



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA PROCESÓW I URZĄDZEŃ PRZEMYSŁU SPOŻYWCZEGO

dr inż. Joanna Piepiórka-Stepuk

Autoreferat

Załącznik nr 2a do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego
w dziedzinie Nauk Rolniczych,
w dyscyplinie Inżynieria Rolnicza

Koszalin, 14.12.2018 r.

Spis treści

1. CHARAKTERYSTYKA HABILITANTKI.....	2
1.1. Uzyskane stopnie i tytuły naukowe.....	2
1.2. Przebieg pracy zawodowej.....	3
1.3. Obszar działalności badawczej habilitantki.....	3
2. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO	4
2.1. Wykaz pozycji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego	4
2.2. Omówienie celów naukowych prac stanowiących osiągnięcie	8
3. OPIS POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH	55
4. SYNTETYCZNA CHARAKTERYSTYKA DOROBKU NAUKOWEGO.....	61
4.1. Ilościowy wykaz najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych	61
4.2. Punktacja osiągnięć wg list MNiSW i danych do oceny parametrycznej jednostek ..	61

1. Charakterystyka habilitantki

1.1. Uzyskane stopnie i tytuły naukowe

2012 – stopień doktora nauk rolniczych w dyscyplinie Inżynieria Rolnicza

Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, promotor: prof. dr hab. inż. Jarosław Diakun, temat pracy doktorskiej: *„Wpływ warunków przepływu cieczy między płytami wymiennika ciepła na skuteczność mycia w obiegu zamkniętym”*. Praca wyróżniona.

2012 - Studia podyplomowe z Przygotowania Pedagogicznego

Politechnika Koszalińska, Wydział Technologii i Edukacji, promotor: dr Renata Kaczmarek, temat pracy dyplomowej: *„Uczeń z przewlekłą chorobą w systemie polskiej oświaty”*.

2010 - Studia podyplomowe z Zarządzania Jakością w Przedsiębiorstwie - Menadżer Jakości w Przemysle Spożywczym

Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny we współpracy z firmą TÜV Akademia Polska Sp. z o.o., (TÜV Rheinland Berlin-Brandenburg). Uzyskano dyplom studiów podyplomowych Politechniki Koszalińskiej oraz dwa międzynarodowe Certyfikaty Pełnomocnika Jakości ISO i Menadżera Jakości w przemyśle spożywczym wydane na podstawie egzaminu przez TÜV-Akademie Rheinland GmbH. Certyfikaty uprawniają do pełnienia funkcji pełnomocnika jakości we wszystkich branżach przemysłu, a zwłaszcza w przemyśle spożywczym i są uznawane na całym świecie.

2006 – tytuł magistra inżyniera kierunku Technika Rolnicza i Leśna

Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, kierunek Technika Rolnicza i Leśna, specjalność Inżynieria Żywności, promotor: prof. dr hab. inż. Wojciech Piotrowski, tytuł pracy dyplomowej: *„Charakterystyka nierozłącznych połączeń części maszyn, jako źródła zagrożeń mikrobiologicznych oraz ocena aktywności biologicznej środków dezynfekcyjnych”*.

1.2. Przebieg pracy zawodowej

- 1.10.12 – do dziś Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego. Praca na stanowisku **adiunkta**.
- 1.10.11 – 30.09.12 Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego. Praca na stanowisku **asystenta**.
- 04.02.09 – 31.07.09 Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego. Praca na stanowisku **starszego technika**.
- 01.10.06 – 30.09.11 Politechnika Koszalińska - Wydział Mechaniczny - Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego. **Doktorant** w Katedrze.
- 19.04.05 – 31.03.08 Prasowe Zakłady Graficzne Sp. z o.o. Praca na stanowisku **referenta administracji**.

Jestem przedstawicielką Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (kadencja od 1 września 2016 r. do 31 sierpnia 2020 r.). Pełnię funkcję Pełnomocnika Dziekana Wydziału Mechanicznego ds. Promocji (kadencja od 1 września 2016 r. do 31 sierpnia 2020 r.). W latach 2012 – 2014 byłam członkinią Rady Programowej kierunku TRiL, a od roku 2016 – 2020 jestem członkinią Rady Programowej kierunku TŻiZCz pełniącą funkcję sekretarza. W latach 2016 – 2017 byłam członkinią Komisji Rekrutacyjnej na Wydziale Mechanicznym. Ponadto, od 2012 roku pełnię funkcję Kierownika Redakcji czasopisma Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego (lista B).

1.3. Obszar działalności badawczej habilitantki

Realizowana przeze mnie działalność naukowa koncentruje się na szeroko rozumianej higienie i bezpieczeństwie produkcji żywności. Swoje badania ukierunkowałam na zwiększenie efektywności procesu mycia w systemie CIP (Clean In Place) z uwzględnieniem ekonomiczno-ekologicznych uwarunkowań, co w połączeniu ze znanymi rozwiązaniami systemowymi (monitorowanie w ramach programów wstępnych GMP i GHP oraz systemu HACCP) wspomaga obniżenie ryzyka występowania zagrożeń fizyko-chemicznych i mikrobiologicznych w produkcji żywności. Głównym obszarem moich działań są analizy czynnikowo-procesowe warunkujące skuteczne mycie w systemie CIP, minimalizację energochłonności procesu mycia oraz zużycia środków chemicznych. Badania w tym zakresie obejmują poszukiwanie zależności pomiędzy powyższymi aspektami badań a istniejącymi rozwiązaniami konstrukcyjno-technologicznymi. Moje główne prace badawcze są tematycznie powiązane z zastosowaniem techniki mycia CIP w technologiach mleczarskich i browarniczych. W tym zakresie posiadam wiedzę teoretyczną i doświadczenie praktyczne.

2. Wskazanie osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie, wynikające z artykułu 16. ustęp 2. ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.), wskazuję cykl ośmiu powiązanych tematycznie publikacji opublikowanych w latach **2014-2018** oraz patent udzielony w **2017** roku przez Urząd Patentowy RP. Wspólny tytuł osiągnięcia brzmi:

***Optymalizacja i monitorowanie procesu mycia instalacji przetwórstwa spożywczego
w obiegu zamkniętym***

2.1. Wykaz pozycji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

O1. Piepiórka-Stepuk J. (70%), Mierzejewska S. (30%), 2014. *Numerical analysis of fluid flow velocity in selected elements of pipeline installations with reference to the effects of cleaning.* **Italian Journal of Food Science**, 04, XXVI(4): ISSN 1120-1770.

***(IF=0,285; IF_{5-Year}=0,315; MNiSW=15 pkt).**

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji badań, opracowaniu modelu matematycznego i modelu symulacyjnego, analizie i porównaniu uzyskanych wyników z wynikami eksperymentalnymi. Dokonałam interpretacji wyników i opracowania manuskryptu. Autor korespondujący. **Mój udział procentowy szacuję na 70%.***

O2. Piepiórka-Stepuk J. (80%), Mierzejewska S. (20%), 2014. Simulation tests of liquid flow in the pipeline elements, **Agricultural Engineering**, 1(149), 175-184.

DOI: <http://dx.medra.org/10.14654/ir.2014.149.019>

***(IF=0; IF_{5-Year}=0; MNiSW=5 pkt).**

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji badań, zaplanowaniu doświadczeń, opracowaniu modelu symulacyjnego i przeprowadzeniu badań numerycznych. Wiodący udział w interpretacji wyników badań i formułowaniu wniosków. Współtwórca opracowania manuskryptu. Autor korespondujący. **Mój udział procentowy szacuję na 80%.***

O3. Piepiórka-Stepuk J. (70%), Tandecka K. (20%), Jakubowski M. (10%), 2016. *An analysis of milk fouling formed during heat treatment on a stainless steel surface with different degrees of roughness.* **Czech Journal of Food Science**, 34(3), 271–2792.

DOI: 10.17221/466/2015-CJFS

***(IF=0,787; IF_{5-Year}=1,048; MNiSW=20 pkt).**

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji badań, opracowaniu i analizie statystycznej wyników eksperymentalnych, ich interpretacji, formułowaniu wniosków jak również opracowaniu manuskryptu. Autor korespondujący. **Mój udział procentowy szacuję na 70%.***

- O4. Piepiórka-Stepuk J. (70%),** Diakun J. (20%), Mierzejewska S. (10%), **2016.** *Poly-optimization of cleaning conditions for pipe systems and plate heat exchangers contaminated with hot milk using the Cleaning In Place method.* **Journal of Cleaner Production**, 112, 946-954.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.018>

*(IF=5,715; IF_{5-Year}=6,207; MNiSW=40 pkt)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu badań eksperymentalnych związanych z myciem wymienników ciepła, opracowaniu funkcji regresji, opracowaniu koncepcji optymalizacji procesu mycia w kontekście energetycznym oraz graficznym przygotowaniu rysunków do publikacji. Współudział w interpretacji wyników, formułowaniu wniosków oraz opracowaniu manuskryptu. Autor korespondujący. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

- O5. Piepiórka-Stepuk J., (70%),** Mierzejewska S., (20%), Jakubowski M. (10%), **2017.** *Application of nephelometry to automatic control of cleaning time during cleaning process in Clean in Place system.* **International Journal of Food Engineering**, 13(6): 20160283, 1-10.

DOI: 10.1515/ijfe-2016-0283

*(IF=0,923; IF_{5-Year}=0,840; MNiSW=15 pkt).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu doświadczenia, wykonaniu badań eksperymentalnych, opracowaniu, analizie i interpretacji wyników, formułowaniu wniosków oraz opracowaniu merytorycznym manuskryptu. Współtwórca koncepcji badań. Autor korespondujący. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

- O6. Piepiórka-Stepuk J., (100%),** **2018.** *Analysis of physical impurities in regenerated solutions used in cleaning brewing systems.* **Journal of the Institute of Brewing.**

DOI: 10.1002/jib.545

** (IF=0,868; IF_{5-Year}=1,238; MNiSW=20 pkt).

Praca samodzielna. Mój udział procentowy wynosi 100%.

- O7. Piepiórka-Stepuk J., (100%),** **2018.** *Turbidity and quantity of sediment particles during regeneration of chemical solutions after cleaning of brewing equipment in the CIP system.* **Agricultural Engineering.** 22(3), 37-48.

DOI: 10.1515/agriceng-2018-0025

** (IF=0; IF_{5-Year}=0; MNiSW=10 pkt).

Praca samodzielna. Mój udział procentowy wynosi 100%.

- O8. Piepiórka-Stepuk J., (100%),** **2018.** *Impact of caustic soda solution temperature on efficiency of its cleaning on solid sediments after completed process of cleaning in CIP system of brewing unit.* **Agricultural Engineering.** 22(2), 79-89.

DOI: 10.1515/agriceng-2018-0018

** (IF=0; IF_{5-Year}=0; MNiSW=10 pkt).

Praca samodzielna. Mój udział procentowy wynosi 100%.

O9. Piepiórka-Stepuk J. (50%), Mierzejewska S (50%). 2017. patent pt. „Sposób i układ monitorowania procesem mycia w przepływie”, Urząd Patentowy RP nr patentu PL 226306 B1. (30 pkt).

*Mój wkład w powstanie patentu polegał na przeprowadzeniu rozpoznania dotychczasowego stanu wiedzy, przeprowadzeniu badań eksperymentalnych i opracowaniu koncepcji zastrzeżeń patentowych. **Mój udział procentowy wynosi 50%.***

Łącznie:

Sumaryczny IF osiągnięcia wg listy JCR wynosi **8,578** ($IF_{5-year} = 9,648$).

Sumaryczna liczba punktów osiągnięcia, wg listy MNiSW oraz kryteriów oceny parametrycznej jednostek naukowych (patent), wynosi **165 pkt**

Liczba punktów udziału własnego w osiągnięciu wynosi **122 pkt**.

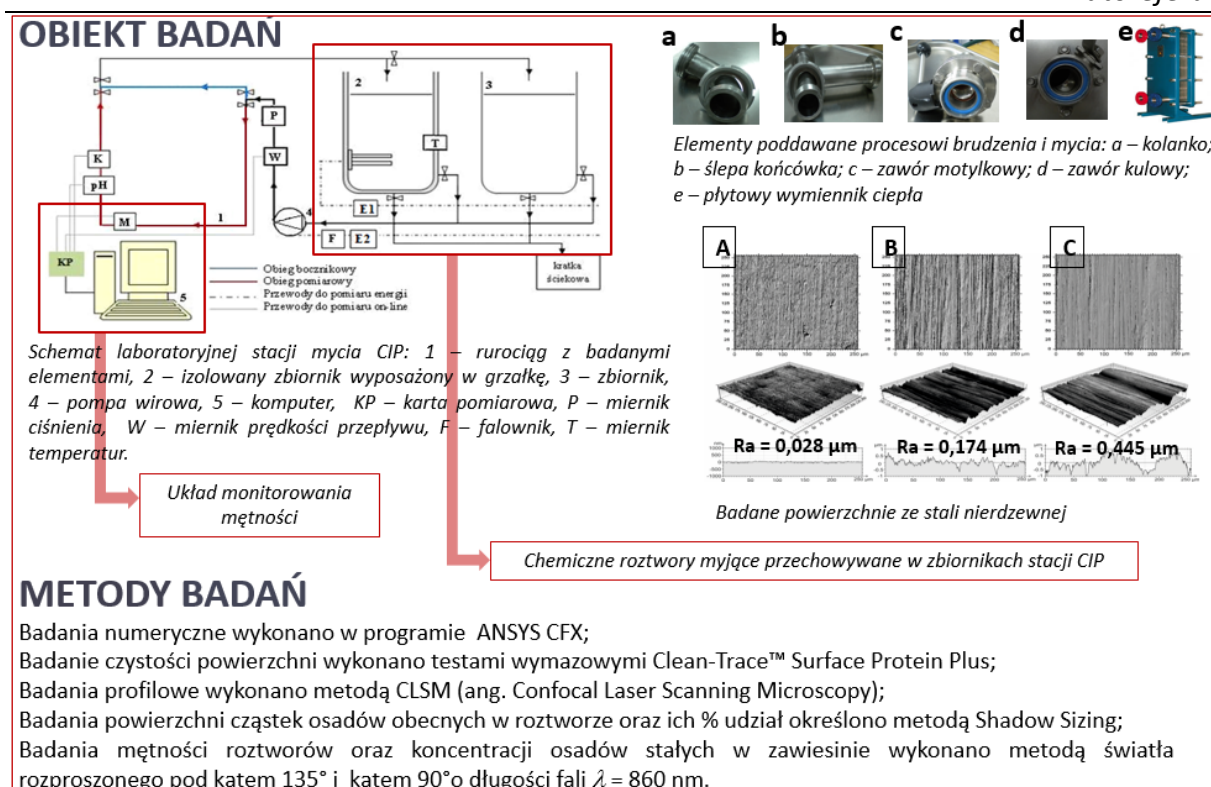
We wszystkich przedstawionych powyżej publikacjach i opracowaniu patentowym byłam pomysłodawczynią hipotez i koncepcji badań eksperymentalnych oraz analiz symulacyjnych. Wszystkie publikacje, wskazane jako osiągnięcie naukowe, stanowią wielowymiarowe rozwinięcie prac zrealizowanych w ramach pracy doktorskiej oraz projektów i zadań badawczych (projekt badawczy własny nr NN313136838 pt. „*Identyfikacja zagrożeń i badanie warunków zapewnienia skutecznego mycia w systemie CIP krytycznych miejsc instalacji*” (2009-2012) i zadanie badawcze służące rozwojowi młodych naukowców pt. „*Zastosowanie obliczeń numerycznych do badania warunków mycia w przepływie elementów instalacji, stosowanych w przemyśle spożywczym*” (2012-2014)). Prace wchodzące w skład osiągnięcia stanowią też podsumowanie współpracy ze średniej wielkości browarem, realizowanej w latach 2013-2016. We wszystkich pracach stanowiących osiągnięcie naukowe, byłam autorką odpowiedzialną za merytoryczną i korespondencyjną stronę publikacji (corresponding author).

Oświadczenia współautorów prac, określające nasz indywidualny wkład w powstanie poszczególnych publikacji, zamieszczono w **Załączniku 5**.

Zakres tematyczny osiągnięcia dotyczy rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych, ukierunkowanych na poprawę skuteczności mycia instalacji przetwórstwa spożywczego w obiegu zamkniętym (CIP). W badaniach wskazano rozwiązania umożliwiające również obniżenie zużycia energii elektrycznej, wody i substancji chemicznych potrzebnych do przeprowadzenia procesu mycia. Zrealizowane prace, wchodzące w skład osiągnięcia, obejmują trzy aspekty badawcze:

- 1. analizę czynników konstrukcyjno-procesowych w kontekście: zmniejszenia ilości tworzących się osadów produkcyjnych na powierzchniach urządzeń, poprawy skuteczności mycia oraz minimalizacji energochłonności procesu (O1, O2, O3, O4);**
- 2. opracowanie metody monitorowania procesu mycia w obiegu zamkniętym oraz sterowanie procesem w oparciu o pomiary wybranych parametrów (O5, O9);**
- 3. analizę właściwości fizyko-chemicznych roztworów myjących stosowanych do mycia w obiegu zamkniętym, ich stabilność w okresie użytkowania oraz uwarunkowania ich skutecznej regeneracji (O6, O7, O8).**

Większość analiz prowadziłam w oparciu o eksperymentalne wyniki badań, z wykorzystaniem zaawansowanych narzędzi badawczych (laboratoryjna stacja mycia CIP, program Shadow Sizing na platformie DynamicStudio, konfokalny laserowy mikroskop skaningowy CLSM, elektroda do pomiaru mętności metodą światła rozproszonego o długości fali $\lambda = 860$ nm). Część analiz, dotyczących określenia warunków przepływu mediów myjących przez instalacje, wykonałam z wykorzystaniem narzędzi modelowania numerycznego i symulacji komputerowej (numeryczna mechanika płynów CFD), które obecnie w Polsce są szeroko stosowane do realizacji prac badawczych w dyscyplinie inżynieria rolnicza. Rozwinięcie obiektu badań i zastosowanych metod badawczych zaprezentowałam na rysunku 1. Badania dotyczące stabilności i regeneracji chemicznych roztworów myjących realizowałam na roztworach przemysłowych, w ramach współpracy z lokalnym browarem.



Rys. 1. Obiekt badań i zestawienie zastosowanych metod badawczych

2.2. Omówienie celów naukowych prac stanowiących osiągnięcie

Mycie urządzeń i instalacji przemysłu spożywczego jest ważnym etapem procesu produkcyjnego. Dla wielu zakładów charakteryzujących się tzw. „produkcją zamkniętą”, największe znaczenie w tym zakresie mają systemy mycia CIP. Mycie w obiegu zamkniętym jest najbardziej zmechanizowanym i zautomatyzowanym procesem higienizacji urządzeń i stanowi podstawę utrzymania standardów higienicznych m.in.: w zakładach mleczarskich, browarniczych, tłuszczowych i owocowo-warzywnych. W systemie CIP myje się większość aparatów i urządzeń produkcyjnych - od cystern dostarczających np. mleko, przez wszystkie tanki i zbiorniki, całą aparaturę oraz niektóre urządzenia technologiczne (Chung i Lai, 2008; Goode i in., 2010; Pettigrew i in., 2015).

Efekt mycia w systemie CIP zależy od dostosowania urządzeń pod względem ich konstrukcji do tej metody. Budowa urządzeń musi zapewniać zachowanie ciągłości przepływu, zarówno półproduktów w czasie ich przetwarzania jak i mediów myjących podczas mycia, a także zapobiegać powstawaniu „martwych przestrzeni”, w których tworzą się tzw. zastoiny. Krytycznymi miejscami pod tym względem są wszelkiego rodzaju zakrzywienia i przewężenia w instalacjach rurowych, zawory, uszczelki, czujniki pomiarowe montowane w instalacjach

oraz elementy niektórych aparatów m.in.: wirówek, nalewaków, płytowych wymienników ciepła. Takie przestrzenie powodują lokalne spadki wartości prędkości przepływu roztworów myjących i lokalne niedomywanie powierzchni (Zał. 3., pkt 2., publ.: **H2, H4, H25, H26**), a także są przyczyną szybszego narastania osadów poprodukcyjnych i sprzyjają rozwojowi drobnoustrojów.

W wykonaniu urządzeń i ich elementów wymagane jest również zastosowanie odpowiednich materiałów konstrukcyjnych o określonym profilu chropowatości, który wg. zaleceń EHEDG (European Hygienic Engineering and Design Group) nie powinien przekraczać $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$ (852/2004; 1935/2004; No.8; No.18). Materiały takie charakteryzują się wysoką adhezyjnością, wynikającą z ich niskiej swobodnej energii powierzchniowej, co przekłada się na stopień wiązania osadów z tymi powierzchniami, ich zwilżalność i efektywność oczyszczania. Oprócz dużej wytrzymałości mechanicznej i braku migracji związków toksycznych do produkowanej żywności materiały konstrukcyjne muszą charakteryzować się również odpornością na korozyjne działanie środowiska zasadowo-kwaśnego oraz odpornością na wysokie i niskie temperatury, w których prowadzone są zarówno procesy przetwórcze jak i procesy mycia.

Mycie w systemie CIP wiąże się również z dużym zużyciem wody i energii elektrycznej oraz dużą objętością odprowadzanych ścieków, będących wynikiem mało efektywnych metod regeneracji roztworów myjących pomiędzy procesami mycia. Szacuje się, że 14 ÷ 30% ogólnego zapotrzebowania zakładów przetwórstwa spożywczego na energię elektryczną związane jest z procesami mycia instalacji produkcyjnych, w tym również w systemie CIP (Neryng i in., 1990; Pawełas, 2010; Rad i Lewis, 2014). Zużycie to wynika przede wszystkim z warunków eksploatacji stacji mycia CIP, rodzaju i wielkości mytych obiektów, doboru warunków mycia, ale przede wszystkim z konieczności ogrzewania i utrzymywania roztworów myjących w wysokiej temperaturze, sięgającej nawet 95°C. Zużycie wody oraz objętość ścieków odprowadzanych po procesie mycia CIP zależą od branży przetwórstwa spożywczego i są relatywnie mniejsze niż w przypadku pozostałych metod mycia (mycie pianowe, komorowe, tunelowe). Jednak ładunek ścieków jest znacznie wyższy. Przykładowo, po procesie mycia instalacji browarniczych w systemie CIP odprowadzane ścieki charakteryzują się wyższym stężeniem związków organicznych (ChZT i BZT₅) i fosforu ogólnego niż ścieki po myciu pianowym (Janczukowicz i in. 2013), stąd przy każdym wyprowadzaniu roztworów ze zbiorników CIP, powinny one być poddane chemicznej degradacji (Biń i Zieliński, 2000; Krzemińska i in., 2013). Natomiast zużycie wody zależne jest od wielkości zakładu. Przykładowo w browarach ogólne zużycie wody szacowane jest w granicach 4 ÷ 11 litrów na litr wyprodukowanego piwa (Pettigrew i in., 2015).

Zmniejszenie zużycia wody i energii można osiągnąć m.in. poprzez optymalizację warunków mycia i skuteczną regenerację roztworów. Ważne jest również opracowanie metody sterownia procesem mycia umożliwiającej skrócenie czasu mycia, który obecnie ustalany jest obligatoryjnie.

Uogólniając, celem prac stanowiących osiągnięcie naukowe była analiza wpływu czynników konstrukcyjnych, procesowych i rozwiązań technologicznych oraz ich optymalizacja w odniesieniu do efektywności procesu mycia w systemie CIP i uwarunkowań energetycznych. W ramach prac przeprowadzono analizy symulacyjne przepływów występujących w przestrzeniach wybranych elementów rurociągów oraz badania eksperymentalne dotyczące efektywności ich mycia. Określono wpływ konstrukcji wybranych elementów oraz profilu chropowatości materiałów, z których są wykonywane na ilości tworzących się zanieczyszczeń oraz stopień ich wymywania z powierzchni. W kontekście minimalizacji energochłonności procesu, określono optymalne warunki procesu mycia w systemie CIP wybranych instalacji produkcyjnych, warunki regeneracji chemicznych roztworów myjących po ich użyciu, a także zaproponowano metodę monitorowania i sterowania procesem mycia w przepływie. Prace stanowiące osiągnięcie umożliwiły poznanie zależności pomiędzy istniejącymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi (ukształtowanie przestrzeni przepływowej, profil chropowatości powierzchni) a ilością i szybkością narastających osadów oraz efektywnością ich usuwania podczas mycia w przepływie. Wzbogacono również wiedzę dotyczącą warunków regeneracji środków chemicznych z jednoczesnym opisaniem relacji zależności pomiędzy temperaturą i czasem sedymentacji osadów a końcową czystością roztworów. Osiągnięcie (zaprezentowane w punktach A.1., A.2., A.3.) stanowi znaczące rozszerzenie prac zrealizowanych w ramach rozprawy doktorskiej habilitantki.

A.1. Określono wpływ czynników konstrukcyjno-procesowych na uwarunkowania mycia (O1, O2, O3, O4).

Celem prac **O1, O2, O3** było powiązanie uwarunkowań konstrukcyjnych wybranych elementów instalacji przetwórstwa spożywczego z ilością i intensywnością tworzenia się na ich powierzchniach osadów poprodukcyjnych w czasie procesu produkcji oraz warunkami przepływu roztworów w czasie procedury CIP, decydującymi o końcowym efekcie mycia. Powyższe wyniki badań oraz wyniki analiz uzyskane w ramach 2 zrealizowanych projektów badawczych MNiSW, których byłam głównym wykonawcą i wykonawcą, umożliwiły przeprowadzenie procedury optymalizacji procesu mycia w systemie CIP. Wielokryterialna optymalizacja zakładała maksymalizację skuteczności mycia wybranych instalacji produkcyjnych oraz minimalizację zapotrzebowania na energię do realizacji tego procesu (**O4**). Cele badawcze, stanowiące rozwinięcie powyższej koncepcji, przedstawiono poniżej.

A.1.1. Określono obszary słabego oddziaływania mechanicznego roztworów myjących w procesie mycia wybranych elementów rurociągów, tj.: kolano 90°, trójkąt 90° krótki i długi (otwarty i zamknięty), zawory (motylkowy i kulowy)

Z przeglądu literatury oraz na podstawie własnych, wieloletnich prac badawczych wynika, że hydrodynamiczne parametry (prędkość przepływu, ciśnienie) oraz naprężenia ścinające występujące podczas przepływu roztworów decydują o usuwaniu osadów poprodukcyjnych. Ich wartości zależą głównie od ukształtowania przestrzeni przepływowej, wynikającej z konstrukcji instalacji (urządzenia) poddawanej myciu. Wielu badaczy wykazało, że kinetyka usuwania zanieczyszczeń jest funkcją prędkości przepływu detergentów myjących, liczby Reynoldsa Re (1) i tworzących się na ściankach mytych elementów naprężeń ścinających τ_w (2) (Lelievre i in. 2002; Jensen i in. 2005; Blel i in. 2007; Diakun, 2011).

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} \quad (1)$$

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (2)$$

Kierując się powyższymi założeniami określono zależność pomiędzy konstrukcją wybranych elementów rurociągów, jako elementów występujących w każdej instalacji produkcyjnej (i w każdej branży przetwórstwa spożywczego), a hydromechanicznymi oddziaływaniami roztworu myjącego na powierzchnie myte w przepływie (**O1 i O2**). Prace

te wykonano z wykorzystaniem obliczeń numerycznych przy wykorzystaniu kodu CFD (Computational Fluid Dynamics), zaimplementowanego w środowisku programu ANSYS. W ramach tego zadania badawczego opracowano matematyczny model ruchu płynu w przestrzeni elementów rurowych, opracowano geometryczny model symulacyjny rurociągów oraz przeprowadzono procedurę eksperymentu numerycznego, na podstawie którego zidentyfikowano występowanie obszarów na powierzchniach badanych elementów rurociągów, w których oddziaływania hydrodynamiczne roztworu są słabsze. Obszary te wskazano, jako narażone na niedomycie w standardowej procedurze CIP. Wyniki badań numerycznych zweryfikowano badaniami laboratoryjnymi na rzeczywistym obiekcie badań, a rezultaty prac przedstawiono poniżej.

– **Opracowano formalny opis przepływu roztworów myjących w elementach rurociągów oraz zdefiniowano warunki brzegowe modelu**

W pracy **O1** określono warunki brzegowe i początkowe modelu numerycznego przepływu występującego w rurociągach w czasie procedury mycia, wykorzystując do tego celu znany z opracowań innych autorów, opis formalny równań bilansowych (Jun, Puri 2006; Zhang i in. 2006; Pinson i in. 2007; Luan i in. 2008). Dla rozpatrywanego ruchu roztworu w testowanych elementach zastosowano układ współrzędnych kartezjańskich x, y, z . Założono izotermiczne warunki przepływu i niezmiennie w czasie. Założono również, że przepływ płynu jest turbulentny (zgodnie z wymaganiami mycia w systemie CIP), a modele turbulencji zawierają standardową definicję opisu warstwy granicznej. W związku z tym do obliczeń wykorzystano model $\kappa - \varepsilon$, w którym przepływ opisywany jest dwoma równaniami modeli turbulencji w pobliżu ściany. (Jensen i Friis, 2007). Warunki brzegowe i początkowe w pierwszym kroku pierwszej iteracji zdefiniowano w postaci: zerowych wartości prędkości na ścianach badanego obszaru obliczeniowego (3), zerowych wartości współczynników turbulencji energii kinetycznej κ (4) i dyssypacji turbulencji ε (5), masowego natężenia przepływu na wlocie i wylocie testowanych modeli numerycznych na poziomie $\dot{m} = 1,95 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Natężenie przepływu przyjęto na podstawie przeprowadzonych testów w rurociągu kanału rzeczywistego, na laboratoryjnej stacji mycia CIP. Chropowatość powierzchni przyjęto na poziomie $Ra = 0,45 \text{ }\mu\text{m}$ (zgodnie z deklaracją producenta elementów rurowych, stanowiących rzeczywisty obiekt badań w testach laboratoryjnych).

$$u_x = 0; u_y = 0; u_z = 0 \quad (3)$$

$$\rho u_x \frac{\partial \kappa}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial \kappa}{\partial y} + \rho u_z \frac{\partial \kappa}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\rho u_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \rho u_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

Pomijając składowe siły ciężkości oraz zakładając zgodnie z hipotezą Reynoldsa, że chwilowe wartości wszystkich wielkości fizycznych charakteryzujących przepływ mogą być traktowane, jako sumy wielkości uśrednionych w czasie, przepływ uśredniony opisano za pomocą równań zachowania masy (6) i pędu (7). Równanie zachowania energii pominięto, ponieważ założono izotermiczność przepływu.

Równanie bilansu masy w postaci dywergentnej:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \bar{u} = 0 \quad (6)$$

Przy czym gęstość ρ uzależniona jest od rodzaju medium myjącego oraz jego temperatury. Zakładając, że proces jest izotermiczny a przepływające medium charakteryzuje się stałą temperaturą (płyn nieściśliwy), w modelu przyjęto stałą wartość gęstości $\frac{\partial \rho}{\partial t} = \text{const}$. Przy tych warunkach i założeniach dla płynu nieściśliwego równanie bilansu pędu (Naviera – Stokesa) w postaci wektorowej przyjmuje postać:

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = \bar{F}_m - \frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \bar{u} \quad (7)$$

W powyższym układzie przyjęto założenie, iż nie występują siły masowe $\bar{F}_m = 0$ oraz, że przepływ jest ustalony $\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = 0$. Uwzględniając powyższe założenia otrzymano równania:

$$\begin{cases} u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right), \\ u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right), \\ u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right). \end{cases} \quad (8)$$

Zaproponowano zastosowanie modelu $\kappa - \varepsilon$, przystosowanego do przepływów o wysokim poziomie turbulencji. W koncepcji tego modelu następuje zamknięcie układu równań (6) i (7) dwoma dodatkowymi równaniami różniczkowymi: transportu energii kinetycznej κ (9) oraz

szybkości dyssypacji energii kinetycznej turbulencji ε (10) (Elsner, 1987; Kazimierski, 2004; Bogusławski i in., 2008).

Równanie dla energii kinetycznej κ :

$$\rho u_x \frac{\partial \kappa}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial \kappa}{\partial y} + \rho u_z \frac{\partial \kappa}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial z} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (9)$$

Równanie dyssypacji energii kinetycznej turbulencji posiada postać ε :

$$\rho u_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \rho u_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{\kappa} G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (10)$$

W powyższych równaniach występują:

– dyssypacja energii ruchu uśrednionego:

$$G = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right\} \quad (11)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

– lepkość efektywna, w postaci sumy lepkości dynamicznej i lepkości turbulentnej określana równaniem:

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (13)$$

– stała modelu turbulencji – $C_\mu = 0,09$

– wartości współczynników – $\sigma_\kappa = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$.

Równanie zachowania masy (6), równanie zachowania pędu (7) i równania przyjętego modelu turbulencji $\kappa - \varepsilon$ (9, 10), stanowią model matematyczny ruchu płynu w przestrzeni elementów rurowych. Są to równania różniczkowe cząstkowe, w których zmiennymi niezależnymi są współrzędne rozpatrywanego punktu w przestrzeni x_i . Na ich podstawie możliwe jest wyznaczenie rozkładu takich wartości zmiennych zależnych jak: składowe wektora prędkości u , ciśnienia p , energia kinetyczna turbulencji κ i dyssypacja turbulencji ε (Jun i Puri, 2006; Zhang i in., 2006; Pinson i in., 2007; Luan i in., 2008). Tak sporządzony opis formalny stanowi postawę do dalszych rozważań i analiz w zakresie symulacji warunków przepływu w elementach rurociągów o różnej konstrukcji.

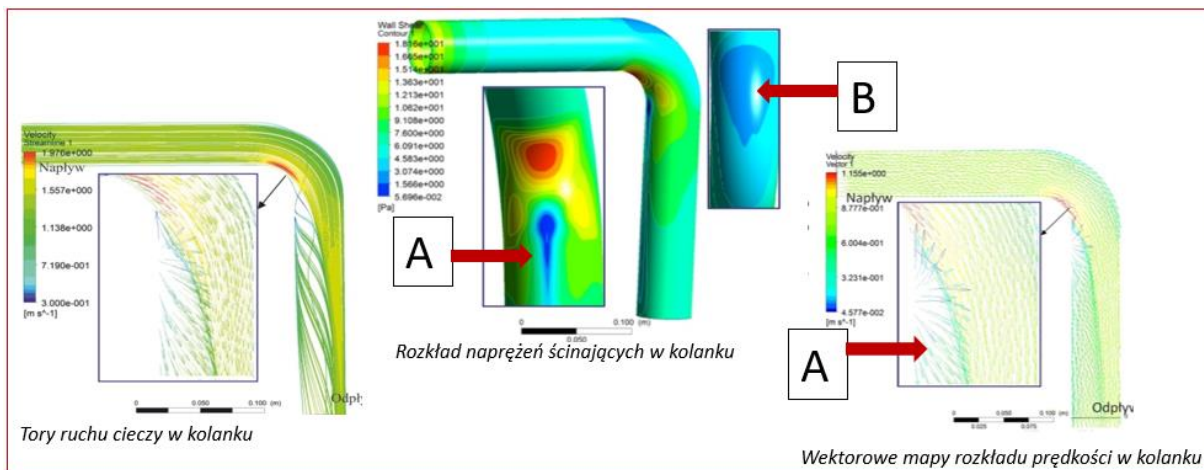
– opracowano modele numeryczne odwzorowujące przestrzenie przepływowe występujące w obiektach rzeczywistych, w oparciu o które określono zakres, charakter i intensywność zjawisk zachodzących w wybranych elementach rurociągów podczas przepływu cieczy myjącej

Metody numeryczne są coraz powszechniej stosowane do analizy zjawisk przepływowych. Narzędzia te posiadają wbudowane kody numeryczne w postaci równań różniczkowych, będących matematycznym zapisem podstawowych praw hydromechaniki i termodynamiki. Jedną z metod jest modelowanie z wykorzystaniem kodu CFD, który pozwala prowadzić analizę przepływu w testowanych elementach rurociągów o różnej konstrukcji, w oparciu o siatki wygenerowane na bazie geometrycznego odwzorowania obiektu rzeczywistego. Zestaw narzędzi i elementów do obliczeń i analiz przepływu płynu oraz zjawisk temu towarzyszących, pozwala także na wprowadzenie parametrów wejściowych w zakresie warunków początkowych symulowanego zjawiska i dowolną ich zmianę. Moduł zawiera różne modele turbulencji, spośród których stosowanym do obliczeń przepływów jest m.in. model $\kappa - \varepsilon$. Mimo iż uzyskane wyniki z analiz symulacyjnych są pewnym przybliżeniem rzeczywistości i wymagają weryfikacji eksperymentalnej, to na ich podstawie można z powodzeniem wnioskować o charakterze symulowanego zjawiska, a także uzyskać dane dotyczące warunków przepływu wewnątrz badanych elementów.

Obliczenia numeryczne, zaprezentowane w pracach **O1** i **O2**, prowadzono korzystając z kodu CFD, stanowiącego jeden z modułów pakietu do obliczeń numerycznych o nazwie ANSYS. Ze względu na charakter zjawiska ruchu płynu w procesie mycia w systemie CIP zagadnienie modelowano, jako turbulентne, zgodnie z przeprowadzonym rozpoznaniem literaturowym i założeniami zaprezentowanymi w poprzedniej części opracowania. Z badanych elementów rurociągów wyodrębniono przestrzenie tworzące kanały przepływowe, które zdyskretyzowano siatką symetryczną o wielkości elementu 0,001 m. Dla modelu zadeklarowano warunki brzegowe zgodne z opisem formalnym i warunki początkowe właściwe dla dalszych badań eksperymentalnych.

Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu numerycznego wykazano, że w kolankach rurociągów największe prędkości przepływu i jednocześnie duże gradienty prędkości występują na wewnętrznym promieniu kolanka, natomiast poniżej zakrzywienia (A) oraz na promieniu zewnętrznym kolanka (B) tworzą się przepływy wtórne, charakteryzujące się małymi gradientami prędkości. Wartości prędkości przepływu u oraz naprężeń ścinających τ_w występujących w tych obszarach obniżają się do wartości bliskiej zero. W tych miejscach obserwuje się oderwanie

strumienia płynu, zmiany kierunku przepływu i tworzenie się zawirowań niesprzyjających procesowi mycia metodą CIP (rys. 2.). Dalsza analiza wektorów prędkości przepływu oraz linii prądu pozwoliła wskazać te obszary w kolanku, jako trudne do umycia.

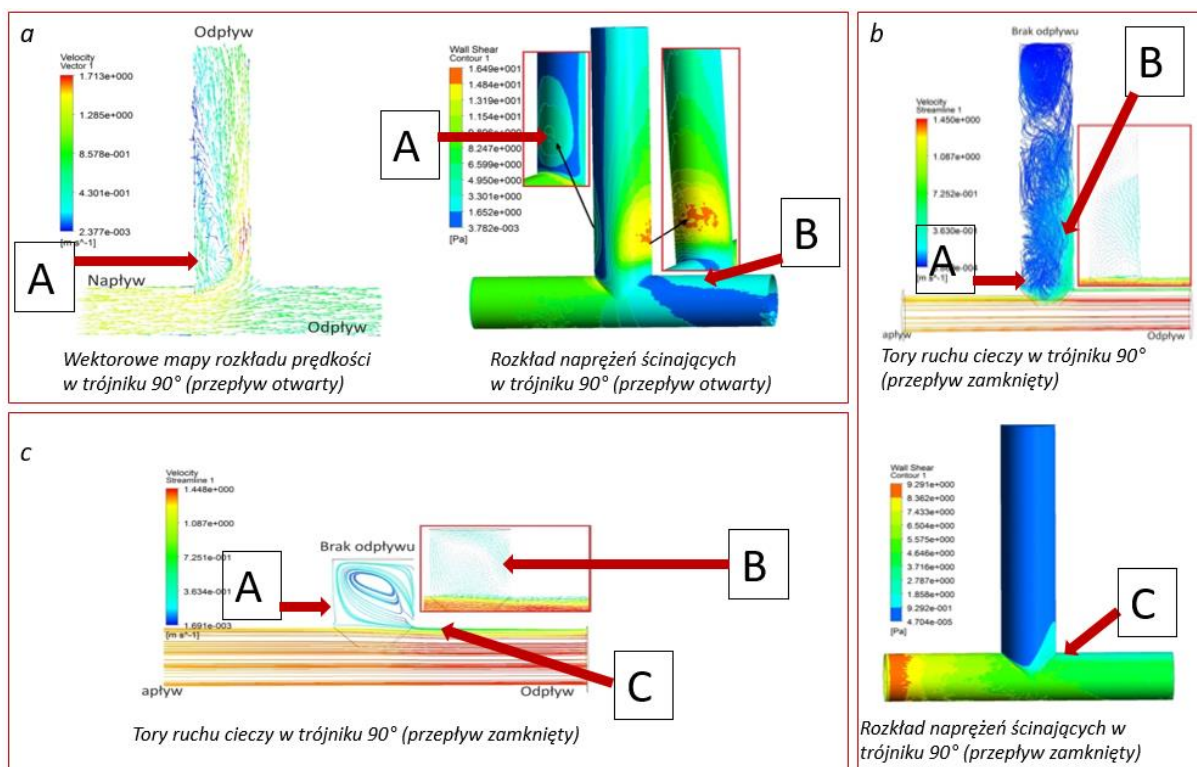


Rys. 2. Wyniki badań numerycznych dla kolanka 90° (A, B – obszary o obniżonych wartościach prędkości przepływu i naprężeniach ścinających)

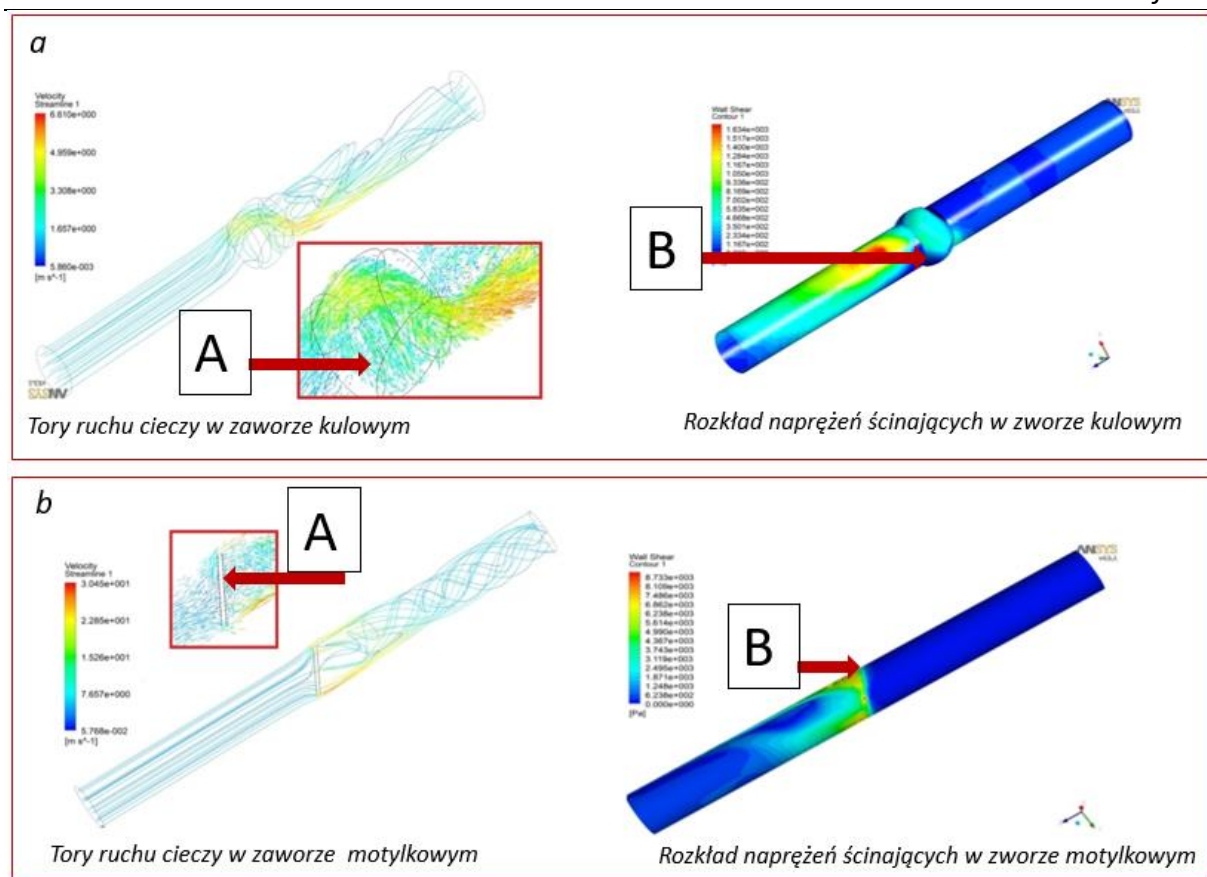
Dla tych samych warunków brzegowych i początkowych przeprowadzono dodatkowe badania numeryczne dla kolanek o średnicy przekroju $d = 0,051$ m oraz $d = 0,076$ m. Wyniki tych analiz zaprezentowano w pracy **O2**. Uzyskano podobny rozkład pól prędkości przepływu, naprężeń ścinających oraz ciśnień. Obniżyły się natomiast wartości analizowanych parametrów, co było konsekwencją zwiększenia średnicy przekroju poprzecznego badanego elementu. I tak, podczas gdy dla kolanka o średnicy $d = 0,038$ m maksymalne wartości prędkości przepływu na wewnętrznym zakrzywieniu przyjmowały wartość $u = 1,97$ m·s⁻¹, to dla średnicy $d = 0,051$ m przyjmują wartość $u = 1,15$ m·s⁻¹ a dla średnicy $d = 0,076$ m wynoszą już $u = 0,54$ m·s⁻¹. Zwiększenie początkowego masowego natężenia przepływu nie wniosło do analiz nic nowego. Nie zaobserwowano zmian w rozkładzie pól prędkości przepływu, poza zamianą ich wartości obliczeniowej. Relatywnie zwiększając wartość początkową masowego natężenia przepływu uzyskano większe wartości prędkości przepływu i naprężeń ścinających w analizowanych obszarach.

Analogiczne jak wyżej, przeprowadzono badania numeryczne i ich analiza dla trójkąta 90° oraz tzw. ślepych końcówek (krótki i długi trójkąt 90° z zaślepieniem odpływem), jak również dla zaworów (motylkowego i kulowego), umożliwiły wskazanie obszarów trudnych do umycia. Przy czym obliczenia numeryczne przepływu w zaworach prowadzono w pozycji ich 30% otwarcia. Szczegółowe wyniki tych analiz przedstawiają prace **O1** i **O2**. Wykazano, że w pewnych

obszarach tych elementów podczas przepływu roztworów myjących, nie jest spełniony podstawowy warunek procesu mycia (przepływ turbulentny) lub jest on spełniony tylko w minimalnym stopniu. Przykładowo, na wylocie z trójnika z przepływem otwartym (obszary A i B) prędkość przepływu maleje do wartości ok. $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, co powoduje, że liczba Re w tych miejscach wynosi zaledwie $Re \approx 6000$ (przy uwzględnieniu gęstości i lepkości dla wody o temperaturze $T=45^\circ\text{C}$) (rys. 3a.). Obniżone wartości prędkości przepływu są wynikiem napływu płynu do wolnych przestrzeni, co jest obserwowalne szczególnie w trójnikach z zamkniętym odpływem (tzw. ślepe końcówki – rys. 3b,c). Natomiast w zaworach wykazano występowanie zmiennych warunków przepływu w obszarach elementów ruchomych i w miejscach ich styku z uszczelką (rys. 4a,b.). Wyniki tych analiz przedstawiono na rys. 3., rys. 4. oznaczając wskazane obszary kolejnymi literami alfabetu.



Rys. 3. Wyniki badań numerycznych dla trójnika 90° : a – przepływ otwarty; b – przepływ zamknięty długa końcówka; c - przepływ zamknięty krótka końcówka (A, B, C – obszary o obniżonych wartościach prędkości przepływu i nieprężeniach ścinających)



Rys. 4. Wyniki badań numerycznych dla zaworów a – kulowego; b – motylkowego (A, B – obszary o obniżonych wartościach prędkości przepływu i naprężeniach ścinających)

– Określono obszary o niskich prędkościach przepływu oraz małych naprężeniach ścinających występujących podczas procesu mycia w przepływie badanych elementów

Na podstawie wyników obliczeń numerycznych wskazano obszary w badanych elementach rur, w których występują małe prędkości przepływu i niskie naprężenia ścinające. W kolanku (rys. 2.) jest to powierzchnia poniżej wewnętrznego łuku kolanka (A) oraz powierzchnia na łuku zewnętrznym (B). W trójniku z przepływem otwartym (rys. 3a.) jest ściana rozgałęzienia trójnika od strony napływu (A) i górna ściana rurociągu odprowadzającego za rozgałęzieniem (B), natomiast w trójniku z zaślepionym odpływem (rys. 3b,c.) jest to powierzchnia całego przyłącza tzw. ślepej końcówki (A i B) i górna ściana rurociągu odprowadzającego za rozgałęzieniem (C). W zaworach (rys. 4a,b.) są to elementy ruchome (A) oraz miejsca ich styku z uszczelką (B). W tych obszarach może występować niedomycie instalacji.

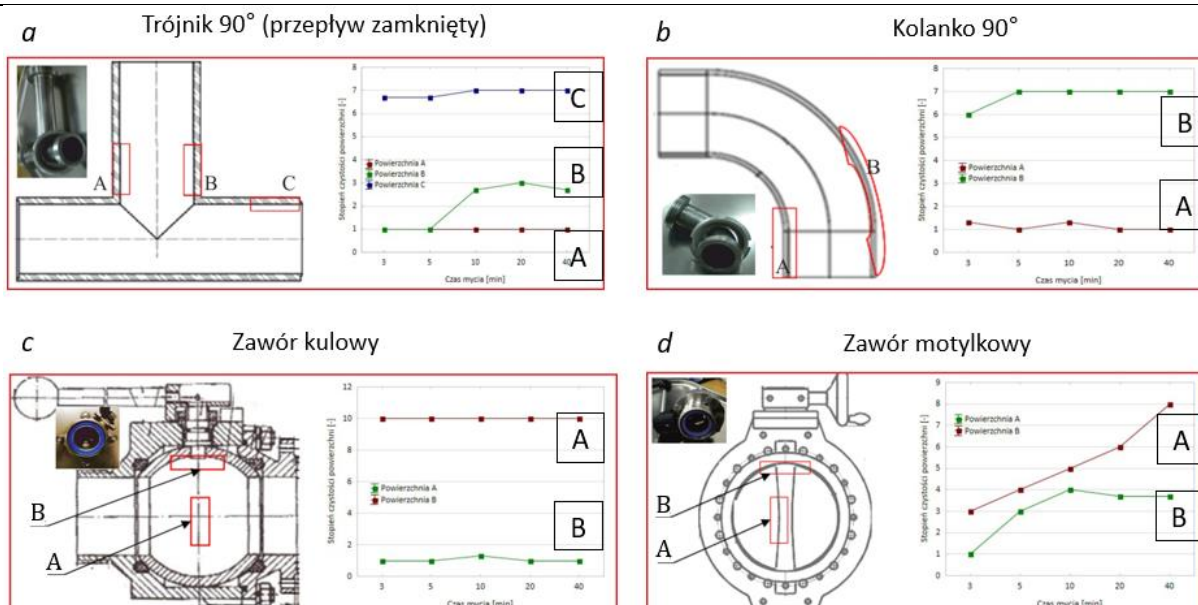
Podobne analizy prowadzono również dla rurociągów o zmiennej średnicy d pola powierzchni na ich przekroju poprzecznym (skokowym i łagodnym), dla kolanek o zmiennym stosunku promienia krzywizny r do średnicy d , a także dla płytowych wymienników ciepła

o zmiennym ukształtowaniu płyt. Wyniki tych prac stanowią treści publikacji wykazanych w Załączniku 3., pkt 2., publ.: **H1, H2, H10, H13, H25, H28, H30**. Prace te pozwoliły na wypracowanie warsztatu badawczego, który doskonale uzupełnia badania związane z hydrodynamicznymi oddziaływaniami roztworów myjących w procesie mycia CIP urządzeń i instalacji o zmodyfikowanej konstrukcji.

– **Przeprowadzono weryfikację obliczeń numerycznych w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych na laboratoryjnej stacji mycia CIP i wskazano w badanych elementach obszary trudne do umycia w przepływie**

Wyniki uzyskane na drodze symulacji poddano weryfikacji eksperymentalnej. Badania eksperymentalne przeprowadzono na laboratoryjnej stacji CIP. Na powierzchni testowanych elementów rurociągów nanoszono zabrudzenia białkowo – tłuszczowe. Elementy instalowano w układ i poddawano procesowi mycia czystą wodą o temperaturze $T = 45^{\circ}\text{C}$, przepływającą z prędkością $u = 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z programów mycia celowo wyeliminowano czynnik chemiczny, co pozwalało zrealizować założone cele badań, związane wyłącznie z oceną hydrodynamicznych oddziaływań cieczy myjącej na efekt mycia. W badaniach przyjęto zmienny czas mycia t , ustalając program na 3; 5; 10; 20 i 40 minut, co dodatkowo pozwalało ocenić wpływ czasu na poprawę skuteczności mycia. Czystość poszczególnych obszarów w badanych elementach, oceniano testem Clean-Trace™ Surface Protein Plus, przypisując skalę czystości od 0 do 10 pkt, przy czym 0 oznaczało stan pierwotny zabrudzenia, a 10 powierzchnię całkowicie czystą.

Analiza wyników badań eksperymentalnych w postaci efektów mycia, wykazała trudności z wymywaniem zanieczyszczeń we wskazanych w badaniach numerycznych obszarach badanych elementów, przy czym końcową czystość analizowanych obszarów oceniono na różnym poziomie (rys. 5.). W trójniku z zamkniętym przepływem (tzw. ślepa końcówka), górna powierzchnia rurociągu za rozgałęzieniem (C) była znacznie czystsza po procesie mycia w przepływie niż obie ściany przyłącza ślepej końcówki (A i B). W kolanku lepszą skuteczność mycia uzyskano na łuku zewnętrznym kolanka (B) niż na łuku wewnętrznym (A). W zaworze kulowym, kula (A) ulegała całkowitemu oczyszczeniu w procesie mycia w przepływie, natomiast uszczelka (B) była trudna do umycia. Natomiast w zaworze motylkowym wykazano, że element ruchomy (A) oraz uszczelka (B) były trudne do umycia, przy czym wydłużenie czasu w nieznacznym stopniu wpłynęło na poprawę końcowego efektu mycia.



Rys. 5. Wyniki badań laboratoryjnych dotyczące skuteczności mycia: a – tzw. ślepej końcówki z długim wylotem (A - ściana rozgałęzienia przy napływie; B - ściana rozgałęzienia przy odpływie, C - górna ściana rurociągu przy odpływie); b - kolanka 90° (A - powierzchnia rury poniżej wewnętrznego zakrzywienia; B - powierzchnia rury na łuku zewnętrznym); c - zaworu kulowego (A - powierzchni kuli, B - powierzchni uszczelki); d - zaworu motylkowego (A - powierzchni kłapki, B - powierzchni uszczelki)

O1. Piepiórka-Stepuk J., Mierzejewska S., 2014. Numerical analysis of fluid flow velocity in selected elements of pipeline installations with reference to the effects of cleaning. Italian Journal of Food Science, 04, XXVI(4): ISSN 1120-1770.

O2. Piepiórka-Stepuk J., Mierzejewska S., 2014. Simulation tests of liquid flow in the pipeline elements. Agricultural Engineering, 1(149), 175-184.

Efektorem przeprowadzonych analiz jest stwierdzenie, że:

- w poszczególnych obszarach badanych elementów rurociągów występują zróżnicowane wartości prędkości przepływu oraz naprężeń ścinających, świadczące o niejednorodnych oddziaływaniach mechanicznych roztworów na ich powierzchni podczas mycia w systemie CIP, a tym samym niejednorodnych warunkach mycia, wpływających na efekt końcowy procesu;
- najtrudniejsze do umycia obszary w badanych elementach rurociągów to: w kolanku – wewnętrzny łuk kolanka, cały odcinek tzw. ślepej końcówki oraz w zaworach - miejsca styku elementu ruchomego z uszczelką;
- intensywne usuwanie zanieczyszczeń następuje w pierwszych minutach mycia, natomiast wydłużanie czasu mycia w sposób nieznaczny wpływa na poprawę końcowego efektu mycia;

- poznanie warunków przepływu występujących w przestrzeniach instalacji mytych w systemie CIP daje możliwość przewidywania problemów związanych z utrzymaniem ich w czystości oraz ukierunkowuje na projektowanie takich rozwiązań konstrukcyjnych lub procesowych, które pozwolą uniknąć ich niedomocy i utracie higieny produkcji.

A.1.2. Określono wpływ wykończenia powierzchni konstrukcyjnych (na przykładzie stali kwasoodpornej AISI 316) na mikrostrukturę i ilość osadów mlekowych tworzących się w wysokich temperaturach

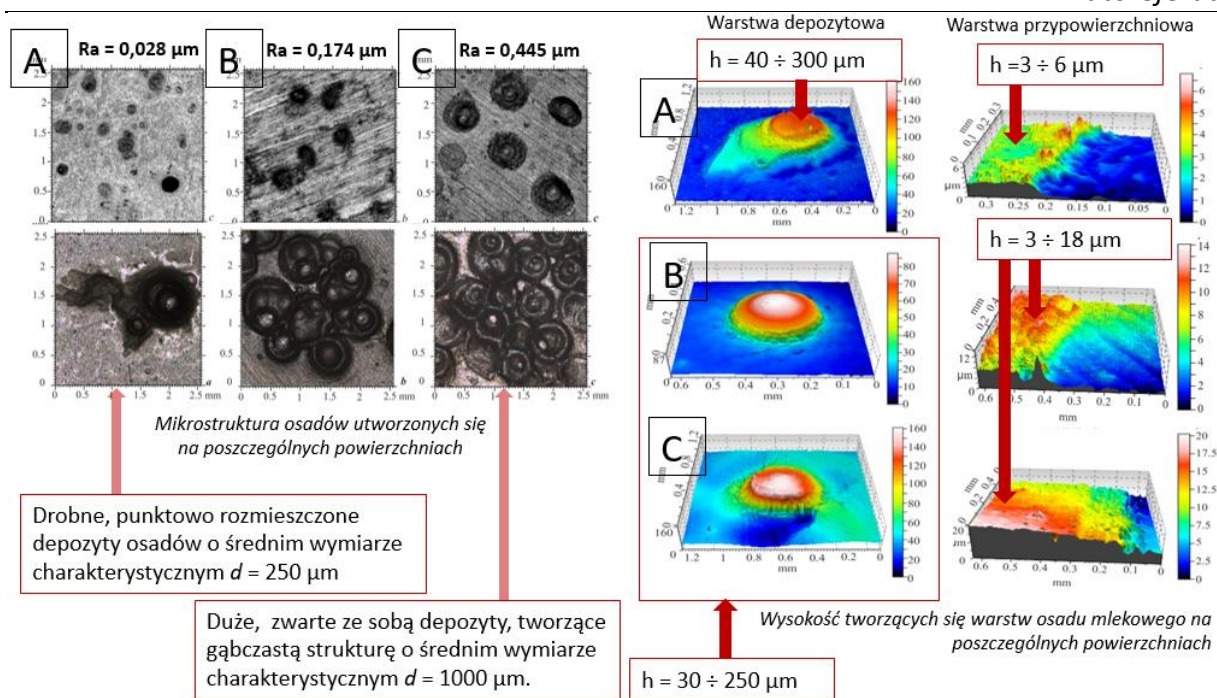
Kolejne analizy ukierunkowano na materiały konstrukcyjne przeznaczone do budowy urządzeń dla przetwórstwa żywności oraz wynikającą z ich wykończenia adhezyjność, wpływającą na wiązanie osadów produkcyjnych w procesie wytwarzania żywności. Materiałom przeznaczonym do kontaktu z żywnością stawia się wysokie wymagania w zakresie higieny, braku toksyczności, łatwości mycia i estetyki. Ogólne zalecenia dotyczące ich stosowania w kontakcie z żywnością można znaleźć w rozporządzeniach unijnych 852/2004 i 1935/2004 a także w publikacjach naukowych (Tamime, 2008; Lelieveld i in., 2003; Holah, 2000). Dopuszczone do kontaktu z żywnością materiały konstrukcyjne posiadają różną zdolność wiązania zanieczyszczeń na powierzchni oraz charakteryzują się różną zwilżalnością. Uzależnione jest to m.in.: od stopnia ich wykończenia, mikrostruktury powierzchni oraz profilu chropowatości i swobodnej energii powierzchniowej (Augustin i in., 2007; Beuf i in., 2003; Rosmaninho i in., 2007; Boyce i in., 2010; Jullien i in., 2002). Badania prowadzone w zakresie wykończenia powierzchni ze stali nierdzewnej wskazują, że minimalna zmiana ich profilu chropowatości, określonego średnią arytmetyczną wysokości powierzchni Ra , istotnie wpływa na ilość tworzących się osadów oraz łatwość ich usuwania w procesie mycia.

Kierując się powyższymi przesłankami określono zależność pomiędzy chropowatością powierzchni a ilością tworzących się osadów. W tym celu na powierzchni ze stali nierdzewnej AISI 316, o różnym profilu chropowatości (A: $Ra = 0,028 \mu\text{m}$; B: $Ra = 0,174 \mu\text{m}$; C: $Ra = 0,445 \mu\text{m}$), nanoszono zanieczyszczenia białkowo-tłuszczowe, odwzorowując warunki pasteryzacji mleka ($T = 90^\circ\text{C}$). Osady nanoszono przez 30 minut, dokonując w ustalonym interwale czasowym (co 5 minut) pomiaru przyrostu ich masy na analizowanych płytkach. Masę zaadsorbowanych na powierzchniach osadów przeliczono na jednostkę powierzchni. Strukturę geometryczną analizowanych powierzchni określono zgodnie z ISO 4287 oraz ISO/DIS 25178 na podstawie

średniej arytmetycznej wysokości powierzchni Ra . Badania profilowe chropowatości analizowanych płytek oraz grubość utworzonych osadów i ich mikrostrukturę oznaczono z wykorzystaniem konfokalnego laserowego mikroskopu skaningowego LEXT OLS4000 firmy OLYMPUS, metodą CLSM (ang. Confocal Laser Scanning Microscopy). Możliwość wykorzystania tej metody pomiarowej zaprezentowano w pracy **H32** (Zał. 3., pkt 2.). Obszar próbkowania wynosił $250\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$. Przetwarzanie cyfrowe obrazu, renderowanie 3D i analizę obrazu wykonano z zastosowaniem oprogramowania TalyMap Platinum 4.0. Badania umożliwiły określenie średnic poszczególnych depozytów tworzących się na powierzchniach, ilość zaadsorbowanych depozytów w analizowanym obszarze oraz wysokość (grubość) powstałych osadów. Wyniki tych prac przedstawiono w pracy **O3**.

– **Określono strukturę morfologiczną tworzących się osadów**

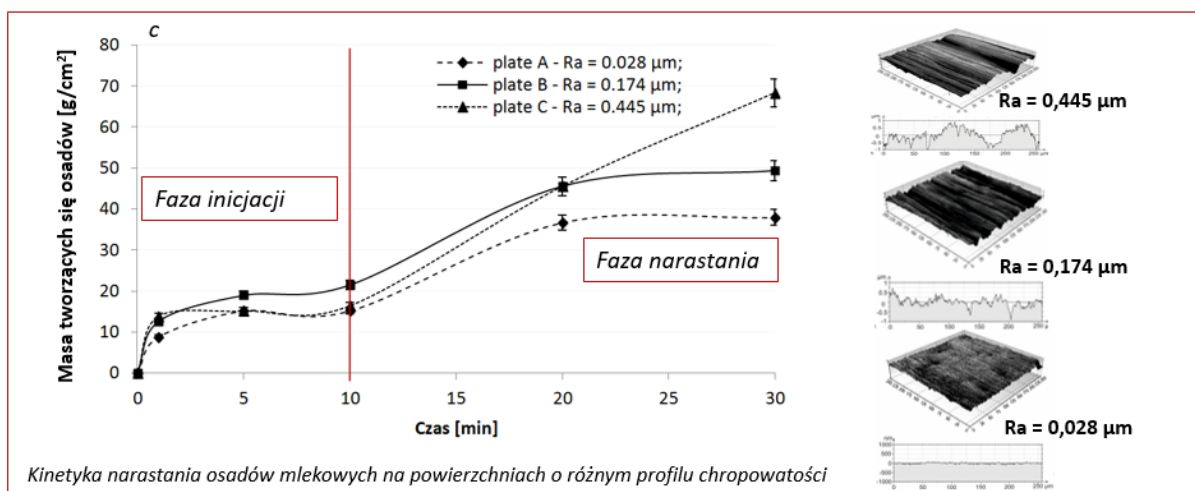
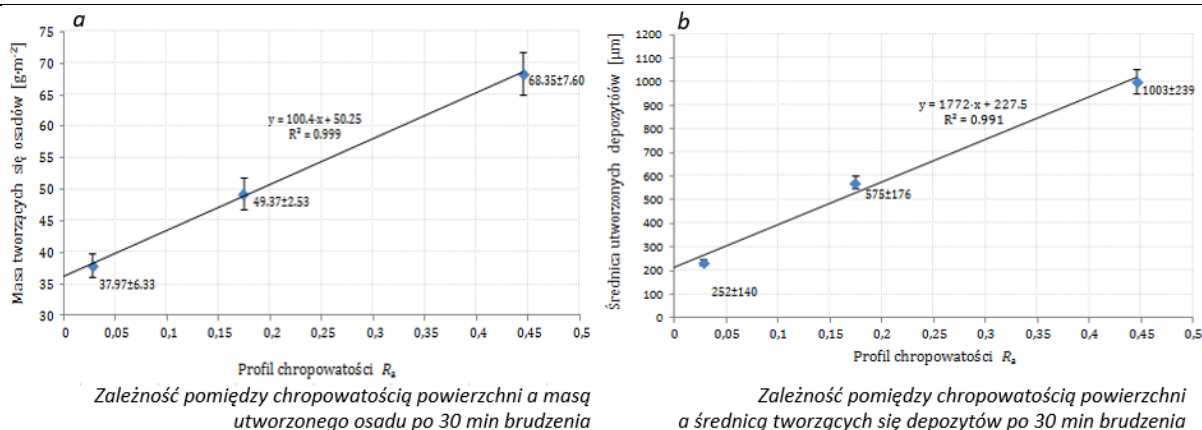
Wykazano, że wzrost profilu chropowatości powierzchni ze stali nierdzewnej powoduje wzrost ilości i grubości tworzących się na niej osadów (rys. 6.). Przykładowo na powierzchni o chropowatości $Ra = 0,028\ \mu\text{m}$ powstawały drobne, punktowo rozmieszczone depozyty osadów białkowo-tłuszczowych o średnim charakterystycznym wymiarze ok. $d = 250\ \mu\text{m}$, podczas gdy na powierzchni o profilu $Ra = 0,445\ \mu\text{m}$ depozytów tych było znacznie więcej. Tworzyły one gąbczastą strukturę a ich średni wymiar charakterystyczny wynosił ok. $d = 1000\ \mu\text{m}$. Na podstawie analizy wyników badań dotyczących wysokości (grubości warstwy) tworzących się depozytów na analizowanych powierzchniach wykazano, że na płytce o profilu chropowatości $Ra = 0,028\ \mu\text{m}$ wysokość osadów mieściła się w granicach od 40 do 300 μm natomiast na pozostałych powierzchniach była porównywalna i mieściła się w zakresie $30 \div 250\ \mu\text{m}$. Badania mikrostruktury tworzących się osadów, wykazały obecność dodatkowej, przypowierzchniowej warstwy osadu. Warstwa ta pokrywała całą powierzchnię badanych płytek a jej grubość była różna w zależności od wykończenia badanych powierzchni. W przypadku powierzchni o chropowatości $Ra = 0,028\ \mu\text{m}$ wysokość tej warstwy mieściła się w granicach od 3 do 7 μm natomiast na pozostałych powierzchniach była porównywalna i mieściła się w zakresie $h = 3 \div 18\ \mu\text{m}$.



Rys. 6. Mikrostruktura powstających osadów na powierzchniach o różnym profilu chropowatości: A - $Ra = 0,028 \mu\text{m}$; B - $Ra = 0,174 \mu\text{m}$; C - $Ra = 0,445 \mu\text{m}$

– Określono zależność pomiędzy chropowatością powierzchni ze stali nierdzewnej a ilością tworzących się depozytów i ich wielkością oraz wyznaczono kinetyki narastania osadów wyznaczając ich charakterystyczne etapy tworzenia się

Określone zależności pomiędzy profilem chropowatości a masą utworzonych osadów (rys. 7a.) i ich średnim wymiarem charakterystycznym (warstwa depozytowa - rys. 7b.) wykazały charakter liniowy. Oznacza to, że wzrost chropowatości powierzchni ze stali nierdzewnej, określonej wskaźnikiem Ra , w sposób proporcjonalny wpływa na przyrost masy i wielkość struktur tworzących się osadów. Kinetyki narastania osadów na poszczególnych powierzchniach, wyznaczone na podstawie pomiaru przyrostu ich masy, umożliwiły wskazanie dwóch charakterystycznych etapów tworzenia się zanieczyszczeń – etapu inicjacji (pierwsze 10 minut) oraz etapu narastania (rys. 7c.). Jest to zgodne z badaniami innych autorów (Augustin i in, 2007). Ostatecznie wykazano, że końcowa masa utworzonego osadu na powierzchni ze stali nierdzewnej o profilu chropowatości $Ra = 0,445$ była dwukrotnie większa niż masa utworzonego osadu na powierzchni o profilu $Ra = 0,028 \mu\text{m}$.



Rys. 7. Określone zależności: a – pomiędzy chropowatością powierzchni a masą utworzonego osadu; b – pomiędzy chropowatością powierzchni a średnicą tworzących się depozytów; c – kinetyka tworzenia osadów mlekowych na powierzchniach o różnej chropowatości

O3. Piepiórka-Stepuk J., Tandecka K., Jakubowski M., 2016. An analysis of milk fouling formed during heat treatment on a stainless steel surface with different degrees of roughness. Czech Journal of Food Science, 34(3), 271–2792.

Efektom przeprowadzonych analiz jest stwierdzenie, że:

- chropowatość powierzchni ze stali nierdzewnej ma duży wpływ na ilość, grubość i struktury tworzących się na niej osadów w trakcie termicznej obróbki mleka, przy czym w zakresie analizowanych danych zależność tą można opisać funkcją liniową;
- zidentyfikowane dwie warstwy osadu białkowo-tłuszczowego (przypowierzchniowa i w postaci depozytów), tworzące się na powierzchniach w czasie termicznej obróbki mleka, mogą mieć istotne znaczenie w dostosowaniu procedury mycia w systemie CIP celem ich usunięcia, przy czym poznanie ich składu oraz sił adhezji wiążących

je z powierzchnią może być pomocne w doborze substancji aktywnych znajdujących się w środkach myjących oraz w ustaleniu parametrów hydromechanicznych procesu mycia;

- normatywne wytyczne dotyczące maksymalnej dopuszczalnej chropowatości powierzchni konstrukcyjnych, dedykowanych dla przetwórstwa spożywczego ($Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$) wydają się być zawyżone i potencjalnie niebezpieczne dla utrzymania higieny powierzchni urządzeń biorących udział w procesach wymiany ciepła (np. płyt wymienników ciepła).

A.1.3. Dokonano polioptymalizacji procesu mycia w systemie CIP z uwzględnieniem czystości powierzchni i energochłonności procesu jednocześnie

Zmienne warunki przepływu wynikają z ukształtowania wewnętrznych powierzchni instalacji tworzących przestrzenie przepływowe, ale również zależą od zastosowanych materiałów konstrukcyjnych i ich wykończenia. Utrzymanie ich w czystości zależy od odpowiednio opracowanej procedury CIP (programu mycia) uwzględniającej wzajemne oddziaływanie poszczególnych czynników mycia. Praktyka przemysłowa opiera się głównie na wzmacnianiu oddziaływań temperatury lub substancji chemicznych. Skutkuje to wzrostem temperatury roztworów myjących lub zawyżaniem stężeń chemicznych substancji myjących a jednocześnie przyczynia się do wysokiego zużycia energii elektrycznej, zużycia wody i wytwarzania ścieków wysoko obciążonych np. BZT₅ i ChZT. Duże nakłady energetyczne w zakładach na procesy mycia instalacji produkcyjnych w systemie CIP, wiążą się wówczas z koniecznością podgrzewania roztworów myjących do wysokiej temperatury i ich utrzymywania w tej temperaturze w czasie mycia (Diakun i in., 2012). Podobnie jest ze zużyciem wody i ilością odprowadzanych przez zakłady ścieków. Są to podstawowe składowe kosztów mycia, które dodatkowo ze względu na duży ładunek chemiczny, są czynnikami obciążającymi środowisko naturalne. Problemy te stanowią element zrównoważonego rozwoju, który jest rozpatrywany w aspekcie ekonomicznym, środowiskowym i społecznym, zgodnie ze strategią czystszej produkcji.

– **Opracowano i przyjęto wielokryterialną funkcję optymalizacji procesu mycia, gdzie kryteria optymalizacji stanowiły funkcje regresji określające stopień umycia J oraz energochłonność procesu mycia E**

W przedstawionym kontekście energetycznym oraz istotności hydrodynamicznych oddziaływań w procesie mycia dokonano wielokryterialnej optymalizacji warunków mycia instalacji rurociąkowej oraz płytowego wymiennika ciepła. Wyznaczony zbiór optymalnych

warunków mycia umożliwia minimalizację zużycia energii elektrycznej i zwiększenie oddziaływania czynników hydromechanicznych. Wyniki tych analiz zaprezentowano w pracy **04**. Kryterium optymalizacji stanowią funkcje regresji opracowane przez Piepiórka-Stepuk (2012) i Mierzejewska (2011), określające stopień umycia prostego odcinka rurociągu J_p i płytowego wymiennika ciepła J_{PHE} oraz energochłonność procesu mycia tych elementów instalacji (E_p ; E_{PHE}). Energochłonność wyliczono na podstawie całkowitego zapotrzebowania na energię elektryczną, jako sumę jednostkowego zapotrzebowania na energię do napędu pompy (E_{Pi}) i podgrzewania czynnika myjącego (E_{Gi}). Natomiast stopień umycia J uwzględnił oddziaływania takich czynników zmiennych jak prędkość przepływu, temperatura, czas, ciśnienie i objętość roztworów myjących $J = f(u, T, t, p, V)$.

Procedurę polioptymalizacyjną przeprowadzono uwzględniając jednocześnie minimalizację zużycia energii oraz maksymalizację skuteczności mycia, przy czym zakresy czynników zmiennych (u, T, t, p, V), tworzyły granice modelu analitycznego. Do obliczeń opracowano wielokryterialną funkcję celu (14), w której przyjęto sumowanie składnika uwzględniającego zapotrzebowanie energetyczne E_C i stopień umycia J .

$$K = w_E \cdot E_C \cdot k + (10 - J) \cdot (1 - k) \rightarrow \min \quad (14)$$

Zakładając, że funkcja wielokryterialna dąży do minimum, odwrócono kierunek oddziaływania ilościowego stopnia umycia J , wprowadzając tę wielkość ze znakiem ujemnym (-), wykorzystując jednocześnie fakt, że stopień umycia J wyrażono wartościami w zakresie ($0 \div 10$).

– **Wyznaczono współczynnik proporcjonalności uwzględniający kryteria podstawowe k oraz współczynnik zrównoważenia oddziaływania energii i jakości mycia w_E**

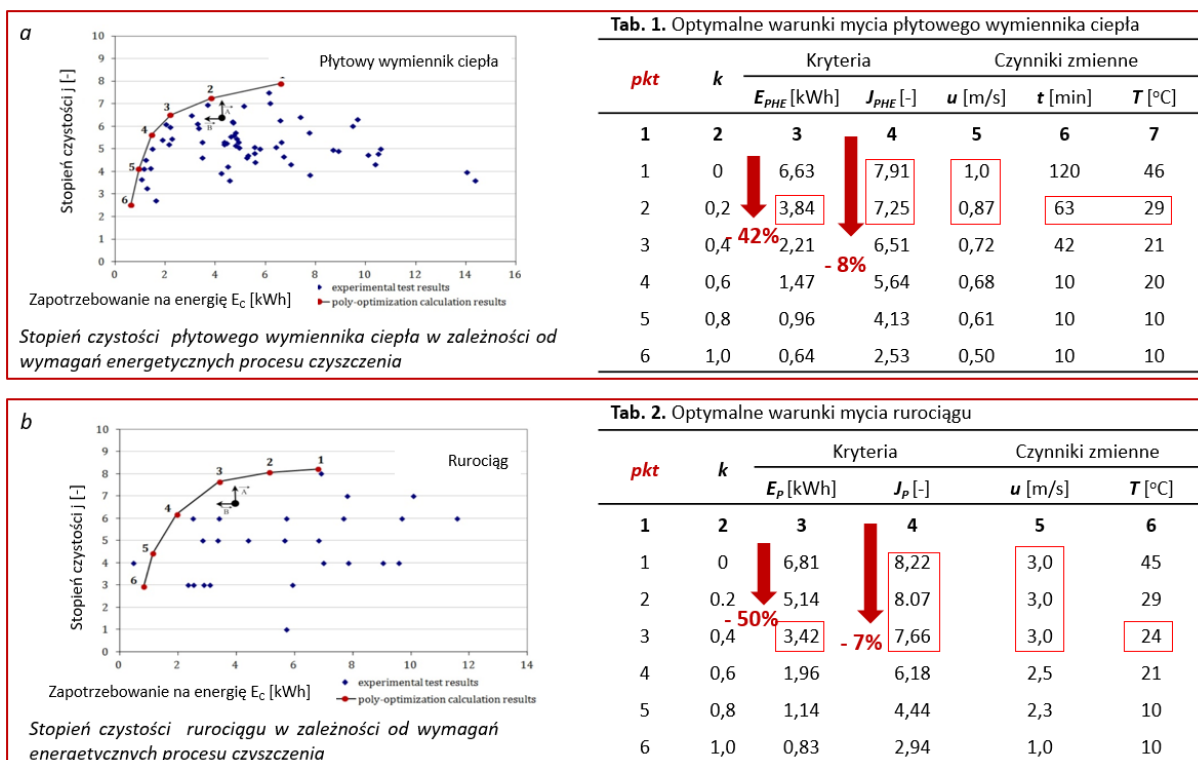
Wielkość k oznacza współczynnik proporcjonalności uwzględniający kryteria podstawowe E_C i J . Założono, że współczynnik ten przyjmuje wartości w zakresie ($0 - 1$), co oznacza, że dla $k = 1$ uwzględnia się tylko kryterium minimalizacji energii, zaś dla $k = 0$ tylko kryterium maksymalizacji skuteczności mycia. Energia i jakość mycia przyjmują różne zakresy wartości. Dlatego w równaniu (14) wprowadzono współczynnik zrównoważenia oddziaływania energii i jakości mycia w_E [kWh^{-1}]. Współczynnik ten jest również wielkością przeliczeniową energii na wielkość bezwymiarową, co umożliwia sumowanie składowych równania a także dopasowanie ilościowe E_C i J . Współczynnik zrównoważenia w_E obliczono w taki sposób, aby dla

współczynnika proporcjonalności $k = 0,5$ wystąpiła równoważność oddziaływania wartości energii i skuteczności mycia. Z przeprowadzonej analizy zakresu wartości funkcji energii i jakości mycia wynika, że jego wartość dla płytowego wymiennika ciepła wynosi $w_{E-PHE} = 2,7 \text{ kWh}^{-1}$, a dla rurociągu poddawanego myciu $w_{E-P} = 4,2 \text{ kWh}^{-1}$. Obliczenia optymalizacyjne dla przyjętej funkcji celu (14) wykonywano funkcją „fmincon” z pakietu programu MATLAB. Analizy umożliwiły wyznaczenie optymalnych warunków mycia rurociągów i płytowego wymiennika ciepła z uwzględnieniem korzystnych oddziaływań czynnika myjącego bez stosowania chemicznych środków myjących.

– **Wyznaczono zbiór optymalnych warunków mycia rurociągu i płytowego wymiennika ciepła**

Na podstawie przeprowadzonych analiz wyznaczono zbiór rozwiązań optymalnych, które mogą znaleźć zastosowanie w warunkach rzeczywistych do opracowywania programów mycia analizowanych obiektów, ze szczególnym uwzględnieniem przemysłu mleczarskiego, gdyż dla takich zanieczyszczeń prowadzono badania eksperymentalne. Uzyskane energetyczne i jakościowe efekty procesu mycia płytowego wymiennika ciepła i rurociągu były porównywalne (rys. 8a,b.). Zbliżone średnie zużycie energii elektrycznej na przeprowadzenie mycia w systemie CIP obu obiektów wynikało z prowadzenia procesu na tej samej instalacji i w tych samych warunkach. W tym przypadku ilość zużytej energii zależała od wielkości i mocy instalacji mycia a także od temperatury roztworu myjącego, do której był nagrzewany. Natomiast porównywalny efekt skuteczności mycia obu testowanych instalacji wynikał jedynie z uzyskania maksymalnej czystości na poziomie 8/10 punktów. Efekt ten był jednak różny dla różnych parametrów procesu, przy czym efekt mycia rurociągów dla tych samych warunków procesu najczęściej oceniano wyżej niż efekt mycia płyt wymiennika ciepła. Wynika to z różnego ukształtowania wewnętrznych powierzchni obu elementów oraz wynikających z tego warunków przepływu w ich przestrzeniach. Otrzymane zależności między skutecznością mycia (stopniem czystości) a nakładem energetycznym wskazały, że przy kryterium minimalizacji energii uzyskuje się bardzo niski poziom umycia, poniżej 3/10 pkt dla granicznych wartości parametrów (najniższa prędkość przepływu, bez podgrzewania wody w najkrótszym czasie). Najefektywniej skuteczność mycia poprawia zwiększanie prędkości przepływu, co jest zgodne z wcześniejszymi analizami. Stąd najlepsze efekty mycia uzyskano dla najwyższych wartości prędkości przepływu, ale również dla najdłuższego czasu mycia i temperatury roztworu ok. 45°C (optymalna temperatura rozpuszczalności osadów mlekowych). Uwzględniając kryterium energetyczne

procesu pojawiają się także dodatkowe optymalne programy mycia, po których zastosowaniu skuteczność mycia nie różni się statystycznie od najlepszych wartości wynikowych a możliwe jest jednocześnie obniżenie energochłonności procesu (tab. 1 – program 2 dla wymienników ciepła i tab. 2 – program 3 dla rurociągu).



Rys. 8. Optymalne parametry mycia a – płytowego wymiennika ciepła; b – rurociągu, uwzględniające energochłonność i efektywność procesu, przedstawione w postaci graficznej i tabelarycznej

Przeprowadzone badania wykazały, że w programach, w których zarejestrowano najwyższe całkowite zużycie energii elektrycznej (w zakresie 12÷14 kWh) nie uzyskano dobrych efektów mycia (rys. 8a,b.). Maksymalna czystość powierzchni płyt wymiennika oraz rurociągu dla tych programów osiągała wartość w granicach 4 ÷ 6 pkt. Podobną skuteczność mycia (ok. 4 pkt.) uzyskano dla programów, w których zarejestrowano najniższe całkowite zużycie energii (ok. 1 kWh), związane wyłącznie z pracą pompy wirowej podczas mycia.

Dodatkowe badania przeprowadzone w tym zakresie wykazały, że wartość współczynnika korelacji Pearsona dla całkowitego zużycia energii elektrycznej E_c i uzyskiwanej czystości elementów poddawanych myciu J była bliska zeru, co świadczy o braku zależności pomiędzy analizowanymi wielkościami. Wykazano, że główną przyczyną wysokiego zużycia energii elektrycznej w procesie mycia instalacji produkcyjnych jest wysoka temperatura czynników myjących, przy czym jednocześnie wykazano, że powyżej określonej wartości, czynnik

ten nie wpływa na poprawę efektu mycia. Dodatkowe analizy przeprowadzone w kierunku korelacji energochłonności procesu mycia w systemie CIP oraz skuteczności mycia wykazały, że wraz ze wzrostem zużycia energii elektrycznej na podgrzewanie wody płuczącej, skuteczność usuwania zanieczyszczeń mlekowych z instalacji maleje. Dla tych zmiennych (E_{Gi} ; J) uzyskano ujemny współczynnik korelacji Pearsona, na poziomie $r = -0,17$. Należy jednak podkreślić, że o wartości współczynnika korelacji decydować będzie rodzaj usuwanego osadu, którego rozpuszczalność w wysokich temperaturach uzależniona jest od składu chemicznego. Wyniki tych analiz stanowią część pracy **H4** (Zał. 3., pkt 2.) niewchodzącej w skład osiągnięcia. W niektórych przypadkach podnoszenie temperatury roztworu myjącego będzie uzasadnione, gdyż będzie sprzyjało rozpuszczaniu osadów poprodukcyjnych (np. osady tłuszczowe). W innych przypadkach będzie wręcz niekorzystne (np. osady mlekowe). Wykazano również, że wraz ze wzrostem energii elektrycznej potrzebnej do pracy pompy wirowej wzrasta skuteczność mycia. W przypadku mycia wymiennika ciepła współczynnik korelacji Pearsona dla tych zmiennych był dodatni i wyniósł $r = 0,74$. Zatem podwyższenie prędkości przepływu w procesie mycia nie tylko poprawia skuteczność mycia, co zaobserwowali inni badacze (Goode i in., 2010), ale przy jednoczesnym obniżeniu temperatury czynników myjących wpłynie na obniżenie kosztów związanych z przeprowadzeniem procesu. Negatywną stroną wzmacniania oddziaływań hydromechanicznych w czasie mycia w przepływie może być ścieranie i degradacja powierzchni produkcyjnych. W tym zakresie należy prowadzić dalsze badania.

O4. Piepiórka-Stepuk J., Diakun J., Mierzejewska S. 2016. Poly-optimization of cleaning conditions for pipe systems and plate heat exchangers contaminated with hot milk using the Cleaning In Place method. Journal of Cleaner Production, 112, 946-954.

Efektom przeprowadzonych analiz jest stwierdzenie, że:

- każde urządzenie poddawane procesowi mycia w systemie CIP powinno posiadać indywidualnie opracowany program mycia, aby końcowy efekt mycia był zadawalający;
- przeprowadzona optymalizacja procesu mycia umożliwiła wyznaczenie takich warunków mycia rurociągu oraz płytowego wymiennika ciepła dla których uzyskuje się najlepszy efekt mycia;
- optymalne warunki mycia, uwzględniające przyjęte kryteria optymalizacji (minimalizacja zużycia energii na proces mycia oraz maksymalizacja efektu mycia), uzyskano dla najwyższych prędkości przepływu roztworów myjących, natomiast stosowanie

wysokiej temperatury czynnika myjącego i wydłużanie czasu mycia, generuje dodatkowe zużycie energii bez uzyskania istotnego efektu mycia;

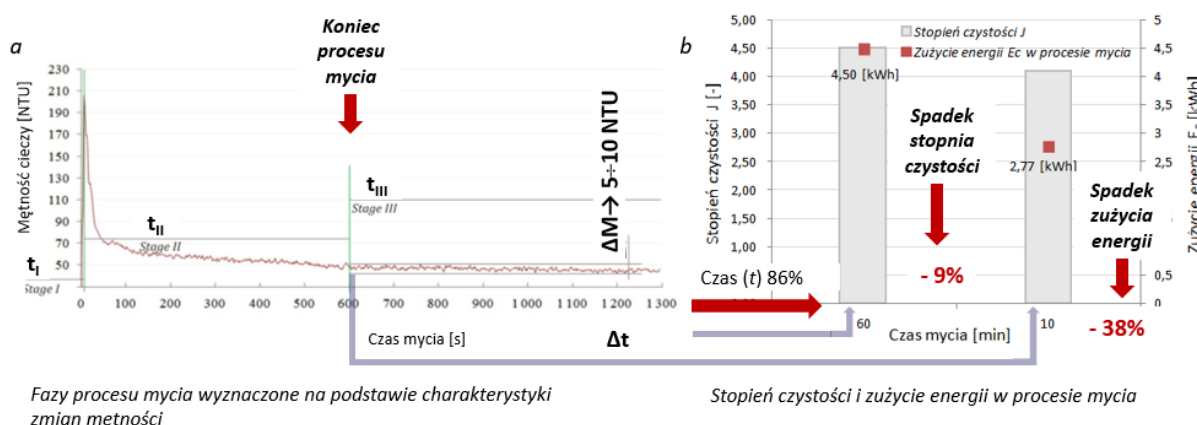
- zbiór rozwiązań optymalnych, może mieć praktyczne zastosowanie w warunkach rzeczywistych do opracowywania programów mycia analizowanych obiektów.

A.2. Opracowano metodę automatycznego monitorowania procesu mycia CIP z możliwością jednoczesnego sterowania programem mycia, zależnym od stopnia wymytych osadów z instalacji (O5, O9)

Kolejne badania i analizy ukierunkowano na pomiar wybranych parametrów roztworów myjących w systemie on-line, celem określenia możliwości sterowania procesem mycia CIP, czego wymiernym efektem jest skrócenie czasu mycia. W praktyce przemysłowej jest to czynnik ustalany na podstawie doświadczenia technologów i producentów środków myjących, przy czym w zakładowych programach mycia jest on stały dla poszczególnych etapów procedury CIP (płukanie wstępne, mycie właściwe, płukanie międzyoperacyjne i dezynfekcja). Badania dotyczące wpływu wybranych czynników na skuteczność mycia, zrealizowane w ramach pracy doktorskiej wykazały, że czas jest funkcją temperatury i prędkości przepływu. Według innych autorów zależy on również od stosowanych chemicznych roztworów myjących i ich stężeń (Xin i in., 2004; Ang i in., 2006; Liu i in., 2006; Fickak i in., 2011). Wydłużanie procesu mycia jest ekonomicznie nieuzasadnione, gdyż nie wpływa na poprawę efektów mycia a podnosi koszty związane z dostarczaniem energii do podgrzewania roztworów chemicznych i utrzymywania ich w określonej temperaturze. Ponadto heterogeniczny charakter osadów tworzących się na powierzchniach w toku produkcji sprawia, że nie zawsze są one jednakowo wmywane w ustalonym czasie. Trudno jest określić optymalny czas trwania procesu mycia CIP również z tego względu, że jest to proces zależny od rodzaju instalacji poddawanej myciu oraz jej wielkości (Wilson i in., 2002; Leliveld i in., 2003; Xin i in., 2004). Przeprowadzone w tym zakresie badania wykazały, że parametrem najlepiej korelującym stan czystości mytej powierzchni jest mętność cieczy myjącej. Pomiar tego parametru najlepiej odzwierciedla kinetykę procesu mycia CIP, na podstawie której możliwe jest sterowanie programem mycia. Wyniki tych badań opublikowano w pracy **O5** i opatentowano **O9**. Zostały one również nagrodzone wyróżnieniem na III Sympozjum Inżynierii Żywności w Warszawie (26-27 czerwca 2012 roku).

– Wyznaczono III fazy procesu mycia oraz określono charakterystyczne wskaźniki monitorowania

Wyniki pomiarów zmian mętności roztworów myjących podczas trwania procesu, umożliwiły wyznaczenie kinetyki mycia, na podstawie której określono charakterystyczne fazy, opisane jako: intensywne wymywanie osadu (faza I), usuwanie osadu mocno związanego z powierzchnią (faza II) oraz domywanie osadu (faza III) (rys. 9a.). Częstkowe wyniki tych prac opublikowano w publ.: H15, H23, H24 (Zał. 3., pkt 2.). Na podstawie kolejnych analiz wykazano, że dla sterowania procesem mycia istotne jest zakończenie fazy II i rozpoczęcie fazy III. Następuje to w momencie stabilizacji wartości mętności cieczy przepływającej przez instalację. Aby określić moment zakończenia jednej fazy i rozpoczęcie drugiej niezbędne jest wprowadzenie określonych wskaźników, w tym przypadku wartości ΔM w określonych granicach, np. $5 \div 10$ jednostek NTU (Nephelometric Turbidity Units). Jeśli wartość różnicy mętności w przyjętym zakresie ΔM nie zmienia się w czasie Δt , to można podjąć decyzję o zakończeniu procesu mycia.



Fazy procesu mycia wyznaczone na podstawie charakterystyki zmian mętności

Stożek czystości i zużycie energii w procesie mycia

Rys. 9. Wyniki badań dotyczące możliwości aplikacji pomiaru mętności roztworów celem sterowania procesem mycia CIP (badania przykładowe dotyczące mycia płytowego wymiennika ciepła): a – fazy procesu mycia wyznaczone na podstawie charakterystyki zmian mętności; b – porównanie efektywności i energochłonności procesu mycia pomiędzy dwoma analizowanymi programami mycia

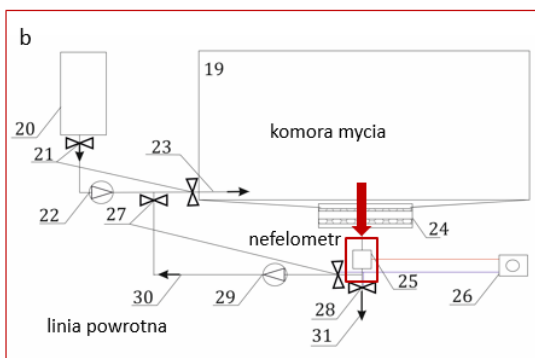
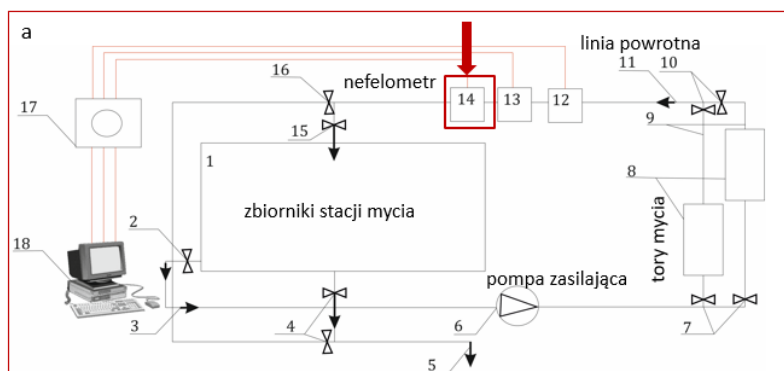
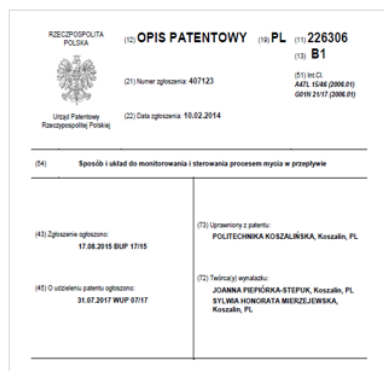
– Zaproponowano zintegrowanie przyrządu optycznego (nefelometru) z układem sterowania, co daje możliwość automatycznego sterowania procesem mycia

Dalsze analizy prowadzone w oparciu o monitorowanie mętności roztworów, wykazały możliwość efektywnego mycia w systemie CIP wewnętrznych powierzchni instalacji z jednoczesnym zmniejszeniem zużycia energii elektrycznej, wynikającym ze skrócenia czasu mycia (rys. 9b.). Wykazano bowiem, że czystość powierzchni elementu testowego po czasie

mycia określonym na podstawie kinetyki procesu (czas, po którym mętność cieczy stabilizowała się – 10 minut) nie różniła się w sposób istotny statystycznie ($\alpha = 0,05$) od czystości powierzchni elementu po myciu w obligatoryjnie przyjętym czasie (60 minut) dla prowadzonej procedury mycia. Wyniki tych badań przedstawiono w pracy **O5**. Całkowity stopień czystości powierzchni po 60 minutach mycia oceniono na poziomie 4,47 pkt natomiast po 10 minutach na poziomie 4,07 pkt. Czas mycia skrócono o 50 minut, czyli 86% w stosunku do czasu początkowego, natomiast zużycie energii elektrycznej obniżyło się o 38%. Proces mycia w obu przypadkach prowadzono w temperaturze $T = 45^{\circ}\text{C}$.

– Opracowano i opatentowano sposób i układ do monitorowania i sterowania procesem mycia w przepływie

Wyniki przeprowadzonych analiz dały podstawę do opracowania założeń i sformułowania koncepcji zastrzeżeń patentowych w zakresie monitorowania i sterowania procesem mycia w systemie CIP. Opatentowane rozwiązanie zakłada, że pomiar mętności może mieć zastosowanie nie tylko w systemach CIP (rys. 10a.), ale również w myjkach komorowych i tunelowych (rys. 10b.), w których może stanowić dodatkowe kryterium kontroli procesu mycia.



Przykład rozwiązania dotyczący układu w stacji mycia: 1 – zbiorniki stacji mycia; 2 – zawór odcinający (zasilający); 3 – linia zasilająca; 4 – zawór odcinający (zlewowy); 5 – kanał zlewowy; 6 – pompa zasilająca; 7 – zawory odcinające wlotowe; 8 – tory mycia; 9 – urządzenia poddawane procesowi mycia; 10 – zawory odcinające wylotowe; 11 – linia powrotna; 12 – pH-metr; 13 – konduktometr; 14 – przyrząd optyczny - nefelometr; 15 – zawór odcinający, zawracający cieczę myjącą do zbiorników; 16 – zawór odcinający, wyprowadzający cieczę myjącą z instalacji mycia; 17 – karta pomiarowa; 18 – stacja monitorująco-sterująca.

Przykład rozwiązania dotyczący układu w myjkach komorowych i tunelowych: 19 – komora mycia; 20 – doprowadzenie mediów myjących; 21 – zawory odcinające (zasilające); 22 – pompa zasilająca; 23 – linia doprowadzająca cieczę myjącą do dysz natryskowych umieszczonych w komorze mycia; 24 – filtr; 25 – nefelometr; 26 – urządzenie monitorująco-sterujące; 27 – zawór odcinający, zawracający cieczę myjącą do komory mycia; 28 – zawór odcinający, wyprowadzający cieczę myjącą z komory mycia; 29 – pompa zawracająca cieczę myjącą do komory mycia; 30 – linia powrotna; 31 – kanał zlewowy.

Rys. 10. Opatentowane rozwiązanie: a – przykład dotyczący układu w stacji mycia CIP; b – przykład dotyczący układu w myjkach komorowych i tunelowych wykorzystujących zasadę mycia w przepływie

Proponowane rozwiązanie zakłada zastosowanie optycznego przyrządu do pomiaru światła rozproszonego, mierzącego mętność popłuczyn i umiejscowionego na rurociągu powrotnym w zamkniętym układzie mycia. Przy jego udziale mierzy się mętność cieczy myjących, przy czym proces mycia przerywa się w momencie ustabilizowania się mętności na określonym poziomie. Poziom ustala się indywidualnie dla danego układu poddawanego myciu lub poprzez wprowadzenie wartości ΔM w określonych granicach jednostek NTU, co oznacza, że jeśli mętność nie zmienia się w tym zakresie, to układ zakończy proces mycia. Przyrząd optyczny podłączony jest do karty pomiarowej, zintegrowanej z kontrolerem programów mycia i urządzeniem monitorująco-sterującym. Pomiar mętności cieczy myjącej w trakcie procesu mycia, daje informację o ilości wmywanych z instalacji produkcyjnej zanieczyszczeń fizycznych, czyli o uzyskaniu określonego poziomu czystości fizycznej. Uzyskane w trakcie pomiaru charakterystyki mętności, obrazują kinetykę procesu mycia, wyszczególniając kolejne fazy mycia. Na tej podstawie możliwe jest podjęcie decyzji o zakończeniu etapu w programie mycia, tj.: płukania wstępnego, mycia ze środkiem chemicznym, lub zakończeniu całego procesu mycia instalacji produkcyjnej. Charakterystyki mętności stanowią podstawę sterowania programem mycia danej instalacji produkcyjnej.

O5. Piepiórka-Stepuk J., Mierzejewska S., Jakubowski M. 2017. *Application of nephelometry to automatic control of cleaning time during cleaning process in Clean in Place system. International Journal of Food Engineering, 13(6), 1-10.*

O9. Piepiórka-Stepuk J. Mierzejewska S. „Sposób i układ monitorowania procesem mycia w przepływie”, nr patentu PL 226306 B1. Urząd Patentowy RP.

Efektom przeprowadzonych analiz jest stwierdzenie, że:

- pomiar zmian mętności roztworów myjących umożliwia poznanie kinetyki procesu mycia, wyszczególnienie kolejnych jego faz i stanowi podstawę sterowania programem mycia instalacji produkcyjnych (płukanie wstępne, mycie zasadnicze),
- pomiar zmian mętności roztworów myjących może również stanowić podstawę działań podejmowanych w programach związanych z bezpieczną produkcją żywności np. w ramach programu GMP, systemu HACCP lub innych standardów (IFS, BRC, ISO 22000);
- kinetyki procesu mycia przebiegają w różny sposób, co związane jest z czasem trwania poszczególnych faz mycia oraz wartością mętności, na której stabilizuje się pomiar;

- zmiany wartości mętności roztworów wynikają z przyjętych w procedurze CIP czynników mycia (temperatury, prędkości przepływu, rodzaju chemicznych roztworów myjących i ich stężeń), co przekłada się na efektywność wymywania zanieczyszczeń z powierzchni jak również zależą od ilości zanieczyszczeń utworzonych w procesie produkcyjnym;
- końcowe wartości mętności można traktować, jako wyznacznik ilości usuniętych zanieczyszczeń (stabilizacja mętności z końcem II fazy mycia);
- zintegrowanie nefelometru z układem sterowania, umożliwi automatyczne sterowanie programem mycia, poprzez przełączanie zaworów w momencie uzyskania mętności na założonym poziomie lub w określonych granicach;
- wartość końcowej mętności należy ustalić indywidualnie dla danego układu mycia lub korzystniej, poprzez wprowadzenie wartości ΔM w określonych granicach (np. 5÷10 jednostek NTU), co oznaczałoby, że jeśli mętność nie zmienia się w tym zakresie w określonym przedziale czasu Δt , to układ zakończy proces mycia.

A.3.Określono charakterystyczne parametry chemicznych roztworów myjących stosowanych do mycia w obiegu zamkniętym oraz zakres ich zmian w okresie użytkowania, stopień ich zanieczyszczenia po procesie mycia i możliwości regeneracji (O6, O7, O8)

Regeneracja roztworów po zakończonym procesie mycia umożliwia ich wielokrotne wykorzystywanie. Jest to jedna z zalet metody mycia CIP, wpływająca na obniżenie zużycia środków chemicznych oraz nakładów finansowych związanych z neutralizacją ścieków (Olajire, 2012). O przydatności roztworów do mycia decydują ich właściwości mikrobiologiczne i fizykochemiczne. Roztwory muszą być wolne od mikroorganizmów oraz pozbawione osadów stałych (Blal i in., 2015; Chen i in., 2012). Dodatkowo muszą spełniać szereg wymagań związanych m.in.: z odpowiednim stężeniem aktywnych substancji myjących w nich zawartych oraz temperaturą, w jakiej stosowane są do mycia (Gésan-Guiziu i in., 2007). Parametry te wpływają na zwilżalność mytych powierzchni, obniżają napięcie powierzchniowe na granicy faz (roztwór – osad – powierzchnia), ułatwiają wnikanie roztworu w struktury osadu i jego rozpuszczanie (Goode i in., 2010).

Regeneracja roztworów polega na ich oczyszczeniu z osadów stałych, uzupełnieniu do określonej objętości i zwiększeniu ich stężenia poprzez dodanie odpowiednich substancji

chemicznych (Merin i in., 2002). Oczyszczanie roztworów z osadów stałych najczęściej prowadzi się z wykorzystaniem zjawiska sedymentacji (Simate i in., 2011; Gönder i in., 2010; Dif i in., 2013). Powszechność tej metody regeneracji roztworów wynika z niskich kosztów jej prowadzenia. Innymi metodami regeneracji są: filtracja membranowa, odwirowywanie osadów lub metody skojarzone (Kaya i in., 2009; Judd i Hillis, 2001; Räsänen i in., 2002). Jednak ze względu na wysokie koszty eksploatacyjne są one rzadziej stosowane.

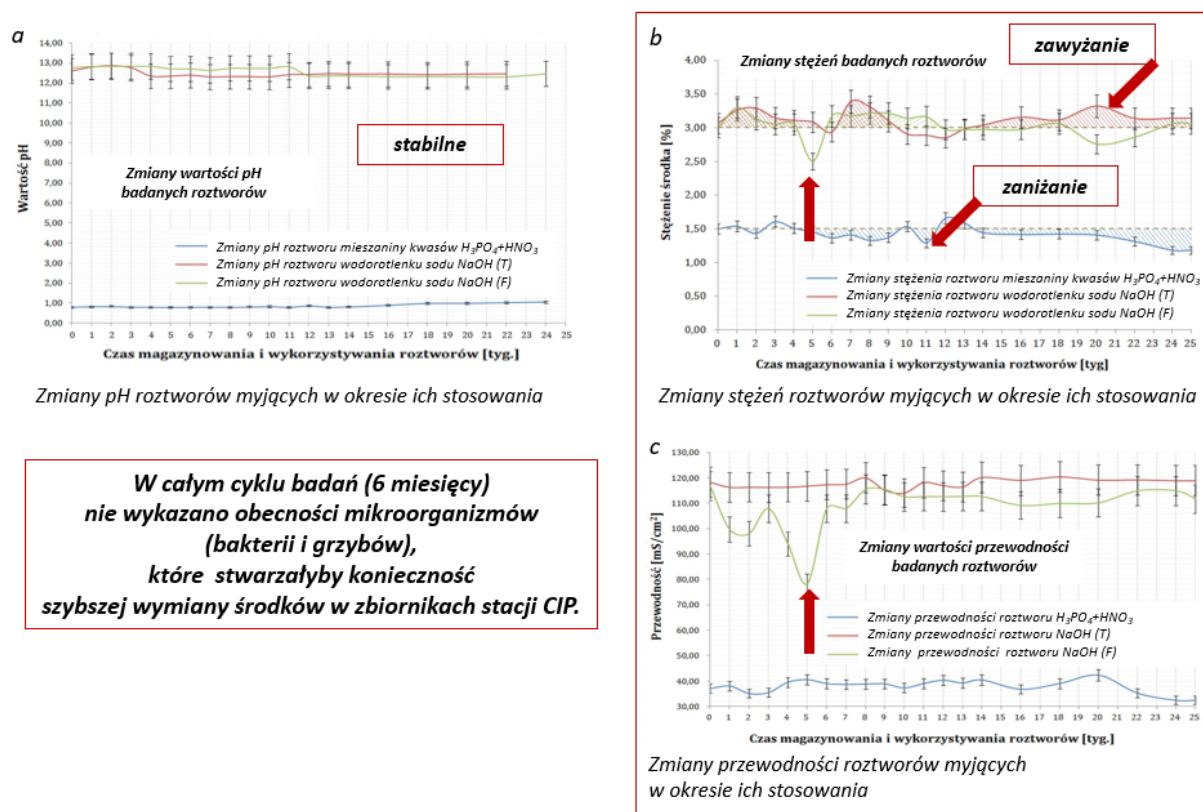
Badania prowadzone w zakresie regeneracji roztworów przemysłowych po procesie mycia urządzeń w browarze metodą CIP wykazały, że w czasie sedymentacji nie następuje ich całkowite oczyszczenie z osadów stałych. Wyniki tych badań opublikowano w pracy **O6**. Opracowanie stanowiło również treść raportu dla browaru sporządzonego w ramach współpracy, w latach 2015-2016. Dalsze prace ukierunkowano na poszukiwanie efektywnych metod regeneracji roztworów, a wyniki tych badań opublikowano w pracach **O7** i **O8**.

A.3.1. Określono stabilność wybranych parametrów roztworów w czasie ich półrocznego wykorzystywania do mycia w systemie CIP oraz efektywność ich regeneracji

Materiał badawczy stanowiły dwa przemysłowe roztwory wodorotlenku sodu (NaOH (F – mycie filtra zaciernego), NaOH (T – mycie zbiorników i drogi brzezki) oraz roztwór mieszaniny kwasów ($H_3PO_4+HNO_3$ – mycie zbiorników i drogi brzezki). Roztwory pobierano z lokalnego browaru ze zbiorników stacji CIP przed procesem mycia naczyń i linii technologicznych w dziale warzelni (po oczyszczeniu) oraz po procesie ich mycia (z osadem przed oczyszczeniem). Próbkę roztworów pobierano raz w tygodniu w objętości ok. 2 litrów przez okres sześciomiesięcznego ich wykorzystywania w zakładzie i poddawano standardowym oznaczeniom pH, kwasowości i przewodności. Oznaczano również ich mętność i poziom koncentracji obecnych w nich osadów, a także powierzchnię cząstek osadów stałych i ich procentowy udział w analizowanej objętości próbki. Badania w tym zakresie prowadzono w oparciu o metodę Shadow Sizing. Próbkę analizowanych roztworów umieszczano w 2,5 mm kuwecie ze szkła optycznego (o objętości 1,4 ml) i oświetlano rozproszonym światłem lasera o długości fali $\lambda = 532$ nm (światło rozproszone filtrem dyfuzyjnym). Źródło światła, o mocy 1W, znajdowało się za kuwetą pomiarową. Przed kuwetą znajdowała się kamera PIV (FlowSence 2M) wyposażona w matrycę o rozdzielczości 1600×1200 pikseli oraz manualny obiektyw makro wraz z zestawem trzech pierścieni pośrednich. Analizę obrazu prowadzono w środowisku DynamicStudio.

– Określono stabilność przewodności, odczynu i stężeń substancji aktywnych zawartych w roztworach a także flokulacje stopnia zanieczyszczenia roztworów

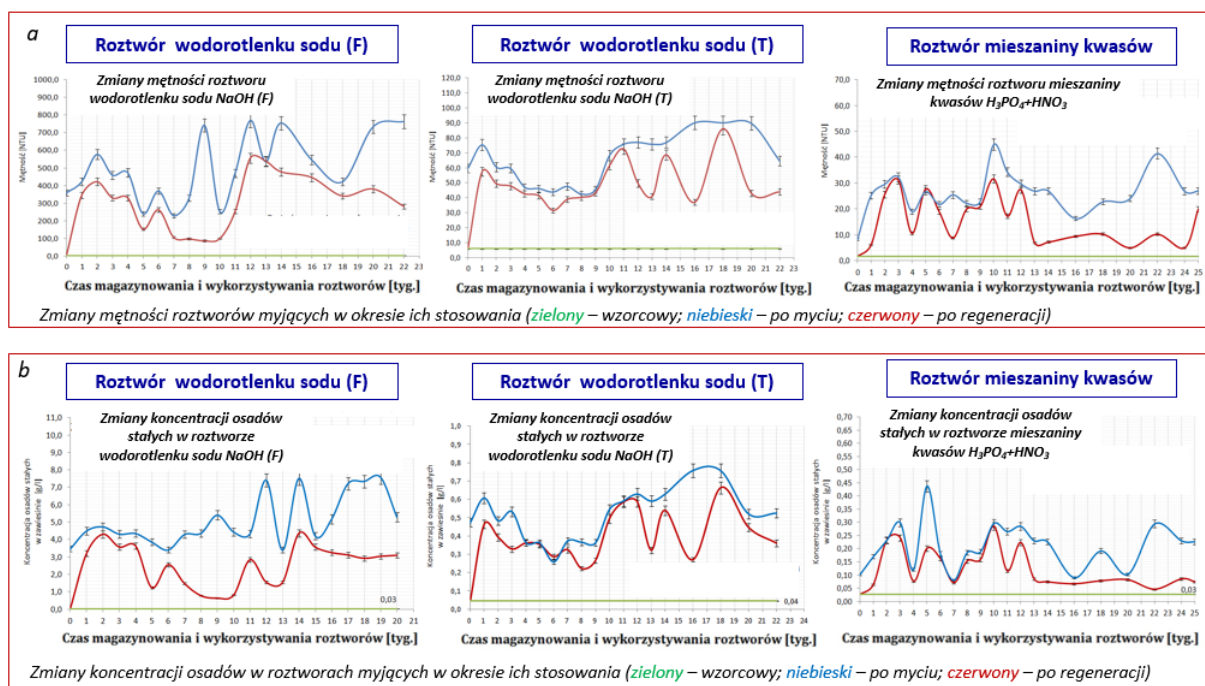
Wyniki badań pH, przewodności oraz stężeń substancji aktywnych zawartych w roztworach wykazały niewielkie wahania w okresie ich półrocznego wykorzystywania w zakładzie (rys. 11a,b,c.). Wartości pH roztworów wodorotlenku sodowego zmieniały się w przedziale 12,3÷12,8 a roztworu mieszaniny kwasów w zakresie 0,75÷1,35. Analiza stężeń badanych roztworów myjących wykazała, że w stosunku do zaleceń proceduralnych przyjętych w zakładzie, stężenia roztworów wodorotlenku sodowego są zawyżane, a roztworu mieszaniny kwasów -zaniżane. Wartości stężeń miały przełożenie na uzyskiwane dane pomiarowe przewodności analizowanych roztworów (rys. 11c. -5 tydzień obserwacji). W całym okresie badań nie wykazano w roztworach obecności mikroflory (bakterii i grzybów), co z punktu widzenia higieny procesu jest korzystne i nie stanowi zagrożenia dla bezpieczeństwa produkcji żywności.



Rys. 11. Stabilność wybranych paramentów roztworów myjących w czasie ich 6 miesięcznego stosowania w browarze: a – odczyn roztworów; b – stężenia substancji aktywnej zawartych w roztworach; c – przewodność roztworów

Wykazano, że roztwory po regeneracji charakteryzują się znacznie wyższą mętnością i koncentracją osadów, co wskazuje na niską skuteczność ich oczyszczania pomiędzy kolejnymi

cyklami mycia (poprzez sedymentację osadów). W całym okresie badań, zarówno w roztworach wodorotlenku sodowego (NaOH (F); NaOH (T)) jak i w roztworze mieszaniny kwasów ($H_3PO_4+HNO_3$) zaobserwowano duże zmiany w/w parametrów. Przyczyną tego może być różny czas pomiędzy cyklami mycia (w tym czasie prowadzona jest regeneracja), stosowanie różnych surowców do wytwarzania brzezki (surowce słodowane i niesłodowane, w różnym udziale) lub zmiany temperatury roztworów w czasie ich regeneracji. Badania w tym zakresie są aktualnie prowadzone. Wykazano również, że najbardziej zanieczyszczonym roztworem, spośród analizowanych, jest roztwór wodorotlenku sody (NaOH (F)), wykorzystywany do mycia filtra zaciernego. Maksymalna mętność i koncentracja osadów w tym roztworze, mieściły się w zakresie odpowiednio $700 \div 800$ NTU oraz $7 \div 8$ g/l, podczas gdy w pozostałych roztworach wartości tych parametrów znajdowały się poniżej 90 NTU oraz 0,8 g/l.

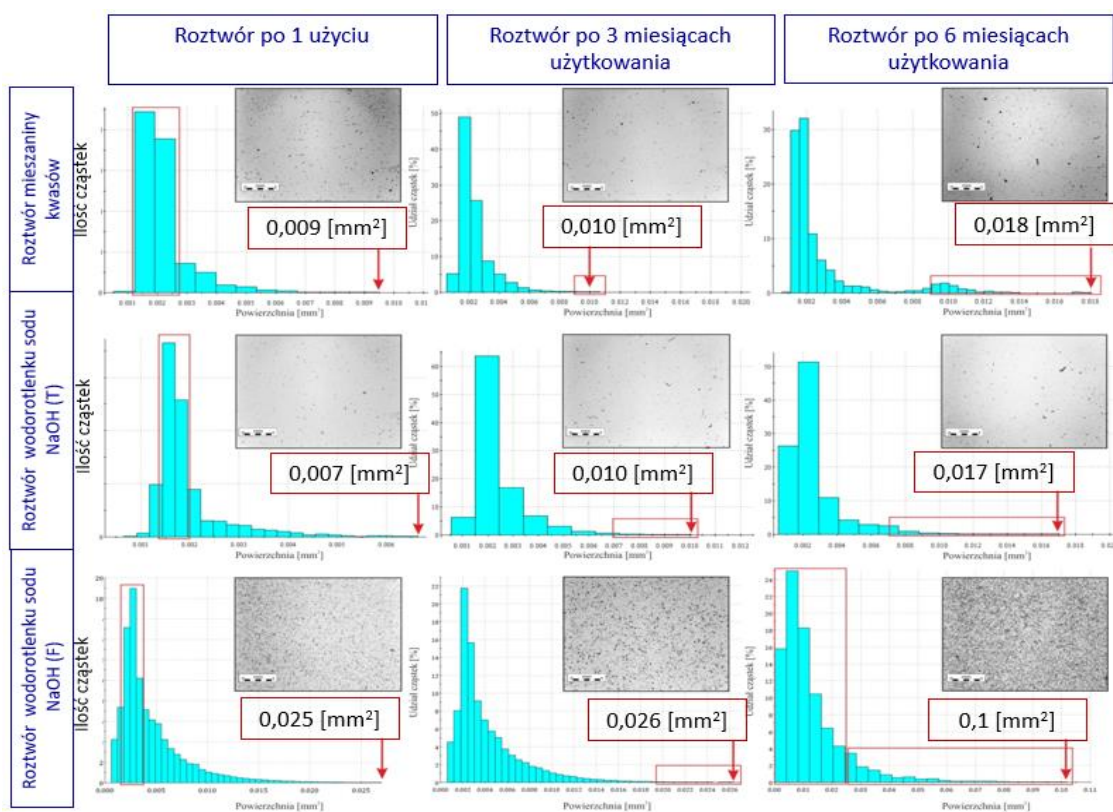


Rys. 12. Zanieczyszczenie roztworów myjących w czasie ich 6 miesięcznego stosowania w browarach: a – mętność roztworów; b – koncentracja osadów w roztworach

– Wykazano, że pozostające w roztworach cząstki osadów, posiadają właściwości koagulujące i w okresie użytkowania roztworów łączą się ze sobą tworząc większe aglomeraty

Dodatkowe analizy w zakresie badania stabilności roztworów w czasie ich półrocznego użytkowania w zakładach wykazały, że osady pozostające w roztworach po ich regeneracji wykazują właściwości koagulujące. Wyniki tych badań są istotne w zakresie omawianego problemu mimo iż nie wchodzącej w skład osiągnięcia (Zał. 3, pkt 2, publ.: H38).

W roztworach (NaOH (F); NaOH (T); H₃PO₄+HNO₃), po ich pierwszym użyciu do mycia, przeważały cząstki stałe o powierzchni w zakresie 0,001 mm² ÷ 0,002 mm² (rys. 13.). Stanowiły one ok. 70% udziału wszystkich cząstek zidentyfikowanych w analizowanych roztworach. Największe cząstki osadów, jakie zidentyfikowano w tym okresie, charakteryzowały się powierzchnią w następujący sposób: H₃PO₄+HNO₃ - 0,009 mm²; NaOH (T) - 0,007 mm² oraz NaOH (F) - 0,025 mm². Po upływie trzech miesięcy nie zaobserwowano znaczących zmian w wielkości cząstek występujących w roztworach. Zmiany takie zaobserwowano dopiero w szóstym miesiącu ich użytkowania. Wykazano bowiem, że udział cząstek o powierzchni 0,002 mm² uległ zmniejszeniu, a pojawiały się cząstki o większej powierzchni. W roztworze NaOH (F) osiągały one pola powierzchni do 0,1 mm² natomiast w roztworach NaOH (T) i (H₃PO₄ +HNO₃) do ok. 0,018 mm². Tworzenie aglomeratów o większej powierzchni może sugerować obniżenie efektywności procesu regeneracji roztworów, czego przyczyną mogą być m.in. zmiany właściwości roztworów (np. zagęszczenie) utrudniające samoistne opadanie cząstek osadów.

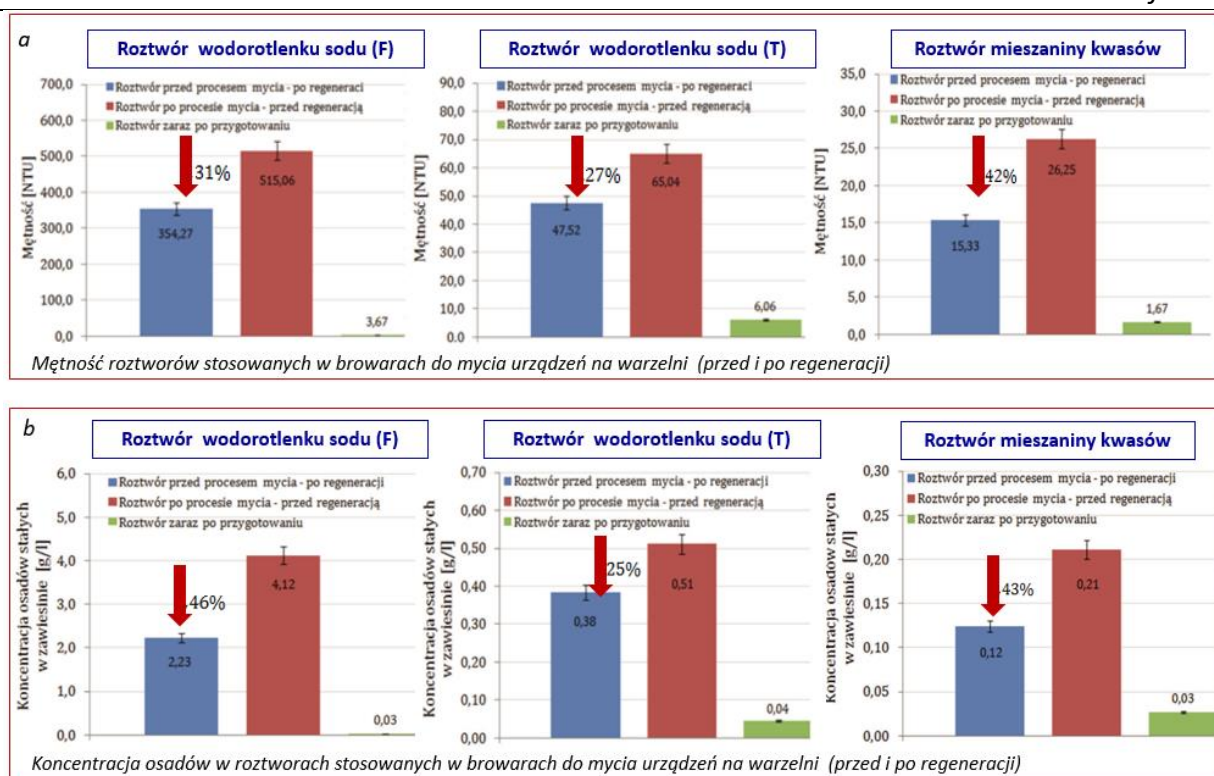


Rys. 13. Zmiany udziału cząstek osadów o różnej powierzchni pozostających w roztworach po regeneracji w okresie 6 miesięcy

– Określono efektywność regeneracji chemicznych roztworów myjących po procesie mycia

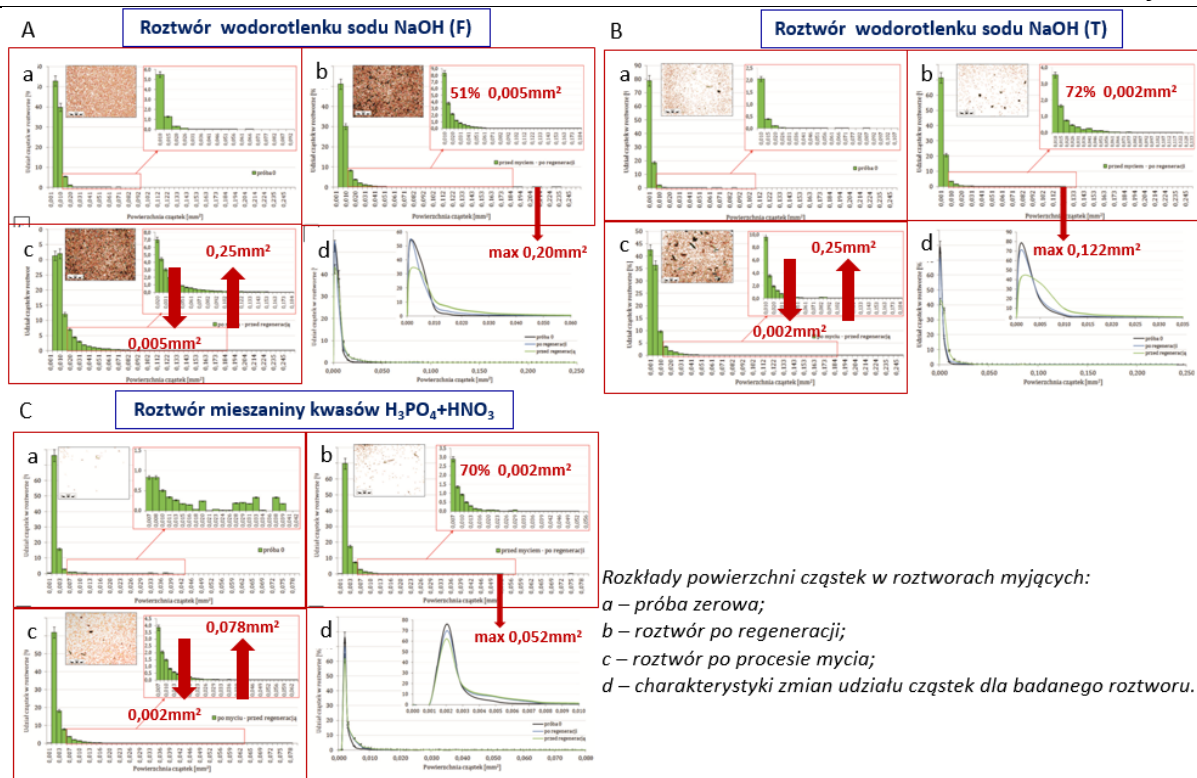
Dalsze analizy ukierunkowano na określenie stopnia oczyszczenia roztworów myjących z części stałych z wykorzystaniem zjawiska sedymentacji. Prezentowane wyniki (rys. 14÷15) stanowią średnie wartości mierzonych parametrów z półrocznego okresu badań i są istotne ze względu na higienę procesu, ryzyko wtórnego zanieczyszczenia instalacji produkcyjnych oraz jakość produkowanego piwa (stabilność koloidalna piwa). Zebrane dane pomiarowe dotyczące kształtu i pola powierzchni cząstek osadów stałych obecnych w roztworach myjących stanowią istotną informację w doborze odpowiednich membran filtracyjnych do regeneracji roztworów. Wyniki tych prac opublikowano w pracy **O6**. Wykazano, również że mętność i koncentracja osadów w analizowanych roztworach warunkowane są obecnością zawiesin o różnym stopniu dyspersji oraz koloidów pochodzenia organicznego i mineralnego. Stopień zanieczyszczenia roztworów wynika przede wszystkim z rodzaju osadów poprodukcyjnych, jakie tworzą się na powierzchniach urządzeń w czasie procesu produkcyjnego i jakie usuwane są w procedurze CIP. Przykładowo, na etapie filtracji zacieru oddzielane są wystodżiny od brzezki przeznaczonej do gotowania. Zatem w roztworze wodorotlenku sodu NaOH (F), po myciu filtra zaciernego, obecne będą osady stałe w postaci reszt łusek i zarodków ziarna, które stanowią typowe zanieczyszczenie filtra po zrzucie wystodżin. W roztworze tym obecne będą również inne związki nierozpuszczalne, w postaci skrobi, celulozy i wysokocząsteczkowych substancji białkowych (Davies i in., 2015; Kunze, 2010). Natomiast w roztworze wodorotlenku sodu NaOH (T) i w mieszaninie kwasów ($H_3PO_4+HNO_3$) obecne będą duże ilości cukrów, dekstryn, substancji białkowych i garbników, utworzonych podczas gotowania brzezki. Dodatkowo w roztworze kwaśnym należy spodziewać się dużej ilości osadów mineralnych (tzw. kamień piwny), powstających w procesach obróbki termicznej m.in.: zacierania srodu oraz gotowania i chłodzenia brzezki (Blél i in. 2015; Kunze, 2010).

Przeprowadzone analizy w kierunku efektywności regeneracji roztworów wykazały niepokojący fakt pozostawiania w nich dużej ilości zanieczyszczeń stałych (rys. 14.). Proces regeneracji obu roztworów wodorotlenku sodu NaOH, wpłynął zaledwie w ok. 30% na ich oczyszczenie z zawiesin stałych natomiast w przypadku roztworu kwasu ($H_3PO_4+HNO_3$) mętność i koncentracja osadów stałych obniżyły się o ok. 40%.



Rys. 14. Średnia efektywność regeneracji roztworów w warunkach przemysłowych wyznaczona na podstawie:
a – mętności roztworu; b – koncentracji osadów w roztworze

Analiza pola powierzchni cząstek osadów stałych, pozostających w badanych roztworach po ich regeneracji, wykazała, że w drodze sedymentacji możliwe jest oczyszczenie roztworów z cząstek osadów o powierzchni powyżej $0,1 \text{ mm}^2$, natomiast mniejsze cząstki pozostają w roztworach w postaci zawiesiny. Mianowicie, w roztworze wodorotlenku sodu po myciu filtra zaciernego NaOH (F), sedymentacji ulegały głównie cząstki o powierzchni powyżej $0,2 \text{ mm}^2$ i obserwowano niewielki wzrost udziału cząstek drobnych, o powierzchni w zakresie $0,015 \div 0,087 \text{ mm}^2$ (rys. 15A.). Natomiast w roztworze wodorotlenku sodu, który stosowano do mycia naczyń i drogi brzezki NaOH (T), sedymentacji ulegały głównie cząstki o powierzchni większej od $0,122 \text{ mm}^2$ i w niewielkim stopniu cząstki o powierzchni w zakresie $0,005 \div 0,031 \text{ mm}^2$ (rys. 15B.). W obu tych roztworach po regeneracji stwierdzono wzrost udziału cząstek stałych o powierzchni $0,005 \text{ mm}^2$ w roztworze NaOH (F) oraz $0,002 \text{ mm}^2$ w roztworze NaOH (T) odpowiednio z 31 do 51% oraz z 43% do 72%. Osady te stanowiły zawiesinę w analizowanych roztworach. W przypadku roztworu mieszaniny kwasów ($\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{HNO}_3$) wykazano, że po sedymentacji pozostawały cząstki o powierzchni mniejszej od $0,052 \text{ mm}^2$ (rys. 15C.).



Rys. 15. Uśrednione zmiany udziału cząstek o różnej powierzchni obecne w analizowanych roztworach na różnych etapach ich wykorzystywania w zakładzie w okresie 6 miesięcy: A – roztwór wodorotlenku sodu NaOH(F); B – roztwór wodorotlenku sodu NaOH(T); C – roztwór mieszaniny kwasów $H_3PO_4+HNO_3$

06. Piepiórka-Stepuk J. 2018. Analysis of physical impurities in regenerated solutions used in cleaning brewing systems. *Journal of the Institute of Brewing.*

Efektom przeprowadzonych analiz jest stwierdzenie, że:

- roztwory myjące magazynowane w zbiornikach stacji CIP spełniają kryterium chemiczne i są stabilne w tym zakresie przez okres ich długoterminowego użytkowania, co wynika z każdorazowego uzupełniania stężeń chemicznych substancji aktywnych po ich regeneracji;
- roztwory, mimo regeneracji, nie spełniają kryterium czystości fizycznej, ze względu na ich wysoką mętność i koncentrację osadów stałych w zawiesinie;
- wzrost udziału cząstek osadów stałych o polu powierzchni w zakresie $0,002\div 0,005\text{ mm}^2$ w roztworach po regeneracji w stosunku do ich udziału w roztworach przed regeneracją świadczy o pozostawaniu tych cząstek w postaci zawiesiny;
- roztwory różnią się między sobą stopniem i rodzajem zanieczyszczenia, co uzależnione jest od drogi mycia, na której dany roztwór był wykorzystany, etapu mycia (jedno

lub dwufazowe) oraz ilości i rodzaju osadów poprodukcyjnych tworzących się w urządzeniu w czasie procesu produkcyjnego;

- po 6 miesiącach stosowania roztworów pozostające w nich cząstki osadów stałych w postaci zawiesiny charakteryzują się znacznie większym polem powierzchni niż cząstki osadów obecne w roztworach po ich pierwszym użyciu;
- sedymentacja powinna stanowić pierwszy etap regeneracji roztworów natomiast drugim etapem, ze względu na pole powierzchni zidentyfikowanych cząstek, powinna być filtracja (roztwór NaOH (F)) lub mikrofiltracja (roztwór NaOH (T) oraz $H_3PO_4+HNO_3$);
- ponieważ grzyby i pleśnie dobrze rozwijają się w środowisku kwaśnym, to roztwór mieszaniny kwasów jest najbardziej narażony na ich występowanie.

A.3.2. Określono korzystne warunki regeneracji roztworów myjących z wykorzystaniem zjawiska sedymentacji osadów

Dalsze badania ukierunkowano na poszukiwanie przyczyn niskiej efektywności regeneracji roztworów. Początkowe analizy dotyczyły oddziaływania czasu przeznaczonego na regenerację roztworów. Na ich podstawie wykazano, że sedymentacja osadów w roztworach alkalicznych przebiega znacznie wolniej niż w roztworze mieszanym kwasów. Wyniki tych prac opublikowano w **O6**. Kolejne analizy dotyczyły wpływu temperatury roztworów na sedymentację osadów. Przy czym należy zaznaczyć, że w browarze z którego pobierano próby, roztwory nie były wychładzane na czas regeneracji. Badania prowadzono w zakresie temperatur $20 \div 80^\circ C$ (roztwory wodorotlenku sodu) oraz $20 \div 60^\circ C$ (roztwór mieszaniny kwasów) zgodnie z normą (PN-EN 12255-4: 2005) w lejach Imhoffa o pojemności 1000 ml. Temperaturę w czasie sedymentacji zwiększano, co $10^\circ C$. W celu uzyskania zmiennych warunków termicznych leje zanurzano w łaźni wodnej i przetrzymywano przez cały okres badań. Badania rozpoczynano w momencie ustabilizowania się temperatury roztworów na założonym poziomie. Roztwory oznaczano w kierunku zmian ich zmętnienia oraz liczebności cząstek osadów stałych pozostających w objętości analizowanej próby po określonym czasie sedymentacji. Obserwacje prowadzono przez 12 godzin a odczyty wykonywano po 1; 2; 4; 6 i 12 godzinie sedymentacji.

Na podstawie uzyskanych wyników wykazano istotny wpływ temperatury roztworów na końcowy efekt ich regeneracji. Istotność określono na podstawie testu Fishera-Snedecora

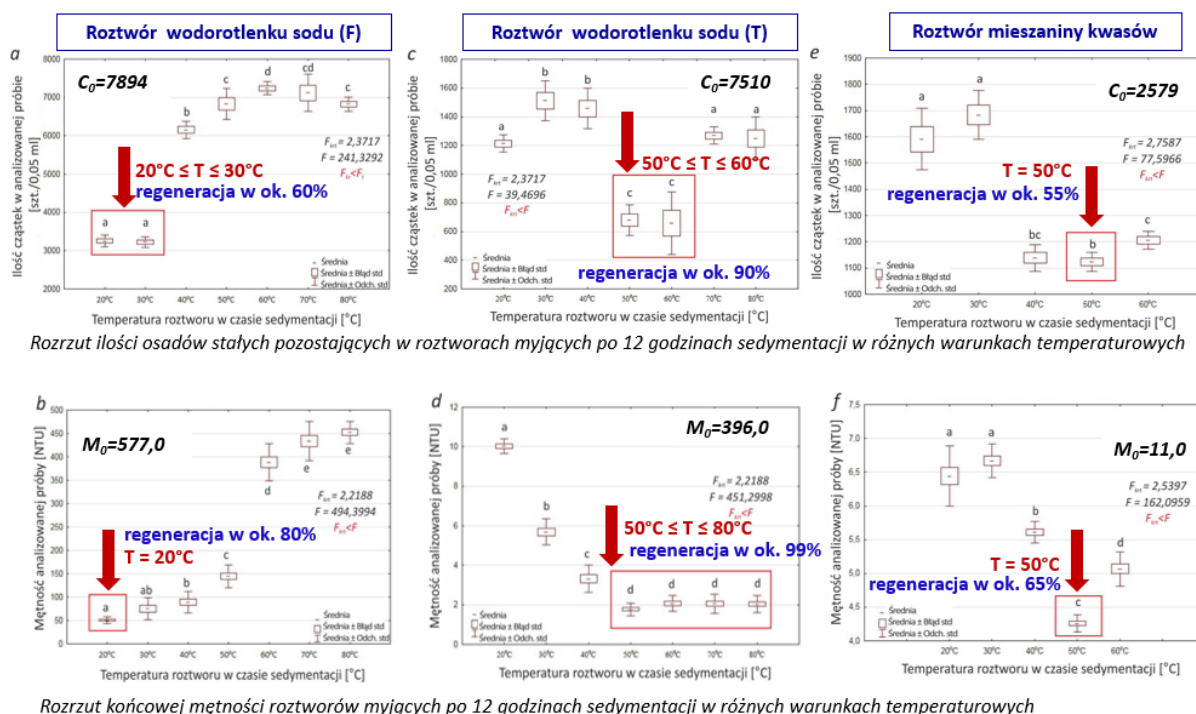
sprawdzając hipotezy zerową $H_0: (\mu=\mu_0)$ i alternatywną $H_1: (\mu\neq\mu_0)$, przy czym F_{kryt} dla ilości cząstek i F_{kryt} dla mętności obliczono dla każdego z roztworów. Przeprowadzono również test wielokrotnych porównań Tukeya, na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Analizy statystyczne prowadzono w programie Statistica 13.1. Wyniki tych prac opublikowano w **O7** i **O8**.

– **Określono końcowy rozkład liczebności cząstek pozostających w roztworach po 12 godzinach sedimentacji oraz końcową mętność roztworów**

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że sedimentacji cząstek w roztworze wodorotlenku sodu NaOH (F) po myciu filtra zaciernego sprzyja temperatura w zakresie $20 \div 30^\circ\text{C}$. Dla tych warunków, po zakończeniu sedimentacji odnotowano najmniejszą ilość cząstek stałych, kształtującą się na poziomie ok. 3200 szt./0,05ml, co jednak w dalszym ciągu stanowiło ok. 40% zanieczyszczenia początkowego ($C_0=7894$ szt./0,05ml) (skuteczność 60%) (rys. 16a.). Najniższą mętność tego roztworu uzyskano po sedimentacji w zakresie temperatur $20 \div 40^\circ\text{C}$ (rys. 16b.), przy czym końcowe wartości tego parametru dla analizowanych temperatur były statystycznie istotnie różne. W tych warunkach, mętność roztworu wodorotlenku sodu w stosunku do wartości początkowej obniżyła się o ok. 80%. Istotny wzrost mętności zaobserwowano dopiero po sedimentacji w temperaturze 50°C (145 NTU). Dalsze wyniki badań wykazały, że im wyższa temperatura roztworu NaOH (F) w czasie sedimentacji, tym mniej korzystne warunki dla regeneracji tego roztworu. Ostatecznie w zakresie temperatur $60 \div 80^\circ\text{C}$, zarówno mętność roztworu wodorotlenku sodu jak i ilość pozostających w nim osadów, w niewielkim zakresie uległy obniżeniu w stosunku do próby początkowej. Sedymetacji w tych warunkach często towarzyszyły zjawiska koagulacji i flokulacji, polegające na wzajemnym oddziaływaniu cząstek fazy rozproszonej oraz łączeniu się w większe agregaty.

Odmienny charakter oddziaływań temperatury na sedimentację osadów zaobserwowano w drugim badanym roztworze wodorotlenku sodu NaOH (T). Najmniejszą liczebność cząstek w tym roztworze po sedimentacji osadów odnotowano w temperaturach 50 i 60°C (odpowiednio 679 szt./0,05ml i 657 szt./0,05ml), co stanowiło ok. 10% zanieczyszczenia początkowego (rys. 16c.). Powyżej i poniżej tego zakresu temperatur liczebność cząstek pozostających w roztworze wzrastała. Przyczyną tego mogły być zmiany gęstości i lepkości roztworu powodujące z jednej strony wzrost oporu ośrodka, w którym zawieszono były cząstki osadów i wydłużenie czasu ich grawitacyjnego opadania, a z drugiej strony wzrost energii wewnętrznej ośrodka i uaktywnienie się ruchów Browna powodujących intensywne i samorzutne unoszenie

się cząstek osadów w roztworze. Podobne wyniki uzyskano dla pomiaru końcowej mętności roztworu wodorotlenku sodu NaOH (T). Najniższą mętność roztworu (2 NTU) uzyskano po sedymentacji w temperaturze 50°C, co odpowiadało aż 99% skuteczności regeneracji roztworu. Dalsze podnoszenie temperatury (do 80°C) nie wpłynęło w sposób istotny statystycznie na zmiany końcowej mętności tego roztworu (rys. 16d.). Ostatecznie stwierdzono, że roztwór ten w każdych warunkach temperaturowych uzyskuje dobry efekt regeneracji. W odniesieniu do próby początkowej ($C_0=7510$ szt./0,05ml; $M_0=396$ NTU) skuteczność regeneracji tego roztworu dla najmniej korzystnych warunków temperaturowych (20÷30°C) mieściła się w zakresie 80÷90%.



Rys. 16. Rozrzut liczebności osadów stałych pozostających w roztworach myjących po 12 godzinach sedymentacji w różnych warunkach temperaturowych oraz ich końcowa mętność: a, b – roztwór wodorotlenku sodu NaOH (F); c, d – roztwór wodorotlenku sodu NaOH (T); e, f – roztwór mieszaniny kwasów fosforowego i azotowego ($\text{H}_3\text{PO}_4+\text{HNO}_3$)

Na podstawie analizy wyników badań roztworu mieszaniny kwasów ($\text{H}_3\text{PO}_4+\text{HNO}_3$) wykazano, że w tym przypadku regeneracja najefektywniej przebiega w temperaturze 50°C. Po 12 godzinach sedymentacji w tych warunkach temperaturowych odnotowano najmniejszą liczebność cząstek osadów stałych (ok. 1130 szt./0,05ml) (rys. 16e.) i najniższą mętność roztworu, na poziomie 4 NTU (rys. 16f.). Uzyskane wartości końcowe pomierzonych

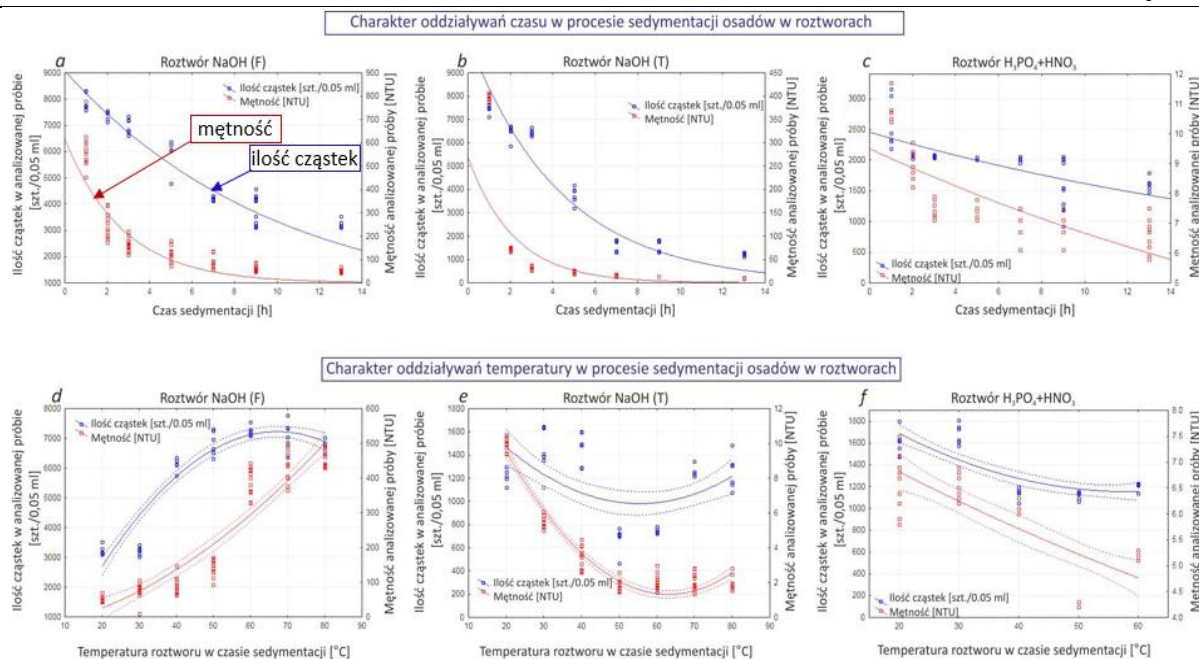
parametrów w odniesieniu do ich wartości początkowych ($C_0=2579$ szt./0,05ml; $M_0=11$ NTU) wskazują na ok. 60% skuteczność regeneracji.

Wykazano również, że czas potrzebny na regenerację badanych roztworów jest różny. Dla najkorzystniejszych warunków temperaturowych minimalny czas regeneracji roztworu wodorotlenku sodu NaOH (T) i roztworu mieszaniny kwasów ($H_3PO_4+HNO_3$) wynosił ok. 6 godzin, natomiast roztworu wodorotlenku sodu NaOH (F) ok. 8 godzin.

– **Określono charakter oddziaływań czasu i temperatury w procesie sedymentacji osadów w roztworach po procesie mycia na ich końcową mętność i liczebność cząstek**

Na podstawie krzywych rozrzutu wyznaczono charakter wpływu poszczególnych zmiennych niezależnych (czasu - t i temperatury - T) na mętność (M) i liczebność cząstek (C) ulegających zmianie podczas sedymentacji. Wyznaczone krzywe stanowiły podstawę przyjęcia cząstkowych funkcji zależności pomiędzy zmiennymi zależnymi (t , T) a zmiennymi niezależnymi (M , C). Modelowanie funkcji $M=f(t)$; $M=f(T)$; $C=f(t)$; $C=f(T)$ i ich dopasowanie wykonano metodą estymacji nieliniowej najmniejszych kwadratów stosując algorytm Gaussa-Newtona. Adekwatność przyjętego modelu zweryfikowano współczynnikiem korelacji R .

Uzyskany rozkład wyników sugerował, że wpływ czasu na efekt regeneracji roztworów wyrażony liczebnością pozostających w roztworach cząstek osadów stałych oraz ich mętnością korzystnie jest aproksymować funkcją wykładniczą (rys. 17a,b,c.), natomiast wpływ temperatury - wielomianem drugiego stopnia (rys. 17d,e,f.). Na tej podstawie wyznaczono cząstkowe funkcje zależności: $M=f(t)$; $M=f(T)$; $C=f(t)$; $C=f(T)$, których zgodność określono współczynnikiem determinacji. Jednocześnie wykazano, że modele funkcji zmian mętności w czasie sedymentacji $M=f(t)$ i w zależności od oddziaływań temperatury $M=f(T)$ wskazują lepsze dopasowanie do danych empirycznych niż modele funkcji zmian liczebności cząstek $C=f(t)$ i $C=f(T)$. Wyniki tych badań stanowią treść pracy **O7**.



Rys. 17. Funkcje aproksymacyjne na tle rozkładu wyników pomiarów w odniesieniu do: a, b, c – czasu sedymentacji (rozkład wykładniczy) oraz d, e, f – temperatury roztworów w czasie sedymentacji (wielomian)

– Określono funkcje zmian mętności (M) i ilości cząstek stałych (C) w chemicznych roztworach myjących, następujących w czasie sedymentacji (t) w różnych warunkach temperaturowych (T).

Dalsze analizy miały na celu określenie funkcji jednoczesnego oddziaływania czasu i temperatury na skuteczność regeneracji badanych roztworów w drodze sedymentacji. Opierając się na analizach dotyczących charakteru oddziaływań poszczególnych zmiennych na sedymentację osadów do opisu przyjęto funkcję wykładniczą, której ogólną postać przedstawiono równaniem (15).

$$M = a \cdot t^{-b} \tag{15}$$

Model funkcji $M=f(t;T)$ dla każdego z badanych roztworów i dopasowanie określono metodą estymacji nieliniowej najmniejszych kwadratów stosując algorytm Gaussa-Newtona. Adekwatność przyjętego modelu sprawdzono wyznaczając współczynnik dopasowania R^2 oraz błąd standardowy estymacji S_e . Fragment tych badań opublikowano w pracy **O8**.

Wyznaczone funkcje odwzorowują zmiany mętności (M) poszczególnych roztworów w czasie (t) ich regeneracji prowadzonej w różnych warunkach temperaturowych (T), przy czym przyjęto, że współczynniki a i b uwzględniają oddziaływania temperatury. Ostatecznie wyznaczone funkcje przyjmują następującą postać (16), (17), (18).

Dla roztworu NaOH (F):

$$M(t,T) = (-0,0078 \cdot T^2 + 573,0) \cdot t^{(0,0137 \cdot T - 1,1035)} \quad R^2=0,9183; S_e=68,47 \quad (16)$$

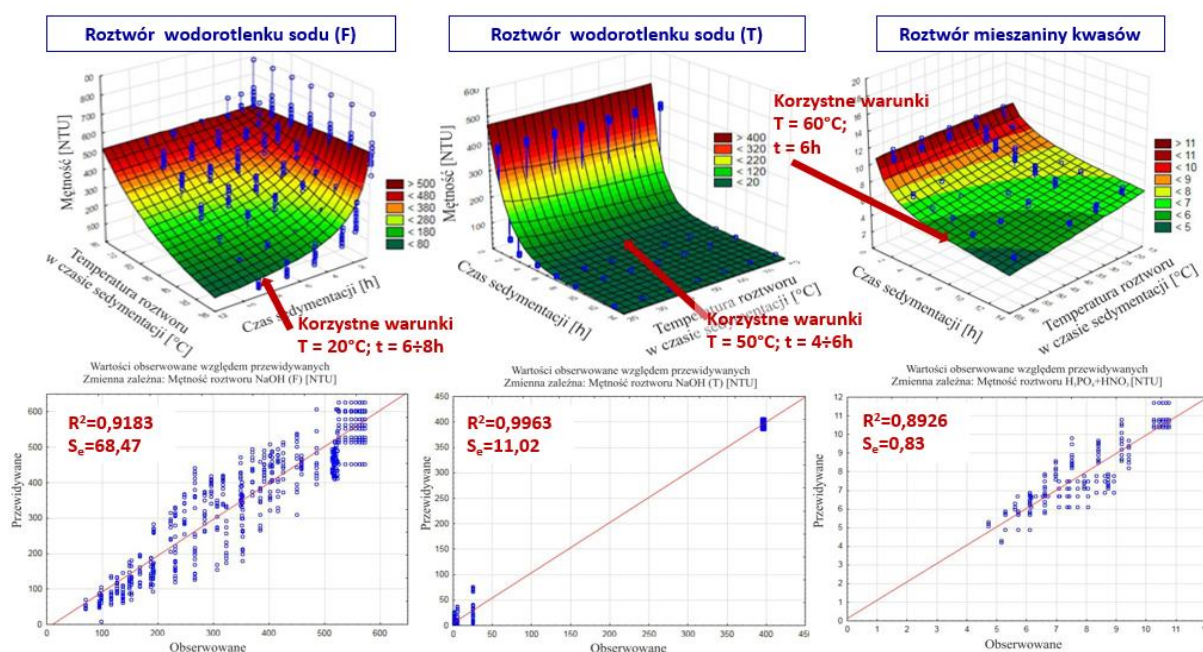
Dla roztworu NaOH (T):

$$M(t,T) = (-0,00059 \cdot T^2 + 397,8) \cdot t^{(-3,9719)} \quad R^2=0,9963; S_e=11,02 \quad (17)$$

Dla roztworu H₃PO₄+HNO₃:

$$M(t,T) = (-0,0002 \cdot T^2 + 10,7979) \cdot t^{(-0,0028 \cdot T - 0,1337)} \quad R^2=0,8926; S_e=0,83 \quad (18)$$

Graficzną postać opracowanych modeli funkcji przedstawiono na rysunku 18, jako powierzchnie odpowiedzi wartości przewidywanej mętności roztworów w odniesieniu do wartości obserwowanej po sedymentacji, dla różnych warunków temperatury i czasu. Na podstawie rozrzutu wartości przewidywanych względem obserwowanych przedstawiono również dobroć dopasowania przyjętego modelu funkcji dla poszczególnych roztworów.



Rys. 18. Zależność mętności analizowanych roztworów względem czasu sedymentacji i temperatury

Dopasowanie opracowanych modeli do danych empirycznych, wyrażone wskaźnikiem determinacji R^2 oraz niskim odchyleniem standardowym wartości empirycznych od teoretycznych S_e jest dobre (roztwór H₃PO₄+HNO₃) i bardzo dobre (roztwory NaOH (F) i NaOH (T)). Oznacza to, że otrzymane modele regresji w sposób wiarygodny wyjaśniają zaobserwowane zmienności parametrów. Wyniki tych prac zostały wyróżnione na VI Sympozjum Inżynierii Żywności w Warszawie (27 czerwca 2018 roku).

07. Piepiórka-Stepuk J., (100%), 2018. *Turbidity and quantity of sediment particles during regeneration of chemical solutions after cleaning of brewing equipment in the CIP system. Agricultural Engineering. 22(3), 37-48.*

08. Piepiórka-Stepuk J., 2018. *Impact of caustic soda solution temperature on efficiency of its cleaning on solid sediments after completed process of cleaning in CIP system of brewing unit. Agricultural Engineering. 22(2), 79-89.*

Efektom przeprowadzonych analiz jest stwierdzenie, że:

- czas regeneracji roztworów chemicznych po procesie mycia CIP i efekt końcowy zależne są od temperatury roztworu, w której następuje sedymentacja osadów;
- czas i temperatura, w której prowadzona jest sedymentacja w sposób nieliniowy wpływają na końcową mętność roztworów oraz liczebność pozostających w nich cząstek osadów stałych;
- charakter zmian mętności roztworów i liczebności pozostających w nich cząstek osadów stałych w czasie sedymentacji najlepiej oddaje funkcja wykładnicza z ujemnym wykładnikiem, natomiast charakter oddziaływań temperatury najlepiej oddaje wielomian drugiego stopnia, przy czym ekstremum funkcji wskazuje na najbardziej lub najmniej korzystne warunki procesu regeneracji roztworów myjących;
- wyznaczone funkcje umożliwiają wskazanie zbioru korzystnych warunków, które mogą mieć praktyczne zastosowanie w warunkach rzeczywistych do regeneracji roztworów.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania i analizy wykazały, że skuteczność mycia w systemie CIP instalacji przemysłowych i utrzymanie wymaganego poziomu higieny produkcji uzależnione jest od wielu czynników, w tym konstrukcyjnych, procesowych oraz od przyjętych rozwiązań technologicznych, związanych m.in. z regeneracją chemicznych roztworów po myciu.

W kontekście wpływu czynników konstrukcyjno-procesowych, wykazano, że końcowy efekt mycia instalacji przemysłowych i jej elementów zależy nie tylko od przyjętych warunków mycia w procedurze CIP (czasu, temperatury, prędkości przepływu, rodzaju substancji chemicznej), ale przede wszystkim od kształtu kanału przepływowego i tworzących się w nim zmiennych warunków przepływu roztworów myjących w czasie mycia, które powodują niejednorodne oddziaływania hydromechaniczne na myte powierzchnie. Na przykładzie wybranych elementów rurociągów, wykazano m.in.: występowanie lokalnie zmiennych profili prędkości przepływu oraz niejednorodny rozkład ciśnień i naprężeń ścinających wywieranych na ścianki analizowanych elementów. Obszary te wskazano, jako trudne do umycia, co zweryfikowano

badaniami eksperymentalnymi. Wykazano również, że chropowatość powierzchni jest czynnikiem wpływającym na jej adhezyjność. Badania przeprowadzone na powierzchniach ze stali kwasoodpornej wykazały, że stosowanie materiałów konstrukcyjnych o możliwie niskim profilu chropowatości ($R_a < 0,4 \mu\text{m}$) do budowy urządzeń, szczególnie przeznaczonych do procesów cieplnych (wymyenniki ciepła), przyczyni się do zmniejszenia ilości tworzących się na nich zanieczyszczeń w czasie produkcji a także ułatwi proces ich mycia. Natomiast w zakresie rozwiązań procesowych wykazano, że warunki mycia instalacji produkcyjnych powinny uwzględniać możliwie najwyższe prędkości przepływu roztworów myjących (z punktu widzenia technicznych możliwości zakładu), co umożliwi obniżenie temperatury i skrócenie czasu mycia a także zapewni założony efekt mycia z jednoczesnym obniżeniem zapotrzebowania na energię elektryczną do przeprowadzenia procesu.

W kontekście nowych rozwiązań techniczno-technologicznych zaproponowano i opatentowano system monitorowania i sterowania procesem mycia w przepływie w oparciu o kinetykę procesu. W tym zakresie wykazano, że pomiar zmian mętności roztworów myjących na drodze powrotnej z układu mycia, umożliwi określenie poszczególnych faz procesu mycia oraz sterownie czasem mycia, który w standardowej procedurze CIP ustalany jest obligatoryjnie. Na przykładzie przeprowadzonych w tym zakresie badań wykazano możliwość skrócenia czasu mycia (o 86% dla przestawionego przykładu) oraz 38% obniżenie zużycia energii elektrycznej, przy zachowaniu niezmiennego istotnie efektu mycia ($\alpha = 0,05$).

Na przykładzie szerokiego eksperymentu, związanego z określeniem stabilności i efektywności regeneracji chemicznych roztworów myjących, użytkowanych w okresie 6 miesięcy w browarze do mycia urządzeń i instalacji warzelniczych, wykazano, że o ile roztwory są stabilne chemicznie i mikrobiologicznie, to ich czystość fizyczna odbiega od czystości roztworów początkowych. Skuteczność regeneracji roztworów w warunkach przemysłowych (sedymentacja osadów w zbiornikach stacji CIP w temperaturze odpowiadającej procesom mycia) określono na poziomie 30%. W zakresie prowadzonych analiz, wykazano konieczność obniżenia temperatury roztworów wodorotlenku sodu w czasie ich regeneracji (roztwór po myciu tzw. drogi brzezki do $T = 50^\circ\text{C}$, natomiast roztwór po myciu filtra zaciernego do $T = 20^\circ\text{C}$). Skuteczność regeneracji roztworów w tych warunkach termicznych (określona w laboratoryjnie na podstawie pomiaru mętności), wzrosła z 30% do 80% -roztwór NaOH (F) i do 99% -roztwór NaOH (T). Wykazano również, że sedymentacja powinna stanowić pierwszy etap regeneracji roztworów, natomiast drugim etapem, ze względu na pole powierzchni

zidentyfikowanych cząstek, powinna być filtracja (roztwór NaOH (F)) lub mikrofiltracja (roztwór NaOH (T) i roztwór $H_3PO_4+HNO_3$).

Wnioski

1. Efektywność mycia w systemie CIP instalacji przemysłowych oraz energochłonność tego procesu uzależnione są od wielu czynników, w tym: konstrukcyjnych, procesowych oraz przyjętych rozwiązań technologicznych.
2. W instalacjach produkcyjnych mytych w systemie CIP występują niejednorodne warunki przepływu roztworów, wpływające na końcowy efekt mycia.
3. Stosowanie materiałów konstrukcyjnych o profilu chropowatości poniżej $0,4 \mu m$ wpłynie na zmniejszenie ilości powstających zanieczyszczeń na powierzchniach w czasie produkcji, a tym samym ułatwi utrzymanie ich w czystości.
4. Opracowanie procedury mycia CIP dla poszczególnych urządzeń w linii produkcyjnej, z uwzględnieniem możliwie wysokich prędkości przepływu mediów myjących, wpłynie na efektywne ich oczyszczanie z osadów poprodukcyjnych z jednoczesną minimalizacją zużycia energii.
5. Rozbudowanie stacji mycia CIP o układ monitorowania mętności roztworów na drodze powrotnej umożliwi skrócenie czasu mycia instalacji, czego wymiernym skutkiem jest również obniżenie nakładów energetycznych.
6. Roztwory wykorzystywane do mycia instalacji produkcyjnych w systemie CIP są stabilne mikrobiologicznie i chemicznie przez okres 6 miesięcy, natomiast flokulacjom ulega ich mętność, koncentracja osadów w zawiesinie i liczebność cząstek.
7. Regeneracja roztworów w warunkach przemysłowych przez sedymentację osadów stałych, umożliwi ich oczyszczenie w 30%.
8. Pola powierzchni cząstek osadów stałych pozostających w badanych roztworach po ich regeneracji, charakteryzują się rozbieżnością w zakresie ich rozkładu i mieszczą się w granicach $0,001 \div 0,2 \text{ mm}^2$, przy czym ok. $60 \div 70\%$ to cząstki o powierzchni $0,002 \div 0,005 \text{ mm}^2$ pozostające w roztworze w postaci zawiesiny.
9. Odpowiednia technologia i dobór warunków regeneracji roztworów myjących umożliwi przedłużenie ich właściwości użytkowych.

Efekt naukowy

Zagadnienia poruszone w niniejszej pracy mają znaczenie poznawcze w zakresie procesu mycia w przepływie oraz warunków eksploatacyjnych stacji mycia CIP z uwzględnieniem aspektów energetycznych. W tym zakresie:

- wzbogacono wiedzę dotyczącą niejednorodnych warunków mycia wybranych elementów instalacji transportujących oraz wykazano konieczność indywidualnego opracowywania programów mycia dla każdego urządzenia mytego w tym systemie;
- opisano relacje między profilem chropowatości powierzchni konstrukcyjnych a ilością tworzących się osadów, wykazując jednocześnie bezpośredni związek z szybkością tworzenia się osadów na określonych powierzchniach;
- wzbogacono wiedzę dotyczącą warunków i skuteczności regeneracji środków chemicznych opisując jednocześnie relacje zależności pomiędzy temperaturą i czasem sedymentacji osadów a końcową czystością roztworów.

Aspekty praktyczne

1. Wykazano, że stosowanie w instalacjach transportujących zakrzywionych elementów rurociągów może przyczyniać się do problemów związanych z ich skutecznym myciem.
2. Wykazano, że profil chropowatości powierzchni konstrukcyjnych wpływa na ilość tworzących się osadów, ich grubość i strukturę.
3. Opracowano wytyczne programów mycia instalacji rurociągowych i płytowego wymiennika ciepła, umożliwiające otrzymanie czystych powierzchni z jednoczesną minimalizacją zużycia energii na przeprowadzenie procesu.
4. Opracowano i opatentowano metodę monitorowania procesów mycia w przepływie z wykorzystaniem nefelometrów, która umożliwia sterowanie programem mycia, skrócenie czasu mycia oraz kontrolę ilości wmywanych zanieczyszczeń.
5. Określono warunki poprawiające skuteczność regeneracji roztworów myjących w drodze sedymentacji oraz określono powierzchnię cząstek pozostających w nich osadów w postaci zawiesiny, co może pomóc w doborze odpowiednich membran filtracyjnych (drugi etap regeneracji).

Perspektywa dalszych prac

Wskazana jest kontynuacja prac badawczych w zakresie wzmocnienia oddziaływań czynników mechanicznych w procesie mycia w systemie CIP. Obecnie, w tym zakresie, prowadzone są badania nad wprowadzeniem barbotażu w typowy układ mycia w przepływie oraz przepływu pulsacyjnego. Dotychczasowe prace w tym zakresie ukierunkowane były na przeprowadzenie wstępnych badań eksperymentalnych, których wyniki wykazały poprawę efektu mycia prostych odcinków rurociągów, zanieczyszczanych osadami testowymi o różnym składzie chemicznym, utrwalonych w wysokich temperaturach. W szerszym ujęciu, prace badawcze dotyczące mycia zintensyfikowanego barbotażem kontynuowane są w ramach pracy doktorskiej mgr inż. Macieja Wawrzyniaka (doktorant-stażysta SGGW).

Kontynuowane są również badania związane ze stabilnością i regeneracją chemicznych roztworów myjących, po procesach mycia CIP. Badania w zakresie stabilności roztworów ukierunkowano na poznanie charakteru zmian powierzchniowego napięcia równowagowego środków myjących w czasie ich przechowywania, a także w zależności od stężenia i temperatury określonego roztworu. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych zostaną poddane dalszej obróbce, mającej na celu opisanie zjawiska zmian zwilżalności poszczególnych roztworów funkcjami matematycznymi $\gamma_{\text{NaOH(F); NaOH(T); H}_3\text{PO}_4+\text{HNO}_3} = f(C, R_{T;F;K}, t_p)$, które wraz z opracowanymi już modelami zmian mętności dla każdego z roztworów $M_{\text{NaOH(F); NaOH(T); H}_3\text{PO}_4+\text{HNO}_3} = f(T, R_{T;F;K}, t_s)$ będą stanowić kryterium optymalizacji czasu przechowywania roztworów w zbiornikach stacji CIP. Kryterium nadrzędne optymalizacji stanowić będzie czystość mikrobiologiczna badanych roztworów w całym okresie badań $M_F = f(R_{T;F;K}, t_p) = 0$ (grzyby); $M_B = f(R_{T;F;K}, t_p) = 0$ (bakterie). Czynniki zmiennymi będą: odczyn roztworu i jego przeznaczenie do mycia ($R_T; R_F; R_K$), stężenie roztworu (C) i jego temperatura (T) oraz czas przechowywania (t_p) i czas sedymentacji osadów obecnych w roztworach po procesie mycia (t_s). Badania mają posłużyć opracowaniu modelu opisującego stabilność chemicznych roztworów myjących S_R regenerowanych i magazynowanych w zbiornikach stacji CIP, zgodnie z przyjętą funkcją:

$$S_{R_{ST}; R_{SF}; R_K} = f(\gamma; M; M_F; M_B) \quad (19)$$

Badania związane z regeneracją roztworów po procesie mycia ukierunkowane będą na poprawę efektywności ich oczyszczania z osadów stałych poprzez zastosowanie substancji zwiększających adsorpcję i sekwestrację cząstek w zawiesinie i ułatwiających ich sedymentację. Obecnie w tym zakresie realizowane są badania z wykorzystaniem takich substancji jak bentonit,

poliakrylamid i karagen, z jednoczesną analizą wpływu zastosowanych substancji na fizykochemiczne właściwości badanych roztworów, w tym również mętność, koncentrację osadów w zawiesinie i powierzchniowe napięcie równowagowe.

Wskazana jest również kontynuacja badań numerycznych mających na celu symulowanie warunków przepływu w innych urządzeniach, czy też zbiornikach poddawanych myciu w systemie CIP m.in.: wirówkach, urządzeniach dozujących, cysternach. Taka analiza, poprzez analogię do prezentowanych powyżej badań, pozwoliłaby wskazać obszary, w których występują niekorzystne warunki przepływu i które są narażone na niedomycie.

Bibliografia

- Ang, W.S., Lee, S., Elimelech, M., 2006. Chemical and physical aspects of cleaning of organic-fouled reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*, 272, 198–210.
- Augustin, W., Geddert, T., Scholl, S., 2007. Surface treatment for the mitigation of whey protein fouling. In: Müller-Steinhagen H., Malayeri M.R., Watkinson A.P. (eds): *Proceedings of Heat Exchanger Fouling and Cleaning VII*, Tomar, Portugal, 206–214.
- Beuf, M., Rizzo, G., Leuliet, J.C., Müller-Steinhagen, H., Yiantsios, S., Karabelas, A., Benezech, T., 2003. Fouling and cleaning of modified stainless steel plate heat exchangers processing milk products. In: Watkinson P., Müller-Steinhagen H., Malayeri M.R. (eds): *Proceedings of Heat Exchanger Fouling and Cleaning V: Fundamentals and Applications*, Santa Fe, USA, RP1, 99–106.
- Biń, A.K., Zieliński, J., 2000. Chemical degradation of contaminants in industrial wastewater. *Annual Set The Environment Protection*, 2, 383–405
- Blel, W., Benezech, T., Legentilhomme, P., Legrand, J., Le Gentil-Lelievre, C., 2007. Effect of flowarrangement on the removal of *Bacillus* spores from stainless steel equipment surfaces during a Cleaning In Place procedure. *Chemical Engineering Science*, 62, 3798–3808.
- Blel, W., Dif, M., Sire, O., 2015. Effect of a new regeneration process by adsorption-coagulation and flocculation on the physicochemical properties and the detergent efficiency of regenerated cleaning solutions, *Journal of Environmental Management*, 155, 1–10.
- Bogusławski, A., Drobnik, S., Tyliczszak, A., 2008. Turbulencja – od losowości do determinizmu. *Modelowanie Inżynierskie*, (5)36, 41–48.
- Boyce, A., Piterina, A.V., Walsh, G., 2010. Assessment of the potential suitability of selected commercially available enzymes for cleaning-in-place (CIP) in the dairy industry. *Biofouling: The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, 26, 837–850.
- Chen, L., Chen, R., Yin, H., Sui, J., Lin, H., 2012. Cleaning in place with onsite-generated electrolysed oxidizing water for water-saving disinfection in breweries. *Journal of the Institute of Brewing*, 118(4), 401–405.
- Chung, S.L., Lai, Y.H., 2008. Process control of brewery plants. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 31(1), 127–140.
- Davies, S., Sykes, T., Philips, M., Hancock, J., 2015. Hygienic design and Cleaning-In-Place (CIP) systems in breweries, in *Brewing Microbiology*. 221–239, Copyright Elsevier Ltd.,
- Diakun J., 2011. Analiza oddziaływania czynników w procesie mycia instalacji i urządzeń. *Inżynieria Rolnicza*, 1(126), 23–29.
- Diakun, J., Mierzejewska, S., Kukielka, K., 2012. The regression equation of energy requirement in the process of cleaning the pipeline by CIP method. *Polish Journal of Food Engineering*, 1(1), 5–8.
- Dif, M., Blel, W., Tastayre, G., Lendormi, T., Sire, O., 2013. Identification of transfer mechanisms involved in soiled CIP solutions regeneration at extreme pH and high temperature. *Journal of Food Engineering*, 114, 477–485.
- EHEDG, 2004. Hygienic equipment design criteria document. 2nd Ed. Brussels, European Hygienic Engineering & Design Group. Guidelines. *Trends in Food Science & Technology*, 8, 88–92.
- EHEDG, 2007. Materials of construction for equipment in contact with food. *Trends in Food Science & Technology*, 18, (Suppl. 1), S40–S50.
- European Regulation (EC) N° 1935/2004 of the European Parliament and of the Council of 27 October 2004 on Materials and Articles Intended to come into Contact with Food and repealing Directives 80/590/EEC and 89/109/EEC. Official Journal of the European Communities, L 338: 13/11/2004.
- European Regulation (EC) N° 852/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the hygiene of foodstuffs. Official Journal of the European Union, L 139/1: 30/4/2004.
- Elsner, J.W., 1987. *Turbulencja przepływów*. Warszawa, Wydawnictwo PWN, ISBN: 83-01-0613-4.
- Fickak, A., Al-Raisi, A., Dong Chen, X., 2011. Effect of whey protein concentration on the fouling and cleaning of a heat transfer surface. *Journal of Food Engineering*, 104, 323–331.
- Gésan-Guizou, G., Alvarez, N., Jacob, D., Daufina, G., 2007. Cleaning-in-place coupled with membrane regeneration for re-using caustic soda solutions. *Separation and Purification Technology*, 54, 329–339.
- Gonder, Z.B., Kaya, Y., Vergili, I., Barlas, H., 2010. Optimization of filtration conditions for CIP wastewater treatment by nanofiltration process using Taguchi approach. *Separation and Purification Technology*, 70, 265–273.
- Goode, K.R., Asteriadou, K., Fryer, P.J., Picksley, M., Robbins, P.T., 2010. Characterising the cleaning mechanisms of yeast and the implications for Cleaning In Place (CIP). *Food and Bioproducts Processing*, 88(4), 365–374.
- Holah, J., 2000. *Food processing equipment design and clean ability*. Flair-Flow Europe Technical Manual F-FE 377A/00. Dublin, National Food Centre.
- Janczukowicz, W., Mielcarek, A., Rodziewicz, J., Ostrowska, K., Józwiak, T., Kłodowska, I., Kordas, M., 2013. Quality Characteristics of Wastewater from Malt and Beer Production. *Annual Set The Environment Protection*, 15, 729–748.
- Jensen, B.B.; Friis, A., Bénézech, T., Legentilhomme, P., Lelièvre, C., 2005. Local wall shear stress variations predicted by computational fluid dynamics for hygienic design. *Food and Bioproducts Processing Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, C 83(1), 1–8.
- Judd, S.J., Hillis, P., 2001. Optimisation of combined coagulation and microfiltration for water treatment. *Water Research*, 35(12), 2895–2904.

- Jun S., Puri V. M., 2006. 2D dynamic model for fouling performance of plate heat exchangers. *Journal of Food Engineering*, 75, 364–374;
- Kaya, Y., Barlas, H., Arayici, S., 2009. Nanofiltration of Cleaning-in-Place (CIP) wastewater in a detergent plant: effects of pH, temperature and transmembrane pressure on flux behaviour. *Separation and Purification Technology*, 65(2), 117-129.
- Kazimierski, Z., 2004. *Podstawy mechaniki płynów i metod komputerowej symulacji przepływów*. Politechnika Łódzka, Łódź.
- Krzemińska, D., Neczaj, E., Parkitna, K., 2013. Application of fenton reaction for supporting biological wastewater treatment from the dairy industry. *Annual Set The Environment Protection*, 15, 2381-2397.
- Kunze, W., 2010. *Technology Brewing & Malting*. (4th. ed.). VLB Berlin, Germany 2010.
- Lelieveld H.L.M., Mostert M.A., White B., Holah J., 2003. *Hygiene in Food Processing*. 1st Ed. Cambridge, Woodhead Publishing, 197-230.
- Lelievre, C., Legentilhomme, P., Gaucher, C., Legrand, J., Faille, C., Bénézech, T., 2002. Cleaning in place: effect of local wall shear stress variation on bacterial removal from stainless steel equipment. *Chemical Engineering Science*, 57(8), 1287-1297.
- Liu, W., Christian, G.K., Zhang, Z., Fryer, P.J., 2006. Direct measurement of the force required to disrupt and remove fouling deposits of whey protein concentrate. *International Dairy Journal*, 16, 164–172.
- Luan, Z.J., Zhang, G.M., Tian, M.C., Fan, M.X., 2008. Flow resistance and heat transfer characteristics of a new-type Plate Heat Exchanger. *Journal of Hydrodynamics*, (20)4, 524–529.
- Merin, U., Gésan-Guizou, G., Boyaval, E., Daufin, G., 2002. Cleaning-in-place in the dairy industry: criteria for reuse of caustic (NaOH) solutions. *Dairy Science Technology*, 82(3), 357-366.
- Mierzejewska, S., 2011. Analiza efektywności oddziaływania czynników mechanicznych w aspekcie energetycznym i jakościowym mycia rurociągów w przemyśle spożywczym. Rozprawa doktorska, Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny.
- Neryng, A., Wojdalski, J., Budny, J., Krasowski, E., 1990. *Energia i woda w przemyśle rolno-spożywczym*. Wydawnictwo WNT, Warszawa 103–106, 189–194, ISBN 8320410754.
- Olajire, A.A., 2012. The brewing industry and environmental challenges. *Journal of Cleaner Production*. (in press) doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.003.
- Pawetas, A., 2010. Energy effectiveness Energy efficiency on the example of the brewery. *Agro Industry*, 3-4, 44-47.
- Pettigrew, L., Blomenhofer, V., Hubert, S., Groß, F., Delgado, A., 2015. Optimisation of water usage in a brewery clean-in-place system using reference nets. *Journal of Cleaner Production*, 87, 583-593.
- Piepiórką-Stepuk, J., 2012. Wpływ warunków przepływu cieczy między płytami wymiennika ciepła na skuteczność mycia w obiegu zamkniętym. Rozprawa doktorska, Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny.
- Pinson, A.F., Gregoire, A.O., Quintard, B.M., Prat, B.M., Simonin, O.B., 2007. Modeling of turbulent heat transfer and thermal dispersion for flows in flat plate heat exchangers. *International Journal of Heat And Mass Transfer*, 50, 1500-1515.
- PN-EN 12255-4: 2005 - *Oczyszczalnie ścieków. Cz. 4 - Sedymentacja wstępna*
- Rad, S.J., Lewis, M.J., 2014. Water utilisation, energy utilisation and waste water management in the dairy industry: A review. *International Journal of Dairy Technology*, 67(1), 1-20.
- Räsänen, E., Nyström, M., Sahlstein, J., Tossavainen, O., 2002. Purification and regeneration of diluted caustic and acidic washing solutions by membrane filtration, *Desalination* 149, 185–190.
- Rosmaninho, R., Santos, O., Nylander, T., Paulsson, M., Beuf, M., Benezech, T., Yiantsios, S., Andritsos, N., Karabelas, A., Rizzo, G., Mueller-Stenhagen, H., Melo, L.F., 2007. Modified stainless steel surfaces targeted to reduce fouling - Evaluation of fouling by milk components. *Journal of Food Engineering*, (80)4, 1176-1187.
- Simate, G.S., Cluett, J., Iyuke, S.E., Musapatika, E.T., Ndlovu, S., Walubita, L.F., Alvarez, A.E., 2011. The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. *Desalination*, 273, 235–247.
- Tamime, A., 2008. Designing for cleanability. In: Tamime A. (ed.): *Cleaning-in-Place: Dairy, Food and Beverage operations*. 3rd Ed. Oxford, Blackwell Publishing Ltd., 87–90.
- Wilson, D.I., 2003. Challenges in cleaning: recent developments and future prospects. In: *Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications*, RP1(21), 148-157.
- Xin, H., Chen, X.D., Özkan, N., 2004. A mathematical model of the removal of milk protein deposit, heat exchanger fouling and cleaning. *Fundamentals and Applications*, RP1(22), 158–166.
- Zhang, G.M., Tian, M.C., Zhou, S.J., 2006. Simulation and analysis of flow pattern in cross-corrugated plate heat exchangers, *Journal of Hydrodynamics*, B.18(5), 547–551.

3. Opis pozostałych osiągnięć naukowych

Aktywność naukową prowadzę od października 2006 r., czyli od momentu podjęcia kształcenia na studiach doktoranckich (III stopnia) w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn, prowadzonych w Wydziale Mechanicznym, Politechniki Koszalińskiej. Studia te ukończyłam w 2011 roku, natomiast pracę doktorską pt. „*Wpływ warunków przepływu cieczy między płytami wymiennika ciepła na skuteczność mycia w obiegu zamkniętym*” obroniłam w 2012 roku w obszarze nauk rolniczych, w dyscyplinie Inżynieria Rolnicza. Podczas studiów doktoranckich zrealizowałam 2-tygodniowy staż przemysłowy w Browarze Royal Unibrew Polska Sp. z o.o. w Koszalinie oraz 3-tygodniowy staż przemysłowy w Spółdzielni Mleczarskiej Mlekosz w Koszalinie. W tym czasie miałam możliwość uczestniczyć w realizacji procesów mycia urządzeń produkcyjnych, zapoznać się z obowiązującymi w obu zakładach procedurami mycia, indywidualnie realizować zadania związane z programami GMP i GHP i systemem HACCP. Nabyte doświadczenie praktyczne w połączeniu z wiedzą teoretyczną ułatwiło mi realizację badań do pracy doktorskiej.

Badania do pracy doktorskiej realizowałam w Katedrze Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego pod kierunkiem Prof. dra hab. inż. Jarosława Diakuna. Celem pracy było poznanie zjawisk i procesów przepływowych istotnych dla mycia płytowych wymienników ciepła, podstawowych aparatów instalacji mleczarskich. W ramach zrealizowanych zadań badawczych opracowałam model matematyczny przepływu płynu w przestrzeni między płytami wymiennika ciepła i przeprowadziłam symulacje komputerowe. Modele dotyczyły różnej geometrii płyt typu „straight flow”. Uzyskane wyniki badań pozwoliły określić wpływ ukształtowania powierzchni płyty na charakter przepływu oraz wskazać miejsca na płycie, w których niedostateczny przepływ może powodować trudności z ich domywaniem. Badania numeryczne potwierdziłam eksperymentalnie, określając czystość powierzchni płyty w określonych jej obszarach po procesie mycia. Wyniki tych badań zostały opublikowane w pracach oryginalnych, wykazanych w Zał. 3., pkt 2., publ.: **H1, H2, H25, H28**. Kolejne analizy zawarte w pracy doktorskiej prowadziłam w zakresie określenia wpływu warunków mycia płytowych wymienników ciepła na efektywność ich mycia (J_{PHE} [-]). Badania realizowałam w aspekcie trzech czynników, tj.: czasu realizacji procesu mycia, temperatury czynnika myjącego oraz prędkości przepływu roztworów myjących w przestrzeni między płytami. Wyniki tych badań opublikowałam w pracach wykazanych w Zał. 3., pkt 2., publ.: **H19, H21, H22, H26, H27, H29**. Na podstawie danych

empirycznych z przeprowadzonych badań opracowałam funkcje regresji opisujące proces mycia płytowego wymiennika ciepła w aspekcie efektywności mycia $J_{PHE}=f(t,u,T)$ oraz energochłonności procesu mycia $E_{PHE}=f(t,u,T)$, które po uzyskaniu stopnia doktora wykorzystałam do dalszych analiz ukierunkowanych na optymalizację procesu mycia płytowych wymienników ciepła. Wyniki tych prac stanowią treść publikacji wykazanej w osiągnięciu naukowym (Załącznik 3., pkt 1, publ.: **O4**). Badania do pracy doktorskiej realizowałam w ramach projektu badawczego–promotorskiego, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (nr NN313 147038) oraz dwóch projektów badawczych finansowanych z Europejskiego Funduszu Społecznego i Budżetu Państwa Poddziałanie 8.2.2 Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki (środki UE), w latach 2007-2013 „Inwestycja w wiedzę motorem rozwoju innowacyjności w regionie – edycja I oraz edycja II”, których byłam beneficjentką. Wyniki prac realizowanych w ramach finansowania z Europejskiego Funduszu Społecznego i Budżetu Państwa stanowią treść 2 rozdziałów w monografii (Załącznik 3., pkt 2.3.).

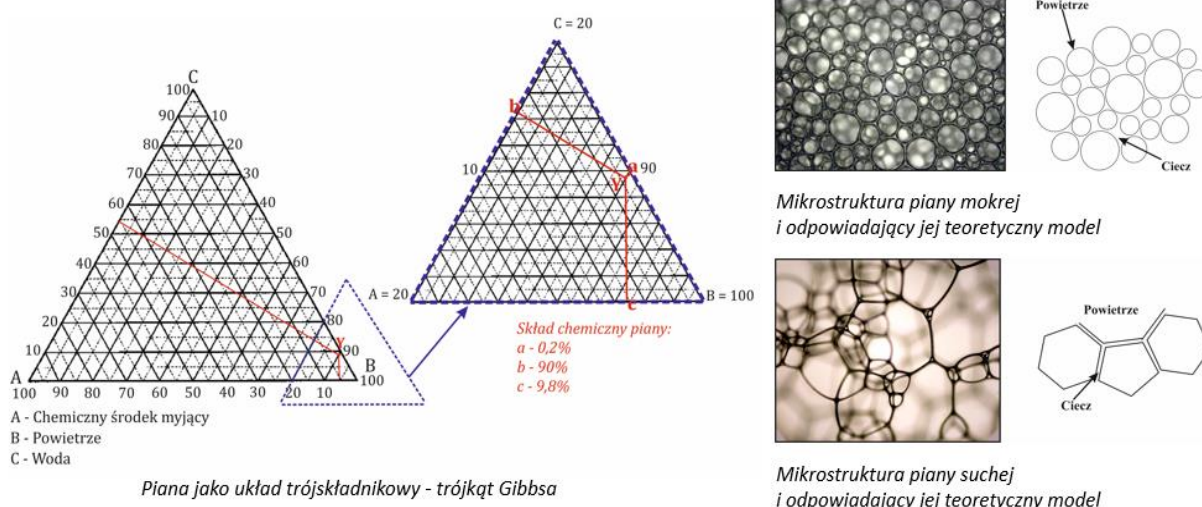
W październiku 2011 roku zostałam zatrudniona w Katedrze Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej na stanowisku asystenta, a rok później adiunkta. Po rozpoczęciu pracy kontynuowałam tematykę badawczą, związaną z procesami mycia stosowanymi w przemyśle spożywczym oraz wpływem czynników techniczno-procesowych na efektywność tego procesu. W zakresie badań eksperymentalnych rozwijałam swoje zainteresowania w kierunku możliwości zastosowania analizy obrazu do badania cech morfologicznych cząstek w układach wielofazowych. Natomiast w zakresie technologii i techniki przetwarzania żywności moje zainteresowania badawcze były tematycznie powiązane z browarnictwem oraz z działaniami podejmowanymi w zakresie bezpieczeństwa produkcji żywności.

W obszarze moich zainteresowań naukowych można dodatkowo wyróżnić następujące kierunki badawcze:

- analiza czynników mycia pianowego i w ultradźwiękach, stosowanych w tym zakresie rozwiązań technicznych i parametrów procesowych w odniesieniu do efektywności mycia;
- identyfikacja parametrów morfometrycznych i fizykochemicznych brzeczek piwnych;
- analiza rozwiązań i działań podejmowanych w zakładach przetwórstwa spożywczego w odniesieniu do programów wstępnych i systemów zarządzania bezpieczeństwem żywności.

3.1. Analiza czynników mycia pianowego i w ultradźwiękach, stosowanych w tym zakresie rozwiązań technicznych i parametrów procesowych w odniesieniu do efektywności mycia

Wiele prac badawczych poświęcono technice mycia pianowego. Określono m.in.: możliwości aplikacyjne tej metody mycia oraz dokonano analizy wpływu stężenia i czasu napowietrzania wybranych roztworów środków myjących na stabilność piany. Wykazano, że w zależności od udziału poszczególnych składników doprowadzonych do komory mieszania, wytworzona piana może charakteryzować się różną strukturą, a powstające pęcherzyki powietrza mogą przyjmować kształt kulisty lub wielościenny. Decyduje o tym udział poszczególnych faz (ciecz/gaz) w układzie zdyspergowanym oraz zachodzące w pianie zjawisko koalescencji (łączenie się pęcherzyków gazu lub cieczy w większe), któremu przeciwdziałają obecność odpowiednich substancji powierzchniowo-czynnych. Wykazano również, że temperatura, ciśnienie sprężonego powietrza oraz stężenie chemicznych substancji aktywnych wpływają na strukturę piany oraz na jej stabilność i utrzymywanie się na mytych powierzchniach przez określony czas. Dotyczy to głównie powierzchni pionowych i skośnych. Zaproponowano opisanie tego układu koloidalnego za pomocą trójkąta Gibbsa, w którym wierzchołki obrazują czyste składniki poszczególnych faz, opisane jako: A - środek myjący, B - powietrze, C - woda, boki trójkąta przedstawiają mieszaniny dwuskładnikowe, natomiast wewnątrz trójkąta znajdują się punkty odpowiadające mieszaninom trójskładnikowym. Punkt Y odpowiada natomiast chemicznemu składowi idealnej piany przeznaczonej do procesu mycia (rys. 19.). Wyniki tych prac wykazano w Zał. 3., pkt 2., publ.: **H31, H35, H36, H48, H51**.

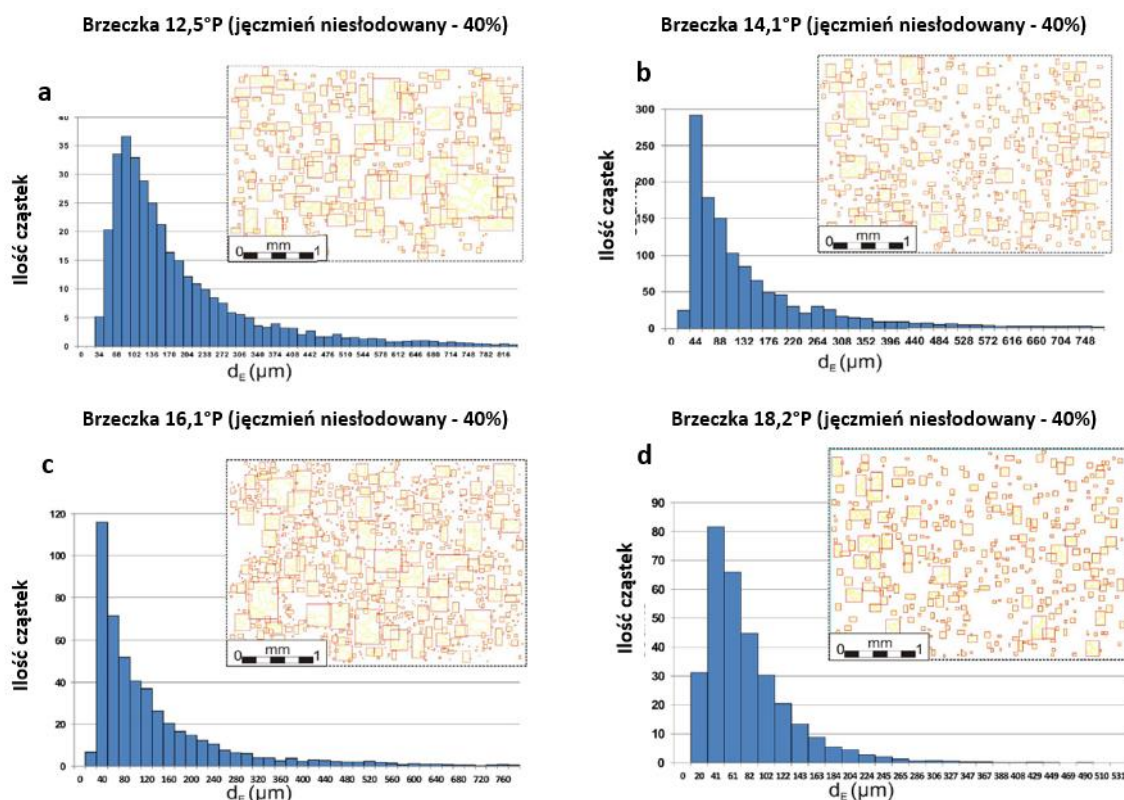


Rys. 19. Charakterystyka układu koloidalnego opisana trójkątem Gibbsa oraz wybrane mikrostruktury analizowanych układów piany

Kolejne prace dotyczyły klasyfikacji myjek komorowych (Zał. 3. pkt 2., publ.: H40), przy czym szczególną uwagę poświęcono myjom ultradźwiękowym i możliwości ich stosowania do usuwania zanieczyszczeń białkowych z elementów instalacji przesyłowych. W ramach tych prac dokonano analizy technicznej myjek ultradźwiękowych dedykowanych dla przetwórstwa spożywczego, omówiono zjawisko kawitacji oraz określono wpływ czynników mycia tj.: moc ultradźwięków, obecność środka chemicznego (NaOH), temperatura roztworu i czas trwania procesu na efektywność usuwania zanieczyszczeń z elementów rurowych (Zał. 3. pkt 2., publ.: H33, H34).

3.2. Identyfikacja parametrów morfometrycznych i fizykochemicznych brzeczek piwnych

Koncepcję badań prowadzonych w zakresie identyfikacji parametrów morfometrycznych oparto o wykorzystanie zaawansowanych algorytmów komputerowej analizy obrazu do identyfikacji cząstek osadu gorącego sedymentującego w brzeczce piwnej metodą Shadow Sizing, którą opisano w części dotyczącej głównego osiągnięcia. Celem było opracowanie charakterystyk rozkładu wielkości cząstek osadu gorącego występującego w brzeczkach piwnych wytwarzanych w warunkach przemysłowych i laboratoryjnych (rys. 20.).



Rys. 20. Rozkład wielkości cząstek osadu gorącego w brzeczkach: a - 12,5°P; b - 14,1°P; c - 16,1°P; d - 18,2°P (jęczmień niesłodowany - 40%)

W ramach zrealizowanych prac określono parametry morfometryczne cząstek osadu oraz opracowano zbiór charakterystyk osadów w brzeczkach słodowych oraz z dodatkiem surowców niesłodowanych. Opracowano również rozkłady ilości i wielkości cząstek, w zależności od składu surowcowego brzeczek. Analizy posłużyły do wstępnego opracowania założeń nowych rozwiązań konstrukcyjnych separatora z zawirowaniem oraz pozwoliły na wstępne opracowanie modelu komputerowego przepływu w kadzi wirowej z uwzględnieniem w przepływie fazy rozproszonej. Do opisu formalnego modelu zaproponowano zastosowanie półempirycznego modelu Schiller'a Naumann'a. Analiza uzyskanych wyników badań dotyczących parametrów morfologicznych osadu gorącego występującego w brzeczkach piwnych po ich gotowaniu pozwoliła także na opracowanie sposobu postępowania w zakresie analizy próbek o wysokim stopniu koncentracji fazy rozproszonej metodą Shadow Sizing. Wyniki tych badań opublikowano w czasopiśmie wyróżnionym w *Journal Citation Reports*[®] (Zał. 3., pkt 2., publ.: **H3**) oraz w czasopismach recenzowanych o zasięgu ogólnopolskim (Zał. 3., pkt 2., publ.: **H7**).

3.3. Analiza rozwiązań i działań podejmowanych w zakładach przetwórstwa spożywczego w odniesieniu do programów wstępnych i systemów zarządzania bezpieczeństwem żywności

Prace dotyczące działań podejmowanych przez zakłady przetwórstwa spożywczego w obszarze GMP i GHP oraz w ramach systemu HACCP stanowią rozwinięcie obszaru moich zainteresowań, obejmujących warunki bezpiecznej produkcji żywności i ich kontrolę. Szczególną uwagę w tym zakresie poświęcono działaniom związanym z utrzymaniem higieny personelu w obszarze produkcji. W ramach zrealizowanych prac dokonano analizy wymagań stawianych pracownikom branży spożywczej oraz w szerszym ujęciu pracownikom branży przetwórstwa mięsnego. Na podstawie zebranej wiedzy praktycznej dokonano również analizy przyczyn zaniedbań higieny przez personel biorący udział w produkcji żywności (Zał. 3., pkt 2., publ.: **H17, H45, H57, H61**). Uwagę poświęcono także materiałom budowlanym stosowanym do wykończenia posadzek w halach produkcyjnych. W tym zakresie wskazano wymagania dotyczące wykończenia posadzek przemysłowym oraz wykazano, że takie materiały jak gres, płytki antybakteryjne, łatwiej utrzymać w czystości niż gumolit (Zał. 3., pkt 2., publ.: **H9, H31, H53**). Dokonano również analizy i klasyfikacji metod kontroli czystości powierzchni po procesach mycia w zależności od ich dostępności (Zał. 3., pkt 2., publ.: **H11, H54, H62**). W ramach zarządzania bezpieczeństwem żywności, na przykładzie wybranego zakładu przetwórstwa ryb, ukazano

działania podejmowane w kierunku utrzymania systemu HACCP w wybranych obszarach produkcyjnych zakładu. Wskazano najslabsze ogniwa w produkcji oraz najczęściej podejmowane działania naprawcze, zapobiegające powtarzaniu się wykrytych niezgodności i prowadzące do udoskonalenia systemu. Na podstawie przeprowadzonych analiz wykazano, że najczęstszą przyczyną wykrywanych niezgodności w zakładach jest personel produkcyjny oraz usterki urządzeń, a podejmowane działania korekcyjne i korygujące przyczyniają się do zmniejszenia popełnianych błędów w tym zakresie błędów w kolejnych latach (Zał. 3. pkt 2, publ.: **H50**). Zebrana w tym zakresie wiedza i nabyte doświadczenie umożliwiły napisanie rozdziału w podręczniku akademickim „Normalizacja w praktyce i przemysłowej przetwórstwa spożywczego”, którego jestem współautorką (zał. 3., pkt 2.4.1.).

4. Syntetyczna charakterystyka dorobku naukowego

4.1. Ilościowy wykaz najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych

Wykaz osiągnięć	Przed doktoratem	Po doktoracie	Łącznie
Publikacje recenzowane punktowane	17	36	53
Publikacje w czasopismach wyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> [®] indeksowanych przez <i>Thomson Reuters</i> [®] <i>Web of Science</i> [®]	0 (IF = 0)	9 (IF = 13,4)	9 (IF = 13,4)
Punktacja za publikacje wg listy MNiSW*	101	456	557
Cytowania według <i>Thomson Reuters</i> [®] <i>Web of Science</i> [®]		10 (indeks Hirscha: 3)	
Cytowania według <i>Elsevier</i> [®] <i>Scopus</i> [®]		13 (indeks Hirscha: 2)	
Rozdziały w monografiach (recenzowane)	1	1	2
Patenty krajowe	–	1	1
Punktacja za udzielony patent	–	30	30
Zgłoszenia patentowe	0	1	1
Udział w konferencjach ogólnopolskich /wygłoszone referaty	12/6	13/6	25/12
Udział w konferencjach międzynarodowych/wygłoszone referaty/ / zaprezentowane plakaty i e-postery	1/0/2	5/1/7	6/1/9
Zlecone prace badawcze	0	3	3
Opracowania naukowe w formie raportów z realizacji projektów badawczych	3	7	10
Projekty badawcze MNiSW/NCN/NCBiR	1	4/0/0	5
Projekty finansowane ze środków UE	4	0	4
Zagraniczne staże naukowe	–	2	2
Nagrody i wyróżnienia naukowe/organizacyjne	–	5/2	5/2

IF i punktacja zgodna z rokiem publikacji – artykuły opublikowane i zaliczone do 2018 roku zostały przeliczone wg wskaźnika aktualnego (za 2017 rok)

4.2. Punktacja osiągnięć wg list MNiSW i danych do oceny parametrycznej jednostek

Publikacje w recenzowanych czasopismach naukowych wyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i>[®] indeksowanych przez <i>Thomson Reuters</i>[®] <i>Web of Science</i>[®]				
Tytuł czasopisma	Liczba publikacji	Punkty wg listy MNiSW	Suma punktów	IF
Chemical and Process Engineering	2	15 (2013) 15 (2017)	30	0,467 0,971
Italian Journal of Food Science	2	15 (2014)	30	0,285
Journal of Food Engineering	1	40 (2016)	40	3,099
Czech Journal of Food Science	1	20 (2015)	20	0,787
Journal of Cleaner Production	1	40 (2016)	40	5,715
International Journal of Food Engineering	1	15 (2017)	15	0,923
Journal of the Institute of Brewing	1	1 (2018)	20	0,868
Publikacje w recenzowanych czasopismach wyszczególnionych na liście B MNiSW				
Tytuł czasopisma	Liczba publikacji	Punkty wg listy MNiSW	Suma punktów	IF
Rocznik Ochrony Środowiska	1	6 (2007)	6	-
Przemysł Spożywczy	20	6 (2007-2012) 5 (2012-2014) 12 (2015-2018)	150	-
Inżynieria Rolnicza Agricultural Engineering	10	6 (2009) 5 (2012-2014) 10 (2018)	61	-
Inżynieria i Aparatura Chemiczna	2	6 (2009) 5 (2011)	11	-
Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych	1	6 (2010)	6	-
Nauki Inżynierskie i Technologie	2	5 (2012) 4 (2013)	9	-
Pomiary Automatyka Kontrola	2	7 (2014)	14	-
Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego	4	6 (2009) 6 (2014)	24	-

Gospodarka Mięsna	4	7 (2015-2018)	28	-
Problemy Higieny i Epidemiologii	1	7 (2014)	7	-
Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego	5	3 (2015-2017)	15	-
Motrol. Motoryzacja i Energetyka w Rolnictwie	1	6 (2016)	6	-
Patenty udzielone przez Urząd Patentowy RP				
Nr patentu/rok udzielenia	Liczba	Punkty wg MNiSW	Suma punktów	IF
226306 B1/2017	1	30 (2017)	30	-
SUMA			557*	13,4*
w tym osiągnięcie naukowe, o którym mowa w art. 16. ust. 2. ustawy z dnia 14 marca 2003 r.			165*	8,578*

IF i punktacja zgodna z rokiem publikacji – artykuły opublikowane i zaliczone do 2018 roku zostały przeliczone wg wskaźnika aktualnego (za 2017 rok)

Koszalin, 14.12.2018 r.

Podpis:
