



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

dr inż. Dominik Mierzwa

WYDZIAŁ TECHNOLOGII CHEMICZNEJ
ul. Berdychowo 4, 60-965 Poznań
tel.: +48 (61) 665 39 69
e-mail: dominik.mierzwa@put.poznan.pl
www.fct.put.poznan.pl



Załącznik nr 2

do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

Autoreferat

Tytuł osiągnięcia naukowego:

**Rola ultradźwięków w procesach wymiany ciepła oraz masy na przykładzie
wybranych operacji jednostkowych.**

dr inż. Dominik Mierzwa

Poznań 2023

Spis treści

| | |
|---|----|
| 1. Dane osobowe habilitanta | 3 |
| 2. Posiadane tytuły, stopnie naukowe | 3 |
| 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych..... | 3 |
| 4. Zestawienie najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych | 4 |
| 5. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.) | 5 |
| 5.1. Wprowadzenie do tematyki badawczej | 10 |
| 5.2. Badania nad intensyfikacją wybranych operacji jednostkowych z wykorzystaniem ultradźwięków | 11 |
| 5.2.1. Suszenie wspomagane ultradźwiękami..... | 11 |
| 5.2.2. Odwadnianie osmotyczne wspomagane ultradźwiękami..... | 26 |
| 5.2.3. Nasycanie próżniowe wspomagane ultradźwiękami | 31 |
| 5.3. Podsumowanie | 38 |
| 6. Informacja o wykazaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej w szczególności zagranicznej | 40 |
| 7. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę..... | 41 |
| 8. Inne informacje ważne z punktu widzenia kariery zawodowej..... | 43 |
| 9. Pozostały dorobek po doktoracie..... | 46 |
| 9.1. Prace w czasopismach indeksowanych w JCR..... | 46 |
| 9.2. Rozdziały w monografiach naukowych | 50 |
| 9.3. Prace w czasopismach nieindeksowanych w JCR..... | 51 |
| 9.4. Patenty | 52 |
| 9.5. Opis pozostałej działalności naukowej po doktoracie..... | 52 |

1. Dane osobowe habilitanta

Imię i nazwisko: **Dominik Mierzwa**

ORCID: **0000-0002-5337-1468**

WoS ResearcherID: **B-1139-2016**

Google Scholar: **ey_soggAAAAJ**

2. Posiadane tytuły, stopnie naukowe

2008-2012 **Doktor nauk technicznych**, dyscyplina: technologia chemiczna. Stopień naukowy nadany uchwałą Rady Wydziału Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej w dniu 23 października 2012 r. Tytuł rozprawy doktorskiej: Efektywność suszenia hybrydowego materiałów biologicznych. Promotor: prof. dr hab. inż. Stefan Jan Kowalski. Rada Wydziału uznała rozprawę za wyróżniającą.

2003-2008 **Magister inżynier**, studia jednolite 5 letnie, kierunek: technologia chemiczna, specjalność: inżynieria chemiczna i procesowa. Tytuł zawodowy uzyskany na Wydziale Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej w dniu 17 czerwca 2008 r. Tytuł pracy magisterskiej: Badanie odkształcania próbek podczas suszenia konwekcyjnego. Promotor: prof. dr hab. inż. Grzegorz Musielak.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2016-teraz **Adiunkt** w Zakładzie Inżynierii Procesowej Wydziału Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej.

2015-2016 **Asystent dydaktyczno-naukowy** w Zakładzie Inżynierii Procesowej Wydziału Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej.

2012-2015 **Asystent naukowy** w Zakładzie Inżynierii Procesowej Wydziału Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej.

4. Zestawienie najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych

Mój całkowity dorobek naukowy obejmuje łącznie 76 prac w tym 29 artykułów opublikowanych w czasopiśmie indeksowanych przez Thomson Reuters Journal Citation Report (JCR). Tabela 1 przedstawia wykaz dorobku naukowego z podziałem na okres przed i po doktoracie.

Tabela 1 Zestawienie osiągnięć naukowo-badawczych

| Lp. | Składnik osiągnięcia naukowego | Liczba | | Łącznie |
|-----|--|---------------------|------------------|--|
| | | Przed doktoratem | Po doktoracie | |
| 1. | Publikacje w czasopiśmie posiadających współczynnik wpływu <i>Impact Factor</i> (IF) | 7 | 22 | 29 |
| 2. | Publikacje w czasopiśmie nieposiadających współczynnika wpływu IF | 2 | 3 | 5 |
| 3. | Publikacje w recenzowanych materiałach konferencyjnych (min 2 str. A4) | 9 | 31 | 40 |
| 4. | Rozdziały w monografiach naukowych | 0 | 2 | 2 |
| 5. | Uzyskane patenty | 0 | 1 | 1 |
| 6. | Udział w projektach badawczych | | | |
| | jako kierownik | 3 | 4 | 7 |
| | jako główny wykonawca/wykonawca | 3 | 3 | 6 |
| 7. | Udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych | | | |
| | wygłoszone referaty | 3 | 4 | 7 |
| | przedstawione postery | 4 | 11 | 15 |
| 8. | Liczba cytowań | | | |
| | sumaryczna | | | 585¹/674² |
| | bez autocytowań | | | 528¹/617² |
| 9. | Sumaryczny współczynnik wpływu IF publikacji | 9,056 | 81,863 | 90,919 |
| 10. | Liczba punktów MEiN | 233 | 2350 | 2583 |
| 11. | Index Hirscha | | | |
| | sumaryczny | | | 15^{1,2} |

¹ Na podstawie bazy bibliograficznej Web of Science (na dzień 15.09.2023 r.) www.webofscience.com

² Na podstawie bazy bibliograficznej Scopus (na dzień 15.09.2023 r.) www.scopus.com

5. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

Osiągnięcie naukowe stanowi cykl 13 powiązanych tematycznie artykułów naukowych pod wspólnym tytułem:

Rola ultradźwięków w procesach wymiany ciepła oraz masy na przykładzie wybranych operacji jednostkowych.

Cykl stanowią następujące prace:

| | | | | |
|---|---|----------|-------------------|--------------------------|
| [H1] | Musielak G., Mierzwa D. (✉), Kroehnke J. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 2016 | 5,191 | 50 (lista A) |
| | | 22*/23** | 15,300* | 200** |
| Food drying enhancement by ultrasound – A review | | | | |
| <i>Trends in Food Science & Technology, 56, 2016, 126-141</i> | | | | |
| DOI: 10.1016/j.tifs.2016.08.003 | | | | |
| Wkład habilitanta obejmuje: analizę literatury pod kątem zastosowania ultradźwięków w procesie suszenia, analizę rozwiązań konstrukcyjnych suszarek ze wspomaganie ultradźwiękowym, tworzenie tekstu oryginalnego, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie rysunków, schematów). | | | | |
| [H2] | Mierzwa D. (✉), Kowalski S.J. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 2016 | 0,971 | 15 (lista A) |
| | | 22*/23** | 0,600* | 100** |
| Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration and Convective Drying of Apples: Process Kinetics and Quality Issues | | | | |
| <i>Chemical and Process Engineering, 37(3), 2016, 383-391</i> | | | | |
| DOI: 10.1515/cpe-2016-0031 | | | | |
| Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie koncepcji/hipotez badawczych, opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów). | | | | |

³ Dane uzyskane z portalu Most Wiedzy www.mostwiedzy.pl, dostęp dnia 30 czerwca 2023 r.

| | | | | |
|------|------------------------------------|----------|-------------------|--------------------------|
| [H3] | Rajewska K., Mierzwa D. (✉) | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 2017 | 3,116 | 40 (lista A) |
| | | 22*/23** | 6,600* | 140** |

Influence of Ultrasound on the Microstructure of Plant Tissue

Innovative Food Science and Emerging Technologies, 43, 2017, 117-129

DOI: 10.1016/j.ifset.2017.07.034

Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie koncepcji/hipotez badawczych, opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

| | | | | |
|------|---|----------|-------------------|--------------------------|
| [H4] | Mierzwa D. (✉), Kowalski S.J., Kroehnke J. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 2017 | 1,168 | 25 (lista A) |
| | | 22*/23** | 2,400* | 40** |

Hybrid Drying of Carrot Preliminary Processed with Ultrasonically Assisted Osmotic Dehydration

Food Technology and Biotechnology, 55(2), 2017, 197-205

DOI: 10.17113/ftb.55.02.17.4942

Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie koncepcji/hipotez badawczych, opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

| | | | | |
|------|---|----------|-------------------|--------------------------|
| [H5] | Kowalski S.J. (✉), Mierzwa D. , Stasiak M. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 2017 | 3,556 | 35 (lista A) |
| | | 22*/23** | 3,300* | 100** |

Ultrasound-Assisted Convective Drying of Apples at Different Process Conditions

Drying Technology, 35(8), 2017, 939-947.

DOI: 10.1080/07373937.2016.1239631

Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie koncepcji/hipotez badawczych, opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

| | | | | |
|---|---|----------|-------------------|--------------------------|
| [H6] | Mierzwa D. (✉), Szadzińska J., Pawłowski A., Pashminehazar R., Kharaghani A. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 2019 | 2,988 | 100 |
| | | 22*/23** | 3,300* | 100** |
| <p>Nonstationary Convective Drying of Raspberries, Assisted by Microwaves and Ultrasound</p> <p><i>Drying Technology, 37(8), 2019, 988-1001</i> DOI: 10.1080/07373937.2018.1481087</p> <p>Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie koncepcji/hipotez badawczych, opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów (procesy suszenia), przeprowadzenie badań eksperymentalnych (procesy suszenia), opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych (procesy suszenia), tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).</p> | | | | |
| [H7] | Kroehnke J., Szadzińska J., Radziejewska-Kubzdela E., Biegańska-Marecik R., Musielak G., Mierzwa D. (✉) | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 2020 | 7,491 | 140 |
| | | 22*/23** | 8,400* | 100** |
| <p>Osmotic Dehydration and Convective Drying of Kiwifruit (<i>Actinidia Deliciosa</i>) – The Influence of Ultrasound on Process Kinetics and Product Quality</p> <p><i>Ultrasonics Sonochemistry, 71, 2021, 105377-1 – 11</i> DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105377</p> <p>Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach.</p> | | | | |
| [H8] | Musielak G. (✉), Mierzwa D. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 2021 | 2,838 | 100 |
| | | 22*/23** | 2,700* | 100** |
| <p>Enhancement of convection heat transfer in air using ultrasound</p> <p><i>Applied Sciences, 11(19), 2021, 8846-1 – 10</i> DOI: 10.3390/app11198846</p> <p>Wkład habilitanta obejmuje: przeprowadzenie badań eksperymentalnych, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).</p> | | | | |

| | | | | |
|---|---|----------|-------------------|--------------------------|
| [H9] | Szadzińska J. (✉), Mierzwa D. , Musielak G. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 2022 | 4,264 | 140 |
| | | 22*/23** | 4,300* | 140** |
| <p>Ultrasound-Assisted Convective Drying of White Mushrooms (<i>Agaricus Bisporus</i>)</p> <p><i>Chemical Engineering and Processing: Process Intensification</i>, 172, 2022, 108803-1 – 11 DOI: 10.1016/j.cep.2022.108803</p> <p>Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie koncepcji/hipotez badawczych, opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych (kinetyka suszenia, aproksymacja modelami cienkowarstwowymi, współczynnik dyfuzji), tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).</p> | | | | |
| [H10] | Mierzwa D. (✉), Szadzińska J., Gapiński B., Radziejewska-Kubzdela E., Biegańska-Marecik R. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 2022 | 7,491 | 140 |
| | | 22*/23** | 8,400* | 140** |
| <p>Assessment of Ultrasound-Assisted Vacuum Impregnation as a Method for Modifying Cranberries' Quality</p> <p><i>Ultrasonics Sonochemistry</i>, 89, 2022, 106117-1 – 10 DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106117</p> <p>Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie koncepcji/hipotez badawczych, opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).</p> | | | | |
| [H11] | Mierzwa D. (✉), Szadzińska J., Radziejewska-Kubzdela E., Lenartowicz T. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 2022 | 4,264 | 140 |
| | | 22*/23** | 4,300* | 140** |
| <p>Effect of Ultrasound on Mass Transfer during Vacuum Impregnation of Low-Porous Food Materials on the Example of Potato (<i>Solanum Tuberosum</i> L.)</p> <p><i>Chemical Engineering and Processing - Process Intensification</i>, 2023 (188), 109375-1 – 9 DOI: 10.1016/j.cep.2023.109375</p> <p>Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie koncepcji/hipotez badawczych, opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych</p> | | | | |

wyjściowych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

| | | | |
|---|----------|-------------------|--------------------------|
| [H12] Musielak G., Mierzwa D. (✉), Łechtańska J. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | 2023 | 2,838 | 100 |
| | 22*/23** | 2,700* | 100** |

Experimental investigation of enhancement of natural convective heat transfer in air using ultrasound

Applied Sciences, 13 (4), 2023, 2516

DOI: 10.3390/app13042516

Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

| | | | |
|--|----------|-------------------|--------------------------|
| [H13] Radziejewska-Kubzdela E., Szadzińska J., Biegańska-Marecik R., Spizewski T., Mierzwa D. (✉) | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | 2023 | 8,400 | 140 |
| | 22*/23** | 8,400* | 140** |

Effect of Ultrasound on Mass Transfer during Vacuum Impregnation and Selected Quality Parameters of Products: A Case Study of Carrots

Ultrasonics Sonochemistry, 99, 2023, 106592-1 – 10

DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106592

Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie koncepcji/hipotez badawczych, opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

Sumaryczny Impact Factor: 54,522

Suma pkt. MEiN: 1165

5.1. Wprowadzenie do tematyki badawczej

Po obronie rozprawy doktorskiej, w grudniu 2021 r., zostałem zatrudniony w Zakładzie Inżynierii Procesowej Instytutu Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Poznańskiej, na stanowisku asystenta naukowego w projekcie BIOSUSZ (nr PBS1/A8/13/2012). Projekt ten realizowany był przez konsorcjum naukowo-przemysłowe w ramach 1 Programu Badań Stosowanych, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Liderem konsorcjum był Instytut Ogrodnictwa – Państwowy Instytut Badawczy w Skierniewicach, a kierownikiem projektu była prof. dr hab. Dorota Konopacka. Oprócz Instytutu Ogrodnictwa oraz Politechniki Poznańskiej, w projekcie wzięli udział Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie, a także dwóch partnerów przemysłowych: firma PROMIS-TECH sp. z o.o. z Wrocławia oraz firma Celiko sp. z o.o. z Poznania. Z ramienia Politechniki Poznańskiej projekt nadzorował prof. dr hab. inż. Stefan Jan Kowalski.

W ramach projektu opracowane zostały nowatorskie technologie suszenia oraz obróbki wstępnej (np. odwadniania osmotycznego) surowca owocowego i warzywnego z wykorzystaniem ultradźwięków jako czynnika intensyfikującego te operacje jednostkowe. W pierwszej fazie konieczne było zaprojektowanie oraz skonstruowanie aparatury badawczej, tj. suszarek oraz urządzeń obróbki wstępnej. Podstawowym problemem był fakt, iż projektowane urządzenia były prototypami na skalę światową. Ówczesnie tylko kilka zespołów na świecie zajmowało się suszeniem wspomaganym ultradźwiękowo, przy czym w nieco innym ujęciu niż zakładał projekt BIOSUSZ. W projekcie tym założono bowiem, że ultradźwięki dostarczane będą do materiału suszonego bezkontaktowo – przez warstwę czynnika suszącego (powietrze). Tylko takie rozwiązanie miało zapewnić możliwość powiększenia skali z laboratoryjnej do półtechnicznej czy technicznej. Moim zadaniem w projekcie było opracowywanie koncepcji technicznych aparatury, nadzór nad procesem jej projektowania oraz konstruowania, testy rozruchowe, planowanie oraz wykonanie badań laboratoryjnych, analiza otrzymanych wyników i redakcja raportów/prac naukowych.

Opisany powyżej okres projektowo-konstrukcyjny nie był z punktu widzenia naukowego bezproduktywny. W czasie intensywnego poszukiwania źródła ultradźwiękowego oraz projektowania suszarki, wraz z pozostałymi członkami zespołu dokonałem przeglądu literaturowego pod kątem zastosowania ultradźwięków w procesie suszenia.

Efektom tych działań były 3 prace:

- Wykorzystanie ultradźwięków jako techniki wspomagania procesu suszenia warzyw i owoców [P2]⁴
- Możliwe efekty oddziaływania ultradźwięków na jakość odwadnianych owoców i warzyw [P3]⁴
- Food drying enhancement by ultrasound – A review [H1].

Szczególnie wartościowa, w mojej ocenie, jest praca [H1], ponieważ dokonano w niej przeglądu stosowanych na świecie technik wspomagania ultradźwiękowego procesów suszenia oraz omówiono podstawowe efekty i mechanizmy działania ultradźwięków w materiale suszonym, a także ich potencjalny wpływ na procesy wymiany ciepła i masy. Praca ta wymagała bardzo dużego zaangażowania i stanowiła podstawę do analizy otrzymanych w późniejszym czasie wyników eksperymentalnych. Należy również zaznaczyć, że znaczna część mechanizmów i zjawisk opisywanych

⁴ Patrz pkt. 9 autoreferatu

w pracy oraz literaturze przedmiotu miała wówczas charakter hipotez badawczych, które wymagały potwierdzenia. W pracy tej wskazano niezagospodarowane obszary badawcze i niepodjęte dotychczas zagadnienia dotyczące wspomaganie ultradźwiękowego operacji jednostkowych, z szczególnym uwzględnieniem suszenia. Przedstawiono również nieopisane do tej pory w literaturze naukowej problemy badawcze związane z działaniem ultradźwięków. Kolejnym krokiem było więc wykonanie serii doświadczeń mających na celu potwierdzenie tych hipotez i określenie mechanizmów wywołujących poszczególne efekty.

Projekt BIOSUSZ oraz doświadczenia w nim zdobyte spowodowały, że w kolejnych latach zajmowałem się zagadnieniem zastosowania ultradźwięków w procesie suszenia oraz innych operacjach jednostkowych, takich jak odwadnianie osmotyczne, nasycanie próżniowe, a także konwekcyjna wymiana ciepła. Przedmiotem mojego szczególnego zainteresowania był wpływ fal akustycznych na procesy wymiany ciepła oraz masy w materiałach owocowych i warzywnych.

Przed przystąpieniem do badań eksperymentalnych przyjąłem następującą hipotezę badawczą:

Ultradźwięki intensyfikują procesy wymiany masy oraz ciepła i korzystnie wpływają na kinetykę operacji jednostkowych opierających się na tych procesach.

Hipoteza ta została później rozszerzona o hipotezy pomocnicze:

- Energia fal mechanicznych ulega częściowo dysypacji i jest wydzielana w postaci ciepła co sprzyja operacjom jednostkowym opierającym się na procesach wymiany.
- Ultradźwięki oddziałują dynamicznie z materiałem, w którym się rozchodzą powodując odwracalne i nieodwracalne efekty.
- Ultradźwięki mogą oddziaływać z medium, w którym propagują (środowisko gazowe lub ciekłe), co prowadzi do intensyfikacji procesów wymiany masy i/lub ciepła poprzez redukcję czynników stanowiących opór dla transportu.

W ramach prowadzonych badań starałem się wykazać, że założone hipotezy badawcze są prawdziwe.

5.2. Badania nad intensyfikacją wybranych operacji jednostkowych z wykorzystaniem ultradźwięków

5.2.1. Suszenie wspomagane ultradźwiękami

Koncepcja suszenia z wykorzystaniem dźwięków słyszalnych i ultradźwięków pojawiła się w literaturze przedmiotu już w latach 50-tych ubiegłego wieku⁵. Technikę tę rozwijano głównie w Związku Radzieckim. Badania wykazały, że zastosowanie ultradźwięków przyspiesza proces suszenia bez wyraźnego wzrostu temperatury materiału. Z tego powodu aplikację ultradźwięków rozważano przede wszystkim w procesach suszenia materiałów wrażliwych termicznie, takich jak produkty żywnościowe. Podstawową wadą badanych wówczas systemów generacji ultradźwięków (syren akustycznych) były: niska wydajność energetyczna oraz wysoki poziom szumów⁶. Z tego powodu badania zawieszono aż

⁵ H.S. Muralidhara, D. Ensminger, i A. Putnam, „Acoustic Dewatering and Drying (Low and High Frequency): State of the Art Review”, *Drying Technology* 3, nr 4 (1 listopad 1985): 529–66, <https://doi.org/10.1080/07373938508916296>.

⁶ T. Kudra i A.S. Mujumdar, „Sonic Drying”, w *Advanced Drying Technologies, Second Edition* (Boca Raton (FL, USA): CRC Press, 2009), 199–224.

do momentu opracowania nowatorskich rozwiązań generacji ultradźwięków wysokiej mocy, opartych na przetwornikach piezoceramicznych. Nowe – efektywniejsze źródła ultradźwiękowe pozwoliły na przeprowadzenie badań, w trakcie realizacji których zaobserwowano, że fale te mogą działać synergistycznie z innymi technikami suszenia i przyspieszać tę operację jednostkową. Co więcej, ultradźwięki, w odróżnieniu do innych źródeł energii, takich jak np. mikrofałe czy też pulsacyjne pole elektryczne, nie wywołują obaw konsumentów co do bezpieczeństwa przetwarzanych produktów, co pozwala na ich stosowanie, np. w przemyśle spożywczym.

Proces suszenia jest skomplikowaną operacją usuwania wilgoci z matrycy porowatej i obejmuje jednoczesną wymianę zarówno ciepła jak i masy. Z punktu widzenia kinetyki, szybkość suszenia może być kontrolowana przez czynniki oporów wewnętrznych (z ang. *internal resistance*), jak i zewnętrznych (z ang. *external resistance*). W najbardziej złożonych przypadkach, kontrolę nad szybkością procesu przejmują obie grupy czynników i mamy do czynienia z układem mieszanym. Aby określić który rodzaj oporu jest dominujący należy wyznaczyć liczbę Biota dla wymiany masy (Bi_m). Przyjmuje się, że dla produktów spożywczych obowiązują następujące wartości graniczne⁷:

- $Bi_m < 0,01$ – suszenie kontrolowane zewnętrznie,
- $1 < Bi_m < 100$ – suszenie kontrolowane zarówno czynnikami zewnętrznymi jak i wewnętrznymi,
- $Bi_m > 100$ – suszenie kontrolowane wewnętrznie.

Podczas suszenia kontrolowanego przez opory zewnętrzne, transport masy wewnątrz produktu może być zaniedbany (występuje jednorodny rozkład wilgoci w materiale), a szybkość procesu jest zależna tylko od wymiany między powierzchnią ciała suszonego i czynnikiem suszącym. W przypadku procesów kontrolowanych częściowo lub całkowicie przez czynniki oporów wewnętrznych, rozkład wilgoci w materiale suszonym nie jest jednorodny i transport masy wewnątrz ciała suszonego nie może zostać zaniedbany. W najbardziej złożonych przypadkach szybkość suszenia jest całkowicie kontrolowana przez transport wilgoci wewnątrz materiału, a proces jest długotrwały i energochłonny. Ze względu na wiele czynników, takich jak: złożona budowa materiału – struktura i skład, wysoka wartość wilgotności krytycznej, postępujący skurcz i wynikające z niego deformacje oraz zmiana powierzchni wymiany ciepła, i masy, suszenie materiałów spożywczych jest w znacznej większości przypadków procesem kontrolowanym czynnikami oporów wewnętrznych, i przebiega niemal całkowicie w okresie o zmniejszającej się szybkości suszenia – tzw. *drugim okresie suszenia*. Często okres ten dzieli się na kilka podokresów. Niemniej jednak jest on długotrwały i powolny, z tego powodu szuka się czynników pozwalających na intensyfikację wymiany ciepła i masy na tym etapie suszenia.

Podobnie jak dla wymiany masy, liczbę Biota można również wyznaczyć dla ciepła (Bi_T). W tym przypadku stanowi ona stosunek transportu ciepła na drodze konwekcji i przewodzenia. Wysoka liczba Biota (>100), wskazuje na dominujący transport na drodze przewodzenia i związany z tym niejednorodny rozkład temperatury wewnątrz materiału. Niska liczba Biota ($<0,01$) oznacza, że ciepło wymieniane jest głównie na drodze konwekcji, pomiędzy powierzchnią a czynnikiem suszącym, a więc temperatura wewnątrz materiału jest jednorodna – gradient temperatury jest pomijalnie mały.

⁷ K. Kahveci i A. Cihan, „Transport phenomena during drying of food materials”, w *Focus on Food Engineering Research and Developments*, red. V.N. Pletney (New York (NY, USA): Nova Science Publishers Inc., 2007), 13–163.

Ze względu na liczne interakcje, ultradźwięki mogą w procesach wymiany ciepła i masy wpływać zarówno na czynniki oporów wewnętrznych jak i zewnętrznych. W 2014 r. w literaturze przedmiotu znaleźć można było doniesienia nt. możliwych mechanizmów oddziaływania ultradźwięków – ich wpływu na szybkość suszenia. Często jednak były to tylko hipotezy badawcze, których nie dowiedziono doświadczalnie. Z tego względu realizując prace doświadczalne starałem się wyjaśnić obserwowane efekty.

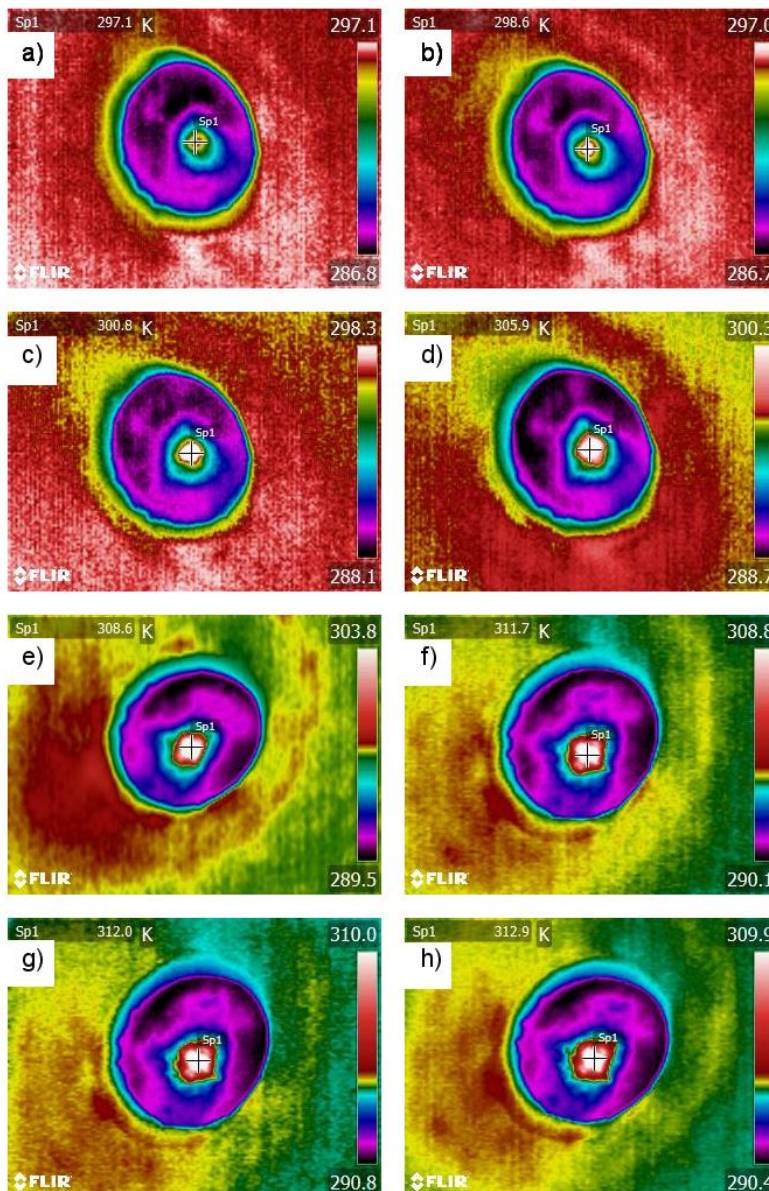
Efekt cieplny

Pierwszym i najprostszym do zaobserwowania efektem działania ultradźwięków jest tzw. *efekt cieplny* (z ang. *heating effect*). Polega on na nagrzewaniu materiału suszonego powyżej temperatury czynnika suszącego, co w warunkach konwekcji naturalnej czy wymuszonej, jest niemożliwe. Efekt ten tłumaczy się faktem, że część energii akustycznej docierającej do materiału suszonego ulega dyssypacji powodując wzrost temperatury powierzchni materiału.

W ramach realizacji badań do pracy [H3] wykonano termogramy próbek poddawanych bezpośrednio oddziaływaniu ultradźwięków w powietrzu. Materiałem badanym było jabłko (plaster) oraz cebula (łupina). Nadźwiękawianie wykonano na stanowisku do bezpośredniej obróbki ultradźwiękowej, wyposażonym w system AUS pracujący ze zbieżnym polem akustycznym. Oznacza to, że intensywność dźwięku zwiększa się w miarę wzrostu odległości od radiatora i osiąga maksimum (ogniskuje się) w odległości ok. 460 mm. Zgodnie z danymi uzyskanymi od producenta, ciśnienie akustyczne w obszarze ogniskowania wynosi 160 dB. Generowane fale miały częstotliwość ok. 21 kHz, moc nastawioną na generatorze 200 W. Stanowisko to zaprojektowałem oraz skonstruowałem we współpracy z dr. inż. Andrzejem Pawłowskim.

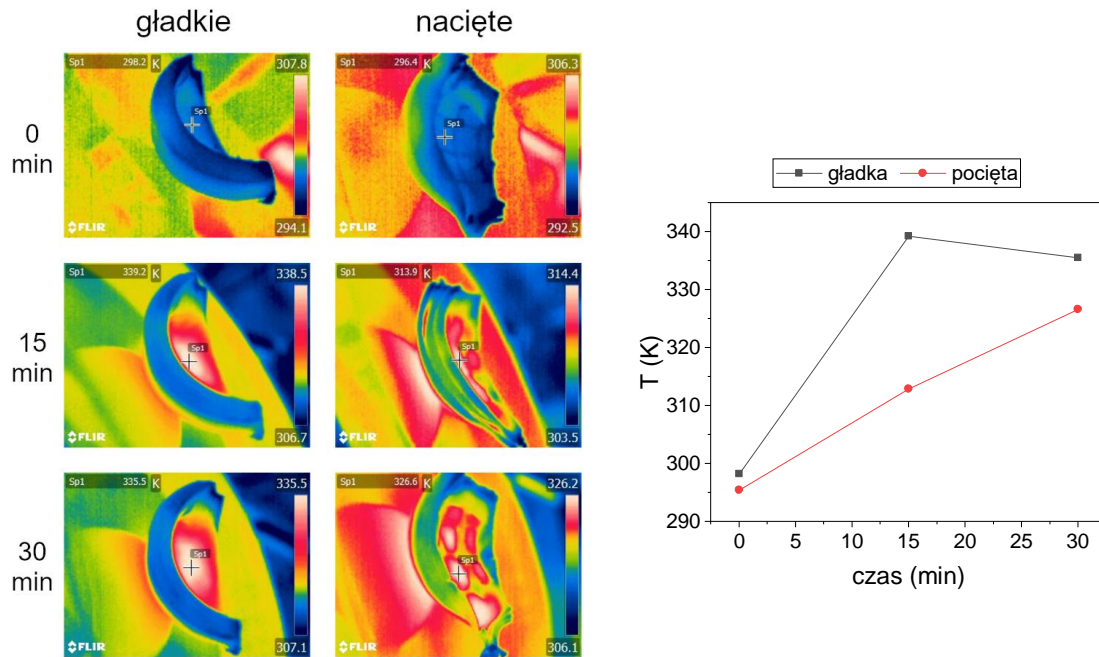
Na rysunku 1 zaprezentowano termogramy zarejestrowane za pomocą kamery termowizyjnej FLIR ThermoCAM B2 dla próbek jabłka umieszczonych w obszarze ogniskowania, a także wykres maksymalnej temperatury odczytanej z zarejestrowanych w czasie eksperymentu zdjęć, w punkcie oznaczonym krzyżykiem.

Otrzymane zdjęcia wskazują, że tkanka jabłka uległa znacznemu nagrzaniu pod wpływem fal akustycznych. Wyraźny jest również efekt ogniskowania, ponieważ najsilniej nagrzał się obszar centralny próbki, zaś w miarę oddalania się ku brzegom, temperatura zmniejszała się. Efekt cieplny jest w tym przypadku bardzo duży, próbka nagrzała się od temperatury otoczenia (295 K) do temperatury ok. 313 K w czasie 15 minut. Wykres temperatury od czasu pokazuje niemal liniowy wzrost temperatury. Świadczy to o bardzo efektywnym nagrzewaniu powierzchni przez ultradźwięki.



Rysunek 1 Termogramy próbek jabłka umieszczonego w polu ogniskowania ultradźwięków po: a) 2, b) 4, c) 6, d) 8, e) 10, f) 12, g) 14, h) 15 minutach oraz wykres zależności maksymalnej temperatury T od czasu, odczytanej w punkcie oznaczonym na termogramach krzyżykiem [H3]

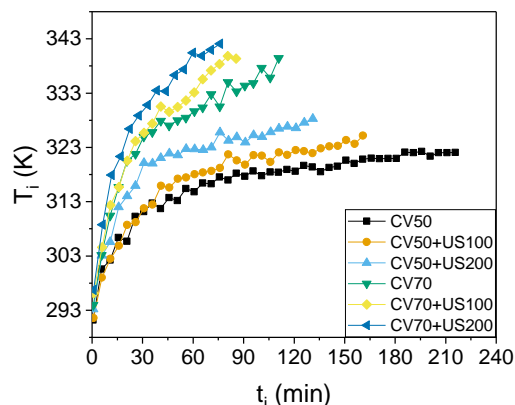
Na rysunku 2 zaprezentowano termogramy otrzymane dla cebuli poddanej działaniu ultradźwięków, a także wykres maksymalnej temperatury odczytanej z zarejestrowanych zdjęć w punkcie oznaczonym krzyżykiem. W doświadczeniu tym zbadano dwa warianty, w pierwszym powierzchnia cebuli została w postaci naturalnej – gładkiej, w drugim nacięto ją w kratkę o oczku 5 mm w celu rozwinięcia powierzchni wymiany.



Rysunek 2 Termogramy próbek cebuli umieszczonej w polu ogniskowania ultradźwięków oraz wykres zależności maksymalnej temperatury T od czasu, odczytanej w punkcie oznaczonym na termogramach krzyżykiem [H3]

Otrzymane termogramy, ponownie ukazują bardzo wyraźny efekt cieplny działania ultradźwięków. Powierzchnia cebuli nagrzewa się w czasie 30 minut do temperatury 335 K (powierzchnia gładka) oraz 326 K (powierzchnia nacięta). Obszar ogniskowania wydaje się w tym przypadku większy niż dla jabłka, jednak jest to tylko złudzenie wynikające z zakrzywienia powierzchni cebuli. Niższa temperatura próbki z naciętą powierzchnią jest skutkiem efektywniejszej wymiany ciepła z otoczeniem. Na wykresie temperatury od czasu widać również, że próbka gładka osiągnęła maksymalną temperaturę po ok. 15 minutach, później zaczęła oddawać ciepło do otoczenia i się chłodzić. Nie ulega jednak wątpliwości, że część energii ultradźwiękowej docierającej do powierzchni ciała poddanego oddziaływaniu fal ulega dyssypacji i wydziela się w postaci ciepła. Tak efektywne nagrzewanie powierzchni może przyczynić się do przyspieszenia procesu suszenia. W trakcie realizowanych badań zaobserwowano bowiem, że powierzchnia, zarówno jabłka jak i cebuli, po nadźwiękawianiu była lekko skurczona i obsuszona.

Efekt cieplny działania ultradźwięków obserwowany był również w trakcie badań nad procesem suszenia. Skala zjawiska była w tym przypadku jednak mniejsza ze względu na warunki prowadzenia procesu. Na rysunku 3 zaprezentowano krzywe temperatury powierzchni próbek pieczarki suszonej w warunkach konwekcji wymuszonej w temperaturze 323 oraz 343K, z przepływem powietrza 2 m/s. Procesy realizowano bez wspomagania ultradźwiękami (CV) oraz ze wspomaganie falami ultradźwiękowymi o częstotliwości 21 kHz (CV+US) oraz mocy nastawnej 100 i 200 W [H9].

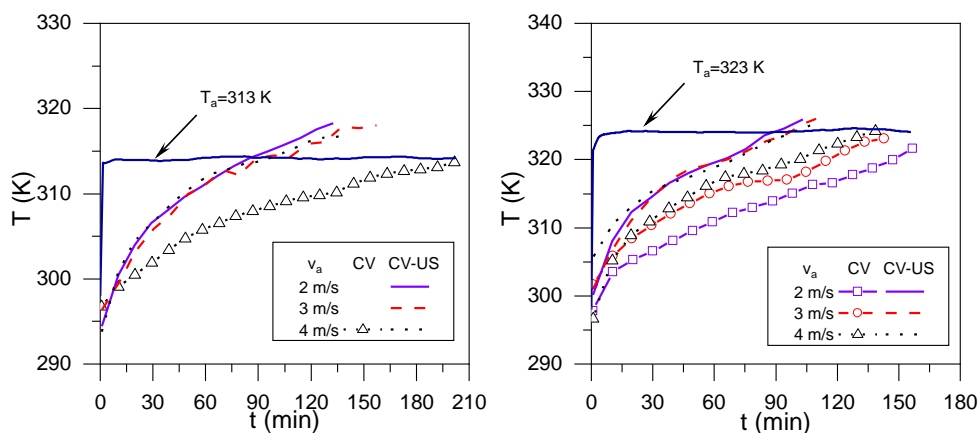


Rysunek 3 Krzywe temperaturowe dla próbek pieczarki suszonej konwekcyjnie z ultradźwiękami [H9]

CVxx – suszenie konwekcyjne w temperaturze xx°C, CVxx+USyyy – suszenie konwekcyjne w temperaturze xx°C wspomagane ultradźwiękami o mocy yyy W

Otrzymane krzywe pozwalają stwierdzić, że w przypadku obydwu wartości temperatury czynnika suszącego, próbki suszone ze wspomaganie ultradźwiękowym nagrzewały się zdecydowanie szybciej w porównaniu z próbkami suszonymi czysto-konwekcyjnie i na koniec procesu osiągnęły temperaturę wyższą od temperatury czynnika suszącego. Widoczny jest również efekt mocy fal akustycznych, w przypadku ultradźwięków o mocy nastawnej 200 W efekt cieplny był większy niż w przypadku ultradźwięków o mocy 100 W. Należy jednak stwierdzić, że za szybsze nagrzewanie powierzchni próbek w procesach wspomaganym ultradźwiękami odpowiedzialny jest nie tylko efekt cieplny, ale również inne zjawiska, które omówione zostaną w dalszej części, np. mieszanie powietrza przy powierzchni.

Podobne efekty obserwowano podczas suszenia jabłka. Wyniki tych badań zaprezentowano w pracy [H5]. W tym przypadku zastosowano również dwie różne wartości temperatury czynnika suszącego: 313 i 323 K, oraz trzy warianty prędkości przepływu powietrza: 2, 3 i 4 m/s. Moc promieniowania akustycznego była stała (nastawa 200 W), częstotliwość fal wynosiła 21 kHz. Na rysunku 4 przedstawiono krzywe zależności temperatury od czasu dla poszczególnych procesów.

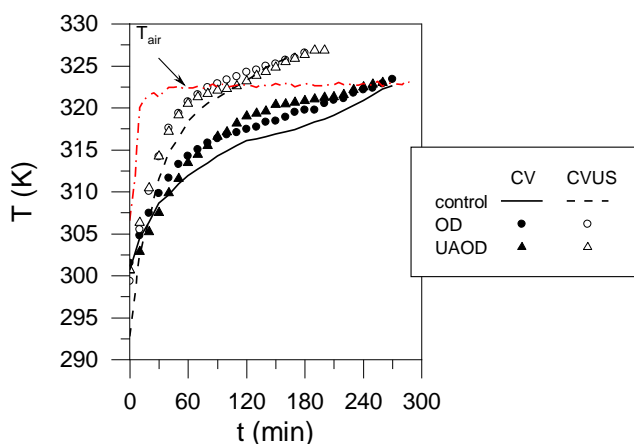


Rysunek 4 Krzywe temperaturowe uzyskane dla jabłka suszonego w warunkach konwekcji wymuszonej ze wspomaganie ultradźwiękowym w temperaturze 313 K i 323 K [H5]

CV – suszenie konwekcyjne, CV-US – suszenie konwekcyjne wspomaganie ultradźwiękami

Analiza otrzymanych krzywych potwierdziła, że próbki jabłka suszone w procesach konwekcyjno-ultradźwiękowych nagrzewały się szybciej, a temperatura ich powierzchni przekraczała temperaturę czynnika suszącego. W przypadku temperatury czynnika suszącego wynoszącej 313 K efekt ten był bardziej wyraźny niż dla 323 K, jednak wynika to po części z krótszego czasu suszenia w wyższej temperaturze. Mniejszy efekt cieplny w wyższej temperaturze może również wynikać ze zmiany gęstości czynnika suszącego, a tym samym zmiany impedancji akustycznej – większego tłumienia ultradźwięków. W efekcie, do powierzchni materiału suszonego dociera fala o mniejszej energii niż ma to miejsce w przypadku niższej temperatury powietrza. Jest to zjawisko obserwowane i opisane w literaturze^{8,9,10}.

W przedstawionych w pracy [H2] badaniach procesu suszenia próbek jabłka odwadnianych wcześniej osmotycznie, również zaobserwowano efekt cieplny (rysunek 5).



Rysunek 5 Krzywe temperaturowe dla próbek jabłka odwadnianych osmotycznie i suszonych z ultradźwiękami [H2]
CV – suszenie konwekcyjne, CV-US – suszenie konwekcyjne wspomagane ultradźwiękami, OD – próbki odwadniane osmotycznie, UAOD – próbki odwadniane osmotycznie ze wspomaganie ultradźwiękami

Próbki surowe (control) oraz wstępnie odwadniane osmotycznie (OD oraz UAOD) suszono w warunkach konwekcji wymuszonej (323 K, 2 m/s) z ultradźwiękami o częstotliwości 21 kHz i mocy nastawnej 200 W (CVUS). Niezależnie od sposobu obróbki wstępnej, próbki suszone ze wspomaganie ultradźwiękowym nagrzewały się szybciej, a ich temperatura przekraczała temperaturę czynnika suszącego. W przypadku próbek suszonych wyłącznie konwekcyjnie takiego efektu nie zaobserwowano.

Jak widać na przedstawionych wykresach efekt cieplny w trakcie suszenia jest zdecydowanie mniejszy niż przy bezpośrednim oddziaływaniu ultradźwięków. Wynika to przede wszystkim z wyższej temperatury otoczenia oraz intensywniejszej wymiany ciepła w warunkach konwekcji wymuszonej.

⁸ E.M.G.C. do Nascimento i in., „Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of passion fruit peel”, *Journal of Food Engineering* 170 (2016): 108–18, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.09.015>.

⁹ Fabiano A. N. Fernandes i in., „Effects of ultrasound-assisted air-drying on vitamins and carotenoids of cherry tomatoes”, *Drying Technology* 34, nr 8 (2016): 986–96, <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1090445>.

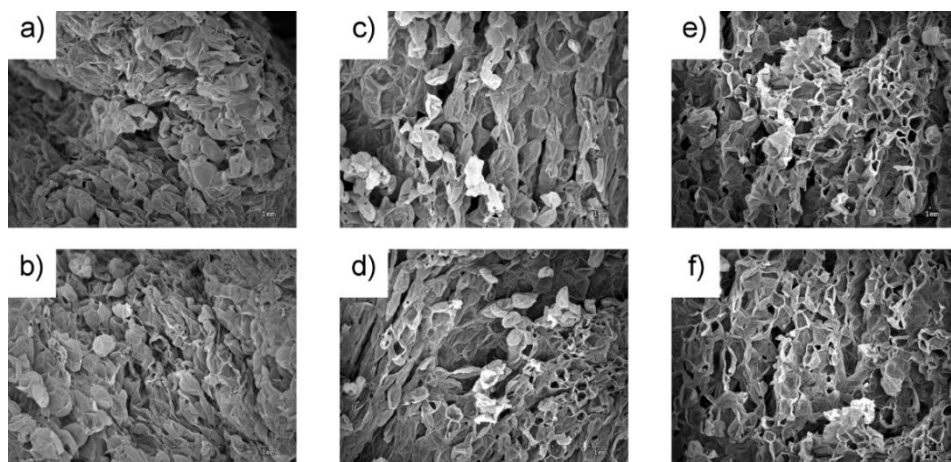
¹⁰ J. A. Cárcel i in., „Influence of temperature and ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of red pepper”, *Drying Technology* 37, nr 4 (2019): 486–93, <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1473417>.

Niemniej jednak efekt ten jest wystarczająco silny by częściowo wpływać na ogólną szybkość suszenia i powodować skrócenie czasu suszenia.

W ramach przedstawionych badań potwierdziłem hipotezę, iż **energia fal mechanicznych ulega częściowo dysypacji i jest wydzielana w postaci ciepła co sprzyja operacjom jednostkowym opierającym się na procesach wymiany**. Zarówno w przypadku bezpośredniego nadźwiękawiania przez warstwę powietrza, jak i suszenia w warunkach konwekcji wymuszonej, materiał przejmował część energii transportowanej przez falę, która to część wydzielala się w postaci ciepła. Ta dodatkowa porcja energii korzystnie wpływa na procesy wymiany masy np. poprzez szybsze odparowanie wilgoci z powierzchni, czy zmianę właściwości fizykochemicznych wilgoci (lepkość, gęstość) co prowadzi do efektywniejszej dyfuzji. W literaturze przedmiotu nie publikowano dotychczas tego typu wyników, lub nie analizowano szerzej zagadnienia „efektu cieplnego” podczas działania ultradźwięków.

Zmiany strukturalne, dynamiczne oddziaływanie ultradźwięków z materiałem suszonym

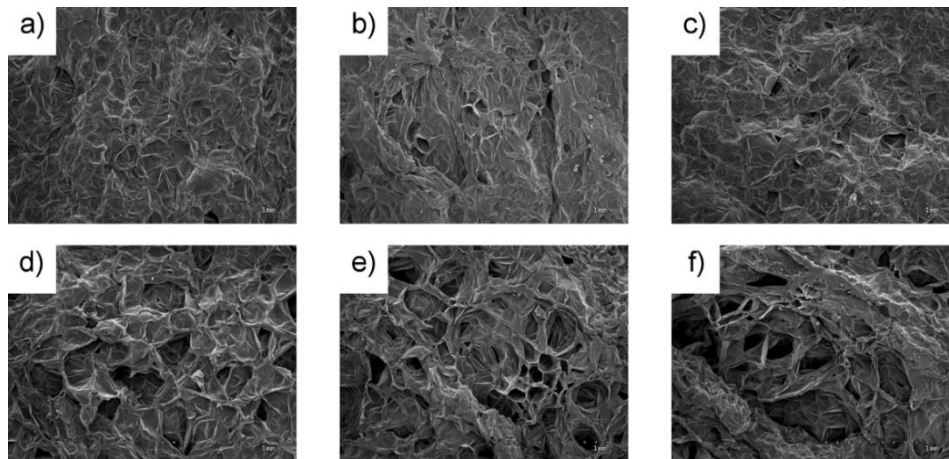
W trakcie suszenia wilgość w postaci ciekłej transportowana jest wewnątrz materiału od wilgotnego rdzenia do powierzchni ciała suszonego lub tzw. *frontu parowania*, gdzie następuje jej przemiana fazowa. W dalszym etapie procesu para wnika od powierzchni ciała suszonego przez warstwę laminarną do rdzenia czynnika suszącego. Ultradźwięki mogą wpływać na każdy z tych mechanizmów transportu. Transport wewnątrz materiału suszonego odbywa się najczęściej przez dyfuzję. Zwiększenie efektywnego współczynnika dyfuzji pod wpływem działania ultradźwięków jest powszechnie obserwowane i może wynikać ze zmian strukturalnych w materiale, lub z dynamicznych interakcji z materiałem suszonym. Pierwsze zjawisko jest najczęściej rezultatem zarówno modyfikacji przestrzennej struktury (geometrii) materiału, jak i zmian właściwości fizykochemicznych wilgoci (lepkość, gęstość, napięcie powierzchniowe, adhezja). Znaczące zmiany w strukturze materiału można zaobserwować pod mikroskopem. W pracy [H3] przedstawiono wpływ ultradźwięków na powierzchnię i tkanki wewnątrz jabłka oraz cebuli, poddanych bezpośrednio działaniu ultradźwięków w temperaturze otoczenia (na poziomie 290 K). Próbki poddawano obróbce przez 15 do 30 minut, następnie wykonano szereg analiz związanych ze zmianami strukturalnymi – zdjęcia pod mikroskopem optycznym oraz z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Na rysunku 6 zaprezentowano obrazy SEM otrzymane dla próbek jabłka poddanego obróbce ultradźwiękowej (21 kHz, moc nastawna 100 i 200 W).



Rysunek 6 Zdjęcia SEM próbek jabłka poddanego oddziaływowaniu ultradźwięków: surowiec (a, b), po 15 minutach obróbki z mocą 100 W (c, d), po 15 minutach obróbki z mocą 200 W (e, f) [H3]

Wyraźnie widać, że zastosowanie ultradźwięków prowadziło przeważnie do większych „zniszczeń” w strukturze tkankowej. Zaobserwowano również spadek spójności tkanek jabłka, przerwania ciągłości, formowanie się mikrokanalików, poszerzenie istniejących i powstawanie nowych porów, itp.

Na rysunku 7 przedstawiono obrazy SEM próbek suszonych w warunkach konwekcji wymuszonej (313 K, 2 m/s) ze wspomaganiem ultradźwiękowym (21 kHz, moc nastawna 200 W). Procesem kontrolnym było suszenie konwekcyjne, prowadzone w tych samych warunkach bez udziału ultradźwięków.



Rysunek 7 Zdjęcia SEM próbek jabłka suszonych w warunkach konwekcji wymuszonej bez ultradźwięków (a, b, c) oraz ze wspomaganiem ultradźwiękowym (d, e, f) [H3]

Otrzymane obrazy wyraźnie wskazują na zmiany wywołane procesem suszenia. Powierzchnia próbek suszonych konwekcyjnie (rysunek 7a-c) wydaje się być bardziej „gęsta”, a porowatość mniejsza, z powodu skurczu i deformacji wywołanych procesem suszenia. Próbki suszone z ultradźwiękami wyglądają odmiennie (rysunek 7d-f). Porowatość jest znacząco większa, a struktura dużo bardziej luźno upakowana, co może prowadzić do zapadnięcia się struktury wewnętrznej i utraty spójności. Znaczne zwiększenie porowatości i przestrzeni międzykomórkowych z pewnością korzystnie wpływa na przenoszenie masy, dzięki mniejszemu oporowi wewnętrznemu materiału. Niestety, może również prowadzić do większego ubytku składników bioaktywnych, takich jak witaminy, minerały, włókna spożywcze, przeciwutleniacze, barwniki itp. Wpływa to niekorzystnie na jakość produktów.

Intensyfikacja wymiany masy i ciepła w trakcie wspomaganych ultradźwiękami procesów może wynikać również z dynamicznego oddziaływania fal akustycznych z materiałem suszonym. Najprostszym przykładem jest naprzemienne odkształcenie objętościowe (rozprężanie i ściskanie) ciekłej wilgoci w sztywnym szkielecie z przewagą jednej z tych interakcji. Może to prowadzić do transportu wilgoci w kierunku od większej do mniejszej jej zawartości, czyli z wnętrza do powierzchni. Również naprzemienne ściskanie i rozciąganie elastycznej struktury porowatej, w wyniku propagacji elastycznej fali mechanicznej, może prowadzić do ruchu wilgoci wewnątrz materiału. Zjawisko to nazywane jest *efektem gąbki*, (z ang. *sponge effect*) ze względu na podobieństwo do ściskania i rozprężania gąbki. Siły powodujące ten efekt mogą być większe od sił napięcia powierzchniowego, utrzymującego wilgoć w porach/kapilarach, co w tym przypadku, powoduje jej „wyciskanie” na zewnątrz. Innym, dynamicznym zjawiskiem, powodującym intensyfikację wymiany masy i ciepła jest kawitacja. Ponieważ jednak zjawisko to zachodzi przede wszystkim w ośrodku ciekłym, zostanie omówione w rozdziałach dotyczących odwadniania osmotycznego i impregnacji próżniowej.

Niezależnie od tego, które z wymienionych wyżej mechanizmów dominują, niemal w każdym przypadku procesu suszenia wspomaganego ultradźwiękami obserwuje się wzrost szybkości transportu masy wewnątrz materiału. W większości przypadków bardzo trudno oszacować, które ze zjawisk powoduje przyspieszenie, z tego powodu w modelowaniu matematycznym rozpatruje się tzw. *efektywny współczynnik dyfuzji*, opisujący efekt końcowy wszystkich powyższych mechanizmów.

Wpływ ultradźwięków na efektywny współczynnik dyfuzji analizowałem w ramach badań do prac: [H6], [H9] oraz [IF4].

W pracy [H9] zastosowanie ultradźwięków (21 kHz, moc nastawna 100 i 200 W) w trakcie suszenia w warunkach konwekcji wymuszonej pozytywnie wpłynęło na efektywny współczynnik dyfuzji w suszonej pieczarce (tabela 2). Zaobserwowano, że wzrost mocy promieniowania akustycznego powoduje zwiększenie wartości współczynnika dyfuzji. Najwyższą wartość D_{eff} obserwowano w danej temperaturze suszenia dla prób suszonych ze wspomaganie ultradźwiękowym o najwyższej mocy nastawnej (200 W). Stwierdzono również, że wzrost współczynnika dyfuzji wywołany ultradźwiękami jest wyższy w przypadku wyższej temperatury. Może to wynikać ze zmian właściwości fizykochemicznych wilgoci, takich jak lepkość, gęstość, itp.

Tabela 2 Wartości efektywnego współczynnika dyfuzji w pieczarce suszonej konwekcyjnie ze wspomaganie ultradźwiękowym (CVUS) [H9]

| proces | D_{eff} (m ² /s) | zmiana względna (-) |
|------------|--|---------------------|
| CV50 | $4,86 \cdot 10^{-10} \pm 7,86 \cdot 10^{-12}$ b | – |
| CV50+US100 | $5,73 \cdot 10^{-10} \pm 8,13 \cdot 10^{-11}$ b | 18% |
| CV50+US200 | $6,96 \cdot 10^{-10} \pm 1,58 \cdot 10^{-10}$ ab | 43% |
| CV70 | $5,30 \cdot 10^{-10} \pm 6,00 \cdot 10^{-11}$ b | – |
| CV70+US100 | $7,17 \cdot 10^{-10} \pm 1,63 \cdot 10^{-10}$ ab | 35% |
| CV70+US200 | $9,97 \cdot 10^{-10} \pm 1,44 \cdot 10^{-10}$ a | 88% |

Średnia \pm odchylenie standardowe, różna litera w kolumnie wskazuje różnicę istotną statystycznie na poziomie $p < 0,05$ zgodnie z ANOVA i testem Tukeya; CV - konwekcja wymuszona, CV+US konwekcja wymuszona wspomaganą ultradźwiękami

W pracy [H6] analizowano wpływ ultradźwięków na wartość współczynnika dyfuzji w trakcie suszenia malin. Otrzymane wartości efektywnego współczynnika dyfuzji zaprezentowano w tabeli 3.

Tabela 3 Wartość efektywnego współczynnika dyfuzji w malinach w różnych warunkach suszenia [H6]

| proces | $D_{eff} \cdot 10^{-8}$ (m ² /s) | zmiana względna (-) |
|--------|---|---------------------|
| CV | 0,17 b | – |
| CVMW | 3,91 d | 2200,0% |
| CVUS | 0,46 b | 170,6% |
| IT1 | 1,50 a | 782,4% |
| IT2 | 1,47 a | 764,7% |
| IT3 | 2,38 c | 1300,0% |
| IT4 | 1,57 a | 823,5% |

Średnia, różna litera w kolumnie wskazuje różnicę istotną statystycznie na poziomie $p < 0,05$ zgodnie z ANOVA i testem Tukeya; CV – konwekcja wymuszona, CVMW – konwekcja wymuszona wspomaganą mikrofalami, CVUS – konwekcja wymuszona wspomaganą ultradźwiękami, IT – konwekcja wymuszona wspomaganą okresowo mikrofalami i ultradźwiękami

W przypadku malin zastosowanie ultradźwięków (21 kHz, moc nastawna 200 W) spowodowało wzrost współczynnika dyfuzji o ok. 170% w porównaniu do procesu konwekcyjnego (CV). Jest to zdecydowanie większy wzrost niż jak to miało miejsce w przypadku pieczarek (Tabela 2) [H9], czy buraka (Tabela 14) [IF4] i może wynikać z różnej struktury tych surowców.

Przedstawione w niniejszym rozdziale wyniki badań doświadczalnych potwierdzają, że zmiany w strukturze oraz dynamiczne oddziaływanie ultradźwięków z materiałem mogą przyczyniać się do zwiększenia efektywności wymiany masy w trakcie operacji jednostkowych opierających się na tym procesie np. suszeniu. Zdjęcia mikroskopowe oraz wartości efektywnego współczynnika dyfuzji w procesach wspomaganych falami mechanicznymi potwierdziły hipotezę iż **ultradźwięki oddziałują dynamicznie z materiałem w którym się rozchodzą powodując odwracalne i nieodwracalne efekty**. Zmiany w strukturze materiału oraz większe współczynniki dyfuzji efektywnej, w porównaniu z procesem bez wspomagania, przekładało się na korzyści kinetyczne. Określenie typu oddziaływania dominującego w danym procesie jest praktycznie niemożliwe. Efekty przenikają się bowiem wzajemnie i bardzo trudno wyróżnić, który z nich wpływa na proces wymiany masy w największym stopniu. Ponieważ, ultradźwięki nie były dotychczas szeroko stosowane w suszarnictwie, otrzymane dane eksperymentalne – wartości współczynników dyfuzji oraz obserwacje mikroskopowe stanowią cenny wkład w tę dyscyplinę i pozwalają na określenie efektów działania fal mechanicznych.

Wpływ ultradźwięków na opór zewnętrzny wymiany ciepła i masy

Ultradźwięki mogą również wpływać na opory zewnętrzne zarówno w przypadku transportu ciepła jak i masy. Rozpatruje się tutaj wiele możliwych mechanizmów. Najbardziej prawdopodobnym jest pulsacja ciśnienia w przyściennej warstwie laminarnej, powodująca mieszanie tej warstwy i redukcję jej grubości. Ponieważ wszystkie procesy transportu w tej warstwie zachodzą na drodze najwolniejszych mechanizmów (przewodzenie dla ciepła i dyfuzja dla masy), zmniejszenie jej grubości efektywnie wpływa na ogólną szybkość procesu. Fluktuacje ciśnienia w przestrzeni przypowierzchniowej mogą powodować również powstawanie prądów cyrkulacyjnych pary w kierunku rdzenia czynnika suszącego. Implodujące w pobliżu powierzchni ciała pęcherzyki parowo-gazowe mogą powodować spadek napięcia powierzchniowego i przyspieszać proces parowania. W literaturze przedmiotu omówionych jest jeszcze wiele innych mechanizmów przyspieszających proces suszenia, brakuje jednak rzetelnej analizy i doświadczalnego zbadania tych zjawisk. Należy więc założyć, że podstawowym mechanizmem pozwalającym na przyspieszenie procesu suszenia, poprzez wpływ na czynniki oporów zewnętrznych, jest redukcja przyściennej warstwy laminarnej. Trzeba jednak stwierdzić, że nie ma obecnie technik badawczych pozwalających na jednoznaczne określenie dokładnego mechanizmu tego zjawiska. Otrzymane dane eksperymentalne oraz analiza obecnego stanu wiedzy zdają się jednak potwierdzać, iż jest to główny mechanizm intensyfikacji wymiany ciepła i masy [H1].

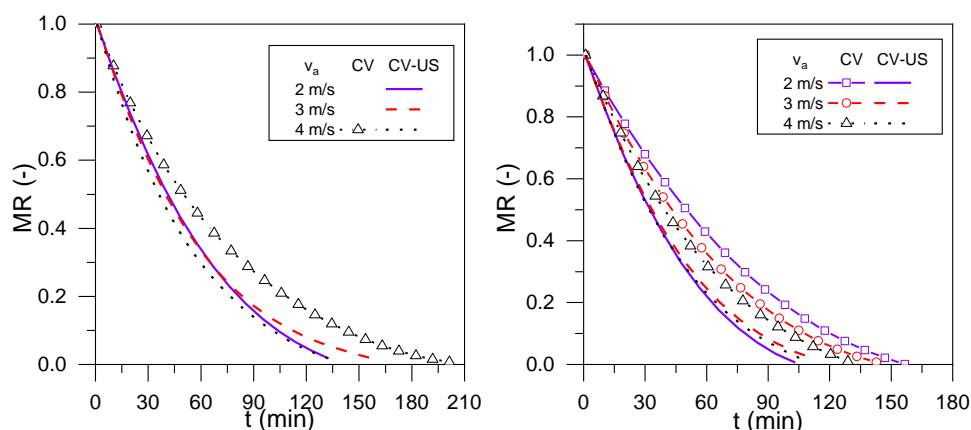
W pracy [H5] analizowano m.in. wpływ ultradźwięków na współczynniki wymiany ciepła (h_T) i masy (h_m). Wartości tych współczynników dla różnych wariantów procesu suszenia przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4 Wartości parametrów procesowych oraz współczynników wymiany masy i ciepła dla jabłka [H5]

| parametr | CV | | CV-US | |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| T_a (K) | 313 | 323 | 313 | 323 |
| v_a (m/s) | 4 | 2 | 4 | 2 |
| h_m (kg/m ² ·s) | 1,60 | 0,64 | 2,56 | 1,26 |
| h_r (W/m·K) | 22,50 | 16,50 | 29,38 | 26,04 |

CV – konwekcja wymuszona, CVUS – konwekcja wymuszona wspomagana ultradźwiękami

Jak powszechnie wiadomo wartości współczynników w przypadku konwekcji wymuszonej zależą zarówno od temperatury (T_a) jak i prędkości przepływu (v_a). Z wyników wywnioskować można, że w przypadku suszenia jabłka, bardziej istotna jest prędkość przepływu. Jej zmniejszenie (z 4 do 2 m/s) skutkowało zmniejszeniem wartości współczynników wymiany masy i ciepła zarówno w procesie konwekcyjnym jak i konwekcyjno-ultradźwiękowym, pomimo podniesienia temperatury czynnika suszącego (z 313 do 323 K). W przypadku tego drugiego wariantu, zmiany były co prawda mniejsze, jednak nadal widoczne. Rozpatrując, na który współczynnik ultradźwięki wpłynęły bardziej, zauważyć można, że większą zmianę w stosunku do procesu czysto-konwekcyjnego zaobserwowano dla współczynnika wymiany masy. Potwierdzałoby to, że efekt cieplny ultradźwięków w trakcie suszenia jest mniejszy od efektów związanych z dynamicznym oddziaływaniem z materiałem. Niemniej jednak obydwa współczynniki osiągały wyższą wartość dla procesów z zastosowaniem ultradźwięków.



Rysunek 8 Krzywe wilgotności względnej uzyskane dla jabłka suszonego w warunkach konwekcji wymuszonej ze wspomaganie ultradźwiękowym w temperaturze 313 K i 323 K [H5]

CV – suszenie konwekcyjne, CV-US – suszenie konwekcyjne wspomaganie ultradźwiękami

Pozytywny wpływ ultradźwięków na procesy wymiany masy i ciepła można było również zaobserwować na krzywych suszenia przedstawionych w pracy [H5]. W trakcie realizacji badań zastosowano trzy prędkości przepływu czynnika suszącego (2, 3 i 4 m/s) w temperaturze 323 K. Analizując krzywe przedstawione na rysunkach 4 i 8 zauważyć można, że dla procesów czysto-konwekcyjnych (CV), prędkość przepływu istotnie wpływa na ich przebieg. Im większa prędkość powietrza tym krótszy proces (rysunek 8) i szybsze nagrzewanie się powierzchni ciała suszonego (rysunek 4). W przypadku procesów wspomaganymi ultradźwiękami, zjawiska tego już nie zaobserwowano. Krzywe charakteryzowały się bardziej spójnym przebiegiem, uniemożliwiającym niekiedy wyróżnienie konkretnego wariantu procesu. Oznacza to, że w przypadku procesów

wspomaganych ultradźwiękami, zwiększenie turbulencji strugi powietrza w otoczeniu próbek – wywołane wzrostem prędkości powietrza, nie miało już znaczenia. Fluktuacje ciśnienia wywołane ultradźwiękami były dominujące i powodowały zdecydowaną redukcję warstwy przyściennej, a tym samym efektywniejszą wymianę ciepła i masy. W niższej temperaturze czynnika suszącego (313 K) obserwowano podobny efekt, przy czym procesem referencyjnym był tu już tylko proces realizowany z prędkością powietrza 4 m/s – teoretycznie najszybszy proces konwekcyjny w danej temperaturze.

W pracy [H8] analizie poddano transport ciepła w warunkach konwekcji wymuszonej wspomaganiej ultradźwiękami. Badania przeprowadzono w dwóch wariantach temperatury powietrza (313 i 333 K), przepływającego z prędkością 0,4 m/s z ultradźwiękami (21 kHz) o mocy 50, 100 i 200 W. Proces referencyjny zrealizowano bez wspomaganie ultradźwiękowego (0 W) w tych samych warunkach temperatury i przepływu powietrza. Temperaturę wewnątrz próbek rejestrowano za pomocą termopary typu K. Ponieważ analiza miała obejmować tylko wymianę ciepła, próby prowadzono na kształtkach stalowych o różnej geometrii i wymiarach. Założono małą liczbę Biota, a więc przyjęto, że czynnikiem determinującym szybkość wymiany ciepła są opory zewnętrzne – gradient temperatury wewnątrz ciała jest pomijalnie mały. W tabelach 5 i 6 przedstawiono wartości ciepła przejętego przez kształtki w wyniku działania ultradźwięków oraz współczynniki wymiany ciepła dla poszczególnych procesów i geometrii próbek.

Tabela 5 Wartość współczynnika wymiany ciepła oraz ciepła przejętego w wyniku działania ultradźwięków w temperaturze 313 K [H8]

| moc ultradźwięków | 0 W | | 50 W | |
|-------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|
| | h (W/K·m ²) | \dot{Q}_{abs} (W) | h (W/K·m ²) | \dot{Q}_{abs} (W) |
| mały walec | 19,68±0,10 | - | 21,93±0,08 | 0,14±0,09 |
| walec | 18,81±0,17 | - | 22,43±0,10 | 0,07±0,04 |
| sześcian | 17,72±0,09 | - | 24,97±0,68 | 0,17±0,03 |
| prostokątoscian | 14,35±0,08 | - | 15,43±0,08 | 0,06±0,02 |
| moc ultradźwięków | 100 W | | 200 W | |
| | h (W/K·m ²) | \dot{Q}_{abs} (W) | h (W/K·m ²) | \dot{Q}_{abs} (W) |
| mały walec | 24,60±0,15 | 0,26±0,12 | 28,65±0,14 | 0,46±0,02 |
| walec | 30,40±0,16 | 0,46±0,06 | 44,55±0,34 | 0,96±0,10 |
| sześcian | 39,21±0,25 | 0,75±0,16 | 57,12±0,46 | 1,85±0,09 |
| prostokątoscian | 19,26±0,04 | 0,75±0,02 | 20,92±0,42 | 1,67±0,05 |

Średnia ± odchylenie standardowe

Tabela 6 Wartość współczynnika wymiany ciepła oraz ciepła przejętego w wyniku działania ultradźwięków w temperaturze 333 K [H8]

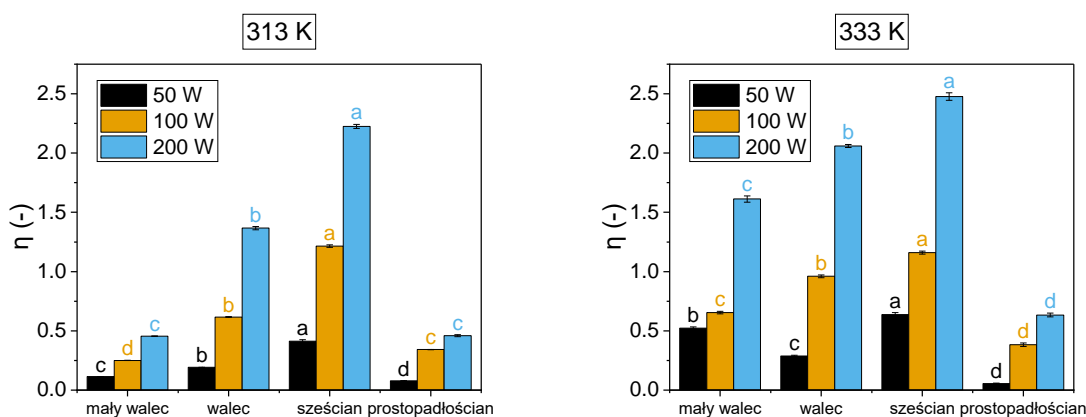
| moc ultradźwięków | 0 W | | 50 W | |
|-------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|
| | h (W/K·m ²) | \dot{Q}_{abs} (W) | h (W/K·m ²) | \dot{Q}_{abs} (W) |
| mały walec | 20,78±0,24 | - | 31,58±0,63 | 0,061±0,04 |
| walec | 17,73±0,05 | - | 22,87±0,72 | 0,039±0,011 |
| sześcian | 16,17±0,20 | - | 26,39±0,65 | 0,037±0,009 |
| prostokątoscian | 10,68±0,27 | - | 11,27±0,58 | 0,16±0,03 |

Tabela 6 Wartość współczynnika wymiany ciepła oraz ciepła przejętego w wyniku działania ultradźwięków w temperaturze 333 K [H8] cd.

| moc ultradźwięków | 100 W | | 200 W | |
|-------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|
| | h (W/K·m ²) | \dot{Q}_{abs} (W) | h (W/K·m ²) | \dot{Q}_{abs} (W) |
| mały walec | 34,34±0,53 | 0,11±0,05 | 54,44±0,93 | 0,33±0,09 |
| walec | 34,60±0,55 | 0,05±0,01 | 54,28±0,12 | 0,78±0,17 |
| sześcian | 34,96±0,75 | 0,08±0,01 | 56,32±0,63 | 1,12±0,25 |
| prostokątnościan | 14,71±0,51 | 0,23±0,03 | 17,61±0,55 | 0,92±0,04 |

Średnia ± odchylenie standardowe

Rysunek 9 przedstawia współczynnik/stopień wzmocnienia wymiany ciepła w wyniku działania ultradźwięków. Współczynnik ten zdefiniowany został jako zmiana względna w odniesieniu do procesu bez ultradźwięków.



Rysunek 9 Współczynnik wzmocnienia wymiany ciepła podczas ogrzewania w warunkach konwekcji wymuszonej dla poszczególnych temperatur i geometrii próbek [H8]

średnia ± odchylenie standardowe; różne litery nad słupkami oznaczają istotną statystycznie różnicę ($p < 0,05$) zgodnie z ANOVA oraz testem Tukeya

Na podstawie otrzymanych danych stwierdzić można, że ultradźwięki intensyfikują wymianę ciepła w trakcie konwekcji wymuszonej, przy czym efekty ilościowe zależą zarówno od geometrii/wymiaru kształtek jak i temperatury powietrza. Najniższe przyrosty współczynnika wymiany ciepła (h), a tym samym najniższą wartość energii przejętej przez stal (Q_{abs}) obserwowano dla kształtki prostokątnej. Najwyższe wartości wspomnianych parametrów rejestrowano dla sześciangu (por. rysunek 9 oraz tabela 5). W wyższej temperaturze (333 K) zmiany były większe, niż gdy powietrze miało temperaturę 313 K. Niemniej jednak zastosowanie ultradźwięków spowodowało wzrost efektywności konwekcyjnej wymiany ciepła w zakresie od 45 do 250% (rysunek 9).

Poprawa wymiany ciepła w wyniku działania ultradźwięków mogła być spowodowana różnymi mechanizmami. Pulsacje ciśnienia mogły zwiększyć turbulencje wewnątrz warstwy granicznej i zmniejszyć jej grubość. Biorąc pod uwagę, że przenoszenie ciepła przez warstwę przyścienną odbywa się na drodze najwolniejszego mechanizmu – przewodzenia, redukcja jej grubości powoduje efektywniejszą wymianę ciepła. Ponadto naprzemienna kompresja i rozrzedzenie również mogą poprawić wymianę ciepła przez warstwę graniczną. Wahania ciśnienia w pobliżu powierzchni

materiału sprzyjają także cyrkulacji przepływu powietrza i poprawiają wymianę ciepła. Można w tym przypadku rozważyć szereg dodatkowych mechanizmów, np. strumieniowanie akustyczne.

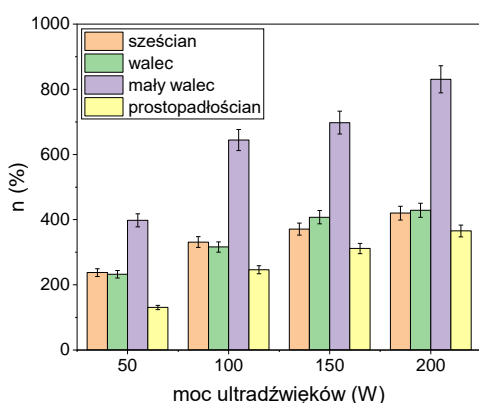
W pracy [H12] przedstawiono badania nad procesem chłodzenia w warunkach konwekcji swobodnej ze wspomaganie ultradźwiękowym. Próbkę stalowe nagrzano najpierw do temperatury 333 K, a następnie umieszczano pod tarczą radiatora system AUS, w polu ogniskowania i chłodzono do temperatury otoczenia (ok. 293 K) rejestrując temperaturę we wnętrzu próbek. Moc ultradźwięków o częstotliwości 21 kHz była analogiczna jak w badaniach przedstawionych w pracy [H8]. Proces referencyjny stanowiło chłodzenie w warunkach konwekcji swobodnej bez wspomaganie ultradźwiękami. W tabeli 7 zaprezentowano wartości współczynnika wymiany ciepła dla poszczególnych geometrii próbek i mocy ultradźwięków.

Tabela 7 Wartość współczynnika wymiany ciepła dla poszczególnych próbek w zależności od mocy ultradźwięków [H12]

| geometria próbki | moc ultradźwięków (W) | | | | |
|------------------|-----------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| sześcian | 41,64 ±0,76 | 140,60 ±3,02 | 179,50 ±4,53 | 1926,20 ±6,04 | 216,50 ±6,04 |
| prostokąt | 36,09 ±0,31 | 83,28 ±1,17 | 124,90 ±4,53 | 148,50 ±1,13 | 167,90 ±1,13 |
| cylinder | 45,27 ±0,76 | 150,80 ±1,22 | 188,80 ±1,51 | 230,10 ±10,6 | 239,70 ±6,80 |
| mały cylinder | 52,43 ±0,50 | 238,70 ±4,53 | 396,50 ±6,55 | 418,20 ±3,24 | 487,90 ±10,60 |

średnia ± odchylenie standardowe

Zastosowanie stosunkowo małej mocy ultradźwięków (50 W) spowodowało bardzo duży wzrost współczynnika konwekcyjnej wymiany ciepła, tj. ponad dwukrotnie dla prostokąta i prawie pięciokrotnie dla małego walca. Dalszy wzrost mocy ultradźwięków skutkowało jeszcze lepszym przenoszeniem ciepła. Rysunek 10 przedstawia współczynnik/stopień wzmocnienia wymiany ciepła w wyniku działania ultradźwięków. Współczynnik ten zdefiniowany został jako zmiana względna w odniesieniu do procesu bez ultradźwięków.



Rysunek 10 Współczynnik wzmocnienia wymiany ciepła podczas chłodzenia w warunkach konwekcji swobodnej dla poszczególnych temperatur i geometrii próbek [H12]

średnia ± odchylenie standardowe

Wyraźnie widać, że zastosowanie ultradźwięków najbardziej przyspieszyło chłodzenie i zwiększyło współczynnik wymiany ciepła dla małego walca. Dla walca i sześcianu efekt działania ultradźwięków

był mniejszy, ale na zbliżonym do siebie poziomie. Najmniejszy wzrost zaobserwowano dla prostopadłościanu. Biorąc pod uwagę wpływ mocy ultradźwięków można stwierdzić, że zwiększenie mocy ultradźwięków spowodowało wzrost współczynnika wymiany ciepła. Jednak największe wzmocnienie zaobserwowano dla 50 i 100 W, co jest szczególnie widoczne dla małego walca. Przy mocy 150 i 200 W współczynnik wymiany ciepła nadal wzrastał, jednakże zmiana w stosunku do poprzedniej mocy ultradźwięków była mniejsza.

Intensyfikacja procesów wymiany masy i ciepła, w każdym z przedstawionych przykładów doprowadziła do skrócenia czasu danej operacji jednostkowej (suszenia, ogrzewania, chłodzenia). Postawiona hipoteza iż **ultradźwięki mogą oddziaływać z medium w którym się propagują (środowisko gazowe lub ciekłe), co prowadzi do intensyfikacji procesów wymiany masy i/lub ciepła poprzez redukcję czynników stanowiących opór dla transportu** również znalazła swoje potwierdzenie. W literaturze brakowało dotychczas jasnego określenia w jaki sposób ultradźwięki przyspieszają operacje jednostkowe. Autorzy publikacji wyróżniali często wpływ na czynniki wewnętrzne i zewnętrzne, jednak nie potwierdzali swoich hipotez badaniami doświadczalnymi. Badania procesów ogrzewania i chłodzenia, oraz procesu suszenia (zachowanie krzywych temperaturowych) zaprezentowane w omówionych powyżej pracach nie pozostawiają wątpliwości, że intensyfikacja występuje. Umożliwia również określenie przyczyny zachodzących zjawisk. Jest to istotny wkład w badania nad procesem wspomagania procesów wymiany ciepła i masy – skracania operacji jednostkowych. Warto również zauważyć, że korzystny wpływ ultradźwięków na kinetykę często prowadził do obniżenia zużycia energii, co bez wątpliwości pozytywnie wpływało na ekonomię procesu. Nie ma jednak możliwości jednoznacznego określenia, które konkretnie zjawiska wpłynęły na kinetykę rozważanych procesów. Z otrzymanych danych można jednak wnioskować o dominacji efektów związanych z dynamicznym oddziaływaniem ultradźwięków na materiał. Nie można jednak ocenić tego wpływu ilościowo.

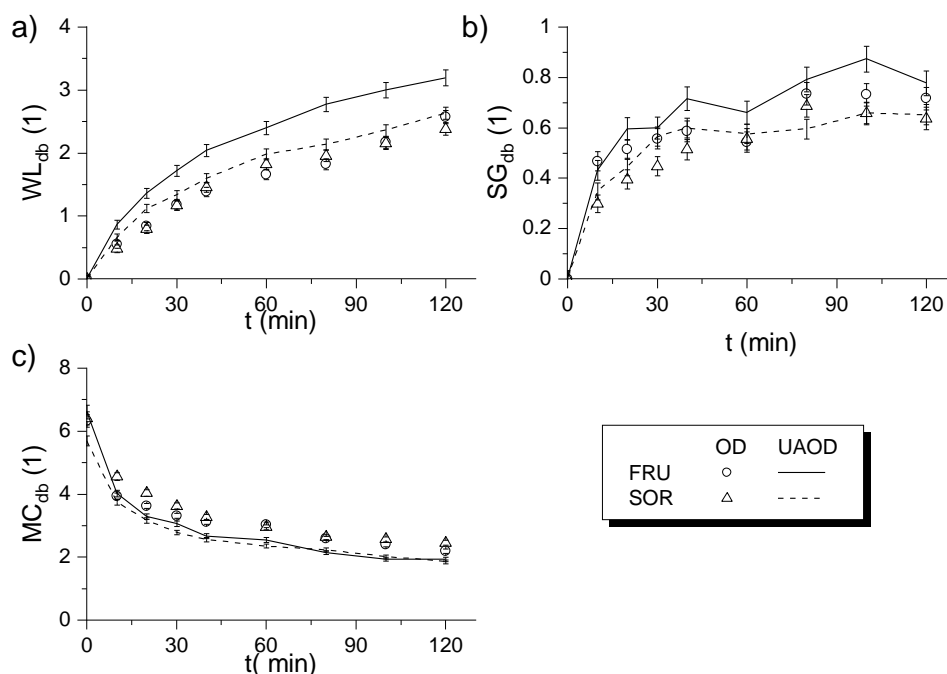
5.2.2. Odwadnianie osmotyczne wspomaganie ultradźwiękami

Odwadnianie osmotyczne jest jedną z bardziej obiecujących metod obróbki wstępnej surowców owocowych i warzywnych przed zasadniczym procesem przetwórczym. Jest to nietermiczny proces, wykorzystujący zjawisko osmozy naturalnej, zachodzące po zanurzeniu tkanki roślinnej w hipertonicznym roztworze cukru, soli lub innego składnika osmoaktywnego. Różnica ciśnień osmotycznych między roztworem a wnętrzem komórek promuje dwa przeciwnie skierowane strumienie masy. Woda przenika przez błonę komórkową z wnętrza komórek do roztworu, podczas gdy rozpuszczona w roztworze substancja przenika w przestrzeń powstałą po odsunięciu się, w wyniku plazmolizy, błony komórkowej od ściany komórkowej. W ten sposób nawet 50% wody zawartej w komórkach może zostać usunięte przy niewielkim nakładzie energii.

Ze względu na dyfuzyjny charakter zachodzących w trakcie osmozy procesów są one bardzo powolne (szczególnie w niskiej temperaturze) i ograniczone stanem równowagi. Aby zwiększyć wydajność odwadniania osmotycznego – wymiany masy, proces ten realizuje się z ultradźwiękami o natężeniu $>1 \text{ W/cm}^2$ i częstotliwości 21-35 kHz⁷. Wpływ fal ultradźwiękowych na kinetykę osmozy nie został w pełni zbadany. Zakłada się jednak, że dominującym mechanizmem intensyfikującym wymianę masy jest proces kawitacji. Inne zjawiska, takie jak efekt gąbki czy zmiany w właściwościach fizykochemicznych cieczy (spadek lepkości, gęstości i napięcia powierzchniowego), również biorą udział w przyspieszaniu wymiany masy, jednak ich znaczenie jest mniejsze.

Kawitacja jest zjawiskiem polegającym na tworzeniu się w cieczy pęcherzyków parowo-gazowych i ich stopniowemu wzrastaniu na drodze koalescencji i/lub parowania pod obniżonym ciśnieniem z powierzchni międzyfazowej do wnętrza pęcherzyka. Występowanie ostatniego etapu kawitacji – implozji pęcherzyków parowo-gazowych, zależy jest od ciśnienia oddziałującego na ich powierzchnię. Gdy ciśnienie zewnętrzne oddziałujące na pęcherzyk jest zbyt małe aby pokonać siły napięcia powierzchniowego utrzymującego pęcherzyk, implozja nie następuje, a kawitacja nazywana jest *stabilną*. W przypadku gdy ciśnienie przekroczy wytrzymałość sił napięcia powierzchniowego – próg Blake’a, dochodzi do „załamania” – implozji pęcherzyka, której towarzyszy gwałtowny, lokalny wzrost ciśnienia (do setek atmosfer) i temperatury (do tysiąca K). Kawitacja nazywana jest wtedy *niestabilną* lub *przejściową* i prowadzi do wielu korzystnych z punktu widzenia wymiany ciepła, i masy procesów takich jak: ogrzewanie, mikro-strumieniowanie, mikro-mieszanie, tworzenie wolnych rodników, redukcja warstwy laminarnej itd. Zjawiska te są na tyle silne, że, choć zachodzą lokalnie, powodują znaczny wzrost współczynników wymiany ciepła i masy, a także modyfikują strukturę wewnętrzną materiału poddanego nadźwiękawianiu.

W pracy [H2] przebadano wpływ ultradźwięków na odwadnianie osmotyczne tkanki jabłka. Wykorzystano dwa czynniki osmoaktywne (fruktozę i sorbitol) w wodnym roztworze o stężeniu 40% (wag.). Proces odwadniania prowadzono w temperaturze 308 K w wannie ultradźwiękowej pracującej z ultradźwiękami o częstotliwości 25 kHz. Moc stosowanych ultradźwięków została określona na wyższą niż 1 W/cm^2 , co uznaje się za próg dla ultradźwięków czynnych. Analizie poddano kinetykę odwadniania opartą o ubytek wody (WL), przyrost masy suchej (SG) oraz wilgotność w odniesieniu do masy suchej (MC_{db}). Na rysunku 11 przedstawiono przebieg tych parametrów w czasie dla poszczególnych procesów.



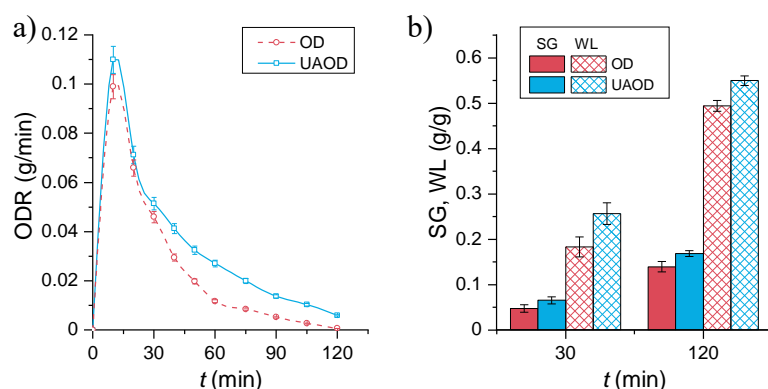
Rysunek 11 Kinetyka odwadniania jabłka: a) ubytek wody, b) przyrost masy suchej, c) zawartość wilgoci [H2]

Średnia \pm odchylenie standardowe

OD – próbki odwadniane osmotycznie, UAOD – próbki odwadniane osmotycznie ze wspomaganie ultradźwiękami, FRU – fruktoza, SOR - sorbitol

Otrzymane wyniki wskazują jednoznacznie, że zastosowanie ultradźwięków wpłynęło na kinetykę odwadniania osmotycznego. W przypadku procesów wspomaganych ultradźwiękami (UAOD), ubytek wody (WL) osiągnął zauważalnie wyższe wartości w porównaniu do zwykłej osmozy (OD), ale korzystne działanie ultradźwięków zostało ujawnione w różnym stopniu dla obu analizowanych substancji osmoaktywnych. W przypadku fruktozy wzmocnienie ultradźwiękowe przyniosło lepszy efekt niż w przypadku sorbitolu. Wyniki przyrostu masy suchej (SG) również wskazują na efektywniejsze oddziaływanie ultradźwięków w przypadku fruktozy. Sorbitol wnikał do próbek odwadnianych z asystą ultradźwiękową podobnie jak w przypadku procesów niewzmacnianych ultradźwiękami (OD). Zjawisko takie może wynikać z wielu czynników, m.in. budowy cząsteczek, różnic w ciśnieniu osmotycznym, lepkości i gęstości roztworu, itp. Analiza krzywych wilgotności (MC) pozwala stwierdzić, że najbardziej efektywny okres odwadniania miał miejsce w pierwszych 30 minutach procesu, niezależnie od rodzaju czynnika osmotycznego (FRU/SOR) oraz wariantu procesu (OD/UAOD). We wszystkich rozpatrywanych przypadkach wilgotność (MC) spadała gwałtownie w ciągu pierwszych 10-20 minut, a następnie powoli dążyła do osiągnięcia wartości równowagowej. Na wykresie przedstawionym na rysunku 11c można jednak zaobserwować, że próbki poddane osmozie ze wspomaganie ultradźwiękowym charakteryzowały się nieco szybszym odwodnieniem – niższą wartością wilgotności dla danego czasu procesu. Potwierdza to korzystny wpływ ultradźwięków na procesy wymiany masy.

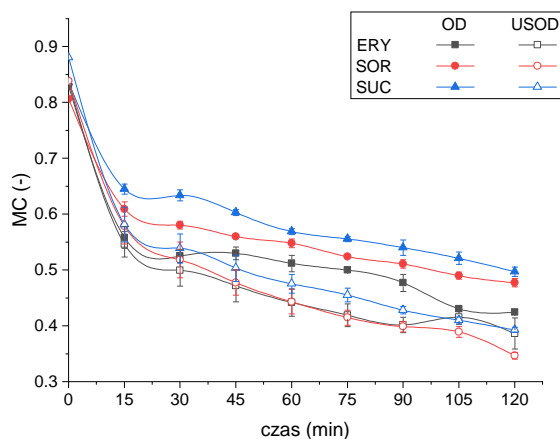
Podobne wyniki uzyskano dla marchwi odwadnianej w roztworze fruktozy o stężeniu 40% (wag.) w warunkach prowadzenia procesu identycznych jak w przypadku jabłka. Wyniki tych badań przedstawiono w pracy [H4]. Efektywność odwadniania oceniano na podstawie chwilowej szybkości odwadniania (ODR) oraz średniej wartości ubytku wody i przyrostu masy suchej. Wartości tych parametrów przedstawiono na rysunku 12.



Rysunek 12 Kinetyka odwadniania osmotycznego (OD) oraz wspomaganego ultradźwiękami odwadniania osmotycznego (UAOD) marchwi: a) chwilowa szybkość odwadniania (ODR), b) przyrost masy suchej (SG) oraz ubytek wody (WL) [H4] średnia \pm odchylenie standardowe

Otrzymane dane jednoznacznie wskazują, że chwilowa szybkość odwadniania (ODR) jest wyższa dla procesu wspomaganego ultradźwiękami. Różnica w szybkości odwadniania rzutuje na pozostałe parametry, takie jak ubytek wody (WL) i przyrost masy suchej (SG). W obu przypadkach, niezależnie od czasu odwadniania (30 lub 120 minut), zarówno wartość WL jak i SG dla procesu wspomaganego ultradźwiękami (UAOD) były wyższe niż bez zastosowania ultradźwięków. Wskazuje to jednoznacznie na intensyfikujący wymianę masy (przepływ wody z komórek i wnikanie substancji rozpuszczonej między ścianę a błonę komórkową) wpływ ultradźwięków.

Praca [H7] poświęcona została procesowi odwadniania osmotycznego owoców kiwi. Wykorzystano trzy czynniki osmoaktywne: erytrytol (ERY), sorbitol (SOR) i sacharozę (SUC), w roztworach wodnych o stężeniu 50% (wag.). W pierwszej części badań próbki odwadniano w czasie 120 minut. Po określeniu efektywnego okresu odwadniania kolejne procesy prowadzono przez 30 minut. Kinetykę odwadniania oceniano na podstawie zmiany wilgotności próbek. Efektywność odwadniania określono w oparciu o ubytek wody (WL) oraz przyrost masy suchej (SG). Na rysunku 13 przedstawiono zmianę wilgotności w czasie dla próbek odwadnianych w poszczególnych czynnikach bez (OD) oraz ze wspomaganie ultradźwiękowym (USOD).



Rysunek 13 Wykres zmian wilgotności materiału podczas odwadniania osmotycznego (OD) oraz wspomaganego ultradźwiękami odwadniania osmotycznego (USOD) owocu kiwi w wodnym roztworze erytrytolu (ERY), sorbitolu (SOR) i sacharozy (SUC) [H7]

średnia \pm odchylenie standardowe;

Na wykresie ubytku wilgotności w czasie (rysunek 13) wyraźnie widać, że procesy realizowane z asystą ultradźwięków charakteryzowały się szybszym ubytkiem wilgoci. Jest to związane z jednej strony z zaburzaniem warstwy przyściennej przy powierzchni materiału, przez co transport masy jest efektywniejszy, zmniejsza się bowiem grubość warstwy, przez którą zachodzi najwolniejszy proces – dyfuzja. Z drugiej strony mieszanie w warstwie przyściennej zmniejsza również zjawisko polaryzacji stężeniowej – rozrzedzanie roztworu osmotycznego w warstwie przy powierzchni materiału przez wypływającą z próbki wodę, przez co moduł napędowy procesu jest wyższy niż w przypadku procesów realizowanych bez udziału ultradźwięków. Oczywiście, efekt cieplny działania ultradźwięków wywołujący zmiany właściwości fizykochemicznych roztworu, takich jak lepkość i gęstość, dodatkowo promuje transport masy.

Tabela 8 Wartości ubytku wody WL i przyrostu masy suchej SG dla 120-minutowego procesu odwadniania owoców kiwi [H7]

| czynnik osmotyczny | WL $\cdot 10^3$ (kg/kg) | | | SG $\cdot 10^3$ (kg/kg) | | |
|--------------------|-------------------------|-----------------|------------|-------------------------|-----------------|------------|
| | OD | USOD | zmiana (%) | OD | USOD | zmiana (%) |
| ERY | 404,3 \pm 3,3 | 466,1 \pm 7,3 | 15% | 167,8 \pm 0,1 | 185,2 \pm 0,4 | 10% |
| SOR | 325,8 \pm 4,7 | 488,7 \pm 1,7 | 50% | 114,4 \pm 5,0 | 145,4 \pm 0,9 | 27% |
| SUC | 338,5 \pm 8,2 | 487,3 \pm 4,5 | 44% | 115,7 \pm 4,5 | 152,6 \pm 0,6 | 32% |

średnia \pm odchylenie standardowe, OD – odwadnianie osmotyczne, USOD – wspomaganie ultradźwiękami odwadnianie osmotyczne

W tabeli 8 umieszczono wartości WL i SG obserwowane dla procesów trwających 120 minut. Zastosowanie ultradźwięków w trakcie procesu odwadniania wpłynęło na transport masy w obu strumieniach. Zarówno ubytek wody jak i przyrost masy suchej były wyższe w przypadku procesów wspomaganych ultradźwiękami, przy czym efekty ilościowe zależały od rodzaju czynnika osmoaktywnego. Jest to zapewne związane z różnicami w budowie i wielkości cząsteczek poszczególnych związków oraz ciśnień osmotycznych roztworów.

Tabela 9 Wartości ubytku wody WL i przyrostu masy suchej SG dla 30-minutowego okresu odwadniania owoców kiwi [H7]

| czynnik osmotyczny | WL·10 ³ (kg/kg) | | | SG·10 ³ (kg/kg) | | |
|--------------------|----------------------------|-------------|------------|----------------------------|-------------|------------|
| | OD | USOD | zmiana (%) | OD | USOD | zmiana (%) |
| ERY | 243,3 ± 2,0 | 245,7 ± 3,8 | 1% | 75,9 ± 0,5 | 110,9 ± 0,2 | 46% |
| SOR | 214,6 ± 3,1 | 240,0 ± 0,8 | 12% | 51,6 ± 2,3 | 88,8 ± 1,2 | 72% |
| SUC | 141,3 ± 3,4 | 200,9 ± 1,9 | 42% | 28,1 ± 1,1 | 53,4 ± 0,2 | 90% |

średnia ± odchylenie standardowe, OD – odwadnianie osmotyczne, USOD – wspomagane ultradźwiękami odwadnianie osmotyczne

Z kolei w tabeli 9 umieszczono wartości WL i SG obserwowane dla procesów trwających 30 minut. Jak widać skrócenie czasu odwadniania do 30 minut nie zmieniło trendu obserwowanego dla 120-minutowego procesu (tabela 8). Procesy wspomagane ultradźwiękami charakteryzowały się wyższymi wartościami zarówno WL jak i SG, przy czym przyrosty w stosunku do procesu osmozy naturalnej (OD) były zdecydowanie wyższe, jeśli chodzi o transport masy suchej. Wynika z tego, że w pierwszej fazie procesu odwadniania następuje intensywny transport masy rozpuszczonej w roztworze do tkanki materiału, zaś transport wody z tkanek jest mniejszy. Efekt taki widoczny był dla erytrytolu oraz sorbitolu. W przypadku sacharozy WL było na podobnym poziomie jak przy 120-minutowym odwadnianiu. Wyjaśnienie tego zjawiska wymaga dalszych badań, najlepiej analiz obrazowych, np. z wykorzystaniem mikrotomografii komputerowej. W pracy [H4] przedstawiono pewną hipotezę badawczą zakładającą wysycenie przypowierzchniowych warstw materiału substancją rozpuszczoną w roztworze, co utrudnia transport wody z wnętrza do roztworu, wymaga ona jednak potwierdzenia doświadczalnego.

Reasumując, zastosowanie ultradźwięków w odwadnianiu osmotycznym istotnie wpływa na kinetykę tego procesu. W literaturze znajdowały się już doniesienia na ten temat, jednak brakowało wyjaśnienia zjawiska i opisanie czynników wpływających na kinetykę procesu. Nie ulega jednak wątpliwości, że zarówno ubytek wody jak i przyrost masy suchej są dla procesów wspomaganych ultradźwiękami większe, co może pozytywnie wpływać na efektywność osmozy. Intensyfikacja wymiany masy w trakcie osmozy wspomaganej ultradźwiękami wynika zapewne z redukcji warstwy przyściennej (dyfuzyjnego oporu wymiany masy) oraz modyfikacji właściwości fizykochemicznych roztworów (zmniejszenie lepkości i gęstości). Dominującym czynnikiem sprawczym, niezależnie od rozpatrywanego mechanizmu intensyfikacji, jest proces kawitacji. Przedstawione powyżej wyniki badań mogą pozwolić na dalszy rozwój tej techniki odwadniania/obróbki wstępnej i wpłynąć na jej szersze stosowanie w warunkach przemysłowych. Wyzwaniem nadal pozostaje utylizacja roztworów poosmotycznych.

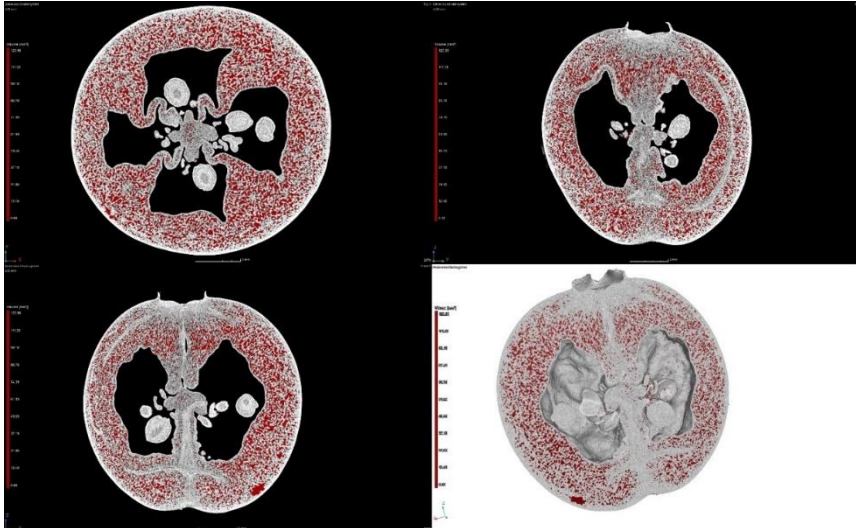
5.2.3. Nasycanie próżniowe wspomagane ultradźwiękami

Nasycanie próżniowe jest procesem, który, poprzez mechanicznie wytworzony gradient ciśnienia, pozwala na usunięcie z tkanki owocowej i warzywnej tzw. *płynów natywnych* i wprowadzenie w ich miejsce składników obecnych w roztworze nasycającym. Dzięki temu możliwe jest modyfikowanie składu surowca i nadawanie mu nowych cech (nawet terapeutycznych). Według Fito i wsp.¹¹ za transport masy odpowiadają w tym procesie dwa zjawiska: *mechanizm hydrodynamiczny* oraz *zjawiska deformacyjno-relaksacyjne*. Niemniej jednak proces ten jest stosunkowo powolny, a jego efektywność zależy w dużej mierze od właściwości samego surowca (np. budowy, porowatości, zawartości skrobi czy innych związków). Z tego powodu poszukuje się metod intensyfikacji wymiany masy, mających na celu skrócenie czasu nasycania lub zwiększenie jego efektywności dla produktów trudno-nasycalnych.

W pracy [H10] zaprezentowano wyniki badań nad procesem nasycania próżniowego owoców żurawiny wielkoowocowej w całości. Struktura owocu, a w szczególności jego gruba, gęsta, nieporowata i pokryta substancjami woskowymi skórka, uniemożliwia właściwie jakikolwiek proces przetwórczy bez naruszenia struktury owocu (rozdrobienie, ocieranie). Takie zabiegi wstępne powodują z kolei niekorzystne zmiany w jakości finalnego produktu (np. ubytek antyoksydantów) i często prowadzą do problemów technologicznych (np. niekontrolowany wyciek soku). Zaproponowano więc zastosowanie ultradźwięków, które z jednej strony mogą poszerzyć istniejące w skórcie pory, a z drugiej, w wyniku działania kawitacji, wytworzyć nowe pory i mikrokanaliki, przez które roztwór nasycający będzie wnikał do owocu. Zmiany te byłyby jednak na tyle małe, że nie wpłynęłyby na jakość otrzymanego produktu. Czynnikiem dodatkowo intensyfikującym wymianę masy byłoby mieszanie przyściennej warstwy laminarnej w otoczeniu skórki, co niewątpliwie zmniejszyłoby grubość tej warstwy i skróciło drogę dyfuzji.

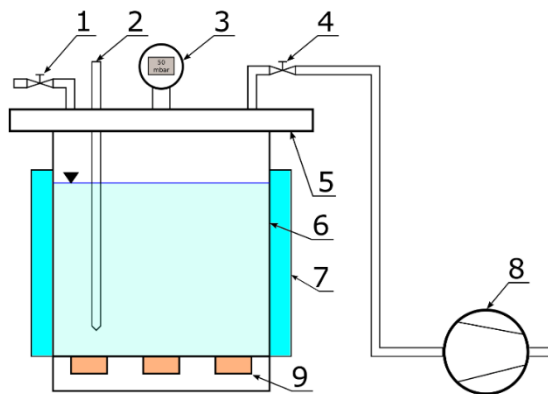
Na rysunku 14 zaprezentowano skany surowca wykonane w technice mikrotomografii komputerowej. Widać na nich wyraźnie, że owoc żurawiny cechuje się wysoką porowatością tkanki – przestrzenią, do której można wprowadzić roztwór nasycający, jednak jest ona niedostępna ze względu na nieporowatą skórkę (biała otoczka wokół owocu). Aby wprowadzić do tkanki jakikolwiek składnik konieczne jest naruszenie skórki lub rozdrobienie owocu (np. przecięcie na pół). Jak już wspomniano, może to prowadzić do niekorzystnych zmian w jakości produktu.

¹¹ P. Fito i in., „Coupling of hydrodynamic mechanism and deformation-relaxation phenomena during vacuum treatments in solid porous food-liquid systems”, *Journal of Food Engineering* 27, nr 3 (1 styczeń 1996): 229–40, <https://doi.org/10/bvvtbm5>.



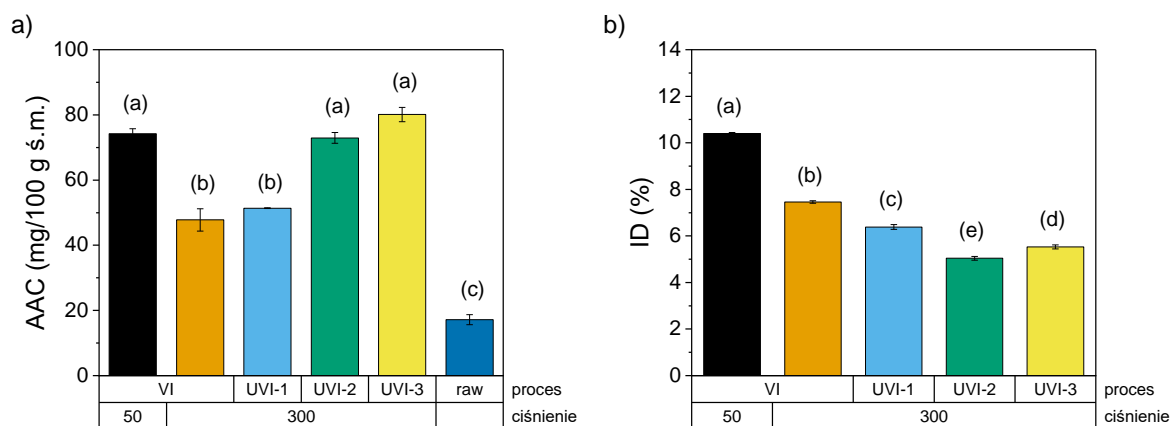
Rysunek 14 Rekonstrukcja struktury wewnętrznej żurawiny metodą mikrotomografii komputerowej [H10]

Postanowiono więc przeprowadzić testy impregnacji próżniowej ze wspomaganie ultradźwiękowym (częstotliwość 35 kHz, moc efektywna zmierzona kalorymetrycznie 240 W). Proces prowadzono w prototypowym urządzeniu IS-PP umożliwiającym stosowanie ultradźwięków w warunkach próżni (rysunek 15). Urządzenie to zostało opracowane i wykonane na podstawie mojej koncepcji we współpracy z firmą INTERSONIC sp. z o.o. z Olsztyna.



Rysunek 15 Schemat urządzenia IS-PP: 1, 4 – zawory, 2 – czujnik temperatury PT-100, 3 – wakuometr, 5 – pokrywa, 6 – komora próżniowa, 7 – płaszcz wodny, 8 – pompa próżniowa, 9 – przetworniki ultradźwiękowe [H10]

Proces nasycania realizowano pod ciśnieniem 50 i 300 mbar (VI), natomiast operacje wspomagane ultradźwiękami (UVI) wyłącznie pod ciśnieniem 300 mbar, w temperaturze 298 K. Ultradźwięki stosowano w etapie obniżonego ciśnienia (UVI-1), relaksacji pod ciśnieniem atmosferycznym (UVI-2), jak i podczas całego procesu (UVI-3). Efektywność nasycania oceniano na podstawie stężenia składnika bioaktywnego wprowadzanego do tkanki, którym był kwas askorbinowy (AAC – z ang. *Ascorbic Acid Content*) oraz stopnia impregnacji (ID – z ang. *Impregnation Degree*) – względnej zmiany masy surowca po procesie nasycania. Na rysunku 16 zaprezentowano wartości obu parametrów dla poszczególnych procesów.



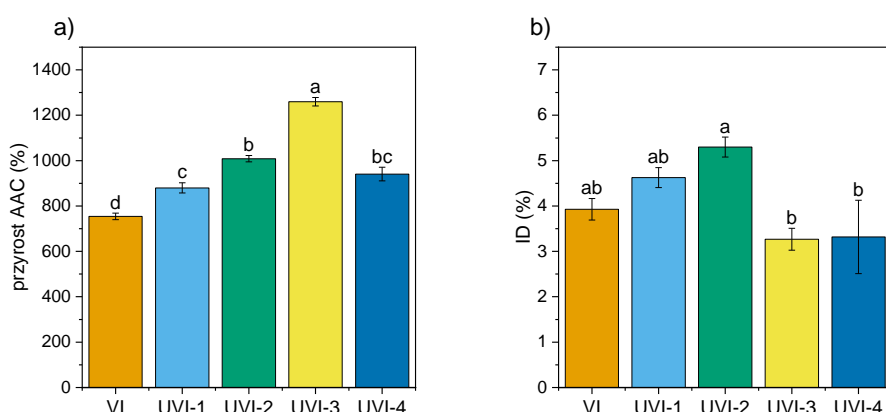
Rysunek 16 a) zawartość kwasu askorbinowego AAC oraz b) stopień impregnacji żurawiny nasycanej ze wspomaganie ultradźwiękowym [H10]

średnia \pm odchylenie standardowe; różne litery nad słupkami oznaczają istotną statystycznie różnicę ($p < 0,05$) zgodnie z ANOVA oraz testem Tukeya

Jak widać zastosowanie ultradźwięków spowodowało wzrost stężenia kwasu askorbinowego w tkance owocu żurawiny (rysunek 16a). Najmniejszy przyrost tego składnika – podobny do uzyskanego w procesie nasycania bez ultradźwięków pod ciśnieniem 300 mbar, obserwowano, gdy ultradźwięki stosowano w trakcie próżni (UVI-1). Aplikacja ultradźwięków pod ciśnieniem atmosferycznym (UVI-2) spowodowała znaczący wzrost efektywności nasycania, do wartości zbliżonej do obserwowanej dla nasycania bez ultradźwięków pod ciśnieniem 50 mbar. Zastosowanie ultradźwięków w całym procesie (UVI-3) spowodowało jeszcze większy, chociaż nieistotny statystycznie w odniesieniu do UVI-2, wzrost zawartości kwasu askorbinowego. Nie ulega wątpliwości, że ultradźwięki efektywnie wpłynęły na procesy wymiany masy i pozwoliły na osiągnięcie zawartości czynnika bioaktywnego na poziomie tego, jaki obserwowano dla dużo wyższego podciśnienia (50 mbar). Różnice pomiędzy procesami, w których ultradźwięki stosowano w próżni i pod ciśnieniem atmosferycznym, mogą wynikać z różnych typów kawitacji dominującej w danym procesie. Gdy ciśnienie nad roztworem nasycającym zostało obniżone, na powstające w wyniku kawitacji pęcherzyki parowo-gazowe oddziaływała dużo mniejsza siła, przez co nie dochodziło do ich implozji. Próg Blake'a – siły napięcia powierzchniowego działające na powierzchni międzyfazowej, nie zostały przekroczone. W okresie tym dominowała więc dużo łagodniejsza w swych efektach kawitacja stabilna. W przypadku gdy ultradźwięki stosowano w okresie relaksacji (pod ciśnieniem atmosferycznym), siły napięcia powierzchniowego nie były już w stanie przeciwstawić się ciśnieniu wywieranemu na pęcherzyki z zewnątrz i dochodziło do ich implozji. W etapach tych dominowała kawitacja niestabilna, prowadząca do zdecydowanie efektywniejszego oddziaływania ultradźwięków na procesy wymiany masy. Potwierdzeniem tego może być wykres stopnia impregnacji ID (rysunek 16b). Dla procesów, w których stosowano ultradźwięki, parametr ten osiągał niższe wartości, co może świadczyć o ich efektywnym oddziaływaniu na powierzchnię owoców żurawiny, np. poprzez oczyszczanie jej z wosków lub mikrouszkodzenia np. odrywanie tkanek. Najniższe wartości ID zaobserwowano jednak dla procesów, w których ultradźwięki działały pod ciśnieniem atmosferycznym.

W pracy [H11] przeprowadzono podobne badania dla tkanki ziemniaka. Surowiec ten charakteryzuje się stosunkowo małą porowatością (~ 4%) oraz dużą zawartością skrobi. Mała porowatość utrudnia

nasycanie próżniowe, ze względu na ograniczoną przestrzeń, w jaką można wprowadzić roztwór nasycający. Z kolei skrobia w przypadku ziemniaka ma postać dużych granul, które mogą fizycznie blokować kapilary i pory. Nasycanie tkanki ziemniaka jest często nieefektywne i wymaga stosowania dużego podciśnienia (wysokiej próżni). Jako czynnik intensyfikujący wymianę masy zaproponowano więc ultradźwięki. Proces nasycania przeprowadzono w opisanym powyżej urządzeniu (rysunek 15). Liczbę procesów zwiększono i przeprowadzono dodatkowy proces UVI-4, w którym ultradźwięki stosowano tylko w okresie zapowietrzania (10-minutowy okres przywracania ciśnienia otoczenia). Reszta parametrów oraz rodzaj czynnika aktywnego wprowadzanego do tkanki były takie same jak w przypadku żurawiny. Na rysunku 17 przedstawiono wartość przyrostu kwasu askorbinowego (AAC) oraz stopień impregnacji dla poszczególnych procesów (ID).



Rysunek 17 a) Wzrost zawartości kwasu askorbinowego oraz b) stopień impregnacji ziemniaka nasycanego próżniowo z wspomaganie ultradźwiękowym [H11]
 średnia \pm odchylenie standardowe; różne litery nad słupkami oznaczają istotną statystycznie różnicę ($p < 0,05$) zgodnie z ANOVA oraz testem Tukeya

Proces impregnacji próżniowej tkanki ziemniaka bez wspomaganie ultradźwiękami pozwolił na zwiększenie zawartości związku aktywnego – kwasu askorbinowego w surowcu o około 750%. Zastosowanie ultradźwięków pozwoliło na zwiększenie ilości wprowadzanego do tkanki składnika i osiągnięcie wzrostu AAC o od 880 do 1260% (rysunek 17a). Podobnie jak w przypadku żurawiny, ultradźwięki zastosowane na różnych etapach nasycania powodowały odmienne efekty ilościowe. Najwyższy wzrost AAC nastąpił w przypadku, gdy ultradźwięki stosowane były przez cały proces (UVI-3), nieco niższy, gdy tylko w okresie relaksacji (UVI-2), najniższy, gdy tylko w okresie próżni (UVI-1). Efekty takie można, podobnie jak w przypadku żurawiny, tłumaczyć różnym charakterem kawitacji oraz czasem oddziaływania ultradźwięków. W procesie UVI-1 dominowała łagodna kawitacja stabilna intensyfikująca wymianę masy poprzez efekty mechaniczne – mieszanie, efekt gąbki itp. W przypadku procesu UVI-2 dominowała kawitacja niestabilna, w trakcie której dochodziło do intensywnej intensyfikacji procesów w wyniku implozji pęcherzyków parowo-gazowych. Proces UVI-3 charakteryzował się najwyższym wzrostem zawartości kwasu askorbinowego, ponieważ czas oddziaływania ultradźwięków był najdłuższy i zachodziły w nim oba rodzaje kawitacji (stabilna i niestabilna).

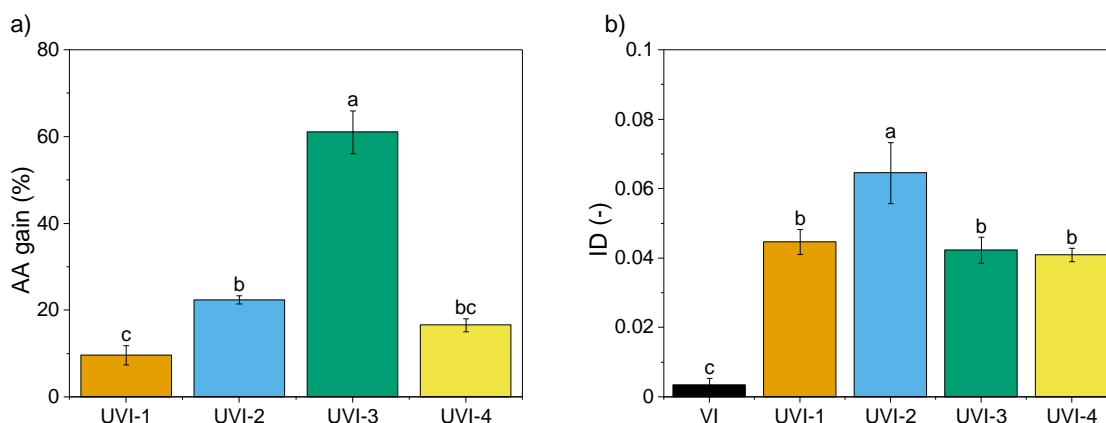
Bardzo ciekawy wynik uzyskano, gdy wspomaganie ultradźwiękowe stosowano w bardzo krótkim okresie zapowietrzania (UVI-4). Ultradźwięki oddziaływały w nim na tkankę tylko przez 10 minut,

w trakcie których przywracano ciśnienie otoczenia. Rezultat ten wymaga dalszych badań, jednak możliwe jest przyjęcie hipotezy, że to właśnie w okresie zapowietrzania dochodzi do największej wymiany masy w procesie impregnacji. Należy jednak stwierdzić, że hipoteza ta nie jest słuszna dla wszystkich rodzajów surowca. Dla marchwi (wyniki w trakcie publikacji) zaobserwowano, że największa wymiana masy następuje dopiero w okresie relaksacji – pływający po powierzchni surowiec tonął w tym okresie i opadał na dno urządzenia. Z kolei dla jabłka (wyniki nieopublikowane), zmiana gęstości wywołana nasyceniem tkanki roztworem kwasu askorbinowego, a w efekcie tonięcie surowca, następowało już w końcowym etapie okresu próżni. Oznaczałoby to, że dla każdego z tych surowców dominuje inny mechanizm nasycania – wymiany masy. W przypadku jednych jest to związane z deformacją kapilar/porów, dla innych z zjawiskami hydrodynamicznymi.

Stopień impregnacji ID (rysunek 17b) potwierdza obserwacje poczynione dla wzrostu zawartości kwasu askorbinowego. W procesach VI, UVI-1, UVI-2 wartość ID wzrasta ze względu na wzrost wprowadzanego składnika do matrycy. W procesie UVI-3 spada ze względu na bardzo długie oddziaływanie ultradźwięków i możliwość wyplukiwania składników stałych, np. skrobi z tkanki ziemniaczanej. Dla procesu UVI-4 spadek stopnia impregnacji w odniesieniu do procesu bez ultradźwięków może wynikać z krótkiego oddziaływania fal na tkankę. Wymaga to jednak dalszych badań.

W pracy [H13] przedstawiono wyniki badań nad wspomaganym ultradźwiękami nasyceniem próżniowym korzenia marchwi. Surowiec ten charakteryzuje się bardzo niską porowatością i zwartą, silnie niejednorodną budową morfologiczną. Cechy te powodują, że nasycanie korzenia marchwi jest utrudnione i często uzyskuje się niejednorodny stopień wysycenia tkanek. Procesy nasycania realizowano zgodnie z metodologią przedstawioną w pracach [H10] oraz [H11].

Na rysunku 18 przedstawiono wartości wzrostu zawartości kwasu askorbinowego oraz stopnia impregnacji tkanki marchwi po procesie nasycania w różnych warunkach procesowych.



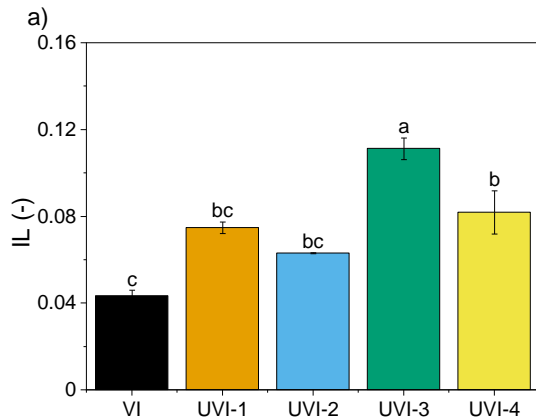
Rysunek 18 a) przyrost zawartości kwasu askorbinowego w tkance, b) stopień impregnacji korzenia marchwi [H13]
Średnia \pm odchylenie standardowe; różne litery nad słupkami oznaczają istotną statystycznie różnicę ($p < 0,05$) zgodnie z ANOVA oraz testem Tukeya

Zastosowanie ultradźwięków podczas impregnacji próżniowej spowodowało znaczny wzrost zawartości kwasu askorbinowego w tkance marchwi. Przyrost, obliczony w porównaniu do impregnacji bez wspomaganie ultradźwiękami (proces VI), był różny i zależał od etapu, w którym zastosowano fale

mechaniczne. Można zauważyć, że kluczowym czynnikiem wpływającym na skuteczność ultradźwięków było ciśnienie. W przypadku procesu, w którym wsparcie było stosowane pod ciśnieniem atmosferycznym (UVI-2), poziomy markera były wyższe niż w przypadku, gdy ultradźwięki były stosowane w próżni (UVI-1): odpowiednio 22% i 9% przyrostu. Może to być związane z występowaniem różnych rodzajów kawitacji. Gdy ultradźwięki były stosowane pod zmniejszonym ciśnieniem (UVI-1), dominowała kawitacja stabilna, podczas której wpływ ultradźwięków na przenoszenie masy był niewielki. Gdy ultradźwięki zastosowano przy ciśnieniu atmosferycznym (UVI-2), przeważała kawitacja przejściowa (niestabilna), której towarzyszą znacznie większe efekty energetyczne, co prowadzi do znacznie większej intensyfikacji wymiany masy. Hipotezę dotyczącą różnych rodzajów kawitacji potwierdzają wyniki uzyskane w procesie UVI-4, w którym ultradźwięki były wykorzystywane podczas napowietrzania (wyrównywania ciśnienia). Ponieważ ciśnienie w tym procesie było funkcją czasu i wzrastało wraz z jego upływem, charakter kawitacji również się zmieniał. Na początku dominowała kawitacja stabilna, ale wraz ze wzrostem ciśnienia stopniowo przekształcała się w kawitację przejściową. Tak więc wzrost zawartości kwasu askorbinowego (około 17%) był wyższy niż w procesie UVI-1, ale niższy niż w UVI-2, mimo że oba te procesy były statystycznie podobne.

Czas ekspozycji miał również wpływ na skuteczność wspomaganie ultradźwiękowego. W procesie UVI-3 ultradźwięki były używane przez cały czas trwania, co spowodowało ponad 60% wzrost zawartości kwasu askorbinowego w tkance. W tym procesie wpływ ultradźwięków był znacznie bardziej złożony, ponieważ oba rodzaje kawitacji wystąpiły na jego poszczególnych etapach. Warty odnotowania jest również synergistyczny efekt działania ultradźwięków w procesie UVI-3. Suma zysków dla procesów UVI-1, 2 i 4 była niższa niż wartość obserwowana dla UVI-3. Jest to stosunkowo rzadkie i trudne do wyjaśnienia zjawisko.

Stopień impregnacji (ID) to parametr opisujący względny wzrost masy tkanki podczas procesu impregnacji. Zazwyczaj koreluje on z zawartością wprowadzonego składnika, a w przypadku procesów UVI-1, UVI-2 i UVI-4 faktycznie można zaobserwować taką zależność (rysunek 18b). Jedynie proces UVI-3 odbiega od tej zależności. Może to być spowodowane długotrwałym oddziaływaniem ultradźwięków na tkankę roślinną i wymywaniem jej składników. Może to również wynikać z bardziej destrukcyjnych zmian, na przykład implozji pęcherzyków parowo-gazowych na powierzchni, powodujących odrywanie się fragmentów tkanki. Potwierdzeniem tej hipotezy mogą być wyniki tzw. wpływu jonów – IL. Na rysunku 19 przedstawiono wartość tego parametru.



Rysunek 19 Wartość wypływu jonów IL dla tkanki marchwi nasycanej próżniowo w różnych warunkach [H13]
 średnia \pm odchylenie standardowe; różne litery nad słupkami oznaczają istotną statystycznie różnicę ($p < 0,05$) zgodnie z ANOVA oraz testem Tukeya

Wartość IL jest związana z liczbą jonów wypłukanych z tkanki materiału po procesie impregnacji. Wartość ta często koreluje ze zmianami strukturalnymi i jest wykorzystywana jako predyktor tych zmian. Wysoka wartość IL wskazuje na znaczące zmiany strukturalne, na przykład poprzez utratę integralności tkanki. Jak widać, zastosowanie ultradźwięków spowodowało wzrost wartości tego parametru; jednak tylko dwie zmiany są statystycznie istotne. Najwyższą wartość IL odnotowano dla procesu UVI-3, co potwierdza hipotezę, że znaczące zmiany strukturalne mogą być spowodowane długotrwałą ekspozycją na ultradźwięki. Statystycznie istotną zmianę (w porównaniu do VI) zaobserwowano również dla procesu UVI-4. Biorąc pod uwagę krótki czas ekspozycji na ultradźwięki i zmienne ciśnienie (występowanie stabilnej i przejściowej kawitacji), należy założyć, że wysoka wartość IL wynikała raczej z intensywnego nasycenia powierzchni tkanek niż ze zmian strukturalnych. Roztwór obecny w warstwach powierzchniowych był łatwo wypłukiwany podczas badania przewodności i dawał wysokie stężenie jonów.

Celem badań nad zastosowaniem ultradźwięków w trakcie impregnacji próżniowej było zwiększenie efektywności tego procesu, szczególnie dla surowców kłopotliwych w nasycaniu, takich jak owoce jagodowe, o niskiej porowatości czy warzywa o dużej zawartości skrobi bądź zwartej i niejednorodnej strukturze. Otrzymane wyniki wskazują, że zastosowanie ultradźwięków jest zasadne i pozwala na zwiększenie ilości składnika aktywnego, wprowadzanego z roztworu wodnego do tkanki. W każdym z przedstawionych przykładów obserwowano wyraźny wzrost zawartości kwasu askorbinowego w surowcu – w odniesieniu do procesu impregnacji bez ultradźwięków. Jest to bardzo pozytywny efekt, ponieważ otwiera możliwości efektywnej impregnacji surowców, które dotychczas uchodziły za niepodatne na ten typ obróbki wstępnej. Opracowanie tej nowatorskiej techniki obróbki wstępnej/wzbogacania może pozwolić nie tylko na otrzymywanie nowych produktów żywności funkcjonalnej, ale i produktów żywnościowych o potencjale terapeutycznym. Kluczowym było jednak poznanie mechanizmu wzmacniania wymiany masy w trakcie impregnacji przez ultradźwięki. Zaprezentowane wyniki pozwalają w dużym stopniu zrozumieć przyczynę wyższej efektywności procesów wspomaganych ultradźwiękami, co stanowi istotny wpływ na dyscyplinę.

Należy jednak stwierdzić, że konieczne są jednak dalsze badania, mające na celu określenie efektywności nasycania surowców innymi składnikami bioaktywnymi oraz weryfikację trwałości wprowadzonego składnika w dalszych procesach utrwalania, np. po suszeniu.

5.3. Podsumowanie

Osiągnięcie naukowe stanowiące podstawę oceny składa się z 13 prac dotyczących czterech różnych operacji jednostkowych, tj. suszenia, konwekcyjnej wymiany ciepła, odwadniania osmotycznego i nasycania próżniowego. Wspólnym mianownikiem wszystkich prac jest intensyfikacja omawianych procesów w wyniku działania ultradźwięków. Kinetyka każdego z badanych procesów opiera się na wymianie ciepła i/lub masy.

Mechanizmy wywołujące korzystne efekty są różne i zależą w dużej mierze od warunków prowadzenia danej operacji jednostkowej. Otrzymane w trakcie badań wyniki (prace [H2], [H3], [H4], [H5], [H6], [H7], [H9]) wskazują na to, że w przypadku procesów suszenia, intensyfikacja następuje przede wszystkim poprzez redukcję czynników oporów zewnętrznych. Pulsacja ciśnienia w otoczeniu materiału suszonego powoduje szereg zjawisk przepływowych oraz redukcję przyściennej warstwy laminarnej, co bardzo pozytywnie wpływa na szybkość suszenia. Efekt cieplny działania ultradźwięków (dyssypacja energii mechanicznej na ciepło) oraz zjawiska wpływające na czynniki oporu wewnętrznego (zmiany strukturalne i dynamiczne oddziaływanie ultradźwięków z materiałem suszonym) również wpływają istotnie na kinetykę suszenia, jednak ich udział jest mniejszy. Potwierdzeniem są wyższe wartości efektywnych współczynników dyfuzji, obserwowane dla procesów suszenia wspomaganego ultradźwiękami. Przedstawione w pracach badania, nie umożliwiają jednak określenia dominujących mechanizmów wywołujących zjawiska intensyfikacji. Perspektywiczny jest tutaj rozwój mikrotomografii komputerowej oraz obliczeniowej mechaniki płynów (CFD).

Badania nad procesem ogrzewania i chłodzenia w warunkach konwekcji wspomagannej ultradźwiękami (prace [H8], [H12]) również wykazały pozytywny wpływ fal mechanicznych na współczynniki wymiany ciepła. Próbkę ogrzewane lub chłodzone w procesie konwekcyjno-ultradźwiękowym szybciej przejmowały/oddawały energię w porównaniu do procesów referencyjnych (bez ultradźwięków). Efekty ilościowe zależały zarówno od mocy wspomaganego ultradźwiękowego, jak i wymiarów oraz kształtu próbek. Im większa moc promieniowania akustycznego oraz im mniejsza i bardziej zwarta bryła, tym większy wpływ fal na wymianę ciepła – wyższe wartości współczynnika wymiany ciepła.

Odwadnianie osmotyczne wspomaganie ultradźwiękami (prace [H2], [H4], [H7]) jest dużo bardziej efektywne od procesu prowadzonego bez udziału fal ultradźwiękowych. Głównym zjawiskiem intensyfikującym wymianę masy jest kawitacja. Zjawisko to prowadzi do wielu korzystnych z punktu widzenia wymiany ciepła i masy procesów takich jak: ogrzewanie, mikro strumieniowanie, mikro mieszanie, tworzenie wolnych rodników, redukcja warstwy laminarnej itd. Otrzymane rezultaty wskazują jednoznacznie, że w trakcie wspomaganego ultradźwiękami osmozy, transport wody i substancji rozpuszczonej jest efektywniejszy, a odwodnienie tkanki szybsze. Pozwala to na skrócenie czasu odwadniania i zmniejszenie niekorzystnych efektów tego procesu, takich jak nadmiarowe zwiększenie ilości cukru w tkance, rozmiękanie i rozpad tkanki spowodowany długotrwałym odwadnianiem.

Ultradźwięki wpływają również bardzo istotnie na efektywność wymiany masy w trakcie nasycania próżniowego (prace [H10], [H11], [H13]). Procesy realizowane ze wspomaganie fal ultradźwiękowych charakteryzowały się większymi przyrostami składnika bioaktywnego w tkance. Dzięki temu możliwe stało się nasycanie owoców o zwartej, nieporowatej skórce oraz warzyw o niskiej porowatości tkanki. Efekty ilościowe zależały jednak od etapu wzmocnienia ultradźwiękami. Stwierdzono występowanie dwóch rodzajów kawitacji dojmującej w różnych etapach nasycania. Gdy ultradźwięki stosowane są w próżni dominuje łagodniejsza kawitacja stabilna, wywołująca efekty zbliżone do tych obserwowanych przy dynamicznym oddziaływaniu ultradźwięków z materiałem. W przypadku zastosowania ultradźwięków na etapie relaksacji (pod ciśnieniem otoczenia), dominująca jest kawitacja niestabilna, wywołująca silne efekty cieplne i mechaniczne. W rezultacie wspomaganie ultradźwiękowe podczas etapu relaksacji jest efektywniejsze pod względem ilościowym. Intensywne zjawiska wywołane kawitacją mogą jednak prowadzić do niszczenia struktury tkankowej, co może przełożyć się na wysokie straty składników bioaktywnych w dalszym procesie utrwalania. Konieczne jest więc zoptymalizowanie procesu wspomaganego ultradźwiękami, w celu osiągnięcia maksymalnego wzrostu stężenia składnika bioaktywnego, przy minimalnych/korzystnych, z punktu widzenia dalszych operacji przetwórczych, zmianach strukturalnych.

Badania prowadzone nad powyżej przedstawionymi, różnymi operacjami jednostkowymi, pozwoliły na doświadczalne potwierdzenie postawionych hipotez pomocniczych:

- Energia fal mechanicznych ulega częściowo dyssypacji i jest wydzielana w postaci ciepła co sprzyja operacjom jednostkowym opierającym się na procesach wymiany.
- Ultradźwięki oddziałują dynamicznie z materiałem, w którym się rozchodzą powodując odwracalne i nieodwracalne efekty.
- Ultradźwięki mogą oddziaływać z medium, w którym propagują (środowisko gazowe lub ciekłe), co prowadzi do intensyfikacji procesów wymiany masy i/lub ciepła poprzez redukcję czynników stanowiących opór dla transportu.

Wobec otrzymanych rezultatów można zatem również potwierdzić słuszność głównej hipotezy badawczej:

Ultradźwięki intensyfikują procesy wymiany masy oraz ciepła i korzystnie wpływają na kinetykę operacji jednostkowych opierających się na tych procesach.

Przedstawione w pracach [H1-13], wyniki moich badań, składające się na osiągnięcie naukowe, poszerzyły wiedzę na temat ultradźwięków i sposobu ich oddziaływania, w aspekcie procesów wymiany masy oraz ciepła. Pozwoliły również na pełniejsze zrozumienie sposobu oddziaływania ultradźwięków z materiałem oraz środowiskiem propagacji. Dotyczy to wszystkich badanych przeze mnie operacji jednostkowych. Moim zdaniem na szczególną uwagę zasługują badania dotyczące procesu nasycania próżniowego wspomaganego ultradźwiękami. W literaturze przedmiotu znaleźć można pojedyncze doniesienia na temat takich procesów, brak jednak było kompleksowych badań nad wpływem ultradźwięków na procesy wymiany masy. Opublikowane prace [H10], [H11], [H13] oraz [IF6], powstałe w dużej mierze z mojej inicjatywy, stanowią niezwykle istotny wkład w dyscyplinę inżynierii chemicznej w zakresie intensyfikacji operacji jednostkowych. Stanowią również platformę do dalszego rozwoju technologii, pozwalającej na rozwiązanie kluczowych problemów związanych z przetwórstwem i utrwalaniem produktów spożywczych.

6. Informacja o wykazaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej w szczególności zagranicznej

W ramach prowadzonej w latach 2012-2023 działalności naukowo-badawczej, nawiązałem współpracę z ośrodkami krajowymi oraz zagranicznymi. Tabela 10 zawiera szczegółowy wykaz tych ośrodków wraz z określeniem charakteru i efektów współpracy.

Tabela 10 Wykaz ośrodków z którymi nawiązano współpracę

| Lp. | Nazwa ośrodka | Forma współpracy | Efekt współpracy/Osoba kontaktowa |
|-----|---|---|---|
| 1. | Otto von Guericke University Magdeburg, Thermal Process Engineering Universitätsäplatz 2, Magdeburg, Niemcy | badania naukowe nad procesem suszenia wspomaganym ultradźwiękami i mikrofalami | [H6], [IF4]/ dr hab. inż. Abdolreza Kharaghani |
| 2. | Instytut Ogrodnictwa – Państwowy Instytut Badawczy w Skierniewicach | badania naukowe nad procesem suszenia oraz odwadniania osmotycznego wspomaganego ultradźwiękami, konsultacje w zakresie procesów suszenia i oceny jakościowej suszy | [P2], [P3]/ prof. dr hab. Dorota Konopacka |
| 3. | Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie | badania naukowe nad wpływem ultradźwięków na strukturę wewnętrzną surowca owocowego i warzywnego w ramach projektu BioSUSZ | prof. dr hab. inż. Artur Zdunek |
| 4. | Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych – Państwowy Ośrodek Badawczy w Słupi Wielkiej | badania naukowe nad procesem nasycania próżniowego w ramach projektu NCN, konkurs SONATA 14 [PK4] | [H11]/ dr inż. Tomasz Lenartowicz |
| 5. | Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu | staż naukowy 4.05-5.06 2023 r. badania naukowe nad procesem nasycania próżniowego [PK4], konsultacje w zakresie suszenia, odwadniania osmotycznego i oceny jakościowej produktu suszonego | [IF6], [IF8], [H7], [H10], [H11], [H13]/ dr hab. inż. Elżbieta Radziejewska-Kubzdela |

Dwa z projektów, w których brałem udział, realizowane były przez konsorcja naukowo-przemysłowe (projekt BIOSUSZ) oraz naukowe (projekt własny w konkursie SONATA 14). Konsorcyjny charakter projektów wymuszał na mnie uczestnictwo w badaniach prowadzonych w innych jednostkach naukowych. W projekcie BIOSUSZ wielokrotnie przebywałem w Instytucie Ogrodnictwa w Skierniewicach (lider projektu) i brałem udział w badaniach. W projekcie realizowanym w ramach konkursu SONATA 14, jako **kierownik projektu**, nadzorowałem oraz wykonywałem prace badawcze realizowane u Partnera konsorcjum – na Uniwersytecie Przyrodniczym w Poznaniu. Badania te

obejmowały zarówno ocenę parametrów jakościowych takich jak tekstura (TPA), jak i analizy chemiczne. Efektem tych działań są liczne prace naukowe, które wykazałem w dorobku naukowym.

Szczególnie owocna jest moja współpraca z Uniwersytetem Przyrodniczym w Poznaniu, z zespołem pani dr hab. inż. Elżbiety Radziejewskiej-Kubzdeli. Współpraca ta zawiązała się ok 2017 roku przy okazji realizacji badań do pracy nad odwadnianiem osmotycznym i suszeniem owoców kiwi [H7]. W roku 2018 zacieśniliśmy współpracę podejmując w konsorcjum naukowym Politechnika Poznańska- Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, realizację projektu finansowanego w ramach programu SONATA 14 przez Narodowe Centrum Nauki pt. „Impregnacja próżniowa wspomagana ultradźwiękami - ocena wpływu ultradźwięków na efektywność procesu nasycania materiałów roślinnych oraz ich właściwości” (2018/31/D/ST8/00627) [PZ4]. Efektem projektu, którego byłem **kierownikiem**, jest 5 prac opublikowanych w czasopiśmie indeksowanym w JCR: [IF6], [IF8], [H10], [H11], [H13]. Długoletnia współpraca z zespołem dr Radziejewskiej-Kubzdeli, spowodowała, że w okresie od 4 maja do 5 czerwca 2023 r. odbyłem **staż naukowy** w Katedrze Technologii Żywności Pochodzenia Roślinnego, w Pracowni Analizy i Technologii Owoców i Warzyw Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Opiekunem stażu była dr hab. inż. Elżbieta Radziejewska-Kubzdela. W trakcie stażu pogłębiłem wiedzę z zakresu:

- ekstrakcji składników bioaktywnych z tkanki roślinnej,
- analizy wybranych związków bioaktywnych w produktach spożywczych z wykorzystaniem techniki HPLC,
- analizy jakościowej i ilościowej danych otrzymanych z oznaczeń chromatograficznych,
- oznaczania tekstury produktów spożywczych z wykorzystaniem testu mechanicznego.

Pozyskana wiedza pozwoliła na pełniejsze zrozumienie zachowania tkanki roślinnej w trakcie procesów przetwórczych, składających się z różnych operacji jednostkowych takich jak suszenie, nasycanie, odwadnianie itd.

7. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

W trakcie mojego dotychczasowego zatrudnienia w Politechnice Poznańskiej prowadziłem wykłady, ćwiczenia, projekty oraz laboratoria na czterech kierunkach kształcenia, tj.: inżynierii chemicznej i procesowej, technologii ochrony środowiska, inżynierii bioprocessów i biomateriałów oraz technologii chemicznej (studia niestacjonarne). Tabela 11. zawiera szczegółowy wykaz przedmiotów prowadzonych przeze mnie w ramach działalności dydaktycznej.

W latach 2015-2023 wypromowałem 13 inżynierów oraz 9 magistrów. Jeden z dyplomów prowadzony był we współpracy z partnerem przemysłowym, firmą Celiko sp. z o.o. z Poznania. Duża część prac inżynierskich stanowiła prace projektowo-konstrukcyjne stanowisk laboratoryjnych, wzmacniających potencjał dydaktyczny wydziału. W trakcie pandemii COVID-19 brałem czynny udział w przygotowaniu materiałów dydaktycznych dla studentów - filmów instruktażowych do zajęć laboratoryjnych z przedmiotów takich jak: mechanika płynów, podstawy inżynierii chemicznej i procesowej, inżyniera materiałów i ośrodków porowatych oraz innych realizowanych w Zakładzie Inżynierii Procesowej.

W ramach realizacji zajęć dydaktycznych opracowałem również szereg przebiegów oraz instrukcji laboratoryjnych.

Tabela 11 Wykaz przedmiotów realizowanych w Politechnice Poznańskiej w ramach działalności dydaktycznej

| Lp. | Nazwa przedmiotu | Forma zajęć | | | |
|-----|---|-------------|-----------|----------|-------------|
| | | Wykład | Ćwiczenia | Projekty | Laboratoria |
| 1. | Termodynamika procesowa | | + | | |
| 2. | Inżynieria materiałów i ośrodków porowatych | + | | | + |
| 3. | Podstawy inżynierii chemicznej i procesowej | | | + | |
| 4. | Metody akustyczne | + | | | + |
| 5. | Zaawansowane techniki przetwarzania biomateriałów ¹² | + | | | |
| 6. | Operacje jednostkowe w przetwórstwie surowców i odpadów ¹² | + | | | |
| 7. | Zaawansowane techniki suszenia (do 2020) | | | | + |
| 8. | Mechanika płynów (do 2020) | | | | + |
| 9. | Aparatura procesowa (do 2018) | + | | | |
| 10. | Technologie informacyjne (do 2019) | | | + | |
| 11. | Grafika inżynierska (do 2020) | | | + | |

W ramach działalności promocyjnej na rzecz Politechniki Poznańskiej brałem udział w warsztatach dla uczniów szkół podstawowych i średnich, a także w prezentacji potencjału badawczego wydziału w trakcie obchodów 50-lecia Wydziału Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej.

Zasiadałem również w Komitecie Organizacyjnym i Komitecie Naukowym 8 Europejskiej Konferencji Suszarniczej (Eurodryng 2023) organizowanej przez Politechnikę Łódzką i Politechnikę Poznańską. Konferencja odbyła się w Łodzi w dniach 4-7 lipca 2023 r.

Od lipca 2023 r. jestem zaproszonym członkiem (z ang. *guest member*) w grupie roboczej ds. suszenia przy Europejskiej Federacji Inżynierii Chemicznej EFCE – WPD (z ang. *European Federation of Chemical Engineering – Working Party on Drying*).

¹² Nowy przedmiot, nieprowadzony wcześniej w ramach kursu.

8. Inne informacje ważne z punktu widzenia kariery zawodowej

W ramach realizowanej pracy naukowej brałem czynny udział w **14. projektach badawczych** (6. przed doktoratem, 8. po doktoracie), z czego w **8.** na stanowisku **kierownika projektu**.

Projekty zewnętrzne (NCN, NCiBR itp.)

Przed doktoratem:

- [PZ-1] Projekt nr POKL 8.2.2/30-206-11/12 (2011/12) realizowany w ramach projektu systemowego pt. „Wsparcie stypendialne dla doktorantów na kierunkach uznanych za strategiczne z punktu widzenia rozwoju Wielkopolski”, Poddziałanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji, Działanie 8.2, Priorytet VIII Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, **pełniona funkcja: kierownik projektu**
- [PZ-2] Grant promotorski MNiSW pt. „Efektywność suszenia hybrydowego materiałów biologicznych”, nr N N209 373639, czas trwania 2010-2012, kierownik: prof. dr hab. inż. Stefan Jan Kowalski, **pełniona funkcja: główny wykonawca**.
- [PZ-3] Projekt badawczy MNiSW pt. „Modelowanie i eksperymentalna identyfikacja pęknięć w suszonych materiałach porowatych”, nr N N209 104337, czas trwania 2009-2012, kierownik projektu: dr inż. Jacek Banaszak, **pełniona funkcja: wykonawca**.
- [PZ-4] Projekt badawczy MNiSW pt. „Suszenie hybrydowe: optymalizacja czasu suszenia i zużycia energii przy żądanej jakości produktu”, nr N N209 031638, czas trwania 2010-2013, kierownik projektu: dr inż. Kinga Rajewska, **pełniona funkcja: wykonawca**.

Po doktoracie:

- [PZ1] Projekt NCBiR w ramach I Konkursu Programu Badań Stosowanych pt. „Wykorzystanie ultradźwięków do wspomaganie procesów suszenia materiałów biologicznych wrażliwych na termiczne warunki suszenia”, nr PBS1/A8/13/2012, czas trwania 2012-2016, kierownik projektu: prof. dr hab. inż. Stefan Jan Kowalski, **pełniona funkcja: wykonawca**.
- [PZ2] Projekt NCN pt. „Badanie mechanizmu oddziaływania ultradźwięków na tkankę materiału biologicznego w procesie suszenia wspomaganego ultradźwiękami.”, nr 2012/05/B/ST8/01773, czas trwania 2012-2016, kierownik projektu: prof. dr hab. inż. Stefan Jan Kowalski, **pełniona funkcja: wykonawca**.
- [PZ3] Projekt NCN pt. „Niestacjonarne konwekcyjne suszenie materiałów biologicznych ze wspomaganie mikrofalowym i ultradźwiękowym” nr UMO-2014/15/D/ST8/02777, czas trwania 2015-2018, kierownik projektu dr inż. Justyna Szadzińska, **pełniona funkcja: wykonawca**.
- [PZ4] Projekt NCN w ramach programu SONATA 14 pt. „Impregnacja próżniowa wspomaganie ultradźwiękami - ocena wpływu ultradźwięków na efektywność procesu nasycania materiałów roślinnych oraz ich właściwości”, nr 2018/31/D/ST8/00627, czas trwania 2019-2023, realizowany w konsorcjum naukowym przez Politechnikę Poznańską – lider, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu – partnera, **pełniona funkcja: kierownik projektu**.

Projekty wewnętrzne (dotacje statutowe):**Przed doktoratem**

- [PW-1] Projekt badawczy finansowany przez Politechnikę Poznańską, Wydział Technologii Chemicznej, pt. „Opracowanie efektywnego suszenia materiałów biologicznych metoda hybrydową”, nr 32-207/2011 DS-MK (dotacja statutowa na rzecz młodej kadry naukowej), czas trwania 2010/2011, **pełniona funkcja: kierownik projektu.**
- [PW-2] Projekt badawczy finansowany przez Politechnikę Poznańską, Wydział Technologii Chemicznej, pt. „Wpływ odwadniania osmotycznego na kinetykę dosuszania konwekcyjnego oraz jakość otrzymywanych produktów”, nr 32-337/2012 DS-MK, czas trwania 2011/2012, **pełniona funkcja: kierownik projektu.**

Po doktoracie

- [PW1] Projekt badawczy finansowany przez Politechnikę Poznańską, Wydział Technologii Chemicznej, pt. „Wpływ zastosowania hybrydowych technik suszenia na kinetykę suszenia materiałów ceramicznych oraz jakość otrzymanych produktów”, nr 03/32/DSMK/0611, czas trwania 2015/2016, **pełniona funkcja: kierownik projektu.**
- [PW2] Projekt badawczy finansowany przez Politechnikę Poznańską, Wydział Technologii Chemicznej, pt. „Suszenie hybrydowe produktów spożywczych o dużej zawartości wilgoci”, nr 03/32/DSMK/0711, czas trwania 2016/2017, **pełniona funkcja: kierownik projektu.**
- [PW3] Projekt badawczy finansowany przez Politechnikę Poznańską, Wydział Technologii Chemicznej, pt. „Impregnacja próżniowa produktów spożywczych – wpływ ultradźwięków na efektywność procesu.”, nr 03/32/DSMK/0811 czas trwania 2017/2018, **pełniona funkcja: kierownik projektu.**
- [PW4] Od 2019 roku jestem również **kierownikiem zadań badawczych** realizowanych w **ramach subwencji badawczej (SBAD) w Zakładzie Inżynierii Procesowej**, Politechniki Poznańskiej.

W latach 2015 – 2023, oprócz działalności publikacyjnej, swoją działalność naukową realizowałem również jako czynny recenzent prac naukowych oraz projektów badawczych. W zarejestrowanym przez platformę Publons okresie od 1 września 2014 do 1 kwietnia 2023 r., **wykonałem ponad 137 recenzji dla czasopism międzynarodowych indeksowanych w JCR.** We wrześniu 2018 r. otrzymałem wyróżnienie „**Top reviewers in Agricultural Sciences - September 2018**”. Tabela 12 zawiera wykaz czasopism dla których wykonałem recenzje.

Tabela 12 Wykaz czasopism, dla których wykonano recenzje¹³

| Lp. | Nazwa czasopisma | Liczba recenzji |
|-------------|---|-----------------|
| 1. | Journal of Food Process Engineering | 22 |
| 2. | Drying Technology | 21 |
| 3. | LWT - Food Science and Technology | 13 |
| 4. | Renewable Energy | 13 |
| 5. | Journal of Food Processing and Preservation | 9 |
| 6. | Food and Bioprocess Technology | 7 |
| 7. | Innovative Food Science & Emerging Technologies | 6 |
| 8. | Foods | 5 |
| 9. | Journal of Food Science and Technology | 5 |
| 10. | International Journal of Food Science & Technology | 3 |
| 11. | Sustainability | 3 |
| 12. | Computers and Electronics in Agriculture | 3 |
| 13. | Journal of the Science of Food and Agriculture | 2 |
| 14. | Journal of Food Science | 2 |
| 15. | Journal of Manufacturing and Materials Processing | 2 |
| 16. | ChemEngineering | 2 |
| 17. | Food and Humanity | 2 |
| 18. | Heat and Mass Transfer | 2 |
| 19. | Thermal Science and Engineering Progress | 1 |
| 20. | Scientific African | 1 |
| 21. | International Journal of Food Science | 1 |
| 22. | Ultrasonics Sonochemistry | 1 |
| 23. | Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy | 1 |
| 24. | Journal of Food Quality | 1 |
| 25. | Information Processing in Agriculture | 1 |
| 26. | Archives of Thermodynamics | 1 |
| 27. | SN Applied Sciences | 1 |
| 28. | Food Chemistry | 1 |
| 29. | Journal of Agricultural Science and Technology | 1 |
| 30. | Czech Journal of Food Sciences | 1 |
| 31. | Molecules | 1 |
| 32. | Notuale Scientia Biologicae | 1 |
| 33. | Scientific Africa | 1 |
| Suma | | 137 |

¹³ Na podstawie Web of Science (dawniej Publons), www.webofscience.com dostęp dnia 1 lipca 2023 r.

Recenzowałem również wnioski w konkursach na projekty badawcze dla Narodowego Centrum Nauki oraz Foundation for Science:

- [REC1] rok 2018, recenzja wniosku o finansowanie badań dla International Foundation for Science, Sztokholm (Szwecja).
- [REC2] rok 2021, recenzja wniosku o finansowanie w ramach konkursu OPUS LAP dla Narodowego Centrum Nauki w Polsce.
- [REC3] rok 2022, recenzja sprawozdania oraz wniosku o ponowne finansowanie (*renewal grant proposal*) badań dla International Foundation for Science, Sztokholm (Szwecja).

Wykonałem także 2 ekspertyzy dla podmiotów gospodarczych. Ze względu na poufny charakter treści, wykaz tych ekspertyz znajduje się w wykazie dorobku naukowego.

9. Pozostały dorobek po doktoracie

Oprócz prac wymienionych w pkt. 5., jestem również współautorem 9 prac naukowych opublikowanych w czasopiśmie indeksowanych w JCR, 2 rozdziałów w monografiach naukowych oraz 3 prac w czasopiśmie nieindeksowanych w JCR. Wszystkie te prace zostały opublikowane po uzyskaniu tytułu doktora, tj. w latach 2012-2023. Jestem również współautorem jednego patentu [PAT1]. Szczegółowy wykaz prac wraz z danymi bibliograficznymi przedstawiono poniżej.

9.1. Prace w czasopiśmie indeksowanych w JCR

| | | | |
|---|----------|-------------------|--------------------------|
| [IF1] Kowalski S.J. (✉), Mierzwa D. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | 2015 | 3,556 | 35 (lista A) |
| | 22*/23** | 3,300* | 100** |
| US-assisted convective drying of Biological materials | | | |
| <i>Drying Technology</i> , 33(13), 2015, 1601-1613 | | | |
| DOI:10.1080/07373937.2015.1026985 | | | |
| Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie koncepcji/hipotez badawczych, opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów). | | | |
| [IF2] Mierzwa D. (✉), Pawłowski A. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | 2017 | 0,687 | 20 (lista A) |
| | 22*/23** | 1,100* | 40** |
| Convective drying of potatoes assisted by microwave and infrared radiation – process kinetics and quality aspects | | | |

Journal of Food and Nutrition Research, 2017, 56(4), 351-361

Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie koncepcji/hipotez badawczych, opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

[IF3] **Mierzwa D.** (✉), Szadzińska J.

| rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
|----------|-------------------|--------------------------|
| 2019 | 1,703 | 100 |
| 22*/23** | 3,000* | 100** |

The microwave-assisted convective drying of kale (*Brassica oleracea* L. var. *sabellica* L.) using continuous and changeable power radiation

Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(3), 13004-1-13004-14,

DOI: 10.1111/jfpe.13004

Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

[IF4] Szadzińska J. (✉), **Mierzwa D.**, Pawłowski A., Musielak G., Pashminehazar R., Kharaghani A.

| rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
|----------|-------------------|--------------------------|
| 2020 | 4,452 | 100 |
| 22*/23** | 3,300* | 100** |

Ultrasound and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot

Drying Technology, 38(1-2), 2020, 93-107

DOI: 10.1080/07373937.2019.1624565

Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów (procesy suszenia, modelowanie cienkowarstwowe, współczynnik dyfuzji), opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych (kinetyka, aproksymacja modelami cienkowarstwowymi, współczynnik dyfuzji), tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

| | | | | |
|--|--|----------|-------------------|--------------------------|
| [IF5] | Stasiak M., Musielak G. (✉), Mierzwa D. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 2020 | 3,004 | 140 |
| | | 22*/23** | 3,200* | 140** |
| <p>Optimization method for the evaluation of convective heat and mass transfer effective coefficients and energy sources in drying processes</p> <p><i>Energies 13 (24), 2020, 6577-1-6577-12</i> <i>DOI: 10.3390/en13246577</i></p> <p>Wkład habilitanta obejmuje: przeprowadzenie badań eksperymentalnych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach.</p> | | | | |
| [IF6] | Mierzwa D. (✉), Szadzińska J., Radziejewska-Kubzdela E., Biegańska-Marecik R. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 2021 | 3,889 | 100 |
| | | 22*/23** | 3,900* | 100** |
| <p>Ultrasound-assisted vacuum impregnation as a strategy for the management of potato by-products</p> <p><i>Sustainability, 13(6), 2021, 3437-1-3437-14;</i> <i>DOI: 10.3390/su13063437</i></p> <p>Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie koncepcji/hipotez badawczych, opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).</p> | | | | |
| [IF7] | Szadzińska J. (✉), Mierzwa D. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 2021 | 4,264 | 140 |
| | | 22*/23** | 4,300* | 140** |
| <p>The influence of hybrid drying (microwave-convective) on drying kinetics and quality of white mushrooms</p> <p><i>Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2021 (167), 108532-1 – 108532-11</i> <i>DOI: 10.1016/j.cep.2021.108532</i></p> <p>Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po</p> | | | | |

recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

| | | | | |
|-------|--|----------|-------------------|--------------------------|
| [IF8] | Mierzwa D. (✉), Szadzińska J., Radziejewska-Kubzdela E., Biegańska-Marecik R., Kidoń M. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 21*/22** | 5,105* | 140** |
| | | 22*/23** | 4,600* | 140** |

Effectiveness of cranberry (*Vaccinium macrocarpon*, cv. Pilgrim) vacuum impregnation: The effect of sample pretreatment, pressure, and processing time

Food and Bioproducts Processing, 2022 (134), 223 – 234

DOI: 10.1016/j.fbp.2022.06.001

Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie koncepcji/hipotez badawczych, opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

| | | | | |
|-------|------------------------------------|----------|-------------------|--------------------------|
| [IF9] | Mierzwa D. (✉), Musielak G. | rok | IF ³ : | pkt. MEiN ³ : |
| | | 21*/23** | 2,838* | 100** |
| | | | | |

Convective–Microwave–IR Hybrid Drying of Kaolin Clay—Kinetics of Process

Applied Sciences, 13 (13), 7451-1-7451-12

DOI: 10.3390/app13137451

Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie koncepcji/hipotez badawczych, opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

9.2. Rozdziały w monografiach naukowych

[R1] Kowalski S.J., **Mierzwa, D.** Szadzińska J.

Highly Efficient Vegetables Drying Technologies III: Ultrasound-Assisted Drying

W: Handbook of Drying of Vegetables and Vegetable Products Bhandari, B., Fang, Z. (eds), CRC Press, Boca Raton (USA, Floryda), 2017, 81-116.

Wkład habilitanta obejmuje: przeprowadzenie badań eksperymentalnych, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

[R2] Musielak G., **Mierzwa D.**, Pawłowski A., Rajewska K., Szadzińska J.

Hybrid and Non-stationary Drying - Process Effectiveness and Products Quality

W: Practical Aspects of Chemical Engineering, Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering. Ochowiak M., Woźniowski S., Doligalski M., Mitkowski P. (eds), Springer, Cham (Szwajcaria), 2017, 319-337.

DOI: 10.1007/978-3-319-73978-6_22

Wkład habilitanta obejmuje: opracowanie i walidację metodologii badań i eksperymentów, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, opracowanie i przetworzenie danych, opracowanie matematyczne i statystyczne danych wyjściowych tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

9.3. Prace w czasopismach nieindeksowanych w JCR

[P1] Kowalski S.J., Łechtańska J., **Mierzwa D.**

Aspekt jakościowy suszenia hybrydowego owoców wiśni

Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2013, 52 (5), 439-440

Wkład habilitanta obejmuje: tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach.

[P2] Konopacka D., Płocharki W., Siucińska K., Kowalski S.J., **Mierzwa, D.**

Wykorzystanie ultradźwięków jako techniki wspomaganie procesu suszenia owoców i warzyw

Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny, 2015, 9, 27-31

DOI: 10.15199/64.2015.9.3

Wkład habilitanta obejmuje: tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach.

[P3] Konopacka D., Płocharki W., Siucińska K., **Mierzwa, D.**, Kowalski S.J.

Możliwe efekty oddziaływania ultradźwięków na jakość odwadnianych owoców i warzyw

Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny, 2015, 10, 18-21

DOI: 10.15199/64.2015.10.3

Wkład habilitanta obejmuje: tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach.

9.4. Patenty

[PAT1] Gawalek A., Gawalek J., Kołda K., Kosicki S., Kowalski S.J.,
Mierzwa D., Musielak, G. Pawłowski A.

**Patent P.235294 Sposób i Urządzenie do Obróbki
Zamrożonych Surowców Owocowo-Warzywnych**

rok zgłoszenia 2016, rok uzyskania prawa ochronnego 2020

Wkład habilitanta obejmuje: co, tworzenie tekstu oryginalnego, potwierdzanie hipotez, wyciąganie wniosków, redakcję i rewizję tekstu oryginalnego oraz po recenzjach, wizualizację danych wyjściowych (tworzenie wykresów, tabel, rysunków, schematów).

9.5. Opis pozostałej działalności naukowej po doktoracie

Po uzyskaniu tytułu doktora, moje zainteresowania badawcze koncentrowały się na:

- zastosowaniu ultradźwięków jako czynnika intensyfikującego wybrane operacje jednostkowe takie jak **suszenie, odwadnianie osmotyczne czy nasycanie próżniowe** (prace wymienione w pkt. 5 autoreferatu, prace [P2], [P3], [IF1], [IF4], [IF6], [R1]),
- zastosowaniu promieniowania elektromagnetycznego (**mikrofalowego, podczerwonego**) w hybrydowych procesach suszenia (prace [IF2], [IF3], [IF4], [IF7], [IF9], [R2], [R1], [P1], [H6]),
- zastosowaniu niestacjonarnych – **okresowo zmiennych warunków** prowadzenia procesu w celu poprawy jakości uzyskiwanych produktów (prace [R2], [IF3], [IF4], [IF8]),
- wykorzystaniu **metod numerycznych** w celu opisu kinetyki i wybranych parametrów procesowych (prace [H5], [IF1], [IF5]).

Prace [P2] i [P3] stanowią przegląd literaturowy nt. suszenia warzyw i owoców wspomaganego ultradźwiękami oraz wpływu tych fal mechanicznych na parametry jakościowe otrzymywanych produktów. Mój wkład w prace polegał na zebraniu i usystematyzowaniu literatury, analizie danych, formułowaniu wniosków. Prace te powstały w ramach projektu BIOSUSZ i stanowiły punkt wyjścia do dalszych badań nad procesem suszenia wspomaganym ultradźwiękami. Zebrano w nich podstawowe informacje na temat możliwych mechanizmów oddziaływania ultradźwięków z materiałem badanym i ich wpływu na kinetykę procesu suszenia. Na tym etapie większość z przedstawionych mechanizmów miała charakter hipotetyczny i wymagała potwierdzenia.

W pracy [IF1] przedstawiono badania nad wpływem ultradźwięków na kinetykę procesu suszenia konwekcyjnego tkanki jabłka (odmiana Ligol) oraz jej strukturę po bezpośrednim oddziaływaniu falami ultradźwiękowymi o częstotliwości 21 kHz i mocy 100/200 W. Oprócz badań eksperymentalnych zaprezentowano rozbudowaną analizę numeryczną obejmującą zarówno kinetykę suszenia jak i efekty wywołane ultradźwiękami w materiale – ocena udziału efektu cieplnego i wibracyjnego. Mój udział polegał na przeprowadzeniu badań doświadczalnych oraz oceny wpływu ultradźwięków na strukturę materiału poddanego nadźwiękawianiu. Otrzymane wyniki wykazały, że zastosowanie ultradźwięków w trakcie suszenia konwekcyjnego znacząco przyspieszyło proces przy niewielkim wzroście temperatury materiału suszonego (mały efekt cieplny). Czas suszenia uległ skróceniu z 235 minut dla

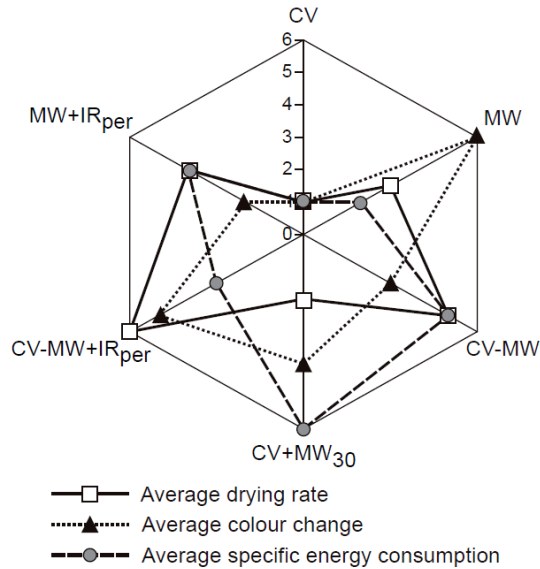
konwekcji wymuszonej do 185 min dla konwekcji wspomaganej ultradźwiękami o mocy 100 W i 145 min dla procesu wspomaganego ultradźwiękami o mocy 200 W. Analiza numeryczna wykazała, że głównym czynnikiem intensyfikującym wymianę masy i ciepła jest efekt wibracyjny. Efekt cieplny, chociaż widoczny, nie odgrywa tak istotnego wpływu na kinetykę procesu. W trakcie badań zaobserwowano również zmiany strukturalne w tkance jabłka. Zmiany te potwierdzają mechanizmy oddziaływania związane z efektem wibracyjnym, m.in. efekt gąbki.

Po uzyskaniu tytułu doktora, kontynuowałem również swoje badania nad procesami suszenia hybrydowego warzyw i owoców. Głównym punktem zainteresowania był wpływ dodatkowych źródeł energii takich jak mikrofałe czy promieniowanie IR na kinetykę i energochłonność procesu suszenia oraz jakość otrzymanych produktów.

Zastosowanie promieniowania mikrofalowego miało na celu zwiększenie szybkości procesu, szczególnie w *drugim okresie suszenia* – o zmniejszającej się szybkości suszenia. Jak powszechnie wiadomo, o tempie procesu w tym okresie decydują czynniki oporów wewnętrznych, a przede wszystkim szybkość dyfuzji wilgoci od wilgotnego rdzenia materiału do jego powierzchni lub tzw. frontu odparowania. Im mniejsza zawartość wilgoci, tym wolniejsza dyfuzja i dłuższy czas procesu. Transport ten można jednak przyspieszyć podnosząc temperaturę lub odparowując wilgoć z wnętrza materiału. Nie można tego jednak osiągnąć w warunkach konwekcji wymuszonej, w której ciepło dostarczane jest od powierzchni ciała suszonego, a gradient temperatury jest skierowany przeciwnie do gradientu wilgotności. W takim przypadku, bardzo dobrze sprawdza się promieniowanie mikrofalowe, które uznawane jest za objętościowe źródło ciepła. Fale elektromagnetyczne, penetrując wilgotne ciało suszone, oddziałują z dipolami wody i powodują silne nagrzewanie ciała w całej jego objętości. Wilgoć odparowuje nie tylko z powierzchni, ale także w jego wnętrzu. Ponieważ dyfuzja pary jest znacznie łatwiejsza niż dyfuzja cieczy, transport wilgoci jest bardziej wydajny, a suszenie szybsze. Dodatkowo wzrost ciśnienia wewnątrz materiału, wywołany wytwarzaniem pary wodnej, może również doprowadzić do wypchnięcia nieodparowanej wilgoci na powierzchnię – tzw. *przepływu tłokowego*, co dodatkowo przyspiesza proces suszenia. Wilgoć znajdująca się na powierzchni ciała suszonego odparowuje w wyniku kontaktu z gorącym czynnikiem suszącym. Proces ten można jednak przyspieszyć dostarczając do powierzchni dodatkową energię. Takim źródłem może być promieniowanie podczerwone, które jest bardzo efektywnym źródłem ciepła i może być dostarczone do materiału niemal bez strat. Dzięki temu możliwe jest przyspieszenie odparowywania wilgoci z powierzchni oraz maksymalne skrócenie czasu suszenia.

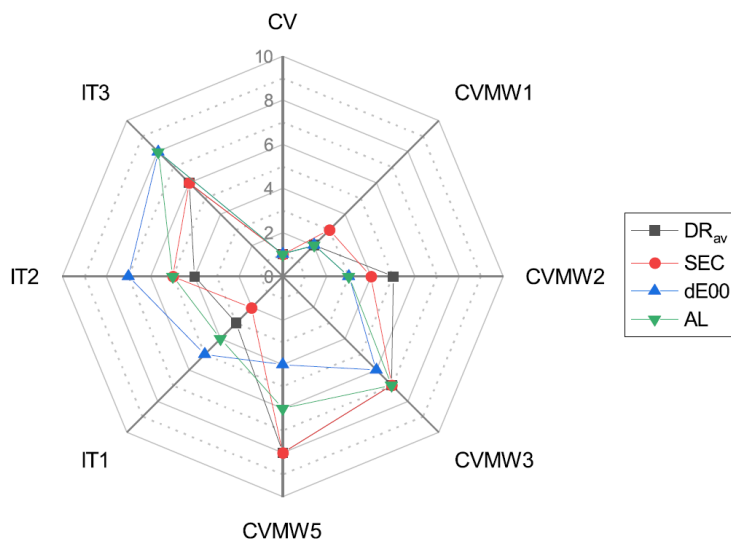
W pracach: [P1], [IF2], [IF3], oraz [IF7] przedstawiono wyniki badań nad procesem suszenia konwekcyjnego wspomaganego promieniowaniem mikrofalowym (częstotliwość 2,45 GHz, zmienna moc) i podczerwonym (NIR, długość fali 0,6-2,5 μm , moc 100/250 W), następujących surowców: owoców wiśni, bulw ziemniaka, liści jarmużu oraz pieczarek. Mój wkład polegał na przeprowadzeniu badań doświadczalnych, opracowaniu oraz analizie otrzymanych wyników, analizie numerycznej i formalnej, współredagowaniu wniosków, i treści manuskryptu.

Na rysunkach 20 oraz 21 przedstawiono wykresy obrazujące wpływ poszczególnych metod suszenia na oceniane parametry. Dla każdego z parametrów tworzono listę rankingową procesów, od najgorszego do najlepszego, której następnie przydzielano skalę punktową od najmniejszej do największej wartości. Wykresy stanowią graficzną prezentację tej listy. Im bliżej środka tym gorsza nota danego parametru.



Rysunek 20 Porównanie wybranych parametrów dla poszczególnych procesów suszenia ziemniaka [IF2]

CV – konwekcja wymuszona, MW – suszenie mikrofalowe, CV+MW₃₀ – suszenie konwekcyjne wspomagane mikrofalami przez 30 min, CV-MW+IR_{per} – suszenie konwekcyjno-mikrofalowe wspomagane okresowo promieniowaniem IR, MW+IR_{per} – suszenie mikrofalowe wspomagane okresowo promieniowaniem IR



Rysunek 21 Porównanie wybranych parametrów dla poszczególnych procesów suszenia liści jarmużu [IF3]

CV – suszenie konwekcyjne, CVMW – suszenie konwekcyjno-mikrofalowe, IT – suszenie w okresowo zmiennych warunkach, DR_{av} – średnia szybkość suszenia, SEC – jednostkowe zużycie energii, dE00 – współczynnik zmiany barwy, AL – utrata kwasu askorbinowego

W przypadku obydwu serii badawczych widać wyraźnie, że procesy suszenia hybrydowego – stanowiące połączenie konwekcji wymuszonej z mikrofalami i promieniowaniem IR, charakteryzowały się lepszymi parametrami kinetycznymi, wyższą jakością produktów oraz niższym jednostkowym zużyciem energii. Oczywiście jest, że procesy różniły się między sobą i korzyści nie zawsze były bardzo znaczące, jednak w większości przypadków pozytywny efekt wzmocnienia jest bardzo wyraźny.

W tabeli 13 przedstawiono wyniki parametrów kinetycznych oraz wartość efektywnego współczynnika dyfuzji dla suszonej hybrydowo pieczarki [IF7].

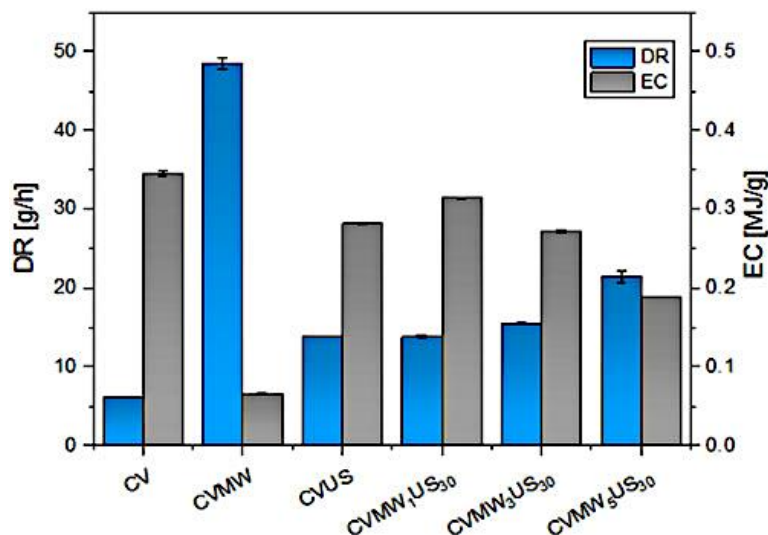
Tabela 13 Wartości całkowitego czasu suszenia (DT), średniej szybkości suszenia (DR_{ave}), efektywnego współczynnika dyfuzji (D_{eff}) i jednostkowego zużycia energii (SEC) dla poszczególnych procesów suszenia pieczarki [IF7]

| proces | DT (min) | DR_{ave} (g/min) | D_{eff} (m^2/s) | SEC (MJ/kg) |
|------------|---------------|-----------------------|------------------------------|------------------|
| CV30 | 681±8 | 0,05±0,01 | $(2,78±0,04) \cdot 10^{-10}$ | 120,81±1,39 |
| CV50 | 241±11 | 0,15±0,03 | $(9,63±0,50) \cdot 10^{-10}$ | 139,56±2,36 |
| CV30+MW100 | 71±3 | 0,52±0,02 | $(3,73±0,18) \cdot 10^{-9}$ | 47,30±1,99 |
| CV30+MW200 | 42±1 | 0,86±0,01 | $(6,57±0,36) \cdot 10^{-9}$ | 32,62±0,77 |
| CV50+MW100 | 47±2 | 0,78±0,03 | $(5,24±0,38) \cdot 10^{-9}$ | 44,09±1,87 |
| CV50+MW200 | 27±1 | 1,36±0,02 | $(8,50±0,62) \cdot 10^{-9}$ | 34,66±1,28 |

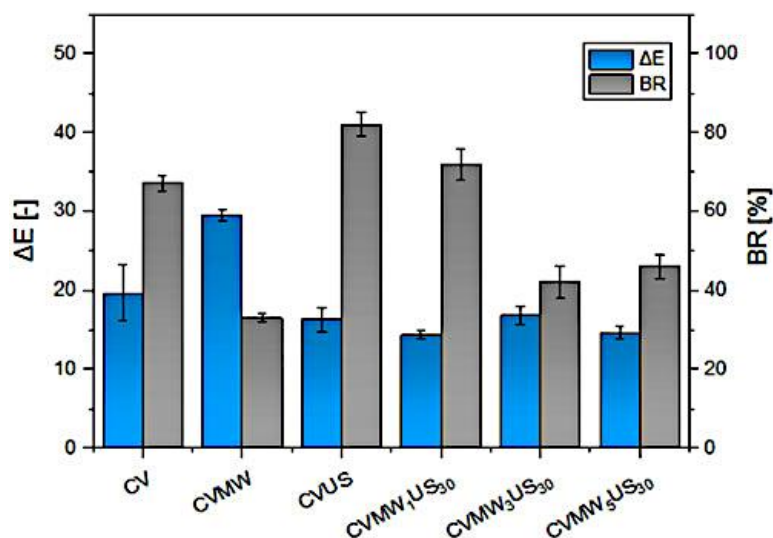
średnia ± odchylenie standardowe, CV – konwekcja wymuszona, MW – mikrofalowe

Otrzymane wyniki jednoznacznie wskazują na pozytywny wpływ promieniowania mikrofalowego na wszystkie oceniane parametry. Procesy hybrydowe charakteryzowały się wyższą średnią szybkością suszenia, co przełożyło się na krótsze czasy suszenia oraz niższe zużycie energii. Wartości współczynnika dyfuzji potwierdzają te obserwacje. Najwyższą wartość tego parametru zaobserwowano dla procesów hybrydowych. Co ważne, prowadzenie procesów hybrydowych pozwoliło na poprawienie kinetyki przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości otrzymanych produktów.

W pracy [IF4] analizie poddano proces suszenia konwekcyjnego buraka czerwonego w warunkach stacjonarnych (konwekcja CV, konwekcja wspomagana ultradźwiękami CVUS, konwekcja wspomagana mikrofalami CVMW) jak i okresowo zmiennych (konwekcja wspomagana okresowo mikrofalami i ultradźwiękami CVMWUS). Mój wkład polegał na przeprowadzeniu badań doświadczalnych, opracowaniu oraz analizie otrzymanych wyników, analizie numerycznej i formalnej, współredagowaniu wniosków, i treści manuskryptu. Otrzymane wyniki wykazały, że procesy hybrydowe są bardziej efektywne pod kątem kinetyki i energochłonności procesu jak i jakości uzyskanych produktów. Stacjonarne i niestacjonarne procesy hybrydowe (wspomagane mikrofalami i ultradźwiękami) charakteryzowały się wyższymi średnimi prędkościami suszenia, niższym jednostkowym zużyciem energii (rysunek 22) i korzystniejszymi wartościami ocenianych parametrów jakościowych np. zmiany barwy czy zawartości betaniny po procesie suszenia (rysunek 23). Kluczowym okazał się jednak sposób łączenia poszczególnych technik i zastosowanie dodatkowego wzmocnienia (mikrofalowego i/lub ultradźwiękowego) w nieodpowiednim momencie lub przez zbyt długo okres czasu prowadził do pogorszenia efektywności suszenia.



Rysunek 22 Średnia szybkość suszenia DR oraz jednostkowe zużycie energii EC w poszczególnych procesach suszenia korzenia buraka czerwonego [IF4]
średnia ± odchylenie standardowe



Rysunek 23 Współczynnik zmiany barwy ΔE oraz średnia retencja betaniny BR w próbkach buraka czerwonego poddanego suszeniu [IF4]
średnia ± odchylenie standardowe

Stwierdzono również, że zastosowanie ultradźwięków (21 kHz, moc nastawna 200 W) intensyfikuje transport wilgoci wewnątrz materiału. Współczynnik dyfuzji dla procesu wspomaganego ultradźwiękami (CVUS) jest o ok. 60% wyższy w porównaniu do procesu czysto konwekcyjnego. Zastosowanie ultradźwięków w procesach niestacjonarnych, w których na przemian stosowano wspomaganie mikrofalowe oraz ultradźwiękowe, również przyczyniło się do wzrostu wartości współczynnika dyfuzji. Były one niższe niż dla procesu, w którym mikrofały działały w sposób ciągły (CVMW), jednak wyraźnie wyższe niż dla procesu konwekcyjno-ultradźwiękowego (CVUS) czy też samej konwekcji (CV).

Tabela 14 Wartość współczynnika dyfuzji w buraku suszonym w różnych warunkach [IF4]

| proces | D_{eff} (m^2/s) | zmiana względna (-) |
|--|--|---------------------|
| CV | $3,42 \cdot 10^{-9} \pm 1,17 \cdot 10^{-10}$ | – |
| CVUS | $5,49 \cdot 10^{-9} \pm 3,43 \cdot 10^{-10}$ | 60,5% |
| CVMW | $1,59 \cdot 10^{-8} \pm 2,20 \cdot 10^{-9}$ | 364,91% |
| CVMW₁US₃₀ | $5,64 \cdot 10^{-9} \pm 3,77 \cdot 10^{-10}$ | 64,9% |
| CVMW₃US₃₀ | $6,20 \cdot 10^{-9} \pm 3,52 \cdot 10^{-10}$ | 81,3% |
| CVMW₅US₃₀ | $7,19 \cdot 10^{-9} \pm 5,13 \cdot 10^{-10}$ | 110,2% |

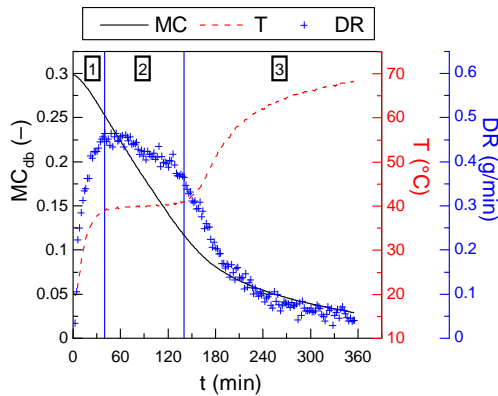
Średnia \pm błąd standardowy, CV – konwekcja wymuszona, CVMW – konwekcja wymuszona wspomagana mikrofalami, CVUS – konwekcja wymuszona wspomagana ultradźwiękami, CVMWUS – konwekcja wymuszona wspomagana okresowo mikrofalami i ultradźwiękami

Swoje badania nad procesem suszenia hybrydowego materiałów pochodzenia roślinnego zebrałem w dwóch rozdziałach [R1] i [R2], opublikowanych w wieloautorskich monografiach naukowych. Prace te przedstawiają syntetyczny wyciąg z prowadzonych przeze mnie badań. Przedstawione rezultaty dowodzą jednoznacznie, że właściwie opracowana hybrydowa technika suszenia pozwala na znaczne zredukowanie czasu procesu, zmniejszenie zużycia energii oraz zachowanie wysokiej jakości produktu. Wyniki badań dowodzą również, że niewłaściwie dobrane źródła energii lub połączone w niepoprawnej sekwencji, mogą prowadzić zarówno do zwiększenia zużycia energii jaki i znacznego pogorszenia jakości materiału suszonego. W skrajnych przypadkach, otrzymywano produkty całkowicie nieprzydatne pod względem jakościowym, stanowiące odpad.

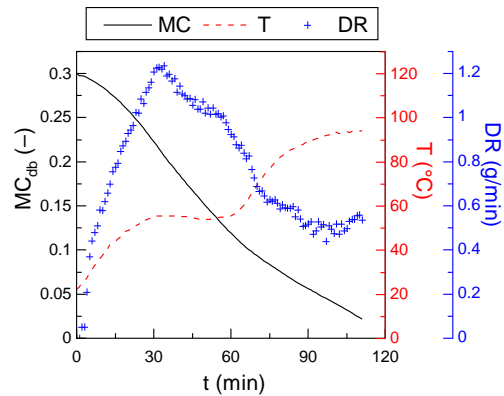
W swoim dorobku naukowym, posiadam również prace dotyczące suszenia hybrydowego innej grupy surowców – materiałów konstrukcyjnych. W pracy [IF9] zaproponowałem nowatorski sposób suszenia glinki kaolinowej za pomocą gorącego powietrza (konwekcji wymuszonej), mikrofal oraz promieniowania podczerwonego. Mój wkład w pracę polegał na opracowaniu koncepcji badawczych, metodologii oraz hipotez badawczych, przeprowadzeniu badań doświadczalnych, opracowaniu i analizie wyników, wyciągnięciu wniosków, i redakcji manuskryptu.

Glinka kaolinowa, w odróżnieniu od produktów spożywczych, charakteryzuje się klasyczną kinetyką suszenia, w której występują wszystkie charakterystyczne okresy suszenia: podgrzewanie, okres stałej i zmniejszającej się szybkości suszenia. Z tego powodu zastosowanie dodatkowych źródeł energii spowodowało znaczące efekty. Średnia szybkość suszenia w procesach hybrydowych była zdecydowanie wyższa niż w procesie czysto-konwekcyjnym. Doprowadziło to do znacznego skrócenia czasu suszenia i zmniejszenia energochłonności procesów hybrydowych. Na rysunku 24 zaprezentowano przykładowe krzywe kinetyki suszenia konwekcyjnego oraz konwekcyjno-mikrofalowego. Zastosowanie mikrofal w trakcie suszenia konwekcyjnego glinki kaolinowej spowodowało około trzykrotny wzrost szybkości suszenia, co przełożyło się na skrócenie czasu suszenia o ok. 33% w porównaniu do suszenia konwekcyjnego. Korzyści wynikające z zastosowania mikrofal przełożyły się również na redukcję energochłonności procesu.

a)



b)



Rysunek 24 Krzywe wilgotności MC, szybkości suszenia DR oraz temperatury T dla suszenia konwekcyjnego (a) i konwekcyjno-mikrofalowego (b) glinki kaolinowej [IF9]

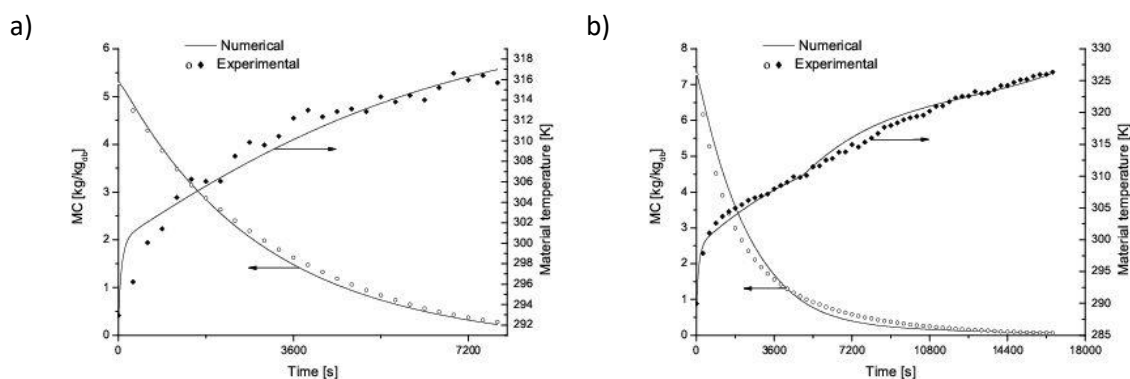
Drugi obszar badawczy będący przedmiotem mojego zainteresowania dotyczył procesu nasycania próżniowego tkanki roślinnej. Proces ten zainteresował mnie ze względu na możliwość zastosowania ultradźwięków w celu jego intensyfikacji. W trakcie studiów literaturowych stwierdziłem pewną lukę badawczą nad nasycaniem materiałów o niskiej porowatości lub zwartej, nieporowatej skórce (owoce jagodowe). Postanowiłem zatem zgłębić ten temat przed podjęciem prób nasycania ze wspomaganie ultradźwiękowym.

Prace [IF6] oraz [IF8] dotyczą procesu nasycania próżniowego surowców o niskiej porowatości (ziemniak) oraz nieprzepuszczalnej, nieporowatej skórce (żurawina). Mój wkład w te prace polegał na opracowaniu koncepcji badawczych, metodologii oraz hipotez badawczych, przeprowadzeniu badań doświadczalnych, opracowaniu i analizie wyników, wyciągnięciu wniosków i redakcji manuskryptów.

Przeprowadzone badania potwierdziły, że zarówno niska porowatość [IF6] jak i obecność nieporowatej, zwartej skórki [IF8] utrudniają proces nasycania. W przypadku bulwy ziemniaka [IF6], nasycanie pod ciśnieniem 300 mbar powoduje wzrost zawartości składnika aktywnego do około 15 mg/100 g masy surowca. Zastosowanie ultradźwięków, spowodowało intensyfikację wymiany masy i zawartość witaminy C wzrosła do 20 mg/100 g masy surowca. Co istotne, wysoka zawartość kwasu askorbinowego utrzymywała się w produkcie również po procesie utrwalania – suszeniu konwekcyjnym. W przypadku żurawiny [IF8], analizie poddano 4 strategie mające na celu intensyfikację procesu nasycania: obróbkę termiczną, zmianę czasu nasycania, zmianę podciśnienia, rozdrobnienie próbki. Stwierdzono, że najlepsze efekty wysycenia tkanki kwasem askorbinowym otrzymuje się po rozdrobnieniu owocu (przekrojeniu na pół), najmniejszy efekt przyniosło nasycanie całych owoców po obróbce cieplnej prowadzonej przez długi okres czasu. Potwierdzono również, że wartość podciśnienia ma kluczowy wpływ na efektywność nasycania. Przekrojone na pół próbki, nasycaly się zdecydowanie lepiej w przypadku, gdy wartość ciśnienia w komorze była niższa. W pracy przedstawiono również szczegółową analizę wpływu impregnacji próżniowej na wybrane parametry jakościowe żurawiny takie jak: zawartość związków polifenolowych i antocyjanów, twardość, pH, zawartość substancji stałej, potencjał przeciwutleniający. Przedstawiono również szczegółową analizę struktury owocu (przed i po nasycaniu) opartą o obrazy mikrotomografii komputerowej.

Praca [IF5] dotyczy nowatorskiej metody wyznaczania współczynników fenomenologicznych – wymiany ciepła i masy dla procesów suszenia. Mój wkład w tę pracę polegał na przeprowadzeniu badań doświadczalnych, opracowaniu i analizie wyników, wyciągnięciu wniosków i redakcji manuskryptów.

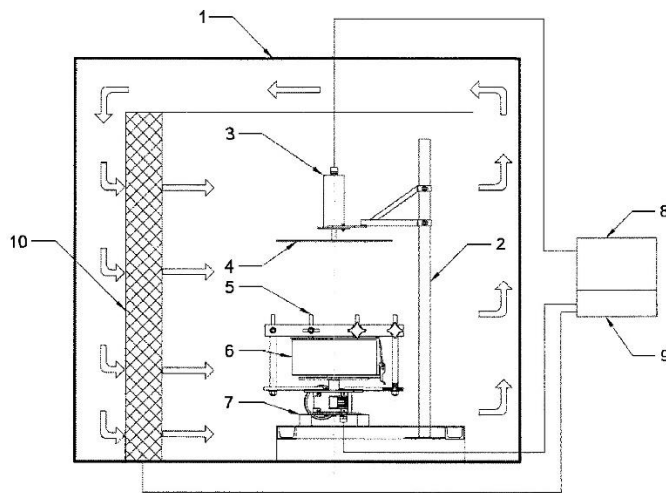
Przedstawiona metoda polegała na dopasowywaniu kinetyki suszenia otrzymanej na drodze eksperymentalnej z kinetyką wynikającą z modelu matematycznego. Zarówno współczynniki przenikania ciepła, jak i masy, krytyczna wilgotność względna oraz dodatkowe źródło energii ultradźwiękowej (ciepła), były objęte procedurą optymalizacji. Zastosowano wieloetapową metodę Adamsa-Bashfortha w celu rozwiązywania nieliniowych równań różniczkowych zwyczajnych. Optymalizację przeprowadzono metodą zagadnienia odwrotnego Rosenbrocka. Zaproponowaną metodologię analizy numerycznej poddano walidacji na danych eksperymentalnych z suszenia konwekcyjnego wspomaganego ultradźwiękami owoców jabłka oraz korzenia marchwi. Wysoki stopień zgodności wyników uzyskanych eksperymentalnie i numerycznie potwierdził poprawność postulowanej metody. Uzyskane wyniki potwierdziły również duży wpływ ultradźwięków na kinetykę suszenia. Stwierdzono, że zastosowanie ultradźwięków poprawiło wymianę masy o 20-80% i wymianę ciepła o 30–90% w porównaniu do suszenia czysto-konwekcyjnego. Stwierdzono również, że efekt nagrzewania powierzchni próbki, wywołany absorpcją ultradźwięków jest znikomy, tj. o wartości poniżej 1%.



Rysunek 25 Kinetyka suszenia konwekcyjnego wspomaganego ultradźwiękami: w temperaturze 40°C (a) oraz 50°C (b)

W swoim dorobku posiadam również jeden patent pt. „Sposób i urządzenie do obróbki zamrożonych surowców owocowo-warzywnych” (Pat. 235294) [PAT1], zgłoszony i otrzymany przez zespół Politechniki Poznańskiej oraz firmę Celiko sp. z o.o. z Poznania. Patent powstał w ramach projektu BIOSUSZ i dotyczył opracowania rozwiązania technologicznego umożliwiającego obróbkę ultradźwiękową surowca w stanie zamrożonym. Podstawowym zadaniem ultradźwięków było w tym przypadku naruszenie struktury owoców/warzyw, co miało ułatwić późniejsze operacje przetwórcze, np. liofilizację. Jest to szczególnie pożądane w przypadku owoców miękkich, np. jagodowych takich jak borówka czy też żurawiny, których zwarta i nieporowata skórka właściwie uniemożliwia przetwarzanie bez wcześniejszego rozdrobnienia owocu. Taka obróbka wstępna owocu prowadzi z kolei do niekorzystnych zmian jakościowych, np. reakcji utleniania się związków bioaktywnych. W trakcie badań laboratoryjnych dowiedziono także, że działanie ultradźwięków nie tylko pozwoliło na modyfikację struktury surowca, w wyniku której skróceniu uległ czas kolejnych procesów przetwórczych (np. liofilizacji). Ujawniano również sanizacyjny charakter działania ultradźwięków – zmniejszenie ilości

drobnoustrojów chorobotwórczych na owocach. Jest to niezwykle wartościowa cecha procesu, pozwalająca na stabilizację produktów trudnych do sanityzacji innymi metodami (maliny, truskawki). Schemat urządzenia przedstawiono na rysunku 26.



Rysunek 26 Urządzenie do obróbki ultradźwiękowej surowca owocowego i warzywnego w stanie zamrożonym [PAT1]

.....
Podpis wnioskodawcy