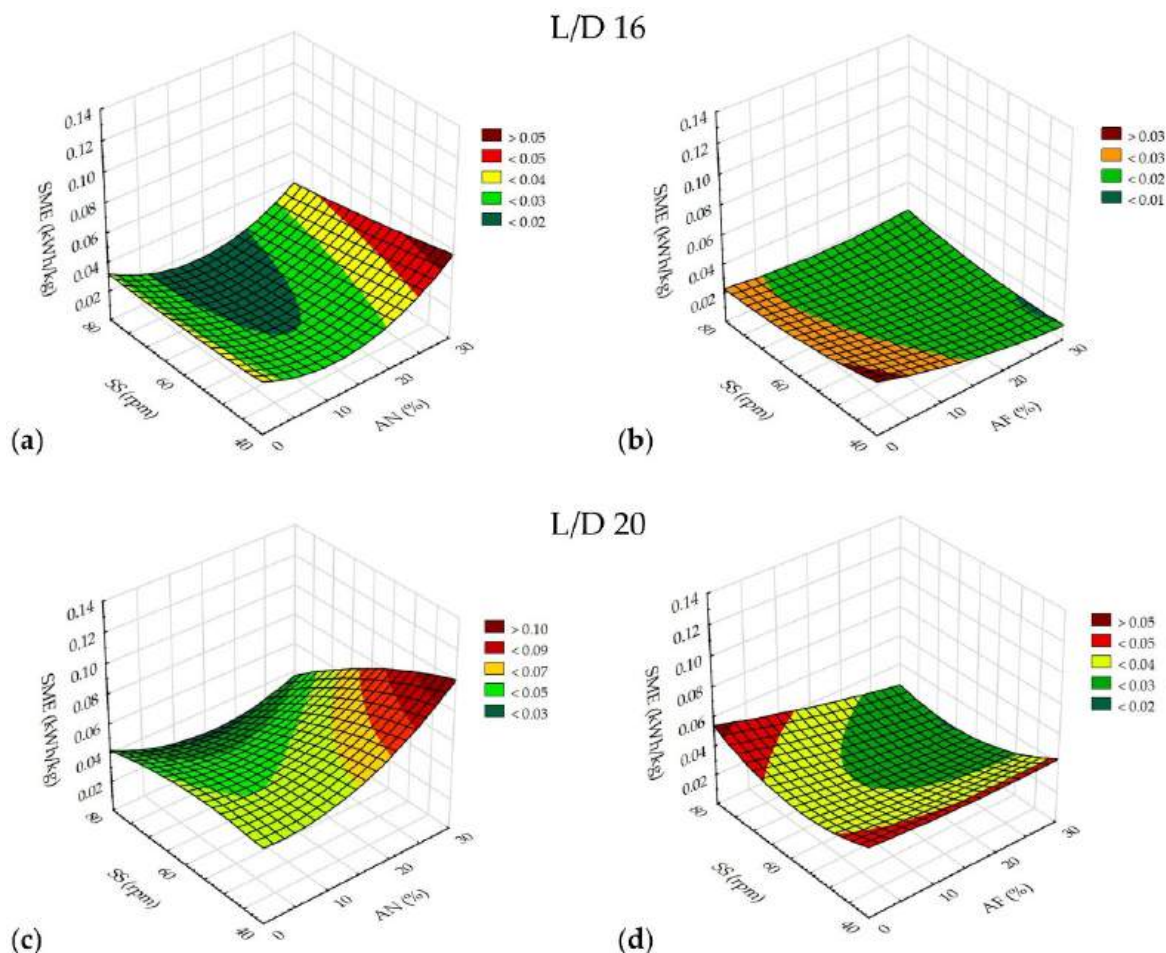


Figure 2. Trend plots of specific mechanical energy demand during the extrusion-cooking process of extrudates in relation to the inclusion level of the selected plant pomace, screw speed and type of plasticizing system: (a) nigella seed pomace processed using L/D 16 plasticizing system; (b) flaxseed pomace processed using L/D 16 plasticizing system; (c) nigella seed pomace processed using L/D 20 plasticizing system; (d) flaxseed pomace processed using L/D 20 plasticizing system.

In the case of flaxseed pomace, the changes in *SME* appeared more stable and predictable. For 10% pomace, at 40 rpm, the *SME* values were 0.021 kWh/kg for L/D 16 and 0.033 kWh/kg for L/D 20. At 60 rpm, the values decreased to 0.010 kWh/kg (L/D 16) and 0.016 kWh/kg (L/D 20), indicating that an increased screw speed leads to lower energy consumption. With 20% pomace, the *SME* for L/D 20 was significantly higher than for L/D 16 at 40 rpm (0.081 kWh/kg vs. 0.018 kWh/kg). However, at 80 rpm, the values dropped to 0.043 kWh/kg (L/D 16) and 0.015 kWh/kg (L/D 20), further confirming that an increase in screw speed reduces mechanical energy consumption. For 30% pomace, the differences in *SME* were less pronounced: at 40 rpm, the *SME* values were 0.013 kWh/kg (L/D 16) and 0.028 kWh/kg (L/D 20). At 60 and 80 rpm, the values stabilized (respectively, 0.010 and 0.012 kWh/kg for L/D 16, and 0.015 and 0.041 kWh/kg for L/D 20), suggesting a more uniform influence of flaxseed pomace on the process dynamics. The generally higher *SME* values observed for the L/D 20 configuration at a low screw speed may be attributed

to the increased material residence time and greater shear surface area due to the longer screw. This likely results in higher shear stress and internal friction, particularly in the presence of fibrous by-products such as pomace, which increases resistance to flow. As screw speed increases, the residence time shortens and material flows more efficiently, reducing the mechanical energy required. As observed in Soja's et al. [28] study, the present data indicate that pomace additives influence *SME* values, with the highest *SME* observed at lower additive concentrations, especially for nigella seed pomace. The maximum *SME* value for different pomace additives was approximately 0.100 kWh/kg, which aligns with the 10% nigella seed pomace addition, where *SME* reached 0.099 kWh/kg at 40 rpm for L/D 20. A comparison of results reveals a decline in *SME* at higher pomace concentrations, suggesting a reduction in process energy efficiency with an increased proportion of pomace in the material. Furthermore, similar to the findings of Kantrong et al. [35], who analyzed energy consumption during the extrusion-cooking process of mushroom rice snacks, the present study also observed irregularities in energy consumption, particularly when various screw rotational speeds were used.

A comprehensive comparative analysis, supported by statistical evaluation, reveals that nigella seed pomace exhibits significant fluctuations in *SME*, especially at a lower screw speed and within the extended L/D 20 system. This variability suggests that there is increased flow resistance and greater mechanical energy demand during processing. In contrast, flaxseed pomace demonstrates more stable *SME* values, indicating superior processing characteristics and a lower impact on energy consumption throughout the extrusion-cooking process (Table 3).

3.2. Results of the Analysis of Selected Physical Properties

Bulk density analysis provides a comprehensive assessment of the effects of different pomace additives and extrusion-cooking process parameters on material properties (Figure 3).

For the control sample, the bulk density remains relatively stable and increases slightly as screw speed rises. At 40 rpm, the values reached 402.19 kg/m³ for L/D 16 and 405.81 kg/m³ for L/D 20. A further increase in screw speed to 60 rpm resulted in a slight rise to 405.91 kg/m³ (L/D 16) and 408.01 kg/m³ (L/D 20). The highest screw speed of 80 rpm led to a minor decrease, with values dropping to 400.22 kg/m³ (L/D 16) and 403.11 kg/m³ (L/D 20). This reduction may indicate lower material compression due to increased flow dynamics.

The bulk density of extrudates with nigella seed pomace varies depending on concentration and screw speed. The 10% pomace addition results in a gradual increase in density with rising rpm. At 40 rpm, the values reached 407.43 kg/m³ (L/D 16) and 409.82 kg/m³ (L/D 20), while at 80 rpm, they increased to 422.29 kg/m³ (L/D 16) and 425.49 kg/m³ (L/D 20). This trend suggests that there is enhanced material compression at higher speeds, which may be beneficial for achieving a more compact structure. A 20% pomace addition leads to the opposite effect, with a decrease in bulk density, particularly for L/D 16, where the value at 40 rpm is only 379.53 kg/m³, while for L/D 20 it reaches 399.98 kg/m³. Although density slightly increases with higher screw speeds, it remains lower than that of the control sample. This result may indicate increased porosity and greater difficulty in compressing the material at higher concentrations of nigella seed pomace. The bulk density of samples with 30% additive rose again, reaching 397.19 kg/m³ (L/D 16) and 404.82 kg/m³ (L/D 20) at 40 rpm, and stabilizing at 398.64 kg/m³ (L/D 16) and 409.79 kg/m³ (L/D 20) at 80 rpm.

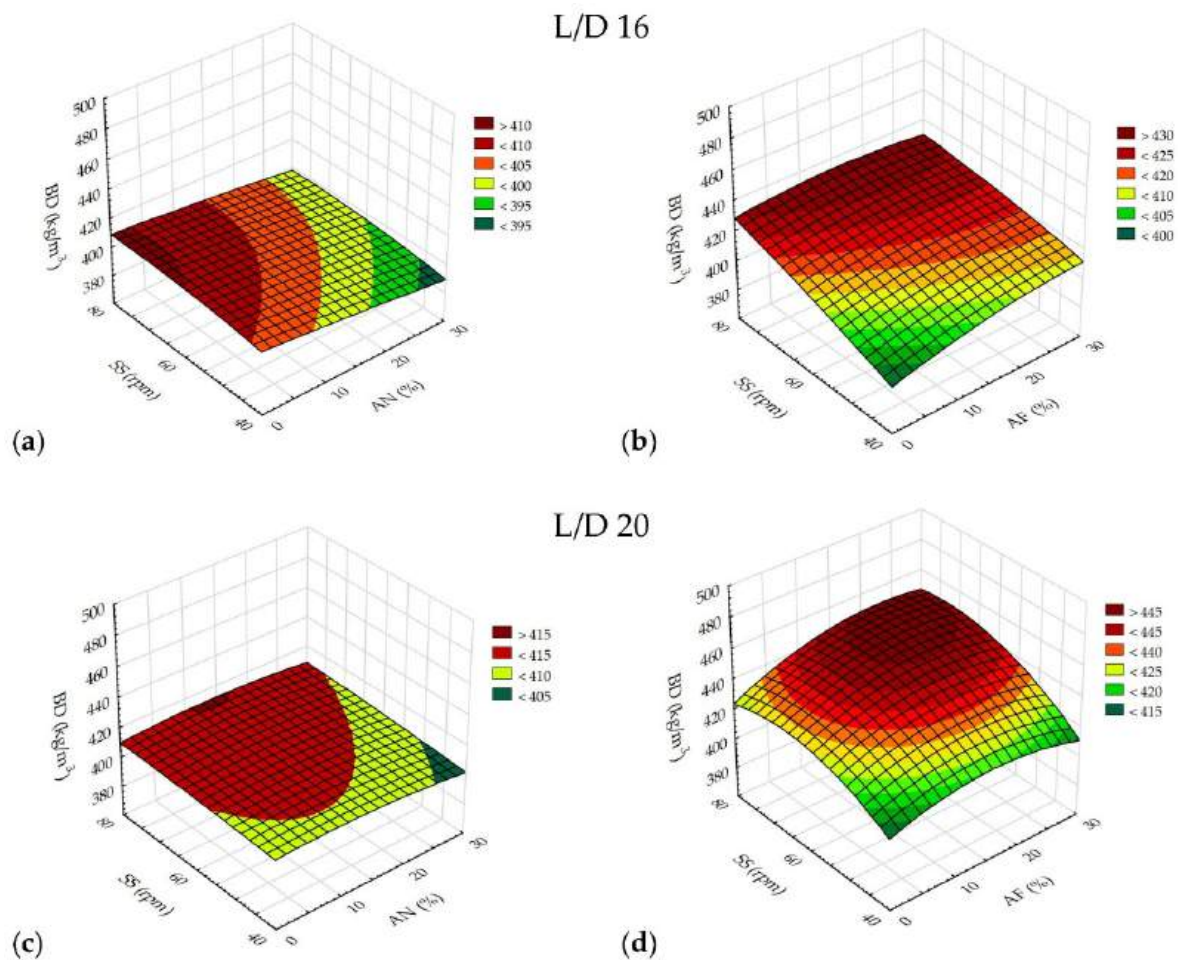


Figure 3. Trend plots of bulk density of extrudates depending on selected plant pomace addition level, processing parameters, and type of plasticizing system: (a) nigella seed pomace processed using L/D 16 plasticizing system; (b) flaxseed pomace processed using L/D 16 plasticizing system; (c) nigella seed pomace processed using L/D 20 plasticizing system; (d) flaxseed pomace processed using L/D 20 plasticizing system.

A different pattern of change was observed for extrudates with flaxseed pomace. At a 10% addition, bulk densities at 40 rpm were 396.19 kg/m³ (L/D 16) and 435.09 kg/m³ (L/D 20), while at 80 rpm, they increased sharply to 486.67 kg/m³ (L/D 16) and 495.96 kg/m³ (L/D 20). This suggests that flaxseed pomace has a higher capacity for compaction within the extruder-cooker system, particularly in the longer L/D 20 configuration and at a higher screw speed. At a 20% addition, bulk density values became more stable, reaching 386.56 kg/m³ (L/D 16) and 390.49 kg/m³ (L/D 20) at 40 rpm, and increasing to 411.35 kg/m³ (L/D 16) and 400.14 kg/m³ (L/D 20) at 80 rpm. For samples with 30% addition, bulk density increased significantly, reaching 425.69 kg/m³ (L/D 16) and 423.06 kg/m³ (L/D 20) at 40 rpm and further rising to 424.82 kg/m³ (L/D 16) and 459.47 kg/m³ (L/D 20) at 80 rpm. In the study conducted by Soja et al. [36], a different forming die was used compared to the present research, which may have contributed to the observed differences in bulk density values. However, both studies indicate that flaxseed pomace had a variable impact on this parameter, especially at higher concentrations. The higher bulk density values obtained in the current study may suggest improved compacting properties of the mixtures or more optimal extrusion process conditions. In the study conducted by Soja et al. [28], a different forming die was also used compared to the present research, which may have contributed to the differences in results. Despite this, both studies confirmed that there was a similar trend of decreasing bulk density with

an increasing percentage of nigella seed pomace. However, in the current study, unlike in Soja's findings, the positive effects of nigella seed pomace were more evident at both low (10%) and high (30%) concentrations.

A comparison of both additives, also considering statistical analysis (Table 4), reveals that nigella seed pomace exhibits greater fluctuations in bulk density, especially at moderate concentrations (20%), where values are lower than those of the control sample. This effect may result from increased material porosity or reduced compressibility under screw action. In contrast, flaxseed pomace demonstrates a more predictable and stable increase in bulk density, especially at a higher screw speed, suggesting superior compacting ability and the formation of a denser structure during extrusion-cooking process. The results indicate that the selection of pomace type and process parameters can significantly influence the final product properties, which should be considered in the optimization of the extrusion process.

The evaluation of the water absorption index serves as an indicator of a sample's capacity to retain water, a core aspect in the extrusion-cooking process that significantly affects both texture and the final characteristics of the product. This analysis investigates the influence of nigella seed pomace and flaxseed pomace at different concentrations (10%, 20%, and 30%), while also analyzing the effect of three screw speed (40, 60, and 80 rpm) under two different plasticizing system length-to-diameter (L/D) ratios (16 and 20) (Figure 4).

The control sample exhibited a stable water absorption index (WAI), which increased with screw speed. At 40 rpm, WAI values were 4.16 g/g (L/D 16) and 4.37 g/g (L/D 20), while at 80 rpm, they increased to 4.32 g/g (L/D 16) and 4.63 g/g (L/D 20). At 60 rpm, the intermediate values obtained, 4.25 g/g (L/D 16) and 4.88 g/g (L/D 20), confirm the existence of an upward trend with increasing screw speed. The effect observed is likely due to a higher level of starch gelatinization, caused by the temperature fluctuations seen at higher screw speeds.

At a 10% addition of nigella seed pomace, WAI values were higher than those of the control sample and increased with screw speed. At 40 rpm, WAI reached 4.53 g/g (L/D 16) and 4.84 g/g (L/D 20), going up to 4.62 g/g (L/D 16) and 4.86 g/g (L/D 20) at 60 rpm and further increasing to 4.73 g/g (L/D 16) and 4.90 g/g (L/D 20) at 80 rpm. This suggests that a low concentration of nigella seed pomace enhances water binding capacity, likely due to the presence of proteins and polysaccharides, which contribute to improved moisture retention. The WAI index for samples with a 20% addition shows a significant decrease, particularly at 40 rpm, where values dropped to 2.05 g/g (L/D 16) and 2.17 g/g (L/D 20). A slight increase was observed at 60 rpm, with values reaching 2.16 g/g (L/D 16) and 2.37 g/g (L/D 20). Subsequent increments were recorded at higher rotational speeds of 80 rpm, rising to 2.29 g/g (L/D 16) and 2.58 g/g (L/D 20). These results indicate that higher amounts of nigella seed pomace reduce water absorption capacity, likely by disrupting the starch structure and limiting gelatinization processes. At a 30% addition, WAI values reach their lowest levels. At 40 rpm, they dropped to 1.57 g/g (L/D 16) and 1.88 g/g (L/D 20), increasing only slightly at 60 rpm to 1.65 g/g (L/D 16) and 1.95 g/g (L/D 20). At 80 rpm, values reached 1.74 g/g (L/D 16) and 2.00 g/g (L/D 20). These findings indicate that higher concentrations of nigella seed pomace negatively impact water absorption, potentially leading to a harder, less porous structure in the final product.

For samples flaxseed pomace, the effect on WAI followed a more consistent pattern, exhibiting a progressive decrease in values with increasing addition levels. At a 10% addition, WAI values at 40 rpm were 3.12 g/g (L/D 16) and 3.38 g/g (L/D 20). As screw speed increased to 60 rpm, values rose to 3.30 g/g (L/D 16) and 3.59 g/g (L/D 20), reaching 3.40 g/g (L/D 16) and 3.76 g/g (L/D 20) at 80 rpm. At a 20% addition, WAI remained stable but lower than at a 10% addition. At 40 rpm, values were 2.59 g/g (L/D 16) and 2.71 g/g (L/D 20), while at 60 rpm, it increased faintly to 2.63 g/g (L/D 16) and 2.76 g/g

(L/D 20). At 80 rpm, WAI decreased to 2.43 g/g (L/D 16) and 2.49 g/g (L/D 20). At 30% addition, WAI reached the lowest values for extrudates with flaxseed pomace. At 40 rpm, they reached 2.34 g/g (L/D 16) and 2.46 g/g (L/D 20). At 60 rpm, the values remained nearly stable at 2.33 g/g (L/D 16) and 2.43 g/g (L/D 20), while at 80 rpm, they further decreased to 2.25 g/g (L/D 16) and 2.37 g/g (L/D 20). In the study conducted by Drożdż et al. [37], it was observed that increased addition of chokeberry presses residues also led to a reduction in WAI values in extruded corn snacks. A similar trend was reported by Wójtowicz et al. [38], where the initial addition of fresh chokeberry increased water absorption, but at higher concentrations (20–30%), a significant decline in WAI was observed. These findings align with the results of the present study, which demonstrated a comparable decrease in WAI with increasing nigella seed and flaxseed pomace concentrations.

A comparison of both additives used (Table 4) shows that nigella seed pomace reduces water absorption capacity more significantly at higher concentrations than flaxseed pomace. In contrast, flaxseed pomace exhibits a more gradual decrease in WAI, with 10% addition values are close to the control sample. This suggests that nigella seed pomace at higher levels may limit water binding, while flaxseed pomace affects this parameter in a more stable and predictable manner.

The water solubility index (WSI) is a crucial parameter that characterizes the degree of starch degradation and the solubility of components in water. WSI values were analyzed in relation to type and content pomace, screw speed, and the type of plasticization system (Figure 5).

Table 4. Response surface approximation models for evaluating the bulk density, water absorption index, and water solubility index of extrudates depending on the selected plant pomace addition level, screw speed, and type of plasticizing system.

L/D	Additive	Property	Model Equation	R ²
16	Nigella seed pomace	BD (kg/m ³)	$379.897 - 0.458 \times \text{AN} + 0.801 \times \text{SS} - 0.003 \times \text{AN}^2 + 0.002 \times \text{AN} \times \text{SS} - 0.006 \times \text{SS}^2$	0.992
		WAI (g/g)	$4.232 - 0.036 \times \text{AN} + 0.004 \times \text{SS} - 0.002 \times \text{AN}^2 + 1.25 \times 10^{-5} \times \text{AN} \times \text{SS} + 7.292 \times 10^{-6} \times \text{SS}^2$	0.999
		WSI (%)	$3.308 + 0.041 \times \text{AN} + 0.025 \times \text{SS} + 0.005 \times \text{AN}^2 + 0.001 \times \text{AN} \times \text{SS} - 0.0002 \times \text{SS}^2$	0.997
	Flaxseed pomace	BD (kg/m ³)	$337.811 + 1.834 \times \text{AF} + 1.514 \times \text{SS} - 0.018 \times \text{AF}^2 - 0.016 \times \text{AF} \times \text{SS} - 0.005 \times \text{SS}^2$	0.999
		WAI (g/g)	$3.685 - 0.104 \times \text{AF} + 0.014 \times \text{SS} + 0.002 \times \text{AF}^2 - 0.0003 \times \text{AF} \times \text{SS} - 6.771 \times 10^{-5} \times \text{SS}^2$	0.999
		WSI (%)	$3.786 + 0.304 \times \text{AF} + 0.008 \times \text{SS} - 0.005 \times \text{AF}^2 - 0.001 \times \text{AF} \times \text{SS} + 2.396 \times 10^{-5} \times \text{SS}^2$	0.998
20	Nigella seed pomace	BD (kg/m ³)	$397.729 + 0.152 \times \text{AN} + 0.261 \times \text{SS} - 0.014 \times \text{AN}^2 + 0.003 \times \text{AN} \times \text{SS} - 0.001 \times \text{SS}^2$	0.993
		WAI (g/g)	$4.369 - 0.039 \times \text{AN} + 0.008 \times \text{SS} - 0.002 \times \text{AN}^2 - 4.5 \times 10^{-5} \times \text{AN} \times \text{SS} - 2.292 \times 10^{-5} \times \text{SS}^2$	0.999
		WSI (%)	$1.922 + 0.253 \times \text{AN} + 0.084 \times \text{SS} + 0.001 \times \text{AN}^2 - 0.001 \times \text{AN} \times \text{SS} - 0.01 \times \text{SS}^2$	0.999
	Flaxseed pomace	BD (kg/m ³)	$284.776 + 0.921 \times \text{AF} + 4.383 \times \text{SS} - 0.049 \times \text{AF}^2 + 0.017 \times \text{AF} \times \text{SS} - 0.033 \times \text{SS}^2$	0.999
		WAI (g/g)	$3.479 - 0.101 \times \text{AF} + 0.029 \times \text{SS} + 0.002 \times \text{AF}^2 - 0.0004 \times \text{AF} \times \text{SS} - 0.0002 \times \text{SS}^2$	0.999
		WSI (%)	$3.65 + 0.193 \times \text{AF} + 0.048 \times \text{SS} - 0.004 \times \text{AF}^2 - 0.0003 \times \text{AF} \times \text{SS} - 0.0004 \times \text{SS}^2$	0.993

AN—addition of nigella seed pomace, AF—addition of flaxseed pomace; SS—screw speed, BD—bulk density, WAI—water absorption index, WSI—water solubility index.

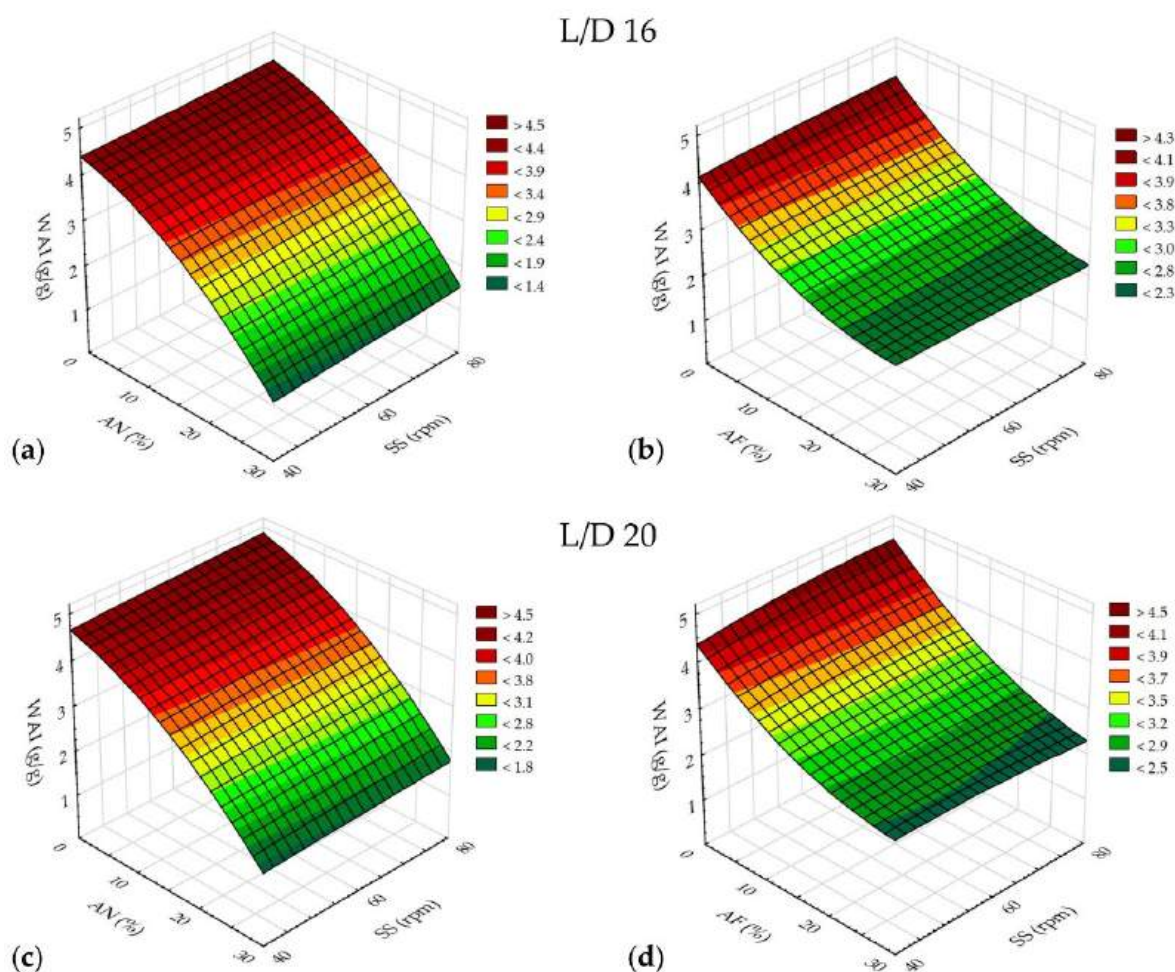


Figure 4. Trend plots of water absorption index of extrudates depending on selected plant pomace addition level, screw speed, and type of plasticizing system: (a) nigella seed pomace processed using L/D 16 plasticizing system; (b) flaxseed pomace processed using L/D 16 plasticizing system; (c) nigella seed pomace processed using L/D 20 plasticizing system; (d) flaxseed pomace processed using L/D 20 plasticizing system.

The control sample exhibited relatively stable WSI values, with higher values for L/D 20 than for L/D 16. At 40 rpm, WSI were 4.52% (L/D 16) and 4.85% (L/D 20), indicating a moderate solubility level. At 60 rpm, WSI slightly decreased to 4.37% (L/D 16) and 5.25% (L/D 20), possibly due to shorter exposure to shear forces in the extruder-cooker. At 80 rpm, WSI increased to 4.68% (L/D 16) and 5.45% (L/D 20), suggesting a higher release of soluble polymers as a result of more intense starch degradation. The addition of nigella seed pomace significantly influenced the water solubility index, with variations depending on the concentration level.

At a 10% addition, WSI values were similar to those of the control sample. At 40 rpm, WSI values were 4.07% (L/D 16) and 5.78% (L/D 20). A slight increase was observed at 60 rpm, reaching 4.18% (L/D 16) and 5.80% (L/D 20). However, at 80 rpm, values decreased to 3.98% (L/D 16) and 6.11% (L/D 20).

At a 20% addition, WSI values were significantly higher than in the control sample. At 40 rpm, WSI values reached 8.28% (L/D 16) and 9.97% (L/D 20), increasing to 8.92% (L/D 16) and 10.50% (L/D 20) at 60 rpm. The highest values were observed at 80 rpm, with 9.80% (L/D 16) and 10.59% (L/D 20), suggesting intensified starch degradation and the increased presence of water-soluble components.

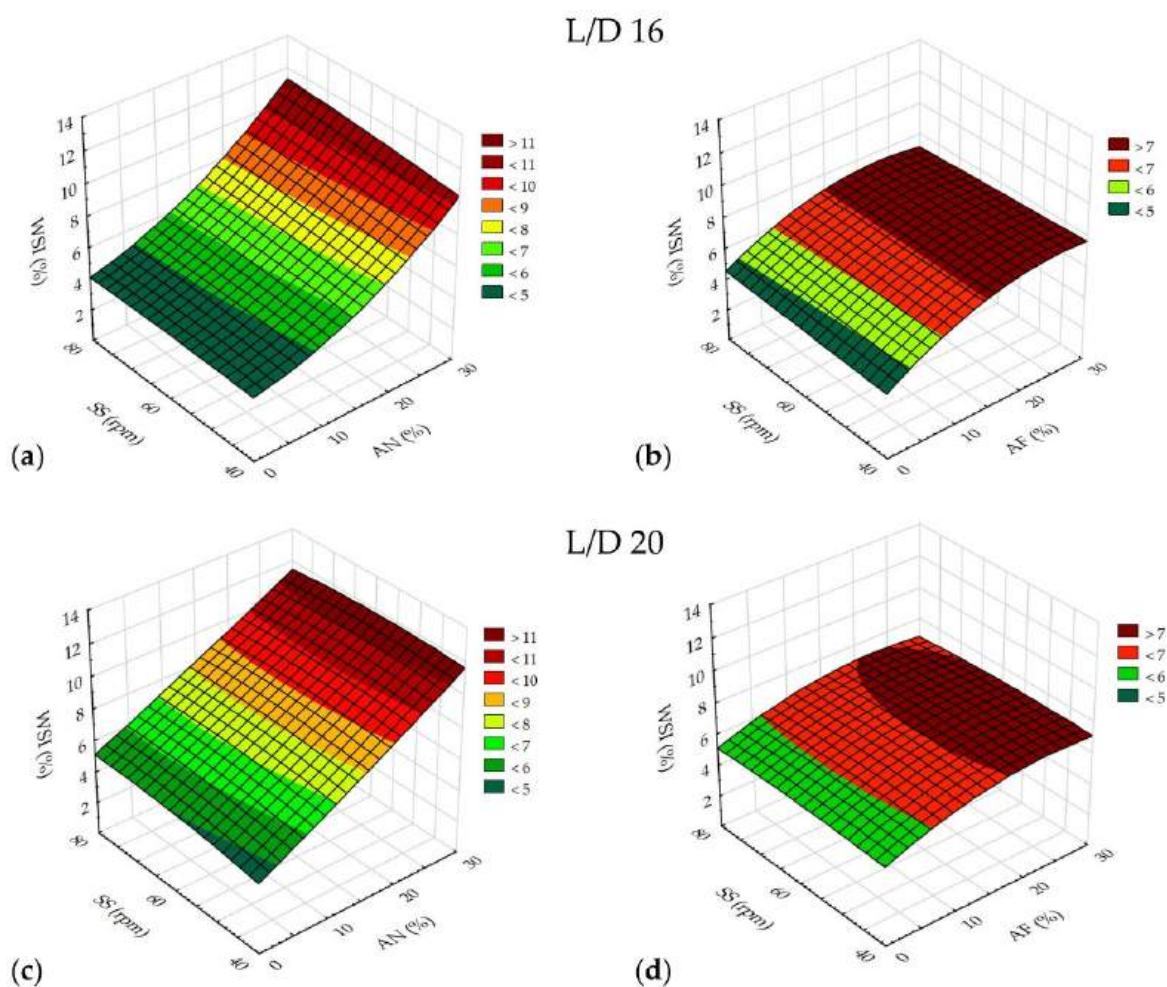


Figure 5. Trend plots of water solubility index of extrudates in relation to selected plant pomace addition level, screw speed, and type of plasticizing system: (a) nigella seed pomace processed using L/D 16 plasticizing system; (b) flaxseed pomace processed using L/D 16 plasticizing system; (c) nigella seed pomace processed using L/D 20 plasticizing system; (d) flaxseed pomace processed using L/D 20 plasticizing system.

At a 30% addition, WSI values increased further. At 40 rpm, WSI values were 9.90% (L/D 16) and 11.21% (L/D 20). At 60 rpm, values rose to 10.72% (L/D 16) and 11.73% (L/D 20), while at 80 rpm, there were faint declines to 10.56% (L/D 16) and 10.83% (L/D 20). These results indicated that a higher pomace content led to intensified starch degradation and an increase in water-soluble substances. However, at a higher screw speed, this effect appeared to be limited by the reduced residence time within the extruder-cooker.

The addition of flaxseed pomace influenced the water solubility index in a more complex manner compared to nigella seed pomace addition, as WSI values varied depending on the L/D ratio and screw speed.

A 10% addition of pomace resulted in minor variations in WSI values depending on the L/D ratio. At 40 rpm, WSI reached 5.56% for L/D 16 and 6.35% for L/D 20, indicating higher solubility with the longer screw. The increase in screw speed to 60 rpm led to a rise in WSI to 5.89% for L/D 16, while for L/D 20, it declined to 6.14%, suggesting that an extended screw zone might have restricted solubility at this speed. A further increase to 80 rpm led to a rise in WSI for L/D 16 (6.01%), while for L/D 20, values remained nearly unchanged (5.93%), implying that screw speed exerted a greater influence on starch degradation in shorter screw zones.

A comparable pattern emerged at a 20% addition. At 40 rpm, *WSI* values were 7.94% for L/D 16 and 7.56% for L/D 20, demonstrating similar solubility levels in both configurations. As the screw speed increased to 60 rpm, *WSI* values rose slightly to 8.16% for L/D 16 and 7.78% for L/D 20. However, at 80 rpm, a decline was observed with *WSI* values decreasing to 7.86% for L/D 16 and showing a significant drop to 6.88% for L/D 20. These results suggest that at a higher screw speed, an extended screw length may constrain starch degradation, thereby reducing the presence of water-soluble components.

A 30% pomace addition led to a decreasing trend in *WSI* values as screw speed increased for both L/D ratios. At 40 rpm, *WSI* values measured 7.57% for L/D 16 and 6.76% for L/D 20, indicating that a longer screw zone reduced solubility. At 60 rpm, *WSI* values decreased to 7.07% for L/D 16, while for L/D 20, values remained relatively stable at 6.83%. Further increasing the speed to 80 rpm caused *WSI* to drop to 6.91% for L/D 16, whereas L/D 20 exhibited a slight increase to 7.05%. These findings indicate a continued reduction in *WSI* for L/D 16, whereas in L/D 20, the minor increase suggests a complex interaction between screw speed and degradation processes. In their studies, Lisiecka and Wójtowicz [39] also observed that increased addition of plant-based ingredients in most extruded raw material blends led to a rise in the water solubility index (*WSI*). In the study by Combrzyński et al. [40], the addition of fresh lucerne sprouts increased *WSI*, reaching a maximum value of 13.07% at a 30% inclusion level and 100 rpm due to the presence of fiber and proteins. Similarly, in the present study, a general increasing trend in *WSI* was observed compared to the control sample, although at higher addition levels, the trend became irregular. Nevertheless, an overall increase in *WSI* was noted, indicating the impact of plant-based ingredients on solubility. Contrary to the findings of Chang and Ng [41], in the present study, screw speed was not the sole dominant factor influencing *WSI*—the type and concentration of additives also had a significant role. This suggests that during extrusion-cooking involving ingredients with irregular structure and high fiber content, the mechanisms of starch degradation may be modified by the presence of other components, which influence the solubilization of the extrudate in water.

Statistical analysis confirms that the impact of flaxseed pomace on *WSI* is more complex than that of nigella seed pomace (Table 4). At lower concentrations and higher screw speeds, *WSI* values tend to increase for L/D 16, whereas for L/D 20, a decline is observed. At higher concentrations (30%), a general decreasing trend in *WSI* is evident, which may be attributed to reduced starch degradation and a higher content of insoluble components, such as the presence of fiber and fat in flaxseed.

The results indicate that the interaction between screw speed, L/D ratio, and pomace concentration performs a significant role in determining *WSI* values. Higher flaxseed pomace levels limit starch solubility, likely due to the presence of structural components that hinder gelatinization and degradation processes.

Analysis of the data indicates the existence of transparent interrelations between mechanical energy consumption and the physical properties of the extrudates. Higher *SME* values, particularly at a lower screw speed and increased pomace concentrations, correspond with elevated *WSI* values, which suggests that there is intensified starch degradation under a greater mechanical load. Samples with lower bulk density typically showed higher *WAI* and *WSI* values, indicating that reduced structural compactness improves water interaction and solubility. These dependencies emphasize that extrusion-cooking efficiency, energy consumption, and hydration-related characteristics are closely linked and are influenced jointly by pomace type, concentration, and screw configuration.

Principal component analysis (PCA) was performed for different types of additives. The results showed that the first two components (PC1 and PC2) explain all the changes in the data—100% of the variability. The most important parameters are marked between

two red circles in the graph (Figure 6a). These have the biggest effect on the results. Each of the tested parameters influences the system. Efficiency and *WSI* are strongly and negatively linked to *WAI*. This means that when efficiency or *WSI* goes up, *WAI* goes down. A strong negative link was also seen between bulk density and *SME*. In this case, higher density comes with lower energy use. There are also some weak positive links. *SME* and *WSI* increase slightly together. A similar connection was seen between *WSI* and efficiency and also between efficiency and bulk density. No link was found between *WAI* and the other two parameters—bulk density and *SME*. These do not affect each other in this system.

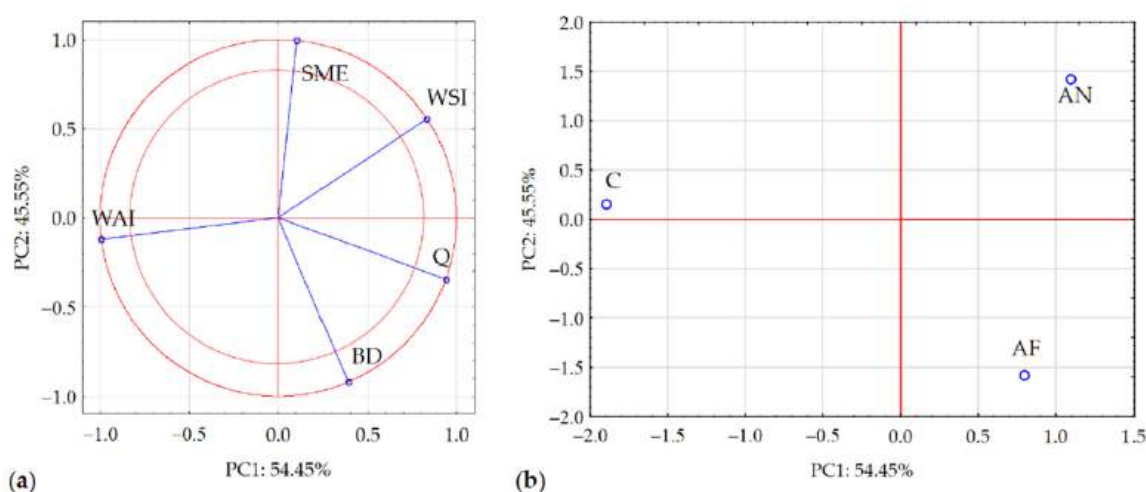


Figure 6. Loading plot (a) and score plot (b) of the principal component analysis (PC1 and PC2). The plot shows the position of tested parameters on the PC1 and PC2 axes (a) and the placement of additive types on the same axes (b), which makes it easier to see the influence of each parameter and additive type on the results.

The PCA also shows (Figure 6a,b) that the flaxseed pomace additive is strongly and positively correlated with *SME* and *WSI*, and the nigella seed pomace additive is strongly and positively correlated with bulk density and efficiency. In turn, the lack of additive is strongly and positively correlated with *WAI*. The PCA shows that the first principal component, PC1, distinguishes between the lack of the additive (negative PC1 values) and the use of the additive derived from seed pomace (Figure 6b) by 54.45%. Positive values of the PC1 principal component describe the results for the lack of the additive. The second principal component, PC2, distinguishes between the use of the Flaxseed pomace additive (negative PC2 values) and the use of the Nigella seed pomace additive (positive PC2 values) by 45.55%.

PCA carried out for different amounts of additive showed that the first two main components, PC1 and PC2, explain 85.95% of the system's variability. This means that most of the changes in the data can be described using just these two components. The loading plot (Figure 7a) shows that the parameters relating to the two red circles have the strongest influence on the system. These include all the tested parameters. A strong positive correlation was observed between efficiency and *WSI*, meaning both values increased together. A strong but negative correlation exists between efficiency, *WSI* values, and *WAI* parameters, and between the bulk density and *SME* parameters. There is no correlation between bulk density and efficiency and *WSI*, between *SME* and *WSI* and efficiency, or between *SME* and *WAI*.

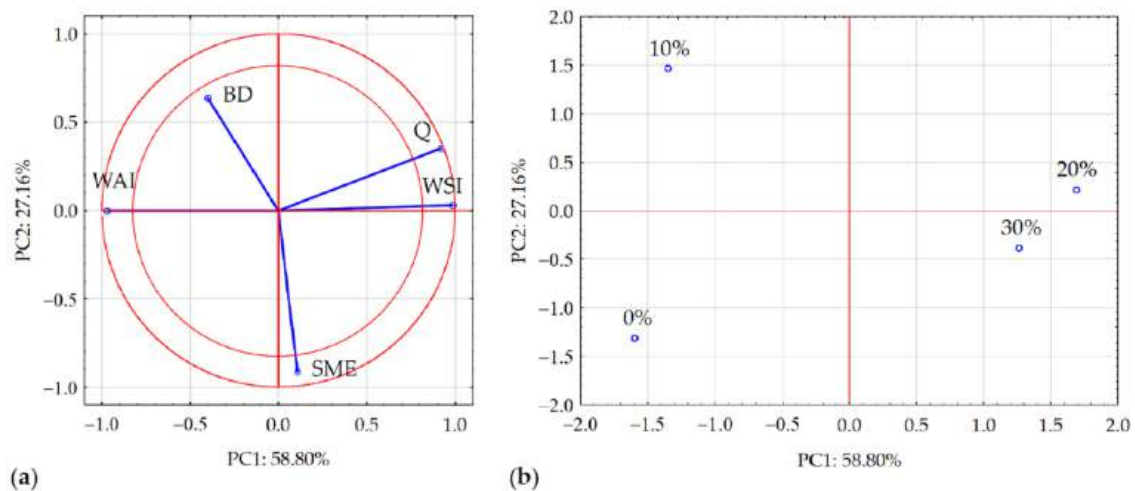


Figure 7. Loading plot (a) and score plot (b) of the principal component analysis (PC1 and PC2). The plot shows the position of tested parameters on the PC1 and PC2 axes (a) and the placement of additive quantity on the same axes (b), which helps to understand the influence of each parameter and additive level on the results.

The PCA also shows (Figure 7b) that PC1 describes the differences in the amount of the additive that affects the tested parameters, 58.80%. Positive PC1 values describe 20% and 30% of the additive, and negative PC1 values describe the lack of additive or lower additive values. PC2 distinguishes the lack of additive and the addition of 10% of the component in 27.18% of cases. The analysis shows (Figure 7a,b) that the *SME* parameter is positively correlated with the lack of additive, while the bulk density and *WAI* parameters are most strongly correlated with the 10% additive. The efficiency and *WSI* parameters are strongly and positively correlated with additions of 20% and 30%.

PCA for screw speed showed that the first two main components, PC1 and PC2, explained 100% of the system's variability. This means that all important changes in the data are covered by these two components. In this case, all tested parameters have a strong effect on the system (Figure 8a). Bulk density, *WAI*, *WSI*, and efficiency show a strong positive correlation, meaning values increase together. *SME* shows a strong negative correlation with the other tested parameters, which means that higher *SME* is linked with lower values of the remaining parameters.

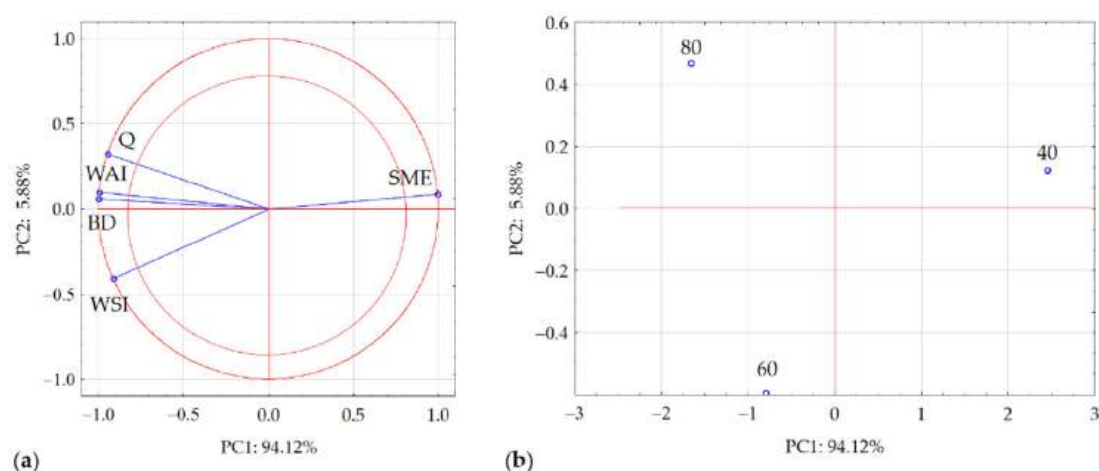


Figure 8. Loading plot (a) and score plot (b) of the principal component analysis (PC1 and PC2). The plot shows the position of tested parameters on the PC1 and PC2 axes (a) and the placement of screw speed values on the same axes (b), which helps to understand the influence of each parameter and screw speed setting on the results.

The PCA performed shows (Figure 8b) that the main component PC1 differentiates low and high screw speed values by as much as 94.12%. Positive PC1 values indicate lower screw speed values (40 rpm) and negative values indicate higher screw speed values (60 and 80 rpm). The second main component, PC2, differentiates between higher screw speed values (60 and 80 rpm) by 5.88%. The analysis shows (Figure 8a,b) that the *SME* parameter is strongly and positively correlated with the lower screw speed value (40 rpm). There is a clear correlation between 60 rpm and 80 rpm screw speed and the tested parameters: bulk density, *WAI*, *WSI*, and efficiency.

PCA for L/D ratio showed that the first two main components, PC1 and PC2, explain 98.48% of the system's variability. This means that nearly all changes in the data are described by these two components. In this case, all tested parameters strongly affect the system (Figure 9a). Bulk density, *WSI*, and efficiency are strongly and positively correlated, which means higher values of one are linked with higher values of the others. A strong but negative correlation exists between bulk density, *WSI* and *WAI*. A weak negative correlation occurs between efficiency and *WAI* and between efficiency and *SME*, and a weak positive correlation exists between *WSI*, bulk density, and efficiency.

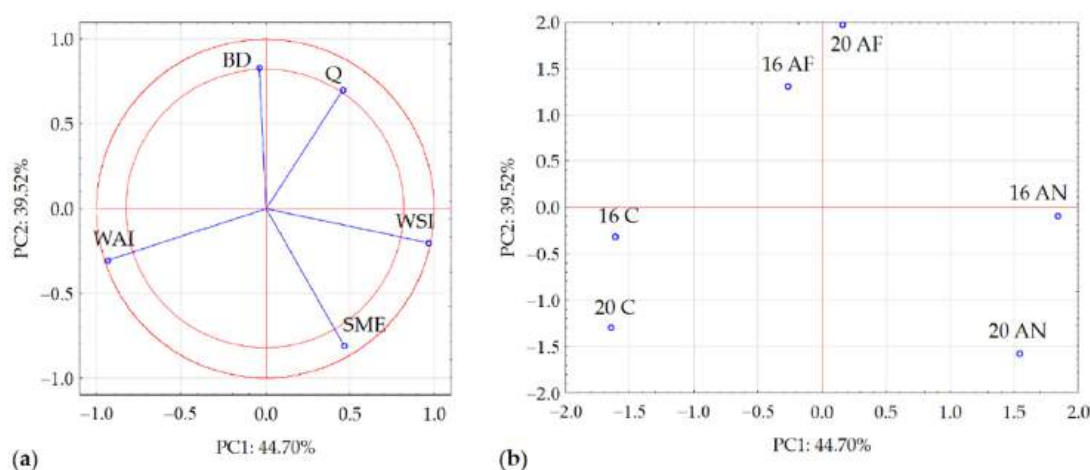


Figure 9. Loading plot (a) and score plot (b) of the principal component analysis (PC1 and PC2). The plot shows the position of tested parameters on the PC1 and PC2 axes (a) and the placement of L/D ratio values on the same axes (b), which helps to see the influence of each parameter and L/D setting on the results.

The conducted PCA shows (Figure 9b) that PC1 differentiates L/D dependency by as much as 67.45% for the use of the additive and the lack of use of the additive. Positive PC1 values indicate the use of flaxseed pomace and Nigella seed pomace additives, and negative values indicate the lack of use of additives. The PC2 differentiates L/D dependency values (16 and 20) by 31.03%. The analysis shows (Figure 9a,b) that the *SME* parameter is strongly and positively correlated with a higher L/D dependency value, and the efficiency parameter is strongly and positively correlated with a lower L/D dependency value with the additive.

4. Conclusions

1. An increase in screw speed to 60 and 80 rpm led to a higher extrusion-cooking efficiency for both L/D 16 and L/D 20 configurations, particularly at higher pomace concentrations. However, L/D 16 exhibited rising efficiency compared to L/D 20, especially at a higher screw speed (60 and 80 rpm). At higher pomace concentrations, a decline in efficiency was observed, likely due to flow difficulties caused by the increased amount of added material. Therefore, the extrusion-cooking process was more efficient at lower pomace concentrations and higher screw speeds.

These variations may result from the interaction between fiber-rich pomace particles and the starch structure, which affects the rheological behavior and flow resistance during processing.

2. *SME* values increased with a higher screw speed at 60 and 80 rpm, indicating greater energy consumption at higher rotational speeds, particularly at higher pomace concentrations. For L/D 16, *SME* was generally lower compared to L/D 20, especially at higher speed, suggesting that L/D 16 may be more energy-efficient in certain conditions. The addition of nigella seed pomace and flaxseed pomace contributed to higher *SME* values, particularly at lower screw speeds, highlighting differences in energy efficiency depending on the type of pomace used. At higher pomace concentrations (20% and 30%), *SME* showed greater variability, with a tendency to increase at 40 rpm and decrease at 80 rpm. This suggests that higher pomace levels alter the energy demand of the extrusion-cooking process, potentially due to changes in material flow and processing resistance. This can be explained by differences in the composition of the pomace, especially fat and fiber content, which influence friction, torque, and energy transfer during extrusion-cooking process.
3. Bulk density analysis showed that the control sample maintained stable values with a slight increase as screw speed became larger. In the case of nigella seed pomace, the changes were irregular—at 10% concentration, bulk density increased, while at 20% a decrease was observed, followed by another increase at 30%. On the other hand, flaxseed pomace demonstrated a more consistent trend, with bulk density gradually increasing along with higher concentrations and screw speed, indicating better compressibility during the extrusion-cooking process. A comparison to different plasticizing system revealed higher bulk density values for L/D 20, which suggests improved material compression in the longer screw system. Irregular changes in bulk density, especially for nigella seed pomace, may stem from variable hydration behavior and structural interference caused by the heterogeneous nature of the pomace components.
4. The analysis of water absorption capacity (water absorption index) showed that the control sample exhibited a gradual increase in *WAI* with higher screw speeds, likely due to more intense starch gelatinization caused by the higher temperatures generated during extrusion. At a low concentration (10%), the addition of nigella seed pomace led to an increase in *WAI*, while at higher concentrations (20% and 30%), a significant decrease was observed. This suggests that a greater amount of this additive limits water absorption capacity. For flaxseed pomace, *WAI* values decreased progressively with increasing concentrations, which may be attributed to the greater presence of fats and fiber, reducing water retention. A comparison between L/D 16 and L/D 20 revealed higher *WAI* values for L/D 20, indicating that a longer screw zone enhances the moisture absorption capacity of the samples, possibly due to the extended contact time with water during extrusion-cooking process. The decreasing trend in *WAI* at higher pomace levels may be attributed to the presence of non-starch polysaccharides and lipids, which can limit water penetration and reduce starch gelatinization.
5. The analysis of the water solubility index showed that the control sample had moderate values, with a minor increase as screw speed increased. For nigella seed pomace, a significant rise in *WSI* was observed at higher concentrations (20% and 30%), indicating more intense starch degradation and an increase in water-soluble components. For flaxseed pomace, *WSI* values increased at 10% and 20% concentrations, but at 30% a decline was noted. This may be due to the higher presence of insoluble components, such as fiber and fats, which reduce solubility. A comparison of *WSI* values between L/D 16 and L/D 20 showed that *WSI* was generally higher for L/D 20, suggesting

that a longer screw zone promoted more intense starch degradation, leading to an increased number of water-soluble components. The observed fluctuations in WSI likely reflect complex interactions between starch degradation, lipid binding, and insoluble fiber content, which together influence the solubilization of extrudate components.

6. Based on the findings, it can be recommended that the L/D 16 configuration, in combination with a higher screw speed (60–80 rpm) and moderate pomace concentrations (10–20%), provides a favorable balance between energy consumption and product quality. For applications requiring higher water absorption (e.g., instant foods), L/D 20 may offer advantages due to extended processing time. Additionally, flaxseed pomace demonstrated more predictable behavior than nigella pomace, making it a potentially more reliable additive in extrusion applications.
7. Future research could investigate the effect of varying moisture content on the processing behavior of blends containing oilseed pomace, as moisture is a critical factor influencing extrusion-cooking dynamics and final product quality. Additionally, sensory acceptability of snacks obtained from the expansion of the produced extruded pellets should be evaluated to assess consumer preferences. This analysis would provide valuable insights into the commercial potential and market readiness of these products. These directions would help bridge the gap between technological development and real-world application.
8. The results of this study highlight the potential for utilizing oilseed pomace as a functional ingredient in the production of sustainable snack pellets. The incorporation of by-products such as flaxseed and nigella pomace into starch-based mixtures offers opportunities to enhance the nutritional profile of extruded products while supporting waste valorization strategies. Tested process configurations demonstrate that, with proper optimization of screw speed, L/D ratio and pomace concentration, it is possible to balance energy efficiency with desirable product attributes. These findings may serve as a foundation for industrial-scale implementation, particularly in the development of high-fiber, clean-label, or upcycled snack products that align with current consumer and sustainability trends.

Author Contributions: Conceptualization, J.S., M.C. and T.O.; methodology, J.S. and M.C.; software, R.R.; validation, J.S. and M.C.; formal analysis, R.R.; investigation, J.S. and M.C.; resources, J.S.; data curation, J.S., M.C. and M.G.; writing—original draft preparation, J.S., M.C. and R.R.; writing—review and editing, J.S. and M.C.; visualization, J.S. and M.C.; supervision, M.C. and R.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: The original contributions presented in the study are included in the article, and further inquiries can be directed to the corresponding author.

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

References

1. Varzakas, T.; Smaoui, S. Global Food Security and Sustainability Issues: The Road to 2030 from Nutrition and Sustainable Healthy Diets to Food Systems Change. *Foods* **2024**, *13*, 306. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Cole, M.B.; Augustin, M.A.; Robertson, M.J.; Manners, J.M. The science of food security. *npj Sci. Food* **2018**, *2*, 14. [[CrossRef](#)]
3. Rațu, R.N.; Veleșcu, I.D.; Stoica, F.; Usturoi, A.; Arsenoia, V.N.; Crivei, I.C.; Postolache, A.N.; Lipșa, F.D.; Filipov, F.; Florea, A.M.; et al. Application of Agri-Food By-Products in the Food Industry. *Agriculture* **2023**, *13*, 1559. [[CrossRef](#)]
4. Bhatia, L.; Jha, H.; Sarkar, T.; Sarangi, P.K. Food Waste Utilization for Reducing Carbon Footprints towards Sustainable and Cleaner Environment: A Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2023**, *20*, 2318. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
5. Mangiapelo, L.; Pinna, N.; Blasi, F.; Ianni, F.; Verducci, G.; Cossignani, L. Harnessing Grape Pomace, a Multifunctional By-Product from the Wine Industry for High-Value Salad Dressings. *Molecules* **2025**, *30*, 693. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

6. Ait-Kaddour, A.; Hassoun, A.; Tarchi, I.; Loudiyi, M.; Boukria, O.; Cahyana, Y.; Ozogul, F.; Khwaldia, K. Transforming plant-based waste and by-products into valuable products using various “Food Industry 4.0” enabling technologies: A literature review. *Sci. Total Environ.* **2024**, *955*, 176872. [\[CrossRef\]](#)
7. Pathania, S.; Kaur, N. Utilization of fruits and vegetable by-products for isolation of dietary fibres and its potential application as functional ingredients. *Bioact. Carbohydr. Diet. Fibre* **2022**, *27*, 100295. [\[CrossRef\]](#)
8. Comunian, T.A.; Silva, M.P.; Souza, C.J.F. The Use of Food By-Products as a Novel for Functional Foods: Their Use as Ingredients and for the Encapsulation Process. *Trends Food Sci. Technol.* **2021**, *108*, 269–280. [\[CrossRef\]](#)
9. Berenguer, C.V.; Andrade, C.; Pereira, J.A.M.; Perestrelo, R.; Câmara, J.S. Current Challenges in the Sustainable Valorisation of Agri-Food Wastes: A Review. *Processes* **2023**, *11*, 20. [\[CrossRef\]](#)
10. Mateus, A.R.S.; Pena, A.; Sanches-Silva, A. Unveiling the potential of bioactive compounds in vegetable and fruit by-products: Exploring phytochemical properties, health benefits, and industrial. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* **2024**, *48*, 100938. [\[CrossRef\]](#)
11. Răpă, M.; Darie-Niță, R.N.; Coman, G. Valorization of Fruit and Vegetable Waste into Sustainable and Value-Added Materials. *Waste* **2024**, *2*, 258–278. [\[CrossRef\]](#)
12. Ueda, J.M.; Pedrosa, M.C.; Heleno, S.A.; Carrocho, M.; Ferreira, I.C.F.R.; Barros, L. Food Additives from Fruit and Vegetable By-Products and Bio-Residues: A Comprehensive Review Focused on Sustainability. *Sustainability* **2022**, *14*, 5212. [\[CrossRef\]](#)
13. García-Lomillo, J.; González-SanJosé, M.L. Applications of Wine Pomace in the Food Industry: Approaches and Functions. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **2017**, *16*, 3–22. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
14. Cassani, L.; Gomez-Zavaglia, A. Sustainable Food Systems in Fruits and Vegetables Food Supply Chains. *Front. Nutr.* **2022**, *9*, 829061. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
15. Singh, J.P.; Kaur, A.; Singh, B.; Singh, N.; Singh, B. Physicochemical evaluation of corn extrudates containing varying buckwheat flour levels prepared at various extrusion temperatures. *J. Food Sci. Technol.* **2019**, *56*, 2205–2212. [\[CrossRef\]](#)
16. Mironeasa, S.; Coțovanu, I.; Mironeasa, C.; Ungureanu-Iuga, M. A Review of the Changes Produced by Extrusion Cooking on the Bioactive Compounds from Vegetal Sources. *Antioxidants* **2023**, *12*, 1453. [\[CrossRef\]](#)
17. Offiah, V.; Kontogiorgos, V.; Falade, K.O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2019**, *59*, 2979–2998. [\[CrossRef\]](#)
18. Ali, I.M.; Forsido, S.F.; Kuyu, C.G.; Ahmed, E.H.; Andersa, K.N.; Chane, K.T.; Regasa, T.K. Effects of extrusion process conditions on nutritional, anti-nutritional, physical, functional, and sensory properties of extruded snack: A review. *Food Sci. Nutr.* **2024**, *12*, 8755–8761. [\[CrossRef\]](#)
19. Luo, S.; Chan, E.; Masatcioglu, M.T.; Erkinbaev, C.; Paliwal, J.; Koksel, F. Effects of extrusion conditions and nitrogen injection on physical, mechanical, and microstructural properties of red lentil puffed snacks. *Food Bioprod. Process.* **2020**, *121*, 143–153. [\[CrossRef\]](#)
20. Pardhi, S.D.; Singh, B.; Nayik, G.A.; Dar, B.N. Evaluation of functional properties of extruded snacks developed from brown rice grits by using response surface methodology. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* **2019**, *18*, 7–16. [\[CrossRef\]](#)
21. Raczowska, E.; Serek, P. Health-promoting properties and the use of fruit pomace in the food industry—A Review. *Nutrients* **2024**, *16*, 2757. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
22. Sergheeva, E.; Netreba, N. Oil crop pomace as a potential source of protein and dietary fiber. *J. Eng. Sci.* **2024**, *31*, 196–215. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
23. Ruiz-Gutiérrez, M.G.; Amaya-Guerra, C.A.; Quintero-Ramos, A.; Pérez-Carrillo, E.; Ruiz-Anchondo, T.D.J.; Báez-González, J.G.; Meléndez-Pizarro, C.O. Effect of Extrusion Cooking on Bioactive Compounds in Encapsulated Red Cactus Pear Powder. *Molecules* **2015**, *20*, 8875–8892. [\[CrossRef\]](#)
24. Borah, A.; Lata Mahanta, C.; Kalita, D. Optimization of process parameters for extrusion cooking of low amylose rice flour blended with seeded banana and carambola pomace for development of minerals and fiber rich breakfast cereal. *J. Food Sci. Technol.* **2016**, *53*, 221–232. [\[CrossRef\]](#)
25. Kebede Ali, M.; Abera, S.; Neme Tolesa, G. Optimization of extrusion cooking process parameters to develop teff (*Eragrostis* (Zucc) Trotter)-based products: Physical properties, functional properties, and sensory quality. *Cogent Food Agric.* **2023**, *9*, 2279705. [\[CrossRef\]](#)
26. Ek, P.; Ganjyal, G.M. Basics of extrusion processing. In *Extrusion Cooking*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; pp. 1–28. [\[CrossRef\]](#)
27. Dey, D.; Richter, J.K.; Ek, P.; Gu, B.-J.; Ganjyal, G.M. Utilization of Food Processing By-products in Extrusion Processing: A Review. *Front. Sustain. Food Syst.* **2021**, *4*, 2020. [\[CrossRef\]](#)
28. Soja, J.; Combrzyński, M.; Oniszczyk, T.; Gancarz, M.; Oniszczyk, A. Extrusion-Cooking Aspects and Physical Characteristics of Snacks Pellets with Addition of Selected Plant Pomace. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 8754. [\[CrossRef\]](#)
29. Matysiak, A.; Wójtowicz, A.; Oniszczyk, T. Process efficiency and energy consumption during the extrusion of potato and multigram formulations. *Agric. Eng.* **2018**, *22*, 49–57. [\[CrossRef\]](#)

30. Kręcis, M. Energy Consumption during Production of Corn Extrudates in Relation to the Process Parameters. *Agric. Eng.* **2016**, *20*, 125–131. [\[CrossRef\]](#)
31. Wójtowicz, A.; Kolasa, A.; Mościcki, L. Influence of Buckwheat Addition on Physical Properties, Texture and Sensory Characteristics of Extruded Corn Snacks. *Pol. J. Food Nutr. Sci.* **2013**, *63*, 239–244. [\[CrossRef\]](#)
32. Bouasla, A.; Wójtowicz, A.; Zidoune, M.N. Gluten-free precooked rice pasta enriched with legumes flours: Physical properties, texture, sensory attributes and microstructure. *LWT-Food Sci. Technol.* **2017**, *75*, 569–577. [\[CrossRef\]](#)
33. Lewko, P.; Wójtowicz, A.; Różańska-Boczula, M. Effect of Extruder Configuration and Extrusion Cooking Processing Parameters on Selected Characteristics of Non-Starch Polysaccharide-Rich Wheat Flour as Hybrid Treatment with Xylanase Addition. *Processes* **2024**, *12*, 1159. [\[CrossRef\]](#)
34. Lisiecka, K.; Wójtowicz, A. Possibility to Save Water and Energy by Application of Fresh Vegetables to Produce Supplemented Potato-Based Snack Pellets. *Processes* **2020**, *8*, 153. [\[CrossRef\]](#)
35. Kantrong, H.; Charunuch, C.; Limsangouan, N.; Pengpinit, W. Influence of process parameters on physical properties and specific mechanical energy of healthy mushroom-rice snacks and optimization of extrusion process parameters using response surface methodology. *J. Food Sci. Technol.* **2018**, *55*, 3462–3472. [\[CrossRef\]](#)
36. Soja, J.; Oniszcuk, T.; Vaskina, I.; Combrzyński, M.; Wójtowicz, A. Integration of Plant Pomace into Extruded Products: Analysis of Process Conditions, Post-Production Waste Properties and Biogas Potential. *Energies* **2024**, *17*, 6476. [\[CrossRef\]](#)
37. Drożdż, W.; Boruckowska, H.; Boruckowski, T.; Tomaszewska-Ciosk, E.; Zdybel, E. Use of blackcurrant and chokeberry press residue in snack products. *Pol. J. Chem. Technol.* **2019**, *21*, 13–19. [\[CrossRef\]](#)
38. Wójtowicz, A.; Combrzyński, M.; Biernacka, B.; Różyło, R.; Bąkowski, M.; Wojtunik-Kulesza, K.; Mołdoch, J.; Kowalska, I. Fresh Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) Fruits as Valuable Additive in Extruded Snack Pellets: Selected Nutritional and Physiochemical Properties. *Plants* **2023**, *12*, 3276. [\[CrossRef\]](#)
39. Lisiecka, K.; Wójtowicz, A. Effect of fresh beetroot application and processing conditions on some quality features of new type of potato-based snacks. *LWT-Food Sci. Technol.* **2021**, *141*, 110919. [\[CrossRef\]](#)
40. Combrzyński, M.; Wójtowicz, A.; Biernacka, B.; Oniszcuk, T.; Mitrus, M.; Soja, J.; Różyło, R.; Wojtunik-Kulesza, K.; Kasprzak-Drozd, K.; Oniszcuk, A. Possibility of water saving in processing of snack pellets by the application of fresh lucerne sprouts: Selected aspects and nutritional characteristics. *J. Ecol. Eng.* **2023**, *24*, 130–142. [\[CrossRef\]](#)
41. Chang, Y.H.; Ng, P.K.W. Effects of extrusion process variables on quality properties of wheat-ginseng extrudates. *Int. J. Food Prop.* **2011**, *14*, 914–925. [\[CrossRef\]](#)

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.

Management of selected fruit and vegetable pomace in fortified snack pellets through the single-screw extrusion-cooking under various process conditions

Jakub Soja¹, Maciej Combrzyński¹, Tomasz Oniszcuk¹, Agnieszka Wójtowicz^{1*}

¹ Department of Food Process Engineering, University of Life Sciences in Lublin, Głęboka 31, 20-612 Lublin, Poland

* Corresponding author's email: agnieszka.wojtowicz@up.lublin.pl

ABSTRACT

Fruit and vegetable pomace, a by-product of the agri-food industry, creates environmental problems due to difficulties in its disposal. At the same time, pomace contains valuable bioactive compounds, making it suitable for reuse in food production. This study focused on the influence of extrusion-cooking parameters on process efficiency, energy consumption and physical characteristics of the snack pellets enriched with fresh apple, chokeberry and pumpkin pomace. Extrudates were produced using a single-screw extruder-cooker with two plasticizing systems (L/D ratios 16 and 20). The highest efficiency (24.00 kg h⁻¹) was obtained with 20% apple pomace and an L/D 20. Energy consumption ranged between 0.005 and 0.189 kWh kg⁻¹. Pomace addition strongly affected the physical properties of the snacks. A sample containing 30% chokeberry pomace and processed with the L/D 20 system reached a water absorption index of 7.11 g g⁻¹ and a water solubility index of 7.92%. Bulk density reached a maximum of 691.35 kg m⁻³ for the same configuration. The findings confirm that application of fresh fruit and vegetable pomace is possible following processing with proper plasticizing system and can improve extruded products quality while reducing waste. This supports sustainable practices in food processing by incorporating plant-based by-products into the development of extruded snack pellets.

Keywords: food by-products management, fruit and vegetable pomace, extrusion-cooking, processing parameters, physical properties.

INTRODUCTION

The modern agri-food industry faces a significant challenge related to the increasing volume of plant-based waste generated throughout the production process (Sarker et al., 2024). A substantial amount of raw materials used in food processing does not reach the consumer market but instead ends up as waste or low-value by-products (Maqsood et al., 2025; Dey et al., 2021). The problem has not only an economic dimension, but also an environmental one – inadequate management of organic waste contributes to increased greenhouse gas emissions and places a strain on local waste management systems (Taifouris et al., 2023; Rebolledo-Leiva et al., 2024). In addition, drying the pomace before further processing can generate

additional energy consumption, increasing the negative impact on the environment. Therefore, developing strategies for the effective reuse of such by-products has become a necessity, aligning with the principles of a circular economy.

Among the by-products with considerable potential for valorization are fruits and vegetable pomace, produced during juice extraction, purée production and other processing operations. These residues are rich in dietary fibre, phenolic compounds, vitamins and other bioactive substances that can enhance the nutritional and functional properties of food products (Raczkowska and Serek, 2024; Ramzan et al., 2025). Of particular interest are apple, chokeberry and pumpkin pomace – readily available, low-cost materials with high contents of fiber and natural antioxidants.

Reusing this type of plant waste in food production can help reduce raw material losses, improve the nutritional profile of final products and increase their market value (Pakulska et al., 2024; Gil–Martín et al., 2022).

One of the most promising technological approaches for incorporating such by-products into food is the extrusion-cooking technology – an advanced, high-efficiency processing method widely used in the food industry (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2021; Sule et al., 2024). Extrusion-cooking involves subjecting the feed material to high temperature, pressure and shear forces over a short residence time. These conditions induce physicochemical transformations, resulting in a final product with modified structure, texture and functional properties (Qui et al., 2024; Pismag et al., 2024). The method is extensively employed in the production of snacks, breakfast cereals, pasta, petfood and specialised nutritional products. An important advantage of extrusion-cooking is the ability to combine cooking and shaping in a single step, contributing to lower energy consumption and process simplification (Mironeasa et al., 2023). The design of plasticizing system in the extruder-cooker significantly affects both the course of the extrusion-cooking process and the characteristics of the final product. These systems differ primarily in the length-to-diameter (L/D) ratio of the screw, which influences the shear, pressure and residence time applied to the materials. A higher L/D ratio typically allows for the inclusion of additional functional barrel zones – such as mixing or degassing sections – thereby enabling more precise control over product transformation and quality (Lewko et al., 2024). The configuration of the screw system is therefore a critical factor in optimizing the processing of formulations enriched with fiber-rich by-products as plant pomace (Schmid et al., 2020).

Incorporating of fresh fruit and vegetable pomace into mixtures offers several benefits. It enriches the products with fiber and bioactive compounds, limits the water addition into raw materials composition, while enabling the valorization of materials that would otherwise be discarded (Gupta et al., 2024). The latest research has shown that such fresh additives can affect extrusion-cooking parameters (efficiency, energy consumption, and pressure) as well as physical and sensory characteristics of the extrudates including structure, expansion, bulk density and water absorption. It is possible to formulate the products that are both

acceptable to consumers and environmentally sustainable, provided that there is adequate consideration of formulation and parameter optimisation (Soja et al., 2025).

Based on this information, the aim of this study was to evaluate the effect of extrusion-cooking parameters on process efficiency, energy consumption and selected physical properties of extruded food products enriched with fresh apple, chokeberries and pumpkin pomace. Particular focus in the study was placed on comparing the type and level of additives used when processed in different plasticizing systems, characterised by different screw L/D ratios. This was undertaken in order to assess the impact on the extrusion-cooking process and the quality attributes of the final products. In a broader sense, this work supports the implementation of sustainable and circular solutions in food production chain.

MATERIALS AND METHODS

Raw materials

In 2023, in the laboratories of the Department of Food Process Engineering at the University of Life Sciences in Lublin, research was conducted on the management of agri-food industry by-products in the production technology of extruded snack pellets. The main goal of the experiment was to evaluate the effect of the addition of selected fresh plant pomace on the extrusion-cooking process and the physical properties of the extrudates obtained. As part of the study, a comparative analysis of various plasticizing system configurations was carried out to evaluate the influence of system design on the development of product properties and the efficiency of the technological process.

Fresh plant pomace derived from apples, chokeberries and pumpkin was introduced into the raw material mixtures. The addition of these components was intended to assess the influence on technological parameters and the quality of the obtained snack pellets. At the same time, a control sample was prepared which served as a reference point for comparative analysis. The production process of snack pellets was based on the recipes developed for the study. The blends were composed of ingredients obtained from local suppliers, including high quality potato starch, potato flakes, rapeseed oil, beet sugar and salt. These raw material bases allowed for effective monitoring of

the influence of the variables studied on the quality and course of the extrusion–cooking process.

At the beginning of the research phase, raw material compositions were developed according to the established recipes (Table 1). Plant-based pomace derived from apples, chokeberries and pumpkin, was introduced as a fresh pulp into each composition at three levels: 10, 20 and 30% by weight.

The concentrations were selected on the basis of previous own experience and analysis of available literature sources. The selected conditions were considered optimal in terms of potential for modifying technological and physicochemical properties of the product, while preserving sensory acceptability. Exceeding the 30% level could lead to process disturbances such as pressure and temperature instability, which would consequently reduce the quality of the obtained extrudates.

Prior to inclusion in the raw material mixtures, fresh fruit and vegetable pomace were finely ground using a Germin CY–329 cup blender (Germin Berlinger, Jarosław, Poland). This procedure made it possible to obtain a homogeneous fraction of plant material, which was crucial to ensure the structural integrity of the mixtures. Sample batches of 4.5 kg were then prepared, in which the proportions of base ingredients and plant additives were adjusted accordingly, depending on the assumed pomace content. To ensure an even distribution of the individual components and to minimise differences in moisture distribution, all mixtures were subjected to a sieving process (0.63 mm). They were then stored under refrigeration for 24 hours. This stage served to stabilise the system and equalise the moisture levels throughout the material, which was important to maintain the uniformity of the extrusion process.

Extrusion-cooking processing

Prior to the actual thermomechanical processing, the actual water content of the samples

was determined. On this basis, the hydration process was carried out by mixing with tap water to 34% of feed moisture as the value considered optimal, in accordance with previous research results and the applicable technological conditions. This allowed proper preparation of the feedstock for the extrusion-cooking process, minimising the risk of technological disruption.

The production of extrudates with added fresh fruit and vegetable pomace was carried out using a single-screw extruder-cooker (EXP–45–32, Zamak Mercator, Skawina, Poland). The equipment comprised two plasticizing systems with different screw length-to-diameter (L/D) ratios: 16 and 20. This configuration enabled a comparison of the effect of screw design on process parameters and product quality. The extrusion-cooking process was conducted at different screw speeds (40, 60 and 80 rpm). The temperature in the barrel's heating zones ranged from 30 to 81 °C (Tables 2 and 3), thereby ensuring stable thermal conditions during processing. The plasticizing system with an L/D ratio of 20 contained an additional fourth section, which supported improved plasticization of the fibrous material. The extruded mass was shaped through a ring die with a slit thickness of 0.6 mm. A cutting unit, located in a close proximity to the die, was employed to cut the material into uniform pieces. The drying process of the extrudates was conducted in a laboratory shelf dryer at 40 °C for 12 hours, until moisture content reached 8.5–9.5%. After the drying process, the products were sealed in Ziplock bags and stored prior to further analysis.

Processing characteristics

Process efficiency (Q) was determined by measuring the mass of extrudate exiting the die at 30-second intervals. All processing conditions, including feed rate, were kept constant during

Table 1. Composition of the mixtures

Raw material	Control sample	10% pomace	20% pomace	30% pomace
Apple, chokeberry, pumpkin pomace (%)	0	10	20	30
Potato starch (%)	82	72	62	52
Potato flakes (%)	15	15	15	15
Rapeseed oil (%)	1	1	1	1
Sugar (%)	1	1	1	1
Salt (%)	1	1	1	1

Table 2. Temperature profile of individual extruder–cooker sections under processing of snack pellets with L/D 16 plastification system

Type of plant pomace	Content of the additive (%)	Screw speed (rpm)	Temperature of section I (°C)	Temperature of section II (°C)	Temperature of section III (°C)	Temperature of section IV (°C)
Control sample	0	40	31.40 ± 0.00	60.33 ± 0.67	75.63 ± 0.50	81.80 ± 1.91
		60	31.80 ± 0.20	61.80 ± 0.26	77.77 ± 0.31	80.40 ± 0.20
		80	32.37 ± 0.12	59.60 ± 1.01	76.93 ± 1.34	79.37 ± 0.71
Apple pomace	10	40	32.00 ± 0.10	58.80 ± 0.85	67.70 ± 0.26	73.40 ± 0.00
		60	32.50 ± 0.00	59.77 ± 0.64	68.13 ± 0.15	73.50 ± 0.00
		80	33.00 ± 0.00	59.73 ± 0.64	68.37 ± 0.15	73.50 ± 0.00
	20	40	33.83 ± 0.06	62.13 ± 0.75	66.90 ± 0.40	73.67 ± 0.06
		60	33.47 ± 0.06	60.83 ± 0.84	67.63 ± 0.31	73.83 ± 0.06
		80	33.30 ± 0.00	60.87 ± 0.25	67.63 ± 0.40	73.87 ± 0.12
	30	40	34.03 ± 0.06	60.23 ± 0.60	67.60 ± 0.46	73.53 ± 0.06
		60	34.47 ± 0.06	59.83 ± 0.84	67.60 ± 0.35	73.50 ± 0.10
		80	34.90 ± 0.00	60.47 ± 0.31	68.47 ± 0.45	73.57 ± 0.06
Chokeberry pomace	10	40	31.77 ± 0.06	60.47 ± 1.29	60.47 ± 1.29	73.63 ± 0.06
		60	31.80 ± 0.00	61.47 ± 0.51	61.47 ± 0.51	73.33 ± 0.15
		80	37.73 ± 0.12	59.10 ± 0.75	58.50 ± 0.62	72.80 ± 0.10
	20	40	31.70 ± 0.00	61.00 ± 0.20	65.50 ± 0.00	73.50 ± 0.10
		60	31.60 ± 0.06	60.40 ± 0.20	66.07 ± 0.15	73.10 ± 0.00
		80	31.73 ± 0.06	59.63 ± 0.81	67.63 ± 0.42	73.13 ± 0.06
	30	40	31.90 ± 0.00	60.77 ± 0.25	65.00 ± 0.10	72.83 ± 0.06
		60	31.90 ± 0.00	61.23 ± 0.50	64.67 ± 0.40	73.07 ± 0.06
		80	31.90 ± 0.00	59.07 ± 1.16	66.60 ± 1.21	73.37 ± 0.06
Pumpkin pomace	10	40	28.60 ± 0.10	58.63 ± 1.42	68.03 ± 0.31	73.37 ± 0.55
		60	29.27 ± 0.15	58.57 ± 1.23	68.07 ± 0.35	72.23 ± 0.06
		80	29.83 ± 0.12	58.67 ± 1.59	68.43 ± 0.25	72.83 ± 0.46
	20	40	31.47 ± 0.06	60.13 ± 1.10	67.87 ± 0.35	73.43 ± 0.06
		60	31.07 ± 0.06	60.40 ± 0.72	68.07 ± 0.35	73.43 ± 0.15
		80	30.50 ± 0.10	58.67 ± 1.40	68.30 ± 0.20	73.57 ± 0.06
	30	40	30.80 ± 0.17	60.27 ± 0.31	67.33 ± 0.35	73.07 ± 0.06
		60	30.60 ± 0.00	59.87 ± 0.98	67.67 ± 0.55	73.13 ± 0.06
		80	31.00 ± 0.10	59.33 ± 1.17	68.10 ± 0.40	73.00 ± 0.17

measurements. Each measurement was repeated three times and the mean value was used for final calculations. Time was recorded using a digital stopwatch and mass was measured with a precision balance (DS–788 Yakudo, Tokyo, Japan) with an accuracy of 0.001 kg. The procedure followed the method described by Kręcis (2016) and allowed for reduced measurement error and improved result reliability:

$$Q = m t^{-1} \quad (1)$$

where: Q is the efficiency (kg h^{-1}), m is the mass of extrudate obtained during measurement (kg), t is the measurement time (h).

Energy consumption was monitored continuously using a built-in wattmeter integrated into the extruder-cooker's standard control system. Energy consumption was assessed by analysing motor load, process efficiency, machine specifications and recorded operating parameters. On the basis of these data, the specific mechanical energy (SME) was calculated. Each value was determined as the average of three repetitions. The calculation followed the method described by Ryu and Ng (2001) and the measured values were converted into SME using the following formula:

$$SME = (n n_m^{-1})(O 100^{-1})(P Q^{-1}) \quad (2)$$

Table 3. Temperature profile of individual extruder-cooker sections under processing of snack pellets with L/D 20 plastification system

Type of plant pomace	Content of the additive (%)	Screw speed (rpm)	Temperature of section I (°C)	Temperature of section II (°C)	Temperature of section III (°C)	Temperature of section IV (°C)	Temperature of section V (°C)
Control sample	0	40	30.50 ± 0.00	60.03 ± 0.15	64.90 ± 0.10	71.57 ± 0.06	72.67 ± 0.06
		60	30.70 ± 0.00	59.93 ± 0.25	64.90 ± 0.20	71.67 ± 0.06	72.97 ± 0.06
		80	30.97 ± 0.12	59.83 ± 0.55	64.90 ± 0.17	70.47 ± 0.31	69.67 ± 0.31
Apple pomace	10	40	33.13 ± 0.06	59.90 ± 0.17	64.83 ± 0.21	69.63 ± 0.15	70.77 ± 0.31
		60	33.13 ± 0.06	59.77 ± 0.58	64.67 ± 0.12	70.27 ± 0.06	72.53 ± 0.12
		80	33.10 ± 0.00	60.03 ± 0.06	65.07 ± 0.12	68.03 ± 0.06	70.00 ± 0.10
	20	40	33.10 ± 0.00	60.07 ± 0.06	64.83 ± 0.06	67.47 ± 0.06	69.93 ± 0.06
		60	33.10 ± 0.00	59.97 ± 0.06	64.80 ± 0.36	66.43 ± 0.06	66.50 ± 0.10
		80	33.00 ± 0.00	60.10 ± 0.00	64.77 ± 0.38	67.37 ± 0.15	69.23 ± 0.15
	30	40	32.93 ± 0.06	60.23 ± 0.50	64.97 ± 1.36	67.50 ± 0.00	69.63 ± 0.06
		60	32.90 ± 0.00	60.60 ± 0.46	63.47 ± 0.20	67.70 ± 0.00	69.90 ± 0.10
		80	32.90 ± 0.00	60.10 ± 0.10	66.43 ± 1.70	67.73 ± 0.06	70.13 ± 0.06
Chokeberry pomace	10	40	33.10 ± 0.00	59.73 ± 0.06	65.47 ± 0.06	66.00 ± 0.00	66.77 ± 0.06
		60	33.30 ± 0.00	60.20 ± 0.00	64.77 ± 0.06	66.80 ± 0.10	68.77 ± 0.15
		80	33.30 ± 0.00	59.90 ± 0.00	64.63 ± 0.06	66.80 ± 0.00	69.17 ± 0.06
	20	40	32.90 ± 0.00	60.37 ± 0.06	67.17 ± 0.06	66.43 ± 0.06	68.43 ± 0.06
		60	32.90 ± 0.00	61.07 ± 0.06	67.57 ± 0.06	66.57 ± 0.06	68.80 ± 0.00
		80	32.87 ± 0.06	59.60 ± 0.10	68.07 ± 0.15	66.50 ± 0.00	69.03 ± 0.06
	30	40	32.60 ± 0.00	59.57 ± 0.31	64.43 ± 0.25	66.40 ± 0.10	68.23 ± 0.06
		60	32.40 ± 0.00	59.97 ± 0.12	64.93 ± 0.06	66.30 ± 0.00	68.00 ± 0.00
		80	32.20 ± 0.00	59.90 ± 0.00	64.70 ± 0.00	66.30 ± 0.00	68.00 ± 0.00
Pumpkin pomace	10	40	32.27 ± 0.06	64.77 ± 0.50	70.07 ± 0.15	73.40 ± 0.10	75.27 ± 0.06
		60	31.90 ± 0.00	64.90 ± 0.17	69.93 ± 0.06	73.07 ± 0.06	75.07 ± 0.21
		80	33.07 ± 1.63	60.33 ± 0.35	65.67 ± 1.33	69.90 ± 1.39	71.00 ± 2.43
	20	40	33.40 ± 0.00	60.40 ± 0.10	65.50 ± 0.10	69.80 ± 0.00	71.67 ± 0.06
		60	33.47 ± 0.15	60.07 ± 0.06	65.63 ± 0.06	70.27 ± 0.12	72.07 ± 0.12
		80	33.80 ± 0.10	60.13 ± 0.06	64.80 ± 0.17	70.03 ± 0.06	71.67 ± 0.06
	30	40	33.13 ± 0.06	59.90 ± 0.00	65.00 ± 0.00	66.90 ± 0.10	69.73 ± 0.06
		60	33.20 ± 0.00	59.87 ± 0.06	64.93 ± 0.06	66.30 ± 0.00	68.70 ± 0.00
		80	33.20 ± 0.00	60.00 ± 0.00	64.93 ± 0.06	66.70 ± 0.00	68.90 ± 0.10

where: SME is the specific mechanical energy (kWh kg^{-1}), n is the screw speed (rpm), n_m is the maximum screw speed (rpm), O is the engine load expressed as a percentage of the nominal power P (kW), Q is the extrusion-cooking process efficiency (kg h^{-1}).

Physical properties of extrudates

Bulk density (BD) was calculated as the ratio of sample mass to sample volume. Mass was measured using a precision balance (DS-788 Yakudo, Tokyo, Japan) with an accuracy of 0.001 kg. Each portion was placed in a container with

a fixed volume of 0.001 m^3 . This parameter describes the relationship between product weight and spatial dimensions. To ensure result accuracy, the measurement was repeated three times, and the average value was used. The procedure followed the method proposed by Han et al. (2018):

$$BD = m V^{-1} \quad (3)$$

where: BD is the bulk density (kg m^{-3}), m is the mass of the sample (kg), V is the volume of the measuring vessel (m^3).

The water absorption index (WAI) was determined using a modified procedure described by

Estrada-Giron et al. (2015). For the analysis, 0.7 g of extrudate that had previously been ground was weighed out and placed in a cylindrical vessel. Thereafter, 7 mL of distilled water was added to the vessel. The mixture was stirred continuously for a period of 20 minutes, thereby facilitating optimal interaction between the water molecules and the hydrophilic components present within the sample. Following the rehydration step, the suspension was subjected to a centrifugation process at 15,000 rpm for a duration of 10 minutes, utilizing a Digicen 21 centrifuge (Labsystem, Krakow, Poland). Following centrifugation, the upper layer was meticulously extracted, while the residual gel precipitate was measured with a precision laboratory balance (WPS 210/C, Radwag, Radom, Poland) with a precision of 0.001 g. The test was performed on each sample three times to enhance the accuracy and repeatability of the results. The final WAI value was calculated as the arithmetic mean of three independent replicates using a formula specific to this type of determination:

$$WAI = m_g m_s^{-1} \quad (4)$$

where: WAI is the water absorption index (g g^{-1}), m_g is the mass of formed gel (g), m_s is the mass of dry sample (g).

The water solubility index (WSI) was determined according to the procedure described by Estrada-Giron et al. (2015) using adapted laboratory conditions. After measuring the water absorption index (WAI), the supernatant obtained was exposed to a water evaporation process. This activity was carried out in an SLW 53 STD laboratory dryer (Pol-Eko Aparatura S.J., Wodzisław Śląski, Poland), at a temperature of 110 °C, until the water was completely removed. After drying process, the solid residue was precisely weighed using a laboratory balance WPS 210/C (Radwag, Radom, Poland), ensuring a measurement accuracy of 0.001 g. The WSI determination was carried out three times for each sample to increase the reliability of the results. The final value was calculated as the arithmetic mean of three independent measurements using the appropriate formula:

$$WSI = (m_v - m_{dv}) m_s^{-1} 100 \quad (5)$$

where: WSI is the water solubility index (%), m_v is the mass of the vessel before drying process (g), m_{dv} is the mass of the vessel

after drying process (g), m_s is the mass of the dry sample (g).

Statistical analysis

The Statistica 13.3 software was used to compile the results. A significance level of $\alpha = 0.05$ was assumed. For statistical analysis, response surface methodology (RSM) was used for fitting polynomial models, where x was the screw speed and y was the various pomace addition level; also the quadratic equations of the tested characteristics were evaluated depending on the variables used in the experiment. The coefficient of determination R^2 was appointed.

RESULTS AND DISCUSSION

Characteristics of extrusion-cooking process

In the control samples (without pomace), the efficiency of the extrusion-cooking process increased along with screw speed. In the L/D 16 plasticizing system, the highest efficiency was 21.48 kg h^{-1} at 80 rpm, while in the L/D 20 system the maximum value reached 14.40 kg h^{-1} at the same speed. These results indicate that the shorter plasticizing system (L/D 16) provided higher process efficiency for the base mixture. For extrudates with an apple pomace, at a concentration of 10%, the L/D 16 system achieved efficiency ranging from 8.88 to 16.32 kg h^{-1} , increasing with rising screw speed (Figure 1a). For the same concentration, the L/D 20 system recorded lower values (Figure 1b), ranging from 7.68 to 15.12 kg h^{-1} . At a concentration of 20% apple pomace, a significant increase in efficiency was observed in the L/D 20 system, with a value of 24.0 kg h^{-1} at 40 rpm being the highest of all samples. For L/D 16 in the same concentration range, the maximum value did not exceed 13.68 kg h^{-1} . At 30% apple addition, the efficiency in the L/D 16 system was still high (up to 19.2 kg h^{-1}); while in L/D 20 it reached a maximum of 15.84 kg h^{-1} , suggesting limitations at high fiber saturation in the longer system. For chokeberry pomace, 10% addition resulted in lower values compared to apples – at L/D 16 the range was 6.96–16.80 kg h^{-1} and at L/D 20 it was 8.40–14.52 kg h^{-1} (Figure 1b and 1c, respectively). The highest results for chokeberry pomace were obtained at 20% addition, where 19.44 kg h^{-1} at 80 rpm was achieved at L/D

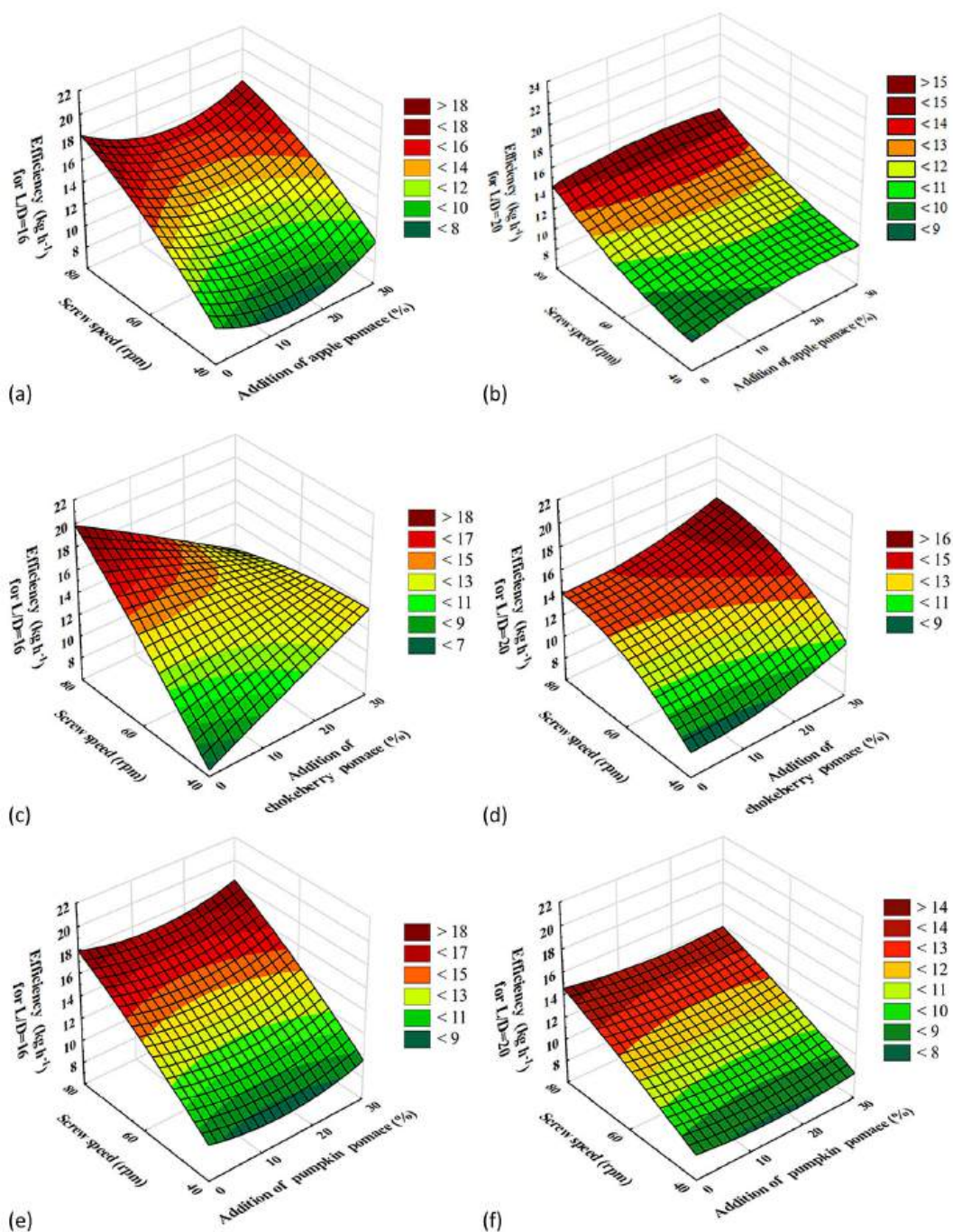


Figure 1. Effect of plant pomace addition and screw speed on the processing efficiency of snack pellets, for two plasticizing systems, (a) apple pomace addition with L/D 16, (b) apple pomace addition with L/D 20, (c) chokeberry pomace addition with L/D 16, (d) chokeberry pomace addition with L/D 20, (e) pumpkin pomace addition with L/D 16, (f) pumpkin pomace addition with L/D 20

16. For the system with L/D 20 ratio, the efficiency for this concentration was lower and did not exceed 14.40 kg h⁻¹. At 30% chokeberry pomace addition, the L/D 16 system showed a decrease in efficiency (down to 9.12 kg h⁻¹), while L/D 20 maintained relatively high values (up to 17.04 kg h⁻¹), which may indicate a better adaptation of this system to the structure of this raw material

at high loadings. For extrudates with pumpkin pomace, the L/D 16 system provided significantly higher and more stable efficiency in all variants (Figure 1e). At 10% addition, values ranged from 9.12–17.16 kg h⁻¹, while at L/D 20 7.32–14.64 kg h⁻¹. For 20% pumpkin pomace addition, L/D 16 reached a maximum of 17.52 kg h⁻¹, while L/D 20 reached 14.88 kg h⁻¹. The highest efficiency for

pumpkin pomace were obtained at 30% concentration, where L/D 16 recorded as much as 19.44 kg h⁻¹ at 80 rpm, one of the highest results. At L/D 20 for this concentration, values did not exceed 13.68 kg h⁻¹ (Figure 1f).

Similar correlations for extrusion–cooking efficiency were presented by Lisiecka and Wójtowicz (2019) who found the highest values at lower vegetable additive concentrations and higher screw speed. In the conducted study, the maximum efficiency was achieved at 20% apple addition in the L/D 20 system, while further increases in pomace proportion led to a decrease efficiency. Although different additives and operating parameters were used in both cases, the common conclusion is that the type of raw material, its quantity and mechanical conditions play an important role in shaping the process efficiency. Similar relationships of extrusion–cooking process efficiency were observed by Lisiecka et al. (2021) who showed that an increase in screw speed contributed to the efficiency of snack production with the addition of fresh vegetable pulp, although this effect depended on the type of raw material. The highest efficiency was obtained with 7.5% onion addition and 120 rpm, while the lowest was obtained for 10% carrots at 80 rpm. The conducted study also found an increase in efficiency with screw speed, particularly in the L/D 16 system. At the same time, it showed that too high an additive concentration (30%) led to a decrease in efficiency, confirming that both the type and amount of vegetable raw material have a significant effect on extrusion–cooking efficiency.

For the control samples, the SME values ranged from 0.018–0.074 kWh kg⁻¹ for the L/D 16 system and 0.025–0.067 kWh kg⁻¹ for the L/D 20 system. Higher speed generally led to lower energy consumption, especially for the L/D 16 system. For the addition of apple pomace at 10% concentration, a pronounced increase in SME was noticed, especially at L/D 20, where values reached 0.189 kWh kg⁻¹ (at 40 rpm). In L/D 16 system (Figure 2a), the highest values were also recorded at this speed (up to 0.093 kWh kg⁻¹), while at 60 and 80 rpm the SME even dropped to 0.009 kWh kg⁻¹. At 20% concentration of pomace, the L/D 20 system showed significant fluctuations (Figure 2b), from 0.019 to 0.183 kWh kg⁻¹, while L/D 16 was more stable (0.013–0.113 kWh kg⁻¹). At 30% apple pomace, the SME values in L/D 16 fluctuated around 0.023–0.047 kWh kg⁻¹, while in L/D 20 increased to 0.114 kWh kg⁻¹ at 40 rpm. At 10% chokeberry pomace addition, the mixtures

processed in L/D 16 system showed moderate energy consumption (0.012–0.122 kWh kg⁻¹) (Figure 2c), while L/D 20 presented scattered values ranging from 0.027 to 0.108 kWh kg⁻¹ (Figure 2d). At 20%, the SME in L/D 16 remained at 0.005–0.065 kWh kg⁻¹, while in L/D 20 it varied between 0.016 and 0.025 kWh kg⁻¹. At a concentration of 30% for this additive, L/D 16 recorded a marked increase in SME at the highest speed (0.113 kWh kg⁻¹), while L/D 20 remained relatively energy efficient (minimum of 0.014 kWh kg⁻¹ at 80 rpm). In the case of pumpkin pomace, as presented in Figure 2e and 2f, for 10% concentration SME was relatively low in the L/D 16 system (up to 0.092 kWh kg⁻¹), while in L/D 20 it peaked at up to 0.126 kWh kg⁻¹ at 40 rpm. At 20% pumpkin addition, the L/D 20 generated extremely high energy consumption values of up to 0.139 kWh kg⁻¹ (60 rpm), while the L/D 16 maintained a lower and more even level (0.012–0.054 kWh kg⁻¹). For 30% pumpkin, the SME values in L/D 16 were stable (0.016–0.048 kWh kg⁻¹), while L/D 20 saw a rapid growth to as much as 0.151 kWh kg⁻¹.

In the Kantrong et al. (2018) study, an increase in screw speed and changes in mixture composition were found to increase SME values, which is consistent with the authors' observations. In both cases, it was noted that intensification of mechanical parameters led to higher energy requirements. In addition, both Kantrong et al. (2018) and the presented study showed that the amount of plant raw material addition influenced SME – an increase in SME resulted in an initial increase in the energy intensity of the process, which was associated with higher mass resistance during transport and plasticisation in the extruder–cooker. Both studies confirm that SME is a sensitive indicator of technological change and can effectively reflect the impact of recipe modifications and machine settings. In the study of Soja et al. (2025) a noticeable relationship was observed between pomace additive concentration, screw speed and L/D system configuration and specific mechanical energy consumption (SME) values. As in the presented study, the lowest SME values were found at higher speeds (80 rpm), while the highest values were found at lower speeds (40 rpm) and higher additive concentration, especially in the L/D configuration of 20. In both cases, it was shown that increasing the screw speed could effectively reduce material flow resistance and thus lower energy consumption.

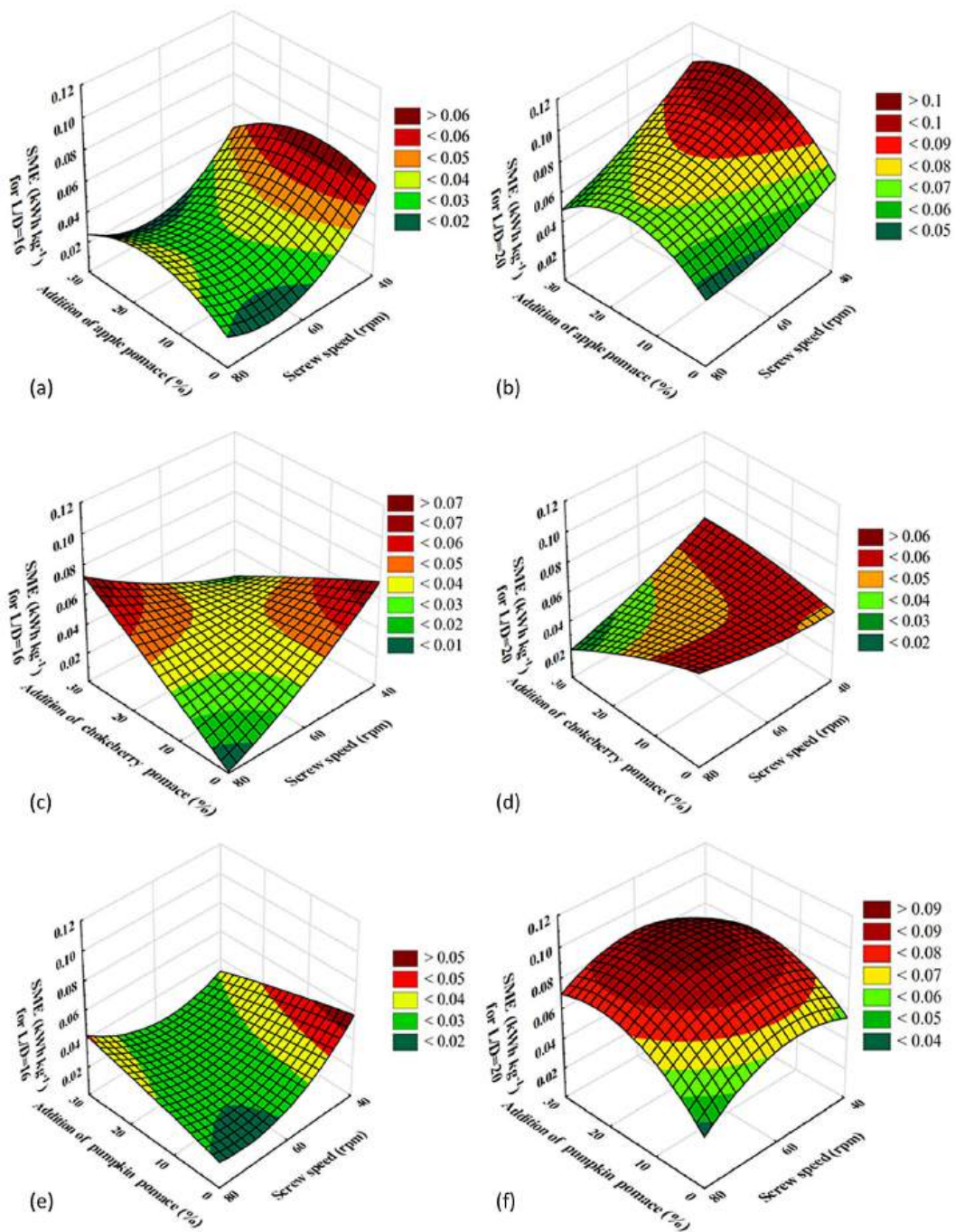


Figure 2. Effect of plant pomace addition and screw speed on the energy consumption during snack pellet processing for two plasticizing systems, (a) apple pomace addition with L/D 16, (b) apple pomace addition with L/D 20, (c) chokeberry pomace addition with L/D 16, (d) chokeberry pomace addition with L/D 20, (e) pumpkin pomace addition with L/D 16, (f) pumpkin pomace addition with L/D 20.

Moreover, the observations on the effect of the length of the plasticisation zone are consistent, with the L/D 20 configuration being associated with higher SME at lower speeds due to higher friction and longer residence time of the material in the cylinder. As speeds increased, these differences decreased and the process was more energy efficient. In both Soja et al. (2025) study and

the present study, it was noted that the highest SME occurred at lower additive concentrations, and that further increases could lead to lower energy efficiency – which could be the result of changes in flow structure and lower mass compaction. Both studies confirm that SME is strongly dependent on the interaction between additive, screw geometry and machine parameters.

The comparison of the results clearly shows that both changes in raw material composition and the process configurations used affect generation efficiency and energy requirements, as is well illustrated by the relationships shown in Table 4.

Physical properties of extruded snack pellets with pomace addition

In the control samples, the bulk density values at L/D 16 system ranged from 399.52 to 407.41 kg m⁻³, while at L/D 20 were slightly higher, ranging from 402.68 to 408.26 kg m⁻³. The highest recorded value was observed at L/D 20 and 60 rpm, which may indicate enhanced compression within the extended plasticizing system under conditions of medium processing intensity. For the extrudates with the addition of apple pomace, a systematic increase in bulk density was noticeable compared to the control sample. At 10% addition, values reached a maximum of 458.23 kg m⁻³ (L/D 16) and 527.87 kg m⁻³ (L/D 20) as presented in Figure 3a and 3b, respectively. As the concentration increased to 20%, the density decreased slightly – to approximately 430.12 kg m⁻³ (L/D 16) and 510.08 kg m⁻³ (L/D 20). Further increases to 30% resulted in a further decrease in density, reaching a minimum of 416.19 kg m⁻³ at L/D

16 and 504.12 kg m⁻³ at L/D 20. This trend suggests that a moderate addition of apple pomace improves the spatial structure, but an excess may destabilise it. The extrudates with chokeberry pomace showed the highest density values among the additives analysed (Figure 3c and 3d). At 10% additive, L/D 16 generated values up to 578.45 kg m⁻³ and L/D 20 up to 690.25 kg m⁻³. Even at a concentration of 20%, the density in both systems remained high (up to 545.25 kg m⁻³ and 655.78 kg m⁻³, respectively). For the samples with 30% addition, a decrease in density was observed (min. 461.11 kg m⁻³ in L/D 16 and 584.45 kg m⁻³ in L/D 20), but it still remained significantly higher than for the other groups. The high content of fiber and peel can affect the density of the material. The extrudates enriched with pumpkin pomace also showed an increase in density compared to the control sample, although less pronounced than for apples and chokeberry pomace. At 10% addition, the maximum density reached 553.58 kg m⁻³ (L/D 16, Figure 3e) and 589.86 kg m⁻³ (L/D 20, Figure 3f). As the concentration increased to 20%, a gentle decrease to 474.27 and 566.54 kg m⁻³ was observed, respectively. The lowest bulk density values for pumpkin pomace occurred at 30% addition and 80 rpm – 425.77 kg m⁻³ at L/D

Table 4. Response surface fitting models describing the processing efficiency (Q) and energy consumption (SME) during the extrusion-cooking process as a function of plant pomace addition and screw speed for two plasticizing systems (L/D 16 and 20).

L/D	Additive	Property	Model equation	R ²
16	Apple pomace	Q (kg h ⁻¹)	$-6.1942 - 0.221x + 0.4693y + 0.0099x^2 - 0.0014xy - 0.0021y^2$	0.899
		SME (kWh kg ⁻¹)	$0.2803 + 0.0009x - 0.0078y - 7.1111E^{-5}x^2 + 1.7333E^{-5}xy + 5.6875E^{-5}y^2$	0.696
	Chokeberry pomace	Q (kg h ⁻¹)	$-10.364 + 0.7656x + 0.4706y - 0.0003x^2 - 0.0129xy - 0.0012y^2$	0.688
		SME (kWh kg ⁻¹)	$0.1818 - 0.0056x - 0.0033y - 3.8889E^{-6}x^2 + 0.0001xy + 1.2708E^{-5}y^2$	0.695
	Pumpkin pomace	Q (kg h ⁻¹)	$-2.6118 - 0.1316x + 0.3363y + 0.0048x^2 - 4.5E^{-5}xy - 0.001y^2$	0.891
		SME (kWh kg ⁻¹)	$0.2195 - 0.0024x - 0.0056y - 4.4444E^{-6}x^2 + 4.2333E^{-5}xy + 3.8542E^{-5}y^2$	0.705
20	Apple pomace	Q (kg h ⁻¹)	$9.599 + 0.1461x - 0.0974y - 0.0028x^2 - 0.0006xy + 0.0019y^2$	0.769
		SME (kWh kg ⁻¹)	$0.124 + 0.0047x - 0.002y - 9.7222E^{-5}x^2 - 2.0417E^{-5}xy + 1.1979E^{-5}y^2$	0.813
	Chokeberry pomace	Q (kg h ⁻¹)	$-7.9853 - 0.0089x + 0.5394y + 0.0032x^2 - 6E^{-5}xy - 0.0033y^2$	0.932
		SME (kWh kg ⁻¹)	$0.0619 + 0.0027x - 0.0007y - 1.3611E^{-5}x^2 - 4.6583E^{-5}xy + 8.8542E^{-6}y^2$	0.878
	Pumpkin pomace	Q (kg h ⁻¹)	$0.5853 - 0.0408x + 0.2089y + 0.0021x^2 - 0.0006xy - 0.0004y^2$	0.941
		SME (kWh kg ⁻¹)	$-0.0612 + 0.0022x + 0.0046y - 8.1944E^{-5}x^2 + 1.7917E^{-5}xy - 4.2396E^{-5}y^2$	0.836

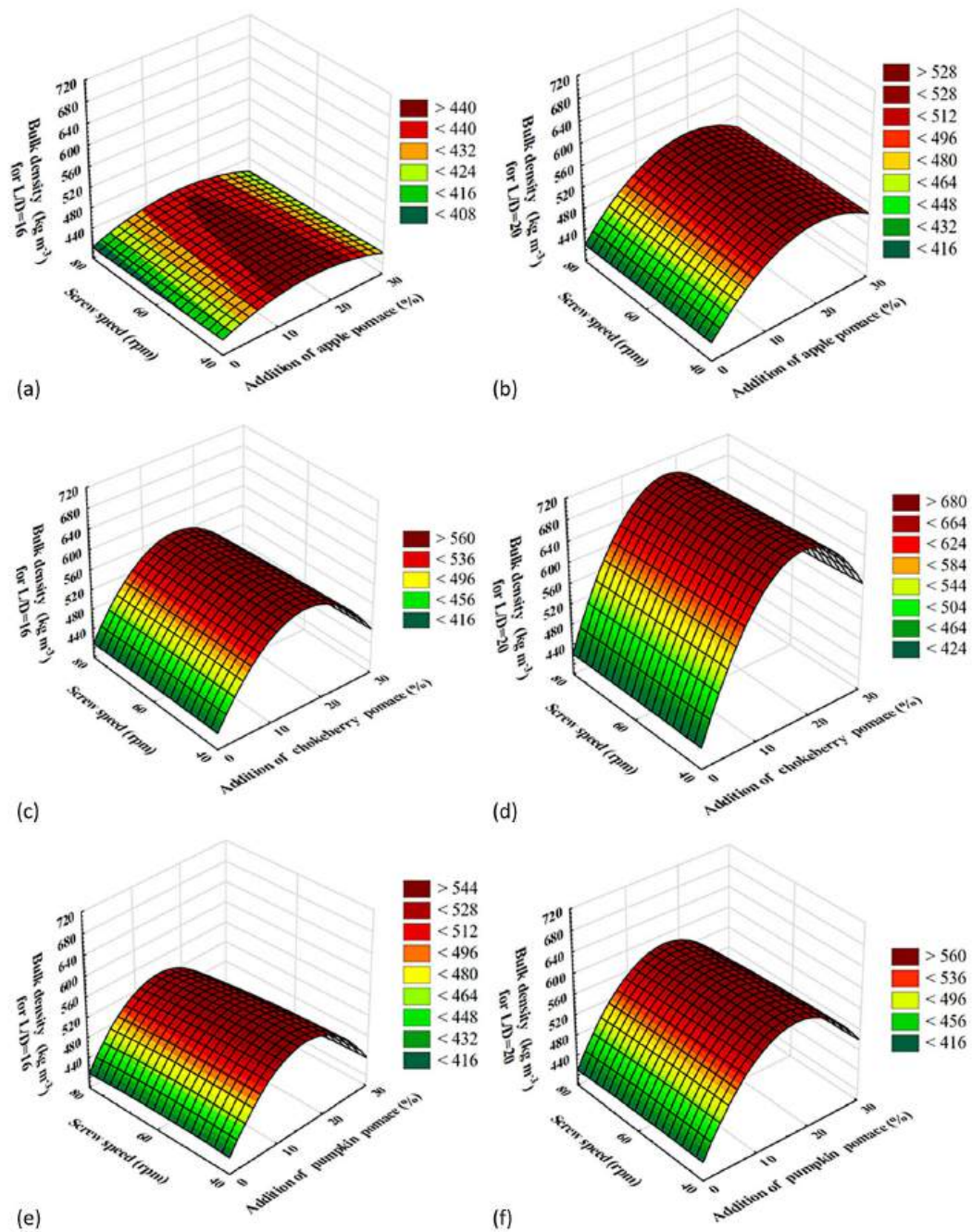


Figure 3. Effect of plant pomace addition and screw speed on the bulk density of snack pellets, for two plasticizing systems, (a) apple pomace addition with L/D 16, (b) apple pomace addition with L/D 20, (c) chokeberry pomace addition with L/D 16, (d) chokeberry pomace addition with L/D 20, (e) pumpkin pomace addition with L/D 16, (f) pumpkin pomace addition with L/D 20

16 and 489.95 kg m^{-3} at L/D 20, indicating a loosening of the structure due to an excess of insoluble components (Figure 3e and 3f, respectively).

The study presented by Dushkova et al. (2024) showed that an increase in the addition of chokeberry pomace led to an increase in the bulk density of the extrudates, particularly at higher moisture levels. Although the moisture content

was constant in the conducted study (34%), it was also observed that a higher proportion of pomace – especially from chokeberry – resulted in a major increase in density, confirming the general trend indicated by Dushkova et al. (2024). These authors also noted that screw speed had a minor effect on density. In the obtained results, the effect of speed was also limited, but some differences

depending on the configuration of the L/D system were noted – for example, for chokeberry pomace, density values were higher in the L/D 20 system than in the L/D 16 system regardless of speed. This may suggest that, as reported by Dushkova et al. (2024), the effect of changes in screw speed on density is secondary to the effect of raw material composition.

Potter et al. (2013) showed that the addition of fruit powder in all formulation variants led to a significant increase in bulk density compared to the control sample, with no significant differences observed between the different types of fruit. A similar relationship was noted in the conducted study – each type of pomace (apple, chokeberry, pumpkin) contributed to an increase in bulk density relative to the control sample, regardless of the type of raw material. This confirms that the pomace addition of a plant component with a high fiber content and a structure that is less susceptible to expansion increases the density of the finished product, regardless of the origin.

In the L/D 16 system, the water absorption index was in the range 4.14–4.34 g g⁻¹, while in the L/D 20 system it was slightly higher, reaching a maximum of 4.64 g g⁻¹ at 80 rpm. The increase in speed caused a slight increase in WAI, which may be due to a more intensive breakdown of the starchy structure. For the extrudates with apple pomace addition (Figure 4a and 4b), at a concentration of 10%, WAI values remained similar or slightly higher than in the control sample (4.12–4.26 g g⁻¹ in L/D 16 and 4.46–4.52 g g⁻¹ in L/D 20). However, an increase in the additive concentration to 20% led to a marked decrease in WAI – especially in the L/D 16 system, where values even fell to 3.11 g g⁻¹. For 30% apple addition, WAI decreased further and reached a minimum of 2.51 g g⁻¹ (L/D 16), which may suggest a reduction in absorption capacity due to depletion in hydrophilic components. A different trend was observed for chokeberry pomace. Already at 10% addition, there was an increase in WAI compared to the reference sample. Values reached 4.54 g g⁻¹ (L/D 16) and 4.42 g g⁻¹ (L/D 20) but at 20% addition differences were significant. The WAI of snack pellets increased to 4.91 g g⁻¹ when processed with L/D 16 but decreased to 4.29 g g⁻¹, when L/D 20 was used, as presented in Figure 4c and 4d. The highest WAI values throughout the study were obtained for 30% additive – as much as 6.01 g g⁻¹ in the L/D 16 system at 80 rpm. Such an increase may be related to the presence of

specific pectin and fiber fractions in the chokeberry pomace, which are characterised by high absorbability. Pumpkin pomace application also significantly increased WAI relative to the control sample, especially at lower concentrations. At 10% additive in the L/D 16 system (Figure 4e), values reached 5.65 g g⁻¹, and at L/D 20 (Figure 4f), even 6.25 g g⁻¹. Increasing the proportion of additive to 20%, resulted in a major decrease in values – to between 3.98 and 4.38 g g⁻¹. For 30% pumpkin, the WAI decreased even further – in the L/D 16 system to 3.12 g g⁻¹ and in L/D 20 to 3.45 g g⁻¹, which may be related to the presence of less reactive structural fractions.

In the study of Blejan et al. (2025) there was a marked decrease in WAI values with an increase in the proportion of bilberry pomace in the corn extrudates. All variants with additives had significantly lower water absorption than the control sample, which was explained by reduced starch gelatinisation in the presence of pectin and lipids. Similar correlations were observed in the conducted study – for apple and pumpkin additives, an increase in concentration resulted in a gradual decrease in WAI, particularly pronounced at 30% of raw material. This confirms that fruit and vegetable additives can reduce water binding capacity by affecting starch transformation during extrusion-cooking process.

In the study of Drożdż et al. (2019) a decrease in WAI from 6.5 to 4.6 g g⁻¹ was observed with an increase in the addition of blackcurrant pomace, what confirms the trends also seen in this experiment. In the considered case, increasing the proportion of apple, chokeberry and pumpkin pomace also resulted in a decrease in WAI, especially at a 30% addition. Both in the study of Drożdż et al. (2019) and in the presented results, no significant differences were found between the types of pomace used. This indicates a similar effect of fiber and compounds limiting starch gelatinisation.

The WSI values of extrudates without additives processed in L/D 16 system were in the range 5.45–5.82%, while slightly higher values of up to 6.65% were recorded at L/D 20, confirming the beneficial effect of a longer residence time of the material in the plasticising system on the development of soluble fractions. In the case of apple pomace, the incorporation of 10% resulted in a significant increase in WSI, reaching a maximum of 6.75% (L/D 16) and 6.47% (L/D 20) as reported in Figure 5a and 5b, respectively. It was demonstrated that higher concentrations

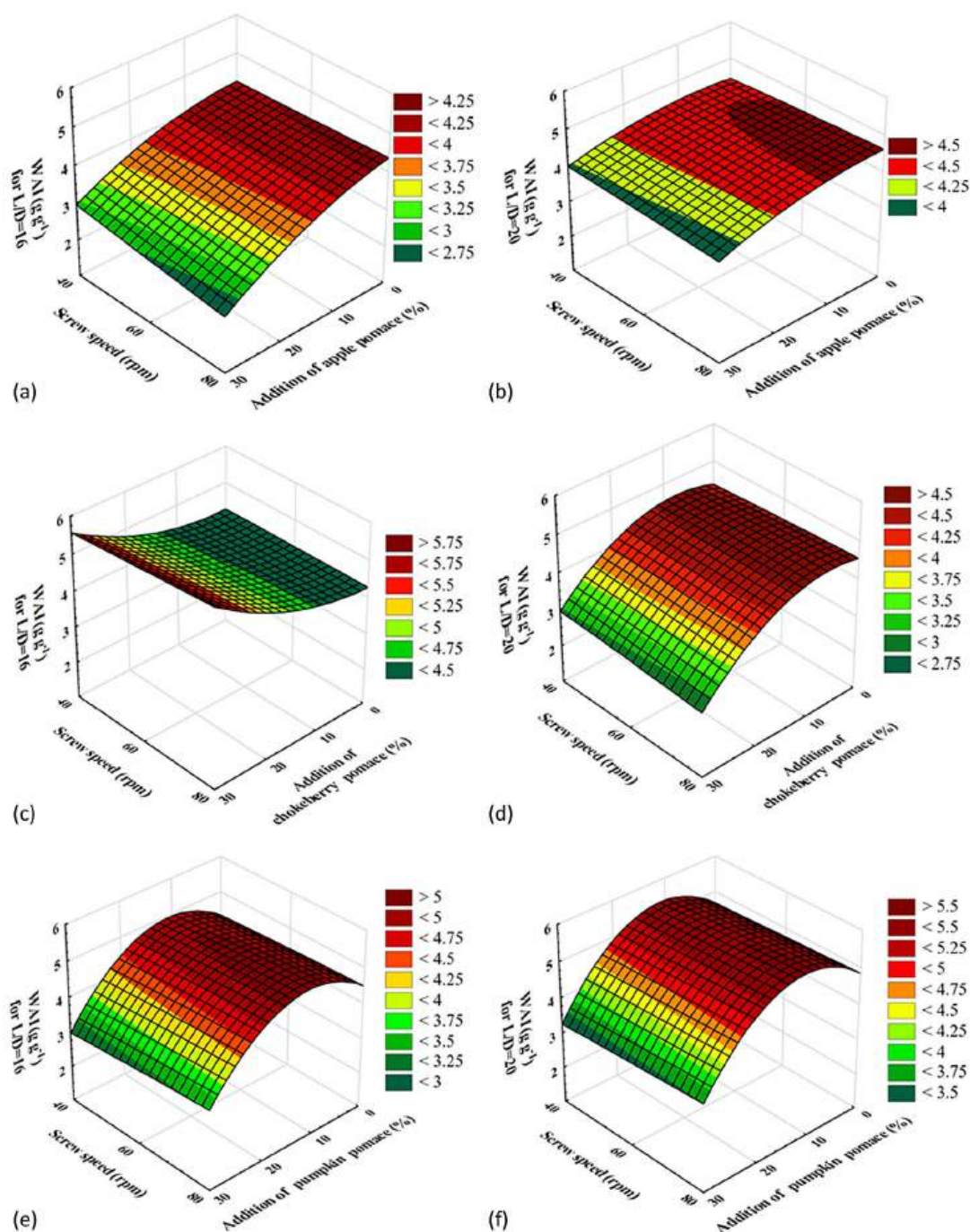


Figure 4. Effect of plant pomace addition and screw speed on the water absorption index of snack pellets, for two plasticizing systems, (a) apple pomace addition with L/D 16, (b) apple pomace addition with L/D 20, (c) chokeberry pomace addition with L/D 16, (d) chokeberry pomace addition with L/D 20, (e) pumpkin pomace addition with L/D 16, (f) pumpkin pomace addition with L/D 20

(20%) resulted in further increases, particularly in the L/D 16 system, where 7.32% was achieved at 80 rpm. The highest values for apple were observed at a concentration of 30%, reaching 7.52% (L/D 16) and 7.34% (L/D 20). This finding suggests that apple pomace significantly contributes to the development of the soluble fraction, likely as a result of the presence

of organic acids and fructooligosaccharides. For the extrudates enriched with chokeberry pomace, the WSI values increased less rapidly. At 10% addition, WSI ranged between 4.92 and 5.11% (L/D 16, Figure 5c) and between 5.41 and 5.67% (L/D 20, Figure 5d). More pronounced changes were only observed at 30%, where the WSI was 6.98% (L/D 16) and 7.92% (L/D

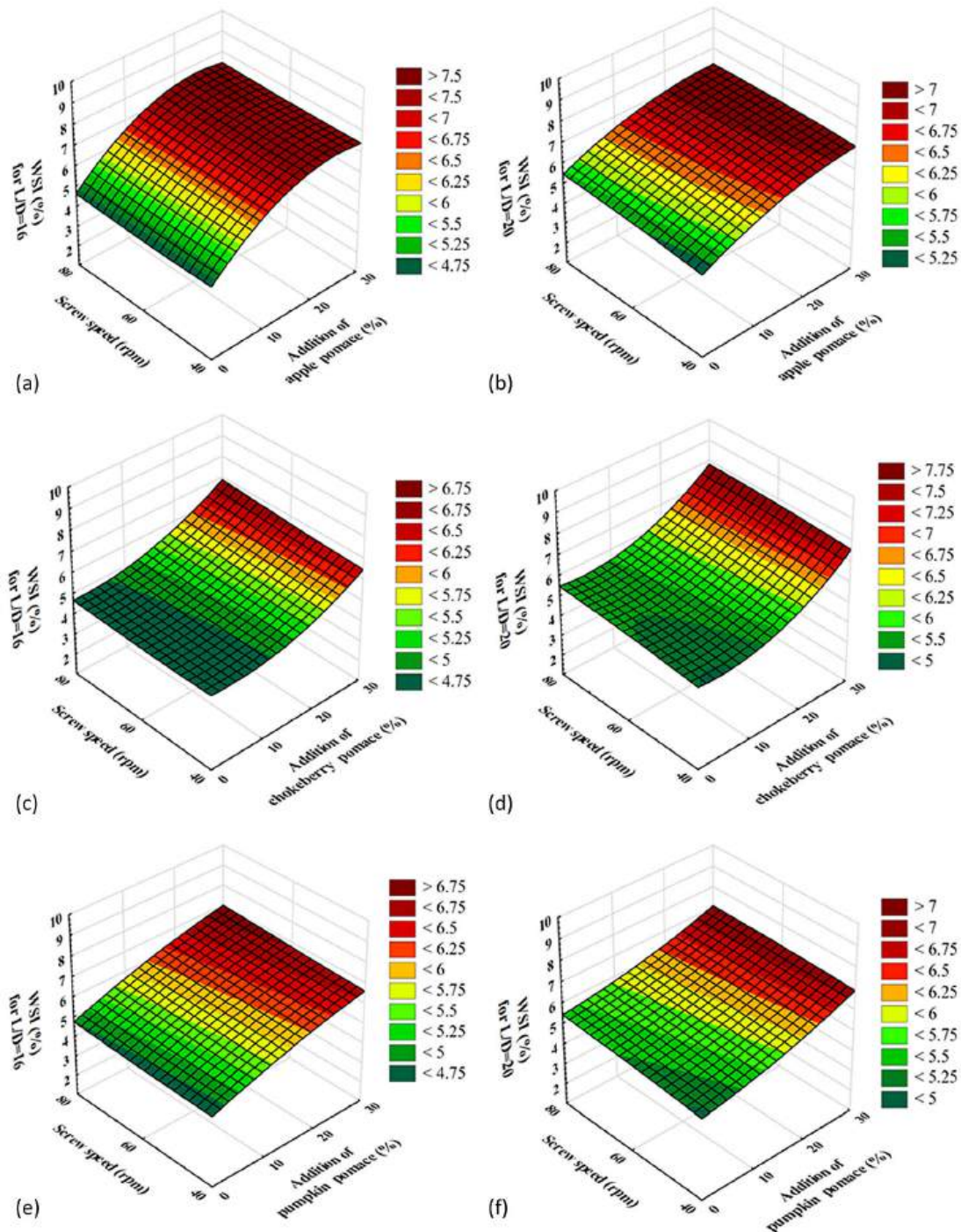


Figure 5. Effect of plant pomace addition and screw speed on the water solubility index of snack pellets, for two plasticizing systems, (a) apple pomace addition with L/D 16, (b) apple pomace addition with L/D 20, (c) chokeberry pomace addition with L/D 16, (d) chokeberry pomace addition with L/D 20, (e) pumpkin pomace addition with L/D 16, (f) pumpkin pomace addition with L/D 20

20), the highest value of all samples. The soluble fractions present in the chokeberry, including anthocyanins, may have contributed to this increase. In the case of pumpkin addition, the highest increase in WSI was already recorded at 10%: up to 5.93% in L/D 16 and 5.71% in L/D 20. Further increases in concentration up to 20%

resulted in moderate increases – up to 6.15% (L/D 16) and 6.28% (L/D 20). The highest values for pumpkin pomace were achieved at 30% addition – up to 7.05% and 7.20% respectively, indicating good solubility of the pumpkin components, albeit less than in chokeberry (Figure 5e and 5f, respectively).

Table 5. Response surface fitting models describing the bulk density (BD), water absorption index (WAI) and water solubility index (WSI) of snack pellets as a function of plant pomace addition and screw speed for two plasticizing systems (L/D 16 and 20)

L/D	Additive	Property	Model equation	R ²
16	Apple pomace	BD (kg m ⁻³)	$419.9363 + 4.6092x - 0.307y - 0.1395x^2 - 0.0007xy + 0.0011y^2$	0.918
		WAI (g g ⁻¹)	$4.2139 - 0.0165x + 0.0019y + 0.0016x^2 + 0.0003xy - 1.5625E^{-5}y^2$	0.977
		WSI (%)	$4.7778 - 0.0271x - 0.0083y + 0.0026x^2 + 0.0003xy + 8.5417E^{-5}y^2$	0.936
	Chokeberry pomace	BD (kg m ⁻³)	$405.1082 + 19.9435x + 0.3316y - 0.59x^2 - 0.0103xy - 0.0035y^2$	0.898
		WAI (g g ⁻¹)	$4.2139 - 0.0165x + 0.0019y + 0.0016x^2 + 0.0003xy - 1.5625E^{-5}y^2$	0.880
		WSI (%)	$4.7778 - 0.0271x - 0.0083y + 0.0026x^2 + 0.0003xy + 8.5417E^{-5}y^2$	0.917
	Pumpkin pomace	BD (kg m ⁻³)	$379.2641 + 17.6344x + 1.2924y - 0.5371x^2 - 0.0185xy - 0.0117y^2$	0.887
		WAI (g g ⁻¹)	$4.0342 + 0.1105x + 0.0089y - 0.0053x^2 + 0.0001xy - 4.1667E^{-5}y^2$	0.899
		WSI (%)	$4.5251 + 0.0872x - 0.0022y - 0.0008x^2 + 0.0002xy + 5.9375E^{-5}y^2$	0.786
20	Apple pomace	BD (kg m ⁻³)	$412.2249 + 12.0426x + 0.1168y - 0.3093x^2 + 0.002xy - 0.0017y^2$	0.899
		WAI (g g ⁻¹)	$4.0502 + 0.0624x + 0.0098y - 0.0032x^2 - 0.0003xy - 4.5833E^{-5}y^2$	0.836
		WSI (%)	$4.1333 - 0.022x + 0.027y + 0.0037x^2 - 0.0001xy - 0.0001y^2$	0.884
	Chokeberry pomace	BD (kg m ⁻³)	$417.406 + 31.0789x + 0.1761y - 0.8341x^2 - 0.0136xy - 0.0016y^2$	0.799
		WAI (g g ⁻¹)	$4.0502 + 0.0624x + 0.0098y - 0.0032x^2 - 0.0003xy - 4.5833E^{-5}y^2$	0.889
		WSI (%)	$4.1333 - 0.022x + 0.027y + 0.0037x^2 - 0.0001xy - 0.0001y^2$	0.893
	Pumpkin pomace	BD (kg m ⁻³)	$402.2073 + 20.8603x + 0.5839y - 0.5918x^2 - 0.0084xy - 0.0061y^2$	0.879
		WAI (g g ⁻¹)	$4.5104 + 0.1267x + 0.0044y - 0.0059x^2 + 6.5833E^{-5}xy - 3.125E^{-6}y^2$	0.947
		WSI (%)	$4.1715 + 0.0463x + 0.0222y + 0.001x^2 - 0.0003xy - 8.3333E^{-5}y^2$	0.924

The study of Schmid et al. (2021) showed that WSI values increased along with the intensity of thermomechanical processing, which was associated with degradation of the material structure and release of soluble fractions. In contrast, Selani et al. (2014) observed a decrease in WSI in extrudates with pineapple pomace, which was explained by the high content of insoluble fiber and the limited amount of starch in the blend. In the conducted study, WSI values increased markedly with both increasing additive concentration and screw velocity, which may reflect the predominance of easily soluble components such as simple sugars and soluble fiber fractions. The observed differences suggest that the direction of WSI changes depends primarily on the characteristics of the additive used and the process flow – the more low-molecular-weight ingredients and the more intensive the technological conditions, the higher the solubility of the finished product.

The obtained results confirmed that the choice of additive and processing conditions shaped the physical properties of the extrudates, including bulk density and water absorption and solubility, as shown in Table 5.

In the study of Sharifi et al. (2021) an increase in WSI from 44.99% to 48.44% was observed

with an increase in the proportion of soy flour in the recipe, which indicates more intensive decomposition of macromolecules during extrusion-cooking. A similar trend was observed in this experiment – WSI also increased along with the proportion of fruit and vegetable pomace, reaching values above 9%, which indicates an increased release of soluble components. In both cases, the addition of protein or fiber components promoted an increase in WSI, emphasising the importance of raw material composition in modifying the functional properties of extrudates.

CONCLUSIONS

The present research has demonstrated the efficacy of utilising fruit and vegetable pomace as valuable components in mixtures for the production of food extrudates with beneficial functional properties and thus the possibility to reduce pomace as a waste product. The impact of these additives was found to vary depending on the type of pomace used, the proportion incorporated into the mixture and the configuration of the plasticizing system during processing. The highest process efficiency was observed with the use of 20% apple

pomace in an L/D 20 system, whereas the extrudates enriched with pumpkin in an L/D 16 system exhibited the most stable processing behaviour. It was found that SME consumption was the lowest in the case of chokeberry pomace addition, particularly at low screw speed. Furthermore, it was demonstrated that higher concentrations of apple and pumpkin pomace in the extended plasticizing system led to increased energy consumption. This is due to more difficult material transport and increased viscosity. When analysing bulk density of snack pellets with addition of pomace, the highest values were obtained in the samples with chokeberry pomace, especially when using the L/D 20 system. The WAI and WSI of enriched snack pellets reached the highest values with 30% chokeberry pomace addition. In contrast, for the snack pellets containing pumpkin and apple pomace, a decrease in WAI was observed at higher levels of addition. The findings indicate that the selection of an appropriate type of fruit or vegetable pomace, the proportion of these additives and the type of plasticizing system are pivotal in the design of enriched extrudates. These factors significantly impact both the process and the properties of the finished product. The observed changes can be attributed to variations in the composition and behaviour of the raw materials during the intensive thermomechanical processing.

REFERENCES

- Blejan, A.M., Nour, V., Corbu, A.R., Codină, G.G. (2025). Corn-based extruded snacks supplemented with bilberry pomace powder: Physical, chemical, functional, and sensory properties. *Applied Sciences*, 15, 2468. <https://doi.org/10.3390/app15052468>
- Cotacallapa-Sucapuca, M., Vega, E.N., Maieves, H.A., Berrios, J.D.J., Morales, P., Fernández-Ruiz, V., Cámara, M. (2021). Extrusion process as an alternative to improve pulses products consumption. A Review. *Foods*, 10, 1096. <https://doi.org/10.3390/foods10051096>
- Dey, D., Richter, J.K., Ek, P., Gu, B.-J., Ganjyal, G.M. (2020). Utilization of food processing by-products in extrusion processing: A Review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 603751. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.603751>
- Drożdż, W., Boruckowska, H., Boruckowski, T., Tomaszewska-Ciosk, E., Zdybel, E. (2019). Use of blackcurrant and chokeberry press residue in snack products. *Polish Journal of Chemical Technology*, 21(1), 13–19. <https://doi.org/10.2478/pjct-2019-0003>
- Dushkova, M., Simitchiev, A., Beleva, B., Petrova, T., Koleva, A. (2024). Extrusion of rice and *Aronia melanocarpa* pomace: physical and functional characteristics of extrudates. *Applied Sciences*, 14, 4315. <https://doi.org/10.3390/app14104315>
- Estrada-Giron, Y., Martinez-Preciado, A.H., Michel, C.R., Soltero, J.F.A. (2015). Characterization of extruded blends of corn and beans (*Phaseolus vulgaris*) cultivars: Peruano and Black-Queretaro under different extrusion conditions. *International Journal of Food Properties*, 18, 2638–2651. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.999862>
- Gil-Martín, E., Forbes-Hernández, T., Romero, A., Cinciosi, D., Giampieri, F., Battino, M. (2022). Influence of the extraction method on the recovery of bioactive phenolic compounds from food industry by-products. *Food Chemistry*, 378, 131918. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131918>
- Gupta, R.K., AE Ali, E., El Gawad, F.A., Daood, V.M., Sabry, B., Karunanithi, S., Srivastav, P.P. (2024). Valorization of fruits and vegetables waste byproducts for development of sustainable food packaging applications. *Waste Management Bulletin*, 2(4), 21–40. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.08.005>
- Han, Y., Tran, T., Le, V. (2018). Corn snack with high fiber content: Effects of different fiber types on the product quality. *LWT – Food Science and Technology*, 96, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.014>
- Kantrong, H., Charunuch, C., Limsangouan, N., Pengpinit, W. (2018). Influence of process parameters on physical properties and specific mechanical energy of healthy mushroom-rice snacks and optimization of extrusion process parameters using response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology*, 55, 3462–3472. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3271-2>
- Kręcis, M. (2016). Energy consumption during production of corn extrudates in relation to the process parameters. *Agricultural Engineering*, 20(2), 125–131. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2016-0034>
- Lewko, P., Wójtowicz, A., Różańska-Boczula, M. (2024). Effect of extruder configuration and extrusion cooking processing parameters on selected characteristics of non-starch polysaccharide-rich wheat flour as hybrid treatment with xylanase addition. *Processes*, 12, 1159. <https://doi.org/10.3390/pr12061159>
- Lisiecka, K., Wójtowicz, A. (2019). The production efficiency and specific energy consumption during processing of corn extrudates with fresh vegetables addition. *Agricultural Engineering*, 23(2), 15–23. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2019-0012>
- Lisiecka, K., Wójtowicz, A., Bouasla, A., Kasprzak, K. (2021). Design of new gluten-free extruded rice snack products supplemented with fresh vegetable

- pulps: the effect on processing and functional properties. *International Agrophysics*, 35(1), 41–60. <https://doi.org/10.31545/intagr/132121>
15. Maqsood, S., Khalid, W., Kumar, P., Benmebarek, I.E., Ul Rasool, I.F., Trif, M., Moreno, A., Esatbeyoglu, T. (2025). Valorization of plant-based agro-industrial waste and by-products for the production of polysaccharides: Towards a more circular economy. *Applied Food Research*, 5(1), 100954. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100954>
16. Mironeasa, S., Coțovanu, I., Mironeasa, C., Ungureanu-Iuga, M. (2023). A Review of the changes produced by extrusion cooking on the bioactive compounds from vegetal sources. *Antioxidants*, 12, 1453. <https://doi.org/10.3390/antiox12071453>
17. Pakulska, A., Kawecka, L., Galus, S. (2024). Physical properties of selected fruit fibre and pomace in the context of their sustainable use for food applications. *Applied Sciences*, 14, 9051. <https://doi.org/10.3390/app14199051>
18. Pismag, R.Y., Rivera, J.D., Hoyos, J.L., Bravo, J.E., Roa, D.F. (2024). Effect of extrusion cooking on physical and thermal properties of instant flours: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1398908. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1398908>
19. Potter, R., Stojceska, V., Plunkett, A. (2013). The use of fruit powders in extruded snacks suitable for Children's diets. *LWT - Food Science and Technology*, 51(2), 537–544. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.015>
20. Qiu, C., Hu, H., Chen, B., Lin, Q., Ji, H., Jin, Z. (2024). Research progress on the physicochemical properties of starch-based foods by extrusion processing. *Foods*, 13, 3677. <https://doi.org/10.3390/foods13223677>
21. Raczkowska, E., Serek, P. (2024). Health-promoting properties and the use of fruit pomace in the food industry - A Review. *Nutrients*, 16, 2757. <https://doi.org/10.3390/nu16162757>
22. Ramzan, K., Zehra, S.H., Balciunaitiene, A., Viskelis, P., Viskelis, J. (2025). Valorization of fruit and vegetable waste: An approach to focusing on extraction of natural pigments. *Foods*, 14, 1402. <https://doi.org/10.3390/foods14081402>
23. Rebolledo-Leiva, R., Estévez, S., Hernández, D., Feijoo, G., Moreira, M.T., González-García, S. (2024). Apple pomace integrated biorefinery for biofuels production: A techno-economic and environmental sustainability analysis. *Resources*, 13, 156. <https://doi.org/10.3390/resources13110156>
24. Ryu, G. H., Ng, P. K. (2001). Effect of selected process parameters on expansion and mechanical properties of wheat flour and whole cornmeal extrudates. *Starch/Stärke*, 53, 147–154. [https://doi.org/10.1002/1521-379X\(200104\)53:3/4<147::AID-STAR147>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/1521-379X(200104)53:3/4<147::AID-STAR147>3.0.CO;2-V)
25. Sarker, A., Ahmmed, R., Ahsan, S.M., Rana, J., Ghosh, M.K., Nandi, R. (2024). A comprehensive review of food waste valorization for the sustainable management of global food waste. *Sustainable Food Technology*, 2, 48–69. <https://doi.org/10.1039/D3FB00156C>
26. Schmid, V., Steck, J., Mayer-Miebach, E., Behnlian, D., Bunzel, M., Karbstein, H.P., Emin, M.A. (2021). Extrusion processing of pure chokeberry (*Aronia melanocarpa*) pomace: impact on dietary fiber profile and bioactive compounds. *Foods*, 10, 518. <https://doi.org/10.3390/foods10030518>
27. Schmid, V., Trabert, A., Schäfer, J., Bunzel, M., Karbstein, H.P., Emin, M.A. (2020). Modification of apple pomace by extrusion processing: Studies on the composition, polymer structures, and functional properties. *Foods*, 9, 1385. <https://doi.org/10.3390/foods9101385>
28. Selani, M.M., Brazaca, S.G.C., Dos Santos Dias, C.T., Ratnayake, W.S., Flores, R.A., Bianchini, A. (2014). Characterisation and potential application of pineapple pomace in an extruded product for fibre enhancement. *Food Chemistry*, 163, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.076>
29. Sharifi, S., Majzoobi, M., Farahnaky, A. (2021). Development of health extruded maize snacks: Effects of soybean flour and feed moisture content. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(7), 3179–3187. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14842>
30. Soja, J., Combrzyński, M., Oniszczyk, T., Gancarz, M., Różyło, R. (2025). Analysis of the influence of different plasticizing systems in a single-screw extruder on the extrusion-cooking process and on selected physical properties of snack pellets enriched with selected oilseed pomace. *Processes*, 13, 1247. <https://doi.org/10.3390/pr13041247>
31. Sule, S., Okafor, G.I., Momoh, O.C., Gbaa, S.T., Amonyeze, A.O. (2024). Applications of food extrusion technology. *MOJ Food Processing & Technology*, 12(1), 74–84. <https://doi.org/10.15406/mojfpt.2024.12.00301>
32. Taifouris, M., El-Halwagi, M., Martin, M. (2023). Evaluation of the economic, environmental, and social impact of the valorization of grape pomace from the wine industry. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(37), 13718–13728. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c03615>

Article

Extrusion-Cooking Aspects and Physical Characteristics of Snacks Pellets with Addition of Selected Plant Pomace

Jakub Soja¹, Maciej Combrzyński¹ , Tomasz Oniszcuk¹ , Marek Gancarz^{2,3,4}  and Anna Oniszcuk^{5,*} 

¹ Department of Thermal Technology and Food Process Engineering, University of Life Sciences in Lublin, Głęboka 31, 20-612 Lublin, Poland; jakub.soja@up.lublin.pl (J.S.); maciej.combrzynski@up.lublin.pl (M.C.); tomasz.oniszcuk@up.lublin.pl (T.O.)

² Centre for Innovation and Research on Pro-Healthy and Safe Food, University of Agriculture in Kraków, Balicka 104, 30-149 Kraków, Poland; m.gancarz@ipan.lublin.pl

³ Faculty of Production and Power Engineering, University of Agriculture in Krakow, Balicka 116b, 30-149 Kraków, Poland

⁴ Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, Poland

⁵ Department of Inorganic Chemistry, Medical University of Lublin, Chodźki 4a, 20-093 Lublin, Poland

* Correspondence: anna.oniszcuk@umlub.pl

Abstract: The article presents the possibilities of using by-products from the agri-food industry in the form of fruit and vegetable pomace as a supplementary ingredient to extruded food products in the form of snack pellets. In the recipe based on potato starch, pomace from apples, chokeberries, pumpkin, nigella seed and flaxseed were added in amounts of 10%, 20% and 30%. The prepared raw material blends were processed using a single-screw extruder-cooker with a plastification system L/D = 20 and variable screw speed. The aim of the research was to determine the effect of pomace addition on the extrusion-cooking process, i.e., efficiency and energy consumption, as well as on selected physical properties of the obtained food pellets, such as expansion index, bulk density and durability. The addition of selected pomace influenced the extrusion-cooking process and the physical properties of the extrudates. A percentage contribution ranging from 10 to 20% can optimize the extrusion-cooking process and improve the quality characteristics of the final product, while simultaneously utilizing by-products from the agri-food industry and reducing their negative environmental impact.

Keywords: extrusion-cooking; pomace; food pellets; processing parameters; selected physical properties



Citation: Soja, J.; Combrzyński, M.; Oniszcuk, T.; Gancarz, M.; Oniszcuk, A. Extrusion-Cooking Aspects and Physical Characteristics of Snacks Pellets with Addition of Selected Plant Pomace. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 8754. <https://doi.org/10.3390/app14198754>

Academic Editor: Marco Iammarino

Received: 18 August 2024

Revised: 24 September 2024

Accepted: 26 September 2024

Published: 27 September 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 agri-food industry constitutes a pivotal role in global food production, catering to the increasing demand for nutritious and safe food products [1–4]. However, this industry also generates substantial amounts of by-products during processing, which, if not properly managed, can pose environmental challenges. By-products such as pomace from fruits, bran from grains and oilseed meals are often considered waste, leading to concerns regarding waste management, resource utilization and environmental sustainability [5,6]. In recent years, there has been a growing interest in exploring the potential of agri-food by-products as valuable resources for various applications, including their utilization as food ingredients [7,8]. This paradigm shift is driven by several factors, including the need to reduce waste generation, enhance resource efficiency and promote sustainable practices within the food industry [9,10]. These by-products often contain valuable nutrients, bioactive compounds and functional components that can enhance the nutritional profile and functionality of extruded products [4,11]. However, their characteristics, including particle size, moisture content, fiber content and composition, can also influence process parameters such as barrel temperature, energy consumption and pressure [12,13]. Thus, a

meticulous examination of the characteristics of by-products and their interplay with processing variables, including the extrusion-cooking technique, is paramount to guaranteeing the excellence of the final products [14].

Extrusion-cooking processing is a huge potential technology for the valorisation of agri-food by-products due to its versatility, efficiency and ability to modify the functional and nutritional properties of raw materials [15,16]. In the context of food processing, the extrusion-cooking process refers to a continuous process that involves forcing a raw material mixture through a die under controlled conditions of temperature, pressure and shear [17,18]. This process results in the transformation of the raw material into a product with a desired shape, texture and structure. Such action can reduce water consumption and minimize the energy consumption of the process [19].

Food pellets incorporating vegetable and fruit pomace present substantial potential for implementation, particularly with respect to sustainability and innovation within the food industry. The integration of such pomace facilitates efficient management of production waste, thereby mitigating waste generation and minimizing environmental impact. Additionally, these ingredients enhance the nutritional profile of the pellets, offering consumers healthier and more wholesome snacking alternatives. Technological advancements, such as optimizing the extrusion-cooking process, may establish new benchmarks in pellet production, thereby conferring a competitive edge in the market. Furthermore, the introduction of these products aligns with the increasing consumer demand for innovative and environmentally sustainable food solutions, rendering them an appealing option for both producers and consumers. Therefore, our research was designed to investigate the effect of the addition of varying content of selected pomace (apple, chokeberry, pumpkin, flaxseed and nigella seed pomace), as well as the variation of screw speed and plasticizing system on the extrusion-cooking process and the physical properties of the created pellets.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

The extrusion-cooking process of snack pellets with added by-products from agri-food industry was described and evaluated, including tests on selected physical properties, in the laboratories of the Department of Process Engineering at the University of Life Sciences in Lublin, in 2023. As an addition to the raw material mixture, apple, chokeberry, pumpkin, nigella seed and flaxseed pomace were used. Additionally, a mixture without any added ingredients was prepared, which served as the control sample.

The production of the snack pellets was based on pre-prepared recipes that included the following raw materials, purchased from local manufacturers: plant pomace, superior standard potato starch, potato flakes, canola oil, beet sugar, salt.

2.2. Preparation of Mixtures and Extrusion-Cooking Process

In the initial stage, mixtures were prepared according to the provided recipes (Table 1). The incorporation of selected types of apple, chokeberry, pumpkin, nigella seed and flaxseed pomace was intended at 10%, 20% and 30% by weight. The concentrations of pomace addition (10%, 20% and 30%) were chosen on the basis of preliminary studies [7,20–22] and a comprehensive analysis of the current literature as sufficient to induce the desired modifications without significantly compromising the texture and sensory acceptability of the product. Concentrations exceeding 30% may present additional technological challenges related to processing and product quality, such as process instability and pressure and temperature fluctuations, which could negatively impact both the manufacturing process and the quality of the extrudates. Pomace was crushed using a Germin cup blender model CY-329 (Germin Berlinger, Jarosław, Poland). Each of the 4.5 kg mixtures had proportions adjusted accordingly based on the quantity of the plant ingredient employed. To ensure even distribution of ingredients and to balance moisture content, the samples underwent sieving. Subsequently, the samples were refrigerated for

24 h to stabilize the mixing process of the ingredients. In the subsequent stage, their moisture contents were assessed. The samples were then moistened until the desired moisture content was reached, the value of which was determined on the basis of previous studies and current technological knowledge.

Table 1. Percentage content of individual components in mixtures.

Raw Materials	Control Sample	10% Pomace	20% Pomace	30% Pomace
apple, chokeberry, pumpkin, flaxseed, nigella seed pomace (%)	0	10	20	30
potato starch (%)	82	72	62	52
potato flakes (%)	15	15	15	15
canola oil (%)	1	1	1	1
sugar (%)	1	1	1	1
salt (%)	1	1	1	1

Before the extrusion-cooking process, samples were taken from the mixtures previously stored. Their moisture contents were determined using a Radwag MA 50 R moisture analyser (Radwag, Radom, Poland). Afterward, the samples were moistened to achieve moisture content values of 34%. The mixtures were then sieved to enhance the homogeneity of their composition and moisture levels.

The extrusion-cooking process was conducted using an extruder-cooker with a length-to-diameter ratio of the screw (L/D) of 20. Mixtures were processed at variable screw rotational speeds of 40, 60 and 80 rpm. The process parameters were optimized based on previous research and adjusted to the prepared mixtures. The pellets were formed into a strip of dough using a flat forming die with dimensions of 25 mm × 0.6 mm and then cut into pieces approximately 25 mm × 25 mm. The extruded snack pellets were dried in a laboratory shelf dryer at 40 °C for 12 h until the moisture content reached 8.5–9.5%. The dried pellets were then placed in tightly sealed polyethylene bags and stored until further processing. The study of the extrusion-cooking process aimed to determine the impact of process variables, raw material mixtures and the addition of selected types of pomace on process efficiency, stability and the quality of the extrudates.

2.3. Extrusion-Cooking Process Efficiency

Process efficiency was evaluated by measuring the mass of each prepared mixture immediately after exiting the die every 30 s, maintaining constant processing conditions and feed rates for each sample. Efficiency was assessed through triple measurements for each test series utilizing an electronic stopwatch and a balance (DS-788 Yakudo, Tokyo, Japan). The resultant average of these measurements was deemed the final outcome. The calculation of process efficiency followed the methodology outlined by Matysiak et al. [21], who studied the extrusion-cooking process of a potato flour-based mixture using a single-screw extruder S45-12 Ichemad Profarb (Gliwice, Poland). The mixtures were processed at three different speeds (20, 40 and 60 rpm):

$$Q = \frac{m}{t} \text{ [kg/h]}$$

where Q is the process efficiency [kg/h], m is the mass of the extrudate obtained during the measurement [kg], and t is time [h].

2.4. Energy Consumption of the Extrusion-Cooking Process

The active power of the extruder-cooker was measured using a standard wattmeter, which is a part of the extruder-cooker equipment. Following the assessment of the motor parameters installed in the extruder, the motor load and the efficiency obtained in the given tests and the measured values were converted into specific mechanical energy consumption

(SME) coefficients. This conversion was performed according to the formula provided by Matysiak et al. [21]:

$$SME = \frac{n}{n_m} \frac{O}{100} \frac{P}{Q} [\text{kWh/kg}]$$

where SME is the specific mechanical energy (kWh/kg), n is the extruder-cooker rotational speed (rpm), O is the extruder-cooker engine load (%), P is the nominal electric power pinpointed by the control panel (kW), and Q is the process efficiency (kg/h).

2.5. Physical Properties of Snack Pellets

The expansion index for the extruded snack pellets is defined as the ratio of the diameter of manufactured pellets to the diameter of the extruder-cooker die. The measurement was carried out three times, and the average of these measurements was used as the final result. The expansion index was derived according to the formula proposed by Combrzyński et al. [19]:

$$X = \frac{d}{D}$$

where X is the rate of the expansion index (-), d is the snack pellet diameter (mm), and D is the extruder-cooker die diameter (mm).

The bulk density of snack pellets was determined as the ratio of the sample mass to its volume. Measurements were conducted in three repetitions, and the arithmetic mean was adopted as the measurement value.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

where ρ is the bulk density (kg/m³), m is the sample mass (kg), and V is the container volume (m³).

The durability of the extrudates was assessed by evaluating their resistance to rotational forces in a closed chamber based on the method originated by Mitrus et al. using the Pfof apparatus to provide the necessary kinetic energy. The final result was elicited as the average of three independent measurements [23,24].

2.6. Statistical Analysis

Statistica software (version 12.0, StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA) was used for statistical analyses. Principal components analysis (PCA), analysis of variance and correlation determination were performed at the significance level of $\alpha = 0.05$. Principal components analysis was employed to determine the correlation between type of addition, amount of ingredient and screw speed and the tested parameters. The PCA data matrix for statistical analysis of test results for type of addition had 5 columns (parameters) and 6 rows (type of addition), for amount of ingredient, it had 5 columns (parameters) and 4 rows (amount of ingredient) and for screw speed, it had 5 columns (parameters) and 3 lines (screw speed). Each input matrix was automatically scaled. The optimal number of principal components obtained in the analysis for each matrix was ascertained based on the Cattell criterion.

3. Results and Discussion

3.1. Effect of Ingredients and Process Variables on the Extrusion-Cooking Process

Fruit, vegetable and oilseed pomace is a valuable raw material for enriching extruded snack recipes. They can improve the nutritional value of products, introduce interesting flavours and colours and support sustainability by reducing waste. The extrusion process may be the optimal way to use this type of waste from the food industry. The study produced results that confirm the potential of using fruit, vegetable and oilseeds pomace as an ingredient to enrich the formulation of extruded snacks (Figure 1).

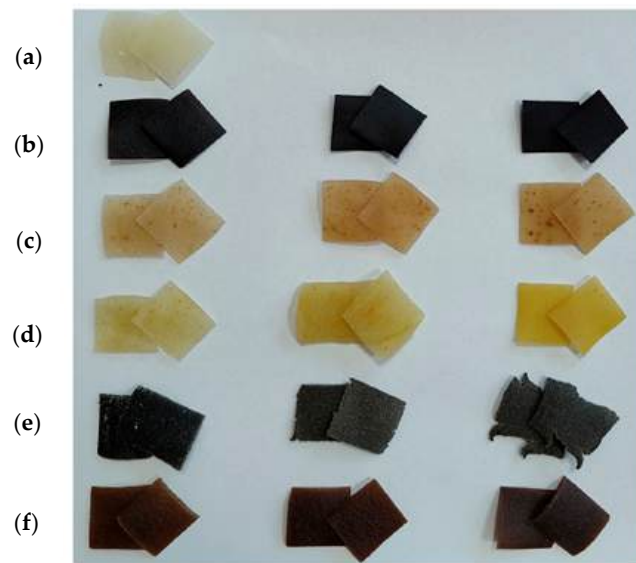


Figure 1. Snack pellets without addition (a) and from left with 10, 20 and 30% pomace: (b) chokeberry pomace; (c) apple pomace; (d) pumpkin pomace; (e) nigella seed pomace; (f) flaxseed pomace.

Most of the snack pellets with the addition of by-products were characterized by a smooth and uniform texture without blisters. In the case of products with 20 and 30% ingredients, it was possible to notice inclusions of selected pomace (in particular, chokeberry and pumpkin pomace), which were strongly visible in the gelatinized structure of the extrudates (Figure 2). This is an extremely desirable feature for manufacturers, since a product with such a structure is more attractive among consumers, who expect products with increased health-promoting potency.

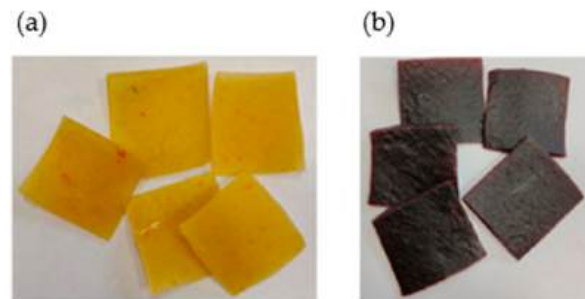


Figure 2. Snack pellets (intermediate product) with 30% pomace: (a) pumpkin pomace; (b) chokeberry pomace.

The introduction of fruit, vegetable and oilseed pomace not only influenced the finished product but also significantly affected the extrusion-cooking process. The findings of numerous preceding experiments [20–24] have demonstrated that the screw speed exerts a considerable influence on the efficacy of the extrusion-cooking process. The outcomes of the present study indicated that, by elevating the screw speed during the processing of the majority of raw material mixtures, there was a notable enhancement in the efficiency of the extrusion-cooking. High screw speed promoted increased material flow through the extruder, resulting in higher production. The highest efficiency for most processed mixtures were observed with the highest percentage of pomace. The highest efficiencies were obtained when processing a blend enriched with 30% addition of nigella seed pomace at 80 rpm (26.00 kg/h) and the lowest for a blend with 20% addition of pumpkin pomace processed at 40 rpm (6.76 kg/h) (Figure 3). In addition, extended efficiencies were observed for blends with the addition of oilseed pomace (flaxseed and nigella seed) compared to

other blends. This was due to the larger quantity of fat, the presence of which affects the flow of the mixture through the extruder cylinder.

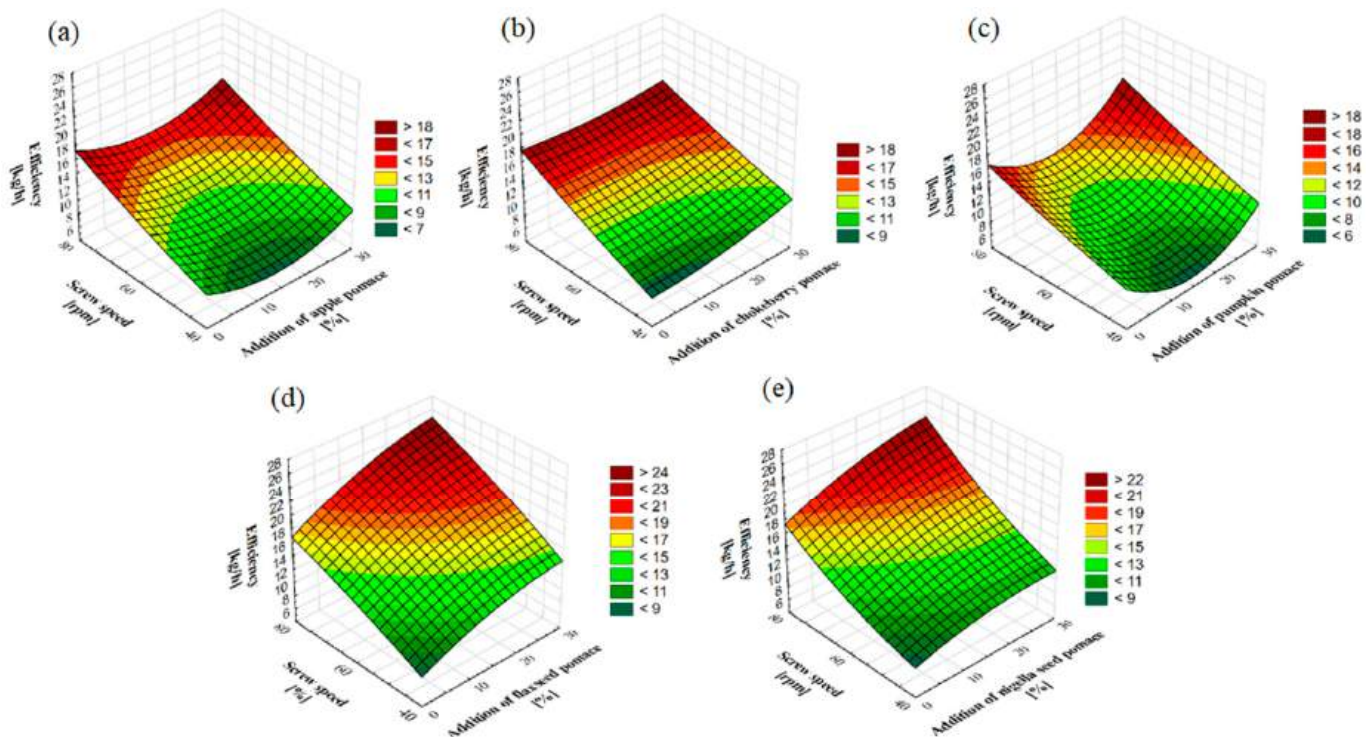


Figure 3. Response plots of extrusion-cooking efficiency of snack pellets depending on selected plant pomace addition level and applied processing variables: (a) apple pomace; (b) chokeberry pomace; (c) pumpkin pomace; (d) flaxseed pomace; (e) nigella seed pomace.

Similar correlations were presented by Lisiecka and Wójtowicz [25], where they showed that auger speed leads to an increase in the efficiency of the extrusion-cooking process of potato pellets with the addition of fresh vegetables such as onions, leeks, kale and carrots. Conversely, Mitrus et al. [24] demonstrated in a study on the impact of fresh broccoli on extrusion-cooking efficiency that an increase in the proportion of broccoli resulted in a corresponding enhancement efficiency, particularly at additions of 20% and 30%.

During the extrusion-cooking process of snack pellets enriched with plant pomace, irregularities in electricity consumption were observed depending on the proportion of pomace addition. Depending on the type of ingredient for most of the processed mixtures, the highest value of SME was at a similar level, amounting to pumpkin pomace mixture 0.118 kWh/kg, apple pomace mixture 0.108 kWh/kg, nigella seed pomace 0.100 kWh/kg, and flaxseed 0.083 kWh/kg. For the mixture enriched with chokeberry pomace, a reduction in the index was observed, with the highest value being 0.034 kWh/kg. The lowest SME values were similar for all ingredients, ranging from 0.008 to 0.013 kWh/kg (Figure 4).

A study presented by Soja et al. [26], who conducted research using a raw material blend based on a mixture of wheat and corn flour on the same single-screw extruder and the same plastifying system configuration, shows a similar correlation, where the lowest SME values were observed for blends with a 30% addition of apple pomace. Furthermore, Mitrus et al. [24] similarly demonstrated this dependence, observing irregularities in SME values during the processing of mixtures with varying vegetable ingredient content.

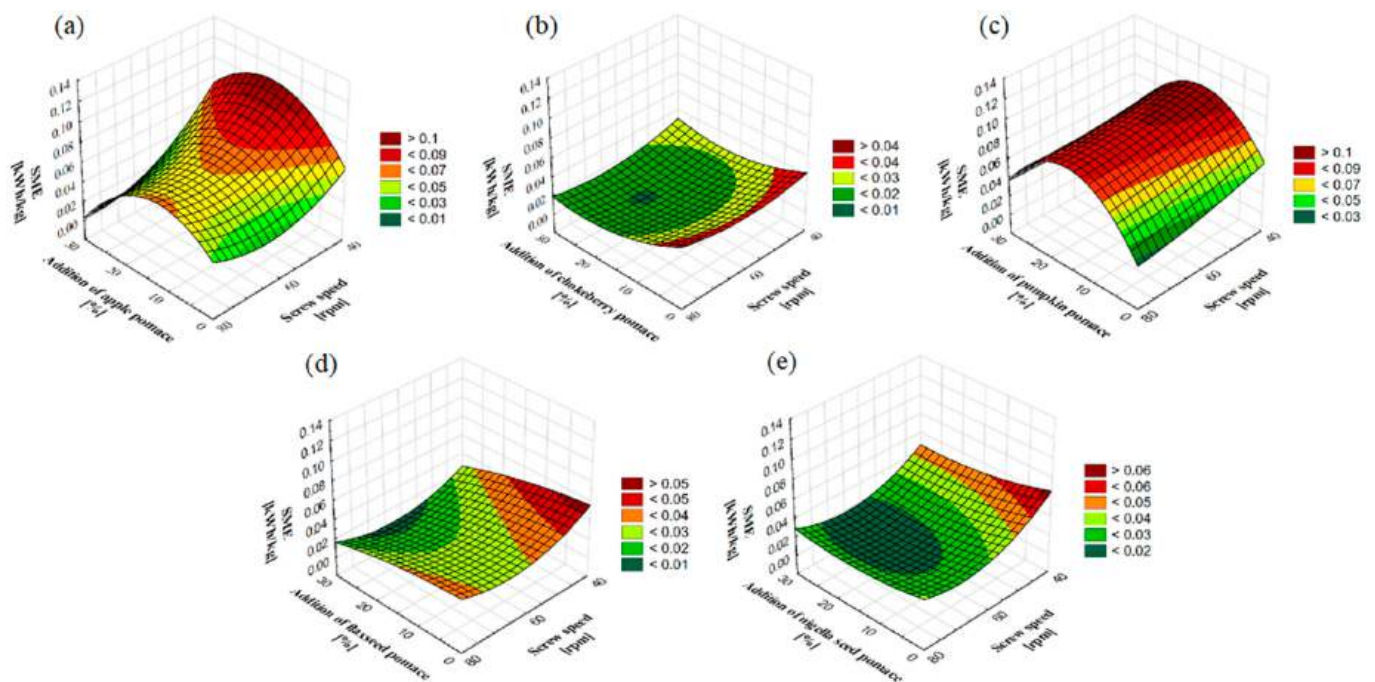


Figure 4. Response plots of specific mechanical energy demand during the extrusion-cooking process of snack pellets as a function of the level of addition of selected plant pomace and the processing variables used: (a) apple pomace; (b) chokeberry pomace; (c) pumpkin pomace; (d) flaxseed pomace; (e) nigella seed pomace.

3.2. Influence of Process Variables on Physical Properties of Extruded Snacks

Extrusion-cooking is a process whereby ingredients are subjected to high temperatures, pressures and mechanical shear, resulting in the formation of granules with a specific structures, textures and physical properties. The type of ingredients present in extruded food granules can significantly influence their physical properties. One of the most important physical characteristics of expanded products is the expansion rate. During the course of the research, the authors observed that increasing the proportion of vegetable pomace in the blend resulted in a reduction in the expansion rate. In the conducted research, pellets with added fruit pomace exhibited a relatively high expansion index. The highest value for mixtures enriched with fruit pomace was achieved with a mixture containing 10% addition of aronia pomace processed at 40 rpm (3.17), while the lowest was observed with 30% addition of chokeberry pomace processed at 80 rpm (2.37). In the case of pellets with the addition of nigella seed pomace, the highest value was obtained for pellets based on a mixture with 10% seed pomace processed at 40 rpm (3.11), while the lowest value was observed for a mixture with 30% nigella seed pomace processed at 60 rpm (1.65). Similarly, for the mixture with added flaxseed pomace, the highest value was also achieved for a mixture with 10% ingredient processed at 40 rpm (2.97), and the lowest value for a mixture with 30% ingredient at 60 rpm (1.74) (Figure 5).

Similar correlations were presented by Lisiecka and Wójtowicz [25], where increasing the percentage of fresh vegetables in the mixture led to a reduction in the expansion ratio. Similarly, Alam et al. [27] observed a reduction in expansion rate when plant ingredients were present. The authors ascribed this phenomenon to the high fibre and lycopene content of the plants, which diminished the expansion capacity. A study by Gumul et al. [28] utilising a single-screw extruder to process a raw material mixture enriched with 5, 10 and 20% by-product ingredients demonstrated that the incorporation of fruit pomace (chokeberry and cherry) into extruded maize snacks also resulted in a reduction in expansion rate. The higher fibre and polyphenol content of these ingredients resulted in a reduction in expandability, which in turn affected the texture and structure of the final products.

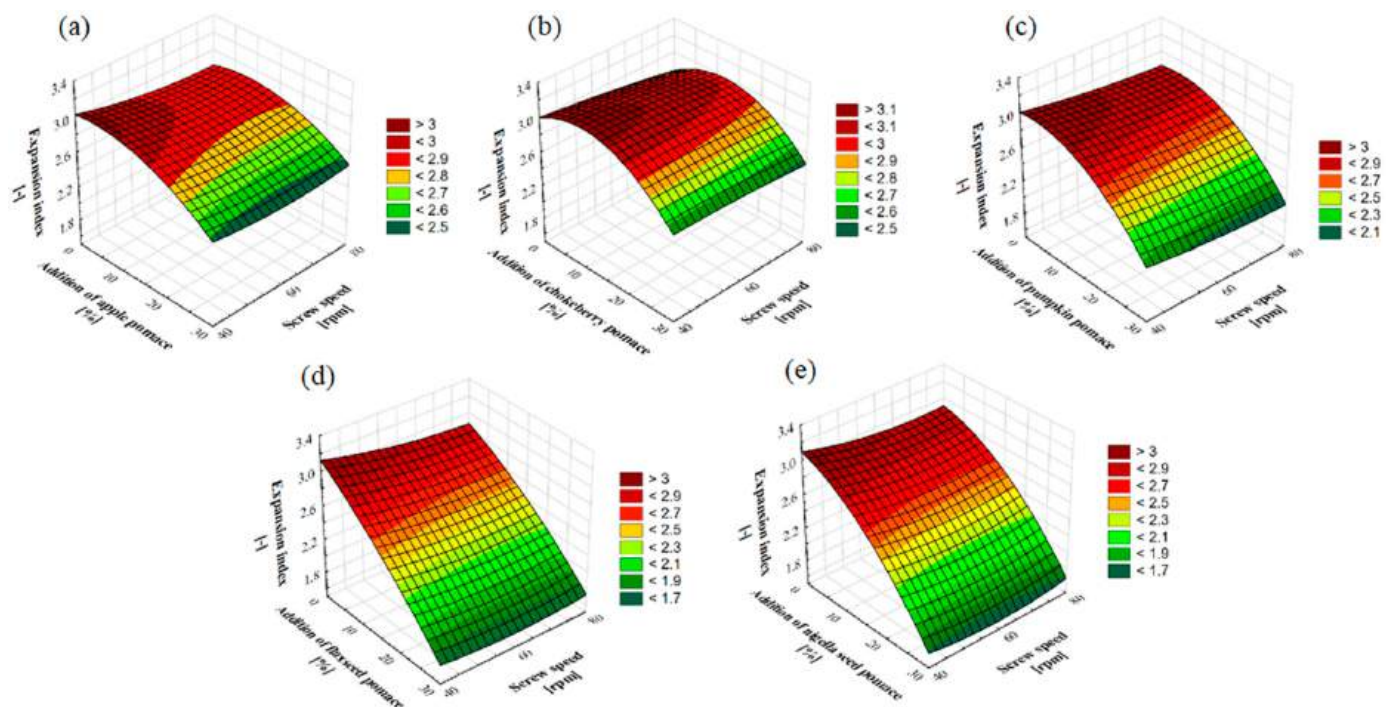


Figure 5. Response plots of expansion index of snack pellets depending on selected plant pomace addition level and applied processing variables: (a) apple pomace; (b) chokeberry pomace; (c) pumpkin pomace; (d) flaxseed pomace; (e) nigella seed pomace.

In the next stage of the experiment, the effect of screw speed and the type and percentage of pomace content on the bulk density of snack granules enriched with selected by-products of the agro-food industry was studied. The results showed that all three factors had a significant effect on the value of the characteristic studied. The highest bulk density value was obtained for the mixture with the addition of 20% nigella seed pomace processed at 40 rpm (392.11 kg/m^3). Conversely, the lowest value of the studied characteristic was found in snack pellets based on a mixture with the addition of 30% chokeberry pomace processed at 60 rpm (262.47 kg/m^3). The results of the analysis of snack pellets indicate that the bulk density value decreases with the increasing percentage of pomace addition (Figure 6). This is primarily due to the increased expansion and porosity of the products (Figure 7). This dependence applies to extrudates based on all formulation mixtures studied in the conducted research.

Lisiecka and Wójtowicz [29] also observed that the addition of fresh vegetable pulp decreases bulk density. They also conducted their research using a mixture based on potato products processed using a single-screw extruder. Similar conclusions were presented by Wójtowicz et al. [30], where increasing the percentage of insect flour resulted in a decrease in the bulk density of extrudates. This was mainly due to increased fat content, which affected the material flow through the extruder cylinder. The elevated fat content acted as a plasticizer, influencing the structure of the extrudates and consequently their bulk density.

The conducted studies showed that a decrease in bulk density corresponded to a reduction in the durability coefficient. The control samples exhibited high durability coefficient. For the screw speed set at 40, 60 and 80, the durability values are 99.85, 99.83 and 99.78%, respectively. The addition of 10% pomace results in extrudates from various ingredients having similar values, typically ranging from 99.67 to 99.88%, regardless of the type of ingredient. These values are higher at lower screw speed (40 and 60) and lower at 80. With an ingredient amount of 20% pomace, the extrudate values slightly decrease, reaching levels between 99.59 and 99.67%. Notably, extrudates from flaxseed exhibit the lowest values at 80 rpm. An increase in the percentage of extrudates to 30% results in a decrease in durability. At 40 rpm, the values range from 99.4 to 99.66%. As the screw speed

increases to 60 and 80, these values continue to decline, reaching a minimum of 99.03% for extrudates with nigella seed pomace at 80 rpm. The absence of ingredient yields the highest values of extrudates at each speed, suggesting that any amount of ingredient at any screw speed decreases extrudate values. The most stable values are observed with lower ingredient amounts (10%), whereas higher amounts of ingredient (20 and 30%) have a more pronounced impact in reducing these values. Analysis of control samples shows the highest values of durability at each rotational speed, indicating that any amount of ingredient at any screw speed decreases the durability of snack pellets. The most stable values are observed at lower ingredient levels (10%), while higher ingredient levels (20% and 30%) have a more pronounced impact in reducing these values (Figure 8).

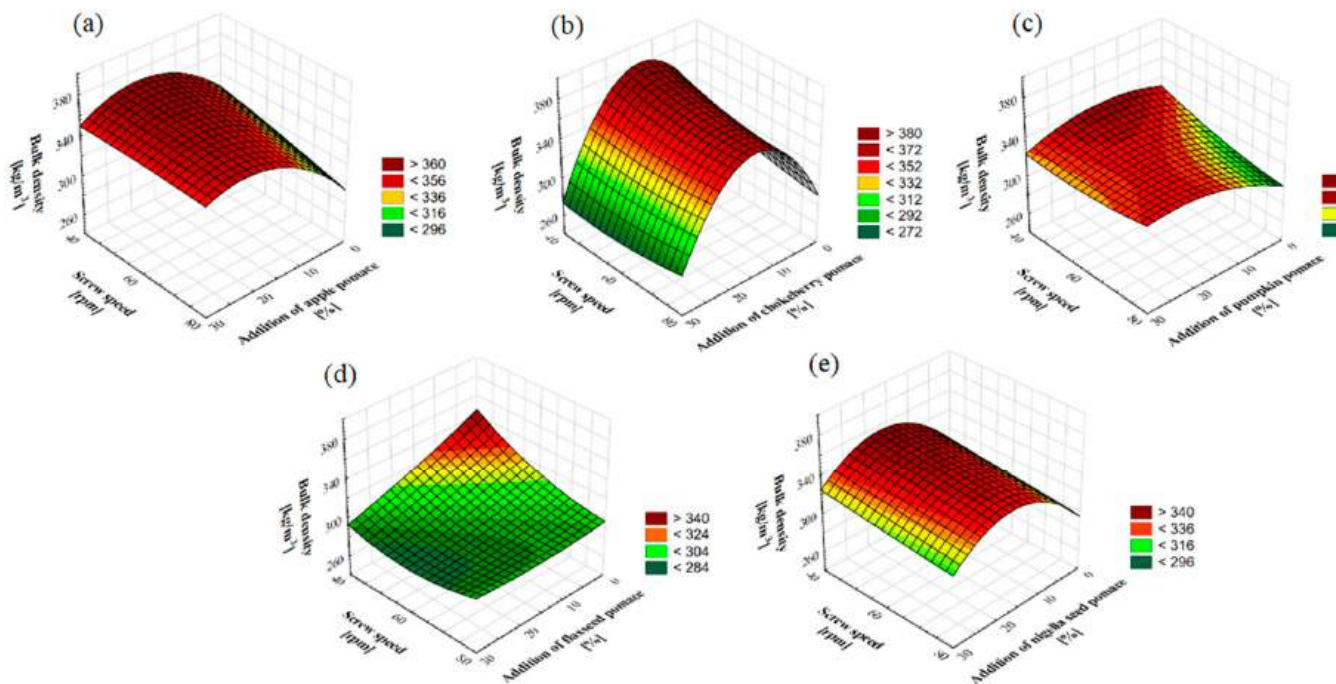


Figure 6. Response plots of bulk density of snack pellets depending on selected plant pomace addition level and applied processing variables: (a) apple pomace; (b) chokeberry pomace; (c) pumpkin pomace; (d) flaxseed pomace; (e) nigella seed pomace.

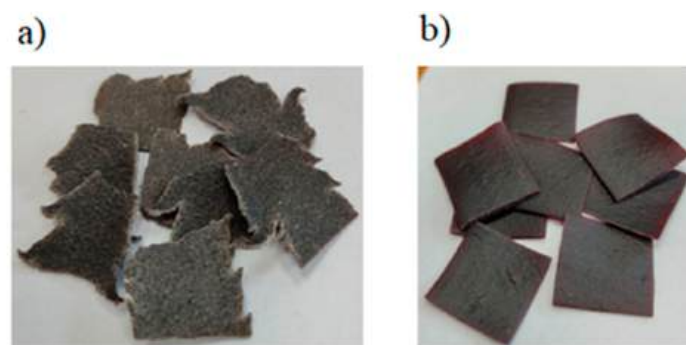


Figure 7. Snack pellets (intermediate product) with the highest and lowest bulk density: (a) nigella seed pomace; (b) chokeberry pomace.

The findings presented by Dushkova et al. [31] show a similar relationship, where the addition of chokeberry (*Aronia melanocarpa* L.) at different levels (10% and 20%) to extruded snack pellets significantly affects their physical and nutritional properties. In this study, increased chokeberry pomace content generally increased antioxidant activity but may decrease pellet shelf life. Higher screw speeds reduced shelf life due to increased shear and mechanical stress during extrusion cooking. Optimal results were found at lower

screw speeds with moderate chokeberry addition, balancing durability and nutritional enhancement. In the study by Karkle et al. [32], dehydrated fruit and vegetable powders (e.g., pumpkin, lotus stem and Indian gooseberry) were added to corn flour at 25% and 50% levels. The authors found that increasing the powder content generally reduced radial expansion and affected the textural properties of the pellets. Durability was best maintained at lower ingredient levels and optimized screw speeds, which is consistent with our research.

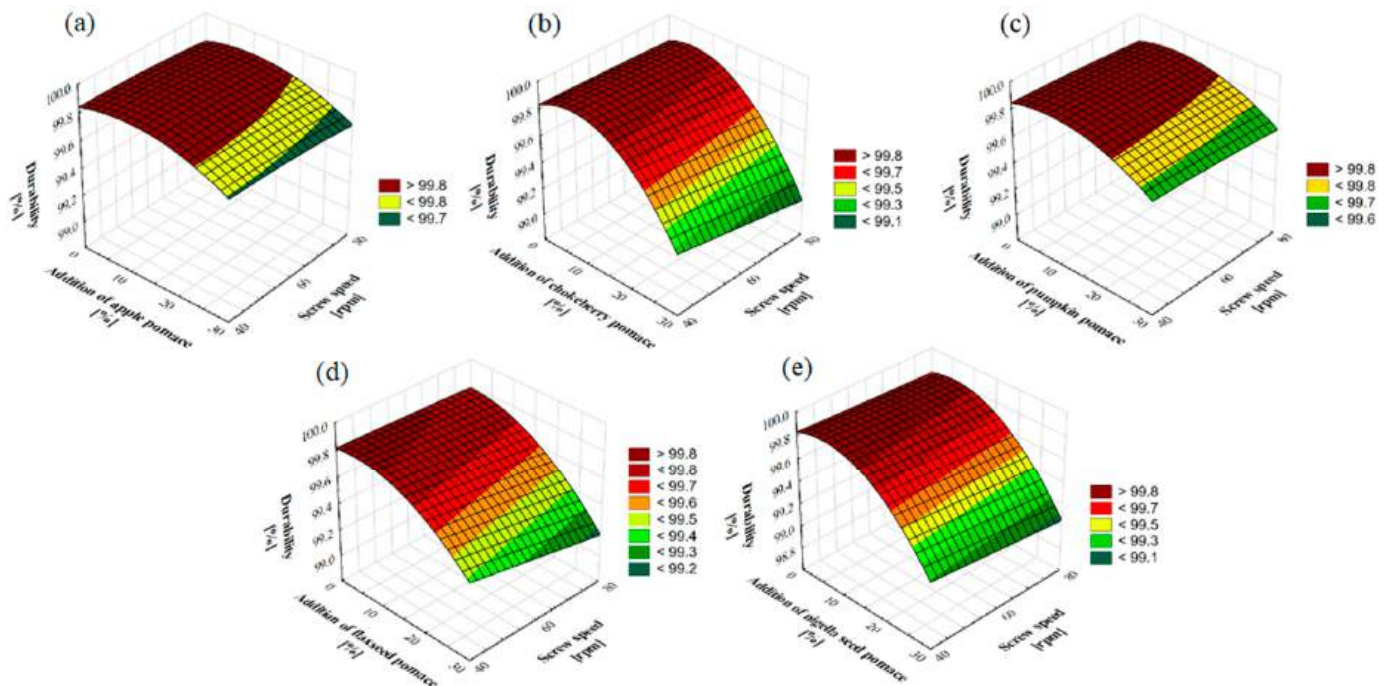


Figure 8. Response plots of durability of snack pellets depending on selected plant pomace addition level and applied processing variables: (a) apple pomace; (b) chokeberry pomace; (c) pumpkin pomace; (d) flaxseed pomace; (e) nigella seed pomace.

All results presented by the authors provides information on different aspects of the process of producing pellets from by-products, and understanding them together allows the process to be optimized, ensuring efficiency, low costs, high quality of the final product and better use of raw materials.

In order to show the correlation between the properties under examination, we conducted PCA analysis. The PCA analysis performed for the type of ingredient shows that, of the five new principal components, the first two principal components, PC1 and PC2, describe 82.94% of the variability of the system. Parameters that fall between the two red circles have the greatest impact on the variability of the system (Figure 9a). Only bulk density has a slightly weaker impact on the variability of the system. Bulk density and SME are strongly and positively correlated. There is also a strong but negative correlation between the durability and efficiency parameters. Moreover, there is a weak positive correlation between the expansion index and durability parameters, which proves that the strength of the product increases slightly with expansion. A weak and negative correlation was observed between the expansion index and efficiency; this in turn proves that, with expansion, efficiency decreases slightly. There is no correlation between expansion index, bulk density and SME.

The PCA analysis also shows (Figure 9a,b) that flaxseed and nigella are strongly and positively correlated with efficiency, and apple and pumpkin with bulk density and SME. In turn, the lack of an addition is positively correlated with the expansion index. The PCA analysis shows that the first principal component of PC1 distinguishes the ingredient derived from seeds, from the ingredient derived from fruits and vegetables in 64.31% of

all cases (Figure 9b). The positive values of the PC1 principal component describe the results for seeds, and negative values of the PC1 principal component describe the results for fruits and vegetables. The second main component of PC2 at 18.63% characterizes the case of using an ingredient from seeds and fruits and vegetables (negative PC2 values) and using an ingredient from soft fruits or no ingredient (positive PC2 values). In summary, negative PC1 values and positive PC2 values describe the absence of ingredients. Positive PC1 and PC2 values characterize soft fruits. Positive PC1 and negative PC2 values describe the addition of seeds, and negative PC1 and PC2 values characterize the addition of fruit and vegetables.

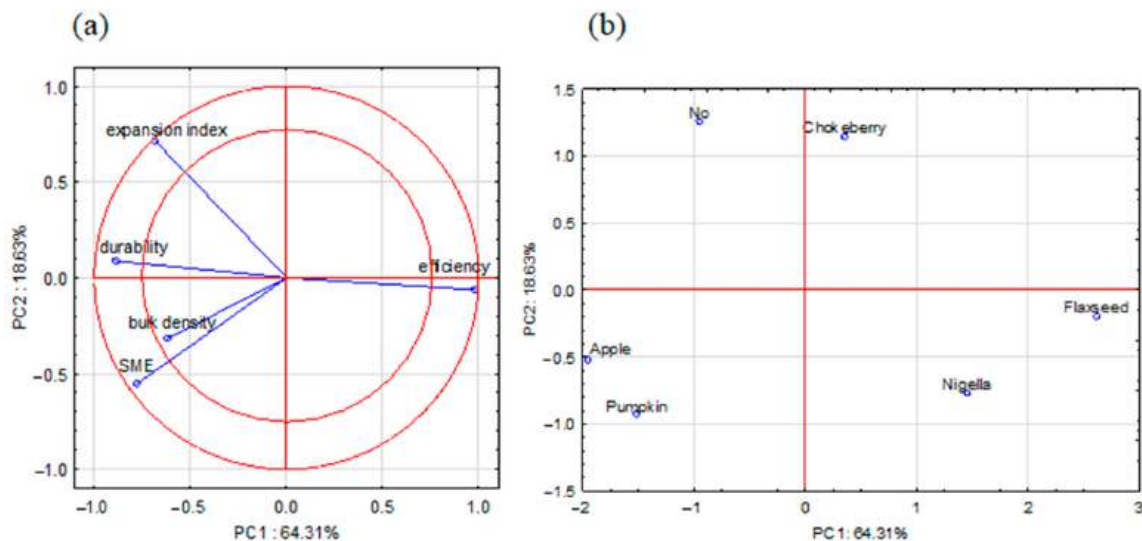


Figure 9. Projection of (a) variables parameters on the PC1 and PC2 loadings plot and (b) addition type on the PC1 and PC2 scores.

In turn, the PCA analysis performed for the amount of ingredient showed that, of the three new principal components, the first two principal components, PC1 and PC2, describe the variability of the system in as much as 98.09%. The parameters that fall between the two red circles have the greatest impact on the variability of the system (Figure 10a), and this means that these are all the parameters tested. Accordingly, durability and expansion index are strongly and positively correlated, while there is a strong but negative correlation between the durability, expansion index and efficiency parameters. There is also a weak positive correlation between the expansion index, durability and SME parameters, and a weak and negative correlation between SME and efficiency. There is no correlation between bulk density and expansion index, durability and efficiency.

The PCA analysis also shows (Figure 10b) that the main component, PC1, at 77.79% and the second main component, PC2, at 20.31% describe differences in the amount of the ingredient. However, adding 30% of the ingredient significantly affects the tested parameters, as evidenced by the high PC1 value. The addition of even 20% does not affect the tested parameters as much as the addition of 30% of the ingredient. The analysis carried out reveals (Figure 10a,b) that the expansion index parameter is positively correlated with the lack of the ingredient, while the durability and SME parameters are most correlated with the 10% addition. What is more, bulk density is positively correlated with an addition of 20%, and the efficiency parameter is positively correlated with an addition of 30%.

The PCA analysis performed for screw speed showed that only the first two main components, PC1 and PC2, describe the variability of the system to 100%. In this case, all parameters have a strong influence on the variability of the entire system (Figure 10a). Bulk density, SME and expansion index are strongly and positively correlated. There is also a weak positive correlation between these parameters and durability. Moreover, a strong but negative correlation exists between efficiency and the other parameters tested.

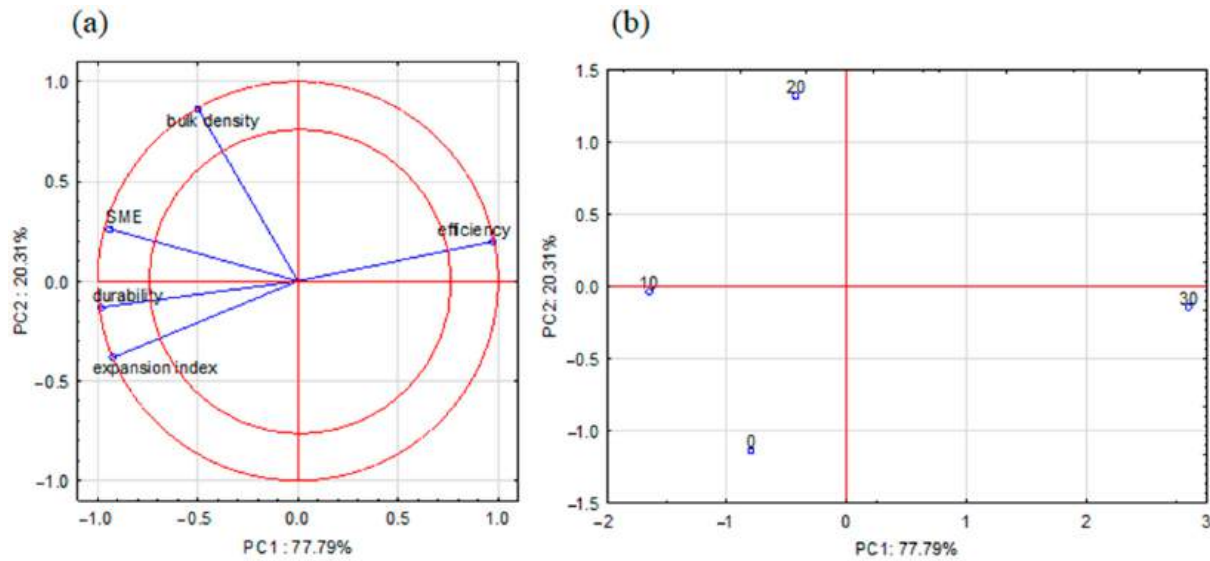


Figure 10. Projection of: (a) variables parameters on the PC1 and PC2 loadings; (b) addition quantity on the PC1 and PC2 scores.

The PCA analysis shows (Figure 11b) that the main component, PC1, differentiates low and high screw speed values by as much as 92.74%. Negative PC1 values describe lower screw speed values (40 rpm) and positive values describe higher screw speed values (60 and 80 rpm). The analysis shows (Figure 11a,b) that the following parameters are strongly and positively correlated with a lower screw speed value (40 rpm): expansion index, SME and bulk density and, slightly less strongly, with durability. There is no clear correlation between the 60 rpm screw speed and the tested parameters. The efficiency parameter is strongly and positively correlated with a screw speed of 80 rpm.

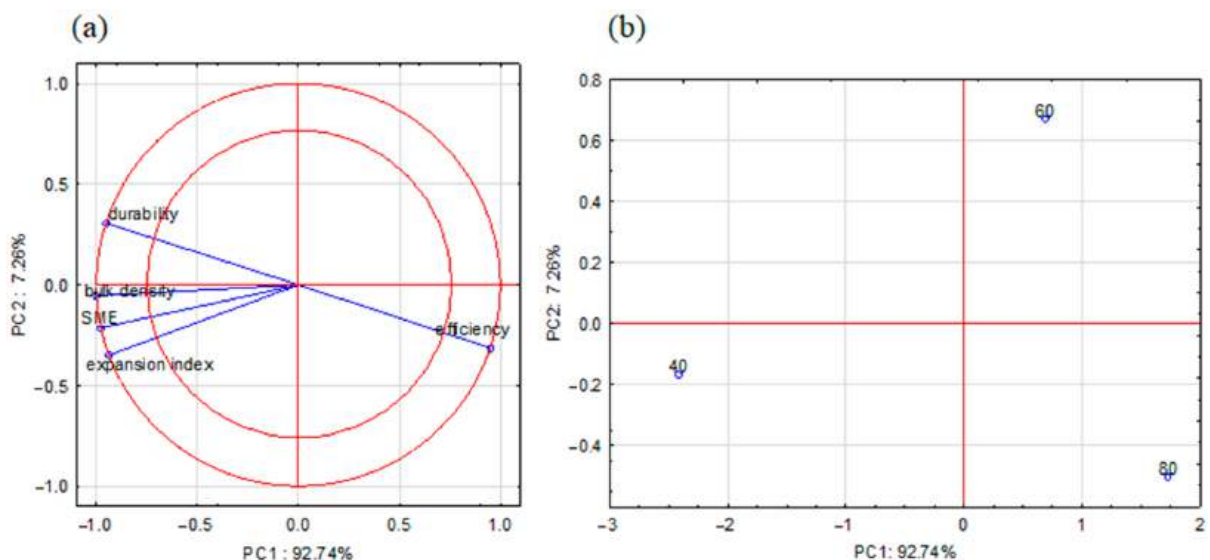


Figure 11. Projection of (a) variables parameters on the PC1 and PC2 loadings and (b) screw speed on the PC1 and PC2 scores.

4. Conclusions

The results of the study confirm the feasibility of utilizing by-products from the agro-food industry as an ingredient for snack pellets. According to the findings, for most mixtures, the addition of 20% pomace processed at 60 and 80 rpm positively impacts the efficiency of the production process while reducing energy consumption. Moreover, increasing the percentage of pomace results in a decrease in the expansion index, with the extrudates

containing 20% and 30% of these ingredients showing significant differences compared to those without pomace and with a 10% ingredient. A similar trend was observed in the analysis of bulk density and durability, which was attributed to structural changes and instability in the processed mixtures. However, the introduction of an appropriate amount of pomace can significantly improve both the processing parameters and physical properties.

The innovative utilization of vegetable and fruit pomace as an ingredient in food pellets represents a significant advancement in both waste management and nutritional enrichment. This practice not only addresses the issue of efficient waste disposal but also fosters the development of novel production technologies. Furthermore, it enables the creation of distinctive market products. Such an approach has the potential to transform the food industry's strategies regarding sustainability and innovation, ultimately impacting the nature of final consumer products.

Author Contributions: Conceptualization, J.S. and M.C.; methodology, J.S., M.C. and T.O.; software, M.G.; validation, J.S. and M.C.; formal analysis, M.G.; investigation, J.S., T.O. and M.C.; resources, J.S.; data curation, J.S., M.G. and M.C.; writing—original draft preparation, J.S., M.C., M.G. and A.O.; writing—review and editing, J.S., M.C. and A.O.; visualization, J.S. and M.C.; supervision, T.O. 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: The original contributions presented in the study are included in the article, further inquiries can be directed to the corresponding author.

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

References

1. Mishra, D.; Muduli, K.; Sevcik, L.; Jana, S.K.; Ray, M. Combating of Associated Issues for Sustainable Agri-Food Sectors. *Sustainability* **2023**, *15*, 10096. [\[CrossRef\]](#)
2. Burchi, F.; Fanzo, J.; Frison, E. The Role of Food and Nutrition System Approaches in Tackling Hidden Hunger. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2011**, *8*, 358–373. [\[CrossRef\]](#)
3. Skalkos, D. Scientific Advancements for an Innovative Agri-Food Supply Chain towards the 2030 Sustainable Development Goals III. *Sustainability* **2024**, *16*, 5693. [\[CrossRef\]](#)
4. Rațu, R.N.; Veleşcu, I.D.; Stoica, F.; Usturoi, A.; Arsenoia, V.N.; Crivei, I.C.; Postolache, A.N.; Lipșa, F.D.; Filipov, F.; Florea, A.M.; et al. Application of Agri-Food By-Products in the Food Industry. *Agriculture* **2023**, *13*, 1559. [\[CrossRef\]](#)
5. 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. [\[CrossRef\]](#)
6. Verni, M.; Casanova, F. The Potential of Food By-Products: Bioprocessing, Bioactive Compounds Extraction and Functional Ingredients Utilization. *Foods* **2022**, *11*, 4092. [\[CrossRef\]](#)
7. Asma, U.; Morozova, K.; Ferrentino, G.; Scampicchio, M. Apples and Apple By-Products: Antioxidant Properties and Food Applications. *Antioxidants* **2023**, *12*, 1456. [\[CrossRef\]](#)
8. Comunian, T.A.; Silva, M.P.; Souza, C.J.F. The use of food by-products as a novel for functional foods: Their use as ingredients and for the encapsulation process. *Trends Food Sci. Technol.* **2021**, *108*, 269–280. [\[CrossRef\]](#)
9. Yadav, S.; Malik, K.; Moore, J.M.; Kamboj, B.R.; Malik, S.; Malik, V.K.; Arya, S.; Singh, K.; Mahanta, S.; Bishnoi, D.K. Valorisation of Agri-Food Waste for Bioactive Compounds: Recent Trends and Future Sustainable Challenges. *Molecules* **2024**, *29*, 2055. [\[CrossRef\]](#)
10. Figuerola, F.; Hurtado, L.; Mari, A.; Chiffelle, I.; Asenjo, F. Fibre concentrates from apple pomace and citrus peel as potential fibre sources for food enrichment. *Food Chem.* **2005**, *91*, 395–401. [\[CrossRef\]](#)
11. Singh, J.P.; Kaur, A.; Singh, B.; Singh, N.; Singh, B. Physicochemical evaluation of corn extrudates containing varying buckwheat flour levels prepared at various extrusion temperatures. *J. Food Sci. Technol.* **2019**, *56*, 2205–2212. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
12. Cotacallapa-Sucapu, M.; Vega, E.N.; Maievas, H.A.; Berrios, J.D.J.; Morales, P.; Fernández-Ruiz, V.; Cámara, M. Extrusion Process as an Alternative to Improve Pulses Products Consumption. A Review. *Foods* **2021**, *10*, 1096. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
13. Berenguer, C.V.; Andrade, C.; Pereira, J.A.M.; Perestrelo, R.; Câmara, J.S. Current Challenges in the Sustainable Valorisation of Agri-Food Wastes: A Review. *Processes* **2023**, *11*, 20. [\[CrossRef\]](#)
14. Pereira, N.; Farrokhi, M.; Vida, M.; Lageiro, M.; Ramos, A.C.; Vieira, M.C.; Alegria, C.; Gonçalves, E.M.; Abreu, M. Valorisation of Wasted Immature Tomato to Innovative Fermented Functional Foods. *Foods* **2023**, *12*, 1532. [\[CrossRef\]](#)

15. Mironeasa, S.; Coțovanu, I.; Mironeasa, C.; Ungureanu-Iuga, M. A Review of the Changes Produced by Extrusion Cooking on the Bioactive Compounds from Vegetal Sources. *Antioxidants* **2023**, *12*, 1453. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
16. Roye, C.; Henrion, M.; Chanvrier, H.; De Roeck, K.; De Bondt, Y.; Liberloo, I.; King, R.; Courtin, C.M. Extrusion-Cooking Modifies Physicochemical and Nutrition-Related Properties of Wheat Bran. *Foods* **2020**, *9*, 738. [\[CrossRef\]](#)
17. Szymczak, P.; Dziadowiec, D.; Andrzejewski, J.; Szostak, M. The Efficiency Evaluation of the Reactive Extrusion Process for Polyethylene Terephthalate (PET). Monitoring of the Industrial Foil Manufacturing Process by In-Line Rheological Measurements. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 3434. [\[CrossRef\]](#)
18. Offiah, V.; Kontogiorgos, V.; Falade, K.O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2019**, *59*, 2979–2998. [\[CrossRef\]](#)
19. Combrzyński, M.; Biernacka, B.; Wójtowicz, A.; Kupryaniuk, K.; Oniszcuk, T.; Mitrus, M.; Różyło, R.; Gancarz, M.; Stasiak, M.; Kasprzak-Drozd, K. Analysis of the extrusion-cooking process and selected physical properties of snack pellets with the addition of fresh kale. *Int. Agrophys.* **2023**, *37*, 353–364. [\[CrossRef\]](#)
20. Lisiecka, K.; Wójtowicz, A. The Production Efficiency and Specific Energy Consumption During Processing of Corn Extrudates with Fresh Vegetables Addition. *Agric. Eng.* **2019**, *23*, 15–23. [\[CrossRef\]](#)
21. Matysiak, A.; Wójtowicz, A.; Oniszcuk, T. Process efficiency and energy consumption during the extrusion of potato and multigram formulations. *Agric. Eng.* **2018**, *22*, 49–57. [\[CrossRef\]](#)
22. Yacu, W. Extruder screw, barrel, and die assembly: General design principles and operation. In *Extrusion Cooking*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; pp. 73–117. [\[CrossRef\]](#)
23. *ASAE Standard: ASAE S269.3; Wafers, Pellets and Crumbles—Definition and Methods for Determining Density, Durability and Moisture Content*. American Society of Agricultural and Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 1989.
24. Mitrus, M.; Combrzyński, M.; Biernacka, B.; Wójtowicz, A.; Milanowski, M.; Kupryaniuk, K.; Gancarz, M.; Soja, J.; Różyło, R. Fresh Broccoli in Fortified Snack Pellets: Extrusion-Cooking Aspects and Physical Characteristics. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 8138. [\[CrossRef\]](#)
25. Lisiecka, K.; Wójtowicz, A. Possibility to Save Water and Energy by Application of Fresh Vegetables to Produce Supplemented Potato-Based Snack Pellets. *Processes* **2020**, *8*, 153. [\[CrossRef\]](#)
26. Soja, J.; Özmen, Ö.; Krajewska, M.; Kasprzak-Drozd, K. Effect of apple pomace (*Malus domestica* ‘Gala’) addition on the processing conditions and antioxidant potential of extruded snacks. *Int. Agrophys.* **2023**, *37*, 401–413. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
27. Alam, M.S.; Kaur, J.; Khaira, H.; Gupta, K. Extrusion and Extruded Products: Changes in Quality Attributes as Affected by Extrusion Process Parameters: A Review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2016**, *56*, 445–475. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
28. Gumul, D.; Berski, W.; Zięba, T. The Influence of Fruit Pomaces on Nutritional, Pro-Health Value and Quality of Extruded Gluten-Free Snacks. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 4818. [\[CrossRef\]](#)
29. Lisiecka, K.; Wójtowicz, A. Effect of fresh beetroot application and processing conditions on some quality features of new type of potato-based snacks. *LWT-Food Sci. Technol.* **2021**, *141*, 110919. [\[CrossRef\]](#)
30. Wójtowicz, A.; Combrzyński, M.; Biernacka, B.; Oniszcuk, T.; Mitrus, M.; Różyło, R.; Gancarz, M.; Oniszcuk, A. Application of Edible Insect Flour as a Novel Ingredient in Fortified Snack Pellets: Processing Aspects and Physical Characteristics. *Processes* **2023**, *11*, 2561. [\[CrossRef\]](#)
31. Dushkova, M.; Simitchiev, A.; Beleva, B.; Petrova, T.; Koleva, A. Extrusion of Rice and Aronia melanocarpa Pomace: Physical and Functional Characteristics of Extrudates. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 4315. [\[CrossRef\]](#)
32. Karkle, E.L.; Alavi, S.; Dogan, H.; Jain, S.; Waghay, K. Development and Evaluation of Fruit and Vegetable-Based Extruded Snacks. Online. AACC International Cereal Science Knowledge Database. 2009. Available online: <https://www.cerealsgrains.org/publications/plexus/cfwplexus/library/webcasts/Pages/EKarkle.aspx> (accessed on 15 August 2024).

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.

Article

Integration of Plant Pomace into Extruded Products: Analysis of Process Conditions, Post-Production Waste Properties and Biogas Potential

Jakub Soja ¹, Tomasz Oniszcuk ¹ , Iryna Vaskina ² , Maciej Combrzyński ^{1,*}  and Agnieszka Wójtowicz ^{1,*} 

¹ Department of Thermal Technology and Food Process Engineering, University of Life Sciences in Lublin, Głęboka 31, 20-612 Lublin, Poland; jakub.soja@up.lublin.pl (J.S.); tomasz.oniszcuk@up.lublin.pl (T.O.)

² Department of Biosystems Engineering, Poznań University of Life Sciences, Wojska Polskiego 50, 60-627 Poznań, Poland; iryna.vaskina@up.poznan.pl

* Correspondence: maciej.combrzynski@up.lublin.pl (M.C.); agnieszka.wojtowicz@up.lublin.pl (A.W.)

Abstract: Waste streams from cereal-based food production processes, rich in organic matter and carbohydrates, have untapped potential for biogas production. This study uniquely investigated the extrusion-cooking process conditions, physical properties and biogas efficiency of snack pellets enriched with plant pomace (apple, chokeberry, pumpkin, flaxseed and nigella seeds) at different levels (10, 20 and 30%), produced using a single-screw extruder-cooker. The highest efficiency obtained in the extrusion-cooking process (18.20 kg/h) was observed for pellets with the addition of 30% flaxseed pomace. The SME value during the entire process was in the range of 0.015–0.072 kWh/kg. New insights into the interaction between the inclusion of pomace, the physical properties of the extrudate and the anaerobic fermentation efficiency were obtained. The results show that 30% chokeberry extrudate maximized methane production (51.39% gas), demonstrating a double innovation: improving snack pellet quality and converting food waste into renewable energy.

Keywords: extrusion-cooking process; post-production waste; biogas efficiency; process efficiency; selected physical properties



Citation: Soja, J.; Oniszcuk, T.; Vaskina, I.; Combrzyński, M.; Wójtowicz, A. Integration of Plant Pomace into Extruded Products: Analysis of Process Conditions, Post-Production Waste Properties and Biogas Potential. *Energies* **2024**, *17*, 6476. <https://doi.org/10.3390/en17246476>

Academic Editors: Christian Aragón-Briceño, Panagiotis Boutikos and Musa Manga

Received: 27 November 2024

Revised: 16 December 2024

Accepted: 19 December 2024

Published: 23 December 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 agri-food sector generates significant amounts of post-production waste, particularly during the manufacture of cereal products such as chips, crisps, pasta, texturized proteins, crispbread, breakfast cereals and other extruded food. These processes are highly energy intensive and are typically conducted on a large industrial scale, which inevitably results in the generation of substantial by-products and waste materials [1]. These wastes, often rich in organic compounds, such as carbohydrates, proteins and fibers, are frequently disposed of through landfilling or incineration. Such practices lead to environmental challenges, such as greenhouse gas emissions and the inefficient use of valuable resources [2]. As global attention shifts toward sustainability and a circular economy, conventional waste management practices are being recognized as progressively unsustainable [3].

Extrusion-cooking, a widely employed technology in food processing, is notable for generating considerable waste, particularly during the early production stages. This method is applied in the manufacturing of snack foods and crisps and involves the simultaneous mixing, cooking and shaping of raw materials under elevated pressure and temperature [4,5]. A critical step in the extrusion-cooking process is the stabilization phase, where parameters such as temperature, pressure, moisture content and screw speed must be finely tuned to achieve desired product characteristics [6,7]. Inefficiencies in production are common during this phase, as machinery requires time to reach stable operation conditions. This transitional period often results in off-specification products, which are discarded as waste, contributing to substantial material losses.

Anaerobic digestion presents a viable approach for managing waste generated during extrusion-based food production [8,9]. Research shows that waste materials rich in organic compounds, especially those from pasta or snack production, are highly suitable for anaerobic digestion, resulting in high methane production [10]. This efficiency is largely attributed to the high organic content of such substances, which serves as an effective substrate for microbial activity under anaerobic conditions [11,12].

Incorporating anaerobic digestion and biorefinery techniques into the agri-food industry provides a novel approach to lessen the environmental impact of post-production waste while supporting renewable energy generation. Recent developments in biorefinery strategies highlight the extraction of bioactive compounds, such as phenolics, from waste materials either before or after anaerobic digestion, enhancing both the sustainability and economic potential of agro-industrial practices [13,14]. This comprehensive approach supports broader goals to reduce the carbon footprint of food production and to advance the transition to a circular economy where waste is redefined as a valuable resource for energy, agriculture and other industrial applications [15–17].

The presence of fermentable organic compounds, particularly sugars, in agri-food industrial by-products significantly enhances microbial activity during anaerobic digestion, thereby optimizing biogas production efficiency. These findings underscore the potential of these waste materials to support sustainable energy generation while concurrently addressing waste management challenges. The conversion of agri-food industrial residues supports the circular economy model by effectively turning waste into valuable energy resources [18,19]. Moreover, the strategic utilization of by-products rich in fermentable sugars offers a dual advantage: it mitigates the environmental impacts associated with waste disposal and contributes to the advancement of renewable energy initiatives. Recent studies have shown that co-digesting different agri-food by-products can significantly boost biogas production, emphasizing the importance of optimizing anaerobic digestion processes for various combinations of these materials [20–22].

The presented study aims to evaluate the impact of the type and proportion of pomace used in the mixture on various aspects of the extrusion-cooking process, including efficiency, specific energy consumption and process stability. Additionally, the research examines how these factors influenced the bulk density, water absorption index (WAI) and water solubility index (WSI) of the extrudates, as well as the biogas and methane production efficiency. This study addresses the growing challenge of managing food manufacturing waste streams, focusing on their potential transformation into value-added products and renewable energy sources. The novelty of the work lies in integrating diverse plant pomaces (apple, chokeberry, pumpkin, flaxseed and nigella seed) into extrusion-cooking, as well as assessing their effects on both product quality and energy recovery efficiency in a systematic and comparative manner. Key contributions of this research include identifying optimal pomace types and proportions for maximizing methane yield while maintaining process stability and providing a practical framework for sustainable waste valorization and renewable energy production.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

This section describes the origin and preparation of post-production waste materials, the extrusion-cooking process and the formulations used in the study. It highlights the methodology employed to generate and process intermediate by-products during extrusion-cooking and the recipes developed to investigate the effects of plant pomace on product properties and biogas production efficiency.

The post-production waste materials employed in this study were obtained from the Department of Process Engineering at the University of Life Sciences in Lublin in 2023 during the extrusion-cooking process. In this case, the waste was generated during the transition between different mixtures of raw materials. This transition phase occurs

when the extrusion-cooking equipment is cleaned of one formulation and prepared for the next, leading to the production of intermediate waste.

The extrusion-cooking process was carried out using a single-screw extruder. Five separate recipes were processed, based on potato components enriched with the addition of plant by-products, i.e., chokeberry pomace, apple pomace, pumpkin pomace, flaxseed pomace and nigella seed pomace. Moreover, a formulation without the inclusion of any additional ingredients was prepared to serve as the control sample.

Extrudate production was carried out based on pre-prepared formulations, drawing upon the following raw materials sourced from local suppliers: plant pomace, potato starch, potato flakes, canola oil, beet sugar and salt.

2.2. Methods

In the initial phase of this study, the mixtures were formulated according to specified recipes. Selected pomace types—nigella seed, flaxseed, apple, chokeberry and pumpkin—were incorporated at varying concentrations of 10, 20 and 30% of dry components by weight as a replacement for potato starch (Table 1). These concentrations were determined via preliminary investigations and a thorough review of the relevant literature, which indicated that such levels are adequate to achieve the desired modifications in the product [23–25].

Table 1. The relative percentages of individual components in the mixtures.

Raw Materials	Control	10% Pomace	20% Pomace	30% Pomace
nigella seed, flaxseed, apple, chokeberry, pumpkin pomace (%)	0	10	20	30
potato starch (%)	82	72	62	52
potato flakes (%)	15	15	15	15
canola oil (%)	1	1	1	1
sugar (%)	1	1	1	1
salt (%)	1	1	1	1

In the next phase of the study, the pomace was shredded by way of a Germin CY-329 blender (Germin Berlinger, Jarosław, Poland). The proportions of each 4.5 kg mixture were carefully adjusted based on the quantity of plant ingredients incorporated.

Prior to the extrusion-cooking process, the water content of each blend was assessed using a Radwag MA50R moisture analyzer (Radwag, Radom, Poland) with an accuracy of 0.001%. Each mixture was then adjusted to reach a water content of 34%. To ensure the uniform distribution of the pomace additives, as well as the desired moisture level, the mixtures were then passed through a 0.5 mm sieve. Following this step, the mixtures were refrigerated for 24 h to stabilize the blends.

The extrusion-cooking process of snack pellets with the addition of pomace was carried out by employing the single-screw extruder EXP-45-32 (Zamak Mercator, Skawina, Poland) equipped with a plasticizing unit, with a total length-to-diameter ratio (L/D) of 16. The mixtures were processed at a screw speed of 60 rpm. The process conditions were selected based on previous studies and adapted to the specific mixtures. The temperature range for the individual extruder-cooker sections was 30–95 °C. The dough strips were formed by way of a flat die measuring 25 mm × 0.6 mm and cut into pieces measuring approximately 25 mm × 25 mm. The resulting products were dried in a laboratory shelf dryer at 40 °C for 12 h until their moisture content reached 8.5–9.5%. After drying, the extrudates were secured in ziplock bags for storage until further processing. Research was performed according to the methodological framework of the study (Figure 1).

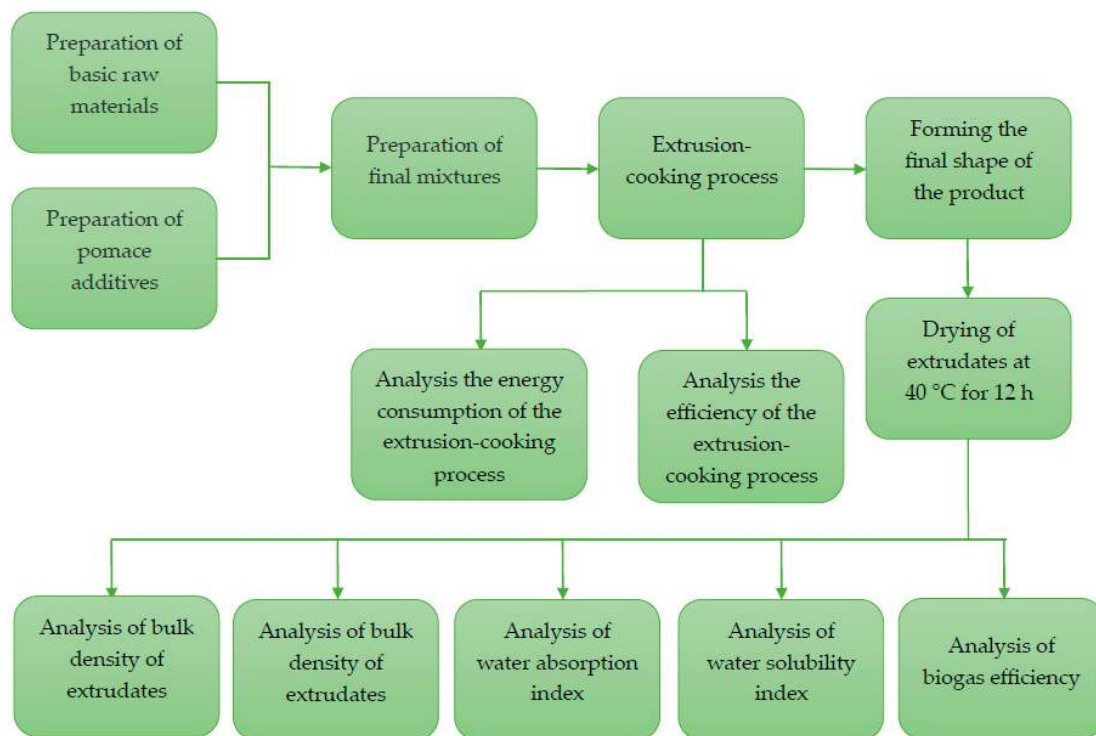


Figure 1. Flowchart presenting the methodological framework of the study.

2.3. Extrusion-Cooking Process Efficiency

Process efficiency (Q) was assessed by measuring the mass of the extruded product leaving the forming die at 30 s intervals, while keeping processing conditions and feed rates constant throughout the tests. Each series of measurements was repeated three times for accuracy, using an electronic stopwatch and a precision balance (DS-788 Yakudo, Tokyo, Japan) with an accuracy of 0.001 kg. The final efficiency value was calculated as the average of these repeated measurements. The approach for calculating process efficiency was based on the methodology of Matysiak et al. [26], who investigated the extrusion-cooking process of potato flour mixtures by way of a single-screw extruder. This methodology has also been employed in previous research to assess extrusion-cooking efficiency under similar conditions [2]:

$$Q = \frac{m}{t} (\text{kg/h}) \quad (1)$$

where Q is the extrusion-cooking process efficiency (kg/h), m represents the mass of the extrudate determined through measurement (kg) and t is time (h).

2.4. Energy Consumption of the Extrusion-Cooking Process

The active power of the extruder-cooker was monitored via an integrated wattmeter, which is part of the machine's standard instrumentation. Based on the motor specifications and operational parameters recorded during the tests, motor load data and process efficiency were used to calculate the specific mechanical energy (SME) consumption. This calculation was performed by applying the methodology outlined by Matysiak et al. [26], with the conversion of measured values into SME following the prescribed formula:

$$SME = \frac{n}{n_m} \times \frac{O}{100} \times \frac{P}{Q} (\text{kWh/kg}) \quad (2)$$

where SME is the specific mechanical energy (kWh/kg), n is the extruder-cooker rotational speed (rpm), n_m is the maximum extruder-cooker rotational speed (rpm), O is the load of

the extruder-cooker engine (%), P is the nominal electrical power specified by the control panel (kW) and Q is the extrusion-cooking process efficiency (kg/h).

2.5. Bulk Density of Extrudates

The bulk density (BD) of the extrudates was evaluated by determining the ratio of the sample mass, measured by means of a precision balance (DS-788 Yakudo, Tokyo, Japan) to an accuracy of 0.001 kg, to its volume (a 1 L container). This assessment was performed in triplicate to ensure an accuracy of 0.01 kg/m³. The arithmetic mean of the three measurements was subsequently utilized as the representative value. The bulk density was calculated via the formula presented by Combrzyński et al. [27]:

$$BD = \frac{m}{V} \left(\text{kg/m}^3 \right) \quad (3)$$

where BD represents the bulk density (kg/m³), m denotes the mass of the sample (kg) and V indicates the volume of the container (m³).

2.6. Water Absorption Index (WAI)

The water absorption index (WAI) was determined following the methodology outlined by Wójtowicz and Mościcki [28]. A sample of ground extrudates (0.7 g) was continuously mixed with distilled water (7 mL) for 20 min. Subsequently, the suspension was centrifuged for 10 min at 15,000 rpm using a Digicen 21 centrifuge (Labsystem, Kraków, Poland). The supernatant was collected, and the remaining gel was weighed by way of a precise laboratory balance WPS 210/C (Radwag, Radom, Poland) to an accuracy of 0.001 g. The WAI was calculated in triplicate using the appropriate formula:

$$WAI = \frac{m_g}{m_s} \text{ (g/g)} \quad (4)$$

where the WAI is the water absorption index (g/g), m_g is the mass of the gel (g) and m_s is the mass of the dry sample (g).

2.7. Water Solubility Index (WSI)

The water solubility index (WSI) was assessed following the methodology established by Wójtowicz and Mościcki [28]. After conducting the WAI measurement, the resulting liquid was evaporated at a temperature of 110 °C in a laboratory dryer SLW 53 STD (Pol-Eko Aparatura S.J., Wodzisław Śląski, Poland) until the complete removal of water was achieved. The mass of the remained solids was then weighed by means of a precise laboratory balance WPS 210/C (Radwag, Radom, Poland) to an accuracy of 0.001 g. The WSI was then determined in triplicate by applying the specified formula:

$$WSI = \frac{m_v - m_{dv}}{m_s} \times 100 \text{ (\%)} \quad (5)$$

where the WSI is water solubility index (%), m_v is the mass of the vessel before drying (g), m_{dv} is the mass of the vessel after drying (g) and m_s is the mass of the dry sample (g).

2.8. Anaerobic Digestion of Processed Extrudates for Methane Production

The biogas efficiency of the analyzed post-production wastes obtained by the extrusion-cooking process was evaluated depending on the type of plant pomace used and its percentage in the extrudates recipes.

A biogas production experiment was conducted in the Laboratory of Ecotechnologies at Poznan University of Life Sciences (PULS). In this study, the efficiency of biogas production was assessed via methane fermentation under mesophilic conditions. The experimental design was structured and consisted of three independent replicates to ensure the reliability and reproducibility of the results. The fermentation process employed

a proprietary bioreactor designed to optimize anaerobic digestion conditions (Figure 2). This bioreactor allows precise control of critical parameters such as temperature, pH and substrate concentration, thus facilitating accurate evaluation of fermentation performance. Various metrics were monitored throughout the experiment, including the volume and composition of the biogas produced, as well as the overall biogas efficiency relative to the input substrate.

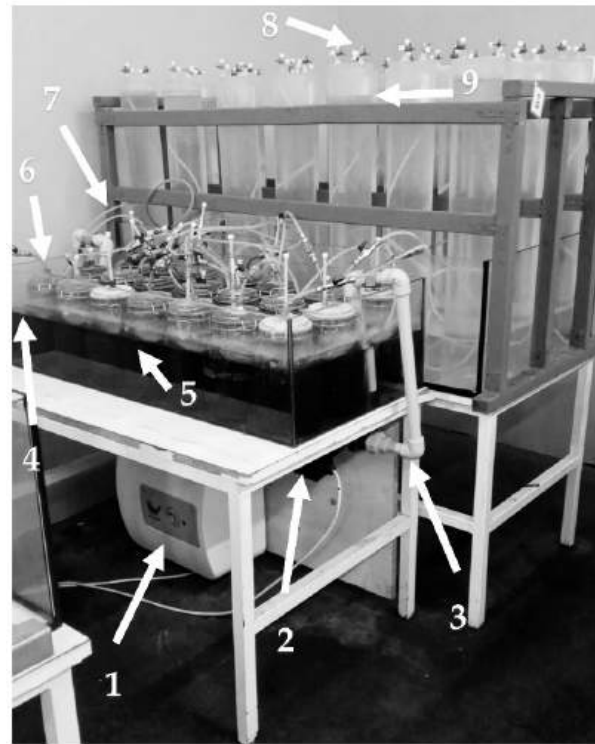


Figure 2. Construction of a biofermentor for biogas production research: 1—water heater with temperature regulator, 2—water pump, 3—insulated conductors of calefaction liquid, 4—water coat, 5—fermenter with charge capacity 2 dm³, 6—sampling tubes, 7—biogas transporting tube, 8—gas sampling valve and 9—biogas volume-scale reservoir [29].

The biogas production experiment was conducted under standard conditions for methane fermentation through the application of the methodology described by Dach et al. [30]. Following this, fermentation reactors with a capacity of 2 dm³ were prepared. Herein, 1187 g of inoculum was introduced into each reactor. The inoculum consisted of a microbial sample sourced from a functioning biogas plant, intended to establish active microbial cultures. Afterward, 13 g of extrudates, supplemented with varying percentages of selected plant pomace, were added to the prepared reactors. The reactors were sealed and submerged in water maintained at 39 °C to simulate actual process conditions found in biogas plants. The volume and quantitative composition of the produced gases were systematically monitored and analyzed at 24 h intervals via a GA5000 gas analyzer (QED Environmental Systems Inc., Dexter, MI, USA). The range and accuracy of this analyzer depend on the tested components: CH₄ 0–100% (0–70%: +/−0.5% (vol.), 70–100%: +/−1.5% (vol.)), CO₂ 0–100% (0–60%: +/−0.5% (vol.), 60–100%: +/−1.5% (vol.)), O₂ 0–25% (0–25%: +/−1.0% (vol.)), H₂S 0–10,000 ppm (+/−5.0%) and NH₃ 0–1000 ppm (+/−10.0%). The obtained results were recalculated using MS Excel as biogas and methane production from 1 Mg of fresh matter (as well as of total solids and volatile solids) of the analyzed sample. The methane (CH₄), the obtained biogas, contained carbon dioxide (CO₂) and smaller amounts of other gases, including hydrogen sulfide (H₂S) as well as ammonia (NH₃) in trace amounts. Biogas pressure varied from 4.182 to 4.927 kPa. Physical properties of the biogas such as flammability, density, calorific value, etc. were not measured as they were not relevant to

this study. The fermentation process was considered to be completed when the daily biogas production fell below 1% of the total biogas efficiency recorded during the previous 24 h period. In accordance, the biogas and methane efficiency (Mg/m^3) were determined based on three replicates for each sample, which complies with the standard DIN 38 414/S8 as described by Kupryaniuk et al. [29]. The final biogas efficiency was calculated in terms of conversion on the fresh mass of the extrudates (CBPFM), dry mass (CBPDM) and dry organic matter (CBPDOM). The amount of methane efficiency was deliberated based on the extrudates fresh mass (CMPFM), dry mass (CMPDM) and dry organic matter (CMPDOM). In addition, the methane content (MC) is shown in comparison to biogas [31].

2.9. Statistical Analysis

Mean values were tested for the significance of differences by the analysis of variance test (ANOVA), followed by the Tukey post hoc test at the 0.05 significance level. Homogeneous groups were indicated with similar letters. Principal component analysis (PCA) was applied to determine the relationship between the studied cases and parameters. Statistica software (version 13.0, StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA) was used for the analyses. Principal component analysis and correlation determination were performed at the significance level of $\alpha = 0.05$. The data matrix employed for the statistical analysis of the PCA results had 12 columns and 16 rows. The number of principal components obtained in the analysis in both cases was determined based on the Cattell criterion. The input matrix was automatically rescaled.

3. Results

In this section, we outlined the outcome of the assessment of certain processing parameters (i.e., efficiency and specific energy consumption during the extrusion-cooking process), as well as the determination of the physical properties of the resulting post-production extrudates. Additionally, we examined the potential of these extrudates as an energy source, focusing on their use in biogas production.

The agri-food industry generates significant amounts of waste, hence posing a notable environmental challenge. The presented results include processing parameters such as efficiency and specific energy consumption during extrusion-cooking, the physical properties of the resulting post-production extrudate and the potential use of the extrudates as an energy source. The tested snack pellets are extruded products primarily composed of starch, characterized by a high content of organic compounds due to the presence of potato starch and plant pomace. The extrudates utilized in this research were classified as post-production wastes that are generated during process optimization and product quality stabilization. These products often pose a challenge in manufacturing facilities, as they do not meet quality standards and cannot be sold as valuable products, resulting in their classification as waste.

The findings provide valuable insights into the potential of these types of products for energy purposes, aligning with the principles of a circular economy. By using extrudates enriched with various types of pomaces and adjusting their percentage compositions, this study enabled a comparative analysis of potential energy outputs across different extrudates, ultimately identifying the most efficient mixture. This approach not only demonstrates the value of post-production waste but also promotes sustainable practices across the agri-food sector.

3.1. Impact of Ingredients Selection and Quantity on the Efficiency of Extrusion-Cooking Process

The analysis of efficiency data for different pomace types at various concentrations (10%, 20% and 30%) compared to a control sample (0% pomace) showed significant variations in processing efficiency, highlighting the influence of both pomace type and concentration on the obtained results. The control sample without pomace resulted in the highest efficiency at 18.00 kg/h (Table 2), serving as a baseline for comparison. The introduction of pomace into the system generally led to an initial decrease in efficiency at the

10% concentration, followed by varying patterns of recovery or further decrease at higher concentrations, depending on the type of pomace.

Table 2. Extrudate extrusion-cooking efficiencies depending on plant pomace type ($n = 3 \pm \text{SD}$).

Type of Pomace	Q (kg/h)			
	Control	10% Pomace	20% Pomace	30% Pomace
Control sample	18.00 ± 0.24^g	-	-	-
Nigella seed pomace	-	13.64 ± 0.18^{cd}	16.28 ± 0.72^f	16.80 ± 0.24^f
Flaxseed pomace	-	13.80 ± 0.36^{cd}	16.52 ± 0.14^f	18.20 ± 0.25^g
Apple pomace	-	13.12 ± 0.14^{bc}	13.00 ± 0.18^{bc}	16.00 ± 0.14^f
Chokeberry pomace	-	12.40 ± 0.37^b	14.36 ± 0.35^{de}	14.16 ± 0.24^{de}
Pumpkin pomace	-	15.00 ± 0.60^e	11.42 ± 0.09^a	13.12 ± 0.14^{bc}

Q—Process efficiency; ^{a–g}—means indicated with similar letters do not differ significantly at $\alpha = 0.05$.

Nigella seed pomace demonstrated a progressive improvement in efficiency as the concentration of pomace increased (Table 2). At 10% of additive in the recipe, the efficiency was 13.64 kg/h—significantly lower than the control. However, when this additive was applied at 20% and 30%, the processing efficiency was improved to 16.28 and 16.80 kg/h, respectively. This approached but did not exceed the control value. The relatively consistent improvement with increasing pomace concentration suggests that nigella seed pomace, while initially reducing efficiency, can be utilized at higher concentrations without substantial adverse effects.

Flaxseed pomace followed a similar pattern, although it exhibited the most remarkable recovery at 30% content in the recipe. The extrusion efficiency at 10% of this additive was 13.8 kg/h, marginally higher than that of nigella seed pomace at the same concentration. As the pomace concentration increased to 20%, the efficiency was improved to 16.52 kg/h. At 30% of additive, it reached 18.20 kg/h—surpassing the control sample. This makes flaxseed pomace the most effective additive among the tested types, particularly at higher concentrations, where it not only restored but enhanced efficiency beyond the baseline result.

Apple pomace presented a different trend, where the efficiency remained relatively low across all concentrations, except for the 30% addition, at which some recovery was observed. At 10% of additive, the efficiency was 13.12 kg/h, and at a 20% concentration, it remained almost constant at 13.00 kg/h. A notable increase occurred at the level of 30%, where efficiency increased to 16.00 kg/h—though still below that of control. This indicates that apple pomace has a more limited potential for efficiency recovery, as even at higher concentrations, it does not fully match the output of the control sample.

The chokeberry pomace data showed a more complex pattern. At 10% of additive, the efficiency was the lowest among all pomaces, at 12.40 kg/h, significantly below the control. At the level of 20%, there was an improvement to 14.36 kg/h, but the addition of 30% of chokeberry pomace slightly decreased the efficiency to 14.16 kg/h, indicating that chokeberry pomace may not support further efficiency gains at higher concentrations and may even result in diminished returns. This pomace appears to have a more limited capacity to enhance efficiency, especially when compared to alternatives such as flaxseed pomace.

Pumpkin pomace exhibited a marked decrease in efficiency at a 20% concentration, which deviates from the trends observed in other pomaces. At 10% of additive, the efficiency was 15.00 kg/h, which was relatively high compared to other types of pomaces at the same concentration. However, at the 20% level, the efficiency decreased sharply to 11.42 kg/h—the lowest recorded value in the dataset. At 30% of pumpkin pomace addition, there was a partial recovery to 13.12 kg/h, but this value remained considerably lower than both the control and the 10% sample (Table 2). The significant decrease at 20% suggests that pumpkin pomace may interfere with the process at these concentrations, although slight improvement can be seen with higher concentrations.

In conclusion, flaxseed pomace stands out as the most effective additive at high concentrations, with the ability to improve efficiency beyond that of the control sample. Nigella seed pomace also showed potential for moderate efficiency gains at high concentrations, though not to the same extent. Apple pomace demonstrates limited capacity for efficiency enhancement, while chokeberry pomace exhibits fluctuating results with diminishing returns at high concentrations. Pumpkin pomace showed a steep decline at intermediate levels, which may limit its application in processes requiring consistent efficiency. The significant differences observed suggest that pomace type and concentration are critical factors in determining their impact on production efficiency.

3.2. Impact of Ingredient Selection and Quantity on the Energy Consumption of Extrusion-Cooking Process

The provided data examined the impact of different types of pomaces added at concentrations of 10, 20 and 30% on the specific mechanical energy (SME) consumption. The control sample without pomace addition establishes a baseline SME of 0.051 kWh/kg (Table 3), serving as a reference for evaluating the influence of pomace types on energy requirements.

Table 3. Extrusion-cooking specific mechanical energy consumption ($n = 3 \pm \text{SD}$).

Type of Pomace	SME (kWh/kg)			
	Control	10% Pomace	20% Pomace	30% Pomace
Control sample	0.051 ± 0.001^{ef}	-	-	-
Nigella seed pomace	-	0.052 ± 0.001^{ef}	0.072 ± 0.002^h	0.021 ± 0.001^{ab}
Flaxseed pomace	-	0.047 ± 0.004^{def}	0.058 ± 0.006^{fgh}	0.033 ± 0.020^{bcd}
Apple pomace	-	0.020 ± 0.002^{ab}	0.057 ± 0.005^{efg}	0.015 ± 0.001^a
Chokeberry pomace	-	0.023 ± 0.004^{ab}	0.020 ± 0.004^{ab}	0.021 ± 0.001^{ab}
Pumpkin pomace	-	0.029 ± 0.024^{abc}	0.067 ± 0.008^{gh}	0.043 ± 0.010^{cde}

SME—specific mechanical energy; ^{a–h}—means indicated with similar letters do not differ significantly at $\alpha = 0.05$.

Nigella seed pomace demonstrated variable effects on the SME across concentrations. At 10% of additive, the SME was calculated at 0.052 kWh/kg, which was close to the control value, indicating minimal influence on energy requirements at this concentration. However, at the level of 20%, the SME value increased significantly to 0.072 kWh/kg, suggesting that this concentration may elevate energy demands. In contrast, increasing addition up to 30% decreased the SME to 0.021 kWh/kg, indicating a substantial reduction in energy consumption compared to both the control sample and other concentrations (Table 3). This trend suggests that nigella seed pomace may be beneficial at higher concentrations, potentially due to improved material properties or processing efficiency. Flaxseed pomace level exhibited a relatively stable influence on the SME, though it showed a general decrease at higher concentrations. At 10% of additive, the SME reached 0.047 kWh/kg—slightly below the control. At the level of 20%, the SME increased moderately to 0.058 kWh/kg, before dropping again at 30% of additive to the mean value of 0.033 kWh/kg (Table 3). These results suggest that, while flaxseed pomace does increase energy demands at moderate levels, its overall impact on the SME remains relatively low, with the lowest energy requirements observed at the highest concentration.

Apple pomace demonstrated a distinct effect, consistently lowering the SME across concentrations. At 10% of additive, the SME was at 0.020 kWh/kg—markedly lower than the control sample. Increasing the additive level to 20% increased slightly the SME results to 0.057 kWh/kg, before decreasing further to 0.015 kWh/kg at a 30% addition (Table 3). This consistent SME lowering indicates that apple pomace has a beneficial impact on reducing energy consumption, particularly at lower concentrations, making it an effective additive for decreasing mechanical energy requirements.

Chokeberry pomace showed minimal changes in SME across all concentrations, maintaining low energy requirements in comparison to the control sample. At the level of 10%, the SME was obtained at 0.023 kWh/kg, which remained lower than the control. A further

decrease to 0.020 kWh/kg at 20% and to 0.021 kWh/kg at 30% of additive was observed (Table 3). The low and stable SME values indicate that chokeberry pomace has a minimal impact on energy consumption and may contribute to efficient processing conditions regardless of the concentration.

The pumpkin pomace level exhibited a moderate effect on the SME. At a 10% concentration, the SME was 0.029 kWh/kg, lower than the control. However, at 20%, the SME increased significantly to 0.067 kWh/kg, suggesting a rise in energy demands at this concentration. The addition of 30% pumpkin pomace in the recipe caused a decrease in the SME to 0.043 kWh/kg (Table 3), indicating a reduction from the 20% level but still higher than for a 10% concentration. These results imply that, while pumpkin pomace may lead to higher energy requirements at moderate levels, its impact decreases at higher concentrations.

In conclusion, this study indicates that the addition of pomace types influenced the specific mechanical energy consumption in diverse ways. Apple and chokeberry pomace addition consistently reduce the SME, particularly at lower concentrations, indicating their suitability for energy-efficient processing. In contrast, nigella seed and pumpkin pomace application displayed more variable effects, with nigella seed pomace showing the greatest reduction in the SME at the 30% level, and pumpkin pomace presented increased energy demands at intermediate levels. Flaxseed pomace addition generally showed a moderate impact on the SME, with energy requirements decreasing as the concentration increased. These findings highlight the importance of the pomace type and concentration in optimizing energy consumption in processing applications.

3.3. Results of Bulk Density of Extrudates

The presented results evaluate the impact of various types of pomaces added at concentrations of 10, 20 and 30% on the bulk density of the extrudates. The control sample without the pomace addition established a baseline bulk density of 298.99 kg/m³ (Table 4), serving as the reference for assessing changes in material compactness upon the addition of pomace.

Table 4. Extrudate bulk density ($n = 3 \pm \text{SD}$).

Type of Pomace	BD (kg/m ³)			
	Control	10% Pomace	20% Pomace	30% Pomace
Control sample	298.99 ± 1.26 ^d	-	-	-
Nigella seed pomace	-	319.43 ± 1.27 ^f	365.19 ± 1.84 ^j	308.24 ± 1.62 ^e
Flaxseed pomace	-	299.23 ± 1.84 ^d	278.05 ± 1.93 ^b	291.64 ± 3.09 ^c
Apple pomace	-	330.52 ± 1.19 ^g	355.29 ± 2.57 ⁱ	337.11 ± 2.38 ^h
Chokeberry pomace	-	338.08 ± 1.29 ^h	369.75 ± 1.49 ^j	255.53 ± 2.11 ^a
Pumpkin pomace	-	310.4 ± 0.92 ^e	309.18 ± 0.24 ^e	302.46 ± 1.05 ^d

BD—bulk density; a–j—means indicated with similar letters do not differ significantly at $\alpha = 0.05$.

Nigella seed pomace demonstrated a positive effect on bulk density, particularly at moderate concentrations. At the 10% addition level, the bulk density increased to 319.43 kg/m³, indicating an improvement in compactness compared to the control. This trend continued at the 20% level, where the bulk density reached 365.19 kg/m³—the highest value among the concentrations for this pomace type—suggesting an optimal compacting effect at this level. However, at 30% of nigella seed pomace, the bulk density decreased to 308.24 kg/m³, which is still above the control, implying that higher concentrations may reduce the bulk density gains seen at moderate levels.

Flaxseed pomace exhibited a more variable impact on bulk density, with a tendency toward reduction at higher concentrations. At a 10% addition, the bulk density was 299.23 kg/m³, which is not significantly different than the control (Table 4). However, the addition of 20% pomace decreased the bulk density to 278.05 kg/m³, indicating a loss of material compactness. At 30% of additive, the bulk density slightly grew to 291.64 kg/m³

yet remained below the control. These results suggest that flaxseed pomace may not enhance bulk density, particularly at high concentrations.

Apple pomace showed a consistent positive impact on bulk density across all concentrations. At 10% of additive, the bulk density increased to 330.52 kg/m³, and at 20%, it rose further to 355.29 kg/m³, indicating a strong compaction effect. At 30%, bulk density remained high at 337.11 kg/m³, suggesting that apple pomace demonstrated enhanced compactness at all tested concentrations, with the most pronounced effects observed at moderate levels (Table 4).

Chokeberry pomace application exhibited the highest bulk density of the extrudates at moderate concentrations but showed a significant decrease when used at the 30% level. At 10% of additive in the recipe, the bulk density was 338.08 kg/m³—significantly above the control—and further increased to 369.75 kg/m³ at 20%—the highest density across all pomace types and concentrations. However, at the 30% level, the bulk density decreased significantly to 255.53 kg/m³, indicating that excessive chokeberry pomace may compromise the material structure, leading to reduced compactness.

Pumpkin pomace demonstrated a stable effect on bulk density across all concentrations, with only slight variations. At a 10% addition, the bulk density was 310.4 kg/m³—higher than the control sample. At the level of 20%, the BD slightly decreased to 309.18 kg/m³, and at 30%, it declined further to 302.46 kg/m³ (Table 4). While pumpkin pomace contributes to increased compactness at lower levels, its effect remains moderate and consistent across all concentrations.

In conclusion, the addition of pomace types significantly influenced bulk density, with nigella seed and apple pomace providing consistent improvements across concentrations, particularly at moderate levels. Chokeberry pomace achieved peak bulk density at a 20% concentration; however, its effectiveness declined significantly at 30%. Conversely, flaxseed pomace demonstrated a tendency to reduce the bulk density, especially at high concentrations, while pumpkin pomace maintained a moderate and stable effect on compactness. These findings underscore the role of both pomace type and concentration in optimizing bulk density—critical for applications requiring tailored material properties.

3.4. Results of Water Absorption Index

The results present the impact of different types of pomaces on the water absorption index (WAI) at concentrations of 10, 20 and 30%. The control sample, devoid of any pomace, established a baseline WAI of 4.19 g/g (Table 5), providing a reference for assessing the impact of each pomace type on the material's water absorption capacity.

Table 5. Extrudate water absorption index ($n = 3 \pm \text{SD}$).

Type of Pomace	WAI (g/g)			
	Control	10% Pomace	20% Pomace	30% Pomace
Control sample	4.19 ± 0.06 ^{hi}	-	-	-
Nigella seed pomace	-	4.73 ± 0.05 ⁱ	2.26 ± 0.01 ^{ab}	1.91 ± 0.01 ^a
Flaxseed pomace	-	3.51 ± 0.07 ^{efg}	2.85 ± 0.04 ^{cdef}	2.55 ± 0.02 ^{abc}
Apple pomace	-	3.35 ± 0.43 ^{def}	4.06 ± 0.09 ^{ghi}	3.45 ± 0.05 ^{efg}
Chokeberry pomace	-	2.89 ± 0.06 ^{bcde}	2.73 ± 0.08 ^{bcd}	2.89 ± 0.58 ^{bcde}
Pumpkin pomace	-	4.02 ± 0.18 ^{gh}	3.73 ± 0.08 ^{fgh}	3.34 ± 0.24 ^{def}

WAI—water absorption index; ^{a-i}—means indicated with similar letters in columns do not differ significantly at $\alpha = 0.05$.

Nigella seed pomace exhibited a variable effect on the WAI across the tested concentrations. At 10% of additive, the WAI increased to 4.73 g/g, reflecting an enhancement compared to the control sample. However, a significant decline was observed at a 20% addition, where the WAI decreased to 2.26 g/g and further diminished to 1.91 g/g at 30%. This trend indicates that, while nigella seed pomace promotes water absorption at lower concentrations, the ability to improve absorption is markedly reduced at higher levels,

potentially due to unfavorable interactions between the pomace and the water absorption mechanisms and fluctuations in the amount of fat [32].

Flaxseed pomace followed a similar pattern, with the WAI weakening as the concentration increased. At a 10% addition, the WAI was recorded at 3.51 g/g, which was lower than found for the control. This value continued to decline to 2.85 and 2.55 g/g at 20% and 30% concentrations, respectively (Table 5). The consistent reduction in the WAI suggests that flaxseed pomace may not effectively enhance water absorption at high concentrations, indicating potential negative interactions that inhibit the water uptake.

In contrast, apple pomace revealed a more favorable influence on the WAI. The initial measurement at 10% was 3.35 g/g, which was relatively close to the control sample. Notably, at a 20% addition, the WAI increased to 4.06 g/g—suggesting a significant enhancement in water absorption capacity. Although there was a slight decrease to 3.45 g/g at the 30% level, this value remained higher than those for the control sample and at a 10% concentration (Table 5). These results indicate that apple pomace was an effective additive in improving water absorption, particularly at moderate levels. Chokeberry pomace presented a relatively stable but consistently lower effect on the WAI. At a 10% addition, the WAI was measured at 2.89 g/g, indicating reduced water absorption capacity compared to the control sample. This value slightly decreased to 2.73 g/g at 20% and returned to 2.89 g/g at 30% of additive used (Table 5). Overall, the lower values suggest that chokeberry pomace may not significantly enhance the water absorption capacity, exhibiting minimal variation across the tested concentrations.

Pumpkin pomace application in extruded products showed a moderate impact on the WAI, with a recorded value of 4.02 g/g at 10%—indicating higher water absorption compared to the control sample. At 20% of additive, the WAI decreased to 3.73 g/g and further to 3.34 g/g at the 30% level (Table 5). Despite the reduction in water absorption with increasing concentration, the initial high value suggests that pumpkin pomace addition may contribute positively to water absorption of extrudates, even at low levels.

Nigella seed and flaxseed pomace exhibited diminished effectiveness at higher concentrations, whereas apple pomace consistently enhanced water absorption, particularly at moderate levels. Conversely, chokeberry pomace demonstrated limited influence, and pumpkin pomace showed a mixed response. These observations underscore the critical role of both pomace type and concentration in terms of enhancing the water absorption capacity of materials.

3.5. Results of Water Solubility Index

The present study systematically evaluates the effects of different pomace types on the water solubility index (WSI) across incremental concentrations of 10, 20 and 30%. The control sample, without the addition of pomace, demonstrated a WSI of 4.21%, providing a reference point for comparison in assessing the impact of different pomace types on water solubility (Table 6).

Table 6. Extrudate water solubility index ($n = 3 \pm \text{SD}$).

Type of Pomace	WSI (%)			
	Control	10% Pomace	20% Pomace	30% Pomace
Control sample	4.21 $\pm$ 0.09 ^a	-	-	-
Nigella seed pomace	-	3.71 $\pm$ 0.53 ^a	7.97 $\pm$ 0.77 ^{def}	10.23 $\pm$ 0.76 ^f
Flaxseed pomace	-	5.47 $\pm$ 0.17 ^{abcd}	6.10 $\pm$ 0.20 ^{abcde}	7.30 $\pm$ 0.16 ^{bcde}
Apple pomace	-	4.49 $\pm$ 0.45 ^{ab}	4.37 $\pm$ 0.38 ^a	5.53 $\pm$ 0.25 ^{abcd}
Chokeberry pomace	-	8.59 $\pm$ 1.01 ^{ef}	14.80 $\pm$ 3.30 ^g	17.67 $\pm$ 0.58 ^g
Pumpkin pomace	-	4.16 $\pm$ 0.72 ^a	4.70 $\pm$ 0.09 ^{abc}	7.53 $\pm$ 0.20 ^{cdef}

WSI—water solubility index; ^{a–g}—means indicated with similar letters do not differ significantly at $\alpha = 0.05$.

Nigella seed pomace showed a significant enhancement in the WSI as the concentration increased. Initially, at the 10% level, the WSI was obtained at 3.71%, which was lower than

the control value. However, at a 20% concentration, a substantial increase in the WSI was observed—rising to 7.97% and further to 10.23% at 30% of additive (Table 6). These results suggest that nigella seed pomace was particularly effective at elevating water solubility, especially at high concentrations, highlighting its potential as an additive in applications requiring improved solubility characteristics.

Flaxseed pomace also positively influenced the WSI, though the enhancement was more moderate. At a concentration of 10%, the WSI of the extrudates was 5.47%, which exceeds the control sample. The WSI values increased to 6.10% at a 20% concentration, followed by a further rise to 7.30% at the 30% level (Table 6). The progressive increase in the WSI across concentrations suggests that flaxseed pomace enhances water solubility, though to a lesser extent than observed if nigella seed pomace was used.

In contrast, the apple pomace application exhibited a relatively stable effect on the WSI. At 10 and 20% of additive, the WSI values were at 4.49 and 4.37%—slightly higher than the control. However, at 30%, a significant increase was observed to 5.53% (Table 6). These results imply that apple pomace can increase water solubility but with inconsistent effects across varying concentrations.

Chokeberry pomace presented the most substantial enhancement in the WSI among the pomaces evaluated. The WSI value at a 10% concentration was 8.59%, which was significantly higher than the control. This increase continued at 20%, reaching 14.80%, and further rose to 17.67% at a 30% concentration. These findings indicate that chokeberry pomace is highly effective at improving water solubility, suggesting a potential application in formulations that require enhanced solubility.

Pumpkin pomace addition demonstrated a more moderate impact on the WSI. At 10% of addition, the WSI was measured at 4.16%, which was slightly lower than in the control sample. However, WSI values increased to 4.70% at 20% and further to 7.53% at 30% of pumpkin pomace. Although this by-product contributes positively to water solubility, its overall effect remains less pronounced compared to nigella seed and chokeberry pomaces.

Nigella seed and chokeberry pomace markedly enhanced the WSI of extrudates, particularly at higher concentrations, while flaxseed pomace provided a moderate benefit. Conversely, apple pomace exhibited steady yet variable effects on the WSI, and pumpkin pomace provided only a minor increase. These outcomes emphasize the significance of selecting both the appropriate pomace type and concentration to enhance water solubility for specific applications.

3.6. Results of Extrudates Biogas Efficiency

The control potato-based extruded sample provided a methane content of 47.38% in the obtained gases during anaerobic fermentation (Figure 3), with a cumulative methane production of 299.29 m³ per Mg of fresh mass and cumulative biogas production of 631.68 m³ per Mg of fresh mass (Table 7). This control serves as a reference sample for evaluating the effects of pomace addition and type on methane efficiency and biogas productivity.

Nigella seed pomace demonstrated a notable increase in the methane content as the concentration of by-products increased in the recipe. At 10% of additive, the methane content was found to be 47.07% of the total gas amount, slightly below the control. However, methane productivity increased to 49.64% if 20% of pomace was used and to 51.39% at the 30% level (Figure 3). Correspondingly, cumulative methane production per Mg of fresh mass increased from 295.87 m³ at 10%, to 323.60 m³ at 20% and 337.04 m³ at 30% of this additive, indicating that nigella seed pomace elevated methane output, particularly at high concentrations (Table 7). Similar trends are observed in cumulative methane production per Mg of dry mass and dry organic matter, suggesting that nigella seed pomace has a positive impact on biogas production efficiency at moderate to high concentrations.

Flaxseed pomace showed relatively stable methane content across all concentrations, starting from 47.42% of the total gas amount at 10% of additive and increasing slightly to 48.95% at 30% with significant effects (Figure 3). The cumulative methane production per Mg of fresh mass remained near the control value, reaching 289.68 m³ at 10% of flaxseed

pomace and increasing to 300.53 m³ at the 30% level. Although flaxseed pomace addition does not significantly enhance methane efficiency as compared to nigella seed pomace, the steady biogas productivity across concentrations suggests a potential for maintaining fermentation stability without significant fluctuations in methane output.

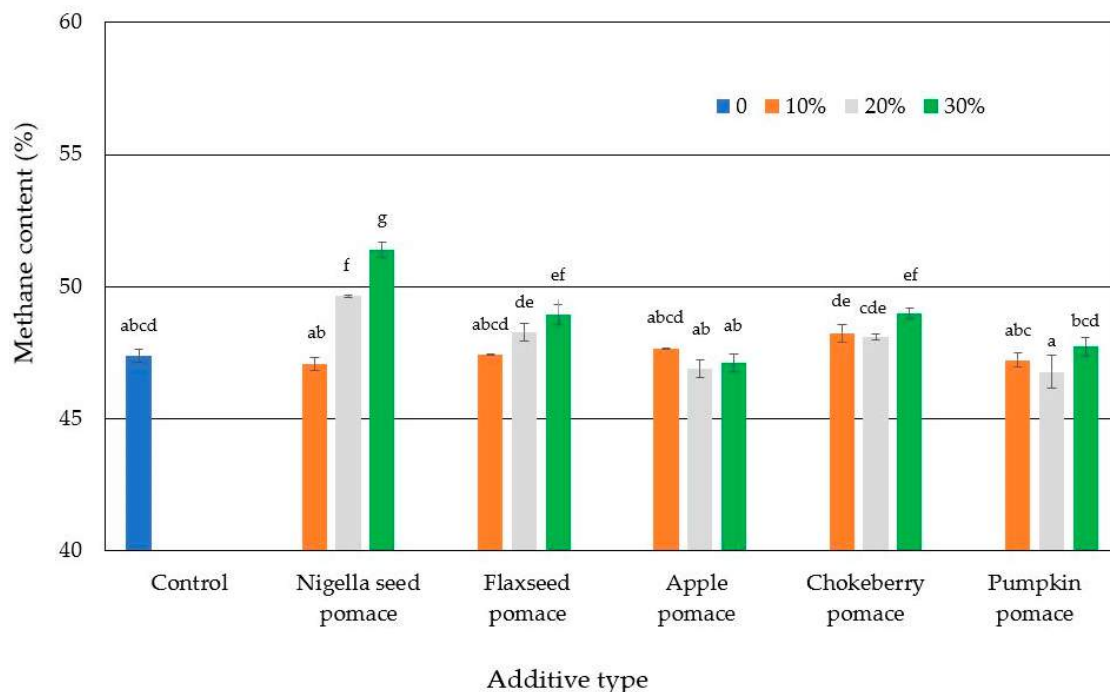


Figure 3. Methane content after anaerobic fermentation of post-production wastes of snack pellets with various types and amounts of additives; ^{a–g}—means indicated with similar letters in columns do not differ significantly at $\alpha = 0.05$.

Table 7. Methane fermentation measurements of post-production waste extrudates ($n = 3 \pm \text{SD}$).

Sample	Pomace Amount (%)	CMPFM (m ³ /Mg)	CBPFM (m ³ /Mg)	CMPDM (m ³ /Mg)	CBPDM (m ³ /Mg)	CMPDOM (m ³ /Mg)	CBPDOM (m ³ /Mg)
Control sample	0	299.29 ± 2.06 ^{de}	631.68 ± 1.15 ^{ef}	326.41 ± 2.31 ^{def}	689.93 ± 1.20 ^{def}	333.18 ± 2.37 ^{def}	703.80 ± 1.60 ^{cde}
Nigella seed pomace	10	295.87 ± 1.04 ^{cd}	628.57 ± 2.44 ^e	324.47 ± 1.01 ^{cde}	686.15 ± 2.59 ^d	330.11 ± 0.78 ^{cd}	700.10 ± 2.58 ^c
	20	323.60 ± 2.60 ^b	651.87 ± 2.60 ^b	355.63 ± 1.09 ^h	716.26 ± 3.06 ^b	364.19 ± 1.30 ⁱ	734.01 ± 3.22 ^b
	30	337.04 ± 0.08 ^h	655.82 ± 3.58 ^b	372.34 ± 0.05 ⁱ	725.43 ± 3.93 ^b	383.65 ± 0.01 ^j	747.63 ± 4.09 ^h
Flaxseed pomace	10	289.68 ± 0.25 ^b	610.91 ± 0.81 ^{bc}	324.14 ± 0.18 ^{cde}	683.55 ± 0.66 ^{cd}	330.64 ± 0.48 ^{cde}	697.91 ± 0.66 ^c
	20	298.47 ± 1.40 ^{de}	618.41 ± 1.48 ^{cd}	328.45 ± 1.56 ^{ef}	680.01 ± 1.59 ^{cd}	335.91 ± 1.63 ^{efg}	695.88 ± 1.74 ^c
	30	300.53 ± 1.02 ^{def}	613.93 ± 3.14 ^c	330.20 ± 1.07 ^{fg}	674.52 ± 3.17 ^{bc}	339.66 ± 1.10 ^{gh}	694.34 ± 3.25 ^c
Apple pomace	10	290.62 ± 1.92 ^{bc}	609.90 ± 3.75 ^{bc}	317.48 ± 2.15 ^b	664.66 ± 4.19 ^b	323.60 ± 2.21 ^{ab}	678.43 ± 4.19 ^b
	20	300.22 ± 1.01 ^{de}	640.20 ± 6.59 ^f	327.43 ± 1.11 ^{def}	699.20 ± 7.45 ^{ef}	334.27 ± 1.13 ^{defg}	713.40 ± 7.40 ^{ef}
	30	296.04 ± 3.58 ^{cd}	628.38 ± 3.32 ^{de}	322.28 ± 3.71 ^{bcd}	683.88 ± 3.46 ^{cd}	331.10 ± 3.73 ^{cde}	700.99 ± 3.59 ^{cd}
Chokeberry pomace	10	303.05 ± 1.59 ^{ef}	628.18 ± 4.75 ^{de}	330.79 ± 0.65 ^{fg}	688.50 ± 5.36 ^{de}	337.17 ± 0.64 ^{fg}	701.07 ± 5.28 ^{cd}
	20	298.98 ± 0.31 ^b	602.79 ± 1.71 ^b	319.36 ± 0.25 ^{bc}	664.14 ± 1.94 ^b	327.36 ± 0.25 ^{bc}	681.04 ± 1.89 ^b
	30	278.87 ± 0.96 ^a	569.12 ± 4.35 ^a	311.32 ± 1.00 ^a	635.35 ± 4.76 ^a	318.72 ± 1.11 ^a	650.41 ± 4.98 ^a
Pumpkin pomace	10	302.53 ± 2.46 ^{ef}	640.81 ± 1.55 ^f	329.63 ± 2.68 ^{efg}	697.53 ± 1.61 ^{ef}	335.44 ± 2.93 ^{defg}	711.53 ± 1.68 ^{def}
	20	297.99 ± 3.17 ^{de}	637.11 ± 1.90 ^{ef}	326.74 ± 3.62 ^{def}	700.51 ± 2.14 ^f	335.61 ± 3.59 ^{defg}	718.38 ± 2.11 ^f
	30	305.80 ± 2.22 ^f	640.69 ± 4.65 ^f	334.67 ± 1.58 ^g	699.77 ± 5.17 ^f	343.72 ± 1.57 ^h	717.09 ± 5.26 ^f

CMPFM—cumulative methane production in m³ per Mg of fresh mass, CBPFM—cumulative biogas production in m³ per Mg of fresh mass, CMPDM—cumulative methane production in m³ per Mg of dry mass, CBPDM—cumulative biogas production in m³ per Mg of dry mass, CMPDOM—cumulative methane production in m³ per Mg of dry organic matter, CBPDOM—cumulative biogas production in m³ per Mg of dry organic matter; ^{a–j}—means indicated with similar letters in columns do not differ significantly at $\alpha = 0.05$.

Apple pomace addition exhibited a variable impact on methane production. At 10% of additive, the methane content was recorded at 47.65% (Figure 3), with cumulative methane production per Mg of fresh mass at 290.62 m³. A slight decrease in the methane content to

46.89% was observed if 20% of additive was used, while cumulative methane production was 300.22 m³ per Mg of fresh mass. At the 30% level, the methane content increased slightly to 47.11%, with the cumulative production at 296.04 m³ (Table 7). These results indicate a moderate improvement in methane production, suggesting that changing the concentration of apple pomace affects methane efficiency.

Chokeberry pomace revealed significant variability in methane production, with a content of 48.24% in the total gas amount when 10% of pomace was applied, peaking at 49.00% at the 30% level (Figure 3). However, cumulative methane production per Mg of fresh mass decreased from 303.05 m³ at 10% to 278.87 m³ at 30% of additive. This trend indicates that, while chokeberry pomace can increase methane content, the impact on cumulative methane production diminishes at higher concentrations, possibly due to interactions that reduce overall gas productivity.

Pumpkin pomace addition in snack pellet recipes produced a consistent methane amount and cumulative methane production across all concentrations. At 10% of addition, the methane content reached 47.21% of total gases (Figure 3), and the cumulative methane production per Mg of fresh mass was 302.53 m³. When 30% was applied, the methane content rose to 47.73% (Figure 3), with the cumulative methane production at 305.80 m³ per Mg (Table 7). These results suggest that pumpkin pomace maintains stability in the methane content and production without sudden variation across all concentrations.

To summarize, the addition of different types of pomaces in various concentrations had an influence on the methane productivity and cumulative biogas amount. Nigella seed pomace addition showed the most substantial enhancements in the methane content and cumulative production at high concentrations. In contrast, flaxseed and pumpkin pomaces demonstrated stable productivity, providing a consistent methane output across all concentrations.

Conversely, apple and chokeberry pomace applications had variable effects, with fluctuations in methane production that suggest process-specific responses. These findings underscore the potential of selecting pomace types, particularly nigella seed, for optimizing methane efficiency in biogas production.

4. Discussion

In our study, the highest process efficiency was obtained for snack pellets enriched with oilseed pomace. Similar findings were reported by Soja et al. [23], who used a single-screw extruder with a plasticizing unit with L/D 20 to produce snack food pellets. The results showed that high concentrations of oilseed pomaces can optimize the processing efficiency and quality of extrudates, while high concentrations of apple and pumpkin pomace can negatively affect process efficiency, possibly due to the presence of fiber, sugars or pectin. Lisiecka et al. [33], in testing snack pellets with added fresh vegetable pulp, noted that an increase in vegetable pulp content within the raw material mixture corresponded with a decline in extrusion-cooking efficiency. This reduction in efficiency was attributed to increased viscosity in the mixture, stemming from the higher fiber content introduced by the vegetable pulp. Accordingly, the elevated fiber fraction altered the flow characteristics of the mixture, creating greater resistance during the extrusion-cooking process and, consequently, reducing overall throughput.

The results of the energy consumption analysis based on the SME indicator obtained in this study showed a similar trend to the findings presented by Lisiecka and Wójtowicz [34]. The lowest SME values were observed for both the smallest and largest additive amounts in the mixture. In contrast, the intermediate additive level (20% in the mixture) was associated with an increase in SME values, compared to the 10% additive for most types of pomaces. This trend was similarly observed by Lisiecka and Wójtowicz [34]. The lowest SME values for all types of pomaces were obtained at the highest additive concentration (30%), aligning with the analysis of the results presented by Soja et al. [35].

The results of the bulk density for most extrudates indicated an increase in bulk density with the addition of 10% and 20% of plant pomace, with the highest values achieved for

mixtures enriched with 20% of pomaces. For most of the snack pellets with an added 30% by-product pomace, a decrease in extrudate bulk density was observed. A similar trend was noted by Wójtowicz et al. [36], who recorded the lowest bulk density for pellets with the highest percentage of additives in the raw material blend. The decrease in bulk density of snack pellets enriched with various functional additives, such as plant pomace or cricket flour, may be attributed to the reduction in carbohydrates and, consequently, in starch content, which, in turn, limits the gelatinization process. The highest bulk density was obtained for extrudates with a 20% pomace addition, and the results were consistent with the previous studies employing a different plasticizing unit length [35]. The control sample, in comparison to mixtures with 10% and 20% of added pomaces, showed a lower bulk density, and this agrees with similar observations reported by Mitrus et al. [37].

In the conducted study, fluctuations in the water absorption index (WAI) values were observed depending on the type of pomace and its percentage content in the mixtures. For extrudates containing nigella seed, flaxseed and pumpkin pomace, a decrease in the WAI was noted as the percentage of these components increased in the mixture. Similar trends were reported by Yagci et al. [38] and Altan et al. [39], where an increase in tomato pomace content led to a decline in the water absorption index. For food pellets with apple and chokeberry pomace, fluctuations and irregular effects on the WAI were observed, aligning with the findings of Dushkova et al. [40], who studied the influence of chokeberry pomace in rice flour-based extrudates. Based on these results, it can be concluded that the type of additive and its physicochemical properties significantly impact the WAI of extruded products.

Building upon the presented research, elevating the concentration of nigella seed, flaxseed and chokeberry pomace in the raw mixture led to an increase in the extrudate water solubility indexes (WSIs). Wójtowicz et al. [41] similarly noted a rise in the WSI of snack pellets as the concentration of fresh chokeberry in the raw mixture increased (this mixture was processed using a single-screw extruder at a screw rotation speed of 60 rpm). These findings are similar to the conclusions drawn in this study. For other pomace types, such as apple and pumpkin, irregularities and fluctuations were observed in the WSI results of the extrudates with increasing pomace concentration in the raw mixture. Lisiecka et al. [42] reported similar findings in their study on the effect of fresh beetroot on processing conditions and selected quality attributes of food pellets.

The biogas production potential of post-production waste from the food industry is essential for advancing sustainable development and the circular economy. Converting this waste into biogas not only reduces waste accumulation but also provides a renewable energy source applicable across various economic sectors. The highest cumulative biogas efficiency was achieved after fermentation of pellets containing a 30% addition of nigella seed pomace, resulting in 337.04 m³/Mg for fresh mass, while the lowest efficiency was obtained for pellets containing a 30% addition of chokeberry pomace, obtaining 278.87 m³/Mg. Czubaszek et al. [43] focused on methane production from agri-food residues by analyzing the biogas efficiency of agricultural by-products like cabbage leaves, apple pomace, pumpkin residue and walnut husks. They observed the highest methane efficiency in the fermentation of cabbage leaves, reaching 297.81 NL/kg of volatile solids, whereas the lowest efficiency was 199.18 NL/kg of volatile solids for pumpkin residue. David et al. [44] also investigated methane efficiency from food residues, with the highest efficiency recorded at 305.45 NL/kg of volatile solids, further supporting the relatively high methane efficiency from post-production waste in food pellet manufacturing.

The mentioned results indicate that the addition of vegetable pomace to snack extrudates increases methane efficiency, probably due to its rich carbohydrate content and balanced fiber levels. Carbohydrates offer an available substrate that promotes microbial activity during anaerobic fermentation, while fiber contributes to maintaining optimal conditions for continuous fermentation. This synergy increases methane production efficiency and reveals enriched snack pellet waste to be a valuable source of biogas generation. These findings highlight the potential of agri-food industrial by-products to support re-

newable energy production, in line with the goals of sustainable waste management and a circular economy.

Comparative analysis of methane efficiency demonstrates that pomace type plays a crucial role in determining biogas potential, emphasizing the importance of substrate selection in optimizing fermentation efficiency. The superior biogas production from nigella seed pomace may be attributed to its higher carbohydrate content and favorable nutrient profile, while the relatively lower efficiency observed with chokeberry pomace suggests the potential influence of specific inhibitory compounds or imbalanced fiber content. These variations underscore the need for tailored approaches in integrating plant pomace into industrial processes—as different pomace types exhibit unique biochemical characteristics that affect microbial activity during anaerobic digestion.

Such insights provide valuable guidance for the selection of optimal pomace compositions, enabling the development of efficient, cost-effective strategies for industrial-scale energy applications. By strategically utilizing pomace types with higher methane efficiency, industries can enhance renewable energy production while contributing to sustainable waste management practices and supporting circular economy goals.

Soldano et al. [45] analyzed the effect of anaerobic fermentation of mycotoxin-contaminated wheat on methane efficiency. The average methane production was 337.0 NL/kg of volatile, which is comparable to the results obtained with a 30% addition of nigella pomace in a study on extruded potato samples. Both studies suggest that an appropriate choice of substrates or additives can significantly affect the methane production efficiency of anaerobic digestion processes. Lopez et al. [46], in turn, investigated the methane potential of various commercial food waste sources, including waste from university dining halls, prepared food and leftover produce waste from grocery stores, food waste generated by hotels and convention centers and restaurant kitchen waste. They reported methane efficiency ranging from 363 to 492 mL/dry g, where lipids contributed 59–70% of the total methane production. In comparison, this study on extrudates demonstrated that nigella seed pomace achieved a methane content of up to 51.39% and a cumulative efficiency of 372.34 m³/Mg dry mass.

Chokeberry pomace, rich in polyphenols, presents a potential challenge for anaerobic digestion. Polyphenols are known for their antioxidant properties, and high concentrations can inhibit the process [47,48]. While apple and pumpkin pomace, due to their carbohydrate content, generally do not exhibit strong inhibitory effects [49,50], their high sugar content could lead to rapid acidification [51] and can disrupt the delicate pH balance necessary for efficient biogas production. Li et al. [52] also note that the presence of polyphenols, even in apple pomace, can have inhibitory effects at high concentrations. In contrast, flaxseed is high in lipids and lignocellulosic material and could potentially lead to LCFA (Long Chain Fatty Acid) inhibition [53]. Hence, high lignin content can slow down the hydrolysis step of fermentation and might also limit the biodegradability of the pomace [54,55].

These findings suggest a comparable influence of food waste on methane production, particularly for substrates rich in lipids, emphasizing the importance of the composition in optimizing methane production potential.

The principal component analysis (PCA) of the presented results allowed us to obtain five new variables that explain 100% of the variability of the tested system. Accordingly, the first two principal components explain as much as 81.93% of the variability. The PCA also showed that all parameters have a very strong effect on the variability of the entire system, barring the process efficiency (Q) and bulk density (BD), which had a slightly smaller effect on the variability of the tested system (Figure 4). The water absorption index (WAI) and process efficiency (Q) were strongly and positively correlated. A similar relationship was obtained for the cumulative biogas production of fresh mass (CBPFM), cumulative biogas production of dry mass (CBPDM) and cumulative biogas production of dry organic matter (CBPDOM) and also between the cumulative methane production of fresh mass (CMPFM), cumulative methane production of dry mass (CMPDM) and cumulative methane production of dry organic matter (CMPDOM). The water absorption

index (WAI), process efficiency (Q), specific mechanical energy (SME) and water solubility index (WSI) were strongly and negatively correlated (Figure 4 and Table 8).

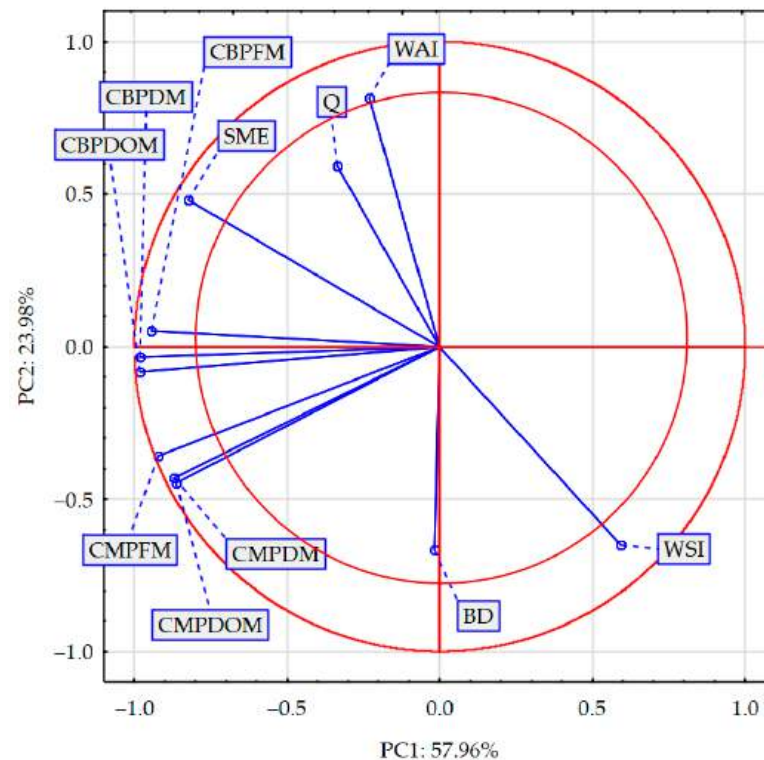


Figure 4. Projection of variables as product parameters on the PC1 and PC2 loadings plot.

Table 8. Correlation matrix between the results obtained for the tested samples.

	SME (kWh/kg)	BD (kg/m ³)	WAI (%)	WSI (%)	CMPFM (m ³ /Mg)	CBPFM (m ³ /Mg)	CMPDM (m ³ /Mg)	CBPDM (m ³ /Mg)	CMPDOM (m ³ /Mg)	CBPDOM (m ³ /Mg)
Q (kg/h)	0.63 *	−0.49	0.37	−0.42	0.19	0.16	0.18	0.18	0.16	0.16
SME		−0.52	0.45	−0.71 **	0.60 *	0.73 **	0.56	0.77 **	0.56	0.76 **
BD			−0.22	0.19	0.23	0.16	0.18	0.09	0.18	0.09
WAI				−0.75 **	−0.10	0.42	−0.25	0.27	−0.27	0.21
WSI					−0.27	−0.68 *	−0.15	−0.59	−0.15	−0.56
CMPFM						0.82 **	0.98 ***	0.90 ***	0.98 ***	0.92 ***
CBPFM							0.72 **	0.98 ***	0.72 **	0.97 ***
CMPDM								0.83 **	0.99 ***	0.86 **
CBPDM									0.83 **	0.99 ***
CMPDOM										0.85 **

Q—efficiency, SME—specific mechanical energy, BD—bulk density, WAI—water absorption index, WSI—water solubility index, CMPFM—cumulative methane production in m³ per Mg of fresh mass, CBPFM—cumulative biogas production in m³ per Mg of fresh mass, CMPDM—cumulative methane production in m³ per Mg of dry mass, CBPDM—cumulative biogas production in m³ per Mg of dry mass, CMPDOM—cumulative methane production in m³ per Mg of dry organic matter, CBPDOM—cumulative biogas production in m³ per Mg of dry organic matter; *—significant at $p < 0.10$; **—significant at $p < 0.05$; ***—significant at $p < 0.01$.

The PCA (Figures 4 and 5) also showed that the cumulative methane production of fresh mass (CMPFM), cumulative methane production of dry mass (CMPDM) and cumulative methane production of dry organic matter (CMPDOM) were strongly correlated with flaxseed pomace addition. In turn, the cumulative biogas production of fresh mass (CBPFM), cumulative biogas production of dry mass (CBPDM) and cumulative biogas production of dry organic matter (CBPDOM) were correlated with pumpkin pomace application in extrudates. The control sample was correlated with the water absorption

index (WAI) and the process efficiency (Q) results, but the water solubility index (WSI) was correlated with the application of chokeberry pomace addition in the extruded pellets.

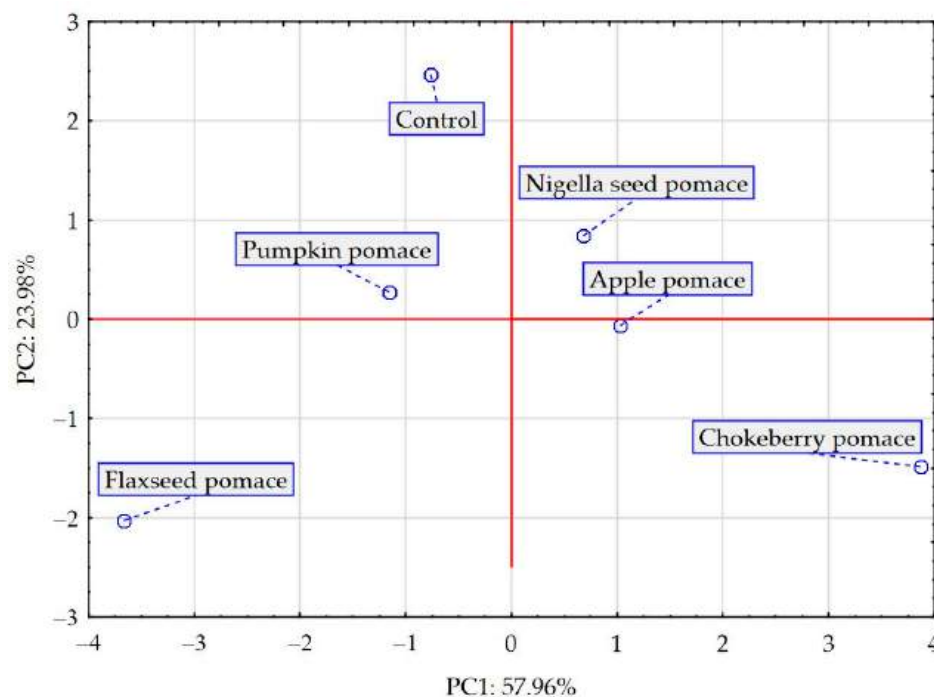


Figure 5. Projection of sample type depending on pomace source on the PC1 and PC2 scores plot.

The correlation matrix performed to analyze data interactions is shown in Table 8. The correlation coefficients as tabled show the interactions between all possible combinations of pairs of variables, wherein the larger its value, the stronger the linear relationship between the variables. Moreover, the sign of the correlation coefficient indicates a positive or negative correlation between the studied variables.

Values of processing efficiency Q were positively correlated with the SME (0.63 at $p < 0.10$). The SME was significantly negatively correlated with the WSI (-0.71 at $p < 0.05$) and positively with the cumulative methane production (CMPFM) (0.60 at $p < 0.10$) and the cumulative biogas production (CBPFM) (0.73 $p < 0.05$) as fresh mass. What is more, significant positive correlations were found between the SME and the cumulative biogas production as dry mass (CBPDM) (0.77 at $p < 0.05$) and as dry organic matter (CBPDOM) (0.76 at $p < 0.05$). In addition, the WSI and WAI were negatively correlated with each other, with a coefficient of -0.75 and at a significance level of $p < 0.05$. Furthermore, as presented in Table 8, all fermentation indicators were significantly correlated with high values of coefficients.

5. Conclusions

Plant pomace addition had a beneficial effect on the extrusion-cooking process and improved the physical properties of the snack food pellets. In addition, the post-production wastes from the production of snack pellets with the addition of plant pomaces showed a promising potential for biogas and methane production. These dual benefits not only enhanced the quality and functionality of food pellets but also highlighted the potential of post-production waste in energy recovery, supporting both sustainable energy initiatives and effective waste management strategies. Considering all the studies conducted, including the analysis of the extrusion-cooking process, the quality of extrudates and the biogas efficiency, we concluded that the best performance was achieved with nigella seed pomace supplemented at levels of 20% and 30%. These concentrations demonstrated superior results in optimizing both the extrusion-cooking characteristics and the overall output quality, while also enhancing biogas production efficiency.

The analysis spotlighted nigella seed and chokeberry pomace as optimal additives for magnifying both functional properties and methane production efficiency. Nigella seed pomace, particularly at a 30% concentration, achieved the highest methane output (51.39%) and significant improvements in water solubility (10.23%), making it highly effective for applications requiring dual benefits. Chokeberry pomace, while exhibiting the most substantial increase in solubility (17.67% at 30%), demonstrated diminishing returns in cumulative methane production at higher concentrations, suggesting its use may be more suited for solubility-focused applications. Flaxseed pomace provided moderate enhancements in solubility and stable biogas productivity, offering a balanced option for maintaining fermentation consistency. Apple and pumpkin pomace showed more variable effects, but their contributions to functional and methane properties indicate a potential for tailored use in formulations where stability or moderate efficiency is desired. These findings emphasize the importance of selecting pomace types and concentrations aligned with specific application goals.

This approach not only reduces greenhouse gas emissions associated with organic waste decomposition but also provides a cost-effective pathway to achieve energy independence in rural and industrial sectors. By valorizing plant pomace and other agro-industrial residues, industries can align with global sustainability goals and contribute to a more resilient bioeconomy.

Author Contributions: Conceptualization, J.S., M.C. and T.O.; methodology, J.S. and M.C.; software, A.W.; validation, J.S. and M.C.; formal analysis, A.W.; investigation, J.S., M.C. and I.V.; resources, J.S. and I.V.; data curation, J.S., M.C. and A.W.; writing—original draft preparation, J.S., M.C. and A.W.; writing—review and editing, J.S., M.C. and A.W.; visualization, J.S. and M.C.; supervision, M.C. and A.W. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: The original contributions presented in the study are included in the article, and further inquiries can be directed to the corresponding author.

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

References

1. Ferdeş, M.; Zăbavă, B.S.; Paraschiv, G.; Ionescu, M.; Dincă, M.N.; Moiceanu, G. Food waste management for biogas production in the context of sustainable development. *Energies* **2022**, *15*, 6268. [\[CrossRef\]](#)
2. Carrère, H.; Dumas, C.; Battimelli, A.; Batstone, D.J.; Delgenes, J.P.; Steyer, J.P.; Ferrer, I. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review. *J. Hazard. Mater.* **2010**, *183*, 1–15. [\[CrossRef\]](#)
3. Ankathi, S.K.; Chaudhari, U.S.; Handler, R.M.; Shonnard, D.R. Sustainability of biogas production from anaerobic digestion of food waste and animal manure. *Appl. Microbiol.* **2024**, *4*, 418–438. [\[CrossRef\]](#)
4. Luo, S.; Chan, E.; Masatcioglu, M.T.; Erkinbaev, C.; Paliwal, J.; Koksel, F. Effects of extrusion conditions and nitrogen injection on physical, mechanical, and microstructural properties of red lentil puffed snacks. *Food Bioprod. Process.* **2020**, *121*, 143–153. [\[CrossRef\]](#)
5. Mironeasa, S.; Coțovanu, I.; Mironeasa, C.; Ungureanu-Iuga, M. A Review of the changes produced by extrusion cooking on the bioactive compounds from vegetal sources. *Antioxidants* **2023**, *12*, 1453. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
6. Yağcı, S.; Altan, A.; Doğan, F. Effects of extrusion processing and gum content on physicochemical, microstructural and nutritional properties of fermented chickpea-based extrudates. *LWT-Food. Sci. Technol.* **2020**, *124*, 109150. [\[CrossRef\]](#)
7. Offiah, V.; Kontogiorgos, V.; Falade, K.O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2019**, *59*, 2979–2998. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
8. Wang, S.; Xu, C.; Song, L.; Zhang, J. Anaerobic digestion of food waste and its microbial consortia: A historical review and future perspectives. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2022**, *19*, 9519. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
9. Pham, T.P.T.; Kaushik, R.; Parshetti, G.K.; Mahmood, R.; Balasubramanian, R. Food waste-to-energy conversion technologies: Current status and future directions. *Waste Manag.* **2015**, *38*, 399–408. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
10. Pazera, A.; Slezak, R.; Krzystek, L.; Ledakowicz, S.; Bochmann, G.; Gabauer, W.; Helm, S.; Reitmeier, S.; Marley, L.; Gorga, F. Biogas in Europe: Food and beverage (FAB) waste potential for biogas production. *Energy Fuels* **2015**, *29*, 4011–4021. [\[CrossRef\]](#)
11. Chow, W.L.; Chong, S.; Lim, J.W.; Chan, Y.J.; Chong, M.F.; Tiong, T.J.; Chin, J.K.; Pan, G.-T. Anaerobic co-digestion of wastewater sludge: A review of potential co-substrates and operating factors for improved methane yield. *Processes* **2020**, *8*, 39. [\[CrossRef\]](#)
12. Gao, A.; Tian, Z.; Wang, Z.; Wennersten, R.; Sun, Q. Comparison between the technologies for food waste treatment. *Energy Procedia* **2017**, *105*, 3915–3921. [\[CrossRef\]](#)

13. Baglary, G.R.; Kalita, S.; Islary, A.; Kumar, S. Sustainable extraction of bioactive compounds from aromatic plants and agro-food wastes for food preservation: A review. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* **2024**, *61*, 103399. [\[CrossRef\]](#)
14. Chamorro, F.; Carpena, M.; Fraga-Corral, M.; Echave, J.; Riaz Rajoka, M.S.; Barba, F.J.; Cao, H.; Xiao, J.; Prieto, M.A.; Simal-Gandara, J. Valorization of kiwi agricultural waste and industry by-products by recovering bioactive compounds and applications as food additives: A circular economy model. *Food Chem.* **2022**, *370*, 131315. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
15. Bhatia, L.; Jha, H.; Sarkar, T.; Sarangi, P.K. Food waste utilization for reducing carbon footprints towards sustainable and cleaner environment: A review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2023**, *20*, 2318. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
16. Jones, S.L.; Gibson, K.E.; Ricke, S.C. Critical factors and emerging opportunities in food waste utilization and treatment technologies. *Front. Sustain. Food Syst.* **2021**, *5*, 781537. [\[CrossRef\]](#)
17. Kumar, V.; Sharma, N.; Umesh, M.; Maitra, S. Emerging challenges for the agro-industrial food waste utilization: A review on food waste biorefinery. *Bioresour. Technol.* **2022**, *362*, 127790. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
18. Hernández, D.; Pinilla, F.; Rebolledo-Leiva, R.; Aburto-Hole, J.; Díaz, J.; Quijano, G.; González-García, S.; Tenreiro, C. Anaerobic co-digestion of agro-industrial waste mixtures for biogas production: An energetically sustainable solution. *Sustainability* **2024**, *16*, 2565. [\[CrossRef\]](#)
19. Suhartini, S.; Nurika, I.; Paul, R.; Melville, L. Estimation of biogas production and the emission savings from anaerobic digestion of fruit-based agro-industrial waste and agricultural crops residues. *BioEnergy Res.* **2021**, *14*, 844–859. [\[CrossRef\]](#)
20. Verni, M.; Casanova, F. The potential of food by-products: Bioprocessing, bioactive compounds extraction and functional ingredients utilization. *Foods* **2022**, *11*, 4092. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
21. Morales-Polo, C.; Cledera-Castro, M.d.M.; Moratilla Soria, B.Y. Biogas production from vegetable and fruit markets waste-Compositional and batch characterizations. *Sustainability* **2019**, *11*, 6790. [\[CrossRef\]](#)
22. Castro, R.; Solís, M.; Chicatto, V.; Solís, A. Biogas production through co-digestion of cattle waste and agricultural residues of tomato cultivation (*Solanum lycopersicum* L.). *Rev. Int. Contam. Ambient.* **2020**, *36*, 529–539. [\[CrossRef\]](#)
23. Soja, J.; Combrzyński, M.; Oniszcuk, T.; Gancarz, M.; Oniszcuk, A. Extrusion-cooking aspects and physical characteristics of snack pellets with addition of selected plant pomace. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 8754. [\[CrossRef\]](#)
24. Combrzyński, M.; Oniszcuk, T.; Wójtowicz, A.; Biernacka, B.; Wojtunik-Kulesza, K.; Bąkowski, M.; Różyło, R.; Szponar, J.; Soja, J.; Oniszcuk, A. Nutritional characteristics of new generation extruded snack pellets with edible cricket flour processed at various extrusion conditions. *Antioxidants* **2023**, *12*, 1253. [\[CrossRef\]](#)
25. Combrzyński, M.; Wójtowicz, A.; Biernacka, B.; Oniszcuk, T.; Mitrus, M.; Soja, J.; Różyło, R.; Wojtunik-Kulesza, K.; Kasprzak-Drozd, K.; Oniszcuk, A. Possibility of water saving in processing of snack pellets by the application of fresh lucerne sprouts: Selected aspects and nutritional characteristics. *J. Ecolo. Eng.* **2023**, *24*, 130–142. [\[CrossRef\]](#)
26. Matysiak, A.; Wójtowicz, A.; Oniszcuk, T. Process efficiency and energy consumption during the extrusion of potato and multigram formulations. *Agric. Eng.* **2018**, *22*, 49–57. [\[CrossRef\]](#)
27. Combrzyński, M.; Biernacka, B.; Wójtowicz, A.; Kupryaniuk, K.; Oniszcuk, T.; Mitrus, M.; Różyło, R.; Gancarz, M.; Stasiak, M.; Kasprzak-Drozd, K. Analysis of the extrusion-cooking process and selected physical properties of snack pellets with the addition of fresh kale. *Int. Agroph.* **2023**, *37*, 353–364. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
28. Wójtowicz, A.; Mościcki, L. Influence of legume type and addition level on quality characteristics, texture and microstructure of enriched precooked pasta. *LWT-Food Sci. Technol.* **2014**, *59*, 1175–1185. [\[CrossRef\]](#)
29. Cieślík, M.; Dach, J.; Lewicki, A.; Smurzyńska, A.; Janczak, D.; Pawlicka-Kaczorowska, J.; Boniecki, P.; Cyplik, P.; Czekala, W.; Jóźwiakowski, K. Methane fermentation of the maize straw silage under meso- and thermophilic conditions. *Energy* **2016**, *115*, 1495–1502. [\[CrossRef\]](#)
30. Dach, J.; Czekala, W.; Boniecki, P.; Lewicki, A.; Piechota, T. Specialised internet tool for biogas plant modelling and marked analysing. *Adv. Mater. Res.* **2014**, *909*, 305–310. [\[CrossRef\]](#)
31. Kupryaniuk, K.; Oniszcuk, T.; Combrzyński, M.; Czekala, W.; Matwijczuk, A. The influence of corn straw extrusion pretreatment parameters on methane fermentation performance. *Materials* **2020**, *13*, 3003. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
32. Różyło, R.; Gładyszewski, G.; Chocyk, D.; Dziki, D.; Świeca, M.; Matwijczuk, A.; Rząd, K.; Karcz, D.; Gawłowski, S.; Wójcik, M.; et al. The influence of micronization on the properties of black cumin pressing waste material. *Materials* **2024**, *17*, 2501. [\[CrossRef\]](#)
33. Lisiecka, K.; Wójtowicz, A.; Bouasla, A.; Kasprzak, K. Design of new gluten-free extruded rice snack products supplemented with fresh vegetable pulps: The effect on processing and functional properties. *Int. Agroph.* **2021**, *35*, 41–60. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
34. Lisiecka, K.; Wójtowicz, A. The production efficiency and specific energy consumption during processing of corn extrudates with fresh vegetables addition. *Agric. Eng.* **2019**, *23*, 15–23. [\[CrossRef\]](#)
35. Soja, J.; Özmen; Krajewska, M.; Kasprzak-Drozd, K. Effect of apple pomace (*Malus domestica* ‘Gala’) addition on the processing conditions and antioxidant potential of extruded snacks. *Int. Agroph.* **2023**, *37*, 401–413. [\[CrossRef\]](#)
36. Wójtowicz, A.; Combrzyński, M.; Biernacka, B.; Oniszcuk, T.; Mitrus, M.; Różyło, R.; Gancarz, M.; Oniszcuk, A. Application of edible insect flour as a novel ingredient in fortified snack pellets: Processing aspects and physical characteristics. *Processes* **2023**, *11*, 2561. [\[CrossRef\]](#)
37. Mitrus, M.; Combrzyński, M.; Biernacka, B.; Wójtowicz, A.; Milanowski, M.; Kupryaniuk, K.; Gancarz, M.; Soja, J.; Różyło, R. Fresh broccoli in fortified snack pellets: Extrusion-cooking aspects and physical characteristics. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 8138. [\[CrossRef\]](#)
38. Yagci, S.; Caliskan, R.; Gunes, Z.S.; Capanoglu, E.; Tomas, M. Impact of tomato pomace powder added to extruded snacks on the in vitro gastrointestinal behaviour and stability of bioactive compounds. *Food Chem.* **2022**, *368*, 130847. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

39. Altan, A.; McCarthy, K.L.; Maskan, M. Evaluation of snack foods from barley-tomato pomace blends by extrusion processing. *J. Food Eng.* **2008**, *84*, 231–242. [[CrossRef](#)]
40. Dushkova, M.; Simitchiev, A.; Beleva, B.; Petrova, T.; Koleva, A. Extrusion of rice and aronia melanocarpa pomace: Physical and functional characteristics of extrudates. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 4315. [[CrossRef](#)]
41. Wójtowicz, A.; Combrzyński, M.; Biernacka, B.; Różyło, R.; Bąkowski, M.; Wojtunik-Kulesza, K.; Mołdoch, J.; Kowalska, I. Fresh Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) fruits as valuable additive in extruded snack pellets: Selected nutritional and physiochemical properties. *Plants* **2023**, *12*, 3276. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
42. Lisiecka, K.; Wójtowicz, A. Effect of fresh beetroot application and processing conditions on some quality features of new type of potato-based snacks. *LWT-Food Sci. Technol.* **2021**, *141*, 110919. [[CrossRef](#)]
43. Czubaszek, R.; Wysocka-Czubaszek, A.; Tyborowski, R. Methane production potential from apple pomace, cabbage leaves, pumpkin residue and walnut husks. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 6128. [[CrossRef](#)]
44. David, A.; Govil, T.; Tripathi, A.K.; McGeary, J.; Farrar, K.; Sani, R.K. Thermophilic anaerobic digestion: Enhanced and sustainable methane production from co-digestion of food and lignocellulosic wastes. *Energies* **2018**, *11*, 2058. [[CrossRef](#)]
45. Soldano, M.; Pietri, A.; Bertuzzi, T.; Fabbri, C.; Piccinini, S.; Gallucci, F.; Aureli, G. Anaerobic digestion of mycotoxin-contaminated wheat: Effects on methane yield and contamination level. *Bioenergy Res.* **2021**, *14*, 313–321. [[CrossRef](#)]
46. Lopez, V.M.; De la Cruz, F.B.; Barlaz, M.A. Chemical composition and methane potential of commercial food wastes. *Waste Manag.* **2016**, *56*, 477–490. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
47. Lin, H.; Lin, S.; Awasthi, M.K.; Wang, Y.; Xu, P. Exploring the bacterial community and fermentation characteristics during silage fermentation of abandoned fresh tea leaves. *Chemosphere* **2021**, *283*, 131234. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
48. Ran, J.; Tang, Y.; Mao, W.; Meng, X.; Jiao, L.; Li, Y.; Zhao, R.; Zhou, H. Optimization of the fermentation process and antioxidant activity of mixed lactic acid bacteria for honeysuckle beverage. *Front. Microbiol.* **2024**, *15*, 1364448. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
49. Kalia, V.C.; Kumar, A.; Jain, S.R.; Joshi, A.P. Biomethanation of plant materials. *Bioresour. Technol.* **1992**, *41*, 209–212. [[CrossRef](#)]
50. Liang, Z.; Su, H.; Lin, X.; He, Z.; Li, W.; Deng, D. Microbial communities and amino acids during the fermentation of Wuyi Hong Qu Huangjiu. *LWT-Food Sci. Technol.* **2020**, *130*, 109743. [[CrossRef](#)]
51. Timmermans, E.; Bautil, A.; Brijs, K.; Scheirlinck, I.; Van der Meulen, R.; Courtin, C.M. Sugar levels determine fermentation dynamics during yeast pastry making and its impact on dough and product characteristics. *Foods* **2022**, *11*, 1388. [[CrossRef](#)]
52. Li, P.; Shen, Y.; You, M.; Zhang, Y.; Yan, J.; Li, D.; Bai, S. Effect of grape pomace on fermentation quality and aerobic stability of sweet sorghum silage. *Anim. Sci. J.* **2017**, *88*, 1523–1530. [[CrossRef](#)]
53. Wang, S.; Zhang, M.; Liu, Y.; Liu, J.; Zheng, T.; Li, Y.; He, S.; Jiang, M.; Wu, L.; Liu, F. Influence of fermentation with lactic bacteria on the structure, functional properties and antioxidant activity of flaxseed gum. *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, *281*, 136133. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
54. Iram, A.; Berenjian, A.; Demirci, A. A review on the utilization of lignin as a fermentation substrate to produce lignin-modifying enzymes and other value-added products. *Molecules* **2021**, *26*, 2960. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
55. de Medeiros, T.D.M.; Dufossé, L.; Bicas, J.L. Lignocellulosic substrates as starting materials for the production of bioactive biopigments. *Food Chem. X* **2022**, *13*, 100223. [[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.