

Wydział Technologii Chemicznej
Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej



Praca doktorska

Ultradźwiękowe wspomaganie procesów suszenia żywności

autor: mgr inż. Joanna Karolina Kroehnke

promotor: prof. dr hab. inż. Grzegorz Musielak

promotor pomocniczy: dr hab. inż. Elżbieta Radziejewska-Kubzdela

Poznań 2022

Serdeczne podziękowania
składam mojemu Promotorowi,
prof. dr hab. inż. Grzegorzowi Musielakowi,
za doskonałą współpracę, a także pomoc
i wsparcie przy tworzeniu niniejszej pracy.

Równie serdeczne podziękowania kieruję do
pani dr hab. inż. Elżbiety Radziejewskiej-
Kubzdeli, za niesamowitą cierpliwość,
cenne wskazówki i wyrozumiałość.

Niniejszą pracę dedykuję mojemu Mężowi

„Z pomocą magii można zmienić
żabę w księcia. Z pomocą nauki
można zmienić żabę w doktora nauk,
ale ów doktor nauk wciąż pozostaje
tą samą żabą, od której zaczęliśmy.”

Terry Pratchett

Streszczenie

W niniejszej pracy zbadano wpływ zastosowania ultradźwięków na kinetykę suszenia konwekcyjnego w zakresie temperatury 45 – 60 [°C] i szybkości przepływu czynnika suszącego $2 - 4 \left[\frac{m}{s} \right]$. Zbadano także wpływ zastosowania ultradźwięków na kinetykę suszenia konwekcyjno-mikrofalowego (w zakresie mocy mikrofal 100 – 200W) oraz jakość uzyskanego produktu. Jako materiał badawczy wykorzystano owoce i warzywa takie jak owoce jabłoni odmian 'Lobo', 'Ligol' i 'Rubin', ziemniaka odmiany 'Denar', marchew zwyczajną, buraka ćwikłowego, jagody kiwi i dyni zwyczajnej.

W badaniach kinetycznych analizowano wpływ zastosowanej mocy ultradźwięków (50 – 200 W) na czas suszenia. Analizie poddano także całkowite zużycie energii podczas procesu. Badania jakościowe prowadzone były w zakresie całkowitej zmiany barwy ΔE w systemie barw CIELab, aktywności wody a_w oraz analizy zawartości składników bioaktywnych, charakterystycznych dla wybranego materiału biologicznego, takich jak karotenoidy, fenole. Zanalizowano również wpływ obróbki osmotycznej klasycznej oraz wspomagananej ultradźwiękami na kinetykę suszenia oraz jakość produktu. Badania osmotyczne przeprowadzono dla roztworów w układzie pojedynczym (sorbitol, erytrytol, sacharoza) i binarnym (sorbitol/chlorek sodu oraz sacharoza/chlorek sodu). Testowano wpływ substancji osmotycznie czynnej oraz jej stężenia (w roztworze binarnym o udziale składników w stosunkach 30/5 i 60/5 % w/w) na kinetykę procesu oraz jakość produktu.

Zastosowanie ultradźwięków w procesie odwadniania osmotycznego daje dobre rezultaty kinetyczne, pozwalając na większą redukcję wilgoci w stosunku do osmozy klasycznej, oraz wpływa w różnym stopniu na cechy jakościowe produktu, np. skutkuje zmniejszeniem zawartość karotenoidów i fenoli.

Zastosowanie ultradźwięków w suszeniu konwekcyjnym skraca czas suszenia, proporcjonalnie do zadanej mocy ultradźwięków, tym samym przyczyniając się do zmniejszenia zapotrzebowania energetycznego procesu. Wpływ ultradźwięków wykorzystanych w procesie suszenia konwekcyjnego jest pozytywny w stosunku do jakości uzyskanego suszu, we wszystkich zbadanych w niniejszej pracy aspektach, tj. aktywności wody, całkowitej zmianie barwy oraz retencji związków o potencjale bioaktywnym, a intensywność zmian w odniesieniu do suszenia konwekcyjnego zależy od zadanej mocy ultradźwięków. Zastosowanie mikrofal w suszeniu konwekcyjnym oraz konwekcyjno-ultradźwiękowym wpływa pozytywnie na redukcję czasu suszenia, natomiast ma negatywny wpływ na końcową zawartość związków o potencjale bioaktywnym w suszu. Odnotowano także wpływ właściwości biofizycznych materiału w odniesieniu do podatności na fale akustyczne. Stwierdzono, że podatność ta wynika z unikalnej budowy mikrostruktury materiału.

Uzyskane wyniki pozwalają zakwalifikować odwadnianie/suszenie wspomagane ultradźwiękami jako obiecującą technikę suszenia, mogącą sprawdzić się w produkcji żywności, przyczyniając się do uzyskania zarówno korzyści ekonomicznych, jak i poprawy właściwości prozdrowotnych materiału.

Abstract

In this study, the impact of the use of ultrasound on the kinetics of convection drying in the temperature range 45-60 [° C] and the drying agent flow rate 2-4 [m / s] was investigated. The influence of the use of ultrasounds on the kinetics of convection-microwave drying (in the microwave power range 100-200W) and the quality of the obtained product were also investigated. The research material used were fruits and vegetables such as apple fruit of the 'Lobo', 'Ligol' and 'Rubin' varieties, potato of the 'Denar' variety, carrot, beetroot, kiwi berries and pumpkin.

In the kinetic tests, the influence of the applied ultrasound power (50-200 W) on the drying time was analyzed. The total energy consumption during the process was also analyzed. Qualitative research was carried out in terms of the total color change ΔE in the CIELab color system, water activity a_w and the analysis of the content of bioactive ingredients characteristic for the selected biological material, such as carotenoids and phenols. The influence of classical osmotic and ultrasound-assisted osmotic treatment on the drying kinetics and product quality was also analyzed. Osmotic tests were carried out for solutions in a single (sorbitol, erythritol, sucrose) and binary (sorbitol / sodium chloride and sucrose / sodium chloride) system. The influence of the osmotically active substance and its concentration (in a binary solution with the proportion of components in the ratios of 30/5 and 60/5% w / w) on the kinetics of the process and the quality of the product were tested.

The use of ultrasound in the osmotic dehydration process gives good kinetic results, allowing for a greater reduction of moisture compared to classical osmosis, and affects the quality of the product to a different extent, e.g. it reduces the content of carotenoids and phenols.

The use of ultrasound in convection drying shortens the drying time, in proportion to the preset ultrasound power, thus contributing to the reduction of the energy demand of the process. The effect of ultrasound used in the convection drying process is positive in relation to the quality of the obtained product, in all aspects examined in this paper, i.e. water activity, complete color change and phytochemical retention, and the intensity of changes in relation to convection drying depends on the preset ultrasound power. The use of microwaves in convection and convection-ultrasonic drying has a positive effect on the reduction of drying time, while it has a negative impact on the final content of selected bioactive compounds in the dried material. The influence of the biophysical properties of the material with regard to susceptibility to acoustic waves was also noted. It was found that this compliance is due to the unique structure of the microstructure of the material. The obtained results allow to classify ultrasound-assisted dehydration / drying as a promising drying technique that can prove useful in food production, contributing to obtaining economic benefits and improving the health-promoting properties of the material.

Spis treści

Streszczenie	5
Abstract	6
Wstęp	11
Część teoretyczna	12
1. Spis oznaczeń.....	12
2. Suszenie	15
2.1. Opis procesu usuwania wody	15
2.2. Suszenie konwekcyjne	17
2.2.1. Parametry charakteryzujące suszenie konwekcyjne	18
2.2.2. Rozwiązania techniczne w suszeniu konwekcyjnym	20
2.3. Suszenie z wykorzystaniem mikrofal	21
2.3.1. Parametry charakteryzujące suszenie mikrofalowe.....	23
2.3.2. Technologia suszenia mikrofalowego	25
2.3.3. Wpływ zastosowania mikrofal na suszenie materiałów pochodzenia roślinnego	26
2.4. Suszenie z wykorzystaniem ultradźwięków	29
2.5. Zastosowanie ultradźwięków w obróbce wstępnej	31
2.5.1. Parametry charakteryzujące odwadnianie osmotyczne i suszenie wspomagane ultradźwiękami	32
2.5.2. Mechanizm oddziaływania ultradźwięków na materiał suszony	34
2.5.3. Technologia suszenia z wykorzystaniem ultradźwięków	36
2.5.4. Wpływ ultradźwięków na materiał biologiczny.....	40
2.5.5. Wpływ zastosowania ultradźwięków na charakterystykę suszenia a także fizyczne i chemiczne właściwości materiału pochodzenia roślinnego.....	41
2.5.6. Techniki suszenia ze wspomaganie ultradźwiękowym	47
3. Efektywność suszenia	48
3.1. Jakość produktu.....	48
3.1.1. Zmiana barwy	48
3.1.2. Aktywność wody.....	50
3.1.3. Związki o potencjale bioaktywnym	52
3.1.4. Zdolność antyoksydacyjna naturalnych przeciwutleniaczy	58
3.1.5. Rehydratacja.....	58
3.2. Energochłonność procesu	59
4. Modelowanie procesu suszenia	60
5. Charakterystyka materiału badawczego	62
5.1. Surowce roślinne wykorzystane w badaniach wstępnych	62

5.1.1.	Owoc jabłoni.....	62
5.1.1.1.	Odmiana 'Lobo'	64
5.1.1.2.	Odmiana 'Ligol'	65
5.1.1.3.	Odmiana 'Rubin'	66
5.1.2.	Burak zwyczajny (ćwikłowy)	67
5.2.	Badania zasadnicze.....	70
5.2.1.	Ziemniak odmiany 'Denar'	70
5.2.2.	Marchew zwyczajna	73
5.2.3.	Owoc kiwi	74
5.2.4.	Dynia zwyczajna.....	75
	Cel i zakres pracy	77
	Część metodyczna	78
6.	Stanowisko badawcze	78
6.1.	Komora termiczna do obróbki osmotycznej	78
6.2.	Suszarka hybrydowa	79
7.	Metody pomiaru jakości produktu	80
7.1.1.	Zmiana barwy	80
7.1.2.	Aktywność wody.....	80
7.1.3.	Rehydratacja.....	80
7.1.4.	Obróbka osmotyczna.....	81
7.1.5.	Oznaczanie parametrów biochemicznych.....	81
7.1.5.1.	Związki fenolowe	81
7.1.5.2.	Karotenoidy	81
7.1.5.3.	Aktywność antyoksydacyjna.....	82
7.1.5.4.	Analiza statystyczna wyników	83
8.	Efektywność suszenia różnych odmian jabłek	84
8.1.	Kinetyka procesu	84
8.2.	Jakość produktu.....	87
8.2.1.	Aktywność wody.....	87
8.2.2.	Zmiana barwy	87
8.2.3.	Rehydratacja.....	90
8.2.4.	Energochłonność procesu	91
8.3.	Podsumowanie i wnioski	91
9.	Efektywność suszenia buraka ćwikłowego.....	93
9.1.	Kinetyka procesu	93
9.1.1.	Krzywe temperaturowe.....	94

9.2. Jakość produktu.....	95
9.2.1. Zmiana barwy	95
9.2.2. Aktywność wody.....	97
9.2.3. Zużycie energii	98
9.3. Podsumowanie i wnioski	99
10. Efektywność suszenia ziemniaka.....	100
10.1. Kinetyka procesu	100
10.2. Jakość produktu.....	102
10.2.3. Aktywność wody.....	102
10.2.4. Zmiana barwy	102
10.2.5. Rehydratacja.....	104
10.2.6. Energochłonność procesu	105
10.3. Podsumowanie i wnioski	106
11. Efektywność suszenia marchwi zwyczajnej.....	107
11.1. Kinetyka procesu	107
11.2. Jakość produktu.....	109
11.2.1. Aktywność wody.....	109
11.2.2. Zmiana barwy	110
11.2.3. Retencja składników fitochemicznych	112
11.2.3.1. Retencja karotenoidów	112
11.2.3.2. Zawartość związków fenolowych	113
11.2.3.3. Zdolność antyoksydacyjna.....	115
11.2.4. Energochłonność procesu	115
11.2.5. Modelowanie procesu.....	116
11.2.5.1. Walidacja kinetyki suszenia	116
11.2.5.2. Efektywność suszenia	118
11.3. Podsumowanie i wnioski	120
12. Efektywność suszenia kiwi po odwadnianiu osmotycznym	121
12.1. Kinetyka procesu	122
12.2.1. Kinetyka odwadniania osmotycznego.....	122
12.2.2 Kinetyka suszenia konwekcyjnego z/bez zastosowania ultradźwięków	125
12.2. Jakość produktu.....	127
12.2.1. Aktywność wody.....	127
12.2.2. Zmiana barwy	128
12.2.3. Retencja składników fitochemicznych	130
12.2.3.1. Retencja karotenoidów	130

12.2.3.2. Zawartość związków fenolowych	132
12.3. Podsumowanie i wnioski	133
13. Efektywność suszenia dyni zwyczajnej po odwadnianiu w roztworze binarnym	134
13.1. Kinetyka procesu	135
13.2. Jakość produktu.....	141
13.2.1. Aktywność wody.....	141
13.2.2. Zmiana barwy	141
13.2.3. Retencja składników bioaktywnych	144
13.2.3.1. Retencja karotenoidów	145
13.2.3.2. Retencja związków fenolowych.....	146
13.3. Podsumowanie i wnioski	148
Podsumowanie i wnioski	149
Wykaz dorobku naukowego	155
Literatura	157

Wstęp

Przechowywanie żywności, które pozwala na wyżywienie ludności, jest jednym z kluczowych zagadnień związanych z rozwojem cywilizacji. Było ono niezbędne już przy powstawaniu osiadłych cywilizacji, aby były niezależne od zewnętrznych dostaw pożywienia. Suszenie żywności, jak również zamrażanie, jest znane od niepamiętnych czasów. Procesy te stosowano, aby wydłużyć jej przydatność do spożycia [1]. Pozwalało to starożytnym ludom na przetrwanie okresów roku ubogich w pożywienie, takich jak zima i początek wiosny, jak również przechowywanie zdobytego już pożywienia przez dłuższy czas, co pozwoliło na wyżywienie rodzin po okresie zbiorów. Zamrażanie było jednak dostępne tylko w wybranych częściach globu, w których w sposób naturalny występowała niska temperatura. Suszenie natomiast było dostępne w każdej części świata ze względu na możliwość wykorzystania ciepła palenisk i słońca, bądź poprzez parowanie w temperaturze otoczenia. Rozwój przez wieki tych metod doprowadził do opracowania wielorakich technik i procesów, które w czasach obecnych są nadal usprawniane.

Badania procesu suszenia żywności koncentrują się na trzech zasadniczych aspektach: jakości produktu, względach ekonomicznych oraz kwestiach ochrony środowiska. Obecnie rynek kształtowany jest przez coraz bardziej świadomego konsumenta. Zagadnienie jakości produktów otrzymanych z surowców pochodzących z upraw polowych bądź sadowniczych jest coraz bardziej istotne, ze względu na silną konkurencję na rynku europejskim i światowym. Jakość handlowa, prozdrowotna, obok ceny i możliwości produkcji dużych partii produktu o jednolitych cechach, są bardzo ważnymi elementami tworzenia przewagi konkurencyjnej [2]. Stymuluje to rozwój nowych technologii, pozwalających uzyskać produkt z tzw. wartością dodaną, ukształtowaną np. poprzez podwyższoną zawartość związków o znaczeniu bioaktywnym.

Jednym z nowatorskich i rozwijanych w ostatnich latach rozwiązań technologicznych pozwalających na osiągnięcie wymienionych wyżej celów jest zastosowanie ultradźwięków do poprawy dynamiki procesu zarówno na etapie odwadniania osmotycznego, jak i suszenia [3]. Zastosowanie ultradźwięków, jako dodatkowego źródła energii może skutkować skróceniem czasu i obniżeniem temperatury procesu suszenia, a tym samym przyczynić się do poprawy jakości uzyskanego produktu i lepszej retencji związków o potencjale prozdrowotnym. Aplikacja ultradźwięków może być wykorzystana m.in. podczas suszenia prowadzonego metodą konwekcyjną czy konwekcyjno-mikrofalową, przyczyniając się do poprawy jakości produktów otrzymanych na bazie surowców, których udział w naszej diecie wg aktualnych zaleceń żywieniowych, powinien się zwiększać, tj. owoców i warzyw. W pracy podjęto więc próbę określenia wpływu ultradźwięków na kinetykę procesu suszenia uwzględniając aspekty związane z jakością otrzymanych suszy.

Część teoretyczna

1. Spis oznaczeń

symbol	definicja	jednostka
W	– zawartość wilgoci w materiale, odniesiona do masy mokrej; wartość liczbową oznaczaną skrótem w.b (ang. <i>wet basis</i>),	[kg/kg]
X	– zawartość wilgoci odniesiona do masy suchej; wartość liczbową oznaczaną skrótem d.b (ang. <i>dry basis</i>),	[kg/kg]
m_w	– masa wody w materiale	[kg],
m_p	– masa mokrego materiału	[kg],
m_s	– masa suchego materiału,	[kg]
q	– szybkość wymiany ciepła (strumień ciepła),	[W]
h_m, h_T	– współczynnik wymiany, odpowiednio masy i ciepła	[kg/m ² s], [W/m ² ·K]
A	– powierzchnia wymiany ciepła i masy,	[m ²]
T_a	– temperatura powietrza,	[°C]
T	– temperatura powierzchni suszonego materiału,	[°C]
m_t	– masa w chwili t ,	[kg]
ΔX	– różnica wilgotności,	[kg/kg]
A_m, A_T	– powierzchnia wymiany, odpowiednio masy i ciepła,	[m ²]
φ_a, φ_B	– względna wilgotność powietrza suszącego, odpowiednio w czynniku suszącym i w pobliżu suchej powierzchni materiału	[kg/kg]
p_{vs}	– ciśnienie cząstkowej pary nasyconej (zależne od temperatury),	[Pa]
c_s, c_l	– ciepło właściwe, odpowiednio dla ciała stałego i cieczy,	[J/kg·K]
l	– utajone ciepło parowania,	[J]
ΔQ	– objętościowe źródło ciepła, opisujące absorpcję energii fali ultradźwiękowej,	[J]
α_v	– objętościowy współczynnik skurczu	
x_0	– początkowa zawartość wilgoci,	[kg/kg]

A_0	– początkowa powierzchnia materiału,	[m ²]
DR	– szybkość suszenia (ang. <i>drying rate</i>),	[kg/s]
ADR	– średnia szybkość suszenia (<i>average drying rate</i>),	[kg/s]
DRE	– zwiększenie szybkości suszenia,	[kg/s]
$CDRE$	– stosunek zwiększenia szybkości suszenia do suszenia konwekcyjnego, w odniesieniu do poszczególnych efektów suszenia (efekt wibracji, efekt temperaturowy, efekt synergistyczny),	
MC	– zawartość wilgoci odniesiona do procesów odwadniania osmotycznego,	[kg/kg]
WL	– ubytek wilgoci podczas odwadniania osmotycznego,	[kg/kg]
SG	– przyrost suchej substancji w odwadnianiu osmotycznym,	[kg]
λ	– współczynnik przewodzenia ciepła	[W/m·K]
η	– współczynnik lepkości dynamicznej płynu	[Pa·s]
E_k	– średnia energia kinetyczna cząstki	[J]
f	– liczba stopni swobody	[-]
k_B	– stała Boltzmana ($1,38 \cdot 10^{-23}$)	[J/K]
ω	– częstość kątowna	[rad/s]
ϵ_0	– przenikalność elektryczna próżni ($8,854 \cdot 10^{-12}$)	[F/m]
i^2	– jednostka urojona	[-]
ϵ'	– stała dielektryczna	[-]
ϵ''	– współczynnik strat dielektrycznych	[-]
c	– prędkość światła w próżni (299 792 458)	[m/s]
λ_f	– długość fali	[m]
f_f	– częstotliwość fali	[1/s]
n	– liczba moli substancji	[-]
M	– masa molowa substancji	[kg/mol]

V_m	– objętość molowa	[m ³ /mol]
E_m	– adiabatyczny współczynnik sprężystości objętościowej	
c_p	– ciepło właściwe w przemianie izobarycznej	[J/kg·K]
c_v	– ciepło właściwe w przemianie izochorycznej.	[J/kg·K]

2. Suszenie

Suszenie jest dobrze poznany i szeroko rozpowszechniony procesem w przemyśle spożywczym, zarówno jako metoda docelowa, pozwalająca utrwalić produkt, jak również etap pośredni w obróbce żywności. Suszenie jest jednym z najlepszych procesów, pozwalającym na uzyskanie szeregu korzyści:

- zmniejszenie masy produktu,
- zminimalizowanie kosztów wynikających z pakowania, przechowywania oraz transportu produktu,
- wydłużenie okresu przydatności do spożycia,
- uzyskanie pożądanego rozmiaru i sypkości,
- ograniczenie podatności na rozwój mikroorganizmów,
- zredukowanie aktywności enzymów katalizujących niepożądane reakcje [4].

Jednocześnie suszenie jest jednym z najbardziej energochłonnych procesów w przemyśle spożywczym. Wg raportu Unii Europejskiej, ok. 12% całkowitej energii w przemyśle spożywczym i rolnictwie jest zużywana w procesach suszenia [5]. Mechanizm suszenia jest niezwykle skomplikowany i trudny do zdefiniowania i modelowania ze względu na szereg procesów fizycznych i chemicznych zachodzących jednocześnie, dlatego też nie ma uniwersalnego modelu opisującego ten proces. Charakterystyka suszenia zależy od szeregu czynników takich jak: skład chemiczny materiału suszonego i zawartość wilgoci w tym materiale, geometria próbki, prędkości przepływu czynnika suszącego itd. Podczas procesu suszenia w materiale zachodzi szereg zjawisk fizycznych i chemicznych, zarówno pożytecznych, jak i niepożytecznych. Najważniejszymi fizycznymi zmianami są: skurcz materiału, puchnięcie (ang. *puffing*), krystalizacja, aglomeracja. Biologiczne i chemiczne zmiany obejmują m.in. takie obszary jak zmiany mikrostruktury materiału (na skutek ubytku wilgoci dochodzi do kurczenia się i zapadania komórek, oderwania błony komórkowej (plazmoliza) lub pęknięcia błony komórkowej (liza)) jak również zmiany w jakości produktu, takie jak zmiana zawartości składników bioaktywnych, denaturacja białka, krystalizacja błonnika, retrogradacja skrobi, zmiana barwy, ułatwienie substancji zapachowych i zmiana aktywności wody.

Podstawą suszenia jest usuwanie wilgoci z materiału pod wpływem ciepła dostarczonego z zewnątrz. Woda w postaci ciekłej lub gazowej dyfunduje przez materiał do jego powierzchni i na granicy faz odparowuje.

2.1. Opis procesu usuwania wody

W materiale biologicznym woda występuje w postaci wolnej i związanej. Forma związana to np. woda w postaci monowarstwy lub woda uwięziona. Formę wolną łatwo oddzielić od materiału stałego. Woda niezwiązana znajduje się w porach i naczyniach włosowatych, może być także luźno zaadsorbowana na powierzchni żywności i jako pierwsza poddaje się procesowi suszenia.

Zawartość wilgoci w materiale jest zwykle wyrażana jako stosunek wilgoci do suchej masy lub masy mokrej badanej próbki. Zależności te opisują równania przedstawione poniżej:

$$W = \frac{m_w}{m_p} = \frac{m_w}{m_s + m_w}, \quad (1)$$

$$X = \frac{m_w}{m_s}, \quad (2)$$

gdzie:

W – zawartość wilgoci odniesiona do masy mokrej (w oznaczeniach wartości z oznaczeniem wb, (z ang. *wet basis*), wartość może być także wyrażona w %),

X – zawartość wilgoci odniesiona do masy suchej (w oznaczeniach wartości z oznaczeniem db, (z ang. *dry basis*), wartość może być także wyrażona w %),

m_w – masa wody w materiale,

m_p – masa mokrego materiału, masa początkowa,

m_s – masa suchego materiału.

Ważną cechą materiału jest równowagowa zawartość wilgoci, ponieważ ma wpływ na charakterystykę suszenia materiału, a także jego zdolność do przechowywania. Definiuje się ją jako wilgoć zawartą w materiale znajdującą się w równowadze z powietrzem o określonej wilgotności i temperaturze oraz stanowi granicę zawartości wody w materiale, jaką można osiągnąć po procesie suszenia.

Proces suszenia jest złożony i obejmuje jednoczesny transport masy i ciepła. Podstawową siłą napędową suszenia jest potencjał chemiczny wody obecnej w materiale. Woda przemieszcza się z wnętrza materiału, gdzie potencjał chemiczny jest większy w kierunku powierzchni zewnętrznej, gdzie potencjał jest niski [6].

W większości przypadków suszenie odbywa się poprzez odparowanie wody, która znajduje się w materiale. Odparowanie wody następuje, gdy dostarczona zostanie określona porcja energii, pozwalająca wodzie na przejście fazowe. Ta ściśle określona porcja energii nazywana jest ciepłem utajonym lub ciepłem przemiany fazowej. Energia może być dostarczana do powierzchni materiału przez konwekcję, przewodzenie i promieniowanie lub objętościowo przez umieszczenie mokrego materiału w polu elektromagnetycznym (mikrofalowym lub radiowym). Większość energii w operacjach suszenia termicznego jest dostarczana na powierzchnię suszonego materiału (z wyjątkiem ogrzewania dielektrycznego), z tego powodu ciepło jest transportowane do ciała stałego głównie przez przewodzenie. Woda musi przemieścić się do granicy faz, gdzie znajduje się w postaci filmu cieczy, dopóki nie zostanie odprowadzona przez powietrze lub gaz nośny. W suszeniu adiabatycznym dyfuzja może zachodzić w fazie ciekłej lub gazowej. Szybkość suszenia często jest bardziej kontrolowana przez współczynnik przenikania ciepła niż współczynnik przenikania masy. Transport wilgoci w żywności stałej może odbywać się za pomocą różnych mechanizmów, w tym: dyfuzji cieczy, dyfuzji pary, dyfuzji powierzchniowej, różnic ciśnienia hydrostatycznego i ich kombinacji.

Przy wnikanii z medium zewnętrznego do materiału suszonego, energia cieplna jest przekazywana dzięki różnicy temperatur, a szybkość wymiany ciepła (strumień ciepła) jest proporcjonalna do tej różnicy temperatur i współczynnika wymiany ciepła, charakteryzującego dany materiał. W przypadku suszenia powietrzem, szybkość wymiany ciepła (strumień ciepła) wyrażana jest równaniem:

$$q = h_T A (T_\alpha - T), \quad (3)$$

gdzie:

q – szybkość wymiany ciepła (strumień ciepła) [W],

h_T - współczynnik wymiany ciepła [W/m²],

A – powierzchnia wymiany ciepła [m²],

T_α – temperatura powietrza [°C],

T – temperatura powierzchni suszonego materiału [°C].

Wraz z postępowaniem procesu suszenia zmieniają się warunki wewnątrz materiału suszonego. Przy jego powierzchni tworzy się warstwa sucha, która jest słabszym przewodnikiem energii cieplnej, co skutkuje utrudnionym przewodzeniem jej w głąb materiału. Wraz z postępującym ubytkiem wilgoci transport ciepła przez warstwy powierzchniowe zachodzi coraz wolniej.

Podczas przepływu czynnika suszącego nad wilgotną powierzchnią materiału woda jest usuwana z powierzchni do powietrza. Wynika to z ciśnienia cząstkowego pary wody lub różnicy stężeń. Szybkość transportu masy jest proporcjonalna do różnicy potencjału (ciśnienia lub stężenia) i właściwości systemu przenoszenia charakteryzowanego przez współczynnik wymiany masy:

$$\frac{dm_t}{dt} = h_m A \Delta X, \quad (4)$$

gdzie:

m_t – transportowana masa [kg],

t – czas, w którym zachodzi transport masy [s],

A – powierzchnia, na której zachodzi transport masy [m²],

h_m – współczynnik wymiany masy [m²·s],

ΔX - różnica wilgotności (masa pary na jednostkę masy gazu wolnego od pary).

2.2. Suszenie konwekcyjne

W przemyśle spożywczym najpopularniejszą metodą suszenia jest suszenie konwekcyjne. Konwekcja to jeden z trzech rodzajów wymiany ciepła, zachodzący poprzez ruch strumieni płynów. W suszeniu konwekcyjnym energia dostarczana jest do materiału poprzez czynnik suszący (ruchomy płyn), który omywa powierzchnię tego materiału (ciało stałe lub ciecz). Dalej mechanizm wymiany ciepła opiera się na nagrzewaniu kolejnych (zaczynając od powierzchni) warstw materiału. Wraz z wzrastającą ilością dostarczonej energii nagrzewanie materiału zachodzi w coraz głębszych jego warstwach. Gdy wilgoć na powierzchni ulega odparowaniu, tworzy się gradient stężeń, będący siłą napędową dyfuzji wilgoci z głębi materiału w kierunku powierzchni materiału. Suszenie konwekcyjne zwykle realizuje się w podgrzonym powietrzu, które, dzięki podgrzaniu, zmniejsza swoją wilgotność względną i przyspiesza proces. Ten typ suszenia dominuje w używanych instalacjach przemysłowych w Polsce i na świecie. W stosowanych w przemyśle konstrukcjach suszarek zachodzą zarówno konwekcja naturalna, jak i (w przypadku zastosowania wentylatorów, pomp itd.) wymuszona. Aby konwekcyjna wymiana ciepła zachodziła efektywnie, potrzebne są duże nakłady energii. Jednocześnie, sprawność termiczna suszarek konwekcyjnych jest zwykle bardzo niska i zwykle nie przekracza 20%. Znane są jednak pojedyncze przypadki dla konstrukcji bazujących na suszeniu kontaktowym, gdzie

sprawność termiczna może dochodzić do 90%, a średnia wydajność suszarek konwekcyjnych zawiera się w przedziale 40-60% [7].

2.2.1. Parametry charakteryzujące suszenie konwekcyjne

Podczas konwekcyjnej wymiany ciepła ruch energii odbywa się za pomocą poruszających się cząstek płynów, którymi są najczęściej gazy. Podczas kontaktu nośnika energii z powierzchnią materiału zachodzi wnikanie ciepła, które następnie dalej rozprzestrzenia się w materiale dzięki mechanizmowi przewodzenia. Do opisu wnikania ciepła stosowane jest równanie Newtona, zaprezentowane wcześniej jako równanie 3.

Współczynnik wnikania ciepła jest zależny od wielu czynników, m.in. od geometrii układu wymieniającego ciepło, właściwości płynu, wielkości różnicy temperatury, jak również charakteru przepływu płynu.

Dostarczone konwekcyjnie ciepło pozwala na odparowanie wilgoci z powierzchni materiału, wilgoć jest odprowadzana przez medium suszące. Jako czynnik suszący mogą być stosowane powietrze (najtańsza i najczęstsza metoda), gaz obojętny (np. N_2 w przypadku materiałów zwilżonych rozpuszczalnikami organicznymi), gazy spalinowe, przegrzana para wodna lub pary rozpuszczalników. W początkowym okresie suszenia, charakteryzującym się stałą prędkością suszenia (okres suszenia podczas którego usuwa jest wilgoć powierzchniowa), powierzchnia materiału suszonego przyjmuje temperaturę termometru mokrego odpowiadającą warunkom temperatury i wilgotności powietrza w tym samym miejscu. W okresie malejącej szybkości suszenia, temperatura ciała suszonego rośnie i zbliża się do temperatury suchego termometru. Czynniki te są szczególnie istotne podczas suszenia materiałów wrażliwych na ciepło. Podczas suszenia przy użyciu przegrzanej pary, temperatura materiału suszonego odpowiada temperaturze nasycenia przy ciśnieniu roboczym, które na przykład dla pary wody o temperaturze 100 °C wynosi 1 atmosferę. W przypadku materiałów podatnych na utlenianie lub denaturację, na przykład w środowisku tlenowym, wrażliwość na ciepło może być zupełnie inna w środowisku pary. Może to powodować, że końcowa jakość produktu uzyskana podczas suszenia będzie odmienna niż w przypadku suszenia w gazie inertym [8].

W rozwiązaniach stosowanych w technice suszarniczej najbardziej rozpowszechnione jest wnikanie ciepła podczas opływu ciał suszonych przez gaz.

Najważniejszymi wielkościami opisującymi konwekcyjną wymianę ciepła są liczby Nusselta i Prandtla, które opisują odpowiednio: podobieństwo kinetyczne czyli intensywność przepływu ciepła na granicy płyn – ścianka i charakterystykę pod względem właściwości fizykochemicznych płynu. Czasem stosowana jest również liczba Pécleta. Te bezwymiarowe wielkości określają zasięg i charakter zjawisk zachodzących w materiale podczas procesu konwekcyjnej wymiany ciepła.

Liczba Nusselta jest stosowana do obliczania współczynnika uwzględniającego międzyfazowy transport ciepła poprzez warstwę przyścienną jako jej empirycznej korelacji i jest określana jako funkcja dwóch innych liczb kryterialnych:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (5)$$

$$Nu = f(Gr, Pr), \quad (6)$$

gdzie równanie 5 zasadne jest w przypadku konwekcji wymuszonej, a równanie 6 swobodnej, a:

Gr – liczba Grashofa,

Re – liczba Reynoldsa.

$$Nu = \frac{h_T \delta_T}{\lambda} = \frac{R_p}{R_k}, \quad (7)$$

gdzie:

δ_T – grubość warstwy przyściennej [m]

R_p – termiczna oporność przewodzenia w warstwie przyściennej, gdzie $R_p = \delta_T / A\lambda$ [K/W],

R_k – termiczna oporność konwekcji w warstwie przyściennej $R_k = 1 / Ah_T$ [K/W],

h_T – konwekcyjny współczynnik wymiany ciepła [W/m²·K],

λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W/m·K],

A – powierzchnia wymiany ciepła [m²].

Liczba Prandtla definiowana jest następująco:

$$Pr = \frac{c_l \eta}{\lambda}, \quad (8)$$

gdzie:

c_l – ciepło właściwe płynu [J/kg·K],

η – współczynnik lepkości dynamicznej płynu [Pa·s].

Liczba Pécleta stanowi ważny parametr opisujący matematycznie proces konwekcyjnej wymiany ciepła lub masy w przypadku, gdy konwekcja naturalna jest marginalna w stosunku do konwekcji wymuszonej. Liczba Pécleta opisywana jest jako stosunek adwekcji (ruchu przez prądy) i dyfuzji (ruchu ciepła lub masy) napędzanej odpowiednim gradientem. W kontekście transferu masy, liczba Pécleta jest iloczynem liczby Reynoldsa i liczby Schmidta.

$$Pe = \frac{u \cdot L}{D} = Re \cdot Sc = \frac{R^2}{D \cdot \tau}, \quad (9)$$

gdzie:

u – lokalna prędkość przepływu [m/s],

L – wymiar charakterystyczny [m],

Sc – liczba Schmidta,

R – promień kropli wody [m],

D – współczynnik dyfuzji molekularnej,

τ – charakterystyczny czas procesu [s].

Liczba Pécleta jest przydatna do przewidywania dyspersji w mediach porowatych. Gdy liczba Pécleta jest rzędu wielkości porowatości materiału (ϵ), dominuje dyfuzja molekularna; gdy Pe jest

rzędu jednego, dyfuzja nadal dominuje w małej skali; gdy Pe jest rzędu ε^{-1} , konwekcja ma tendencję do dominowania, a w przypadku gdy konwekcja jest dominująca, liczba Pe jest rzędu ε^{-2} [9].

Tabela 1. Zależność dyspersji od liczby Pécleta

Zależność	Dominujące zjawisko
$Pe \cong \varepsilon$	dyfuzja molekularna
$Pe \cong 1$	dyfuzja molekularna oraz w małej skali konwekcja
$Pe \cong \varepsilon^{-1}$	konwekcja oraz w małej skali dyfuzja molekularna
$Pe \cong \varepsilon^{-2}$	konwekcja

2.2.2. Rozwiązania techniczne w suszeniu konwekcyjnym

Najczęściej stosowane w suszeniu konwekcyjnym są suszarki, w których czynnik suszący opływa materiał suszony. Do najczęściej spotykanych należą suszarki komorowe (suszarka wykorzystana do badań w niniejszej pracy posiada konstrukcję komorową).

Suszarki komorowe składają się z jednej lub większej ilości komór, gdzie znajdują się specjalne pojemniki (najczęściej tace), na których umieszczane są materiały poddawane suszeniu. Bardzo często stosowane jest suszenie z wymuszonym przepływem powietrza. W tym wypadku przepływ powietrza wywołany jest przez wentylatory. W przypadku konwekcji swobodnej, przepływ powietrza wywołany jest gradientem temperatury.

W suszeniu konwekcyjnym możliwe jest zastosowanie różnej geometrii nawiewu, tj. można go realizować wzdłuż materiału suszonego, prostopadle, czyli poprzez warstwę materiału oraz poprzez złożę fluidalne. Rozwiązania te mają różny wpływ na poszczególne parametry jakościowe oraz charakterystykę suszenia. Wg Witrowej-Rajchert i Radeckiej-Wierzbickiej [10], przepływ równoległy charakteryzuje się lepszymi parametrami rehydracyjnymi oraz mniejszym ubytkiem rozpuszczalnych składników suchej substancji dla marchwi i ziemniaka. Zastosowanie suszenia fluidalnego powodowało największe ubytki karotenoidów w marchwi (56%) i witaminy C w ziemniaku (51%).

Energia dostarczana w postaci ciepła pozyskiwana jest z pary grzejnej lub gorącej wody. Mniej popularne rozwiązania to ogrzewanie elektryczne, gazowe lub olejowe.

Suszarka komorowa oprócz zalet w postaci łatwej obsługi i mało skomplikowanej konstrukcji ma szereg ograniczeń i wad. Należą do nich:

- niejednorodność procesu suszenia w objętości komory suszarki,
- znaczne straty ciepła podczas załadunku i wyładunku materiału,
- trudności w kontroli procesu,
- znaczne straty powietrza suszącego spowodowane nieszczelnościami,
- trudności w utrzymaniu dobrych warunków sanitarnych.

Najczęściej suszarki komorowe stosowane są w instalacjach przemysłowych starszego typu oraz w praktyce laboratoryjnej. Szczególnie przydatne okazały się w suszeniu materiałów wymagających długiego suszenia w łagodnych warunkach oraz stosowania specjalnych/specyficznych warunków suszenia [11].

2.3. Suszenie z wykorzystaniem mikrofal

Fale mikrofalowe jako źródło energii, która może być łatwo zamieniana na energię cieplną zaczęto wykorzystywać już w latach 40. XX w. [12]. Mikrofałe to fale elektromagnetyczne zaliczane do fal radiowych, których częstotliwość przyjmuje się w zakresie od 300 MHz do 300 GHz (λ o długości od 1mm do 1m). W użyciu do celów cywilnych, naukowych lub medycznych najbardziej popularne są częstotliwości 915±13 MHz (radiolokacja, komunikacja, np. telefony komórkowe) oraz 2,45±0,5 GHz (sieci bliskiego zasięgu, głównie WiFi). Zakresy, w których użytkowane są fale elektromagnetyczne regulowane są przez Regulamin Radiokomunikacyjny ITU (ang. *Radio Regulations of the International Telecommunication Union*) i obowiązują także na terenie Polski. Regulacje dzielą zakres długości fal elektromagnetycznych w systemie dekadowym i zostały stworzone, aby uniknąć ingerowania w pasma komunikacyjne, np. pasma LTE, urządzenia radiolokacyjne. Stanowi to również kompromis między głębokością wnikania, a efektywnością nagrzewania materiału (częstotliwość 915 MHz ma zdolność wnikania do ok. 30 cm, a 2,45 GHz do ok. 10 cm w głąb materiału [13] [14]). Mikrofałe wykorzystywane są w przemyśle (np. technologii procesów obróbki minerałów [15], chemii i technologii polimerów [16], chemii analitycznej [17]), w celach naukowych (np. w radioastronomii do wykrywania chmur wodoru), w celach militarnych (np. radary, naprowadzanie pocisków), medycynie (np. diatermia mikrofalowa), a także życiu codziennym w postaci systemu GPS (1575,42 MHz i 1227,6 MHz), popularnych kuchenek mikrofalowych, lub też urządzeń Wi-Fi czy Bluetooth® (2,4 GHz). Ogrzewanie mikrofalowe znalazło szereg zastosowań w obróbce żywności, np. w procesach liofilizacji, pasteryzacji, sterylizacji, pieczenia, blanszowania, rozmrażania.

Proces suszenia, w którym wykorzystywane są mikrofałe, charakteryzuje się dużym przyrostem temperatury materiału suszonego. Jest to spowodowane nagrzewaniem materiału, ze względu na bezpośrednią absorpcję energii mikrofal. Nagrzewanie się materiału umieszczonego w polu elektromagnetycznym wyjaśnia się głównie następującymi zjawiskami o odrębnych mechanizmach: polaryzacją jonów, przewodnictwem jonowym oraz rotacją dipoli.

Fala elektromagnetyczna składa się z pola elektrycznego i magnetycznego, które są w stosunku do siebie prostopadłe. Zależności między nimi, a także zachowanie cząsteczek dipoli w polu mikrofalowym przedstawiono na rysunku 1.

Energia mikrofal może być przekształcona w ciepło, gdy substancja posiadająca stałe lub indukowane dipole poddana jest fali elektromagnetycznej o odpowiedniej częstotliwości. Polaryzacja jonów wywołwana jest przez pole elektryczne, gdzie jony, ze względu na posiadany ładunek elektryczny, zyskują przyspieszenie zgodne z kierunkiem pola elektrycznego, kosztem energii tego pola. To z kolei prowadzi do ich częstszych i silniejszych zderzeń, w wyniku czego średnia energia kinetyczna cząstek wzrasta i powoduje podgrzanie materiału. Zależność między energią a temperaturą została przedstawiona w równaniu 10.

$$E_K = \frac{f}{2} k_B T, \quad (10)$$

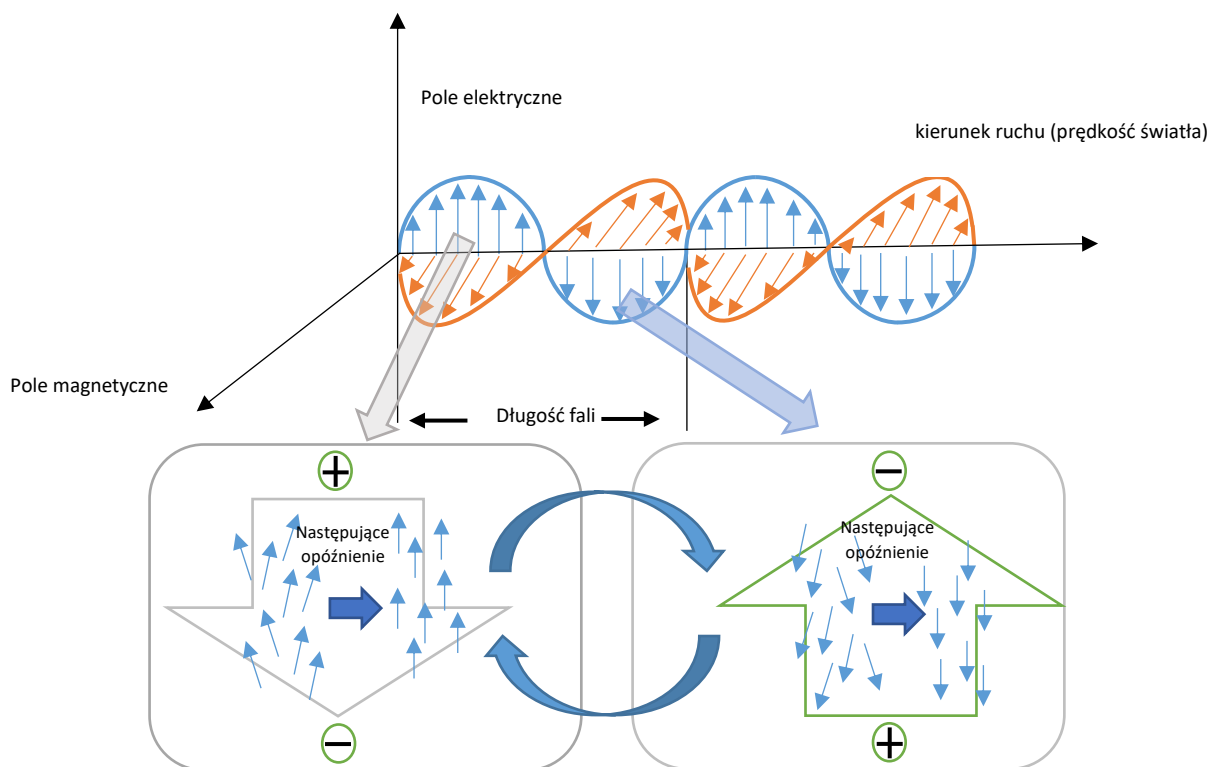
gdzie:

E_K – średnia energia kinetyczna cząstki,

f – liczba stopni swobody,

k_B – stała Boltzmana,

T – temperatura bezwzględna.



Rysunek 1. Zachowanie dipoli w polu elektro-magnetycznym [19]

W przewodzeniu jonowym rozpuszczone naładowane cząstki (jony) w próbce oscylują tam i z powrotem pod wpływem pola elektrycznego, wytwarzając prąd elektryczny. Ten prąd napotyka opór wewnętrzny z powodu zderzeń naładowanych cząstek z sąsiednimi cząsteczkami lub atomami, w wyniku czego przekazują one energię, czego skutkiem jest nagrzewanie się materiału.

Mechanizm rotacji cząsteczek dipolowych, czyli cząsteczek posiadających moment dipolowy w wyniku nierównomiernie rozłożonego ładunku elektrycznego (w suszeniu żywności - głównie dipoli wody) polega na bardzo częstej zmianie orientacji w przestrzeni cząsteczek z powodu szybko zmieniającego się zwrotu pola elektro-magnetycznego. Cząsteczki dipolowe obracają się (wykonują ruchy rotacyjne) odpowiednio szybko, aby zorientować się w przestrzeni zgodnie ze zwrotem polaryzacji. Dzięki energii mikrofal rozrywane są wiązania wodorowe, uwalniając cząsteczki ze swojej struktury. Pozwala to na ruchy drgające, które wywołują oddziaływanie molekularne cząsteczek dipolowych między sobą, a także z otaczającym je materiałem, generując energię cieplną. Aby osiągnąć efekt cieplny, częstotliwość mikrofal jest tak ustawiona, że w zmiennym polu elektrycznym różnica faz między obracaniem dipoli a orientowaniem pola powoduje tarcie molekularne i kolizje, które powodują nagrzewanie dielektryczne. Zmiany położenia cząsteczek dipolowych są opóźnione w stosunku do fazy padającej na nie fali elektromagnetycznej o tzw. czas relaksacji. Czas relaksacji w istotny sposób wpływa na właściwości dielektryczne materiału i zależy od jego lepkości, stanu skupienia i temperatury [18].

Suszenie z wykorzystaniem mikrofal cechuje wiele zalet, takich jak:

- wysoka efektywność konwersji energii,

- selektywność,
- nagrzewanie zachodzi wewnątrz materiału,
- brak kontaktu między źródłem energii a ogrzewanym materiałem,
- możliwość zdalnego ogrzewania materiału w pożądanej atmosferze,
- skrócenie czasu trwania procesu,
- obniżenie kosztów procesu,
- oszczędność energii,
- elastyczność w wytwarzaniu szerokiej gamy produktów suszonych.

2.3.1. Parametry charakteryzujące suszenie mikrofalowe

W procesach suszenia z wykorzystaniem mikrofal takich materiałów jak żywność, głównymi parametrami charakteryzującymi podatność materiału na ten typ suszenia bądź też podgrzewania, są jego własności dielektryczne, które opisuje stała dielektryczna ϵ' oraz współczynnik strat dielektrycznych ϵ'' . Stała dielektryczna ϵ' wyraża zdolność materiału do magazynowania energii elektrycznej, czyli sprzężenie energii materiału z elektromagnetycznym polem mikrofalowym. Natomiast współczynnik stałej dielektrycznej ϵ'' opisuje zdolność materiału do rozpraszania energii w odpowiedzi na zastosowane zmienne pole elektryczne [20]. Są to parametry, od których w sposób zasadniczy zależy pochłanianie, odbijanie, przesyłanie i rozpraszanie energii elektromagnetycznej w żywności. Zależność między nimi opisuje równanie:

$$\epsilon_{abs}(\omega) = \epsilon_0 \cdot \epsilon(\omega) = \epsilon_0[\epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega)], \quad (11)$$

gdzie:

ϵ_0 - przenikalność elektryczna próżni ($8,854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$)

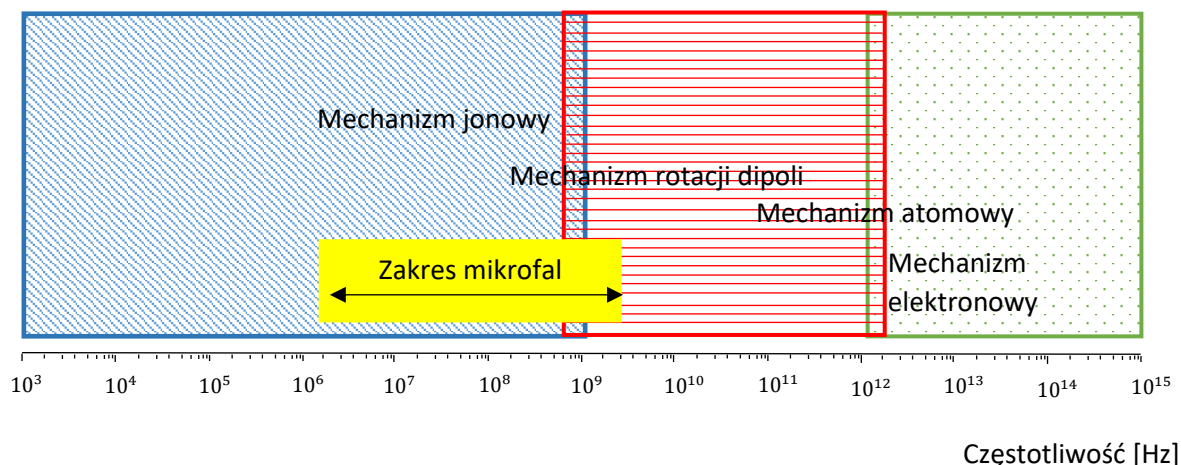
ω – częstość kątowna [rad/s]

$i^2 = -1$.

Stała dielektryczna oraz współczynnik strat dielektrycznych, w przypadku materiału biologicznego, zależą od częstotliwości fali, temperatury i składu chemicznego [21]. Skład chemiczny (głównie zawartość wilgoci w postaci wolnej i związanej oraz soli, a także cukrów) może powodować duże różnice we współczynniku strat dielektrycznych. Roztwory soli działają jak przewodnik w polu elektromagnetycznym, a zatem zmniejszają przenikalność a zwiększają współczynnik strat dielektrycznych, np. zmiana zawartości soli z 0,8 do 1,8% w purée ziemniaczanym zwiększa współczynnik strat z 38,1 do 95,2 w temperaturze 121°C i częstotliwości fali elektromagnetycznej 915 MHz [22]. Podobne zależności zauważono w pracy Wang i współpracowników [23], gdzie badano wpływ zawartości NaCl (1-7%) i sacharozy (3-15%). Zanotowano wzrost współczynnika strat wraz ze wzrostem koncentracji zarówno chlorku sodu, jak i sacharozy w puree ziemniaczanym.

Mechanizmy, które generują współczynnik strat dielektrycznych obejmują reakcje jonowe, elektronowe, atomowe oraz procesy Maxwella-Wagnera (mechanizmy narastania ładunku

elektrycznego). Jak już wspomniano, najważniejszymi ze względu na częstotliwości stosowane w przetwórstwie żywności, są polaryzacja jonowa oraz rotacja dipolowa.



Rysunek 2. Zakresy częstotliwości występowania mechanizmów nagrzewania [24]

Tabela 2. Stałe dielektryczne dla wybranych owoców i warzyw [24] [25] [26]

Roślina	Zawartość wilgoci [%, wb]	Stała dielektryczna ϵ'	Współczynnik strat dielektrycznych ϵ''	Temperatura [°C]	Częstotliwość [GHz]
Jabłko	88	54	10	23	2,45
Kiwi	87	66	17		
Avocado	71	45	12		
Marchew	87	56	15		
Ziemniak	79	57	17		
	80	23,51	0,15	24	9,3
		16,12	0,101		14,7
Burak czerwony	86	2,81	0,29	-	9,9
Dynia zwyczajna	97,59	62,08	0,104	24	9,3
		43,03	0,097		14,7
Rzodkiewka	96	67	15	23	2,45

Głębokość penetracji (D_p) jest ważnym parametrem opisującym rozkład temperatury w procesach ogrzewania mikrofalowego żywności i przenikanie mikrofal do wnętrza materiału niemetalicznego. Jest to odległość od powierzchni materiału, przy której wielkość natężenia pola spada o współczynnik $1/e$. Wykorzystywana jest w celu ustalenia jak głęboko energia mikrofal wnika w materiał [27]. Parametr ten można obliczyć stosując równanie 12:

$$D_p = \frac{c}{2\pi\omega \sqrt{2\epsilon' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right]}}, \quad (12)$$

gdzie:

c – prędkość światła w próżni (299 792 458 [m/s])

ω – częstotliwość [rad/s].

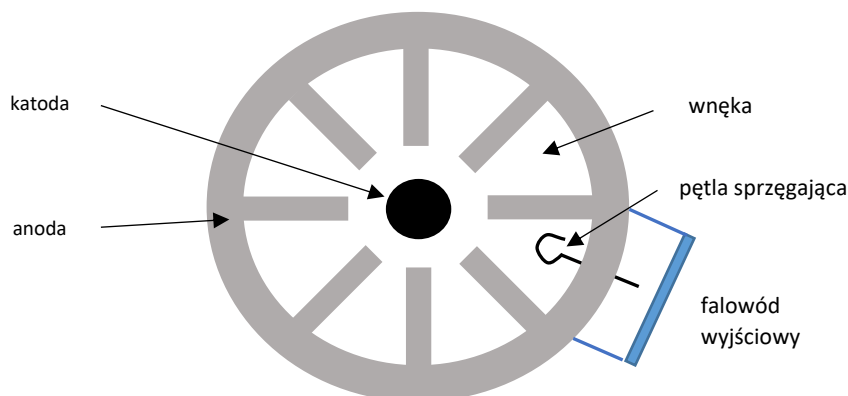
Na głębokość penetracji w próbkach ryżu, wg Auksornisri i współpracowników [28], miały wpływ: dodatek soli i temperatura. W przypadku próbek bez dodatku soli, D_p wzrasta wraz ze wzrostem temperatury, podczas gdy w próbkach z dodatkami soli (0,5-3%) spada wraz ze wzrostem temperatury i zwiększeniem zawartości soli.

2.3.2. Technologia suszenia mikrofalowego

Suszarki mikrofalowe składają się z kilku podstawowych elementów, takich jak generator fal elektromagnetycznych, adapter, aplikator oraz urządzenia kontrolno-pomiarowe. Bardzo istotne jest odpowiednie dobranie wszystkich elementów konstrukcyjnych, tak, aby generowana moc i sposób aplikacji był dopasowany do rodzaju materiału suszonego.

Najbardziej popularnym źródłem fal elektromagnetycznych w przemyśle spożywczym jest magnetron. Jest to urządzenie emitujące „skrzyżowane pole” (prostopadłe) elektromagnetyczne, czyli takie, gdzie podstawowe oddziaływanie zależy od ruchu elektronu w polu elektrycznym i magnetycznym. Podstawowy schemat budowy magnetronu przedstawiono na rysunku 3. Energia mikrofal przekazywana jest do materiału w sposób bardzo efektywny, ponieważ (w zależności od konstrukcji magnetronu) tylko 20-40% energii elektrycznej wykorzystywana jest do pracy magnetronu, pozostała część (60-80%) przekazywana jest do materiału w postaci fal elektromagnetycznych [29]. Umożliwia to niezwykle szybki transport masy, co nie zawsze jest korzystne dla produktu, ponieważ może powodować uszkodzenia i odkształcenia materiału, zmiany w jakości i teksturze, np. tzw. „puffing” [30]. Zjawisko to można ograniczyć przez ściśle kontrolowanie parametrów procesu, ale może być ono również celowo wywoływane dla uzyskania określonej jakości produktu.

Aplikatory mikrofal tworzy się w kształcie metalowych cylindrów, wewnątrz których umieszcza się materiał do obróbki. Charakterystyka tych elementów zależy od planowanych zastosowań. Aby wyeliminować efekty nierównomiernego rozłożenia natężenia pola elektromagnetycznego można zastosować tzw. mieszadła mikrofal w postaci szybko wirujących anten lub też materiał wprowadza się na taśmach, albo talerzach obrotowych. Nie zawsze można w ten sposób całkowicie wyeliminować negatywne skutki, takie jak przegrzanie wzdłuż krawędzi i narożników próbki, przypalenia i nadmierne wyschnięcie, przez co materiał może tracić walory estetyczne, smakowe i odżywcze [31].



Rysunek 3. Schemat magnetronu [32]

Znane są dwa rozwiązania konstrukcyjne aplikatorów: aplikatory monomodowe (przeznaczone do małych ilości materiału, szczególnie o niskim współczynniku strat) oraz aplikatory wielomodowe.

Aplikatory wielomodowe wykonane są w postaci komory o co najmniej jednym wymiarze większym niż długość wolnej przestrzeni mikrofalowej (np. dla częstotliwości 2450 MHz wymiar ten musi być większy niż 122 mm). Do wnętrza komory doprowadzane są mikrofały, gdzie odbijają się od jej ścian. Fały te interferują ze sobą, a tym samym rozkładają natężenie pola elektrycznego wewnątrz wnęki. Rozkład pola zależy od konstrukcji wnęki, tj. wymiarów, właściwości dielektrycznych wsadu, jego położenia we wnętrzu a także rozmiaru wsadu [33].

W końcowym etapie suszenia, ze względu na małą ilość wody, a także zawartość innych składników, takich jak cukry, temperatura materiału może gwałtownie wzrastać, co może prowadzić do przypalania materiału [34]. Niezbędna jest ścisła kontrola temperatury, dlatego też bardzo często w suszarkach mikrofalowych montuje się termometr/pirometr/termoparę wraz z odpowiednim oprogramowaniem.

2.3.3. Wpływ zastosowania mikrofał na suszenie materiałów pochodzenia roślinnego

Z danych literaturowych wynika, że zastosowanie mikrofał ma pozytywny wpływ na kinetykę suszenia materiałów biologicznych. W pracy Contrerasa i współpracowników [35], odnotowano skrócenie czasu suszenia oraz mniejsze zmiany barwy dla jabłek i truskawek, w przypadku suszenia mikrofalowego w porównaniu z konwekcyjnym. Jednocześnie zaobserwowano straty w zawartości antocyjanów oraz spadek jasności próbek. W suszarkach otrzymanych metodą mikrofalową stwierdzono także większą odporność mechaniczną na pękanie i odkształcanie. Badania nad strukturą jabłek (*Malus domestica* L. odmiany Granny Smith) wykonane zostały także przez Andresa i współpracowników w pracy [36], gdzie potwierdzono wpływ parametrów procesu (moc mikrofał, temperatura), na zmiany mikro- i makrostrukturalne produktu.

W przypadku wiśni również odnotowano większą szybkość suszenia w porównaniu do suszenia konwekcyjnego przy zastosowaniu mikrofał oraz przy zwiększającej się ich mocy. Najniższą zawartością fenoli i witaminy C oraz aktywnością antyoksydacyjną charakteryzowały się próbki suszone konwekcyjnie, natomiast nie wykazano znaczącej różnicy w przypadku zmiany barwy [37]. Podobny wpływ na kinetykę procesu uzyskano dla owoców jarzębu domowego (*Sorbus domestica* L.) [38], owoców moringa (*Moringa olifera* Lam.) [39], zielonej papryki (*Capsicum annum* L.) [40], a także plasterków cytryny (*Citrus limon* L.), gdzie najlepsze rezultaty zarówno odnoszące się do kinetyki procesu, zmiany barwy, jak i zdolności rehydracyjnej uzyskano dla suszenia przy wykorzystaniu metody konwekcyjno-mikrofalowej [41]. Funebo i Ohlsson zbadali wpływ zmiennych przepływów powietrza przy stałej mocy mikrofał na kinetykę suszenia oraz rehydrację, gęstość nasypową i zmianę barwy dla jabłek (*Malus domestica* L. odmiany Golden delicious) i pieczarek dwuzarodnikowych (*Agaricus bisporus* Imbach). Najlepsze rezultaty w przypadku kinetyki procesu, uzyskali dla największych przepływów powietrza (1,5 m/s), natomiast nie odnotowali wpływu warunków procesu na pozostałe badane aspekty jakościowe [42]. Autorzy prac [43] [44] [45] zbadali również wpływ zmiennych mocy mikrofał i przepływu powietrza na kinetykę procesu suszenia i zużycie energii dla takich surowców jak: czosnek pospolity (*Allium sativum* L.), liść rumianku (*Matricaria chamomilla* L.) i jabłka (*Malus domestica* odmiany Golab). Najgorsze wyniki uzyskali oni dla suszenia konwekcyjnego, przy jednoczesnym pogorszeniu jakości uzyskanych produktów [43]. Natomiast przy zastosowaniu mikrofał redukcja zużycia energii wyniosła odpowiednio ok. 90%, 75% i 83%. Dla zielonego groszku (*Pisum sativum* L.) prowadzono badania dla mocy mikrofał 100-450 W i również uzyskano przyspieszenie szybkości suszenia, natomiast w przypadku zmiany barwy, zawartości związków fenolowych oraz aktywności antyoksydacyjnej efekt był niekorzystny [46]. Negatywny wpływ mikrofał (175 W) na składniki aromatyczne (np. terpinen-4-ol, wodzian cis-sabinenu) dla majeranku (*Oreganum majorana* L.) wykazali autorzy pracy [47], wskazując suszenie konwekcyjne jako właściwe dla

zatrzymania substancji lotnych. Przeciwnie rezultaty dla związków z grupy flawonoidów, a także kwasu chlorogenowego oraz irydoidów (kwasu genipoydowego i aukubiny) wykazali autorzy pracy [48], na przykładzie męskich kwiatów Eukomii wiązowatej (*Eucommia ulmoides* Oliv.), gdzie zadana moc mikrofal w zakresie 140-700 W pozwalała uzyskać najlepsze rezultaty dla najwyższych mocy. Alibas Ozkan i inni badali wpływ wzrastającej mocy mikrofal (90-1000 W) przy suszeniu konwekcyjnym liści szpinaku (*Spicacia oleracea* L. odmiany Meridian), gdzie podobnie stwierdzili znaczącą redukcję czasu suszenia, natomiast zarówno dla zawartości witaminy C, jak i całkowitej zmiany barwy najlepsze rezultaty uzyskali dla pośrednich wartości mocy mikrofal [49]. Kilka lat później podobne doświadczenie przeprowadzono dla liści pokrzywy (*Urtica dioica* L.) i także uzyskano optimum dla średnich (500W) mocy mikrofal [50]. Podobne zależności zaobserwowano dla banana (*Musa paradisiaca* L.), gdzie szybkość suszenia była największa dla najwyższej mocy mikrofal (700 W), tymczasem parametry jakościowe były najlepiej zachowane dla średniej tzn. 490 W [51]. Podobnie skonstruowany eksperyment przeprowadzili Prabhanjan ze współpracownikami, na marchwi zwyczajnej (*Daucus carota* L.), uzyskując największą redukcję czasu suszenia przy najwyższej mocy (90%), jednakże poskutkowało to zwęgleniem materiału. Zadowalające rezultaty pod względem jakościowym uzyskano przy najniższych mocach mikrofal, bądź ich całkowitym braku [52]. Soysal, w swojej pracy poświęconej zielonym liściom pietruszki (*Petroselinum crispum* Mill.), uzyskał zdecydowanie mniejszą redukcję czasu suszenia w porównaniu do Maskana [51], (64% do 97%), natomiast nie odnotował znaczących różnic w zmianie barwy wraz ze wzrastającą mocą mikrofal [53]. Takie same rezultaty jakościowe w badaniach przeprowadzonych na korzeniu żeń-szenia amerykańskiego (*Panax quinquefolium* L.) uzyskali Ren i Chen w 1998, natomiast redukcja czasu suszenia wynosiła 55,2%, ze względu na mniejszą aplikowaną moc mikrofal [54]. Wpływ mikrofal na zapach i kolor ziaren pszenicy zbadali Warchalewski i inni, 1998. Odnotowali, że wraz z czasem ekspozycji na mikrofałe znacząco zwiększają się różnice w badanych parametrach, w porównaniu do świeżej próbki. Dobre rezultaty (90% barwy początkowej) uzyskano dla krótkiego (15-60 s) czasu ekspozycji [55].

Zastosowanie mikrofal podczas procesu suszenia może wpływać również na redukcję liczby mikroorganizmów takich jak *Escherichia coli* O157:H7 oraz *Listeria monocytogenes*. Wg Siguemoto i innych, w temperaturze 55-70°C i 400-1000 W energii mikrofal osiągnięto redukcję liczby drobnoustrojów o 5 cykli logarytmicznych, czyli w zakresie rekomendowanym przez Agencję Żywności i Leków (FDA) [56]. Woo i inni także wykazali radykalną redukcję żywych komórek bakterii *Escherichia coli* K-12 i *Bacillus subtilis* KM107, jak również wzrost ilości DNA i białka uwalnianego z komórek pod wpływem działania promieniowania mikrofalowego (600W) [57]. Destrukcyjne działanie promieniowania mikrofalowego wykazano także dla wegetatywnych szczepów *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pyogenes* z grupy A, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* i *Enterococcus faecalis* oraz zarodników *Bacillus subtilis* i *Bacillus stearothermophilus*. Przy zadanej mocy mikrofal 350 i 600 W obserwowano śmierć form wegetatywnych w ciągu 5 minut [58].

W Tabeli 3 zestawiono efekty suszenia mikrofalowego dla wybranych surowców roślinnych.

Tabela 3. Zestawienie efektów zastosowania mikrofal dla suszenia wybranych surowców roślinnych

Materiał	Moc mikrofal	Redukcja czasu suszenia	Inne badane parametry	Wartość [%] w stosunku do próbki świeżej	publikacja
Banan	0-700 W	97% (700 W)	Zmiana barwy Rehydratacja	59,1% dla 0W 77,3% dla 490 W 74,9% dla 700W ~73% dla 0, 350, 700 W ~66% dla 490W	Maskan, 2000 [51]
Czosnek pospolity	0-40 W	97%	Zużycie energii	90% dla 40W	Sharma i Prasad, 2006 [43]
Eukomia wiązowata	140-700 W	-	Flawonoidy Kwas chlorogenowy Kwas genipozydowy Aukubina	~77% ~80% ~60% ~90%	Dong i inni, 2011 [48]
Groszek zielony	100-450 W	67,8% (450 W)	Zmiana barwy Aktywność antyoksydacyjna (DPPH· IC ₅₀)	64% dla 100 W 61,7% dla 300 W 57,7% dla 450 W 12,5% dla 100 W 112,5% dla 300 W 100% dla 450 W	Chahbani i inni, 2018 [46]
Jabłko odmiany Golab	200-600 W	83% (600 W)	Wydajność energetyczna	54,34% dla 600 W	Zarein i inni, 2015 [45]
Jabłko odmiany Golden delicious	0,5 Wg	60%	Rehydratacja Gęstość nasypowa Zmiana barwy	40% 400-500 kg/m ³ 90-95%	Funebo i Ohlsson, 1998 [42]
Jabłko odmiany Granny Smith	0-10 Wg	-	Zmiany mikrostrukturalne	-	Andres i inni, 2004 [36]
Marchew	0-600 W	90%	Zmiana barwy rehydratacja	-	Prabhanjan i inni, 1995 [52]
Moringa	0-750 W	80% (750 W)	Zmiana barwy Stopień rehydratacji Substancje lotne	82,3% dla 750 W 80,8% dla 750 W 22,3% dla 750 W	Dev i inni, 2011 [39]

Papryka zielona	180-540 W	73% (540 W)	-	-	Darvishi i inni, 2014 [40]
Pieczarka dwuzarodnikowa	0,5 Wg	77%	Rehydratacja Gęstość nasypowa Zmiana barwy	20% 300-400 kg/m ³ 91-96%	Funebo i Ohlsson, 1998 [42]
Pietruszka	360-900 W	64%(900 W)	Zmiana barwy	~90,5% dla 360-900 W	Soysal, 2004 [53]
Pokrzywa	0-500 W	95% (500 W)	Witamina C Zmiana barwy	72,9% dla 0 W 92,8% dla 160 W 97,8% dla 500 W 90,2% dla 0 W 93,4% dla 160 W 97,2% dla 500 W	Alibas, 2010 [50]
Pszemica	1250W	-	Zapach Zmiana barwy	45% (180 s) 91% (180 s)	Warchalewski i inni, 1998 [55]
Rumianek	200-900 W	75% (900 W)	Zużycie energii	24% dla 400 W	Motevali i inni, 2016 [44]
Szpinak	90-1000 W	92,8% (1000 W)	Witamina C Zmiana barwy	46,4% dla 90 W 86,8% dla 650 W 83,3% dla 1000 W 72,9% dla 90 W 85,4% dla 500 W 66,6% dla 1000 W	Alibas Ozkan i inni, 2007 [49]
Żeń-szeń	0-60W	55,2% (60W)	Zmiana barwy	97%	Ren i Chen, 1998 [54]

2.4. Suszenie z wykorzystaniem ultradźwięków

Ultradźwięki (naddźwięki) definiowane są jako sprężyste fale dźwiękowe lub obszary medium nośnego oscylujących wokół pozycji swojej równowagi. Fluktuacje te rozprzestrzeniają się w materiale. Przyjmuje się zakres częstotliwości ultradźwięków od 16-20 kHz (dolna granica) do 1GHz. Mają one zdolność do poruszania się w różnych mediach: płynach oraz ciałach stałych (np. w powietrzu $v = 340 \frac{m}{s}$, a w wodzie $v = 1500 \frac{m}{s}$, przy temperaturze 15°C). Zależność między długością fali a jej częstotliwością opisuje równanie 13:

$$\lambda_f = \frac{v}{f_f}, \quad (13)$$

gdzie:

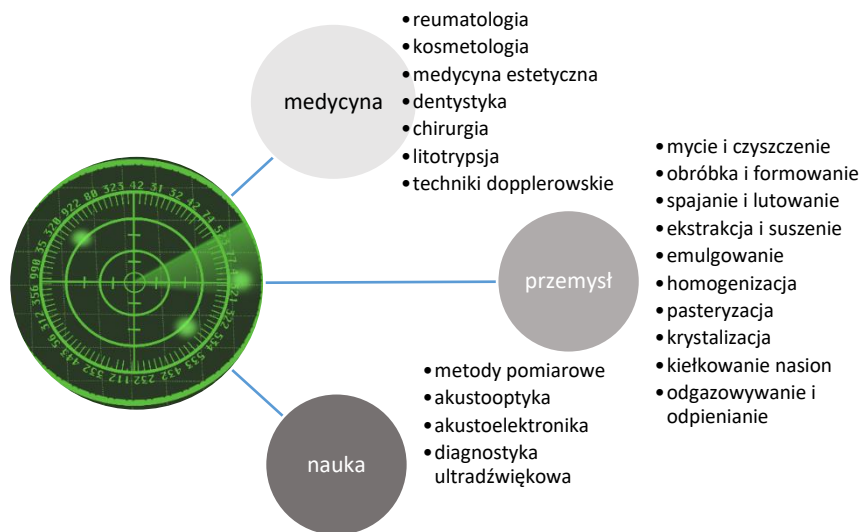
λ_f – długość fali [m],

v – prędkość rozchodzenia się fali w danym ośrodku [m/s],

f_f – częstotliwość fali [1/s].

Energia ultradźwięków jest przenoszona wzdłuż fali drgającej. Taki rodzaj transportu energii jest charakterystyczny ze względu na to, że wynika bardziej z elastycznych deformacji pod wpływem zmian ciśnienia, niż z ruchu cząsteczek.

Ultradźwięki znalazły zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu (np. badania nieniszczące, metody pomiaru odległości [59]), nauki (np. synteza związków chemicznych [60]) i medycyny (diagnostyka różnych organów, USG [61]), a także w różnych gałęziach przemysłu spożywczego (np. wywoływanie reakcji utleniania/redukcji, ekstrakcji enzymów lub białek, indukowania zarodkowania w krystalizacji, intensyfikacji takich procesów jak fermentacja podczas produkcji win czy napojów spirytusowych, kontroli reakcji enzymatycznych, stymulacji probiotycznych bakterii w fermentacji jogurtu, zwiększenie wydajności procesów emulgowania i ekstrakcji oraz dekontaminacji powierzchni) [62]. Graficzne ujęcie licznych zastosowań ultradźwięków zostało przedstawione na rysunku 4.

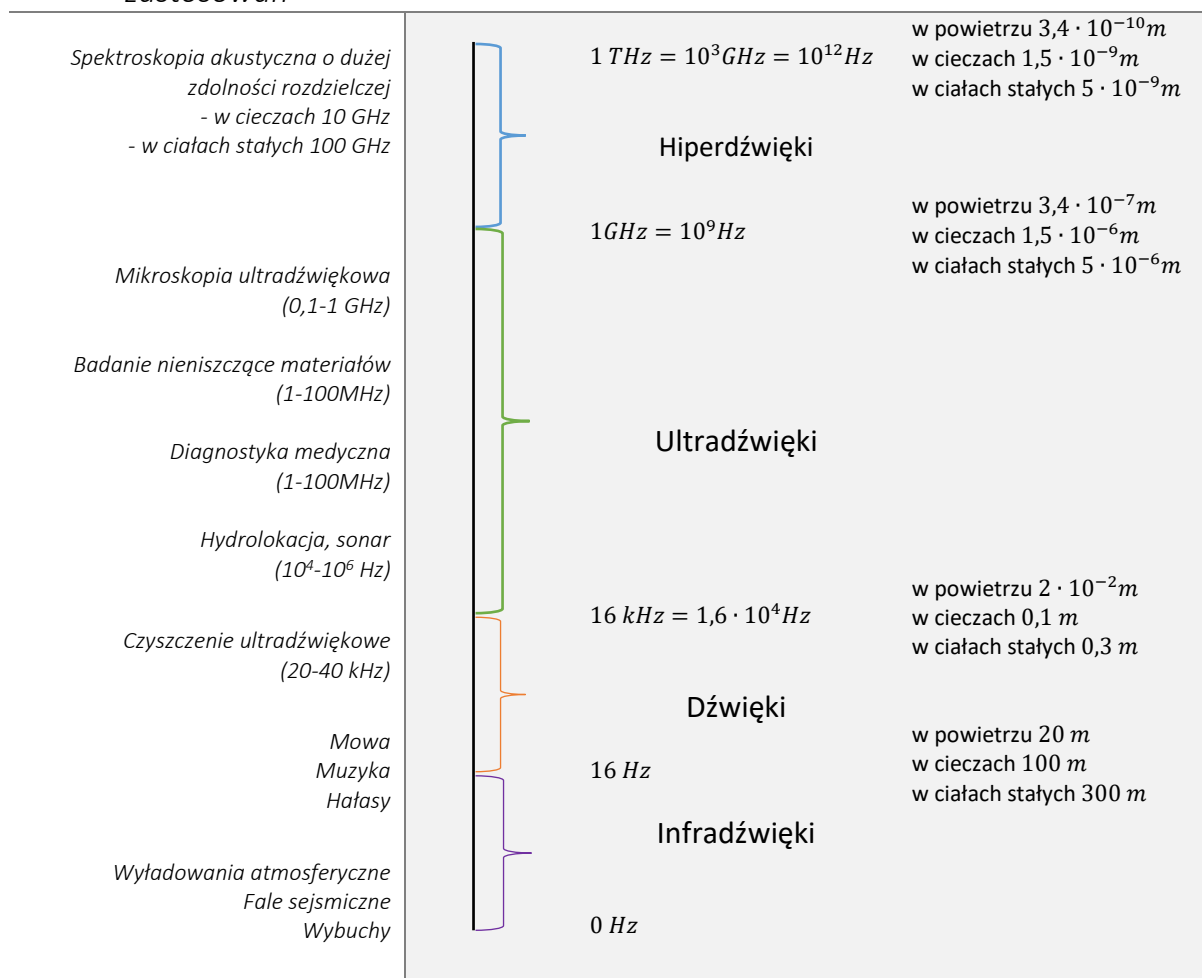


Rysunek 4. Zestawienie zastosowań ultradźwięków [63] [64]

Na rysunku 5 przedstawiono widmo fal sprężystych wraz z długościami fal, mającymi zastosowanie w różnych dziedzinach. Obrazuje to niezwykłą różnorodność, a także szerokie możliwości aplikacyjne fal akustycznych.

Niektóre przykłady zastosowań

Zakres częstotliwości ω i długości λ



Rysunek 5. Widmo fal sprężystych [65]

W przetwórstwie żywności jedną z częstych prób aplikacji ultradźwięków jest suszenie. Zwykle w tym procesie wykorzystuje się częstotliwości z zakresu 20-40 kHz. W literaturze można znaleźć wiele udokumentowanych zalet wykorzystywania ultradźwięków w procesie suszenia żywności takich jak:

- możliwość zastosowania niższych temperatur dla wrażliwych na ciepło materiałów biologicznych,
- zmniejszenie zużycia energii,
- skrócenie czasu suszenia,
- poprawa jakości suszu poprzez zachowanie jego cennych składników (witamin, związków mineralnych) i wyglądu (kolor, kształt) [3].

2.5. Zastosowanie ultradźwięków w obróbce wstępnej

Ultradźwięki można wykorzystać nie tylko na etapie suszenia produktu, ale już w trakcie obróbki wstępnej surowca. Metodą, która pozwala w znacznym stopniu ograniczyć niekorzystne zmiany sensoryczne czy straty składników bioaktywnych powstające podczas suszenia, jest odwadnianie osmotyczne, które poprzedza ten proces. Pozwala ono na usunięcie znacznej ilości wody z materiału

roślinnego bez przemiany fazowej. Transport masy w tym procesie jest przede wszystkim związany z powstałą różnicą stężeń pomiędzy roztworem a sokiem komórkowym tkanki. W odwadnianiu osmotycznym stosuje się różne roztwory hipertoniczne. Wymiana masy w tym przypadku może być dodatkowo wspomagana poprzez zastosowanie ultradźwięków. Do odwadniania osmotycznego przy udziale ultradźwięków wykorzystywane są wanny ultradźwiękowe o regulowanej temperaturze.

Zastosowanie ultradźwięków w obróbce osmotycznej może jednak nastęcać pewnych trudności, np.:

- efekt ogrzewania – przy zastosowaniu ultradźwięków temperatura roztworu rośnie,
- wpływ turbulencji na zakłócenia pola akustycznego – mieszanie powoduje obniżenie ilości energii dostarczanej do materiału,
- wpływ temperatury – wysoka temperatura ogranicza efekty związane z zastosowaniem ultradźwięków – im wyższa temperatura, tym niższy stosunek energii akustycznej do energii cieplnej [66].

2.5.1. Parametry charakteryzujące odwadnianie osmotyczne i suszenie wspomagane ultradźwiękami

Dźwięk jest definiowany jako fala mechaniczna, która powoduje zakłócenia w medium, w którym jest propagowana, przenosząc energię z jednego punktu do drugiego. Podczas przemieszczania się fali dźwiękowej przez ośrodek, energia jest rozprzestrzeniana przez zderzenia sąsiadujących ze sobą cząstek. Cząsteczki te zaczynają oscylować wokół ich pozycji spoczynkowej, zachowując swoje rozmieszczenie w strukturze materiału. Fale dźwiękowe mogą być podłużne lub poprzeczne. Jest to uzależnione od kierunku ich oscylacji w odniesieniu do kierunku przemieszczania się energii przez medium. Szczególną cechą poprzecznych sprężystych fal dźwiękowych jest to, że mogą być propagowane jedynie w ciałach stałych. Materiały inne niż ciało stałe, czyli płyny, mają zdolność do podtrzymywania jedynie fali podłużnej, co determinuje sposób propagacji fali ultradźwiękowej przez tkanki miękkie oraz np. płyny ustrojowe w ciele człowieka.

W technice odwadniania materiału, ultradźwięki propagowane są w roztworach wodnych podczas ultradźwiękowej obróbki wstępnej oraz w powietrzu podczas suszenia konwekcyjnego wspomaganego ultradźwiękami. Podstawy zjawiska rozchodzenia się fali akustycznej opisuje równanie Newtona-Laplace'a. Wyznacza ono zależność między prędkością rozchodzenia się fali v , modułem sprężystości objętościowej gazu K i gęstością ośrodka ρ . Przyjmując dla gazu idealnego $K = \gamma \cdot p$, prędkość fali ultradźwiękowej w gazie rzeczywistym można obliczyć wówczas następująco:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}. \quad (14)$$

gdzie:

v – prędkość rozchodzenia się fali akustycznej [m/s],

ρ – gęstość ośrodka [kg/m³],

γ – wykładnik adiabatywny: stosunek ciepła właściwego gazu pod stałym ciśnieniem, do ciepła właściwego gazu w stałej objętości,

P – ciśnienie gazu w stanie niezakłóconym [Pa].

W przypadku gazu idealnego z zależności $p = nRT/V$ oraz $\rho = nM/V$ otrzymuje się postać równania:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{\frac{\gamma kT}{m}}, \quad (15)$$

gdzie prędkość dźwięku nie jest zależna od ciśnienia, a:

R – uniwersalna stała gazowa [J/(mol·K)],

T – temperatura [K],

M – masa molowa [kg/mol],

k – stała Boltzmana,

m – masa cząsteczki [kg].

W przypadku gazów nieidealnych, np. w przypadku par związków organicznych, lub par pod wysokim ciśnieniem, stosując równanie Van der Waalsa i podstawiając do równania 15 otrzymujemy:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \left(p + \frac{a}{V_m^2}\right) (V_m - b)}{M}}, \quad (16)$$

gdzie:

a – pierwszy współczynnik wirialny,

b – drugi współczynnik wirialny,

V_m – objętość molowa [m³/mol].

W obu wymienionych wyżej przypadkach prędkość fali akustycznej rośnie wraz ze zwiększającą się temperaturą oraz maleje przy zwiększającej się masie cząsteczkowej. Podczas propagacji ultradźwięków w gazowym medium składającym się z cząstek wieloatomowych, np. dwutlenku węgla, może wystąpić dyspersja prędkości. To zjawisko spowodowane jest częściowym pochłanianiem energii propagowanych fal do nadania ruchu obrotowego cząstkom, w zależności od ich stopnia swobody. Energia ta jest pochłaniana w różnym stopniu, w zależności od częstotliwości (częstotliwości rezonansowe dla danych cząsteczek, bądź ich części są pochłaniane najsilniej i dla nich wykazuje się największy spadek prędkości). Takiej dyspersji prędkości towarzyszy silne tłumienie, często wykluczające pomiary w takich gazach. W konsekwencji zależność częstotliwości lub dodatkowa zależność prędkości dyspersji od ciśnienia i temperatury zazwyczaj nie jest problemem w zastosowaniach przemysłu spożywczego.

W przypadku propagacji ultradźwięków w cieczech prędkość fali, przyjmując, że $E_m = \kappa \cdot p$, a $\kappa = c_p/c_v$, przyjmuje postać:

$$v = \sqrt{\frac{E_m}{\rho}} = \sqrt{\frac{c_p \cdot p}{c_v \cdot \rho}}, \quad (17)$$

gdzie:

E_m – adiabatyczny współczynnik sprężystości objętościowej,

c_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,

c_v – ciepło właściwe przy stałej objętości,

κ – wykładnik adiabaty.

W przypadku cieczy prędkość przemieszczania się ultradźwięków w ośrodku maleje wraz ze zwiększającą się temperaturą. Ciekawy wyjątek stanowi woda destylowana, gdzie maksimum prędkości notowane jest dla 74 °C. Zależności prędkości fali akustycznej od temperatury zmieniają się w zależności od rodzaju wprowadzanej substancji lub innej wzajemnie mieszającej się cieczy. Rozpatrując popularne w obróbce osmotycznej roztwory cukru, kształt krzywej zależności prędkości fali od temperatury roztworu zmienia się w zależności od stężenia. Dla roztworów cukru oraz chlorku sodu, prędkość fali akustycznej rośnie wraz ze stężeniem roztworu. Zależność ta spowodowana jest zmianą ściśliwości roztworu. Prędkość propagacji fali różnicuje także rodzaj cukru (mono-, di-, polisacharydy), jak również budowa cząsteczki, np. w przypadku roztworów monosacharydów o tym samym stężeniu.

Kolejną wielkością charakteryzującą działanie ultradźwięków jest impedancja akustyczna. Na granicy ośrodków współczynniki transmisji i odbicia zależą od stosunku impedancji tych ośrodków. Impedancja akustyczna jest wyrażana jako:

$$\frac{\text{nadciśnienie}}{\text{prędkość przemieszczenia cząstek}} = E_M k. \quad (18)$$

Wielkość impedancji charakterystycznej wyrażana jest jako:

$$Z = \frac{E_m k_f}{\omega} = \frac{E_M}{c} = v\rho = \sqrt{E_M \rho}, \quad (19)$$

gdzie:

E_M – moduł sprężystości,

k_f – wektor falowy,

ω – prędkość kątowna,

$E_M = \gamma\rho$ dla gazów i $E_M = K_s$ dla cieczy. Na podstawie powyższych wzorów, najmniejszą impedancją akustyczną charakteryzują się gazy, a największą ciała stałe.

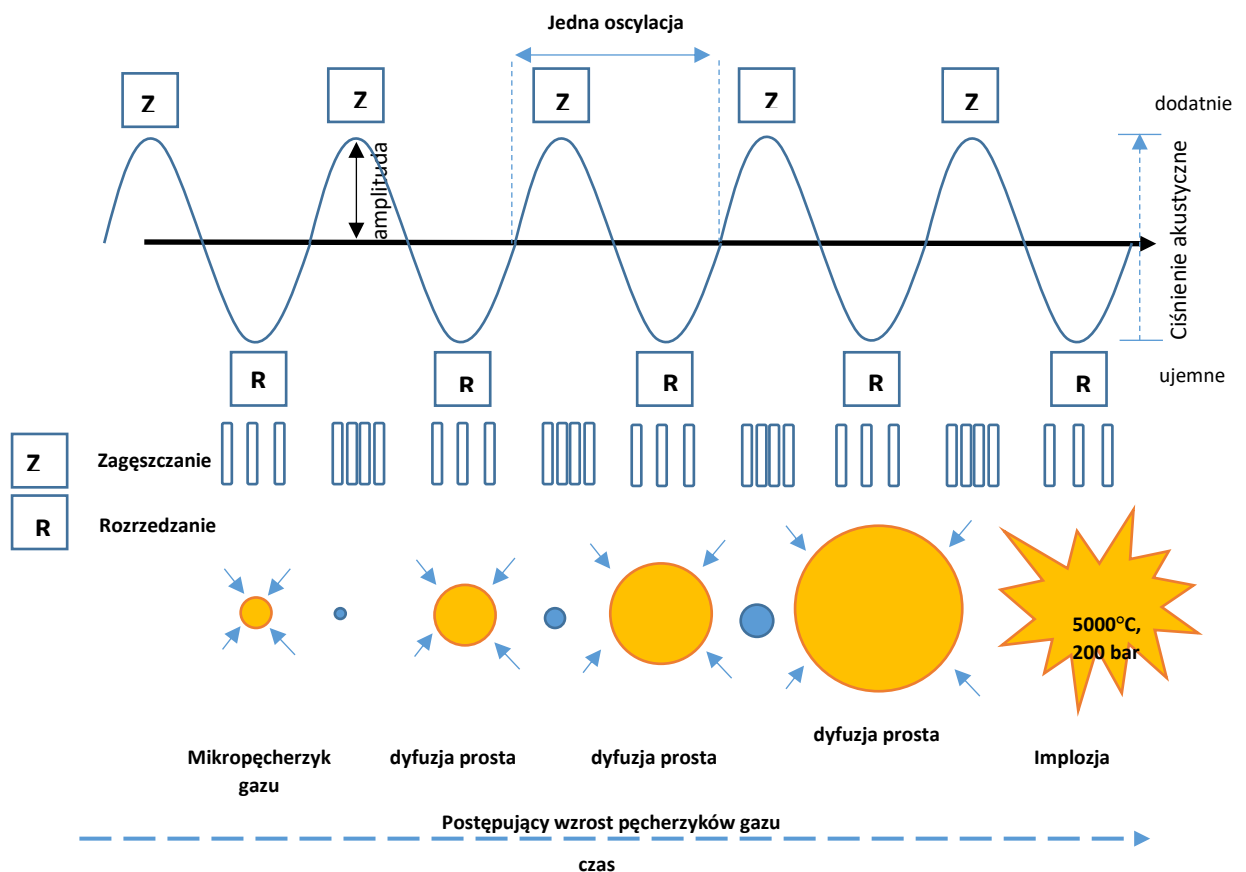
2.5.2. Mechanizm oddziaływania ultradźwięków na materiał suszony

Jedno z pierwszych doniesień literaturowych, dotyczące możliwości wykorzystania ultradźwięków w procesie suszenia pochodzi z 1963, z pracy Gregussa [67], gdzie autor, na przykładzie suszenia cukru, przedstawia mechanizm oddziaływania ultradźwięków na materiał. Podczas przemieszczania się ultradźwięków przez materiał zachodzi szereg zjawisk zarówno fizycznych, jak i chemicznych, mogących zmniejszyć opór wewnętrzny, jak i zewnętrzny transportu masy.

W przemyśle spożywczym wykorzystywane są głównie ultradźwięki o dużej mocy i niskich częstotliwościach (20-100 kHz), ponieważ są zdolne wywołać efekty kawitacyjne. Kawitacja to zjawisko

tworzenia się, wzrostu i implozji mikroskopijnych pęcherzyków pary w cieczy. Schemat przedstawiający ten proces został przedstawiony na rysunku 6. Zjawisko to nie występuje we wrzących cieczach oraz przy częstotliwościach większych niż 2,5 MHz [68]. Średni czas trwania pęcherzyków jest zwykle mniejszy niż 100 ns. Pęcherzyki powstają, gdy "ujemny" nacisk podczas fazy rozrzedzania podłużnej fali dźwiękowej jest wystarczająco duży, aby rozerwać ciągłość cieczy. Pęcherzyki te mają większą powierzchnię podczas cyklu rozprężania i zwiększają dyfuzję gazu. Maksimum osiągnięte jest tam, gdzie izolowana energia ultradźwiękowa nie jest wystarczająca, aby utrzymać fazę gazową w pęcherzyku, co powoduje szybką kondensację. W wodzie implozja tych pęcherzyków miejscowo generuje temperaturę do 5000 K i ciśnienie do 200 barów, ze względu na ściskanie fazy gazowej wewnątrz nieciągłości. Warunki te prowadzą do powstawania stanów wzbudzonych, pęknięcia wiązań i generowania rodników [69]. Zdolność materiału do występowania kawitacji (minimalnych oscylacji ciśnienia wywołujących efekty kawitacyjne) określa szereg czynników:

- rodzaj i stężenie rozpuszczonego gazu,
- ciśnienie hydrostatyczne,
- ciepło właściwe cieczy i gazu w pęcherzyku,
- napięcie powierzchniowe płynu,
- temperatura (odwrotnie proporcjonalna do kawitacji),
- częstotliwość ultradźwięków (kawitacja występuje poniżej 2,5 MHz).



Rysunek 6. Schematyczne przedstawienie wzrostu i zapadania się pęcherzyków w procesie kawitacji akustycznej [70]

Ultradźwięki powodują także zmniejszenie grubości granicznej warstwy dyfuzyjnej poprzez zmiany ciśnienia, prędkości oscylacji na granicy gaz-ciało stałe. Ultradźwięki charakteryzujące się wysoką (w odniesieniu do fali dźwiękowej) częstotliwością mogą powodować ruchy płynu (tzw.

„mikromieszanie”, ang. „*microstirring*”), powodując zwiększenie transportu masy w płynie. Jest to niezwykle istotne, ponieważ zjawisko to zachodzi bardzo blisko powierzchni materiału i również wpływa na zmniejszenie grubości granicznej warstwy dyfuzyjnej. Ponadto ultradźwięki mogą także wpływać na wewnętrzny transport wilgoci przez naprzemienne sprężanie i rozprężanie wytwarzane w materiale (tzw. efekt "gąbki", ang. „*sponge effect*”). Takie naprzemienne zmiany naprężenia tworzą mikroskopijne kanały, które umożliwiają łatwiejsze usuwanie wilgoci z głębi materiału. Ponadto fale akustyczne o wysokiej częstotliwości mogą powodować zjawiska kawitacyjne tam, gdzie wewnątrz stałej matrycy materiału występuje wilgoć. Może to niezwykle korzystnie wpływać w przypadku silnie związanych cząsteczek wody. Zapadanie się pęcherzyków gazu jest niesymetryczne (kawitacja nieinercyjna) blisko powierzchni międzyfazowej i powoduje wytworzenie mikrostrumieni, uderzających w powierzchnię materiału [71]. Uderzenia te mogą niekiedy doprowadzić do wnikięcia (wstrzyknięcia) wilgoci w materiał, dodatkowo rozluźniając jego strukturę. W zależności od charakterystyki systemu, pęcherzyki czasami nie zapadają się i wibrują z taką samą częstotliwością jak zastosowane ultradźwięki [72]. Wibracje te również przyczyniają się do mieszania cieczy. W związku z tym skutki działania ultradźwięków mogą przyczynić się do zmniejszenia zewnętrznego i wewnętrznego oporu transportu masy podczas suszenia [73]. Wpływ ultradźwięków jest szczególnie duży w początkowej fazie suszenia o stałej szybkości (I okres suszenia), kiedy powierzchnia materiału jest całkowicie pokryta wilgocią [74].

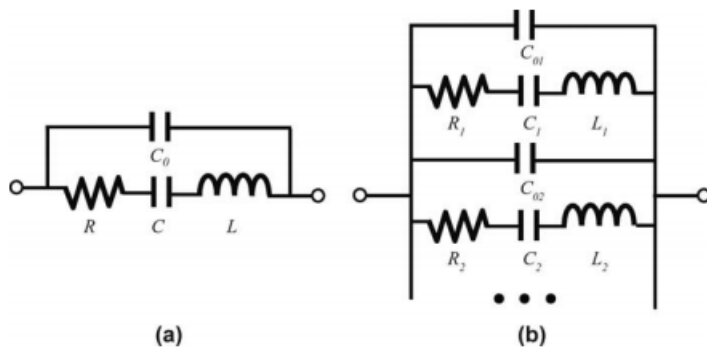
Kowalski wymienia trzy zjawiska składające się na fenomen działania ultradźwięków podczas suszenia. Są to:

- efekt ogrzewania
- efekt wibracyjny
- efekt synergistyczny [75].

Główną trudnością w stosowaniu ultradźwięków jest transmisja fali akustycznej z powierzchni emitera do próbki, ponieważ powietrze, ze względu na małą gęstość, jest ośrodkiem o wysokiej wartości tłumienia i niskiej impedancji akustycznej, pochłaniającym energię akustyczną. Ponadto wysoka różnica impedancji pomiędzy powietrzem i ciałem stałym powoduje odbicie dużej części energii akustycznej, uniemożliwiając przenoszenie energii akustycznej do ciała stałego, które ma być poddawane jej działaniu. Czynniki te powodują, że przenoszenie energii akustycznej podczas procesu suszenia jest dużo trudniejsze, niż podczas jej przenoszenia w medium ciekłym.

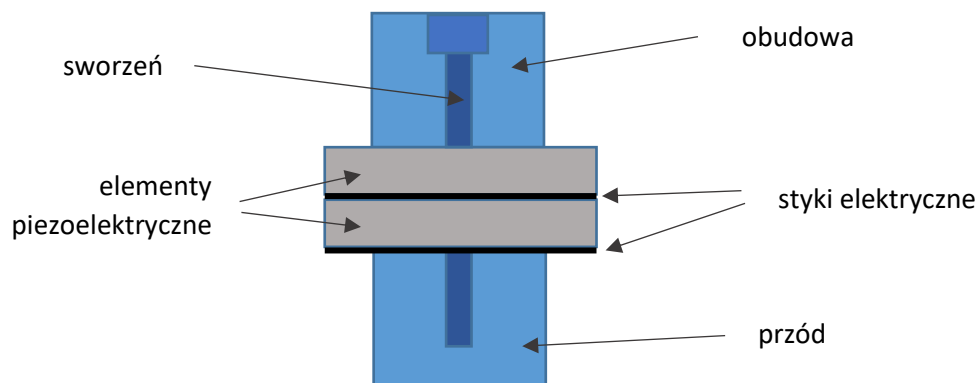
2.5.3. *Technologia suszenia z wykorzystaniem ultradźwięków*

W technologii suszenia z wykorzystaniem ultradźwięków najważniejszym i kluczowym elementem konstrukcji jest przetwornik ultradźwiękowy wytwarzający drgania akustyczne o częstotliwości 16 kHz - 1 GHz. Przetwornik ultradźwiękowy przetwarza energię elektryczną lub mechaniczną na energię akustyczną. Istnieją trzy zasadnicze typy przetworników ultradźwiękowych: przetwornik cieczowy, przetwornik magnetostrykcyjny oraz przetwornik piezoelektryczny. Przetworniki znajdujące się obecnie w użyciu to w zdecydowanej większości przetworniki piezoelektryczne (konstrukcja suszarki hybrydowej, służącej do przeprowadzenia badań w niniejszej pracy została oparta o przetwornik piezoelektryczny). Przetworniki piezoelektryczne z reguły są wąskopasmowe, tzn. największa odpowiedź pojawia się w paśmie rezonansowym. Jednakże, do specyficznych zastosowań wymagane są przetworniki szerokopasmowe (np. detekcja emisji akustycznej, obrazowanie w diagnostyce medycznej).



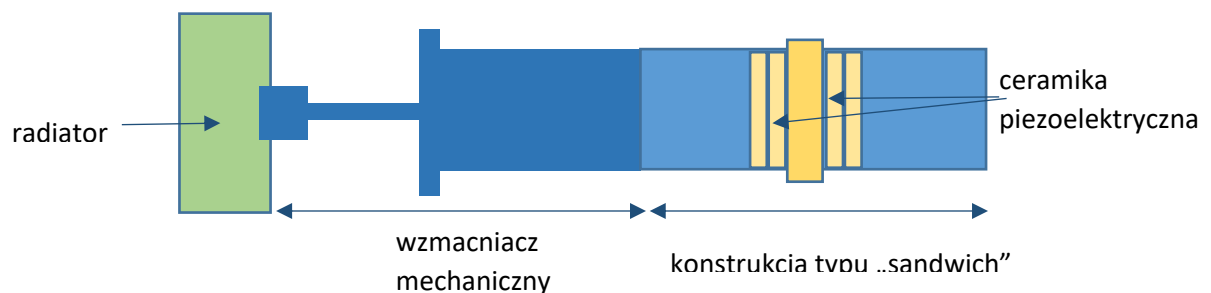
Rysunek 7. Model piezoelektrycznego przetwornika ultradźwiękowego Butterwortha-Van Dyke'a dla uwzględnienia (a) pojedynczej częstotliwości rezonansowej i (b) wielokrotności częstotliwości rezonansowej [76]

Przetwornik piezoelektryczny składa się z dwóch dysków wykonanych z ceramiki piezoelektrycznej, umieszczonej między dwoma identycznymi blokami metalowymi. Dyski piezoceramiczne są stosowane parami, aby wywołać dodatkowe drgania mechaniczne. Oba dyski są zamocowane na sworzniu, spolaryzowane w przeciwnych kierunkach i rozdzielone elektrodą sprzężoną ze źródłem zasilania. Model przetwornika piezoelektrycznego stosowanego w sondzie ultradźwiękowej został przedstawiony na rysunku poniżej (Rys. 8).



Rysunek 8. Schemat przetwornika piezoelektrycznego w sondzie ultradźwiękowej

Inne rozwiązanie konstrukcyjne generatora ultradźwięków, opierającego się o przetwornik piezoelektryczny zaproponowali naukowcy z Hiszpańskiej Narodowej Rady Badań (ang. *Spanish National Research Council* (CSIC)) prowadzonej przez dr J. A. Gallego-Juarez i dr E. Riera. Nowoczesne przetworniki projektuje się w oparciu o metody analityczne i numeryczne. Konstrukcja zaproponowanego przez nich przetwornika znajduje się na rysunku 9.



Rysunek 9. Podstawowa konstrukcja przetwornika ultradźwiękowego stosowanego w procesach suszenia / odwadniania

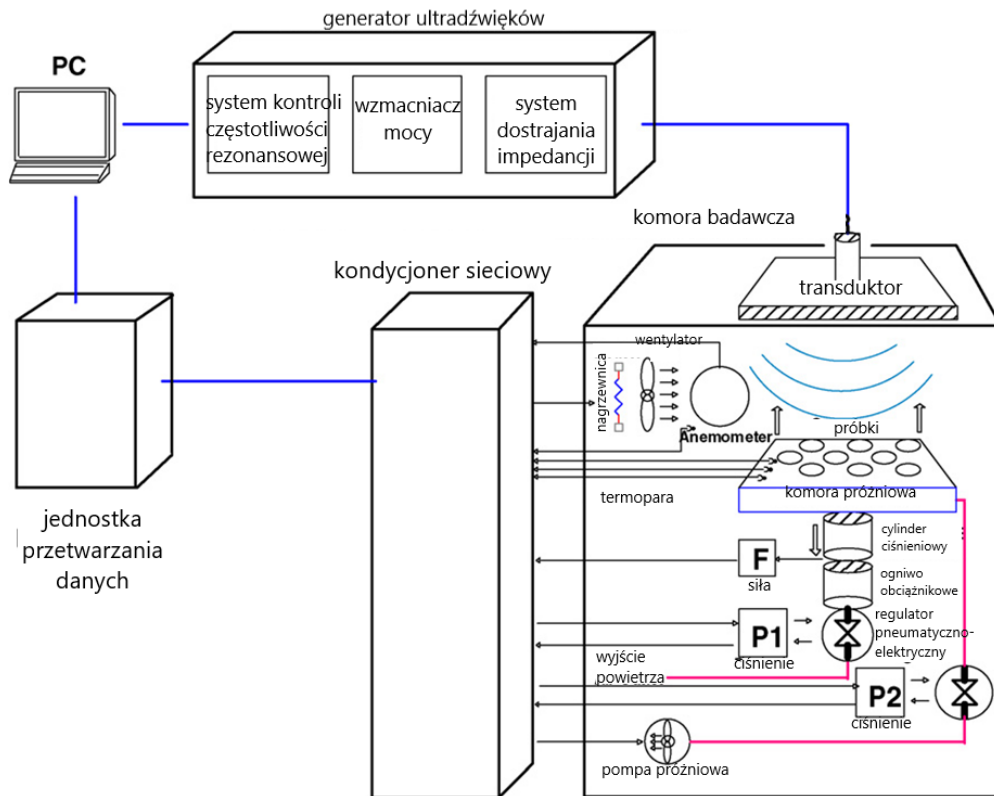
Składa się on głównie z piezoelektrycznie aktywowanego wibratora napędzającego radiator. Piezoelektryczny wibrator generuje drgania, które są następnie wzmacniane mechanicznie. Specjalna konstrukcja radiatora zwiększa jego odporność na drgania. Taki rodzaj konstrukcji pozwala na poprawę sprzężenia impedancji akustycznej i usprawnia przenoszenie energii poprzez powietrze do materiału [77].

Konstrukcje przetworników ultradźwiękowych obejmują także manipulowanie geometrią radiatorów, w celu intensyfikacji mocy i dopasowania przetwornika do konkretnych zastosowań. W związku z tym powstały konstrukcje okrągłe (zdecydowana większość) a także prostokątne (do specjalnych zastosowań), o schodkowej płycie i dużej powierzchni radiatora. Do specyficznych zastosowań, gdzie przestrzeń oddziaływania ultradźwięków jest ograniczona i określona, można stosować radiatory o kształcie cylindrycznym. Cechują się one zdolnością do samorozpraszania fali akustycznej, gdyż ściany cylindra działają jak promiennik.

Jako materiał piezoelektryczny stosuje się np. tytanian baru, tytanian ołowiu lub cyrkonian ołowiu, bądź niektóre stopy aluminium. Materiały te pod wpływem pola elektrycznego zmieniają swoje wymiary i dzięki temu zjawisku wytwarzane są fale ultradźwiękowe. Materiały używane do przetworników piezoelektrycznych cechują się dużą kruchością, dlatego też umieszcza się je między metalowymi płytami w celu ochrony przed uszkodzeniem. Wadami przetworników piezoelektrycznych są:

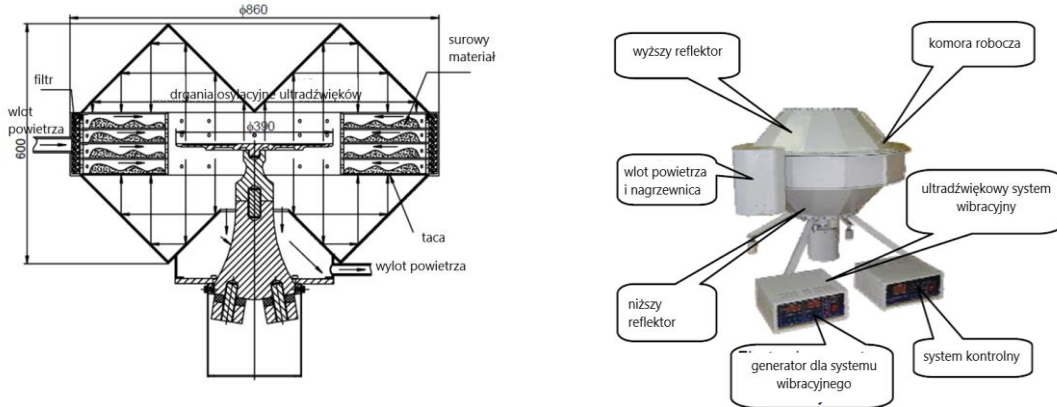
- ograniczony rozmiar, ze względu na możliwe interakcje drgań osiowych i promieniowych,
- konieczność stosowania układów wielopunktowych do uzyskania pożądanego natężenia mocy,
- konieczność dostrajania takich układów każdorazowo do konkretnej konstrukcji,
- występowanie efektów nieliniowych przy wysokich napięciach, takich jak przesunięcia częstotliwości i interakcje modalne [77].

Nad uzyskaniem jak najlepszych parametrów suszenia z wykorzystaniem ultradźwięków pracowało wiele zespołów badawczych, konstruując suszarki bazujące na wyżej opisanych elementach. Jedną z zaproponowanych konstrukcji było zastosowanie prostokątnego przetwornika, napędzanego przez piezoelektryczny wibrator. Została ona zaprezentowana na rysunku 10.



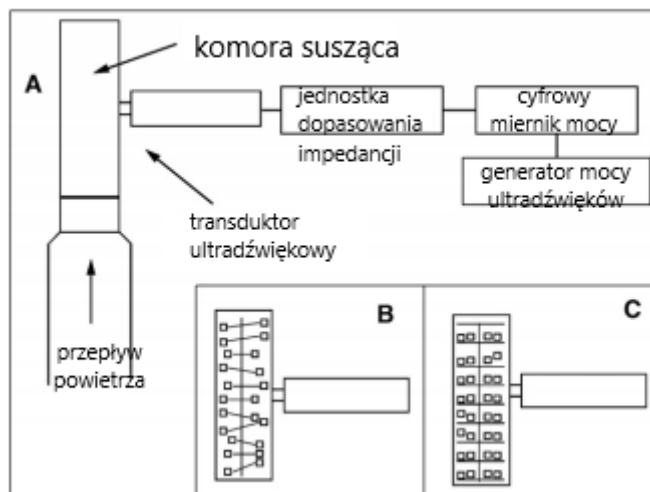
Rysunek 10. Konstrukcja suszarki ultradźwiękowej zaproponowanej przez [78]

Khmelev i inni zaproponowali układ składający się z radiatora drgań ultradźwiękowych w postaci fleksograficznego dysku wibracyjnego połączonego z przetwornikiem piezoelektrycznym. Materiał jest ładowany od góry, przez zdejmowany wyższy reflektor ultradźwięków. Schematyczna budowa tego układu została zaprezentowana na rysunku 11.



Rysunek 11. Konstrukcja suszarki ultradźwiękowej zaproponowanej przez [79]

Garcia-Perez i inni wykonali konstrukcję pozwalającą na zastosowanie ultradźwięków w złożu fluidalnym. W tym przypadku novum polega na zastosowaniu wibrującego aluminiowego cylindra jako komory badawczej, który jest napędzany piezoelektrycznym generatorem kompozytowym.



Rysunek 12. Rozwiązanie konstrukcyjne dla suszenia ultradźwiękami w złożu fluidalnym [80]

2.5.4. Wpływ ultradźwięków na materiał biologiczny

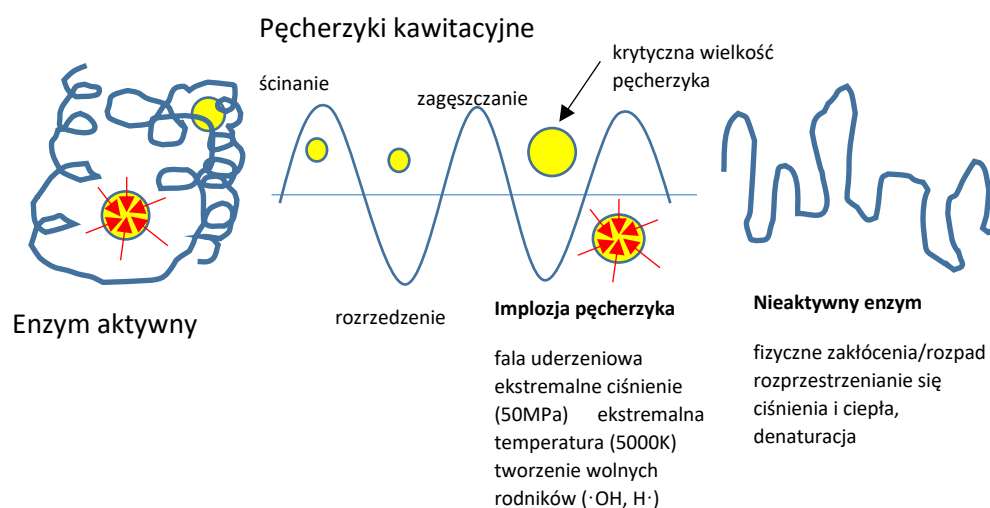
Warzywa i owoce jako materiał stały, poddają się działaniu ultradźwięków w specyficzny sposób. Kiedy fala akustyczna przenika przez materiał, następuje seria szybkich zmian ciśnienia w skali mikro, wywołujących naprzemienne ściskanie i rozkurczanie materiału. W materiałach o dużej gęstości, które są praktycznie nieściśliwe, powoduje to usuwanie wilgoci poprzez transport wody przez istniejące kanaliki lub też wytworzenie nowych. Mikrokanaliki powstają w kierunku, w którym rozprzestrzenia się fala podczas jej relaksacji lub równoległe z propagacją fali podczas kompresji. Materiały o dużej gęstości mogą ulec rozerwaniu pod działaniem ciśnienia akustycznego.

Z uwagi na ujęte powyżej zmiany zachodzące w materiale biologicznym podczas stosowania ultradźwięków, zastosowanie ich w przemyśle spożywczym, np. przy dezaktywacji enzymów, może prowadzić do niekorzystnych zmian jakości materiału biologicznego, w tym także zmian cech sensorycznych. Działanie dezaktywujące może wynikać z efektów kawitacyjnych, omówionych wyżej, gdzie w ekstremalnych warunkach ultradźwięki mogą powodować rozpad wiązania wodorowego i oddziaływania Van der Waalsa w łańcuchach polipeptydowych białek, w tym enzymów [81]. Dochodzi do zmian struktury drugorzędowej i konformacji trzeciorzędowej struktury enzymu, obejmującej także ułożenie przestrzenne miejsca aktywnego. Ekstremalny wzrost ciśnienia i temperatury może prowadzić również do homolitycznego rozerwania cząsteczki wody wytwarzającej wolne rodniki hydroksylowe i wodorowe. Zmienia to zasadniczo interakcję między enzymem a substratem i może prowadzić do poprawy lub pogorszenia aktywności katalizacyjnej (zdolności katalizowania reakcji) [82].

Zakres i skuteczność działania ultradźwięków zależy ściśle od struktury enzymu. Za najbardziej podatne na działania mechaniczne uważa się enzymy oligomeryczne. Działanie dezaktywujące na polifenolooksydazę (ang. PPO - polyphenoloxidase) oraz peroksydazę (ang. POD), które są głównie odpowiedzialne za brązowienie, w przypadku zastosowania ultradźwięków Cao i współpracownicy wykazali na przykładzie liści laurowych, dla których zaobserwowali znaczące skrócenie czasu potrzebnego na dezaktywację enzymów [83]. Rodriguez i współpracownicy zbadali skuteczność inaktywacji polifenolooksydazy, peroksydazy oraz metyloesterazy pektyny (PME) w jabłkach, jednakże pomimo pozytywnego wpływu ultradźwięków na właściwości sensoryczne, zaobserwowano tylko

częściową inaktywację PME [84]. Inne doniesienia literaturowe sugerują, że wolne rodniki wytwarzane podczas kawitacji odgrywają główną rolę w inaktywacji wielu enzymów [85].

Przy małej intensywności ultradźwięki (zarówno o wysokiej, jak i niskiej częstotliwości) można również stosować do modyfikacji metabolizmu komórkowego w tkance roślinnej. W odpowiedzi na stres dochodzi do zwiększenia produkcji przydatnych metabolitów wtórnych roślin, w tym polifenoli.



Rysunek 13. Schemat możliwego działania kawitacji w inaktywacji enzymów [81]

Ważnym aspektem zastosowania ultradźwięków przy obróbce żywności jest także ich zdolność do inaktywacji mikrobiologicznej. Jest ona zależna od rodzaju bakterii, czasu prowadzenia procesu, składu materiału biologicznego a także temperatury procesu. Działanie inaktywujące może wynikać z dużych zmian ciśnienia, spowodowanych przez falę akustyczną, która wywołuje mechaniczne wibracje w obrębie struktur komórkowych. Powodują one zmiany w strukturze komórkowej zaburzając funkcjonowanie, prowadząc do lizy (rozpadu) komórek. Ultradźwięki powodują także miejscowe nagrzewanie struktur tworząc wolne rodniki, przyczyniające się do uszkodzeń w budowie DNA.

2.5.5. Wpływ zastosowania ultradźwięków na charakterystykę suszenia a także fizyczne i chemiczne właściwości materiału pochodzenia roślinnego

Ważnym zagadnieniem związanym z suszeniem materiału pochodzenia roślinnego z wykorzystaniem ultradźwięków jest dopasowanie parametrów procesowych do charakterystyki materiału poddawanego procesowi suszenia. Podstawową cechą fizyczną materiału jest jego porowatość. Materiał o dużej porowatości (miękkki) cechuje się dużymi przestrzeniami międzykomórkowymi, przez co jest w dużo większym stopniu podatny na cykle ściskania i rozprężania materiału, które ułatwiają transport wilgoci przez materiał do powierzchni. Materiał o dużej twardości i małej porowatości wymaga dużo większej energii akustycznej, aby osiągnąć zbliżone rezultaty naprężeń mechanicznych [86].

Zastosowanie ultradźwięków wpływa również na mikrostrukturę materiału roślinnego. Szereg prac skupia się na obserwowaniu zmian na poziomie komórkowym, zachodzących przy aplikacji ultradźwięków. W pracy Puiga i innych [87], zaobserwowano, że w przypadku bakłażana poddawanego działaniu ultradźwięków o niskiej mocy zachowane zostały ściany komórkowe i ogólna struktura tkanki,

natomiast w przypadku suszenia konwekcyjnego i przy zastosowaniu ultradźwięków o dużej mocy, ta struktura uległa w dużym stopniu zniszczeniu. Wpływ ultradźwięków na strukturę materiału roślinnego był przedmiotem zainteresowań wielu badaczy. Prowadzili oni swoje badania skupiając się na mikrostrukturze takich surowców jak m.in. jabłka różnych odmian, marakuja i malina. W przypadku pieczarki opisanej przez Vallespir i innych [88], zaobserwowano tworzenie mikrokanalów i „efekt gąbki”. Zmiany fizyczno-chemiczne na powierzchni pokrytej substancjami woskowymi zostały zaobserwowane na przykładzie skórki pomarańczy. Przy zastosowaniu ultradźwięków niskiej mocy część substancji woskowych uległa rozpuszczeniu i zablokowała część porów, jednak nadal posiadały one charakterystyczny kształt pierścienia. Dopiero użycie ultradźwięków wysokiej mocy powodowało zniszczenie (rozmycie) kształtu porów i ich całkowite zablokowanie substancjami woskowatymi [89].

Szczegółowe zestawienie zagadnień badanych w obszarze suszenia z wykorzystaniem ultradźwięków zostało zaprezentowane w tabeli 4.

Tabela 4. Zestawienie danych literaturowych na temat suszenia żywności ze wspomaganie ultradźwiękowym (UD) (na podst. [3], uzupełnione)

Materiał	Metoda suszenia	Parametry procesowe	Tryb przesyłu UD	Moc/ częstotliwość ultradźwięków	Analizowane zagadnienia	Modelowane parametry	Autor
Bakłażan odmiany 'Black Enorma'	SK	2 m/s -14 °C 7% RH	BK	45 W 19,5 kW/m ³ (20 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci	KS, De	Garcia- Perez i inni, 2012 [90]
	SK	1 m/s 40°C	BK	6, 12, 19, 25, 31, 37 kW/m ³ (21,8 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci skurcz	KS, De, Si, hx	Ortuno i inni, 2010 [91] Garcia-Perez i inni, 2011 [92]
				45, 90 W	kinetyka suszenia mikrostruktura	KS	Puig i inni, 2012 [87]
Banan (<i>Musa paradisiaca</i>)	SK	0,2 m/s 50°C	K	45W (20 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci skurcz zwarłość polifenoli pojemność antyoksydacyjna	KS	Méndez i inni, 2015 [93]
Brzoskwinia zwyczajna	P	0,02-0,03 MPa 60°C	BK	4870 W/m ² 25 kHz	zmiana barwy związki fenolowe	KS, De	Souza da Silva i inni, 2019 [94]
Cytryna (skórka) 'Fino'	SK	1 m/s 40°C	BK	4, 8, 12, 16, 21, 25, 29, 33, 37 kW/m ³ (21,8 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci	KS, De	Garcia-Perez i inni, 2009 [95]
		0,5-12 m/s 40, 50 °C		75 W 154,3 dB (21,8 kHz)			Garcia-Perez i inni, 2007 [96]
Czosnek	SK	50, 60, 70 °C	K	1513,5 W/m ²	kinetyka suszenia zawartość związków siarkoorganicznych	KS, De, hx	Tao i inni, 2018 [97]
Fasola (nasiona)	P	55, 65, 75 °C	BK	1W/cm ² 40 kHz 60 mbar, 2 L/s	kinetyka suszenia zawartość fenoli kolor zużycie energii	KS, De	Tekin i inni, 2017 [98]
Groch	LA, SK	3,1; 3,2; 3,4 m/s -6, -3, 0, 10, 20°C	BK	67, 68, 69, 70, 73 W (20 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci barwa	KS, De	Bantle i inni, 2011 [99]
	SK	0,7 m/s 30, 35, 40°C	BK	60 W (28 kHz) 100W(28 kHz) 60 W (40 kHz)	kinetyka suszenia aktywność enzymów antyoksydacyjnych zawartość aldehydu dimalonowego test zdolności kiełkowania	KS, De	Yang i inni, 2018 [100]
Guawa	SK	1 m/s	K	45 W (20 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci	KS	Mendez i inni, 2015 [93]

					skurcz zawartość polifenoli pojemność antyoksydacyjna		
Jabłko 'Granny Smith'	LA	1, 2, 4, 6 m/s 5, 10, 15 °C	BK	25, 50, 75 W (21,8 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzja wilgoci	KS, De, hx	Santacatalina i inni, 2015 [101]
	SK	1 m/s 30,40, 50, 70°C	BK	18,5; 24,6; 30,8 kW/m ³ (21,8 kHz)	kinetyka suszenia, właściwości antyoksydacyjne i strukturalne	KS, De, hx	Rodriguez i inni, 2014 [102]
	SK, L	2 m/s 60°C	BK	20 kW/m ³ (21,8 kHz)	kinetyka suszenia, dyfuzja wilgoci, właściwości antyoksydacyjne	KS, De	Ahmad-Qasem i inni, 2015 [103]
	SK	1 m/s 40, 60°C 25% RH	K	75, 90 W (21 kHz)	kinetyka suszenia, struktura, tekstura	-	Sabarez i inni, 2012 [104]
	SK	1; 1,3; 1,7 m/s 22, 31°C	K	25, 50, 100 W (20 kHz)	kinetyka suszenia, dyfuzja wilgoci	KS, De	Gallego-Juarez i inni, 2007 [105]
	SK	1 m/s 40°C	BK	6, 12, 19, 25, 31 kW/m ³	kinetyka suszenia dyfuzja wilgoci struktura, tekstura i właściwości akustyczne	KS, De	Ozuna i inni, 2014a [106] Ozuna i inni, 2014b [107]
	LA	2m/s -14°C, 7% RH	BK	45W; 19,5 kW/m ³	kinetyka suszenia dyfuzja wilgoci	KS, De	Garcia-Perez i inni, 2012 [90]
	SNT	2 m/s -10, -5, 0, 5, 10°C	BK	50W (20,5 kHz)	kinetyka suszenia właściwości antyoksydacyjne zawartość polifenoli i flawonoidów dyfuzja wilgoci	KS, hx	Santacatalina i inni, 2014a [108]
				25, 50, 75 W (21,9 kHz) 155db	kinetyka suszenia rehydratacja twardość pojemność antyoksydacyjna zwartość związków fenolowych mikrostruktura	KS, De, hx	Santacatalina i inni, 2016 [109]
				20,5 kW/m ³ (21,9 kHz)	kinetyka suszenia efektywna dyfuzyjność	KS, De	Santacatalina i inni, 2015 [101]
2 m/s -10, -5, 0, 5, 10°C				kinetyka suszenia skurcz efektywna dyfuzyjność pojemność antyoksydacyjna zawartość fenoli i flawonoidów	KS, De	Santacatalina i inni, 2014b [110]	
LA	2 m/s -10°C	BK	30,8 kW/m ³ (21,9 kHz)	kinetyka suszenia pojemność antyoksydacyjna retencja witaminy C	KS,	Moreno i inni, 2015 [111]	
Jabłko 'Braeburn'	SK	70°C	K	4µm (24 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci czas sonikacji, skurcz	KS, De	Schössler i inni, 2012 [112]
Jabłko 'Ligol'	SK	0,7; 1,2 m/s 30, 45 °C	BK	50, 100 W	kinetyka suszenia	KS	Kowalski, 2015 [113]
		0,72; 2, 3, 4 m/s 40, 45, 50°C		100, 200 W	kinetyka suszenia zużycie energii współczynniki wymiany masy i ciepła	KS, WE, hx	Kowalski i inni, 2015 [114]

Jabłko 'Lobo'	SK	2 m/s 75°C	BK	200 W	kinetyka suszenia wytrzymałość na ściskanie moduł Younga	-	Banaszak i Pawłowski, 2018 [115]
		0,9 m/s 75°C			kinetyka suszenia właściwości mechaniczne i akustyczne	KS	Banaszak i Pawłowski, 2015 [116]
		0,7 m/s 45 C		100 W (26 kHz)	kinetyka suszenia wymiana masy i ciepła szybkość suszenia zużycie energii	KS, hx, WE	Kowalski i Mierzwa, 2015 [117]
Jabłko 'Royal Gala'	SK	1, 2, 3 m/s 45, 60°C	BK	75W	wewnętrzna dyfuzyjność wody mikrostruktura	De, LB	Magalhaes i inni, 2017 [118]
		1, 2, 3, 5 m/s 45, 60°C			kinetyka suszenia zawartość witamin B ₁ , B ₂ , B ₃ , B ₅ , B ₆ , D i E	KS	Fernandes i inni, 2014 [119] Fernandes i inni, 2015 [120]
	SK	1,2,3, 5 m/s 45, 60°C	BK	75 W (21,8 kHz) 30,8 W/cm ³	aktywność enzymów zawartość fenoli dyfuzyjność wody	KS	Rodrigues i inni, 2017 [84]
Jabłko 'Rubin'	SK	2,3,4 m/s 40, 50°C	BK	200W	zużycie energii zmiana barwy aktywność wody	Hx	Kowalski i inni, 2017 [121]
					kinetyka suszenia wymiana masy i ciepła zmiana barwy aktywność wody zużycie energii	KS, hx, WE	Kowalski i inni, 2015 [114]
Jagoda	SK	5 m/s 50 °C	BK	45 W (20 kHz)	kinetyka suszenia mikrostruktura zawartość antocyjanów aktywność wody	KS	Konopacka i inni, 2015 [122]
Kapusta głowiasta biała	SK	2 m/s 60°C	K	492,3; 1131,1 W/m ² (20kHz)	Kinetyka suszenia zmiana barwy związki fenolowe witamina C glukozynolany indolo-3-acetonitryl askorbigen	KS, De, hx	Tao i inni, w druku [123]
Malina	SK	0,4 m/s 55°C	BK	100, 200W	zmiana barwy, aktywność wody	hx	Kowalski i inni, 2016 [124]
Malina 'Polana'	SK	2 m/s 55°C	BK	100, 200W 26kHz	Rehydratacja Mikrostruktura	hx	Szadzińska i inni, 2019 [125]
Maniok (Manihot esculenta)	SK	1 m/s 40°C	BK	6, 12, 19, 25, 31 kW/m ³ (21,8 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci właściwości strukturalne, teksturalne i akustyczne	KS, De	Ozuna i inni, 2014 a [106] Ozuna i inni, 2014b [107]
Mango (Magnifera indica L.)	SK	1 m/s	K	45 W (20 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci skurcz zawartość polifenoli pojemność antyoksydacyjna	KS	Mendez i inni, 2015 [93]
Marakuja (skórka)	SK	1 m/s 40, 50, 60, 70°C	BK	30,8 kW/m ³ (21,8 Hz)	Kinetyka suszenia Pojemność antyoksydacyjna Związki fenolowe Mikrostruktura	KS, De, hx	do Nascimento i inni, 2016 [126]

Marchew 'Nantesa'	SK	1 m/s 40 °C	BK	75 W (21, 8 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci gęstość obciążenia	KS, De, hx	Carcel i inni, 2011 [127]
	SK	1 m/s 30, 40, 50, 60, 70°C	BK	-	-	-	Garcia-Perez i inni, 2006 [128]
	SK	1 m/s 40 °C	BK	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 W (21,8 kHz)	-	-	Garcia-Perez i inni, 2008 [129]
	SK	0,5-12 m/s 40, 50 °C	BK	75 W 154,3 dB (21,8 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci	KS, De	Garcia-Perez i inni, 2007 [96]
	LA	2 m/s -14 °C, 7% RH	BK	45 W 19,5 kW/m ³ (20 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci	KS, De	Garcia-Perez i inni, 2012a [89]
Marchew	SK	2 m/s 24-26 °C 30-46%RH	BK	25, 50, 75, 100 W (20 kHz)	kinetyka suszenia	-	de la Fuente Blanco i inni, 2006 [78]
		4 m/s 45 °C		75, 125, 200 W	kinetyka suszenia zmiana barwy aktywność wody zawartość karotenoidów i polifenoli antywność antyoxydacyjna	KS	Kroehnke i inni, 2015 [130]
		2,2; 2,8 m/s 50°C, 0,0096 kg/kg AH		100W 140 dB (25 kHz)	kinetyka suszenia prędkość przepływu powietrza	hx	Aversa i inni, 2011 [131]
		0,5 m ³ /min		150 W 130-150 dB (24 kHz)	kinetyka suszenia efektywność energetyczna	KS	Khmelev, i inni, 2011 [79]
		1 m/s 40°C		4, 8, 12, 16, 21, 25, 29, 33, 37 kW/m ³	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci	KS, De	Garcia-Perez i inni, 2009 [95]
		A: 1,3; 1,6; 3 m/s 50, 60, 70, 83, 90, 115 °C B: 1; 1,3; 1,7 m/s 22, 31°C	BK (A) K (B)	A: 155 i 163 dB B: 25, 50, 100 W (20 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci	KS, De	Gallego-Juarez i inni, 2007 [105]
		5 m/s 50 °C	BK	200 W (25 kHz)	kinetyka suszenia mikrostruktura zawartość antocyjanów aktywność wody	KS	Konopacka i inni, 2015 [122]
Mięso (Porcine Longissimus dorsi)	SK	1 m/s 40°C	BK	50 W 20,5 kW/³	kinetyka suszenia	KS	Sawicka i inni, 2015 [132]
Oliwka (liście) 'Serrana'	SK	1 m/s 40°C	BK	8, 16, 25, 33 kW/m ³ (21,8 kHz)	-	-	Carcel i inni, 2010 [133]
Papaja	P	60°C	BK				Vieira Da Silva i inni, 2018 [134]
Papryka czerwona 'Annuum'	SK	70°C	K	4 µm (24 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci czas sonikacji skurcz	KS, De	Schossler i inni, 2012 [112]
	L	46 Pa	K	4,9; 6; 6,7 µm (24 kHz)	kinetyka suszenia czas sonikacji gęstość nasypowa kolor, zawartość witaminy C rehydratacja	KS	Schossler i inni, 2012 [135]

Papryka czerwona 'Lamuyo'	SK	1m/s 30,50,70°C	BK	20,5 kW/m ³ 21,8 kHz	Kinetyka suszenia Pojemność antyoksydacyjna Związki fenolowe Witamina C	KS, De, hx	Carcel i inni, 2018 [136]
Papryka zielona	SK	2 m/s 55°C	BK	100, 200 W (26 kHz)	kinetyka suszenia zmiana barwy aktywność wody zawartość witaminy C rehydratacja	KS	Szadzińska i inni, 2015 [137]
	SK	2 m/s 54°C	BK	100, 200 W (26 kHz)	kinetyka suszenia zmiana barwy aktywność wody zawartość witaminy C rehydratacja całkowite zużycie energii	KS, De, hx	Szadzińska i inni, 2017 [138]
Persymona 'Rojo Brillante'	SK	0,5; 1; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 12 m/s 50°C	BK	75W 154,3 dB (21,8 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci	KS, De	Garcia-Perez i inni, 2007 [96]
					kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci transport masy prędkość przepływu powietrza	KS, De, hx	Carcel i inni, 2007 [139]
Pieczarka	SK	1 ms 5, 10, 15°C	BK	50W (20,5 kW/m ³) 22 kHz	kinetyka suszenia zmiana barwy pojemność antyoksydacyjna ergosterol związki fenolowe WRC, FAC	KS, De, hx	Vallespir i inni, 2019 [88]
Pistacje 'Akbart'	SK	1 m/s 25 °C	BK	150, 300 W (20 kHz)	kinetyka suszenia	KS	Kouchkzadeh i Ghobadi, 2012 [140]
	SK	1,18-2,06 m/s 23,3-27,1 °C, 24-30 % RH	BK	500, 1000 W (20 kHz)	kinetyka suszenia wydajność suszenia	KS	Kouchkzadeh, 2013 [141]
Pomarańcza (skórka) 'Navelina'	SK	1 m/s 40°C	BK	45, 90 W (21,8 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci właściwości strukturalne	KS, De	Garcia-Perez i inni, 2012 [89]
Pomidor koktajlowy (Cerasifor me)	SK	1, 2, 3 m/s 45, 60 °C	BK	75 W (21 kHz)	Zawartość karotenoidów i witamin B ₁ , B ₂ , B ₃ , B ₅ , B ₆ , D i E	KS	Fernandes i inni, 2016 [120]
Ryba solona (Gadus morhua – dorsz atlantycki)	SK	2 m/s 20 °C 30% RH	BK	25 W/kg WB (20 kHz)	kinetyka suszenia zużycie energii	KS	Bantle i Eikevik, 2014 [142]
				45 W (20 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci zużycie energii	KS, De, hx	Bantle i Hanssler, 2013 [143]
	SNT	2 m/s -10,0,10 °C	155 dB, 20,5 kW/m ³ (21 kHz)	kinetyka suszenia rehydratacja barwa tekstura	KS, De	Ozuna i inni, 2014 [144]	
Ryż	SK	-	BK	160 dB (130, 415 Hz)	kinetyka suszenia	KS	Fedorov i inni, 2010 [145]
		22 m/s 22 °C, 3,5 RH		160 dB (415 Hz)	kinetyka suszenia	KS	Korobeinikov i inni, 2008 [146]
Ryż niełuskany	SK	1,9 m/s 30,40, 50°C	BK	11,1l 14,6; 18,7 kW/m ³ 20, 25, 28, 30 kHz	całość ziaren i ich odporność mechaniczna	-	Jafari i Zare, 2017 [147]

Truskawka 'Elsanta'	SK	2 m/s 50°C	BK	100, 200W 26kHz	zmiana barwy aktywność wody	hx	Szadzińska i inni, 2016 [148]
Truskawka <i>Fragaria x ananasa</i> 'Duchesne'	SK	2 m/s 40, 50, 60, 70 °C	BK	30, 60 W (21,8 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci skurcz izotermi sorpcji	KS, De, SI, hx	Gamboa- Santos i inni, 2014 [149]
					analiza mikrobiologiczna zawartość witaminy C reakcje Mailarda rehydratacja	-	Gamboa- Santos i inni, 2014 [150]
Tymianek	SK	1, 2, 3 m/s 40, 50, 60, 70, 80 °C	BK	6,2; 12,3; 18 W/m ³ (21,8 kHz)	kinetyka suszenia wymiana masy i ciepła	KS, hx	Rodriguez i inni, 2014 [151]
Wiciokrzew Japoński (<i>Flos loniceræ</i>)	SK	1 m/s 40, 50, 60, 70 °C	BK	40, 60, 90, 120, 160 W (20kHz)	kinetyka suszenia odległość od transduktora dyfuzyjność wilgoci	De	Liu i inni, 2014 [152]
Winogrono (wytłoki) 'Bobal'	SK	1; 1,5; 2; 3 m/s 40, 50, 60, 70 °C	BK	30,8 kW/m ³ 154,1 dB (21,8 kHz)	kinetyka suszenia efektywność energetyczna	KS, De, hx	Clemente i inni, 2014 [153]
Winogrono (skórka) 'Bobal'	SK	1 m/s 40, 50, 60, 70 °C	BK	45 W (21,7 kHz)	kinetyka suszenia zawartość fenoli pojemność antyoksydacyjna	KS, De	Cruz i inni, 2016 [154]
Winogrono (łodyga) 'Bobal'	SK	1 m/s 40, 60 °C	BK	45, 90 W (21,8 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci efektywność energii	KS, De, WE, hx	Garcia-Perez i inni, 2013 [155]
Wiśnia	SK	5 m/s 50°C	BK	200 W (25 kHz)	kinetyka suszenia mikrostruktura zawartość antyocyanów aktywność wody	KS	Konopacka i inni, 2015 [122]
Ziemniak	SK	1; 1,3; 1,7 m/s 22, 31 °C	A: BK B: K	A: 155, 163 dB B: 25, 50, 100 W (20 kHz)	kinetyka suszenia dyfuzyjność wilgoci	DK, De	Gallego-Juarez i inni, 2007 [105]
Ziemniak 'Belana'	SK	70°C	K	2 i 4 μm (24 kHz)	kinetyka suszenia właściwości strukturalne	KS	Schossler i inni, 2012 [156]
Ziemniak 'Denar'	SK	50°C	BK	100, 200 W (25 kHz)	kinetyka suszenia zmiana barwy rehydratacja zużycie energii	KS	Kroehnke i inni, 2014 [157]
Ziemniak 'Monalisa'	SK	1 m/s 40	BK	6, 12, 19, 25, 31, 37 kW/m ³ (21,8 kHz)	kinetyka suszenia, dyfuzja wilgoci, transport masy	KS, De, hx	Ozuna i inni 2011 [73]
Żeń-szeń	SK	0,5 m ³ /min 40°C	BK	150 W 30-150 dB (24 kHz)	kinetyka suszenia efektywność energetyczna	KS	Khmelev i inni, 2011 [79]

P – suszenie próżniowe, LA – liofilizacja pod ciśnieniem atmosferycznym, L – liofilizacja, BK – bez kontaktu, K – kontaktowe, SK – suszenie konwekcyjne, SNT – suszenie w niskiej temperaturze, De – efektywna dyfuzyjność, KS – kinetyka suszenia, hx – współczynnik transportu masy/ciepła, LB – liczba Biota, WE – wydajność energetyczna

2.5.6. Techniki suszenia ze wspomaganie ultradźwiękowym

W technologii suszenia z wykorzystaniem ultradźwięków znane są dwa podstawowe rozwiązania dla przekazywania energii fal akustycznych do materiału. Pierwsze z nich to bezpośredni kontakt materiału suszonego z emitorem ultradźwięków (suszenie kontaktowe), natomiast drugie rozwiązanie przewiduje rozpraszanie fali akustycznej pochodzącej z emitera w powietrzu (innym medium) i przekazywanie jej do materiału. Innym rozwiązaniem może też być zastosowanie ultradźwięków w obróbce wstępnej.

Suszenie wspomagane ultradźwiękami bezkontaktowe

Zastosowanie rozwiązania bezkontaktowego w suszeniu żywności zostało szeroko opisane w literaturze, a prace na ten temat zostały zestawione w rozdziale 2.4.5. Jak już wspomniano, głównym problemem stosowania suszenia bezkontaktowego jest dostarczenie odpowiedniej porcji energii akustycznej do materiału. Jak wykazano, suszenie z wykorzystaniem ultradźwięków pozwala na zredukowanie ilości energii potrzebnej do przeprowadzenia procesu. Zastosowanie ultradźwięków w procesie suszenia wymaga dopasowania takich parametrów suszenia jak gęstości obciążenia masowego, geometrii próbki, prędkości przepływu powietrza oraz temperatury procesu.

Suszenie wspomagane ultradźwiękami kontaktowe

W suszeniu kontaktowym powierzchnia próbki jest w ścisłym kontakcie z powierzchnią radiatora. Ten typ suszenia charakteryzuje się dużą mocą fal akustycznych przekazanych bezpośrednio do próbki, ponieważ pominięty jest transport energii przez powietrze i jej rozpraszanie oraz częściowe pochłonięcie. Fala ultradźwiękowa o dużej mocy jest w stanie wnikać głęboko w materiał, potęgując zjawiska charakterystyczne dla zastosowania ultradźwięków. W tym przypadku dużą rolę odgrywa efekt ogrzewania próbki. Zastosowanie bezpośredniego kontaktu sprzyja zjawiskom kawitacyjnym, które mogą przyczynić się do usunięcia wody silnie związanej w materiale i uzyskać niższe ilości wilgoci w materiale niż w przypadku suszenia gorącym powietrzem. Takie rozwiązanie technologiczne niesie ze sobą pewne niedogodności i wady, np.:

- może być stosowane tylko dla małej skali, ze względu na ograniczoną powierzchnię radiatora,
- efekt ogrzewania – nagrzewanie materiału może być zbyt intensywne i zniwelować korzyści z zastosowania niższej temperatury medium grzewczego,
- problem z zablokowaniem granicy faz,
- wymagania higieniczne np. konieczność każdorazowego demontażu radiatora i jego dezynfekcja.

3. Efektywność suszenia

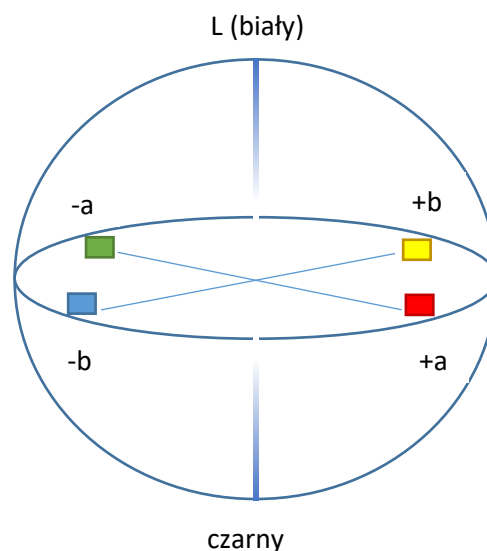
3.1. Jakość produktu

Jakość produktu jest kluczowym parametrem decydującym o atrakcyjności produktu dla konsumenta i jego wartości na rynku. W obecnych czasach wzrasta świadomość konsumentka oraz konkurencja na rynku, a także zwiększa się dostępność całej gamy podobnych produktów. Tym samym coraz większą uwagę przykładają się do uzyskiwania jak najlepszych cech jakościowych produktu. Kluczowe dla konsumenta przestają być tylko cechy sensoryczne, takie jak wygląd, barwa, zapach, smak, ale ważną rolę zaczynają odgrywać tzw. ukryte cechy jakości, np. zawartość składników o charakterze prozdrowotnym.

3.1.1. Zmiana barwy

W ocenie żywności barwa od dawien dawna jest jednym z najważniejszych czynników decydującym o atrakcyjności produktu. W ocenie jakościowej przeprowadzanej na potrzeby przemysłu stosuje się znormalizowaną skalę barw, pozwalających w sposób obiektywny ocenić barwę i jej zmiany podczas obróbki żywności i wykorzystuje się szereg instrumentów pomiarowych, pozwalających w wygodny i powtarzalny sposób na pomiar. Skala barw zastosowana w poszczególnych pomiarach powinna być dostosowana do konkretnych potrzeb, a instrument pomiarowy odpowiednio wyskalowany. W praktyce stosuje się kilka skal (przeźroczności) barw, np.:

- przestrzeń barw RGB – jedna z najczęściej stosowanych w cyfrowej obróbce obrazu, oparta na wystandaryzowanych długościach fal odpowiadającym kolorom: czerwonemu, zielonemu i niebieskiemu. W tej przestrzeni odwzorowanie barw nie zawsze pokrywa się z obrazem rzeczywistym, ponieważ np. kolor żółty jest odwzorowany przez niebieski zielony i czerwony, gdyż barwy te nakładają się na siebie.
- przestrzeń barw HSV i HSI – (ang. Hue Saturation Value) oparta jest na przestrzeni RGB, ale stosowane w niej kolory wyznaczają jedynie osie współrzędnych, a cała przestrzeń bardziej dostosowana jest do ludzkiej percepcji barw,
- przestrzeń CIE L* a* b* (CIELab) - to najczęściej stosowana przestrzeń barw, stosowana w ocenie żywności. W bardzo dobry sposób odzwierciedla zmiany barwy w przestrzeni odpowiadającej barwom rzeczywistym. Pomiar przeprowadzony w tej skali barw można traktować jako pomiar bezwzględny, ponieważ doskonale mierzy różnice między obiektami. System pomiaru przekształca odbicie lub widmo transmisyjne obiektu w trójwymiarową przestrzeń barw przy użyciu widmowego rozkładu mocy źródła światła i funkcji dopasowania kolorów obserwatorów standardowych. Przestrzeń L* a* b* opiera się na zasadzie trójchromatycznej. Parametr L* - określa jasność (luminacja) obiektu w skali od 0-100, gdzie 0 oznacza całkowitą czerń, a 100 biel. Parametr a* określa barwę w skali od zielonego do czerwonego (magenta) w zakresie od -100 do +100, a parametr b* oznacza zmienność barwy od niebieskiego do żółtego w zakresie od -100 do 100 [158]. Schemat przedstawiający powyższe odwzorowanie barw został przedstawiony na rysunku 14.



Rysunek 14. Schemat przestrzeni barw CIELab

W przestrzeni CIELab różnicę między poszczególnymi barwami oblicza się na podstawie wzoru:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}. \quad (20)$$

Przestrzeń CIELab została zdefiniowana przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową w 1979 roku. Na przestrzeni lat definicje poszczególnych wzorców i odwzorowań barw zostały zmodyfikowane i tak np. jako odpowiednik światła dziennego stosuje się źródło światła D65, które zawiera składnik ultrafioletowy i temperaturę barwową 6500 K. W niniejszej pracy doktorskiej wszystkie badania barwy zostały przeprowadzone w skali L* a* b* [159].

3.1.2. Aktywność wody

Najczęściej stosowanym deskryptorem termodynamicznym wody jest jej aktywność. Aktywność wody jest wartością bezwymiarową i określa się ją symbolem a_w . Aktywność wody roztworów wodnych może być obliczana na podstawie wzoru przedstawionego przez Daniela i Alberty i wyrażającego się następująco:

$$a_w = e^{\frac{\Psi}{RT}}, \quad (21)$$

gdzie:

R – uniwersalna stała gazowa ($8,3145 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),

T – temperatura bezwzględna,

Ψ – potencjał wody (turgor).

W tym przypadku aktywność wody przyjmuje wartości od 0 do 1 (aktywność wody czystej), dla potencjału wody z zakresu $-\infty$ do 0. Dla materiałów o bardziej skomplikowanej strukturze, aktywność wody wyraża się poprzez stosunek prężności pary wodnej nad materiałem (f_m) do prężności pary wodnej nad czystą wodą (f_0). Ta zależność została sformułowana przez Lewisa i Randalla (1961). Wzór przyjmuje wtedy postać:

$$a_w = \left(\frac{f_m}{f_0}\right)_T \approx \frac{p_m}{p_0}, \quad (22)$$

gdzie aktywności wody odpowiada w przybliżeniu stosunkowi ciśnień cząstkowych pary wodnej odpowiednio dla materiału i wody. Wzory te są całkowicie poprawne dla pary wodnej zachowującej się w przybliżeniu jak gaz idealny. Uzyskana w ten sposób wartość aktywności wody jest podawana jako wartość wilgotności powietrza będącej w równowadze z materiałem. Aktywność wody jest parametrem ściśle związanym z temperaturą – przy wzroście temperatury, wartość aktywności wody także rośnie, dlatego istotne jest dokonywanie pomiarów w takich samych warunkach, a także ściśle zdefiniowanie warunków odniesienia. Jak wynika ze wzoru (21), aktywność wody jest związana z turgorem, gdzie, wraz ze zmniejszającą się aktywnością wody, zwiększa się naprężenie plastyczne w wyniku powstawania niezerowego naprężenia międzykomórkowego z powodu odkształcenia. Aktywność wody jest ściśle związana z innymi wielkościami chemicznymi, takimi jak potencjał chemiczny i ciśnienie osmotyczne, zaprezentowanymi we wzorach poniżej:

$$\mu = \mu_0 + RT \ln(a_w), \quad (23)$$

gdzie:

μ – potencjał chemiczny,

μ_0 – potencjał chemiczny w warunkach standardowych,

R – stała gazowa,

T – temperatura.

$$-\ln a_w = \frac{\Pi M_w}{RT \rho_w}, \quad (24)$$

gdzie:

Π – ciśnienie osmotyczne,

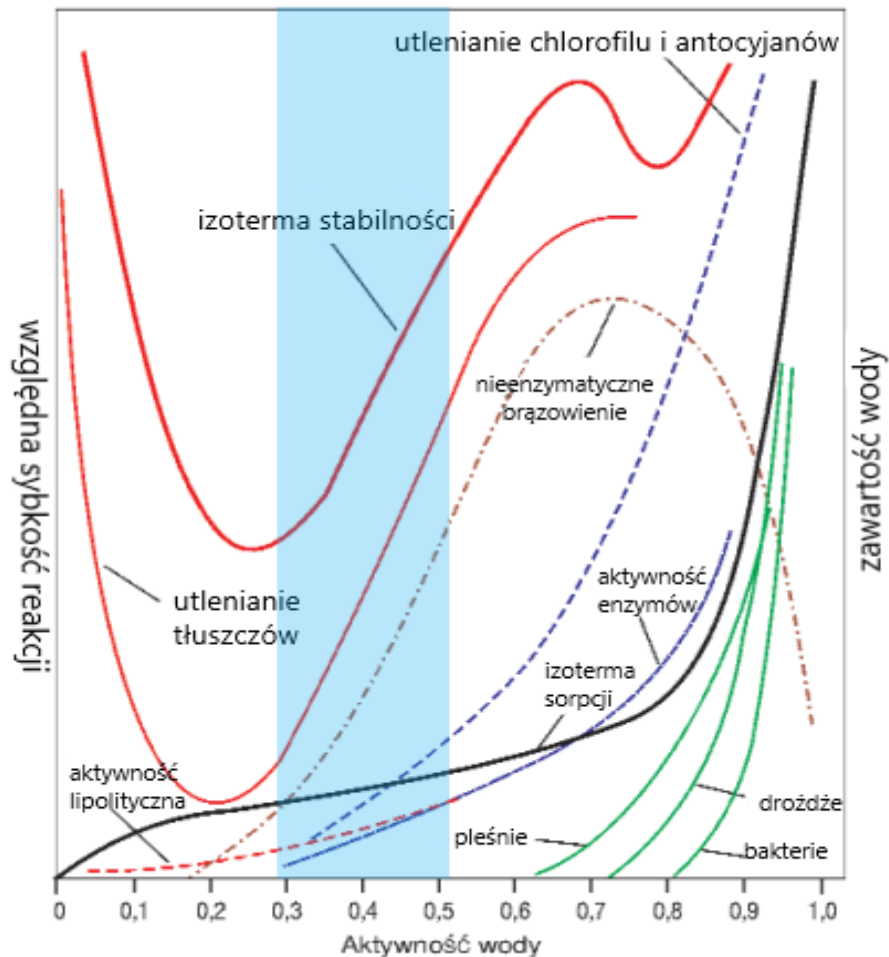
M_w – masa molowa,

ρ_w – gęstość.

Aktywność wody jest jednym z kluczowych parametrów w przemyśle spożywczym, parametrem który wpływa na szybkość reakcji biochemicznych i procesów biologicznych, tym samym determinuje przydatność produktu do przechowywania. Parametr ten określa w jakim stopniu woda w produkcie jest związana, określając jej dostępność dla mikroorganizmów czy reakcji enzymatycznych. Woda może być wiązana m.in. przez takie związki jak: sole, węglowodany czy białka. Dlatego nie zawsze wysoka zawartość wilgoci w materiale świadczy o niewielkiej przydatności produktu do przechowywania (np. dla dżemu zawartość wilgoci może dochodzić do 90%, a aktywność wody być w granicach 0,7). Okres przydatności do spożycia danego produktu może ulec skróceniu, jeśli będą zachodziły w nim zmiany wynikające m.in. z rozwoju mikroorganizmów lub reakcji enzymatycznych, odpowiadających np. za brązowienie czy zmiany tekstury produktu. Aktywność wody jest ściśle powiązana ze wspomnianym wyżej wzrostem mikroorganizmów, ponieważ dostępność wody jest jednym z istotniejszych czynników warunkujących ich wzrost i rozwój.

Wpływ aktywności wody na trwałość żywności został dobrze zaprezentowany za pomocą tzw. „map żywności”, pokazujących względną szybkość niepożądanych zmian w odniesieniu do aktywności wody. Takie mapy dobrze odzwierciedlają wpływ stanu termodynamicznego wody na właściwości żywności oraz jej jakość i trwałość. Znajomość kinetyki poszczególnych procesów wzrostu mikroorganizmów, a także przebiegu reakcji enzymatycznych od aktywności wody pozwala na projektowanie procesów technologicznych obróbki żywności, jak również przewidywać finalne cechy produktu. Rysunek 15 przedstawia jedną z najbardziej znanych map stabilności żywności, zaproponowaną w 1970 roku przez Labużę, gdzie położenie względem izotermy sorpcji zostało powiązane z aktywnością wody oraz czynnikami, które decydują o cechach i trwałości żywności. Dla większości mikroorganizmów optymalny zakres aktywności wody wynosi 0,990-0,995, natomiast minimalne wartości przy których następuje ich rozwój dla większości wynoszą w przybliżeniu 0,9 dla bakterii, 0,8 dla drożdży oraz 0,7 dla pleśni. Występują również wyjątki drobnoustrojów, mogących rozwijać się w zakresie wartości granicznych, np. 0,97 dla *Clostridium botulinum* typu E, 0,75 dla bakterii halofilnych, 0,90-0,62 dla drożdży z rodzaju *Saccharomyces* oraz 0,61 dla pleśni kserofilnej *Xeromyces bisporus*. Ilość dostępnej wody ma także wpływ na konformację białek enzymatycznych, które są kluczowe dla aktywności i zdolności katalitycznych enzymów. Reakcje enzymatyczne wymagają wody jako ośrodka reakcji umożliwiającego transport substratu do enzymu lub jako niezbędnego substratu reakcji. W przypadku reakcji enzymatycznych, w których woda występuje jako substrat, aktywność wody warunkuje całość przemian, a jej graniczna wartość wynosi około 0,3. Dla reakcji enzymatycznych, gdzie woda zapewnia odpowiednią strukturę przestrzenną enzymu, minimalna wartość aktywności wody może wynosić około 0,1. Utlenianie lipidów może przebiegać przy minimalnej ilości dostępnej wody. Wzrost a_w powoduje do pewnego momentu zahamowanie reakcji utleniania, jednak przy wyższych wartościach aktywności wody znów następuje zwiększenie szybkości reakcji. Zahamowanie reakcji utleniania przez wodę może być tłumaczone np. poprzez utrudnienie dyfuzji tlenu do miejsca w którym zachodzi reakcja, lub obniżeniem stężenia jonów metali, katalizujących reakcję. Odwrotne zjawisko można zaobserwować dla reakcji nieenzymatycznego brunatnienia (reakcje Mailarda). Dzięki większej stabilności substancji takich jak witamina C, barwniki

hemowe, chlorofile i antocyjany w zakresie niskich wartości aktywności wody, reakcje te mają miejsce dopiero gdy woda zaczyna pełnić funkcję rozpuszczalnika. Szybkość reakcji wzrasta wraz ze wzrostem a_w i osiąga maksimum w zakresie 0,3-0,7. Może być to spowodowane efektem rozcieńczenia lub hamowania przebiegu reakcji ze względu na wodę jako produkt tej reakcji. Oprócz aktywności wody, na reakcje przedstawione poniżej na „mapie żywności” mają wpływ takie czynniki jak pH, temperatura, gęstość, a także krystalizacja występująca w układach odwodnionych. „Mapy żywności” można sporządzać dla każdego rodzaju żywności ukazując krytyczne wartości a_w [160].



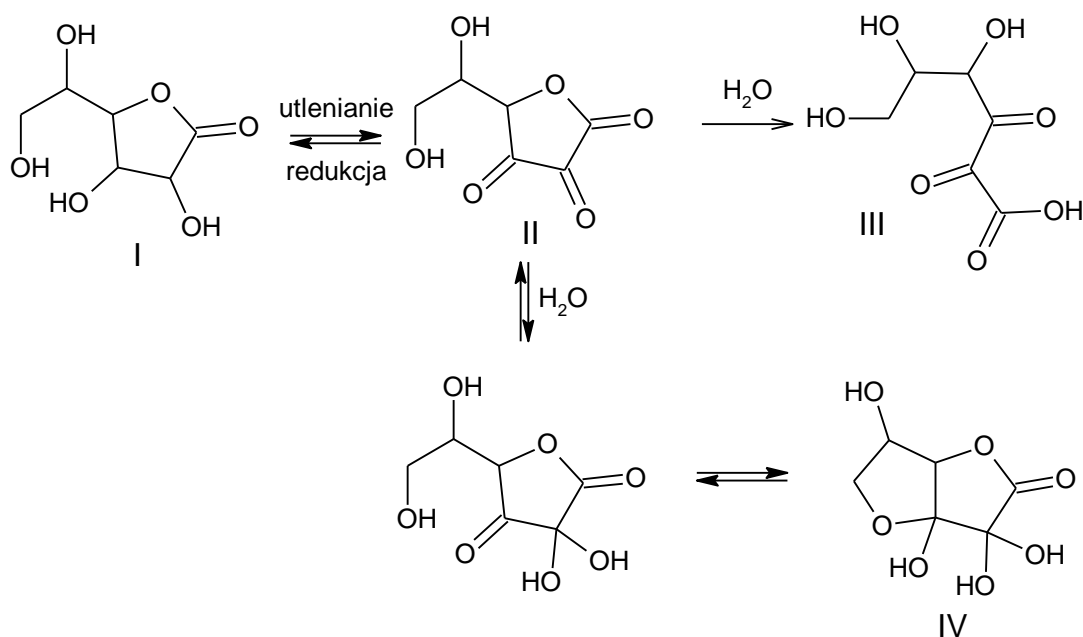
Rysunek 15. Mapa stabilności żywności jako funkcja aktywności wody (na podst. [160] oraz [161])

3.1.3. Związki o potencjale bioaktywnym

Składniki o potencjale bioaktywnym stanowią szeroką grupę związków o zróżnicowanym charakterze chemicznym i biochemicznym, które są syntetyzowane m.in. przez rośliny. W dużej mierze człowiek nie jest w stanie sam wytwarzać tego typu związków. Żywność bogata w witaminy i fitozwiązki nie tylko poprawia ogólną kondycję organizmu, ale może także przeciwdziałać zmianom chorobowym, i rozwojowi szkodliwych mikroorganizmów. Obecnie jakość produktów coraz częściej jest wiązana z zawartością związków o potencjale bioaktywnym.

Witamina C

Witamina C to zwyczajowa nazwa kwasu askorbinowego ((R)-3,4-dihydroksy-5-((S)-1,2-dihydroksyetylo)furan-2(5H)-on wg. IUPAC). Kwas askorbinowy jest dla człowieka egzogennym (musi być dostarczany wraz z pokarmem, organizm nie potrafi samodzielnie go syntetyzować), niezwykle ważnym związkiem, biorącym udział w szeregu reakcji biochemicznych, takich jak reakcje hydroksylacji, a także biosyntezie katecholamin, hydroksyproliny i kortykosteroidów. Jest w pełni przyswajalny przez organizm ludzki i rozprowadzany w całym ciele, a jego najwyższe stężenie znajduje się w przysadce mózgowej i nadnerczach. Około 3% całkowitej ilości witaminy C w organizmie jest wydalana z moczem w postaci kwasu askorbinowego, dehydroaskorbinowego i innych produktów jej degradacji [162]. Kwas askorbinowy występuje w postaci czterech izomerów: kwasu L-askorbinowego (R, S), kwasu D-askorbinowego (S, R), kwasu L-izoaskorbinowego (S, S), kwasu D-izoaskorbinowego (R, R).



Rysunek 16. Kwas askorbinowy i jego produkty utleniania (rysunek własny wykonany w programie ChemSketch), gdzie: I – kwas askorbinowy, II - kwas dehydroaskorbinowy, III – uwodniony hemiketal kwasu dehydroaskorbinowego, IV - kwas 2,3-diketogulonowy

Kwas askorbinowy jest obecny niemal we wszystkich organizmach roślinnych i zwierzęcych, gdzie substratem do jego tworzenia jest D-glukoza. Jego duża ilość znajduje się w owocach dzikiej róży, czerwonej i czarnej porzeczce oraz w owocach cytrusowych. Może być także syntezowany chemicznie.

Zalecane dzienne spożycie witaminy C jest różne w różnych krajach i waha się w granicach od 30-100 mg/dzień. Spożywanie witaminy C sprzyja przyswajaniu żelaza. Wiele doniesień naukowych mówi o pozytywnym wpływie dużego stężenia kwasu askorbinowego na przyswajalność żelaza niehemowego w dwunastnicy, dlatego wiele suplementów diety dostępnych na rynku zawierających żelazo jest łączonych z witaminą C [163] [164].

W przemyśle spożywczym kwas askorbinowy jest wykorzystywany jako przeciwutleniacz i stabilizator kwasowości i funkcjonuje pod nazwą E300. Jest niezbędny do tworzenia białka kolagenowego, które utrzymuje prawidłową kondycję skóry i tkanki łącznej. Witamina C działa antyszkorbutowo. Jej niedobór powoduje kruchość i pękanie ścian naczyń włosowatych, powodując krwawienie z dziąseł, może również powodować utratę zębów, a także trudne gojenie się ran oraz choroby stawów [165].

Witamina C łatwo ulega degradacji w procesie utleniania, szczególnie w wysokiej temperaturze, jak również w obecności jonów metali (np. żelazo, miedź i srebro). Duże straty występują podczas obróbki żywności, gdzie każdy kolejny etap przetwarzania, szczególnie wymagający poddania materiału działaniu wysokiej temperatury (np. blanszowaniu, smażeniu, suszeniu czy gotowaniu), jak również przechowywanie, skutkuje nieodwracalnymi przemianami kwasu askorbinowego i dehydroaskorbinowego, powodując utratę aktywności biologicznej jako witaminy C. Aby zapewnić wysoką zawartość kwasu askorbinowego w gotowym produkcie, bez konieczności wprowadzania go jako dodatkowego składnika, poszukuje się nowych rozwiązań technologicznych umożliwiających ograniczenie degradacji tej witaminy.

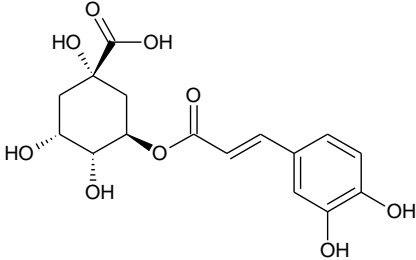
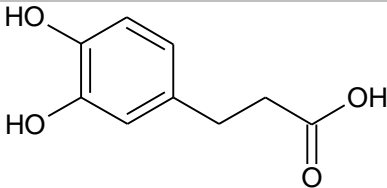
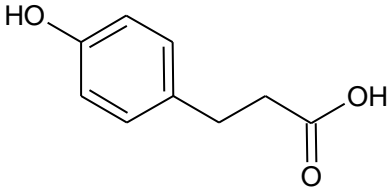
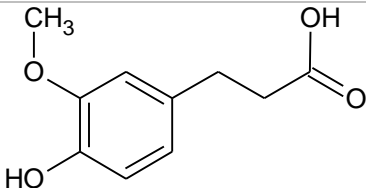
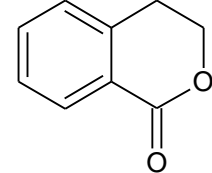
Związki fenolowe

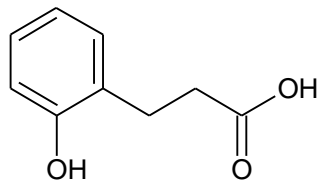
Związki fenolowe to bardzo szeroka grupa związków, które występują naturalnie wyłącznie w roślinach, ponieważ tylko one są zdolne do syntezy pierścienia aromatycznego. Wśród nich wyróżnić można takie typy związków jak kwasy fenolowe, flawonoidy (flawony, flawonole, flawonony, flawononole, izoflawony i flawany) a także związki aminofenolowe. Związki fenolowe pochodzenia roślinnego to metabolity wtórne, które powstają podczas naturalnego rozwoju rośliny, jak również w odpowiedzi na czynnik stresogenny (susza, promieniowanie słoneczne, atak patogenu). W swojej budowie zawierają pierścień aromatyczny, do którego dołączone są grupy hydroksylowe oraz różne inne podstawniki. Związki fenolowe mogą być produkowane także syntetycznie. Mają zastosowanie w przemyśle spożywczym jako środek zapobiegający psuciu się żywności, natomiast ich dodatek podlega ścisłym regulacjom prawnym [166].

Do najpowszechniej występujących w roślinach związków fenolowych należą: proste fenole, kwasy fenolowe, flawonoidy, taniny, kumaryny, stilbeny, lignany i ligniny. Biosynteza związków fenolowych głównie związana jest ze szlakiem kwasu szikimowego. Powstająca w szlaku szikimowym fenyloalanina, w wyniku deaminacji przekształca się w kwas cynamonowy i jego pochodne. Podstawowym szkieletem kwasów hydroksybenzoesowych jest C₆-C, natomiast hydroksycynamonowych C₆-C₃. Dużą grupę wśród związków fenolowych stanowią flawonoidy o budowie łańcucha węglowego C₆-C₃-C₆. Różnią się one stopniem utlenienia oraz liczbą i pozycją przyłączonych grup hydroksylowych, metoksylowych oraz związanych glikozydowo cukrów. W tej grupie znajdują się m.in. flawonole zawierające w pierścieniu heterocyklicznym grupę ketonową, nienasycone wiązanie podwójne oraz dodatkową grupę hydroksylową w pozycji 3. W tabeli 5 przedstawiono zestawienie związków fenolowych oznaczanych w niniejszej pracy wraz z najważniejszymi ich właściwościami.

Funkcje biologiczne polifenoli zależą od ich szlaków przemian metabolicznych w przewodzie pokarmowym i struktury chemicznej powstałych metabolitów.

Tabela 5. Zestawienie związków fenolowych oznaczanych w badaniach zasadniczych

Nazwa	Wzór chemiczny	Właściwości
kwask chlorogenowy		<ul style="list-style-type: none"> ▪ ester kwasu (-)-chinowego i kawowego, ▪ wykazuje dużą aktywność przeciwutleniającą, ▪ występuje naturalnie w yerba mate i wielu innych owocach i warzywach, ▪ spowalnia wydzielanie glukozy do krwi po posiłku ▪ działanie żółciopędne [167], ▪ stymuluje produkcję przeciwciał IgG ▪ wykazuje działanie przeciwbakteryjne, przeciwwirusowe i przeciwgrzybiczne
kwask kawowy		<ul style="list-style-type: none"> ▪ przeciwdziała oksydacji lipoprotein i lipidów oraz recyrkulacji α-tokoferolu w formę aktywną, ▪ chroni komórki endotelium przed uszkodzeniami wywołanymi przez utlenioną frakcję LDL ▪ bardzo dobrze przyswajany przez organizm ▪ działanie żółciopędne ▪ stymuluje produkcję przeciwciał IgG ▪ hamuje aktywność oksydazy porównywalnie do allopurynolu [168]
pochodne kwasu p-kumarynowego	 <p>kwask p-kumarynowy</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ działanie antymutagenne [169], ▪ właściwości przeciwplatekcyjne, ▪ właściwości antybakteryjne szczególnie przeciw bakteriom Gram-dodatnim poprzez podwójne mechanizmy uszkodzenia, a mianowicie zwiększenie przepuszczalności błony komórkowej bakterii przez i związanie z anionem fosforanowym DNA,
kwask ferulowy		<ul style="list-style-type: none"> ▪ działanie żółciopędne ▪ właściwości przeciwplatekcyjne [170], ▪ działanie przeciwzapalne, ▪ silne właściwości antyoksydacyjne
izokumaryna		<ul style="list-style-type: none"> ▪ chroni rośliny przed porażeniem chorobami, ▪ jej produkcja w roślinach może być stymulowana ozonem [171], ▪ może odpowiadać za gorzki smak w marchwi

<p> pochodne kwasu hydroksycynamonowego</p>	 <p> kwas 2-hydroksycynamonowy</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ najbardziej rozpowszechnione w roślinach pochodne fenolokwasów, ▪ występują w formie estrów glukozy lub kwasu chinowego, ▪ właściwości antybakteryjne szczególnie przeciw bakteriom Gram-dodatnim, ▪ właściwości przeciwpłytkowe,
---	---	--

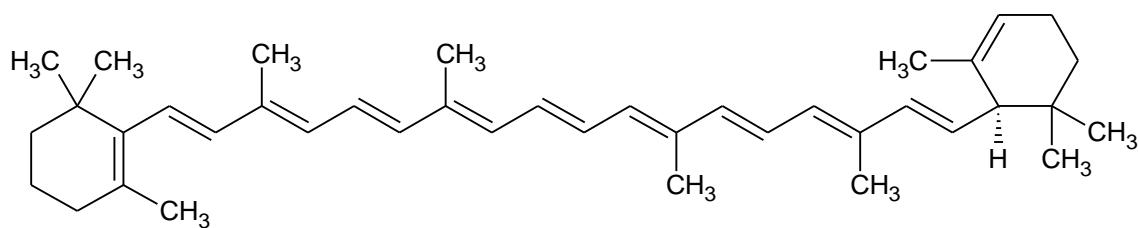
Związki fenolowe mają szereg pozytywnych właściwości, np.

- mają działanie prozdrowotne, tj. blokują związki powstające na szlakach metabolicznych niektórych substancji rakotwórczych, np. 4-nitrochinolino-1-tlenków, chronią organizm przed szkodliwym działaniem promieni UV, mogą wykazywać działanie antyalergiczne, przeciwzapalne, antyhepatotoksyczne, antymutagenne i przeciwmiażdżycowe, a także profilaktyczne w chorobach sercowo-naczyniowych,
- mają działanie przeciwutleniające (neutralizują reaktywne formy tlenu, hamują powstawanie wolnych rodników, wykazują działanie inhibitujące w stosunku do enzymów z grupy oksydaz, a w stosunku do enzymów o działaniu przeciwutleniającym - działanie wspomagające, sprzyjają chelatowaniu jonów metali (żelaza, miedzi) [172]
- znalazły zastosowanie w kosmetologii, a także w przetwórstwie żywności jako substancje konserwujące.

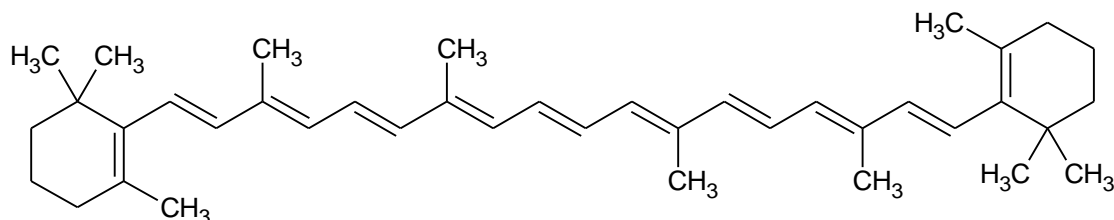
Związki fenolowe wykazują dużą wrażliwość na różnorodne procesy technologiczne. Oszmiański i inni wykazali, że podczas produkcji soku, procesy mechaniczne (tj. tłoczenie) mogą mieć największy wpływ na utratę związków fenolowych w porównaniu do surowca. Jednocześnie dużą rolę odgrywają procesy termiczne (np. zagęszczanie), które także obniżają zawartość polifenoli w produkcie [173]. Na podstawie badań Nowackiej i innych można zaobserwować negatywny wpływ obróbki technologicznej na zawartość polifenoli, gdzie zaraz po rozmrażaniu (-18°C) i rehydratacji, suszenie (konwekcyjne) plasuje się na trzeciej pozycji pod względem wielkości strat związków fenolowych generowanych przez proces. Zastosowanie modyfikacji procesu suszenia (np. suszenia mikrofalowego lub promiennikowego) prowadziło do mniejszych strat tych związków. Poszukiwanie najkorzystniejszych rozwiązań technologicznych może pomóc ograniczyć te straty [174].

Karotenoidy

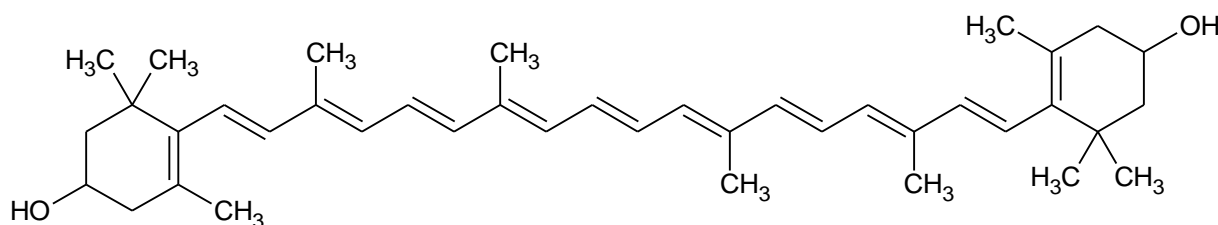
Karotenoidy są związkami nadającymi surowcom roślinnym kolor od żółtego przez pomarańczowy do czerwonego. Barwniki te należą do grupy tetraterpenów. Występują we wszystkich tkankach roślinnych, które mają zdolność do fotosyntezy jako składniki chloroplastów. Spośród karotenoidów można wyróżnić dwie grupy: karoteny (węglowodory) i ksantofile (zawierające w strukturze tlen). Wybrane karotenoidy oznaczane w badaniach jakościowych zostały przedstawione na rysunku 17.



α - karoten



β - karoten



luteina

Rysunek 17. Budowa chemiczna wybranych karotenoidów (rysunek własny wykonany w programie ChemSketch)

Karotenoidy w większości są rozpuszczalne w niepolarnych rozpuszczalnikach organicznych. Zawartość poszczególnych karotenoidów w roślinach jest różna, natomiast biorąc pod uwagę warzywa, wśród karotenów dominuje β -karoten, a wśród ksantofili - luteina. W owocach znajduje się szersza gama karotenoidów i np. w pomidorach dominujący jest likopen, a w owocach cytrusowych kryptoksantina.

Karotenoidy wykazują dość dużą stabilność w naturze, natomiast podczas różnego rodzaju obróbki żywności, np. podczas podgrzewania lub ekstrakcji, stają się dużo bardziej labilne. W czasie obróbki cieplnej szczególnie podatne są na izomeryzację, z pozycji *all-trans* przechodzą do mono- lub poli-*cis* izomerów. Wiąże się to z tendencją do utraty intensywności barwy wraz ze wzrastającą liczbą wiązań podwójnych typu *cis*-. Degradacja karotenoidów jest również związana z ekspozycją na tlen, światło oraz z obecnością jonów metali i enzymów.

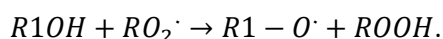
Karotenoidy stały się bardzo popularnymi dodatkami do żywności i są stosowane jako barwniki np. w serach, lodach, margarynie, ciastach i deserach. Ich prozdrowotne właściwości od wielu lat są przedmiotem badań. Karotenoidy z pierścieniem β -jonowym stanowią prekursor witaminy A, której walory zdrowotne zostały szeroko opisane w literaturze [175] [176]. Badania przeprowadzone w odniesieniu do diety bogatej w karotenoidy zawarte w owocach i warzywach, wskazują na ich antykancerogenne działanie, szczególnie w odniesieniu do nowotworów przewodu pokarmowego i układu oddechowego. Potwierdzono także działanie α - i β -karotenu oraz likopenu jako przeciwdziałające rakowi płuc oraz likopenu jako związku zmniejszającego ryzyko raka prostaty [177].

3.1.4. Zdolność antyoksydacyjna naturalnych przeciwutleniaczy

Mianem antyoksydantu określa się takie związki chemiczne, które, przy niskich stężeniach w porównaniu z ulegającymi utlenieniu substratami, znacznie opóźniają lub zapobiegają utlenianiu tego substratu. Termin substrat ulegający utlenieniu obejmuje prawie wszystkie związki (z wyjątkiem H₂O) występujące w żywności i żywych tkankach: białka, lipidy, węglowodany i DNA. Właściwości antyoksydacyjne wykazuje szereg związków pochodzenia głównie roślinnego, np. witamina C, karotenoidy czy związki fenolowe, jak również tokoferole. Antyoksydanty mogą pełnić różne funkcje:

- chronią żywność przed utlenianiem, np. przeciwdziałają oksydacji lipidów jednocześnie przeciwdziałając zmianom barwy czy zapachu,
- przyswajane przez organizm mogą ochronić go przed stresem oksydacyjnym,
- przy ograniczonym wchłanianiu mogą one powodować dezaktywowanie ksenobiotyków również w przewodzie pokarmowym,
- mogą mieć znaczenie prewencyjne w organizmie względem m.in. stanów zapalnych czy zakrzepicy [178].

Aktywność antyoksydacyjna przeciwutleniaczy polega na dezaktywowaniu reaktywnych form, np. tlenu, azotu, czy wolnych rodników. Większość naturalnie występujących antyoksydantów to związki fenolowe, które, dzięki występującym przy łańcuchu aromatycznym grupom hydroksylowym (R1OH), mogą przekształcać rodniki typu nadtlenkowego (RO₂[·]) w wodoronadtlenki, produkty nierodnikowe:



Wygaszanie wolnych rodników jest szczególnie istotne ze względu na coraz większą ich obecność w środowisku oraz ich wpływ na rozwój takich chorób cywilizacyjnych jak cukrzyca, otyłość, nadciśnienie, miażdżyca i nowotwory.

3.1.5. Rehydratacja

Proces rehydratacji polega na przywróceniu wysuszonemu materiałowi właściwości, jakie miał przed poddaniem go obróbce wstępnej i suszeniu, poprzez jego kontakt z wodą. Jednakże w praktyce, niezależnie od czasu nawilżania, nigdy nie osiąga się całkowitego przywrócenia cech, jakimi charakteryzował się materiał wyjściowy, ponieważ procesy obróbki wstępnej i suszenia wywołują szereg zmian w strukturze, właściwościach i składzie materiału. Podczas procesu rehydratacji zachodzą jednocześnie trzy zjawiska:

- chłonięcie wody przez tkanki wysuszonego materiału,
- zwiększenie masy i objętości próbki,
- wypłukiwanie z próbki substancji rozpuszczalnych w wodzie (cukrów, kwasów, minerałów, witamin) [179].

Procesy te zależą od cech surowca:

- porowatości,
- występowania kapilar i wgłębień blisko powierzchni materiału,
- występowania uwieczonych pęcherzyków powietrza,
- występowania struktur amorficznych i krystalicznych,
- obecności rozpuszczalnych substancji stałych,

- stopnia wysuszenia,

jak również od warunków procesowych suszenia oraz obróbki wstępnej. Procesowi rehydratacji sprzyjają porowatość oraz występowanie kapilar i wgłębień blisko powierzchni materiału, natomiast występowanie uwieczonych pęcherzyków powietrza bardzo utrudnia penetrację materiału przez wodę. Obecność w materiale struktur krystalicznych może powodować opór solwatacyjny, który spowalnia rehydratację, w przeciwieństwie do struktur amorficznych, które łatwo ulegają nasączeniu [8]. W rehydratacji, podobnie jak w suszeniu, szybkość procesu jest duża na początku i zwalnia wraz z jego postępem. Duża szybkość w początkowej fazie procesu jest spowodowana przez ssanie kapilarne na powierzchni. Zdolność materiału do rehydratacji stanowi jedną z ważniejszych cech jakościowych i może stanowić miarę jego uszkodzeń [180]. Rehydratacja zależy w dużej mierze od takich czynników jak temperatura procesu (w podwyższonej temperaturze przyrost masy przebiega szybciej i w ograniczonym czasie skutkuje większą objętością próbki), a także od rodzaju i cech medium, w jakim prowadzony jest proces, np. występowania anionów (ich obecność powoduje większą objętość materiału) oraz wartości pH wody użytej do nasączenia próbki (na przykładzie rehydratacji jabłek, największy przyrost objętości uzyskano dla prób poddanych rehydratacji w wodzie i 0,5% roztworze kwasu cytrynowego, natomiast najmniejszy dla soku jabłkowego i 16,5% roztworu sacharozy [181]).

3.2. Energochłonność procesu

Zapotrzebowanie na energię przemysłowych procesów suszenia jest niezwykle duże. W zależności od branży może wynosić 70% w przetwórstwie drewna, 50% w przemyśle tekstylnym, 27% w przemyśle papierniczym i około 12% w całym przemyśle spożywczym. Energochłonność procesu jest czynnikiem, który obok innych przyczyn wpływających na koszty procesu, stosunkowo najłatwiej usprawnić. Dlatego bardzo wiele uwagi w badaniach R&D poświęca się na rozwój tej dziedziny. Funkcjonujące obecnie regulacje prawne promują wysiłek poświęcony na ograniczenie zużycia energii w procesach przemysłowych, co tłumaczone jest działaniem prośrodowiskowym, mającym na celu ograniczenie emisji gazów cieplarnianych [182]. Nie bez znaczenia są również wciąż wzrastające koszty energii, przekładające się na rosnące ceny produktów, a także wysokie kary w odniesieniu do bezpieczeństwa i warunków pracy. Obniżenie zużycia energii może być realizowane poprzez działania w obszarach:

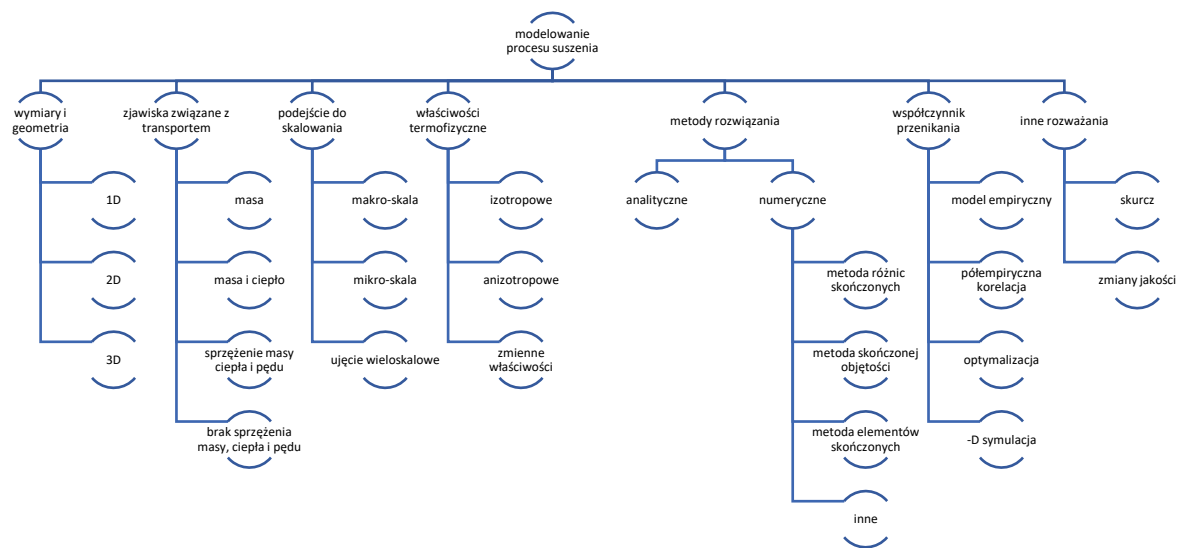
- metodologii procesu, czyli na poszukiwaniu i opracowaniu metod pozwalających na zmniejszenie zużycia energii,
- technologicznym, opierające się na wykorzystaniu wtórnych źródeł energii, ograniczeniu strat ciepła itp.,
- społeczno-ekonomicznym, polegające na kierowaniu poszukiwań energii w stronę alternatywnych źródeł,
- organizacyjnym, polegające na koordynacji procesów mających na celu oszczędne wykorzystanie energii.

W niniejszej pracy został podjęty wątek metodologii procesu, ukazującej połączenie metody konwencjonalnej z alternatywną, mającej na celu usprawnienie procesu. Praca wpisuje się w dziedzinę intensyfikacji wymiany masy i ciepła, która, poprzez skrócenie czasu trwania procesu, pozwala na obniżenie jednostkowego zużycia energii. Zwiększenie intensywności zewnętrznego transportu masy i ciepła próbowano osiągnąć poprzez zastosowanie fali akustycznej. Dostarczenie energii cieplnej do wewnątrz materiału intensyfikowano poprzez zastosowanie fali elektromagnetycznej, natomiast ujednoczenie i rozprządzenie ciepła wewnątrz materiału poprzez zastosowanie fal akustycznych. Ponadto fale akustyczne jednocześnie intensyfikują transport masy z wnętrza materiału do jego

powierzchni dzięki zwiększaniu gradientu stężeń poprzez wywołanie zmian strukturalnych wewnątrz materiału, gdzie mogą występować efekty kawitacyjne [8].

4. Modelowanie procesu suszenia

Modelowanie procesu suszenia dla materiałów biologicznych jest utrudnione ze względu na skomplikowaną geometrię próbek oraz niejednorodność struktury. Aby uprościć ten proces, często zakłada się idealny kształt próbki, wykonuje się cięcie próbek na kształty o prostej, zdefiniowanej geometrii, lub przyjmuje się rozmaite uproszczenia, np. zakładając jednorodną gęstość w całej objętości próbki. Na rysunku 18 pokazano schematycznie poziomy, na których można analizować proces oraz szereg parametrów, które należy uwzględnić, lub, upraszczając pominąć, projektując model matematyczny opisujący proces suszenia.



Rysunek 18. Parametry matematycznego modelowania biomateriałów [183]

Globalny model kinetyki suszenia opisujący transfer ciepła i masy opracowali Kowalski i Pawłowski [75] [184]. Ostateczny system sprzężonych równań różniczkowych zwyczajnych jest następujący:

$$m_s \frac{dX}{dt} = -A_m h_m \ln \frac{\varphi|_{\partial B} p_{vs}(T_m)}{\varphi_a p_{vs}(T_a)}, \quad (25)$$

$$m_s \frac{d}{dt} [(c_s + c_l X) T_m] = A_T h_T (T_a - T_m) - A_m l h_m \ln \frac{\varphi|_{\partial B} p_{vs}(T_m)}{\varphi_a p_{vs}(T_a)} + \Delta Q, \quad (26)$$

gdzie:

A_m, A_T – powierzchnie wymiany masy i ciepła,

h_m, h_T – współczynniki wymiany masy i ciepła,

$\varphi_a, \varphi|_{\partial B}$ – względna wilgotność względna powietrza suszącego, odpowiednio w czynniku suszonym i w pobliżu suchej powierzchni materiału,

p_{vs} - ciśnienie cząstkowe pary nasyconej (zależne od temperatury),

c_s, c_l - ciepło właściwe, odpowiednio: ciała stałego i cieczy,

l - utajone ciepło parowania,

ΔQ - objętościowe źródło ciepła opisujące absorpcję ultradźwięków.

Założono, że przenikanie masy i ciepła zachodzi na całej powierzchni materiału i, że materiał podlega liniowemu skurczowi objętościowemu. W rezultacie powierzchnie masy i wymiany ciepła są sobie równe i są opisane równaniem poniżej:

$$A_m = A_T = A(X) = [1 - \alpha_V(X_0 - X)]^{\frac{2}{3}} A_0, \quad (27)$$

gdzie:

α_V – objętościowy współczynnik skurczu,

X_0 - początkowa zawartość wilgoci,

A_0 - początkowa powierzchnia materiału.

Określona wartość współczynnika skurczu objętościowego została opracowana na podstawie eksperymentu.

Aby ocenić wilgotność względną $\varphi|_{\partial B}$, stosuje się równanie zaproponowane w pracy [185]:

$$\varphi|_{\partial B} = \begin{cases} 1 & \text{for } X \geq X_{cr} \\ 1 - (1 - \varphi_a) \frac{X_{cr} - X}{X_{cr} - X_{eq}} & \text{for } X_{cr} \geq X \geq X_{eq} \end{cases} \quad (28)$$

gdzie X_{cr} i X_{eq} są odpowiednio wartościami krytycznymi i równowagowymi zawartości wilgoci. Prężność pary nasyconej p_{vs} oszacowano na podstawie [186].

Model kinetyki suszenia (równania (25-28)) stanowi nieliniowy problem początkowy. Ten problem został rozwiązany przy użyciu schematu całkującego Adams-Bashforth [187]. Wybór tej metody został dokonany ze względu na dobrą zbieżność i stabilność w długoterminowych symulacjach. Pierwsze cztery kroki problemu wartości początkowej rozwiązano metodą Runge-Kutty czwartego rzędu.

Metoda stosowana do oszacowania parametrów modelu opiera się na rozwiązaniu zagadnienia odwrotnego. Dane eksperymentalne kinetyki obejmują krzywe suszenia i temperatury. W procesie optymalizacji poszukuje się najlepszego dopasowania danych eksperymentalnych i numerycznych. W modelu wprowadzono cztery nieznanne parametry opisujące proces suszenia. Mianowicie, efektywne współczynniki wymiany masy h_m i ciepła h_T , krytycznej zawartości wilgoci X_{cr} i dodatkowego źródła ciepła ΔQ (w przypadku zastosowania ultradźwięków). Funkcja celu w zagadnieniu optymalizacji wielu parametrów została sformułowana w formie

$$f(h_m, h_t, \Delta Q, X_{cr}) = \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{X_{num,i} - X_{exp,i}}{X_{max} - X_{min}} \right)^2 + \left(\frac{T_{num,i} - T_{exp,i}}{T_{max} - T_{min}} \right)^2 \right]. \quad (29)$$

Różnice danych eksperymentalnych i numerycznych zostały znormalizowane przez różnice w doświadczalnych minimalnych i maksymalnych wartościach wilgotności i temperatury. Aby oszacować nieznanne parametry, zastosowano metodę Rosenbrocka optymalizacji bezgradientowej [188]. Kryterium wyboru tej metody jest szybka zbieżności w problemach optymalizacji wielowymiarowej [189].

Modelowanie uzyskanych wyników doświadczalnych zostało przeprowadzone dla marchwi zwyczajnej.

5. Charakterystyka materiału badawczego

Skład chemiczny owoców i warzyw jest bardzo zróżnicowany. Dodatkowo, w dużej mierze jest uzależniony od wielu czynników takich jak: warunki wzrostu, zbioru, przechowywania. Surowce te w dużej mierze składają się z wody (75-96%). W suchej substancji dominują węglowodany, niewielka jest zawartość białka i tłuszczów. Niektóre owoce i warzywa mają zdolność do magazynowania skrobi, która podczas dojrzewania ulega często hydrolizie. Mięknienie owocu powoduje rozpad biopolimerów takich jak celuloza czy pektyny, które pełnią funkcje strukturotwórcze. Jednocześnie owoce i warzywa są bardzo dobrym źródłem witamin i składników mineralnych. Dodatkowo zawierają związki o potencjale bioaktywnym. Budowa morfologiczna i struktura anatomiczna ich części jadalnych jest bardzo zróżnicowana [190]. Jednym z czynników różnicujących, istotnym dla procesu suszenia, jest porowatość materiału roślinnego.

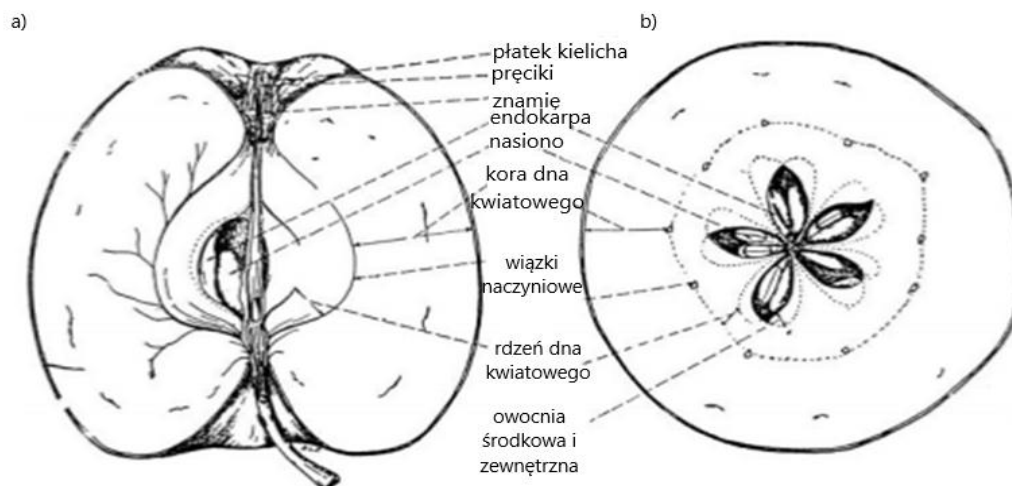
Materiał badawczy do badań został wybrany z uwzględnieniem zróżnicowania zarówno ze względu na jego strukturę (różnice wynikające z porowatości materiału), wielkości produkcji, jak i zawartości składników o potencjale bioaktywnym.

5.1. Surowce roślinne wykorzystane w badaniach wstępnych

5.1.1. Owoc jabłoni

Jabłoń domowa (*Malus domestica* Borkh.) jest głównym gatunkiem sadowniczym w Polsce i Europie. Doskonale znosi polskie warunki klimatyczno-glebowe, ma bardzo dobre predyspozycje do przechowywania, a także doskonałe walory smakowe i dietetyczne. Odmiany jabłoni dzieli się ze względu na czas osiągnięcia dojrzałości konsumpcyjnej na letnie, jesienne, zimowe oraz późnozimowe. Produkcja jabłek w 2016 stanowiła 88,67% ogólnej produkcji owoców i wyniosła 3604,3 tys. t [191]. W Polsce uprawę jabłoni w sadach prowadzi około 173,9 tys. gospodarstw rolnych, a główna koncentracja produkcji owoców jabłoni występuje w województwie mazowieckim, choć znaczne ilości produkowane są także w województwach: lubelskim, świętokrzyskim i łódzkim. Polska jest piątym na świecie producentem jabłek [192].

Schemat przedstawiający budowę owocu jabłoni w przekroju podłużnym i poprzecznym przedstawiono na rysunku 19. Wyraźnie została pokazana na nim niejednorodna struktura oraz różnice w budowie poszczególnych warstw.



Rysunek 19. Struktura dojrzałego owocu jabłoni. a) przekrój podłużny, b) przekrój poprzeczny [193]

Odmiany jabłek różnią się między sobą cechami sensorycznymi. Jest to spowodowane zarówno składem chemicznym, jak i ich strukturą. Szczególny wpływ na jakość owocu ma struktura skórki, zwłaszcza epiderma i kutykula, które tworzą barierę między środowiskiem wewnętrznym i zewnętrznym. Wg dotychczas przeprowadzonych badań ocenia się, że dojrzałe komórki miąższu owocu mają średnicę w zakresie od 50 do 500 μm i średnicę przestrzeni międzykomórkowej w zakresie 210 do 350 μm , zajmującą ok. 20-30% objętości tkanki. Są one luźno osadzone w strukturze podobnej do siatki. Włókna celulozowe, osadzone w amorficznej i anizotropowej matrycy polisacharydowej, tworzą szkielet tkanki [194].

Jabłka uznawane są za znakomite źródło monocukrów, minerałów, błonnika, witamin oraz różnych biologicznie aktywnych związków, takich jak fenole, zapewniając odpowiednią ich ilość w diecie człowieka. Uśrednione zestawienie podstawowych składników odżywczych (na podstawie odmian Red delicious, Golden delicious, Gala, Granny smith, oraz Fuji) w jabłku zostało przedstawione w tabeli 6. Analiza składu owoców jabłoni wykazała, że występują w nich takie związki fenolowe jak kwasy fenolowe, pochodne flavan-3-olu, flawonole, antocyjany oraz dihydrochalkony. Udział poszczególnych związków jest inny w każdej z części jabłka (skórka, miąższ, wyodrębniony sok, nasiona). Najwyższą zawartość związków fenolowych stwierdzono w skórce, oprócz kwasu chlorogenowego, którego głównym źródłem jest miąższ owocu. Wyjątek stanowią koniugaty kwercetyny, które stwierdzono wyłącznie w skórce. Podczas przetwarzania jabłek na sok tracone są znaczne ilości związków polifenolowych (ok. 58%), przez co obniża się ich zdolność antyoksydacyjna (nawet o 90%) w porównaniu ze świeżym owocem, ponieważ znajdują się one głównie w stałej części owocu [195]. Ilość poszczególnych składników jest zróżnicowana pod względem odmian jabłoni, regionu geograficznego, w którym są uprawiane, warunków klimatycznych i glebowych, a także innych czynników [196].

Tabela 6. Zawartości wybranych składników w świeżym jabłku [197]

Substancja	Zawartość
Witamina C	4,6 [mg/100g]
Witamina E (α-tokoferol)	0,18 [mg/100g]
β-karoten	27 [μg /100g]
Sacharoza	2,07 [g/100g]
Błonnik	2,4 [g/100g]

Wielu autorów w swoich pracach donosiło, że ekstrakty jabłkowe mają silną aktywność przeciwutleniającą i aktywność antyproliferacyjną przeciwko ludzkim komórkom rakowym [198] [199]. Zawarte w jabłkach substancje nie tylko zmniejszają ryzyko zachorowań na choroby płuc, układu pokarmowego lub krążenia, ale wykazują także właściwości bakteriobójcze oraz sprzyjają szybszemu gojeniu się błon śluzowych. W pracy [200] autorzy wykazali hamujące właściwości ekstraktów fenolowych otrzymanych z wyłoków jabłek na namnażanie się niektórych wirusów oraz wskazali możliwość zastosowania tych ekstraktów w celach leczniczych w preparatach do stosowania miejscowego w leczeniu zmian objawowych skóry opryszczkowej.

5.1.1.1. Odmiana 'Lobo'

Odmiana 'Lobo' wywodzi się z Kanady, gdzie została pozyskana jako siewka odmiany 'McIntosh' w 1898 roku. Jabłonie 'Lobo' charakteryzują się silnym wzrostem, dużą, luźną rozłożystą koroną oraz dużą plennością; w okres dojrzewania wchodzi średnio późno. Drzewa tej jabłoni wykazują małą wrażliwość na mróz oraz mączniaka, średnią na zarazę ogniową, natomiast dużą na parcha [201]. Wg Kubiaka, odmiana 'Lobo' znajduje się wśród 5 najczęściej produkowanych odmian w Polsce [202]. Odmiana 'Lobo' należy do odmian jesiennych. Termin zbioru owoców przypada na I połowę września, a przechowuje się do końca lutego. Drzewa owocują wcześnie, bardzo obficie, owocami średniej wielkości lub przy odpowiedniej pielęgnacji, dużymi. Badania przeprowadzone przez Grangera i innych wykazały, że odmiana 'Lobo' charakteryzuje się największą wydajnością plonów spośród czterech odmian (Empire, Cortland, Summerland McIntosh i 'Lobo') [203]. Odmiana ta jest mało przydatna do nasadzeń amatorskich, natomiast dobrze sprawdza się w uprawie towarowej, w szczególności na terenach o chłodniejszym klimacie. Produkcja wg GUS w roku 2016 wyniosła 135,3 tys. t, plasując odmianę 'Lobo' na dziewiątym miejscu wśród innych odmian jabłek [191].

Owoce odmiany 'Lobo' są kulisto-splaszczone, lekko stożkowate, o gładkiej, błyszczącej skórce o barwie zielonożółtej z ciemnokarminowym rozmytym rumieńcem, pokrywającym prawie całą powierzchnię. Charakterystyczne dla tej odmiany są duże, jasno-żółtoszare przetchlinki, umiejscowione po stronie pokrytej rumieńcem. Jabłka odmiany 'Lobo' są bogate w wapń a także zawierają około 343 ± 10 [mg/kg] procyjanidyn w miąższu oraz 1317 ± 14 [mg/kg] procyjanidyn w skórce [204].



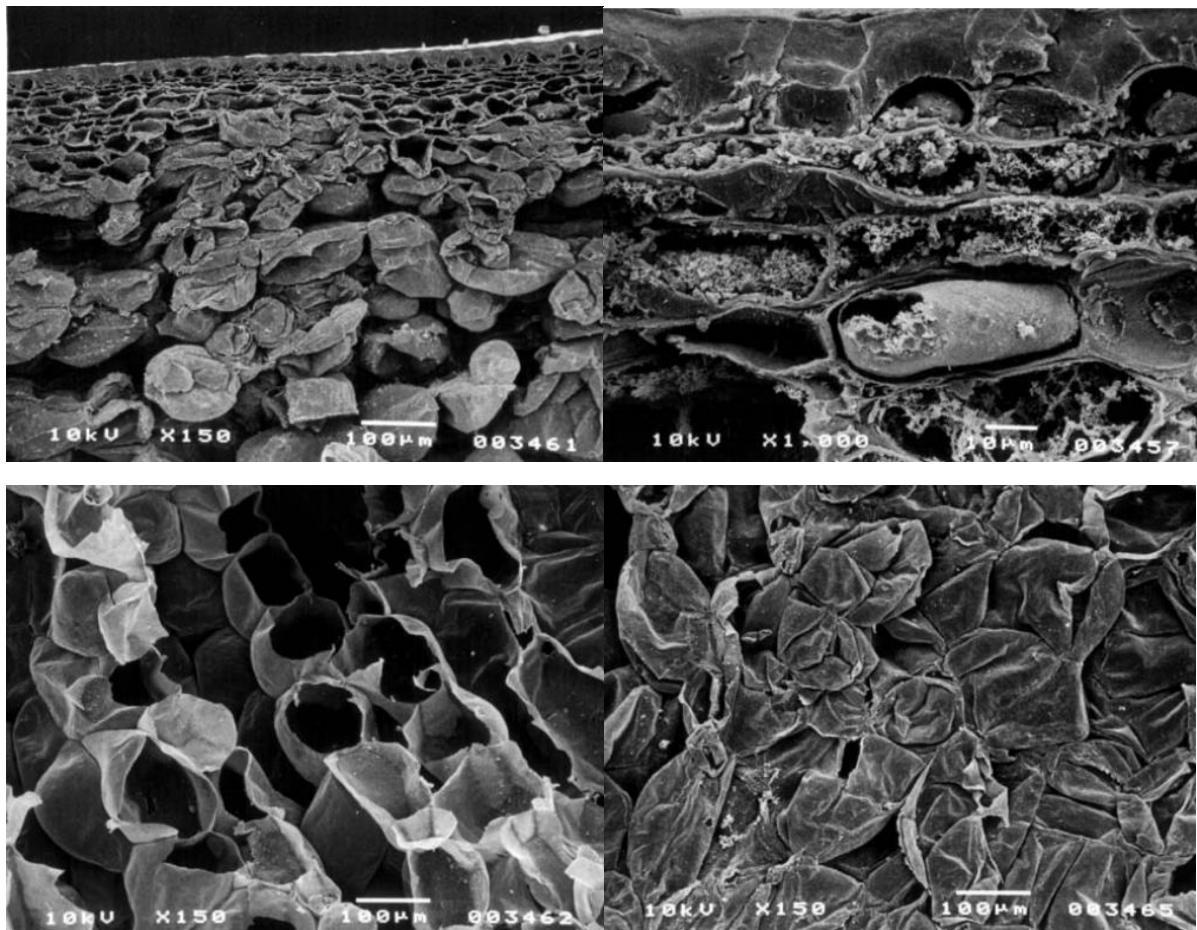
Rysunek 20. Odmiana 'Lobo' a) owocująca jabłko, b) jabłka po zbiorze [205] [206]

Pierzynowska-Korniak i inni [207] podjęli próbę znalezienia zależności między strukturą owoców jabłoni, a ich właściwościami sensorycznymi. Na podstawie zdjęć mikroskopu skaningowego (SEM)

dokonali oceny preparatów odciętych lub oderwanych. Owoce odmiany 'Lobo' charakteryzują się grubością wosku na skórce wynoszącą ok. 20 μm i bardzo spłaszczoną warstwą komórek naskórka (Rys. 21 a i b).

Obraz mikrostruktury wewnętrznej struktury komórek naskórka różni się również od ogólnego opisu dla owocu jabłoni. Znacząco cieńsze ściany komórkowe otaczają zamknięte lub otwarte pęcherzyki, mając znacznie mniej kuliste wtrącenia w porównaniu do innych opisanych w literaturze odmian jabłek (białkowe krystaloidy, drobne ziarna skrobi). Widoczny jest charakter sieci obserwowanych struktur globoidalnych, co może świadczyć o innym składzie chemicznym. Miąższ owoców tej odmiany ma regularną strukturę w preparacie cięcia (Rysunek c), z większością okrągłych komórek, widocznych w przekroju poprzecznym, o średnicy 120 mikrometrów. Mikroskopowy obraz łamanego preparatu (rysunek d) pozwala na klasyfikację owoców tej odmiany jako miękkich i delikatnych. Powyższe stwierdzenie jest związane z obecnością zapadniętych komórek, które ujawniają liczne przestrzenie międzykomórkowe [207].

Jabłka odmiany 'Lobo' są najchętniej wybierane spośród innych odmian wg badań przeprowadzonych przez Kierczyńską [208].



Rysunek 21. Zdjęcia SEM preparatów odmiany 'Lobo' a) skórka - cięcie; b)skórka - łamanie; c) miąższ - cięcie; d) miąższ - łamanie

5.1.1.2. Odmiana 'Ligol'

Odmiana Ligol należy do odmian zimowych, chętnie wybieranych ze względu na smak, atrakcyjny wygląd oraz przydatność do długoterminowego przechowywania. Owoce odmiany Ligol

należą do takich, które nie są podatne na brązowienie. Mają gładką, lepłą i tłustą w dotyku powierzchnię. Odmiana Ligol wywodzi się z Polski (została wyselekcjonowana w ISK- Skierniewice 1972 r.), ze skrzyżowania odmian Linda i Golden Deliciuos. Drzewa rosną średnio silnie a ich korona jest stożkowata, słabo zagęszczona. Jabłonie odmiany Ligol są średnio wrażliwe na mróz i parcha oraz mało podatne na mączniaka, natomiast bardzo podatne na zarazę ogniową. Owocują wcześnie, bardzo obficie z tendencją do przemienności. Owoce odmiany Ligol są duże lub bardzo duże, kulisto-stożkowate, często wydłużone; skórka owocu jest twarda, żółta, błyszcząca o rozmytym, czerwono-karminowym rumieńcu. Owoce mogą ulegać gorzkiej zgniliznie, czasami gorzkiej plamistości podskórnej, zbrązowieniu przygnieźdnemu i oparzeliznie powierzchniowej.



Rysunek 22. Odmiana 'Ligol' a) owocująca jabłoni, b) jabłka po zbiorze [209] [210]

Konarska [211] przeprowadziła badania nad zmianami struktury skórki w owocach w różnych stadiach dojrzałości: na początku wzrostu (średnica 1 cm), po osiągnięciu dojrzałości oraz po 6 miesiącach przechowywania. Na ich podstawie można stwierdzić, że grubość naskórki i ilość wosków epikutylarnych wzrasta podczas rozwoju i przechowywania owoców, ale masa owoców i jędrność maleją podczas przechowywania; szparki, soczewki i mikropeknięcia w naskórku owocowym są słabymi miejscami, w których skórka jest często rozdierana przez siły rozciągające, przyczyniając się do transpiracji i zwiększając podatność owoców na patogeny. Jednak miąższ tej odmiany, bezpośrednio po zbiorze, charakteryzuje się zwartą strukturą i dużą twardością.

Zawartość związków fenolowych w jabłkach odmiany Ligol wynosi $35,9 \pm 3,6$ [mg/100 g jabłka] a aktywność polifenolooksydazy (PPO) wobec kwasu chlorogenowego $221 \pm 7,6$ [JA/100 g jabłka], natomiast wobec katechiny wartość ta wynosi $21,9 \pm 0,8$ [JA/100 g jabłka] [212].

Produkcja sadownicza tej odmiany jabłka, w roku 2016 wynosiła 310,8 tys. t, co dawało jej czwarte miejsce wśród pozostałych uprawianych odmian [191].

5.1.1.3. Odmiana 'Rubin'

Odmiana 'Rubin' należy do grupy odmian zimowych. Odmiana ta została otrzymana w Střížovicach (Czechy) przez Otto Louda w 1960 r. ze skrzyżowania odmian 'Lord Lambourne' i 'Golden Delicious'. W Polsce odmianę tą na szerszą skalę zaczęto uprawiać dopiero od początku lat 90. Wyróżnia się wysoką jakością i wyśmienitym smakiem. Miąższ ma barwę żółtawą, jest kruchy, soczysty o szczególnym dla tej odmiany słodko-winnym smaku. Odmiana 'Rubin' należy do odmian deserowych. Od 1997 roku znajduje się w Rejestrze Odmian w Polsce, czyli jego materiał siewny może być wytwarzany i może znajdować się w obrocie w Polsce. Jabłonie odmiany 'Rubin' rosną dość silnie, mają luźną, rozłożystą koronę, są średnio wrażliwe na mróz, mączniaka i parcha, natomiast są podatne

na gumowatość drewna. Drzewo owocuje średnio wcześnie i średnio obficie, w sposób regularny. Owoce są duże i bardzo duże, kuliste, wyrównane. Skórka owocu jest gładka, barwy żółtej z czerwonym rozmyto-paskowanym rumieńcem. Jabłka odmiany 'Rubin' są wrażliwe na gorzką plamistość podskórną i gorzką zgniliznę, czasami występuje oparzelizna powierzchniowa. Termin zbioru przypada na II połowę września.



Rysunek 23. Odmiana 'Rubin' a) owocująca jabłoni, b) jabłka po zbiorze [213] [214]

Odmiana 'Rubin' cechuje się silnym wzrostem, który można ograniczyć stosując odpowiednie cięcie i rozsadę, jak również, dzięki badaniom Porebskiego i współpracowników, wykorzystując podkładki karłowate P 16 i P 61 [215].

Na podstawie, przeprowadzonych w Kotlinie Sandomierskiej, badań nad zależnością jakości kwiatów i owoców czteroletnich jabłoni odmiany 'Rubin' na podkładce M.9 od lokalizacji w kwiatostanie i owocostanie a także koronie drzew stwierdzono, że kwiaty położone centralnie charakteryzowały się krótszymi szypułkami i wyższym dnem kwiatowym, w stosunku do bocznych. Owoce wykształcone z tych kwiatów miały znacznie większą średnicę i wysokość od owoców z kwiatów bocznych i zawierały większy udział suchej masy. Charakteryzowały się natomiast niższą jędrnością miąższu niż miąższ owoców z kwiatów bocznych. Kwiaty znajdujące się w górnej partii koron cechowały się największą masą i wysokością dna kwiatowego. Największe owoce pozyskano ze środkowych części koron. Owoce te miały także największą zawartość suchej masy i liczbę nasion [216]. Świadczy to o ogromnym zróżnicowaniu owocu pochodzącego w tego samego drzewa, nie wspominając o położeniu geograficznym, czy warunkach pogodowych.

Zawartość związków fenolowych w tym surowcu kształtuje się w zakresie 47,6 – 102,6 mg/100g [217]).

5.1.2. Burak zwyczajny (ćwikłowy)

Burak ćwikłowy (łac. *Beta vulgaris* L. spp. *esculenta*) (przedstawiony na rysunku 25) należy do rodziny komosowatych (*Chenopodiaceae*) i jest zaliczany do warzyw korzeniowych. Burak ćwikłowy jest to uprawiana forma *Beta vulgaris* spp. *vulgaris* (*conditiva*) i wpisuje się w nią wiele odmian jadalnych uprawianych w obu Amerykach, Europie i Azji. W przeciwieństwie do innych podgatunków *Beta vulgaris* spp. *vulgaris* (*altissima*), znanych jako burak cukrowy, zawartość cukru w podgatunku buraka ćwikłowego jest około 2 razy mniejsza. Istotne jest, że w przeciwieństwie do innych owoców i warzyw, burak ćwikłowy zawiera tylko niewielką ilość fruktozy, a w przeważającej części sacharozę.

Fakt ten pozwala na zastosowanie buraka do zdrowych przekąsek i napojów energetycznych dla sportowców, ponieważ sacharoza w przeciwieństwie do fruktozy nie obniża zdolności wysiłkowej.

Burak zwyczajny posiada palowy system korzeniowy, którego głębokość sięga do 2 m. Liście buraka należą do długoogonkowych, posiadających blaszkę trójkątną bądź owalną. Powstawanie korzenia spichrzowego buraka o kształcie kulistym lub kulistospłaszczonym następuje głównie z części podliścieniowej łodygi, z kolei korzenie spichrzowe o wydłużonym kształcie powstają głównie z korzenia właściwego. Ze względu na różny stopień zagłębienia korzenia buraka w ziemi może on być pokryty w różnej mierze tkanką korkową na wystającej ponad poziom gruntu części. Budowa anatomiczna korzenia buraka jest bardzo charakterystyczna i różni się znacznie od innych warzyw korzeniowych, ze względu na występowanie kilku pierścieni tkanki twórczej. Powoduje to, że przekrój poprzeczny buraka tworzą koncentryczne kręgi tkanki przewodzącej (naczyniowo sitowej i tkanki przewodzącej, ułożone naprzemiennie (Rysunek 25). Kręgi tkanki mięksiszowej charakteryzują się ciemniejszą barwą niż tkanka przewodząca. Swoją barwę burak zawdzięcza głównie barwnikom betacyjaninowym, w tym betaninie. Betanina to barwnik zwany również czerwienią buraczną, który należy do grupy betalain, czyli drugorzędowych fenolowych metabolitów roślinnych. Barwnik ten jest szeroko stosowany w przemyśle spożywczym, nie tylko ze względu na dobre właściwości barwiące, ale również ze względu na własności antyoksydacyjne i przeciwzapalne, a także hamowanie peroksydacji lipidów, działanie antyrakotwórcze, antibakteryjne i antywirusowe. Oprócz betalain w buraku ćwikłowym zidentyfikowano niewielkie ilości kwasów hydroksycynamonowych takich jak galusowy, syringowy i kawowy oraz flawonoidów [218]. W tabeli 8 zestawiono zawartości wybranych składników obecnych w buraku czerwonym. Korzenie buraka ćwikłowego charakteryzują się największą zdolnością do gromadzenia azotanów spośród wszystkich warzyw korzeniowych.



Rysunek 24. Burak ćwikłowy [219]

Korzenie buraka mogą przyjmować barwę od amarantowej do ciemnoczerwonej. Pierścienie, w zależności od wybarwienia tkanki przewodzącej, mogą być wyraźne lub ledwo widoczne. Warzywa o dużych rozmiarach mają mniej intensywne zabarwienie z wyraźnymi, jaśniejszymi pierścieniami tkanki przewodzącej. Na intensywność zabarwienia korzenia buraka mają wpływ zarówno cechy odmianowe, jak również warunki środowiskowe. Ciemniejszą barwę uzyskują buraki, gdy warunki środowiskowe bardziej sprzyjały fotosyntezie niż wzrostowi i mniej związków cukrowych zostało zużytych na wzrost rośliny. Na smak buraka mają wpływ kwasy i cukry organiczne, głównie kwas jabłkowy i szczawiowy, których zawartość jest bardzo zróżnicowana w zależności od odmiany [220].

Tabela 7. Zawartość wybranych składników w buraku czerwonym [221]

Substancja	Zawartość
Witamina C	4,9 [mg/100 g]
Całkowita zawartość związków fenolowych	1,06 [g/kg]
Rozpuszczalne cukry	7,57 [g/100 g]
Sacharoza	6,5 [g/100 g]
Betanina	0,445 [g/100 g]
Błonnik	2,8 [g/100 g]
β-karoten	12 [μg/100 g]

Burak zwyczajny jest doskonały w uprawie i przechowalności. Wykazuje dużą odporność na suszę i adaptację do warunków atmosferycznych zmieniając tempo wzrostu i cechy fizjologiczne (zmniejszając suchą masę liści i korzeni a zwiększając rozpraszanie ciepła w liściach) a także zawartość związków fitochemicznych [222]. Produkcja buraka zwyczajnego (ćwikłowego) wyniosła w Polsce w roku 2016 341100 t [191]. Surowiec ten znajduje się na czwartym miejscu spośród warzyw pod względem produkcji i konsumpcji.

5.2. Badania zasadnicze

5.2.1. Ziemniak odmiany 'Denar'

Ziemniak (*Solanum tuberosum* L.) jest wieloletnią rośliną zielną, wytwarzającą bulwy. W warunkach krajowych na jeden cykl wegetacyjny przypada jeden cykl od posadzenia do zbioru. Użytkową częścią ziemniaka są bulwy, które formują się na końcu stolonu (pęd podziemny, wyrastający z pączka kąтового dolnej części łodygi, mający zamiast liści łuski okrywające). Bulwy ziemniaka przechodzą okres spoczynku bezwzględnego, po którym w sprzyjających warunkach wypuszczają kielki. Wg Engela wyróżnia się 6 podstawowych faz rozwoju ziemniaka, których schemat przedstawiono na rysunku 25:



Rysunek 25. Fazy rozwoju ziemniaka wg Engela [223]

Głównym składnikiem bulwy ziemniaka jest skrobia, której zawartość wynosi nie więcej niż 15-16%. W ziemniaku występują także polifenole i karotenoidy. Bulwy ziemniaka w bardzo niewielkim stopniu kumulują metale ciężkie lub pozostałości środków ochrony roślin [224]. W tabeli 9 zebrano zawartości najbardziej charakterystycznych dla ziemniaka składników.

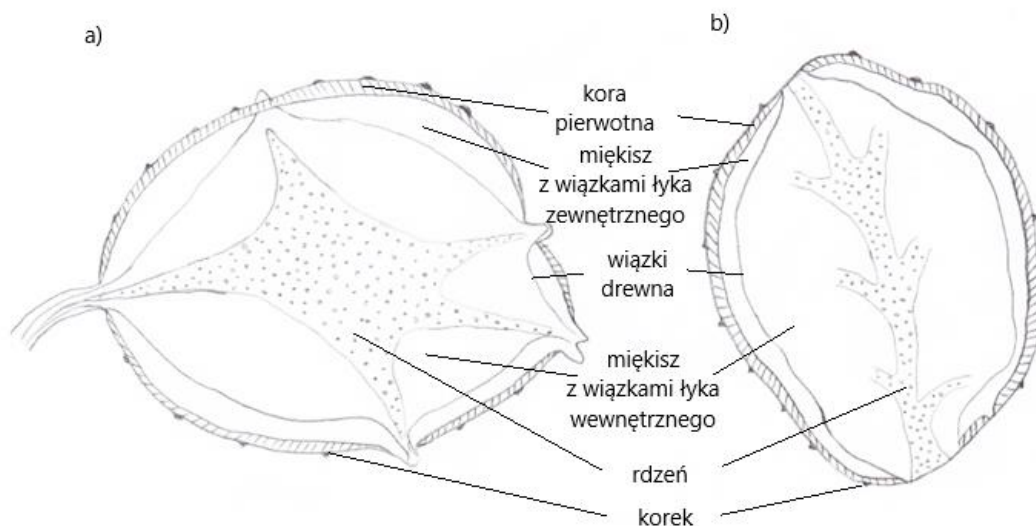
Tabela 8. Zawartości wybranych składników w ziemniaku [225]

Substancja	Zawartość
Witamina C	14 [mg/100 g]
Witamina E	0,05 [mg/100 g]
β -karoten	5 [μ g/100 g]
Sacharoza	0,5 [g/100 g]
Błonnik	1,5 [g/100 g]

Pośród odmian ziemniaków jadalnych, można wyróżnić 4 typy użytkowe:

- Typ A – sałatkowy; miąższ nie jest wodnisty ani mączysty oraz nie rozpada się podczas gotowania,
- Typ B – wszechstronny, ogólnoużytkowy; miąższ lekko mączysty i wilgotny,
- Typ C – mączysty; miąższ po ugotowaniu sypki,
- Typ D – bardzo mączysty; ograniczone zastosowania, np. pieczenie.

Na rysunku 26 przedstawiono przekrój poprzeczny oraz podłużny bulwy ziemniaka.



Rysunek 26. Schematyczny przekrój a) - poprzeczny oraz b) - podłużny ziemniaka; (wg. L. Hausbrandt) (rysunek własny).

Wymagania konsumenckie wobec ziemniaka obejmują następujące cechy jakościowe:

- wybrane cechy sensoryczne, obejmujące kolor (szczególnie preferowana jest mała skłonność do ciemnienia mięszu), smak, aromat, konsystencja,
- wysoka wartość żywieniowa obejmująca wysoką zawartość mikroelementów i innych składników odżywczych,
- brak oznak porażenia chorobami i uszkodzeń,
- regularny kształt bulw o płtykich oczkach,
- możliwość długotrwałego przechowywania bez specjalistycznego sprzętu,
- pochodzenie ziemniaka (preferowane są coraz częściej uprawy ekologiczne) [226].

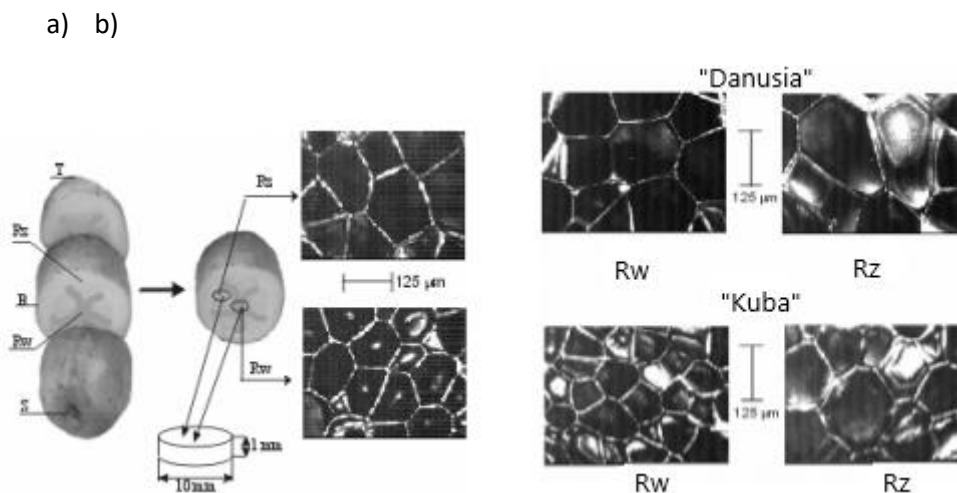


Rysunek 27. Zdjęcie ziemniaka

Ziemniak zajmuje ważną pozycję wśród roślin uprawianych w Polsce, ponieważ nie ma wysokich wymagań glebowych i osiąga dobre plony także na glebach słabych. W uprawie ziemniak preferuje się kwaśny odczyn glebowy (4,8 – 5,4) [227]. W Polsce (wg danych GUS za rok 2016) ogólna produkcja ziemniaka wyniosła 8,6 mln ton, natomiast światowa produkcja ziemniaka wynosi około 270-300 mln ton rocznie [191]. Na terenie naszego kraju ok. 90% zbiorów ziemniaka trafia do przechowywania, skąd potem jest pozyskiwana do przetwórstwa. W ostatnich latach można zaobserwować wyraźną

tendencją do spadku spożycia ziemniaka jako warzywa, natomiast rośnie jego zastosowanie w postaci przetworzonej.

Konrankiewicz i współpracownicy [231] badali strukturę mikroskopową ziemniaka za pomocą mikroskopu konfokalnego. Przykładowe zdjęcia mikrostruktury zostały przedstawione na rysunku 28.



Rysunek 28. Mikrostruktura ziemniaka na podst. [228], gdzie: Rw, Rz – promień wewnętrzny, zewnętrzny, a) schemat pokazujący różnice w wielkości komórek pobieranych z obszaru rdzenia wewnętrznego i zewnętrznego, b) zdjęcia mikroskopowe pokazujące różnice wielkości komórek tkanki miękkiej w zależności od odmiany

Przedstawione zdjęcia mikroskopowe wyraźnie obrazują różnice w mikrostrukturze ziemniaka i wykazują jego anizotropię. Odmiany ziemniaka różnią się między sobą zarówno rozmiarem komórek, jak i rozrzutem ich wielkości. Dodatkowo, ukazano wpływ miejsca pobrania próbki na właściwości fizyczne i chemiczne tkanki. Różnice te wynikają głównie z tego, że komórki rdzenia wewnętrznego i zewnętrznego różnią się między innymi zawartością skrobi, jak również wpływa na to obecność włókien ksylemu i łyka, układających się promieniście wokół rdzenia wewnętrznego [229]. Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że najlepsze, ze względu na uśrednienie wyników, jest pobieranie próbki z całego przekroju poprzecznego, jak miało to miejsce w niniejszej pracy.

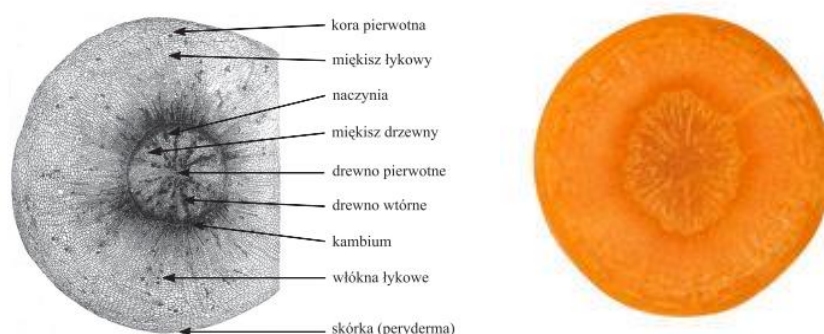
Odmiana 'Denar', wykorzystywana jako materiał badawczy w tej pracy, została zarejestrowana w 1999 roku i stanowi jedną z najczęściej uprawianych odmian w Polsce. Odmiana 'Denar' należy do odmian bardzo wczesnych, a także cechuje się 7 pkt w skali przydatności do przechowywania (gdzie 1 – najmniejsza i 9 – największa zdolność do przechowywania) i wg Krzysztofik, charakteryzowała się najmniejszymi stratami podczas składowania w przechowalni [230]. Na podstawie pracy [231] można stwierdzić, że odmiana 'Denar' cechuje się średnią zdolnością do akumulacji ołowiu (0,039 mg/kg), natomiast największą (spośród 15 badanych odmian) do akumulacji kadmu (0,043 mg/kg).

Wg doświadczeń prowadzonych przez IHAR (Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin) w latach 2004-2009 odmiana 'Denar' cechuje się wysokimi plonami ok. 44 t/ha. Zawartość skrobi wynosi 11,9 g/100 g. Bulwy są okrągło-owalne, bardzo duże (9/9), o dość głęboko osadzonych oczkach (7/9). Skórka bulw jest żółta, gładka a barwa mięszu jasnożółta. Mięsz odznacza się dobrymi walorami smakowymi (7/9) i wysoką jakością sensoryczną, a także prawie w ogóle nie ulega ciemnieniu (8,5/9), zarówno w przypadku mięszu surowego, jak i gotowanego [232]. Ziemniaki odmiany 'Denar' należą do typu AB, a więc są zwarte, typu sałatkowego, co kwalifikuje je do odmian jadalnych z przeznaczeniem do konserw, sałatek i produktów mrożonych, a więc doskonale sprawdzają się w przetwórstwie. W uprawie odmiana 'Denar' posiada dużą odporność na wirusy typu Y (PVY – ang. *potato virus Y*) (7/9), L (wirus liściorozwoju – PLRV – ang. *potato leaf roll virus*) (7/9), oraz średnią na wirusa typu M (PVM –

ang. *potato virus M*) (4,5/9). Odmiana 'Denar' jest dość podatna na zarazę ziemniaka liści (3/9) i bulw (4/9) i jest średnio odporna na czarną nóżkę (5/9) i parcha zwykłego (5/9); posiada dość dużą odporność na uszkodzenia mechaniczne (7/9). Do uprawy odmiana 'Denar' wymaga gleb o jakości od średniej do dużej [233]. Wg badań przeprowadzonych przez Jankowską i innych, odmiana 'Denar' została zaliczona do odmian niestabilnych, czyli do takich których plonowanie wykazuje silną interakcję ze zmieniającymi się warunkami okresu wegetacji [234].

5.2.2. Marchew zwyczajna

Marchew zwyczajna (*Daucus carota* L.) należy do rodziny selerowatych. Występuje powszechnie w stanie dzikim, jak również jest uprawiana na dużą skalę. Marchew zwyczajna należy do roślin dwuletних, czyli dopiero w drugim roku uprawy wykształca kwiatostany w formie baldacha i nasiona. Marchew posiada palowy system korzeniowy, mogący sięgać do głębokości 1-2 m. Korzeń spichrzowy jest tworzony głównie z korzenia właściwego, tylko w niewielkiej części powstaje z części podliścieniowej. Tworzenie korzenia spichrzowego następuje dopiero 30 dni po wschodach, a tworzenie barwników następuje 40-85 dni od wschodów. Swoją barwę marchew zwyczajna zawdzięcza wysokiej zawartości barwników z grupy karotenoidów. Przekrój poprzeczny marchwi charakteryzuje się dwoma wyraźnymi współśrodkowymi pierścieniami, rozdzielonymi wąskim pierścieniem wtórnej tkanki twórczej. Budowa korzenia marchwi na przekroju poprzecznym została przedstawiona na rysunku 29. Poszczególne części korzenia różnią się między sobą zawartością składników odżywczych: kora wykazuje dużą zawartość cukrów, soli mineralnych i karotenoidów, natomiast rdzeń posiada ich znacznie mniej, o czym może świadczyć jego zwykle jaśniejsza barwa.



Rysunek 29. Przekrój poprzeczny korzenia marchwi [235]

W marchwi występuje szereg związków organicznych, np. olejki eteryczne (charakterystyczne dla baldaszkowatych), związki fenolowe, karotenoidy (α - i β -karoten, luteina), witaminy C i E. Tabela 9 podsumowuje zawartości wybranych składników obecnych w marchwi.

Tabela 9. Zawartości wybranych składników odżywczych w marchwi zwyczajnej [225]

Substancja	Zawartość
Witamina C	3,4 [mg/100 g]
Witamina E	0,51 [mg/100 g]
β-karoten	9,938 [g/100 g]
Sacharoza	2 [g/100 g]
Błonnik	3,6 [g/100 g]

Kształt korzenia, wybarwienie, stosunek masowy części zielonej do korzenia, a także ilość składników bioaktywnych w dużej mierze zależą od cech odmianowych, ale również duży wpływ mają czynniki środowiskowe. Na kształt korzenia wpływa rodzaj gleby, temperatura, a także występowanie

nicieni [220]. Produkcja marchwi jadalnej w roku 2016 w Polsce wyniosła 822 tyś. t [191] i znajdowała się na trzecim miejscu wśród warzyw po kapuście i cebuli. Charakterystyczna dla marchwi jest duża plenność, łatwość uprawy, przydatność do produkcji szeregu przetworów, a także możliwość długotrwałego przechowywania.

5.2.3. Owoc kiwi

Owoc kiwi pozyskuje się z Aktinidii smakowitej (*Actinidia deliciosa*), zwanej też agrestem chińskim, która należy do rodziny aktinidiowatych (*Actinidiaceae*). Roślina ma formę drzewiastego pnącza cechującego się zwartym układem liści skrętoległych, piłkowanych, przyjmujących kształt owalny lub sercowaty. Owoce kiwi są jagodami, a ich miąższ zielony, soczysty, zawierający w centralnej części skupisko nasion. Owoc kiwi składa się od zewnątrz: ze skórki, zewnętrznej owocni, wewnętrznej owocni i rdzenia. Owoce Aktinidii smakowitej są walcowate, o cieniwej skórcie, pokrytej brązowym kutnerem (gęste włoski). Krzewy mogą być jedno- lub dwupienne.

Owoce kiwi cieszą się coraz większą popularnością i w latach 1998-2012 nastąpił w Polsce wzrost ich konsumpcji na poziomie 1,6% [236].



Rysunek 30. Owoce kiwi [237]

Aktinidie rosną naturalnie w różnych rejonach globu, głównie w Azji (głównym producentem są Chiny). W warunkach klimatu umiarkowanego możliwa jest uprawa minikiwi, których owoce nie osiągają tak dużych rozmiarów jak w klimacie cieplejszym. Dojrzałość do zbioru w przypadku kiwi ocenia się na podstawie zawartości składników ekstraktowych (ang. *Total Soluble Solids*), których optymalna zawartość wynosi 6,2%. Nasiona podczas dojrzewania robią się ciemnobrązowe i luźne w strukturze owocu. Pnącza aktinidii uprawia się na mocnych podporach, ze względu na dużą plenność (18 t/ha). Zbioru dokonuje się ręcznie [238].

Owoce kiwi zawierają charakterystyczny związek – aktynidynę, należącą do grupy proteaz, która powoduje rozkład białek. Z tego powodu jagody kiwi są używane do rozluźniania tkanki mięsa. Natomiast nie znajdują zastosowania jako składnik deserów zawierających mleko lub żelatynę. W tabeli 11 zestawiono zawartości wybranych związków występujących w owocach aktinidii.

Tabela 10. Zawartości wybranych związków w jagodach kiwi [197]

Substancja	Zawartość
Witamina C	59 [mg/100 g]
Witamina E	0,2 [mg/100 g]
β -karoten	43 [μ g/100 g]
Sacharoza	0,7 [g/100 g]
Błonnik	2,1 [g/100 g]

Owoce kiwi, pomimo dość szerokiej możliwości stosowania w przemyśle spożywczym, odznaczają się jednak dość krótkim okresem przydatności do spożycia i nie nadają się do przechowywania. Nadają się do spożycia na surowo oraz do przetwarzania, np. w postaci soków, dżemów, galaretek.

Wielu naukowców wykazało działanie prozdrowotne owoców kiwi, np. antynowotworowe [239] [240]. Badania wykonane przez Bursal i Gulcin, wskazują na zdolności antyoksydacyjne wodnych ekstraktów z owoców kiwi [241].

5.2.4. *Dynia zwyczajna*

Dynia zwyczajna (*Cucurbita pepo* L.) należy do dyniowatych (*Cucurbitaceae*). Dynia zwyczajna jest rośliną płożącą, silnie ekspansywną, której pędy rosną do 12 m długości. Łodyga dyni jest pokryta włoskami i posiada wąsy czepne. Liście dyni są duże, sercowate z owłosionymi brzegami. Roślina cechuje się dobrze rozwiniętym, choć płytkim systemem korzeniowym. Wykształca także tzw. korzenie przybyszowe, które przyczepiają się do podłoża. Dynia zwyczajna to roślina należąca do jednopiennych, obupłciowych, o intensywnie żółtych, bezwonnym kwiatach, które rosną od czerwca do września. Kwiaty żeńskie dyni wyrastają pojedynczo, natomiast kwiaty męskie rosną w postaci pęczków w kątach liści i posiadają 5 zrośniętych pręcików. Owoc dyni charakteryzuje się dużymi wymiarami (średnicy do 40 cm), może przyjmować kształt kulisty, gruszkowaty, cylindryczny lub dyskowaty, w zależności od odmiany. Miąższ owocu dyni jest włóknisty, zawiera liczne, białe nasiona.

Uprawa dyni najlepiej udaje się na glebie przepuszczalnej, bogatej w azot. Świetnie rośnie na kompostowniku. Jest ciepłolubna, do optymalnego wzrostu wymaga temperatury około 25 °C (temperatura minimalna to 8 °C). Dynię można uprawiać sięjąc wprost do gruntu lub z rozsady.



Rysunek 31. Dynia zwyczajna [242]

Miąższ dyni jest źródłem wielu cennych składników organicznych, takich jak karotenoidy i witamin z grupy B, a także kwasów organicznych (głównie cytrynowego, jabłkowego i szczawiowego) jak również minerałów, takich jak potas, fosfor, magnez, żelazo oraz selen [243]. Również pestki dyni mają bardzo dobre właściwości prozdrowotne z powodu zawartości białka, kwasu linolowego, błonnika pokarmowego, a także innych związków bioaktywnych, takich jak kwasy fenolowe, tokoferole czy sterole. Zawartość poszczególnych składników w dyni zwyczajnej zależy od jej odmiany. Zestawienie zawartości wybranych związków przedstawiono w tabeli 12 .

Tabela 11. Zawartości wybranych składników w dyni zwyczajnej [225]

Substancja	Zawartość
Witamina C	8 [mg/100 g]
Witamina E	1,03 [mg/100 g]
β-karoten	2,974 [g/100 g]
Sacharoza	2,1 [g/100 g]
Błonnik	2,8 [g/100 g]

Miąższ dyni może być stosowany do różnego rodzaju przetworów, takich jak dżemy, marynaty, sosy i ciasta, a także w produktach przeznaczonych dla dzieci. Pozytywne działanie dyni na zdrowie zostało szeroko opisane w pracy Zdrojewicza i współpracowników [244] oraz Kulczyńskiego i współpracowników [245].

Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu działania ultradźwięków na efektywność suszenia oraz jakość uzyskanego produktu.

Dla uzyskania celu w pracy podjęto następujące badania:

- określenie wpływu ultradźwięków na osmotyczną obróbkę wstępną,
- zbadanie wpływu osmotycznej obróbki wstępnej na kinetykę procesu suszenia,
- ocena wpływu ultradźwięków stosowanych na etapie suszenia na kinetykę suszenia konwekcyjnego oraz konwekcyjno-mikrofalowego oraz wybrane determinanty jakości otrzymanych suszy.

Zakładanymi hipotezami są:

- zastosowanie ultradźwięków na etapie odwadniania osmotycznego powoduje przyspieszenia wymiany masy pomiędzy roztworem a odwadnianą tkanką roślinną,
- skład oraz stężenie roztworów wykorzystywanych podczas odwadniania osmotycznego wpływa na jakość otrzymanych suszy owocowych lub warzywnych,
- zastosowanie ultradźwięków na etapie suszenia pozwala na intensyfikację transportu masy, co w efekcie pozytywnie wpływa na całkowity czas suszenia i poprawę jakości uzyskanego produktu.

Całość badań, ze względu na zakres i cel poszczególnych etapów, podzielono na badania wstępne i zasadnicze. W badaniach wstępnych wykonano szereg eksperymentów, których głównym celem było określenie wpływu ultradźwięków na kinetykę procesu suszenia wybranych surowców roślinnych. Zbadano energochłonność procesu, a także wykonano podstawowe badania jakości otrzymanych suszy (całkowita zmiana barwy, aktywność wody). W badaniach wstępnych wykorzystano następujące surowce: jabłko odmian: 'Lobo', 'Ligoł', 'Rubin' oraz korzenie buraka ćwikłowego. W badaniach zasadniczych rozszerzono zakres badanych parametrów, a także wzięto pod uwagę wpływ obróbki wstępnej osmotycznej (klasycznej oraz z wykorzystaniem ultradźwięków) na kinetykę procesu oraz jakość produktu. Rozszerzono także zakres badań jakościowych, w których określono zawartość wybranych składników o potencjale bioaktywnym. W badaniach zasadniczych badano takie surowce jak: ziemniak odmiany 'Denar', marchew, kiwi oraz dynia zwyczajna. W przypadku suszenia marchwi do opisanego kinetyki procesu zastosowano model matematyczny, opracowany przez prof. S. J. Kowalskiego [114].

Część metodyczna

6. Stanowisko badawcze

6.1. Komora termiczna do obróbki osmotycznej

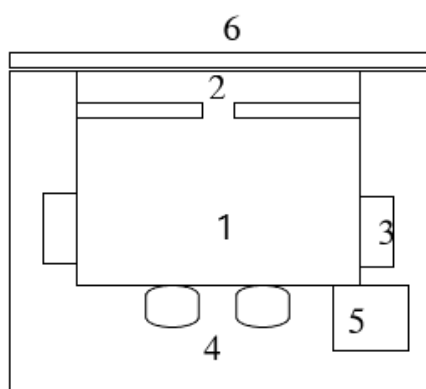
Jako obróbkę wstępną materiału wybrano obróbkę osmotyczną, realizowaną w komorze termicznej (wannie ultradźwiękowej), przeznaczonej do tego celu.

Obróbka osmotyczna klasyczna jest szeroko stosowana ze względu na niskie zapotrzebowanie energetyczne oraz możliwość zastosowania niskiej temperatury podczas procesu dehydratacji. Jest ona stosowana do częściowego odwadniania produktów spożywczych, zwłaszcza owoców i warzyw. W wyniku odwadniania osmotycznego uzyskuje się produkt o dobrych właściwościach organoleptycznych, atrakcyjny dla konsumenta. Technika obróbki osmotycznej polega na zanurzeniu materiału o wybranej geometrii w roztworze hipertonicznym wybranej substancji osmotycznie czynnej, dzięki czemu, w wyniku procesu osmozy, materiał traci część wilgoci, która przechodzi do roztworu, jak również zyskuje część substancji hipertonicznej z roztworu. Ważnymi parametrami, mającymi kluczowe znaczenie w procesie osmotycznym, jest temperatura oraz czas prowadzenia procesu, a także rodzaj zastosowanej substancji osmotycznej oraz jej stężenie. W procesach przetwarzania żywności stosuje się głównie roztwory cukru, soli lub syropu glukozowo-fruktozowego [246].

Komora termiczna InterSonic (25 kHz, 700 W), model IS-145, wyposażona została w system regulacji temperatury obejmujący grzałki, termostat oraz pompę cyrkulacji wody. W komorze termicznej zamocowano uchwyty do zlewek z cieczą hipertoniczną, pozwalające na zanurzenie zlewek z badanym roztworem w wodzie i utrzymywanie ich w stałym położeniu. Pod wanną zawierającą wodę umieszczono generatory ultradźwięków. Komora termiczna do obróbki osmotycznej zaopatrzona została również w możliwość wytrząsania próbki podczas obróbki osmotycznej, jednak w przeprowadzonych badaniach nie wykorzystano tej możliwości.

Schemat komory termicznej umieszczono na rysunku 32:

a)



b)



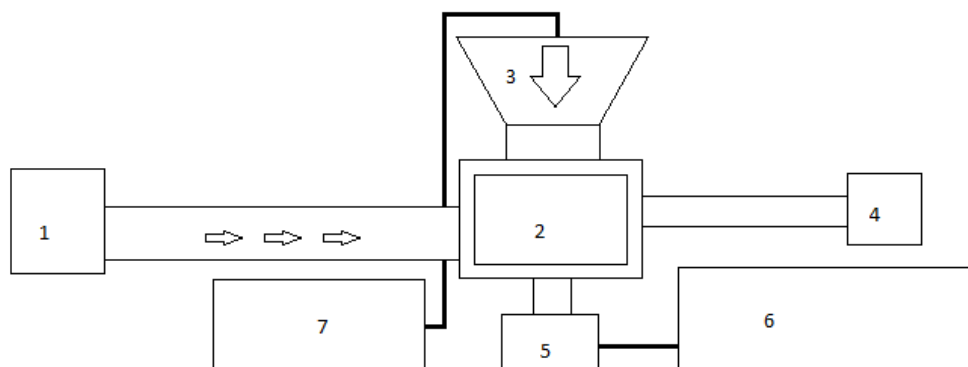
Rysunek 32. a) Schemat komory termicznej do obróbki osmotycznej: 1 – komora; 2 – uchwyty do mocowania zlewek; 3 – grzałki; 4 – generatory ultradźwięków; 5 – pompa cyrkulacji wody; 6 – pokrywa komory; b) stanowisko komory termicznej

6.2. Suszarka hybrydowa

Badania przeprowadzone były na prototypowej suszarce hybrydowej, zaprojektowanej oraz zakupionej w ramach projektu „Badanie mechanizmu oddziaływania ultradźwięków na tkankę materiału biologicznego w procesie suszenia wspomaganego ultradźwiękami” nr 2012/05/B/ST8/01773 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w Polsce. Suszarka ta wyposażona jest w generator ultradźwięków firmy Pusonics S. L. (Hiszpania) wytwarzający falę o częstotliwości 25 kHz oraz generator mikrofal. Przepływ powietrza realizowany jest od dołu szalki pomiarowej i może być regulowany w zakresie od 1 do 5 m/s. Regulacja temperatury może być prowadzona w zakresie od 10 do 95°C. Suszarka daje możliwość pomiaru *on line* temperatury materiału, dzięki zamontowanemu pirometrowi. Generator ultradźwięków wytwarza fale akustyczne propagujące się prostopadle do powierzchni szalki, padając bezpośrednio na materiał (od góry) i pozwala na zadawanie ultradźwięków o mocach od 50 do 200 W. Generator mikrofal pozwala pracować w zakresie od 100 do 500 W mocy.

Schemat suszarki hybrydowej umieszczono na rysunku 33:

a)



b)



Rysunek 33. a). Schemat suszarki hybrydowej: 1 - pompa powietrza; 2 - komora suszarki; 3 - konwerter; 4 – generator mikrofal; 5 - waga; 6 - komputer; 7 – generator ultradźwięków; b) stanowisko suszarki hybrydowej [157]

7. Metody pomiaru jakości produktu

Początkowa wilgotność materiału była wyznaczana za pomocą analizatora wilgotności XM120 Precisa Gravimetrics AG, CH – Dietikon (Szwajcaria). Pomiar był przeprowadzany na podstawie ciągłego pomiaru ubytku masy próbki o masie do 1,5 [g] do uzyskania wilgotności równowagowej. Wynik obliczany był na podstawie równania (1).

7.1.1. Zmiana barwy

Pomiar zmiany barwy był przeprowadzany za pomocą kolorymetru CR-400 Konica Minolta Sensing, INC., (Japonia). Kolorymetr był bezpośrednio połączony z komputerem, wyposażonym w oprogramowanie SpectraMagic NX QC Software. Przed każdym pomiarem kolorymetr był kalibrowany za pomocą wzornika barw. Do każdego pomiaru próbka była przygotowywana przez mielenie za pomocą młynka analitycznego IKA A11 (Werke GmbH & Co. KG, Niemcy). Wymiary młynka wynosiły 85x85x240 mm (DxGxW), a efektywna objętość młynka wynosiła 80 ml. Następnie przygotowana określona objętość próbki była umieszczana w naczyniu pomiarowym, do którego przystawiany był kolorymetr. Dla każdej próbki pomiar był przeprowadzany 10-krotnie. Pomiar został przeprowadzony w przestrzeni barw CIELab, opisanym w rozdziale 3.1.1., a wartość zmiany barwy liczona na podstawie wzoru (19).

7.1.2. Aktywność wody

Parametr aktywności wody wyznaczany był za pomocą urządzenia Testo 650/0628.0024. Urządzenie mierzące aktywność wody wyposażone jest w czujnik wilgotności względnej, który jest elementem pomiarowym. Czujnik ten wystawiony jest na działanie wilgotnego powietrza w komorze pomiarowej, a jego budowa podobna jest do budowy kondensatora. W czujniku wilgotności znajdują się dwie elektrody, które są oddzielone od siebie cienką warstwą higroskopijnego polimeru, pełniącego rolę dielektryka. Zmiana stałej dielektrycznej higroskopijnego polimeru jest proporcjonalna do wilgotności względnej powietrza, w której znajduje się czujnik wilgotności. Aktywność wody była wyznaczana zarówno dla próbki świeżej, jak i suszonej. W tym celu uśredniona próbka materiału badanego była mielona za pomocą młynka laboratoryjnego IKA A11 (Werke GmbH & Co. KG, Germany), a następnie jej określona objętość umieszczana w szczelnej, metalowej komorze pomiarowej urządzenia. Uzyskany wynik był wartością równowagową temperatury i zawartości wilgoci.

7.1.3. Rehydratacja

Pomiar zdolności rehydracyjnej był przeprowadzany dla dwóch próbek z każdego pomiaru. Procedura badawcza przeprowadzona była w oparciu o metodykę przedstawioną w pracach Witrowej-Rajchert i Lewicki [247] oraz Stępnia i współpracowników [248]. Pomiar był przeprowadzany w temperaturze pokojowej. Wybrane próbki umieszczano w naczyniu pomiarowym zawierającym wodę destylowaną. Całkowity czas pomiaru wynosił 5 godzin, a ważenie próbek było przeprowadzane po 0,5; 1; 3; 4 i 5 godzinach za pomocą wagi analitycznej RADWAG PS 3500.R2. Przed ważeniem próbki były wyciągane z wody i osuszane. Proporcja suchego materiału do wody destylowanej wynosiła 1:50. Otrzymane wyniki przedstawiane były w postaci wykresu zależności stosunku masy zważonej w czasie rehydratacji do masy wyjściowej (masa próbki suchej) względem czasu trwania procesu.

7.1.4. Obróbka osmotyczna

Przygotowanie wstępne materiału do obróbki osmotycznej było realizowane poprzez zanurzenie materiału przygotowanego do badań (umytego, obranego ze skórki i pociętego zgodnie z zaplanowaną do badań geometrią) w wybranym roztworze hipertonicznym w stosunku 1:4. Roztwór przygotowywany był bezpośrednio przed procesem, poprzez roztrzaskanie odważonej na wadze analitycznej RADWAG PS 3500.R2 naważki substancji osmotycznie czynnej w wodzie destylowanej. Roztwór był przygotowywany w kolbie miarowej, w której umieszczano mieszadło magnetyczne i mieszano do całkowitego rozpuszczenia substancji. Przed każdym procesem roztwory były rozlewane w równych ilościach do zlewek z tworzywa, które umieszczano na pół godziny w komorze do obróbki osmotycznej w zaprogramowanej temperaturze, z włączonymi ultradźwiękami, w celu nadaniu roztworowi pożądanej temperatury oraz odgazowaniu roztworu. Czas prowadzenia obróbki wstępnej ustalany był na podstawie krzywych kinetyki odwadniania. Kinetykę procesu odwadniania wyznaczano prowadząc proces przez 120 min i dokonując pomiaru masy co 10 min (w ciągu pierwszej godziny) i co 15 min (w czasie drugiej godziny procesu).

7.1.5. Oznaczanie parametrów biochemicznych

7.1.5.1. Związki fenolowe

Ekstrakcję związków fenolowych przeprowadzono następująco: rozdrobniono, a następnie odważono świeży (około 10 g) i wysuszony materiał (około 0,5 g), które kolejno homogenizowano stosując homogenizator IKA T-25 (Niemcy) z 50 ml 70% metanolu. Następnie homogenaty wytrząsano przez 15 minut w mechanicznym urządzeniu do kąpieli wodnej typu 357 (Elpin, Polska), a później filtrowano próżniowo. Pozostałość zebrano z filtra i wytrząsano ponownie z 50 ml 70% metanolu a potem przesączono. Przesącze zmieszano razem i wirowano w wirówce laboratoryjnej MPW-351R (Polska) przy 3000xg przez 20 minut, a następnie odparowano w próżniowej wyparce Büchi R-205 (Szwajcaria) w 40 °C. Na koniec skondensowane ekstrakty uzupełniono do 25 ml wodą destylowaną.

Oznaczenie jakościowe i ilościowe związków fenolowych wykonano przy użyciu systemu LC Agilent Technologies 1200 Rapid Resolution wyposażonego w kolumnę Poroshell 120, SB-C18 (4,6 x 150 mm, 5 µm). Binarna faza ruchoma składała się z 60 g/L kwasu octowego w 0,002 mol/L roztworze octanu sodu (Chempur, Polska) (faza A) i acetonitrylu (Sigma Aldrich Chemie GmbH, Niemcy) (faza B). Szybkość przepływu wynosiła 1 [ml/min], a całkowity czas rozdzielania - 35 min. Zastosowano rozdział gradientowy, w którym udział fazy B zmieniał się w następujący sposób w czasie elucji: 0–15% przez 15 minut, 15–30% do 25 minuty, 30–50% przez 5 minut i 50–100% przez kolejne 5 minut. Związki fenolowe oznaczono ilościowo, w odniesieniu do kwasu galusowego, kwasu chlorogenowego, katechiny i kwercetyny (Sigma Aldrich Chemie GmbH, Niemcy). Wyniki wyrażono w mg/kg suchej masy.

7.1.5.2. Karotenoidy

Zawartość karotenoidów oznaczono za pomocą wysokosprawnej chromatografii cieczowej (HPLC – ang. *high-performance liquid chromatography*). Ekstrakcję badanych związków przeprowadzono zgodnie z następującą procedurą. Pierwszym etapem było rozdrobnienie surowca w celu uzyskania większej powierzchni właściwej. Kolejno, z rozdrobnionego materiału odważano próbki marchwi świeżej (około 10 g) i suszonej (około 0,5 g). Następnie próbki z 50 ml acetonu (POCH, Polska) homogenizowano przez 1 min, po czym wytrząsano przez 20 minut bez dostępu światła, a następnie mieszaninę przesączano. Proces powtarzano jeszcze dwukrotnie na odsączonym materiale

w celu pełnej ekstrakcji karotenoidów. Otrzymane przesącze połączono w rozdzielaczu. Następnie do ekstraktu dodano eter naftowy (75 ml) (POCH, Polska) i fazę organiczną przemyto trzy razy 50 ml wody destylowanej. Dolną warstwę acetonowo wodną odrzucono. Do warstwy eterowej dodano bezwodnym siarczan sodu (POCH, Polska) w celu usunięcia pozostałej wody. Frakcję eterową odparowano do sucha w próżniowej wyparce Büchi R-205 (Szwajcaria). Pozostałość rozpuszczono w 10 ml acetonu. Ekstrakt przesączono przez filtr strzykawkowy PTFE 0,22 m (Millipore, USA). Analizę chromatograficzną przeprowadzono za pomocą systemu LC Agilent Technologies 1200 Rapid Resolution (Waldbronn, Niemcy) wyposażonego w kolumnę Poroshell 120, SB-C18 (4,6 x 150 mm, 5 µm) (Agilent Technology Inc, USA). Faza ruchoma składała się z acetonitrylu zawierającego 0,5 g/l trietyloaminy (rozpuszczalnik A) oraz metanolu i octanu etylu (55:45 v/v) (rozpuszczalnik B) (Sigma Aldrich Chemie GmbH, Niemcy) w gradiencie 0–15% B przez 15 min, 15–30% B do 25 min, 30–50% B przez 5 min i 50–100% B przez kolejne 5 min. Szybkość przepływu wynosiła 0,5 ml/min. Eluat wykryto za pomocą detektora DAD (Agilent Technology, Niemcy) przy długości fali 454 nm. Karotenoidy oznaczono ilościowo, w odniesieniu do β-karotenu. Uzyskane dane zawartości karotenoidów wyrażono w procentach retencji w porównaniu ze świeżym materiałem (100%).

7.1.5.3. Aktywność antyoksydacyjna

Metody pozwalające na zbadanie aktywności antyoksydacyjnej dzielą się na dwa typy:

- metoda opierająca się na mechanizmie przeniesienia atomu wodoru, tzw. HAT (ang. *hydrogen atom transfer*),
- mechanizmu przeniesienia pojedynczego elektronu, tzw. SET (ang. *single electron transfer*).

W analizie materiału suszonego w niniejszej pracy wykorzystano metodę typu SET, opierającą się na analizie spektrofotometrycznej barwnej reakcji redukcji, następującej wskutek przeniesienia elektronu z antyoksydantu na utleniacz. Jako wolny rodnik wykorzystano związek ABTS (2,2'-azobis(3-etylobenzotiazolino-6-sulfonian), który jest szeroko stosowany do analizy całkowitej aktywności antyoksydacyjnej płynów ustrojowych oraz żywności. Rodnik kationowy ABTS^{•+} jest generowany poprzez utlenianie ABTS siarczanem potasu.

Antyoksydanty zawarte w badanej próbce powodują redukcję rodnika kationowego w stopniu zależnym od czasu trwania reakcji, stężenia przeciwutleniacza, a także jego aktywności. W wyniku reakcji następuje odbarwienie się roztworu, przy czym intensywność odbarwienia jest proporcjonalna do zawartości przeciwutleniaczy w roztworze. Dzięki tej metodzie można również przeprowadzać pomiar kinetyki reakcji na podstawie pomiaru tzw. czasu indukcji (ang. *lag time*), czyli opóźnienia rozpoczęcia reakcji utleniania rodnika ABTS wskutek dodania antyoksydantu. Czas indukcji jest proporcjonalny do stężenia badanego przeciwutleniacza. Metoda analityczna wykorzystująca rodnik ABTS jest stosunkowo prosta, dzięki czemu jest rutynowo używana do oznaczania aktywności antyoksydacyjnych próbek przeciwutleniaczy o charakterze hydrofobowym i hydrofilowym. Innymi czynnikami decydującymi o częstym stosowaniu metody ABTS są: duża szybkość reakcji rodnika kationowego ABTS z przeciwutleniaczami (około 30 min) jak również rozpuszczalność związku ABTS w rozpuszczalnikach polarnych i niepolarnych [249].

Aktywność antyoksydacyjną materiału świeżego i suszonego określono zgodnie z procedurą opisaną przez Re i współpracowników [250] przy pomocy rodnika ABTS^{•+} (2,2'-azynobis(3-etylobenzotiazolino-6-sulfonianu). Kationorodnik ABTS^{•+} wytworzono przez poddanie reakcji 0,007 mol/l roztworu wodnego ABTS z 0,002 mol/l nadsiarczanu potasu. Wodny ekstrakt fenolowy (50 µl) zmieszano z 5 ml rozcieńczonego roztworu ABTS^{•+} + i zmierzono jego absorpcję przy 734 nm po

6 minutach inkubacji w 30 ° C. Pojemność przeciwutleniającą wyrażono w mikromolach Troloxu na 1 g suchej substancji surowca lub produktu.

7.1.5.4. Analiza statystyczna wyników

Obliczenia statystyczne wykonano za pomocą programu Statistica w wersji 12, firmy StatSoft (StatSoft, Tulsa, Oklahoma, USA). Wszystkie analizy przeprowadzono trzykrotnie. Wyniki poddano jednokierunkowej analizie wariancji (ANOVA) a do oceny różnic zastosowano test post-hoc HSD Tukeya (ang. *Tukey's Honest Significant Difference test*). Różniące się statystycznie wyniki oznaczono kolejnymi literami alfabetu, gdzie istotne różnice statystycznie wyników odnotowano dla $p \leq 0,05$.

Wyniki badań i ich dyskusja

8. Efektywność suszenia różnych odmian jabłek

Przeprowadzono eksperyment suszenia trzech odmian jabłek ('Rubin', 'Lobo' i 'Ligoł'), które zakupiono na lokalnym targowisku. Jabłka przechowywane były w temperaturze 4°C, bez dostępu światła. Zbadano wpływ zastosowania ultradźwięków o różnej mocy na kinetykę i energochłonność procesu oraz na jakość produktu w aspekcie zmiany barwy oraz aktywności wody. Jabłka pocięto w plastry o grubości 0,5 cm, z których wycięto próby w kształcie prostopadłościanu o podstawie 2 cm x 4 cm. Początkowa masa wsadu wynosiła 49±0,9 g. Wilgotność początkowa materiału wynosiła średnio 0,86 [g/g w.b] dla odmiany Ligoł, 0,87 [g/g w.b] dla odmiany 'Lobo' oraz 0,84 [g/g w.b] dla odmiany 'Rubin'. Proces prowadzono do momentu kiedy końcowa zawartość wilgoci w materiale wynosiła około 0,03 [g/g w.b].

8.1. Kinetyka procesu

W celu zbadania oddziaływania ultradźwięków na materiał o dużej porowatości (jabłko) proces suszenia przeprowadzono w warunkach opisanych w tabeli 12.

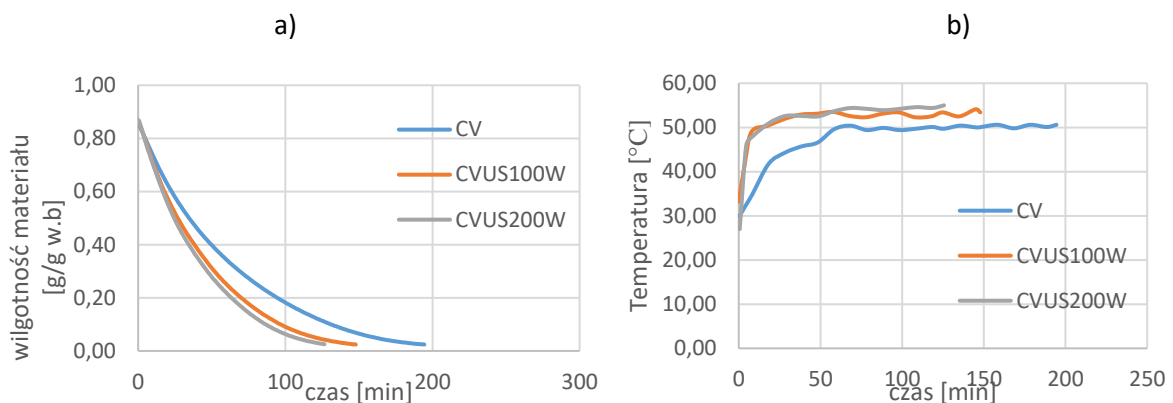
Tabela 12. Zestawienie warunków procesowych podczas suszenia jabłek różnych odmian

Odmiana	Temperatura [°C]	Przepływ powietrza [m/s]	Moc ultradźwięków [W]	Akronim
'Ligoł'	45	3,5	-	CV
			100	CVUS100W
			200	CVUS200W
'Lobo'			-	CV
			100	CVUS100W
			200	CVUS200W
'Rubin'			-	CV
			100	CVUS100W
			200	CVUS200W

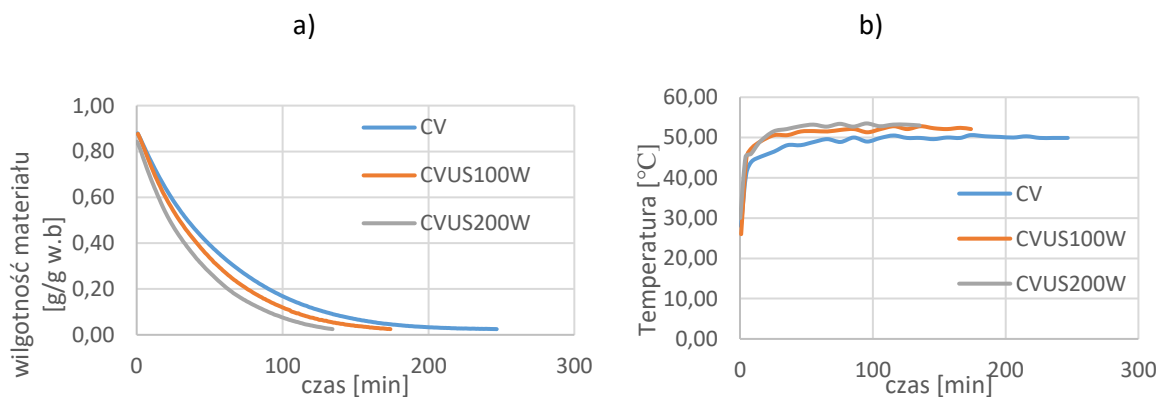
Na wykresach 34-36 przedstawiono krzywe kinetyczne i temperaturowe dla przedstawionych powyżej warunków suszenia jabłek. W tabeli 13 zestawiono czasy suszenia w zależności od parametrów procesu. Najdłuższym czasem suszenia, niezależnie od zastosowanych warunków procesu, cechowała się odmiana 'Lobo'. Czas suszenia dla tej odmiany był o ok. 21% dłuższy w porównaniu z czasem suszenia uzyskanym dla pozostałych odmian. Przebieg krzywych suszenia konwekcyjnego (CV), niezależnie od zastosowanej odmiany jabłka, już w ok. 15 min procesu zaczynał odbiegać od krzywych suszenia konwekcyjnego z wykorzystaniem ultradźwięków o mocy 100 i 200 [W]. Najkrótszym czasem suszenia, niezależnie od odmiany, charakteryzował się proces suszenia konwekcyjnego z wykorzystaniem ultradźwięków o mocy 200 W. Różnice pomiędzy czasem suszenia przy wykorzystaniu ultradźwięków o mocy 200 W a 100 W wynosiły 15%, 22% i 23% odpowiednio dla odmian 'Ligoł', 'Rubin' i 'Lobo'.

We wszystkich zbadanych przypadkach przebieg krzywych temperaturowych dla suszenia konwekcyjnego w początkowej fazie procesu odbiegał od przebiegu krzywych temperaturowych dla suszenia konwekcyjno-ultradźwiękowego (100 i 200 [W]). Temperatura podczas suszenia

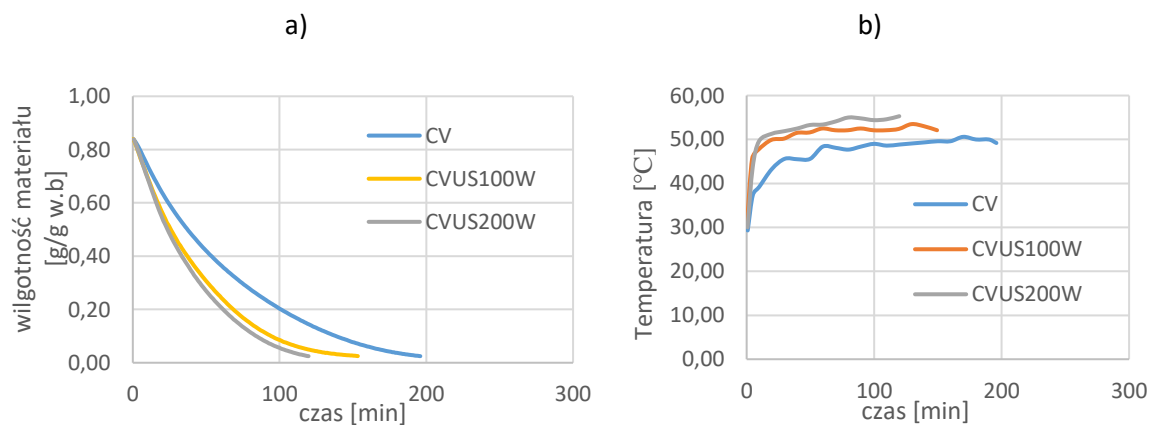
konwekcyjno-ultradźwiękowego była wyższa niż dla suszenia konwekcyjnego. Różnica ta wynosiła 3 i 4°C dla odmiany Ligol, 2 i 3 °C dla odmiany ‘Lobo’ i 4 i 6 °C dla odmiany ‘Rubin’, odpowiednio dla mocy ultradźwięków 100 i 200 [W]. Różnice w przebiegu krzywych temperaturowych mogą być związane z zawartością wilgoci w materiale. Największą początkową wilgotnością charakteryzowała się odmiana ‘Lobo’, co mogło przełożyć się na dłuższy czas suszenia, a także spowodować szybsze odparowanie wilgoci z powierzchni materiału, obniżając jego temperaturę. Analogicznie – najmniejsza początkowa zawartość wilgoci w odmianie ‘Rubin’ mogła przyczynić się do wolniejszej dyfuzji wody do powierzchni materiału, powodując większe nagrzewanie pod działaniem fali akustycznej.



Rysunek 34. Krzywe kinetyczne(a) i temperaturowe (b) dla procesu suszenia jabłka odmiany ‘Ligol’



Rysunek 35. Krzywe kinetyczne(a) i temperaturowe (b) dla procesu suszenia jabłka odmiany ‘Lobo’



Rysunek 36. Krzywe kinetyczne(a) i temperaturowe (b) dla procesu suszenia jabłka odmiany ‘Rubin’

Tabela 13. Zestawienie czasów suszenia różnych odmian jabłek

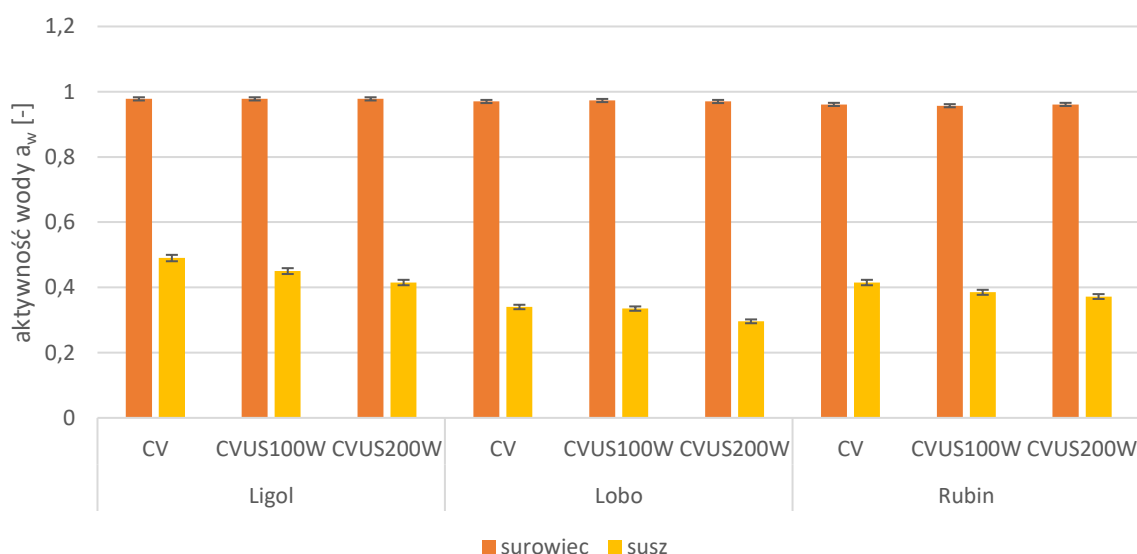
Odmiana	Program	Czas suszenia [min]	T _{max} [°C]
'Ligol'	CV	195	48,5
	CVUS100W	148	51,4
	CVUS200W	125	51,4
'Lobo'	CV	247	50,0
	CVUS100W	174	50,4
	CVUS200W	134	50,5
'Rubin'	CV	196	48,9
	CVUS100W	153	51,0
	CVUS200W	120	52,4

8.2. Jakość produktu

Uzyskany suchy produkt rozdrobiono i poddano podstawowym fizycznym badaniom jakościowym (aktywność wody, zmiana barwy w systemie CIELab).

8.2.1. Aktywność wody

Aktywność wody w próbach otrzymanych ze świeżych jabłek, we wszystkich odmianach była bliska jedności. Najniższą aktywnością wody odnotowano dla odmiany 'Rubin'. Dla odmian 'Ligol' i 'Lobo', a_w była zbliżona (różnica pomiędzy odmianami była rzędu 0,5%). Na wykresie poniżej zestawiono wartości a_w dla surowców i otrzymanych suszy. Średnia temperatura pomiaru wynosiła 20,5 °C.



Rysunek 37. Zestawienie wartości aktywności wody w materiale świeżym i suszonym dla różnych odmian jabłek

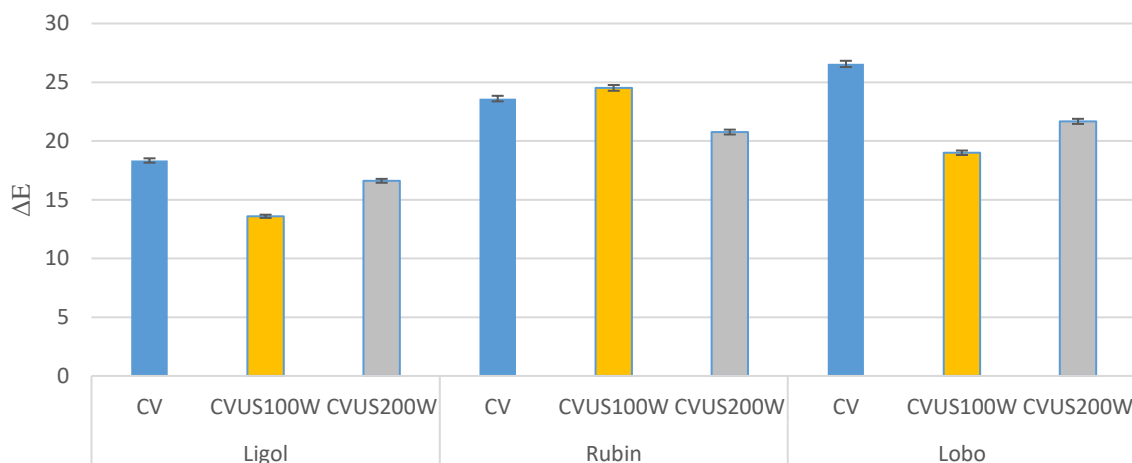
Otrzymane susze charakteryzowały się wartościami a_w w zakresie bezpiecznym, czyli poniżej 0,6. Zaobserwowano zależność między zastosowaną mocą ultradźwięków a wartością aktywności wody. We wszystkich przypadkach, wartość a_w dla próbek suszonych konwekcyjnie była najwyższa (0,340-0,490 [-]). Najniższą zaś wartość badanego parametru uzyskano dla próbek suszonych z wykorzystaniem największej mocy ultradźwięków (0,415-0,296[-]). Wartość a_w oznaczona w badanych suszach była zależna od odmiany. Najniższą wartość tego parametru odnotowano dla odmiany 'Lobo', natomiast najwyższą dla odmiany 'Ligol'. Wartość a_w w próbach suszonych konwekcyjnie przy wspomaganie ultradźwiękami o mocy 100 W była o 1,5-8% niższa od a_w mierzonej dla próbek suszonych konwekcyjnie oraz o 3%-13% wyższa niż dla próbek suszonych przy zastosowaniu ultradźwięków o mocy 200W, gdzie największą różnicę wartości aktywności wody odnotowano dla odmiany 'Lobo' a najmniejszą dla odmiany 'Rubin'.

8.2.2. Zmiana barwy

Na rysunku 38 przedstawiono całkowitą różnicę barwy pomiędzy surowcami a suszami otrzymanymi z badanych odmian jabłek. Najmniejszą całkowitą różnicą barwy (ΔE) cechowały się susze otrzymane z jabłek odmiany 'Ligol' (13,59-18,34 [-]), niezależnie od zastosowanych warunków

suszenia. Może być to związane z małą podatnością tej odmiany na proces brązowienia enzymatycznego (patrz rozdział 6.1.1.2). Największymi zmianami barwy, za wyjątkiem suszy otrzymanych metodą CVUS100W, odznaczały się próby otrzymane z odmiany 'Lobo', w których całkowita różnica barwy była o 12% (susze z CVUS200W) i 31% wyższa w przypadku suszenia konwekcyjnego oraz o 4% i 23% dla suszy otrzymanych metodą CVUS200W odpowiednio dla odmian 'Rubin' i 'Ligoł'.

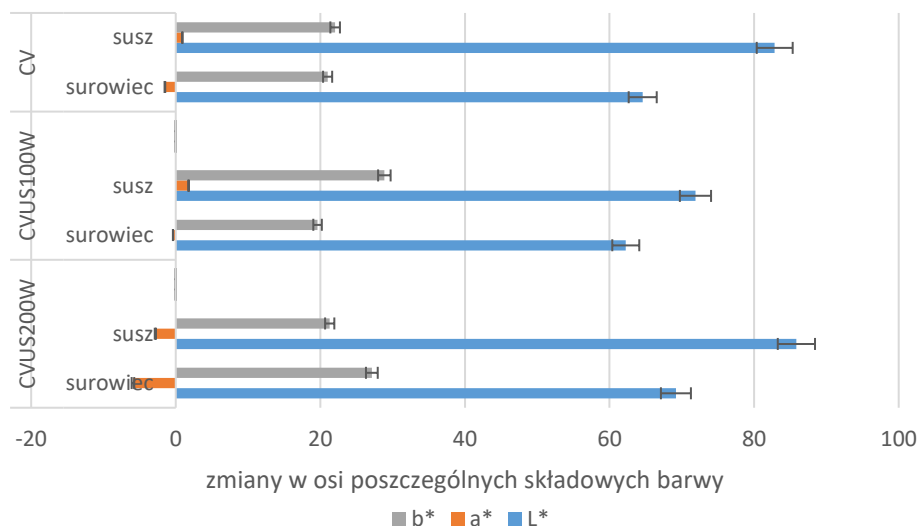
Wspomaganie suszenia konwekcyjnego poprzez ultradźwięki w większości przypadków spowodowało obniżenie całkowitej różnicy barwy dla badanych odmian. Wyjątek stanowiła próba suszona metodą CVUS100W dla odmiany 'Rubin', w której odnotowano wzrost tej wartości. Dla suszy z odmian 'Ligoł' i 'Lobo', najmniejszą całkowitą zmianę barwy odnotowano dla prób suszonych metodą CVUS100W i była ona odpowiednio o 26% i 28% niższa niż w przypadku prób suszonych konwekcyjnie. Dla prób suszonych metodą CVUS200W odnotowano wzrost tej wartości w stosunku do prób suszonych metodą CVUS100W dla odmian 'Ligoł' i 'Lobo'. Jednak nadal wartość ta dla odmiany 'Ligoł', 'Lobo' oraz 'Rubin' była odpowiednio o 9%, 18% i 12% niższa niż dla jabłek suszonych konwekcyjnie. Tym samym wspomaganie procesu suszenia ultradźwiękami miało korzystny wpływ na barwę otrzymanych suszy jabłkowych. Uzyskane rezultaty są zbliżone do wyników opisanych przez Kowalskiego i współpracowników, gdzie dla odmiany 'Rubin' uzyskano podobną wielkość całkowitej zmiany barwy (różnica wyników około 9%) przy zbliżonych parametrach procesowych (przepływ powietrza – 4 m/s, temperatura – 50 °C, moc US – 200 W) [121].



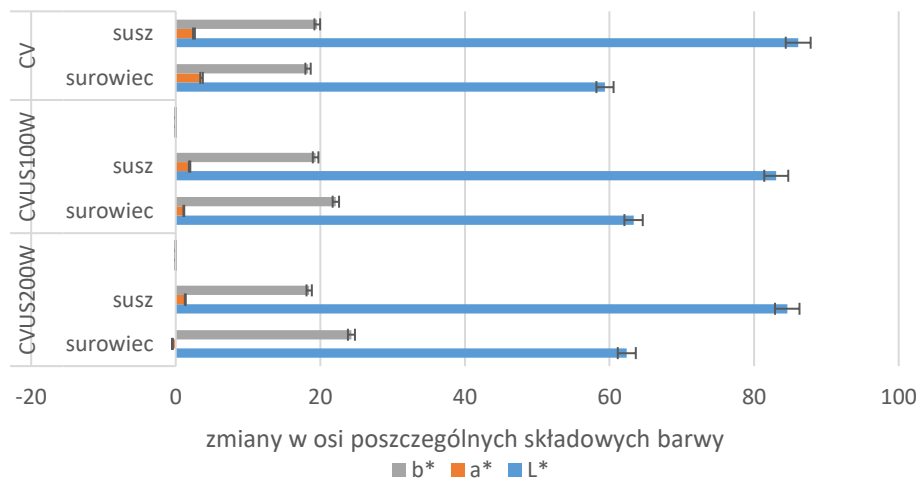
Rysunek 38. Całkowita zmiana barwy dla różnych odmian jabłek

Na rysunkach 39-41 przedstawiono porównanie poszczególnych parametrów barwy surowców ze składowymi barwy określonymi dla suszy otrzymanych z jabłek badanych odmian. Największe zmiany barwy obserwowano dla jasności (L^*). Dla wszystkich zbadanych suszy uzyskano znaczne przesunięcie składowej L^* w stronę barwy białej. Składowa a^* (zielony – czerwony) wykazywała najmniejsze zmiany, przez co miała najmniejszy wpływ na końcową barwę produktu. Zanotowane zmiany w obszarze tego parametru mogą być cechą odmianową, na którą wpływ ma początkowe charakterystyczne zabarwienie miąższu. Najmniejsze zmiany w składowej a^* odnotowano dla odmiany 'Rubin'. Na zmiany wartości parametru b^* (niebieski – żółty) wpływ miała odmiana jabłka. Próby odmiany 'Lobo' wykazywały najmniejsze zmiany parametru b^* . W materiale odmiany 'Lobo', który był suszony z zastosowaniem ultradźwięków odnotowano zmniejszenie udziału barwy żółtej, podczas gdy wszystkie suszone próby odmiany 'Rubin' cechowały się wyraźnym przesunięciem parametru b^* w stronę wartości dodatnich. Podobne zmiany w swojej pracy zanotował Beigi [251]. W plastrach

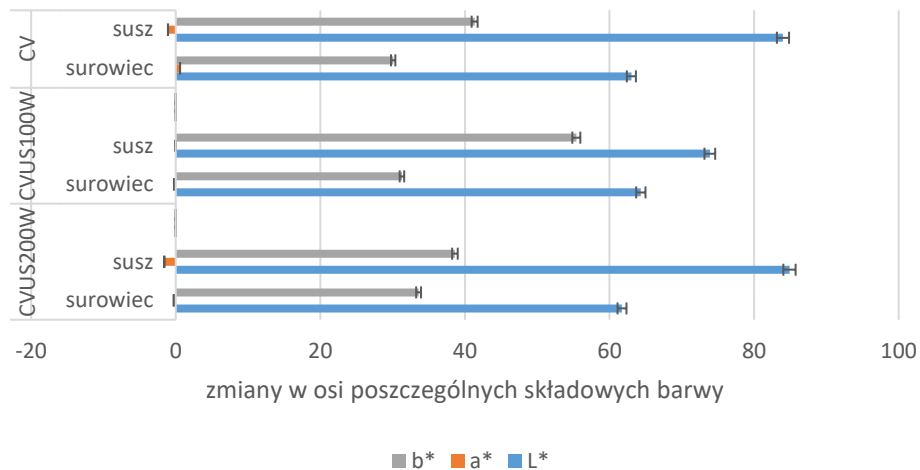
jabłek, które były suszone konwekcyjnie w temperaturze 50°C również odnotował wyraźne przesunięcie parametru L* w kierunku bieli oraz nieznaczne zmiany w obszarze parametru a*. Zaremba i inni, [252] oraz Wichrowska i współautorzy [253], także otrzymali podobne zmiany dla konwekcyjnego suszenia plasterów jabłek, gdzie dla odmiany Ligol, spośród sześciu innych odmian, uzyskali najmniejszą zmianę barwy, a także odnotowali przesunięcie parametru b* w kierunku barwy żółtej.



Rysunek 39. Profil zmian składowych barwy dla odmiany Ligol



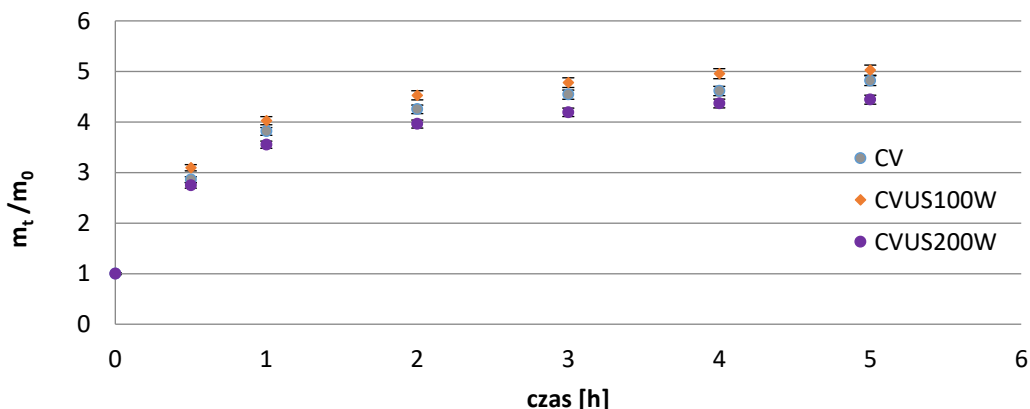
Rysunek 40. Profil zmian składowych barwy dla odmiany 'Lobo'



Rysunek 41. Profil zmian składowych barwy dla odmiany 'Rubin'

8.2.3. Rehydratacja

Do rehydratacji wybrano jabłko odmiany 'Ligol', cechującej się najlepszymi parametrami barwy i krótkim czasem suszenia. Wyniki przedstawiono w postaci wykresu zależności stosunku masy próbki poddanej rehydratacji (m_t) do masy początkowej (m_0) w czasie i zaprezentowano na rysunku 42.



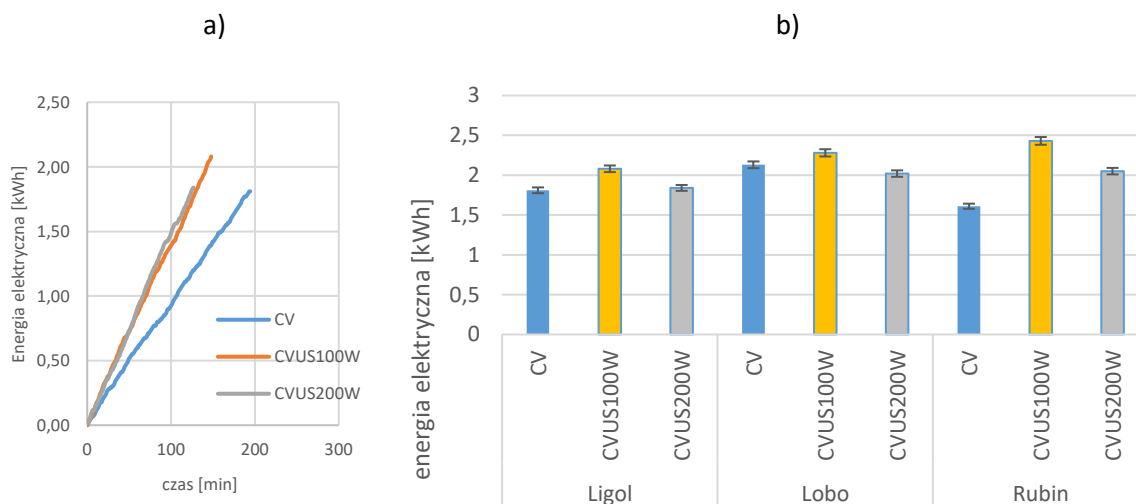
Rysunek 42. Zależność przyrostu masy materiału rehydratyzowanego od czasu procesu dla próbek jabłka odmiany Ligol

Największym stosunkiem masy rehydratyzowanej do początkowej, a tym samym najkorzystniejszym powrotem do masy pierwotnej, charakteryzowały się próby suszone z wykorzystaniem ultradźwięków o mocy 100 W (CVUS100W), osiągając po 5 godzinach procesu 70% masy początkowej. Dobrą rehydratacją charakteryzowały się również próby suszone konwekcyjnie (CV), natomiast najmniejszy przyrost masy zanotowano dla prób suszonych z wykorzystaniem ultradźwięków o mocy 200 W (CVUS200W). Próby otrzymane metodą CVUS100W charakteryzowały się również najmniejszą zmianą barwy (ΔE) co może świadczyć o mniej destruktywnym wpływie średniej mocy ultradźwięków na tkankę jabłek. Najbardziej destruktywne okazały się ultradźwięki o dużej mocy (200 W), które mogły spowodować uszkodzenia struktury tkanki i ścian komórkowych. Wyniki te odbiegają od rezultatów uzyskanych przez Szadzińską i inni [125], gdzie najlepsze wyniki uzyskano dla maliny suszonej konwekcyjnie, a wraz ze wzrastającą mocą ultradźwięków współczynnik powrotu do masy początkowej poprawiał się. Może to wynikać z odmiennej struktury owocu i jego

podatności oraz odpowiedzi na działanie ultradźwięków. Santacatalina i inni [109] przeprowadzili rehydratację suszu z jabłka ‘Granny Smith’, jednak ich wyniki dla różnych mocy ultradźwięków pokazywały niemal identyczne rezultaty zarówno dla suszenia konwekcyjnego, jak i z zastosowaniem ultradźwięków. Może to wynikać z bardzo niskich wartości zastosowanej temperatury suszenia, dzięki którym skurcz materiału był niewielki, a materiał nie był narażony na silne warunki stresowe. Znaczący wpływ mogła mieć także zastosowana niska moc ultradźwięków (25, 50 i 75 W), które nie zdołały wpłynąć na strukturę materiału. Podobnie można odnieść się do wyników uzyskanych przez Schossler i inni [135]. Zbliżoną do wyników autorki odpowiedź materiału na zastosowanie ultradźwięków uzyskała Szadzińska i inni [137], gdzie dla papryki zielonej najlepsze wyniki uzyskano dla próbek suszonych z zastosowaniem ultradźwięków o mocy 100 W. Można zatem stwierdzić, iż wpływ metody suszenia na właściwości rehydracyjne jest zależny od struktury suszonego materiału.

8.2.4. Energochłonność procesu

Na przykładzie jabłek odmiany Ligoł przedstawiono charakterystykę zużycia energii elektrycznej w czasie (rysunek 43 a)) oraz całkowite zużycie energii podczas procesów suszenia. Krzywe przyrostu energii w czasie dla wszystkich odmian jabłek miały bardzo podobny przebieg. Różnice w wartości końcowej wynikają z różnych czasów suszenia próbek. We wszystkich przeprowadzonych procesach największe zużycie energii zanotowano dla suszenia konwekcyjnego z zastosowaniem ultradźwięków o mocy 100 W. Wynika to ze stosunkowo niewielkiej redukcji czasu suszenia, a zdecydowanie większego jednostkowego poboru mocy dla tego procesu. Jak przedstawiono na rysunku 40 a), krzywe CVUS100W i CVUS200W są bardzo do siebie zbliżone, co świadczy o podobnym jednostkowym zużyciu energii podczas procesów. Jest to interesujące z tego względu, że (na przykładzie odmiany ‘Lobo’) zastosowanie mocy 100W skraca proces o 30%, a 200W o 54%, przy mniejszym nakładzie energii.



Rysunek 43. Zużycie energii elektrycznej podczas procesów suszenia różnych odmian jabłek, a) zużycie energii w czasie dla procesów odmiany ‘Ligoł’, b) zestawienie całkowitego zużycia energii elektrycznej.

8.3. Podsumowanie i wnioski

Do badań zaproponowano trzy odmiany jabłek cechujących się różnym czasem uzyskania dojrzałości konsumpcyjnej. Uzyskane rezultaty pokazują dużą różnorodność cech odmianowych w obrębie tego samego gatunku w odniesieniu zarówno do barwy, struktury materiału, jak i podatności na proces suszenia oraz zastosowania ultradźwięków. Najkorzystniejsze wyniki

uzyskano dla jabłek odmiany 'Ligol', w przypadku której wykazano pozytywny wpływ ultradźwięków na: czas suszenia (skracając go o około 36% dla prób suszonych metodą CVUS200 w stosunku do suszenia konwekcyjnego oraz o 21, 15 i 7% w stosunku do czasów uzyskanych dla odmiany 'Lobo' odpowiednio dla metod suszenia CV, CVUS100 i CVUS200); zużycie energii (porównując średnie zużycie energii we wszystkich programach suszenia) które było o 10% i 7% mniejszym w stosunku do odmian 'Lobo' i 'Rubin', oraz całkowitą zmianę barwy (gdzie biorąc pod uwagę średnią zmianę barwy dla wszystkich procesów, była ona odpowiednio o 30% i 33% mniejsza niż dla odmian 'Rubin' i 'Lobo'). W przypadku prób odmiany 'Lobo', uzyskano zarówno najdłuższe czasy suszenia (Tabela 13), jak i duże zmiany barwy (19-27 [-]). Jabłka tej odmiany brązowiły bardzo szybko, co utrudniało obróbkę materiału oraz cały proces. Jak opisano w rozdziale 5.1.1.1, struktura mięszu jabłka odmiany 'Lobo' należy do miękkich i delikatnych, o gąbczastej strukturze. Mogło to znaleźć odzwierciedlenie zarówno w czasie suszenia, jak i niskich różnicach temperatury krzywych suszenia konwekcyjnego i konwekcyjno-ultradźwiękowego. Delikatna struktura mogła ulec destrukcji, zapaść się, przez co znacząco utrudniony został transport wilgoci do powierzchni. Na podstawie analizy twardości odmian [254] można stwierdzić, że choć odmiany 'Lobo' i 'Ligol' mają zbliżoną twardość i jędrność ($45,1 \pm 3,4$ i $51,2 \pm 5,3$ [N] oraz $10,2 \pm 0,6$ i $9,1 \pm 0,7$ [N]) i obie zaliczane są do odmian o średniej twardości, muszą w nich istnieć znaczące różnice w mikrostrukturze. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że jabłka odmiany 'Lobo' nie nadają się do procesu suszenia. Uzyskane wyniki potwierdziły pozytywny wpływ ultradźwięków na kinetykę suszenia. Dla wszystkich zbadanych odmian uzyskano skrócenie czasu suszenia, proporcjonalnie do zastosowanej mocy ultradźwięków. Potwierdzono także pozytywny wpływ ultradźwięków na jakość produktu, zależny jednak od zastosowanej mocy.

9. Efektywność suszenia buraka ćwikłowego

Korzenie buraka ćwikłowego zakupiono na lokalnym targowisku i przechowywano je w temperaturze 4°C bez dostępu światła. Przed procesem technologicznym korzenie buraka przetrzymywano w temperaturze pokojowej w celu wyrównania temperatury z otoczeniem. Następnie surowiec obierano ze skórki i krojono w plastry o grubości 0,5 cm, z których wykrawano próby o średnicy 5,3 cm. Średnia masa wsadu do suszarki wynosiła 70 g, przy średniej wilgotności materiału 89% w. b.

9.1. Kinetyka procesu

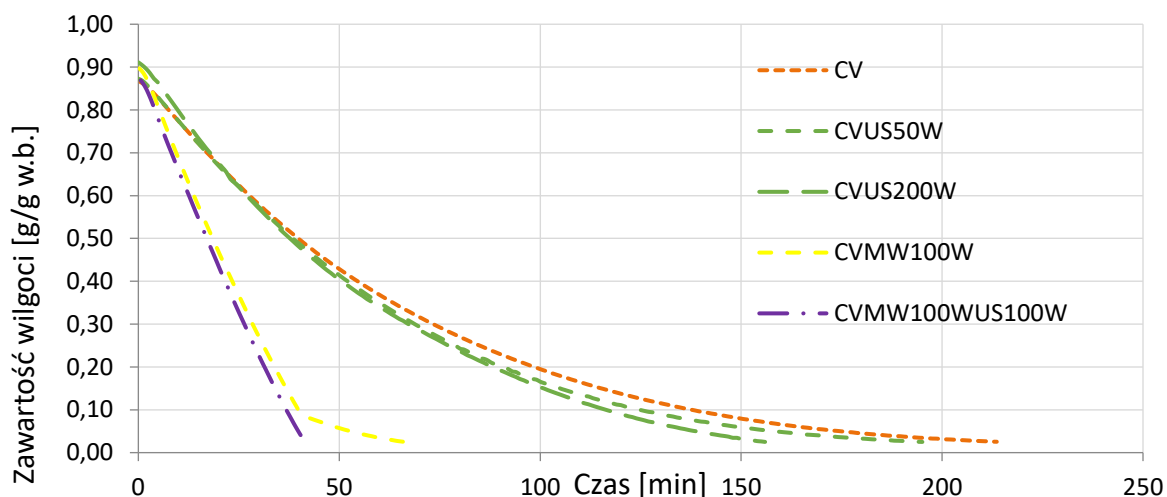
Uzyskane wyniki przedstawiono w formie wykresu zależności zawartości wilgoci w materiale (w odniesieniu do masy mokrej) względem czasu prowadzenia procesu. Materiał suszono w temperaturze 50°C, przy przepływie powietrza 5 m/s. Proces prowadzono do momentu osiągnięcia przez materiał wilgotności około 3% (w. b). Plastry buraka suszone konwekcyjne stanowiły próbę odniesienia. W tej części pracy badano wpływ suszenia konwekcyjnego z zastosowaniem ultradźwięków różnej mocy, suszenia konwekcyjno-mikrofalowego oraz suszenia hybrydowego łączącego suszenie konwekcyjne z ultradźwiękami i mikrofalami na wybrane parametry procesu i jakości produktu. Schemat przeprowadzonych badań przedstawiono w tabeli 14:

Tabela 14. Zestawienie warunków procesowych

Przepływ powietrza [m/s]	Temperatura powietrza [°C]	Moc ultradźwięków [W]	Moc mikrofal [W]	Akronim
5	50	-	-	CV
5	50	50	-	CVUS50W
5	50	200	-	CVUS200W
5	50	-	100	CVMW100W
5	50	100	100	CVUS100WMW100W

Na rysunku 44 przedstawiono krzywe kinetyki suszenia plastrów buraka. Najdłuższy czas suszenia badanych prób odnotowano dla suszenia konwekcyjnego. Czas suszenia z zastosowaniem ultradźwięków niskiej mocy CVUS50W był o 14% krótszy od suszenia metodą CV. Zastosowanie czterokrotnie większej mocy ultradźwięków pozwoliło na niemal dwukrotnie większą redukcję czasu suszenia (o 27%). W przypadku wspomaganie procesu suszenia mikrofalami o średniej mocy 100 W czas procesu uległ skróceniu o 69%, czyli o 145 minut. Krzywa dla prób suszonych metodą CVMW100W cechuje się dużym kątem nachylenia, który gwałtownie zmniejsza się po osiągnięciu wilgotności 0,09 [g/g w.b.] i pozostaje względnie stały do końca procesu. Wynika to z określenia nastawy temperatury na poziomie 80°C, w celu ochrony materiału przed spalaniem. Przekroczenie temperatury nastawy powoduje odłączenie dodatkowego źródła energii i kontynuowanie procesu sposobem konwekcyjnym. Taka charakterystyka krzywej, tzn. przekroczenie 80°C, może być spowodowane zablokowaniem powierzchni materiału pod wpływem gwałtownego skurczu, wiążącym się z szybką redukcją wilgoci z materiału. Burak, jako materiał o małej porowatości (14,5% [255]) ma utrudnioną dyfuzję wilgoci z głębi tkanki, co może powodować zasklepienia porów zewnętrznej warstwy. Krzywa dla prób suszonych metodą CVUS100WMW100W przebiega bardzo podobnie do krzywej przedstawiającej proces suszenia CVMW100. W w. w. procesach redukcja czasu suszenia w odniesieniu do suszenia konwekcyjnego wynosiła ok. 69% - 80%. W przypadku prób suszonych metodą CVUS100WMW100W

nie obserwowano załamania krzywej, która do osiągnięcia przez materiał końcowej wilgotności 0,03 [g/g wb] przebiega ze stałym nachyleniem. Może być to spowodowane działaniem ultradźwięków, które poprzez oddziaływanie na strukturę materiału, mogły przyczynić się do powstania mikrokanalów na powierzchni i nie dopuścić do jej zablokowania. Krzywe dla prób suszonych metodą CVUS50W i CVUS200W mają przebieg charakterystyczny dla suszenia konwekcyjno-ultradźwiękowego materiału roślinnego, gdzie kąt nachylenia wzrasta wraz z mocą zastosowanych ultradźwięków w stosunku do krzywej ukazującej przebieg suszenia konwekcyjnego.

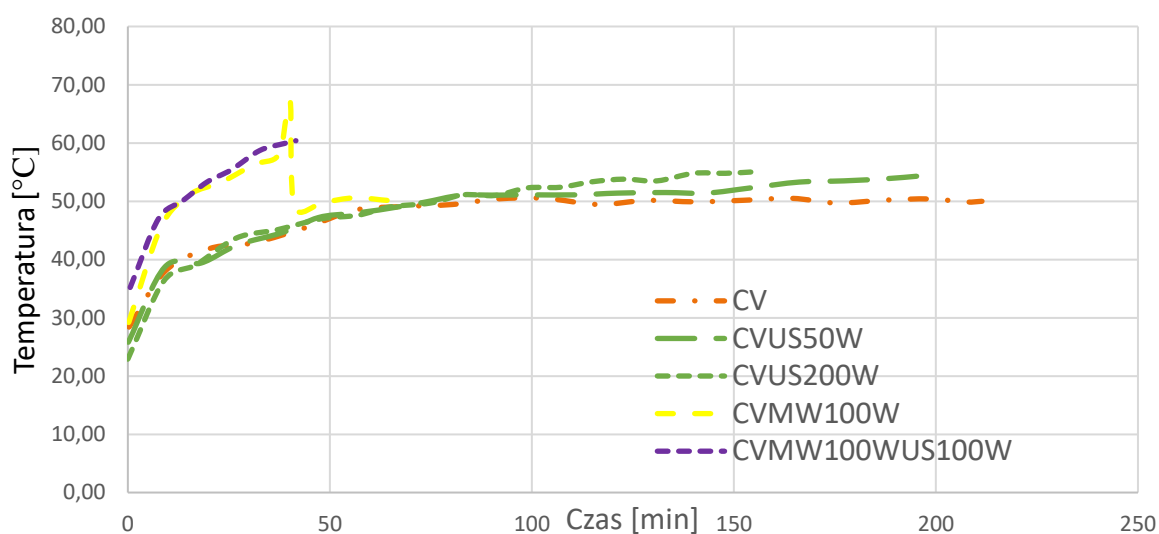


Rysunek 44. Krzywe kinetyczne dla programów suszenia zaproponowanych dla buraka ćwikłowego

9.1.1. Krzywe temperaturowe

Na rysunku 45 przedstawiono krzywe temperaturowe odpowiadające procesom suszenia opisanym krzywami kinetycznymi zaprezentowanym na rysunku 44. Charakterystyka krzywej dla próby suszonej metodą CV odpowiada typowym krzywom dla suszenia konwekcyjnego, gdzie materiał osiąga temperaturę czynnika suszącego. W tym przypadku nastawa wynosiła 50°C i materiał w 75 minucie procesu osiągnął tę wartość. Próby suszone metodą CVUS50W i CVUS200W charakteryzowały się wyższą temperaturą od prób suszonych konwekcyjnie (CV) odpowiednio o 1,5 i 5°C. Krzywa temperaturowa dla prób suszonych metodą CVUS50W, podobnie jak krzywa kinetyczna, ma przebieg zbliżony do krzywej dla prób suszonych metodą CV do ok. 150 min. procesu, co odpowiada zastosowanej niskiej mocy ultradźwięków i małej podatności tkanki buraka na ultradźwięki. Dopiero w końcowej fazie procesu, temperatura próby suszonej metodą CVUS50W zaczyna rosnąć, osiągając pod koniec procesu temperaturę o 4,5°C wyższą niż dla prób suszonych metodą CV. Może być to związane z niską zawartością wody w próbce i ograniczeniem procesu jej dyfuzją do powierzchni, kiedy fala akustyczna padała na suchą powierzchnię materiału, powodując jej większe nagrzanie. Temperatura próby CVUS200W w ok. 75 min procesu zaczyna znacznie odbiegać od temperatury próby CV i w końcowym etapie osiąga temperaturę o 5°C wyższą. Może być to spowodowane nagrzewaniem materiału przez ultradźwięki, gdy dyfuzja wilgoci do powierzchni została bardzo utrudniona. W wyniku tego temperatura powierzchni nie obniża się poprzez proces odparowania wilgoci, tylko bezpośrednio poddawana jest wysokoenergetycznej fali akustycznej oraz stosunkowo niewielkiej ilości energii, dostarczanej przez suszenie konwekcyjne. Charakterystyczny przebieg krzywej temperaturowej dla prób suszonych metodą CVMW100W jest spowodowany osiągnięciem krytycznej bezpiecznej temperatury przez materiał (80°C, programowana nastawa). Krytyczna wartość temperatury nie została zarejestrowana na krzywej, natomiast specyficzny pik pokrywa się z załamaniem na krzywej kinetycznej dla prób suszonych metodą CVMW100W. Po osiągnięciu tej

wartości program zakończył pracę magnetronu generującego mikrofałe i proces był kontynuowany poprzez suszenie wyłącznie konwekcyjne, stąd łagodne nachylenie krzywej dążącej do osiągnięcia temperatury powietrza suszącego. Przebieg krzywej dla próby suszonej metodą CVMW100WUS100W prawie całkowicie pokrywa się z krzywą dla próby CVMW100W do ok. 30 min procesu, z tym, że nie przekracza 60°C, w momencie osiągnięcia przez materiał zadanej wilgotności 0,03 wb. Zdecydowanie szybszy wzrost temperatury w stosunku do krzywych temperaturowych dla prób suszonych metodą CVUS50W i CVUS200W spowodowany został przez zastosowanie mikrofał. Końcowy odcinek krzywej temperaturowej dla próby suszonej w warunkach CVMW100WUS100W, odpowiadający spadkowi wilgotności od 0,08-0,03 [g/g w.b] nachylony jest pod nieco mniejszym kątem, co pozwala przypuszczać, że mimo zastosowania mikrofał, materiał osiągnąłby temperaturę medium grzewczego, nie przekraczając temperatury krytycznej nastawy. Charakterystyka krzywej temperaturowej dla próby suszonej metodą CVMW100WUS100W odpowiada jej krzywej kinetycznej i może potwierdzać ułatwienie dyfuzji wilgoci z materiału przez ultradźwięki.



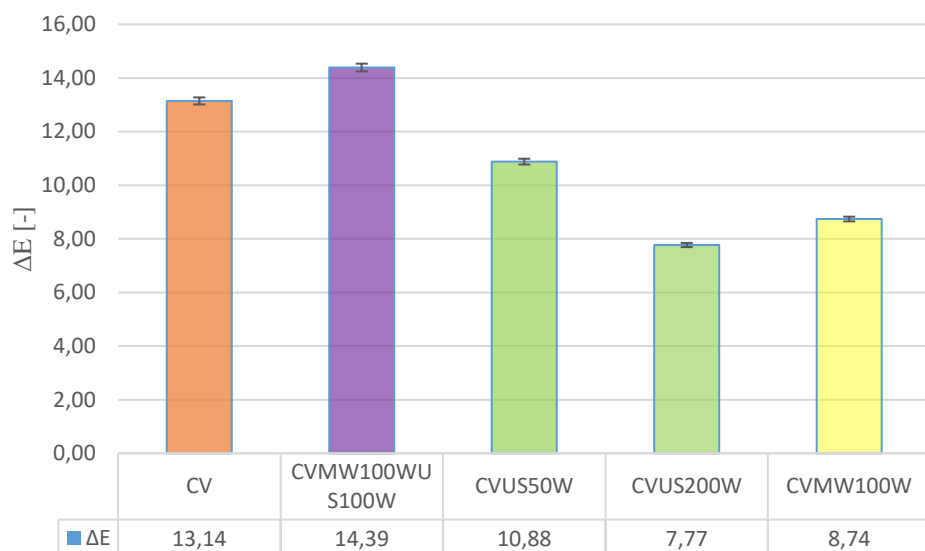
Rysunek 45. Krzywe temperaturowe odpowiadające krzywym kinetycznym z rys. 44. dla procesów suszenia buraka ćwikłowego

9.2. Jakość produktu

Uzyskany susz z buraka ćwikłowego poddano podstawowym fizycznym badaniom jakościowym, obejmującym zmianę barwy i aktywność wody.

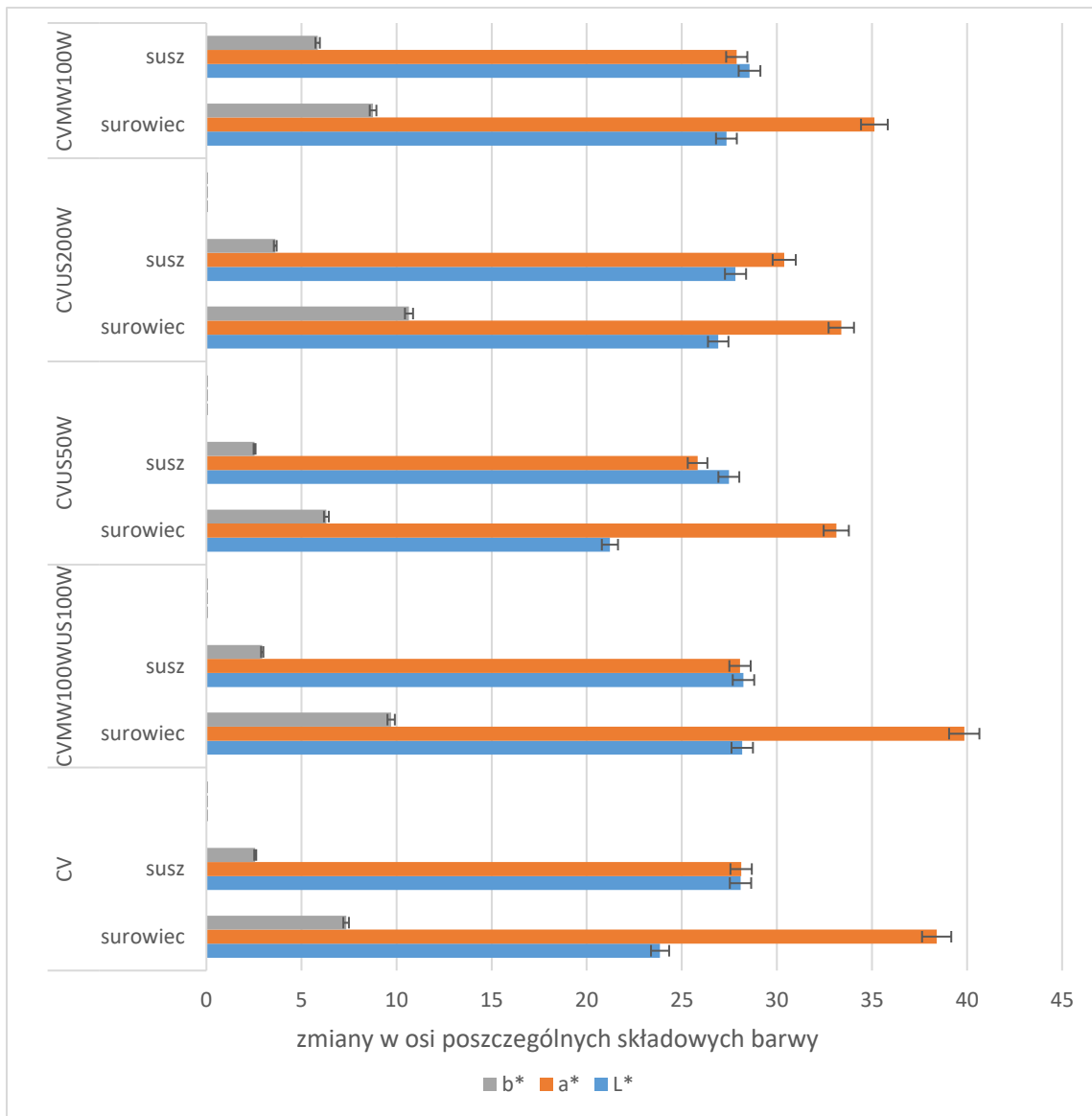
9.2.1. Zmiana barwy

W suszonych próbach buraka ćwikłowego określono całkowitą zmianę barwy w odniesieniu do barwy surowca. Na rysunku 46 przedstawiono zestawienie wartości zmiany barwy w zależności od warunków procesu suszenia. Całkowita zmiana barwy dla suszy uzyskanych metodą konwekcyjno-ultradźwiękową była o 17 i 40% (odpowiednio dla 50W i 200W US) niższa od zmiany barwy dla suszu uzyskanego w suszeniu konwekcyjnym, natomiast dla próby suszonej metodą konwekcyjno-mikrofałową całkowita zmiana barwy była o 33% mniejsza w stosunku do ΔE dla prób suszonych metodą CV. Największą całkowitą zmianę barwy odnotowano dla prób suszonych metodą CVMW100WUS100W i była ona o 10% wyższa niż dla suszy uzyskanych metodą konwekcyjną.



Rysunek 46. Całkowita zmiana barwy podczas suszenia buraka czerwonego

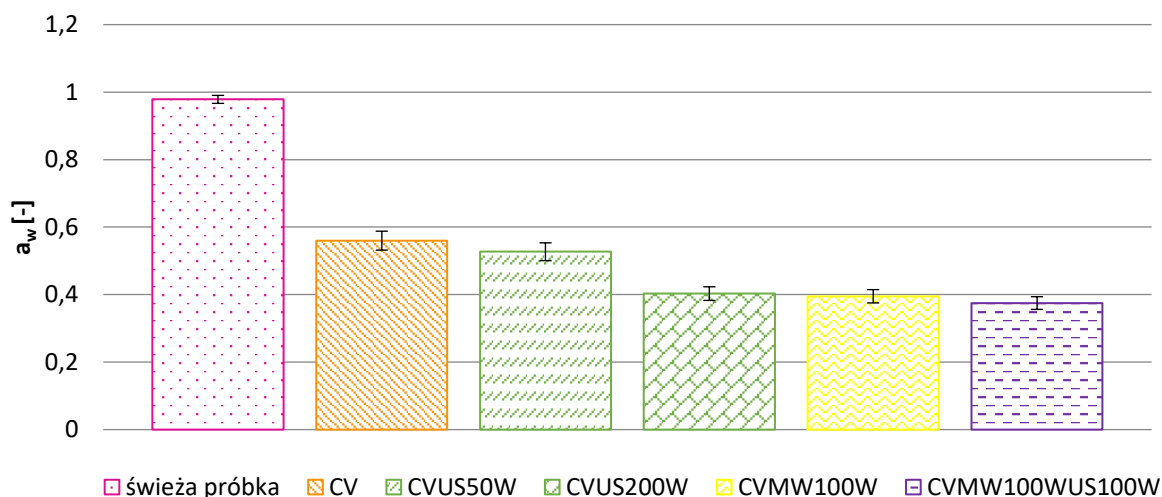
Na rysunku 47 przedstawiono zmiany poszczególnych składowych barwy dla suszy otrzymanych z buraka ćwikłowego w odniesieniu do surowca. Największymi zmianami w zakresie jasności próbki (L^*) charakteryzowały się próby o najdłuższym czasie suszenia (CV i CVUS50, odpowiednio wzrost wartości o 18% i 29% w stosunku do surowca). Zmiany w zakresie parametru barwy a^* związane były ze zmniejszeniem udziału barwy czerwonej i dotyczyły wszystkich badanych prób. Największymi zmianami parametru a^* cechowały się susze otrzymane metodą CVMW100WUS100W (29% spadek w stosunku do surowca), a najmniejszymi CVUS200W (9% spadek w stosunku do surowca). W przypadku parametru b^* również odnotowano spadek wartości w otrzymanych suszach. Najmniejszą wrażliwość na zastosowany program suszenia uzyskano w przypadku prób otrzymanych metodą CVMW100W (33% procentowy spadek wartości w stosunku do surowca). Dla pozostałych prób zmiana wartości parametru b^* w stosunku do surowca była większa i wynosiła od 60% do 70%. Podobne rezultaty w odniesieniu do strat i zmian w poszczególnych składowych barwy uzyskali dla buraka Gokhale i Lele [256] [257], którzy badali wpływ suszenia konwekcyjnego w różnych temperaturach na kinetykę i zmianę barwy oraz zawartość związków barwnych. Dla temperatury 50°C i podobnego czasu suszenia, uzyskali rozjaśnienie próbki oraz straty w barwie czerwonej i żółtej. Zmiany w zakresie strat barwy czerwonej powiązali oni ze stratami w zawartości betacyjanianin .



Rysunek 47. Zmiany parametrów $\Delta(L^*a^*b^*)$ podczas suszenia buraka czerwonego

9.2.2. Aktywność wody

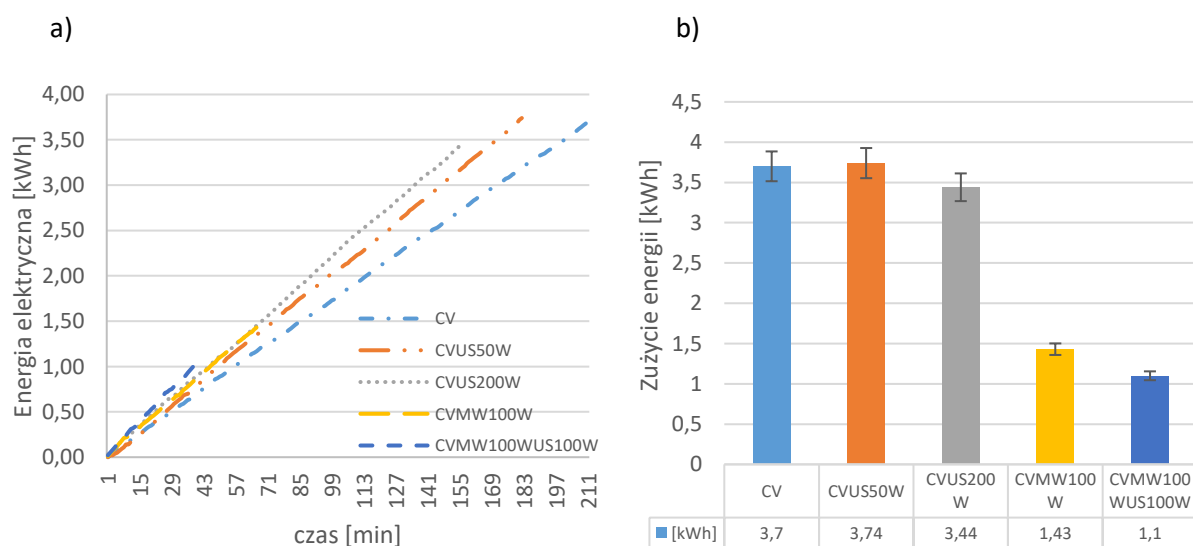
Na rysunku 48 przedstawiono zestawienie wyników dotyczących aktywności wody oznaczonej w surowcu i badanych suszach. Próba świeża miała aktywność wody bliską 1, co świadczy o bardzo wysokiej aktywności wody w badanym materiale. Wszystkie otrzymane susze, niezależnie od użytej metody suszenia, charakteryzowały się aktywnością wody poniżej wartości 0,6, uznawanej za bezpieczną. Aktywność wody dla próbek uzyskanych metodą CV i CVUS50W o podobnym przebiegu krzywych suszenia wynosiła około 0,55. Zbliżona wartość a_w w tych próbkach świadczy o minimalnym wpływie tak niskiej mocy ultradźwięków na badany materiał. Dla suszy otrzymanych metodą CVUS200W, CVMW100W i CVMW100WUS100W uzyskano zbliżone wartości a_w , wynoszące około 0,4.



Rysunek 48. Aktywność wody próbek uzyskanych z buraka ćwikłowego

9.2.3. Zużycie energii

Dla przeprowadzonych procesów wykonano bilans energetyczny. Na rysunkach 49 a) i b) zestawiono zużycie energii elektrycznej [kWh] liczonej na wyjściu z suszarki hybrydowej, obejmujące urządzenia peryferyjne. Największym zużyciem energii charakteryzowały się procesy suszenia konwekcyjnego i konwekcyjno-ultradźwiękowego (CV, CVUS50W i CVUS200W), uzyskując zbliżone wartości około 3,7 [kWh]. Mimo redukcji czasu suszenia o 14 i 27% zastosowanie dodatkowego źródła energii w postaci fali akustycznej nie pozwoliło na obniżenie poboru energii elektrycznej. Może być to spowodowane wspomnianą wcześniej niską porowatością buraka, nie pozwalającą na szybszą wymianę masy, warunkującej krótszy czas procesu. Znaczącą redukcję zużycia energii zaobserwowano dla procesów wykorzystujących mikrofałę (CVMW100W i CVMW100WUS100W), gdzie zmalało ono około 2- i 3-krotnie.



Rysunek 49. Zestawienie zużycia energii elektrycznej: a) przyrost zużycie energii w czasie procesu; b) całkowite zużycie energii

Taki wyraźnie mniejszy pobór energii jest spowodowany znaczącym skróceniem czasu trwania procesu. Jak wynika z wykresu 49 a), proces CVMW100WUS100W cechował się największym jednostkowym poborem prądu (największy kąt nachylenia krzywej). Wynika to z jednoczesnego zastosowania dwóch dodatkowych źródeł energii. Krzywe wykreślone dla procesu CVUS200W i CVMW100W można ocenić jako jednakowo energochłonne (posiadający taki sam pobór jednostkowy), a różnice przedstawione na wykresie Rys. 49 b) wynikają z różnic czasu trwania procesu.

9.3. Podsumowanie i wnioski

Zastosowanie ultradźwięków w konwekcyjnym suszeniu buraka ćwikłowego pozwoliło na uzyskanie lepszych rezultatów, zarówno kinetycznych, jak i jakościowych, w odniesieniu do suszenia konwekcyjnego (skracając czas suszenia o 14 i 27% dla 50 i 200 W), mimo małej porowatości materiału. Jakość produktu (zmiana barwy zredukowana w stosunku do prób suszonych metodą CV o 17 i 40% dla 50 i 200 W), skrócenie czasu procesu a także redukcja zużycia energii rosły wraz ze wzrastającą mocą ultradźwięków. Zastosowanie mikrofal w suszeniu konwekcyjnym również pozwoliło na uzyskanie dobrych rezultatów kinetycznych (redukcja czasu suszenia o 69% i zmniejszenie zużycia energii o 61% dla CVMW100W w stosunku do CV), jednakże znaczące nagrzanie próby poskutkowało pogorszeniem jakości produktu, zwłaszcza zmniejszeniem udziału barwy czerwonej, gdzie dla prób suszonych metodą CVMW100W wartość Δa^* wynosiła 7,2, a w przypadku próby suszonej metodą CVUS200 wartość tego parametru kształtowała się na poziomie 3,0. Może to być związane ze znaczną degradacją betaniny w badanych próbach. Kombinacja mikrofal i ultradźwięków (CVMW100WUS100W) zastosowana w procesie suszenia, dała najkorzystniejszy efekt w odniesieniu do kinetyki i zużycia energii (redukcja czasu suszenia o 80% i zmniejszenie zużycia energii o 70% w stosunku do prób suszonych metodą CV), odnotowano jednak największe zmiany barwy produktu (Δa^* miała wartość około 7, natomiast dla prób suszonych konwekcyjnie około 5 i zwiększenie ΔE o 10% dla CVMW100WUS100W w stosunku do suszy uzyskanych metodą CV). Wyższa temperatura procesu oraz możliwość naruszenia integralności tkanki mogły spowodować większą degradację betalain odpowiedzialnych za barwę buraka ćwikłowego.

10. Efektywność suszenia ziemniaka

Ziemniaki odmiany Denar (*Solanum tuberosum* L.) zakupiono na lokalnym targowisku. Surowiec był przechowywany w temperaturze 4°C, w ciemności, aby zapobiec zielenieniu i kiełkowaniu. Przed procesem ziemniaki przetrzymywano w temperaturze pokojowej. Ziemniaki były myte, obierane, a następnie krojone w plastry o grubości 0,5 cm, z których wycinane były próby o średnicy 5,3 cm. Masa wsadu użytego do suszenia wynosiła 68,5 g przy średniej wilgotności materiału wynoszącej 82% w.b.

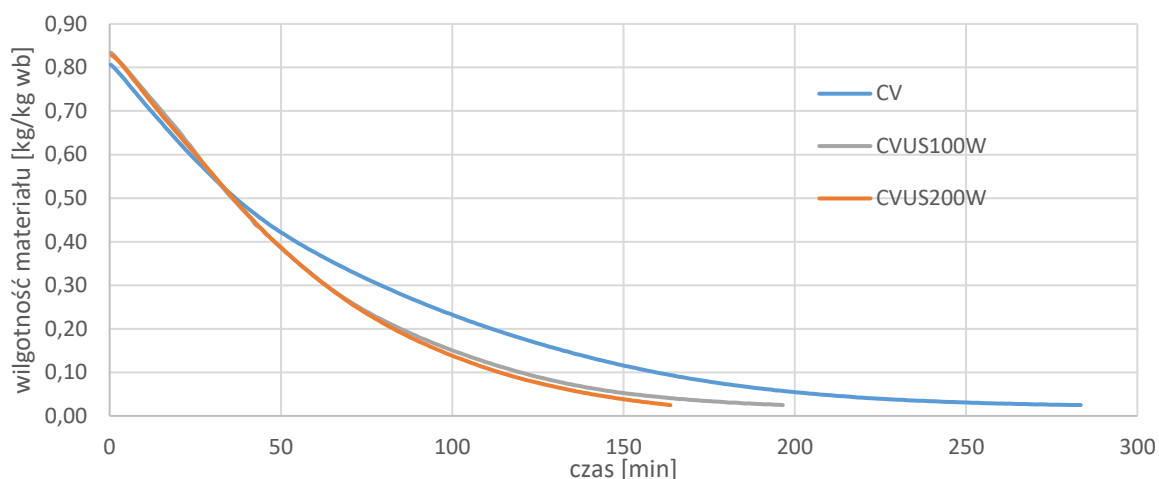
10.1. Kinetyka procesu

Do przeprowadzenia procesu suszenia wykorzystano suszarkę hybrydową, opisaną w rozdziale 6.2. Ustalono parametry procesowe: przepływ powietrza 4 m/s i temperaturę powietrza 50°C. Próbę odniesienia stanowiły ziemniaki suszone konwekcyjnie. Zestawienie stosowanych parametrów procesowych umieszczono w tabeli 15.

Tabela 15. Zestawienie warunków procesowych w suszeniu ziemniaka

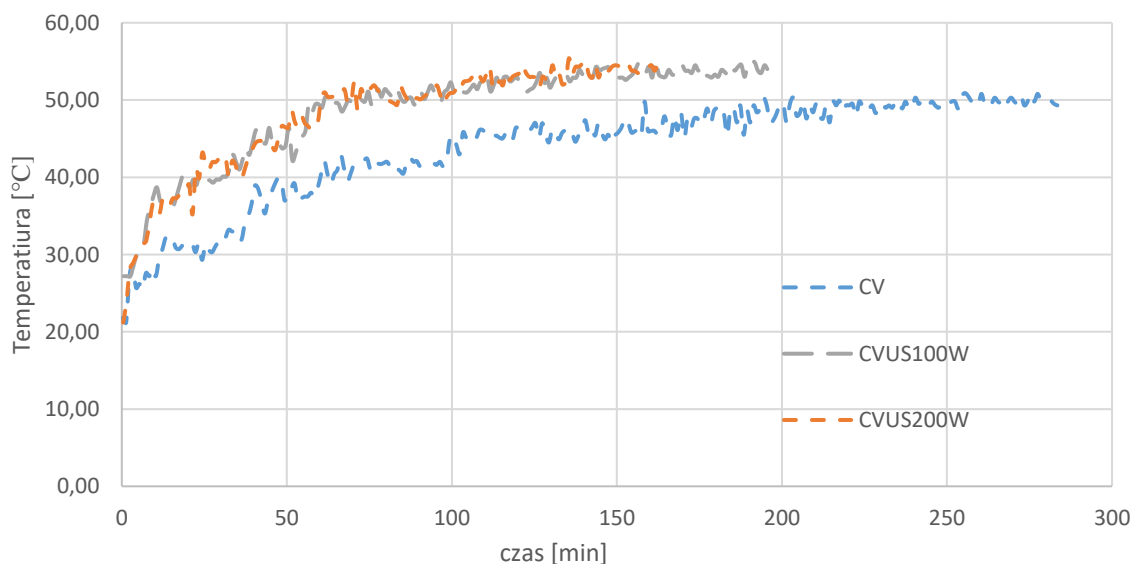
Temperatura [°C]	Przepływ powietrza [m/s]	Moc ultradźwięków [W]	Akronim
50	4	-	CV
		100	CVUS100W
		200	CVUS200W

Na rysunku 50 przedstawiono wykres zależności spadku wilgoci od czasu trwania procesu dla prób otrzymanych z ziemniaka odmiany Denar. Proces suszenia zakończono, gdy wilgotność materiału była na poziomie 3% w.b. W początkowym okresie suszenia, do ok. 35 min procesu i spadku wilgotności materiału do 0,5 [kg/kg w.b], nie obserwowano dużych różnic między kątem nachylenia krzywych dla suszenia konwekcyjnego a konwekcyjno-ultradźwiękowego (CVUS100W i CVUS200W). Dopiero po tym czasie krzywa suszenia dla prób suszonych metodą CV wyraźnie zmienia kąt nachylenia i proces przebiega dużo wolniej niż w przypadku prób suszonych metodą CVUS100W i CVUS200W. Całkowity czas suszenia prób suszonych konwekcyjnie wynosił około 280 min. Krzywe dla prób suszonych ze wspomaganie ultradźwiękowym po 35 min procesu także przebiegają w bardzo zbliżony sposób, a zauważalna różnica między nimi pojawia się dopiero na samym końcu trwania procesu, podczas ubytku ostatnich 0,04 [kg/kg w.b]. Zastosowanie ultradźwięków podczas suszenia badanych prób (CVUS100W i CVUS200W) spowodowało skrócenie czasu trwania procesu o odpowiednio 31 i 42% w porównaniu do suszenia konwekcyjnego. Małe różnice w przebiegu krzywych dla prób suszonych metodą CVUS100W i CVUS200W mogą wynikać ze specyficznej struktury ziemniaka, opisanej w rozdziale 5.2.1.



Rysunek 50. Krzywe kinetyki suszenia ziemniaka

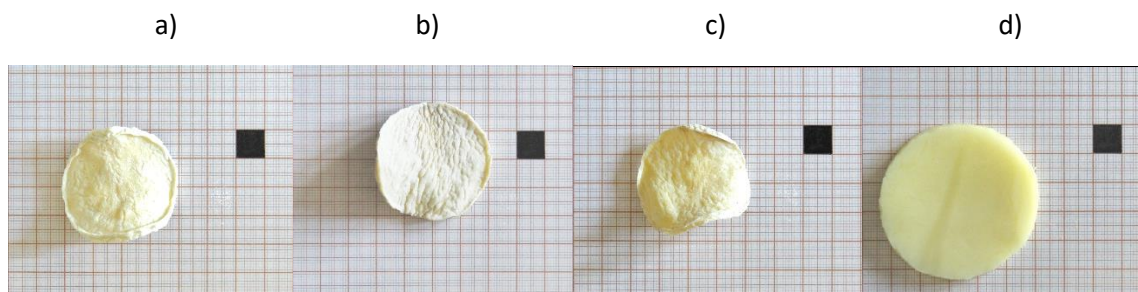
Na rysunku 51 zaprezentowano krzywe temperaturowe dla badanych procesów suszenia opisanych w Tabeli 15. Dla prób suszonych metodą CV wzrost temperatury przebiegał bardzo wolno. Badany materiał osiągnął temperatura czynnika suszącego dopiero w ok. 180 min procesu. Może być to spowodowane stosunkowo niską nastawą temperatury procesu oraz dużą masą próbki. Dla prób suszonych metodą CVUS100W i CVUS200W wzrost temperatury, szczególnie na początku procesu jest zdecydowanie szybszy i już po ok. 15 minutach jest wyższy od wartości otrzymanej dla suszenia metodą CV o 5°C. W próbach tych stała wartość temperatury została osiągnięta dopiero po 110 minucie procesu i była o 3 i 4 °C wyższa niż powietrze w suszarce, odpowiednio dla procesu prowadzonego z wykorzystaniem ultradźwięków o mocy 100 i 200 W. Czas przekroczenia temperatury powietrza pokrywa się z czasem wyraźnego różnicowania nachylenia krzywych kinetycznych suszenia konwekcyjnego i konwekcyjnego wspomaganego ultradźwiękami. Świadczy to zatem o pozytywnym wpływie ultradźwięków na wymianę masy.



Rysunek 51. Krzywe temperaturowe suszenia ziemniaka

10.2. Jakość produktu

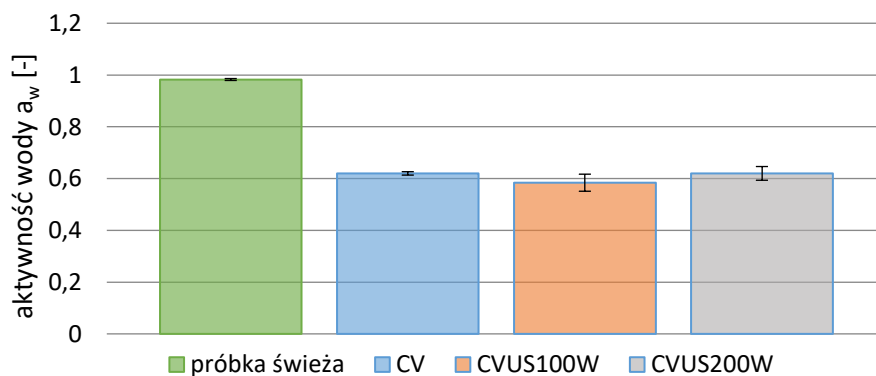
W wyniku suszenia uzyskano próby ziemniaka, które następnie poddano badaniom jakościowym. Otrzymane susze zaprezentowano na rysunku 52.



Rysunek 52. Fotografie własne próbek ziemniaka: a) CV, b) CVUS100W, c) CVUS200W, d) próbka świeża

10.2.3. Aktywność wody

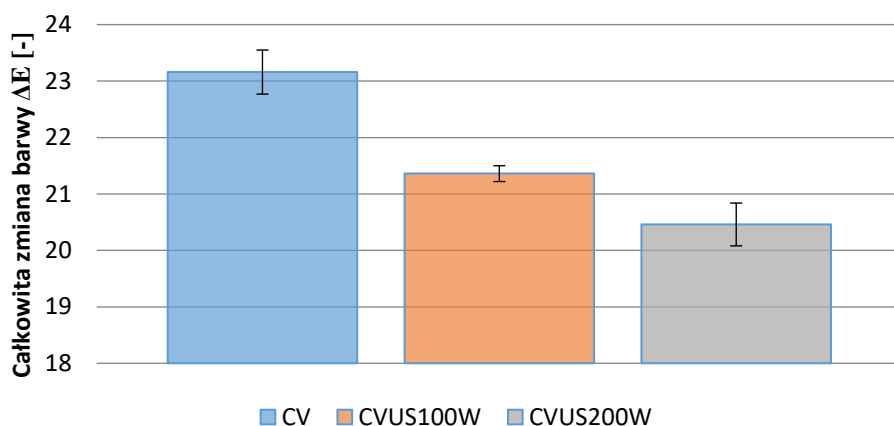
W otrzymanych suszach z ziemniaka oznaczono aktywność wody. Wszystkie badane próby miały zbliżoną wartość a_w , bliską 0,6. Uzyskana wartość jest stosunkowo duża, jednak w dalszym ciągu pozwala na skuteczne zahamowanie wzrostu mikroorganizmów i inhibicję reakcji enzymatycznych. Uzyskane wyniki są zbliżone (różnica 5%) do wartości aktywności wody uzyskanych przez Kowczyk-Sadowy i innych [258] dla suszonych konwekcyjnie warzyw, w tym ziemniaka. Suszyli oni warzywa do momentu uzyskania stałej masy (ok. 1%), co pozwala sądzić, że przedłużenie czasu trwania procesu nie wpłynęłoby na istotny spadek wartości aktywności wody, natomiast mogłoby pogorszyć inne parametry jakościowe.



Rysunek 53. Zestawienie wyników aktywności wody próbek ziemniaka

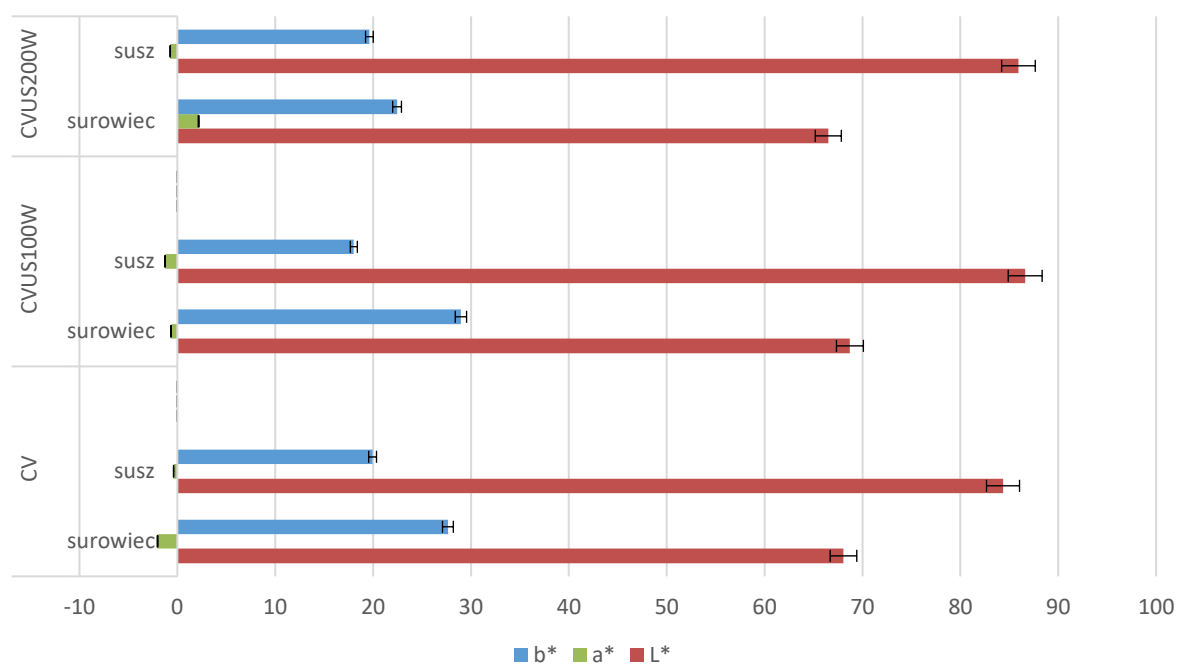
10.2.4. Zmiana barwy

W suszu z ziemniaka oznaczono zmianę barwy względem świeżego ziemniaka. Uzyskane wyniki zaprezentowano na rysunku 54. Największą całkowitą zmianę barwy ($23,16 \pm 0,39$ [-]) odnotowano dla prób suszonych konwekcyjnie. Dla suszy otrzymanych w procesach wspomaganym ultradźwiękami o mocy 100 i 200W wartość parametru ΔE była niższa odpowiednio o 7,7% i 8,4% w stosunku do prób suszonych konwekcyjnie.



Rysunek 54. Zestawienie wartości zmiany barwy suszu z ziemniaka

Analizując poszczególne parametry barwy badanych suszy, największe zmiany, w stosunku do surowca, odnotowano w przypadku parametru L^* (o 19, 20 i 23%, odpowiednio dla CV, CVUS100W i CVUS200W), które były związane z rozjaśnieniem barwy suszonych plasterów ziemniaka, niezależnie od stosowanego programu suszenia. Koresponduje to z wynikami uzyskanymi przez Chua i innych [259], którzy dla ziemniaka, przy zastosowaniu różnych technik suszenia, uzyskali wyraźny wzrost parametru L^* w kierunku barwy białej. Wartość parametru a^* badanych prób uległa niewielkim zmianom (od 0,61 do 2,9 [-]), natomiast wartość parametru b^* obniżyła się o 39, 61 i 14% odpowiednio, dla CV, CVUS100W i CVUS200W, co wskazuje na zmniejszenie udziału barwy żółtej (Rys. 55). Uzyskane wyniki potwierdzają zdjęcia próbek suszonych plasterów ziemniaka umieszczone na początku rozdziału, gdzie można zaobserwować wyraźne wybielenie próbek. Susze otrzymane poprzez suszenie konwekcyjne oraz konwekcyjne wspomagane ultradźwiękami o mocy 100 W cechowały się większym spadkiem udziału barwy żółtej, natomiast zastosowanie ultradźwięków o mocy 200 W spowodowało lepsze zachowanie tej składowej barwy. Podobne wyniki w odniesieniu do kierunku i wielkości zmian zachodzących w zakresie parametrów b^* oraz L^* i a^* dla ziemniaka uzyskali Bondaruk i Markowski [260].

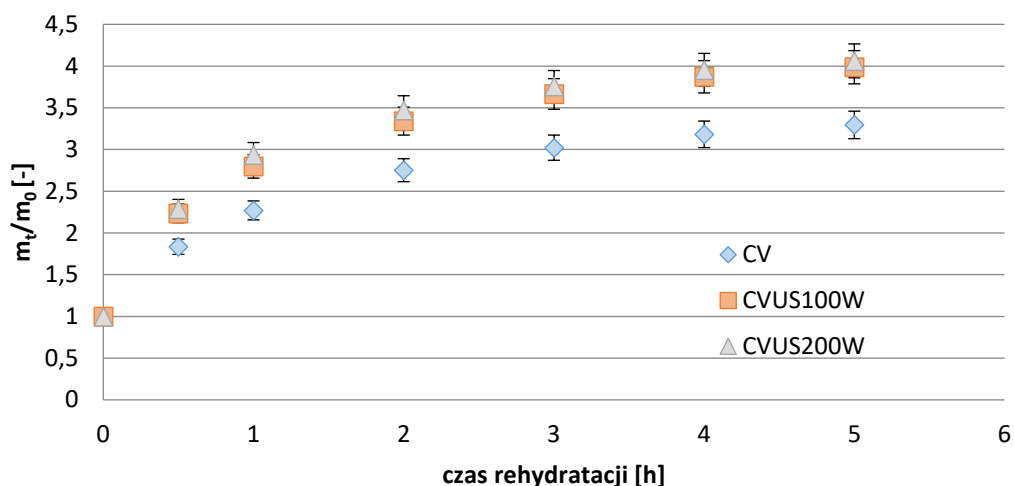


Rysunek 55. Zestawienie zmian w składowych barwy dla próbek ziemniaka

Specyficzny rodzaj zmian, zaprezentowany na rysunku powyżej, może świadczyć o zahamowaniu reakcji enzymatycznych, odpowiadających za brązowienie produktu [261]. Z kolei pojaśnienie barwy może wynikać z degradacji karotenoidów obecnych w tkance ziemniaka.

10.2.5. Rehydratacja

Na rysunku 56 przedstawiono zmiany masy suszy z ziemniaka podczas rehydratacji. Jak pokazano na wykresie, największym przyrostem masy cechowały się próby suszone z zastosowaniem ultradźwięków. Próbki suszone konwekcyjnie wyraźnie wolniej wchłaniają wodę i w czasie procesu uzyskany przyrost masy próbki stanowi 2-krotną wartość masy początkowej, podczas, gdy zastosowanie ultradźwięków pozwoliło na uzyskanie trzykrotnego przyrostu masy. Gorsze wyniki rehydratacji dla suszenia konwekcyjnego mogły być spowodowane przez długotrwałe narażenie na naprężenia rozciągające i ściskające i znaczne usztywnienie struktury. Drobne pęknięcia na powierzchni próbki, charakterystyczne dla suszenia konwekcyjnego, powstają głównie w ostatnim etapie suszenia. Wydłużenie tego czasu zwiększa uszkodzenia powierzchni, mocno wpływając na destrukcję tkanki we wnętrzu próbki, gdzie struktura ścian komórkowych zostaje trwale uszkodzona.

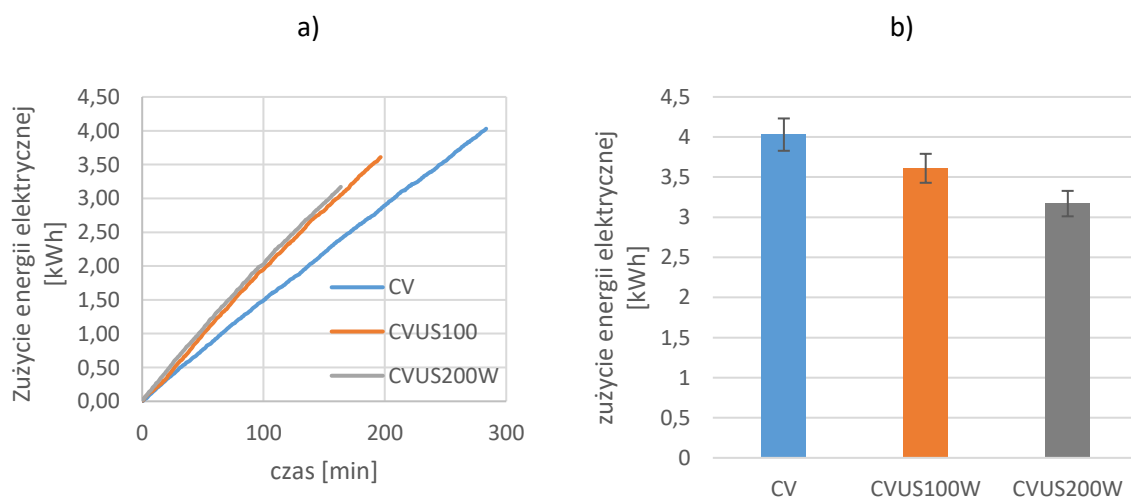


Rysunek 56. Wykres zmian masy próbki podczas rehydracji

Zastosowanie ultradźwięków o różnej mocy nie miało wpływu na zdolności rehydracyjne badanych prób. Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że zastosowanie ultradźwięków może przyczyniać się do ograniczenia pęknięcia ścian komórkowych wewnątrz i na powierzchni materiału. Działanie ultradźwięków na powierzchni prób prawdopodobnie nie przyczynia się do usztywnienia struktury, a dzięki wytwarzaniu mikrokanalów, może powodować uzyskanie lepszych właściwości rehydracyjnych materiału.

10.2.6. Energochłonność procesu

Na rysunku 57 przedstawiono zestawienie poboru energii elektrycznej z sieci podczas procesów suszenia. Jak można zaobserwować na rysunku 57 a) krzywa dla prób suszonych metodą CV wyraźnie odbiega od krzywych dla prób suszonych metodą CVUS100W i CVUS200W. Dla suszenia konwekcyjnego zanotowano największe zużycie energii, wynoszący ok. 4 [kWh]. Całkowite zużycie energii zobrazowane zostało na rysunku 57 b) i wskazuje na jej redukcję podczas suszenia wspomaganego ultradźwiękami o mocy 100 i 200 W o odpowiednio 12 i 22%.



Rysunek 57. Porównanie zużycia energii elektrycznej podczas suszenia ziemniaka: a) przyrost zużycia energii w czasie, b) całkowite zużycie energii

10.3. Podsumowanie i wnioski

Odnotowano pozytywny wpływ zastosowania ultradźwięków na kinetykę procesu suszenia plastrów ziemniaka, całkowite zużycie energii oraz zależność skrócenia czasu procesu od zastosowanej mocy ultradźwięków, gdzie czas suszenia został zredukowany o 31% i 42% a całkowite zużycie energii o 12 i 22% odpowiednio dla prób suszonych metodą CVUS100W i CVUS200W w odniesieniu do suszenia plastrów ziemniaka metodą CV. Użycie ultradźwięków w procesie suszenia przełożyło się także na jakość uzyskanego suszu. Choć zastosowanie ultradźwięków nie wpłynęło znacząco na aktywność wody, pozwoliło na ograniczenie zmian barwy produktu (obniżając wartość ΔE o 7,7% i 8,4% odpowiednio dla prób suszonych metodą CVUS100W i CVUS200W w odniesieniu do suszu ziemniaka uzyskanego metodą CV) oraz większą zdolność rehydracyjną (o 20% większy przyrost masy), w stosunku do materiału suszonego w procesie konwekcyjnym. Otrzymane wyniki pozwalają przypuszczać, że zastosowanie ultradźwięków w procesie suszenia konwekcyjnego pozytywnie wpływa na zachowanie struktury materiału oraz przyczynia się do oszczędności czasu i energii.

11. Efektywność suszenia marchwi zwyczajnej

Korzenie marchwi zwyczajnej (*Daucus carota* L.) zakupiono na lokalnym targowisku i zabezpieczono do badań przechowując je w temperaturze 4°C, bez dostępu światła. Marchew przed badaniem była myta, a następnie pokrojona w plastry, z których wykrojono próby o grubości 0,5 mm i średnicy 32 mm. Wykorzystana do badań marchew pochodziła od jednego dostawcy i charakteryzowała się podobnymi rozmiarami (długość, szerokość, brak wygięć).

Celem badań było określenie wpływu ultradźwięków i mikrofal na kinetykę suszenia konwekcyjnego oraz wybrane wyróżniki jakości suszonej marchwi.

Parametry badanych procesów suszenia zostały przedstawione w tabeli 16.

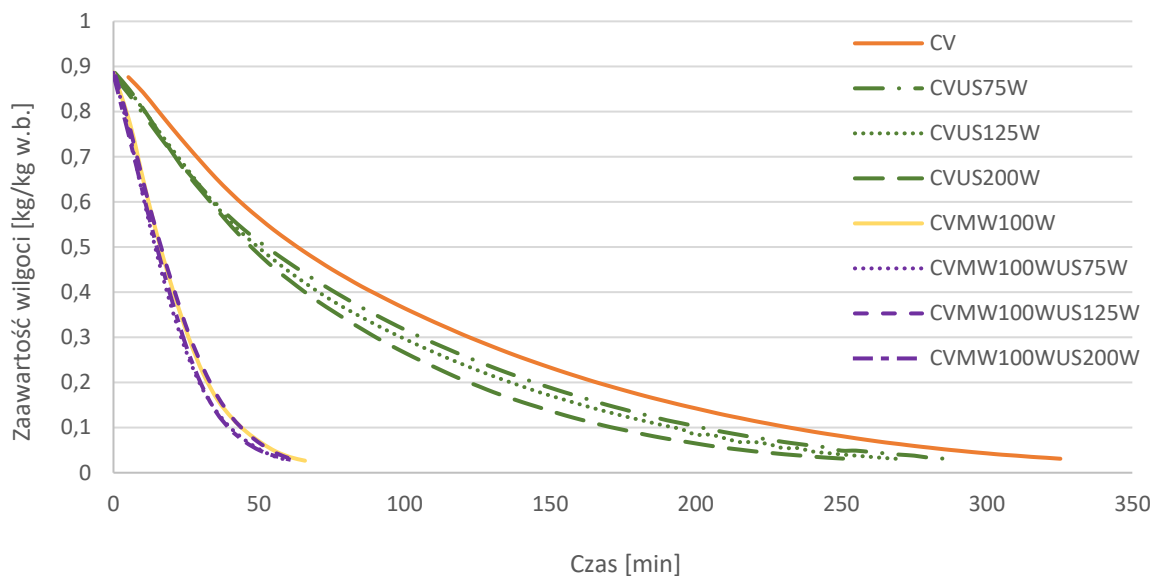
Tabela 16. Zestawienie parametrów suszenia dla marchwi

Temperatura powietrza [°C]	Prędkość przepływu powietrza [m/s]	Moc ultradźwięków [W]	Moc mikrofal [W]	Akronim
45	4	-	-	CV
		75	-	CVUS75
		125	-	CVUS125
		200	-	CVUS200
		-	100	CVMW100
		75	100	CVMW100US75
		125	100	CVMW100US125
		200	100	CVMW100US200

Proces suszenia uznawano za zakończony, gdy wilgotność materiału wynosiła 0,03 [kg/kg w.b]

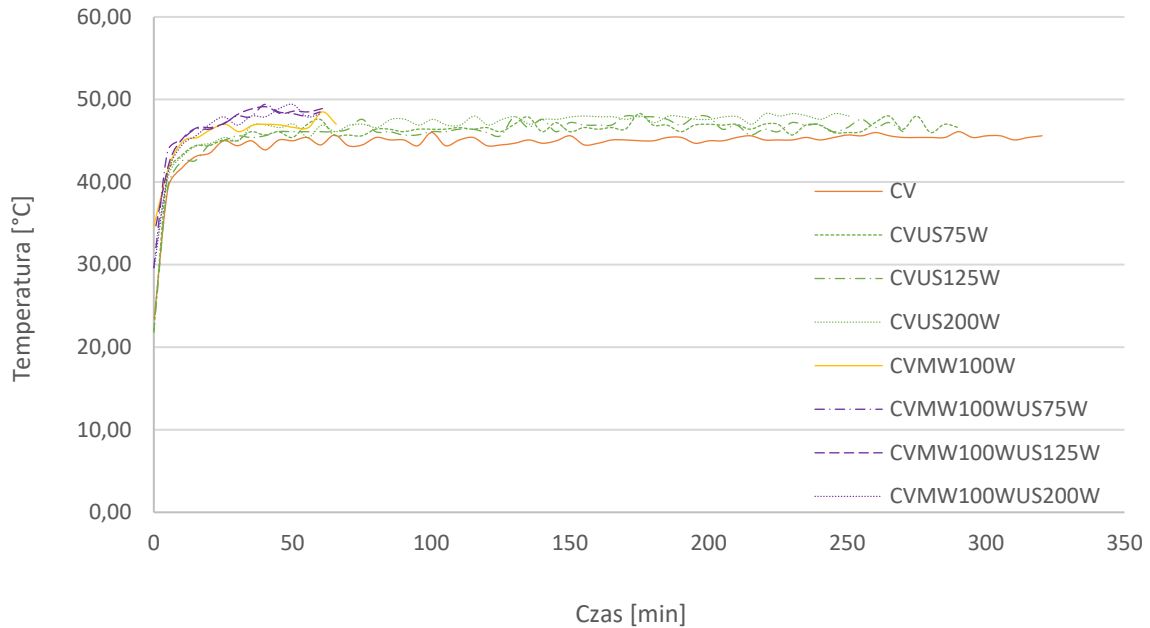
11.1. Kinetyka procesu

Na podstawie krzywych suszenia zaprezentowanych na rysunku 58 oceniano kinetykę procesu. Najdłuższym czasem suszenia plastrów marchwi (ok. 320 min) charakteryzował się proces prowadzony metodą konwekcyjną (CV). W tym przypadku przebieg krzywej suszenia był typowy dla suszenia konwekcyjnego. Zastosowanie ultradźwięków w procesie suszenia konwekcyjnego spowodowało skrócenie czasu procesu wraz z wzrastającą mocą ultradźwięków (75, 125, 200 W) odpowiednio o 10, 15 i 22%. Krzywe dla prób suszonych metodą CVUS charakteryzowały się podobnym nachyleniem do krzywej przedstawiającej proces suszenia metodą CV, choć w początkowej fazie procesu (do około 50 min.) spadek wilgotności prób postępował szybciej. W początkowej fazie procesu krzywe dla prób suszonych metodą CVUS75W, CVUS125W i CVUS200W przebiegały niemal identycznie, co świadczy o małym wpływie ultradźwięków na I etap procesu, niezależnej od zastosowanej mocy. Po tym czasie krzywe zaczęły się różnicować, co może wskazywać na wpływ mocy ultradźwięków na transport masy. Marchew, jako materiał o niskiej porowatości ma utrudnioną dyfuzję wilgoci do powierzchni. Dopiero zastosowanie ultradźwięków o dużej mocy (CVUS200W) pozwoliło na znaczącą redukcję czasu suszenia, co może wynikać z modyfikacji próby przez falę akustyczną, wywołującą zmiany w strukturze materiału.



Rysunek 58. Krzywe suszenia dla marchwi.

W przypadku suszenia konwekcyjnego plasterków marchwi z zastosowaniem mikrofal o mocy 100 W (CVMW100W) odnotowano redukcję czasu suszenia o około 79% w stosunku do suszenia konwekcyjnego. Przeprowadzono również testy suszenia hybrydowego, wykorzystując mikrofałę o mocy 100 W, jako moc dobraną do wielkości wsadu oraz pozostałych parametrów procesowych, nie dopuszczając do przegrzania próbki i nie wywołującej w niej niekorzystnych zmian. W takim układzie doświadczalnym przeprowadzono także testy z wykorzystaniem mikrofal o mocy 200 i 300 W, w tym przypadku próby po kilku minutach procesu przypalały się i ulegały znaczącemu „puffingowi”, w związku z czym odrzucono w. w. warianty doświadczalne z zastosowaniem dużych mocy. Do suszenia hybrydowego zastosowano wcześniejsze parametry procesowe oraz te same moce ultradźwięków. W procesach suszenia, które charakteryzują krzywe dla próbek suszonych metodą CVMW100WUS75W, CVMW100WUS125W i CVMW100WUS200W, odnotowano skróceniem czasu suszenia o około 81% w odniesieniu do suszenia konwekcyjnego (CV) i o około 8% w stosunku do suszenia konwekcyjno-mikrofalowego (CVMW100W). Wszystkie procesy hybrydowe cechowały się zbliżonym przebiegiem krzywych suszenia oraz czasem suszenia (różnice rzędu 1 min). Może to świadczyć o pozytywnym wpływie suszenia hybrydowego na kinetykę procesu. Zastosowanie wzrastającej mocy ultradźwięków nie spowodowało istotnych różnic w czasie suszenia marchwi, co może świadczyć o granicznych możliwościach poprawy kinetyki suszenia przez zastosowanie dodatkowego źródła energii.



Rysunek 59. Krzywe temperaturowe dla marchwi

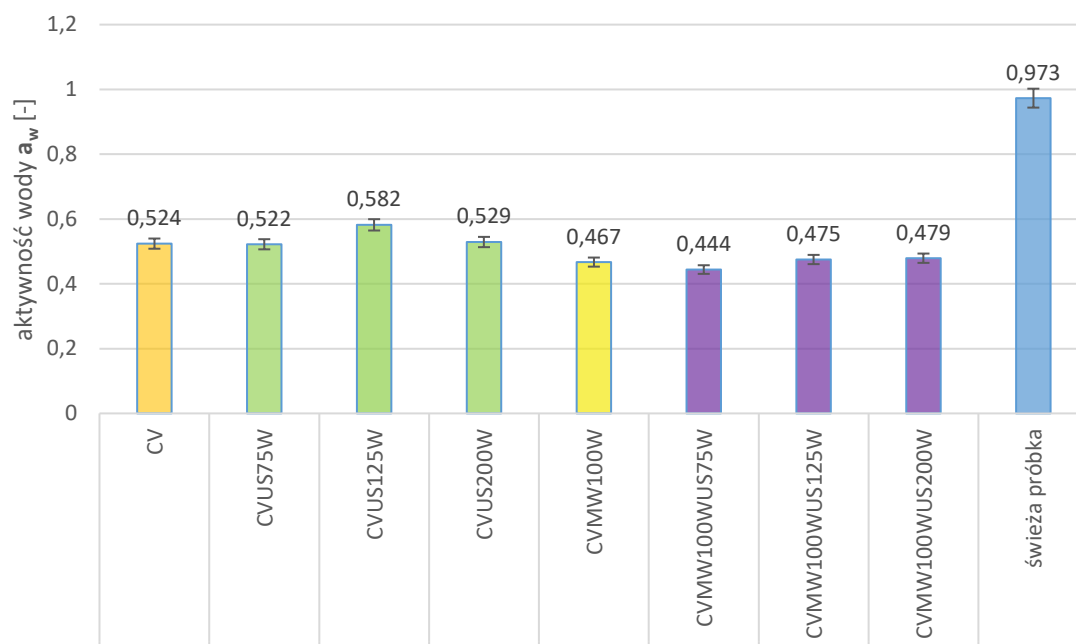
Na wykresie powyżej zaprezentowano krzywe temperaturowe, odpowiadające procesom suszenia omówionym wcześniej. Krzywa temperaturowa dla prób suszonych metodą CV przebiega w sposób typowy, oscylując wokół temperatury powietrza suszącego (45°C). Kolorem zielonym oznaczono krzywe odpowiadające suszeniu konwekcyjno-ultradźwiękowemu o różnej mocy. W tym układzie próby osiągnęły temperaturę medium suszącego szybciej, tj. po ok. 20 min. dla procesu CVUS200W oraz po ok. 25 min dla procesów CVUS75W i CVUS 125W. Po tym czasie temperatura próby rosła powoli, przekraczając temperaturę medium suszącego. Dla próby otrzymanej metodą CVUS200W temperatura przekroczyła temperaturę powietrza suszącego o 3°C, natomiast dla prób suszonych metodą CVUS75W i CVUS125W, o 2°C. W przypadku prób otrzymanych metodą CVMW100W oraz suszonych hybrydowo (kolor fioletowy), temperaturę powietrza suszącego osiągnięto już po ok. 10 min procesu. Krzywa temperaturowa dla prób otrzymanych metodą CVMW100W ma zbliżony przebieg do krzywej dla prób suszonych metodą CVUS200W i osiąga temperaturę 48°C, natomiast plastry marchwi suszone hybrydowo osiągają niemal 50°C, niezależnie od zadanej mocy ultradźwięków. Pokrywa się to z przebiegiem krzywych kinetycznych. Brak różnic w temperaturze prób otrzymanych metodą CVMW100WUS75W, CVMW100WUS125W i CVMW100WUS200W może wynikać z dużego przepływu powietrza (4 m/s), który uniemożliwiał zbytnie nagrzewanie powierzchni materiału.

11.2. Jakość produktu

Ocenę jakości uzyskanego suszu, przeprowadzono na podstawie oznaczenia zmian barwy i aktywności wody oraz oznaczenia zawartości związków o potencjale bioaktywnym oraz pojemności antyoksydacyjnej.

11.2.1. Aktywność wody

Aktywność wody została zbadana zarówno dla materiału świeżego, jak i suszonego. Pomiar przeprowadzono w temperaturze pokojowej, średnio 23,4°C, gdzie różnice między poszczególnymi pomiarami wynosiły $\pm 1^\circ\text{C}$. Wyniki zaprezentowano na rysunku 60.

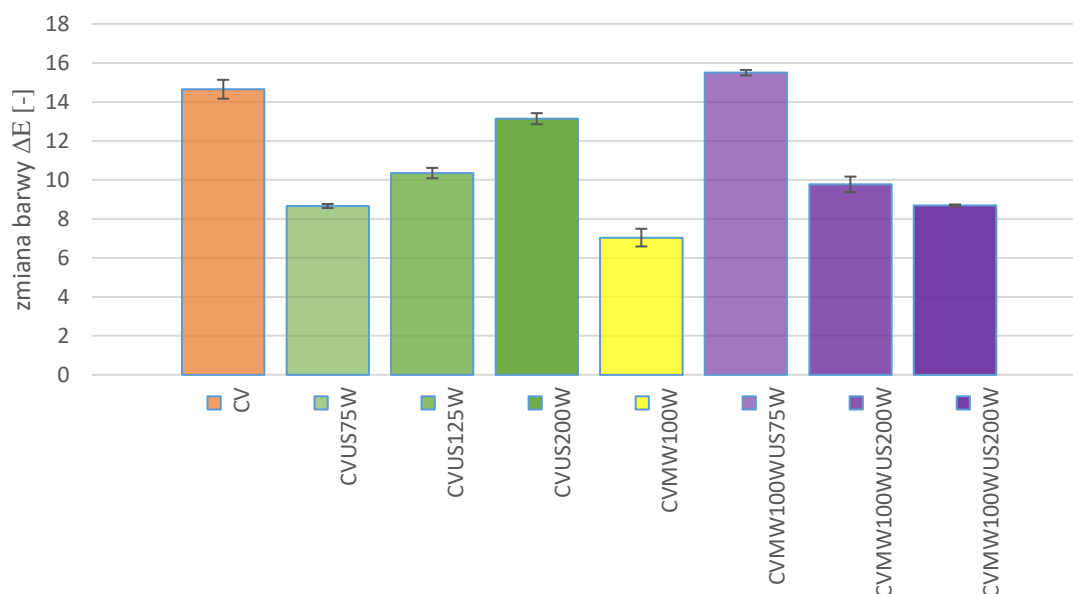


Rysunek 60. Aktywność wody w marchwi zwyczajnej

Oznaczona w badanych suszach aktywność wody była poniżej 0,6. Wg Lavelli i współpracowników [262], aktywność wody w zakresie 0,31-0,54 dla suszu z marchwi może hamować wzrost mikroorganizmów, aktywność enzymatyczną, nieenzymatyczne ciemnienie oraz gwarantować stabilność karotenoidów. Otrzymane wyniki zawierają się w tym zakresie (za wyjątkiem próby otrzymanej metodą CVUS125W). Zastosowanie ultradźwięków nie miało wpływu na aktywność wody w badanym materiale. Natomiast aplikacja mikrofal zarówno w suszeniu konwekcyjnym (CVMW100W), jak i hybrydowym wyraźnie obniża aktywność wody (o około 13% w stosunku do suszenia bez mikrofal). Nie stwierdzono wpływu mocy ultradźwięków zastosowanych w suszeniu hybrydowym na aktywność wody otrzymanego suszu.

11.2.2. Zmiana barwy

Zmianę barwy badanych suszy marchwiowych w odniesieniu do surowca zaprezentowano na rysunku 61. Największą całkowitą zmianą barwy charakteryzowały się próby suszone hybrydowo CVMW100WUS75W oraz konwekcyjnie (15,5 i 14,65 [-]), a najmniejszą próby poddane procesowi suszenia konwekcyjno-mikrofalowemu (CVMW100W) – 7,04 [-]. Zastosowanie ultradźwięków o rosnącej mocy w suszeniu konwekcyjnym przełożyło się na wzrost ΔE . Jednakże w każdym przypadku suszenia konwekcyjno-ultradźwiękowego, zmiany barwy badanych prób były mniejsze (o 41, 29 i 10% dla mocy US 75, 125 i 200W) niż w przypadku suszenia konwekcyjnego (CV). Próby otrzymane w wyniku suszenia hybrydowego cechowały się odwrotną tendencją zmian. Największą zmianę barwy odnotowano dla prób suszonych z wykorzystaniem najmniejszej mocy ultradźwięków (większą o 6% w stosunku do CV), a najmniejszą dla największej mocy US 200 W (ΔE została zredukowana o 41% w odniesieniu do CV). Takie wyniki mogą świadczyć o połączonym wpływie ultradźwięków i mikrofal ograniczającym zmiany wynikające z reakcji enzymatycznych bądź nieenzymatycznych zachodzących w materiale.

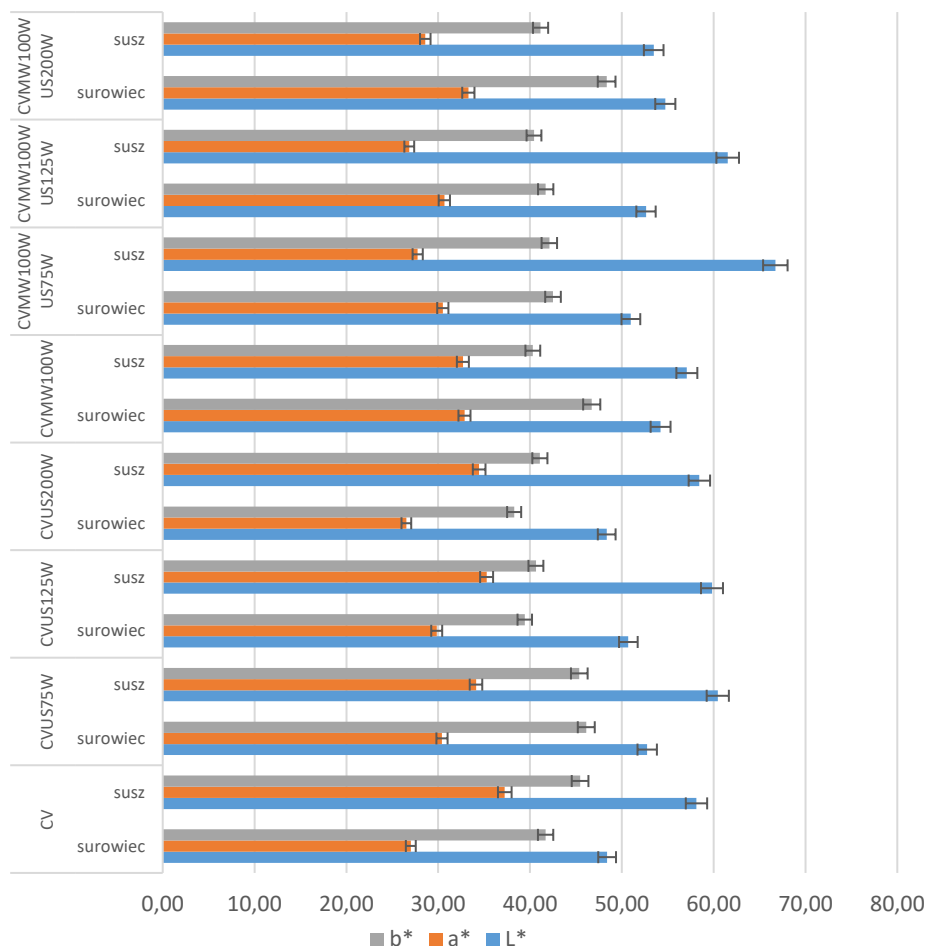


Rysunek 61. Zmiana barwy w marchwi zwyczajnej

Dodatkowo, na rysunku 62 przedstawiono zmiany wartości poszczególnych parametrów barwy dla prób świeżych i suszonych. Największe różnice między próbą świeżą a suszoną odnotowano dla parametru L^* (średnio o 18%). W przypadku prób suszonych konwekcyjnie z ultradźwiękami, stwierdzono stopniowy wzrost wartości parametru L^* wraz ze wzrastającą mocą ultradźwięków (odpowiednio o 7,69 do 10,09 [-] jednostek). Odwrotną tendencję, odpowiadającą zależnościom odnotowanym dla całkowitej zmiany barwy, stwierdzono dla prób suszonych hybrydowo. Różnica w wartości parametru L^* próby suszonej i świeżej malała wraz ze wzrastającą mocą ultradźwięków (zmiana wartości od 15,73 do -1,26 [-] jednostek). Dla prób otrzymanych metodą CVMW100W, różnica w wartościach składowej barwy L^* w porównaniu z surowcem była niewielka i wynosiła $2,86 \pm 0,03$. W przypadku wartości parametru a^* , największą zmianę odnotowano dla prób suszonych metodą CV, (o $10,23 \pm 0,05$ jednostek, w kierunku intensywnej barwy czerwonej). Dla plastrów marchwi suszonej z wykorzystaniem ultradźwięków różnica w wartości parametru a^* wzrastała (od 3,7 do 7,93 [-] jednostek), wraz z ich wzrastającą mocą. Dla prób suszonych hybrydowo, wartość ta malała (mniejszy udział barwy czerwonej) wraz z rosnącą mocą ultradźwięków. Dla próbki suszonej metodą CVMW100W różnica w parametrze a^* w stosunku do surowca była minimalna i wynosiła $0,17 \pm 0,04$. W przypadku parametru b^* , zmiany wartości dla prób otrzymanych metodą CVUS75W, CVUS125W i CVUS200W wzrastały wraz z wyższą mocą zastosowanych ultradźwięków (od $-0,76 \pm 0,02$ do $2,8 \pm 0,04$ jednostek). W przypadku prób otrzymanych metodą CVMW100WUS75W, CVMW100WUS125W i CVMW100WUS200W, różnica pomiędzy wartościami parametru b^* w stosunku do surowca zwiększała się, przy czym w kierunku mniejszego udziału barwy żółtej. Dla próby suszonej konwekcyjnie z wykorzystaniem mikrofal, zmiana wartości parametru b^* w stosunku do surowca była największa i wynosiła $-6,42 \pm 0,05$ jednostek.

Omówione zmiany w obszarze parametru L^* dla prób suszonych bez użycia mikrofal pokrywają się z rezultatami otrzymanymi przez Nahimana i innych [263], gdzie dla różnych temperatur zastosowanych do suszenia konwekcyjnego otrzymano przesunięcie parametru L^* w kierunku bieli. Uzyskane rezultaty całkowitej zmiany barwy przy zastosowaniu ultradźwięków otrzymane przez autorkę są mniejsze o około 50% od wyników uzyskanych przez Nahimana i innych, co może świadczyć o większej skuteczności zastosowania ultradźwięków w zachowaniu oryginalnego koloru materiału biologicznego. Także Lewicki i Duszczyk [264], podczas suszenia konwekcyjnego plastrów marchwi,

odnotowali wzrost parametru L^* i niewielkie zmiany w obszarze parametrów a^* i b^* . Zmiany w obszarze parametru L^* powiązali z ubytkiem wilgoci w materiale oraz skurczem, przez co zmienia się odbicie światła przez materiał oraz struktura jego powierzchni. Również Doymaz [265], przedstawił wzrost parametru a^* podczas suszenia konwekcyjnego w podobnej temperaturze (50°C), oraz niewielkie zmiany w wartości parametru b^* .



Rysunek 62. Zmiany parametrów barwy dla marchwi zwyczajnej

11.2.3. Retencja składników fitochemicznych

11.2.3.1. Retencja karotenoidów

W suszu z badanej marchwi zwyczajnej określono zawartość karotenoidów ogółem oraz ich profil. Zestawienie otrzymanych wyników przedstawiono w tabeli 17. Najwyższy stopień retencji badanych związków w suszu uzyskano przy suszeniu wspomaganym ultradźwiękami, zwłaszcza przy zastosowaniu niższej mocy US. Obserwowane trendy są takie same jak w przypadku całkowitej zmiany barwy, gdzie dla najniższej mocy ultradźwięków zanotowano najmniejszą różnicę barwy. Wyniki te są zbliżone do uzyskanych przez Friasa i innych [266], gdzie retencja β -karotenu w suszach z marchwi otrzymanych przy zastosowaniu ultradźwięków podczas suszenia konwekcyjnego wynosiła do 90%. Wskazują oni, że poziom retencji karotenoidów zależy od mocy ultradźwięków. W przypadku suszenia z zastosowaniem mikrofal lub hybrydowych procesów suszenia, retencja karotenoidów była o około 30% niższa. Inni autorzy odnotowali również znaczne straty w zawartości karotenoidów podczas suszenia wspomaganego mikrofalami, sięgające aż 62% [267]. Redukcja zawartości karotenoidów może wynikać z wysokiego stopnia nienasycenia w ich strukturze, czyniąc je podatnymi na reakcje

utleniania, jak również izomeryzację z form trans- do mniej barwnych izomerów cis. Degradacja może być również spowodowana aktywnością lipooksygenaz, które są termostabilne i zdolne do tworzenia reaktywnych rodników, które niszczą karotenoidy. Degradacja badanych związków może również zachodzić na drodze termicznej w wyniku zderzeń wywołanych polaryzacją jonową i obrotami dipoli, a także przemieszczaniem jonów powodującym rozprzestrzenianie się energii cieplnej w materiale. Zastosowanie ultradźwięków w procesie suszenia było szczególnie korzystne w odniesieniu do retencji β -karotenu w suszonych plastrach marchwi. W przypadku α -karotenu najlepszą retencję uzyskano w próbach poddanych suszeniu ze wspomaganie ultradźwiękami o mocy 75W. Zastosowanie zarówno ultradźwięków, jak i mikrofal w suszeniu konwekcyjnym nie wpłynęło na poprawę retencji luteiny w badanych próbach.

W badanych suszach nie stwierdzono istotnej korelacji pomiędzy całkowitą zmianą barwy a zawartością karotenoidów. Zmiany barwy w badanym produkcie mogą jednak nie tylko być związane z degradacją karotenoidów ale również wynikać z brązowienia enzymatycznego lub nieenzymatycznego. Na istotną rolę tego ostatniego procesu mogą wskazywać badania Soria i inni [268], którzy stwierdzili obecność 2-furoylometylo-aminokwasów w suszonej w temperaturach do 60 °C marchwi.

Tabela 13. Zestawienie retencji karotenoidów w marchwi zwyczajnej

Akronim	świeża próbka (mg/kg d.m.)	CV	CVUS75W	CVUS125W	CVUS200W	CVMW100W	CVUS75WMMW100W	CVUS125WMMW100W	CVUS200WMMW100W
Nazwa substancji		Retencja składników (%)							
α -karoten	144	87 c	98 d	89 c	78 b	54 a	59 a	73 b	57 a
β -karoten	476	68 a	97 c	86 e	76 b	60 d	67 a	78 b	65 a
luteina	17	94 a	95 a	87 ac	47 a	93 a	25 b	19 b	41 b
Całkowita ilość	637	73 b	98 c	86 d	75 b	60 a	63 a	75 b	62 a

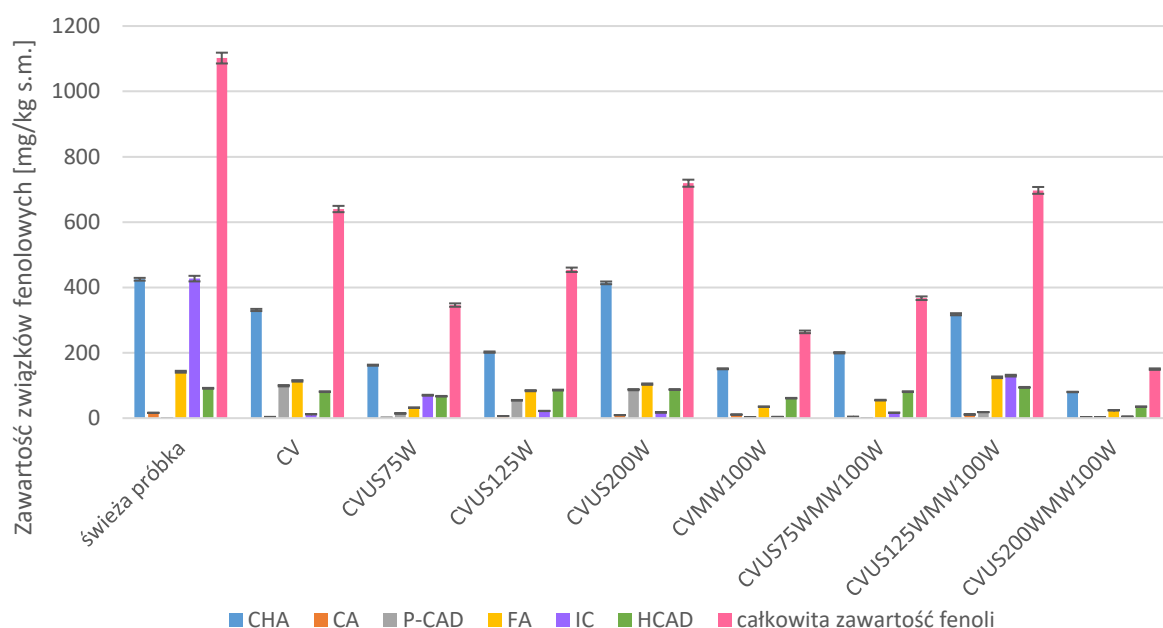
a, b, c, d, e- średnie w wierszach oznaczone przez tą samą literą nie różnią się statystycznie przy $p < 0.05$.

11.2.3.2. Zawartość związków fenolowych

Zestawienie otrzymanych wyników przedstawiono na rysunku 63. Całkowita zawartość związków fenolowych w świeżej marchwi wynosiła 1102 mg/kg s. s. Ogólna zawartość związków fenolowych w surowcu była istotnie ($p < 0,05$) wyższa niż w otrzymanych suszach. Suszenie konwekcyjne (CV) marchwi wpłynęło na 42% redukcję całkowitej zawartości związków fenolowych. Zastosowanie procesu suszenia konwekcyjnego wspomaganego ultradźwiękami spowodowało straty całkowitej zawartości fenoli od 34% (CVUS200W) do 68% (CVUS75W). Zastosowanie suszenia

konwekcyjnego z ultradźwiękami o najwyższej mocy (200W) spowodowało znaczne ograniczenie degradacji związków fenolowych w porównaniu z suszeniem metodą CV, co mogło być spowodowane skróceniem czasu trwania procesu. Z danych literaturowych wynika, że krótszy czas suszenia prób przy wspomaganie ultradźwiękami zmniejszał degradację polifenoli [102] [269]. Potwierdzają to również badania przeprowadzone przez Nascimento i inni, [126], którzy w przypadku suszenia skórek z marakui odnotowali wyższą retencję związków fenolowych dla suszenia konwekcyjnego wspomaganego ultradźwiękami niż dla suszenia konwekcyjnego.

Zastosowanie połączenia ultradźwięków oraz mikrofal podczas suszenia konwekcyjnego spowodowało znacznie ($p < 0,05$) większe straty związków fenolowych w marchwi w stosunku do suszenia prowadzonego metodą CVUS. W badanych suszach straty w. w. związków wynosiły od 37% (CVUS125WMW100W) do 86% (CVUS200WMW100W) w odniesieniu do próby świeżej. W szczególności zastosowanie metody CVUS200WM100W spowodowało 86% spadek zawartości polifenoli w otrzymanych suszach w stosunku do poziomu tych związków w surowcu oraz 76% zmniejszenie zawartości w. w. związków w stosunku do ich zawartości w próbach otrzymanych metodą CV. Prawdopodobnie był to wynik znacznej ingerencji w strukturę tkanki. Rotacja dipoli w wyniku działania mikrofal może spowodować znaczne uszkodzenie komórek i struktur komórkowych, powodując utlenianie związków fenolowych. Co więcej, zbyt szybki transport masy spowodowany poprzez dodatkową energię pochodzącą od mikrofal może przyczynić się do uszkodzenia tkanki lub niepożądanych zmiany w strukturze, prowadzących do „puffingu” [102] [269] [270]. Na duże straty związków fenolowych w skórkach cytryny i mandarynki wynikające z zastosowania suszenia konwekcyjnego wspomaganego ultradźwiękami i mikrofalami wskazują również Ghanem i inni [271].



Rysunek 63. Zawartość związków fenolowych w marchwi zwyczajnej i w otrzymanych z niej suszach, gdzie: CHA – kwas chlorogenowy (chlorogenic acid), CA – kwas kawowy (caffeic acid), P – CAD – pochodne kwasu p-kumarowego (p-coumaric acid derivatives), FA – kwas ferulowy (ferulic acid), IC – izokumaryna (isocoumarin), HCAD – pochodne kwasu hydroksycynamonowego (hydroxycinnamic acid derivatives)

Na zawartość związków fenolowych w badanych próbach może mieć wpływ proces suszenia, utlenianie, ale także synteza *de novo*. Proces suszenia prowadzono w zakresie temperatury 40-50 °C. Temperatura z tego zakresu nie powoduje całkowitej inaktywacji enzymów oksydacyjnych,

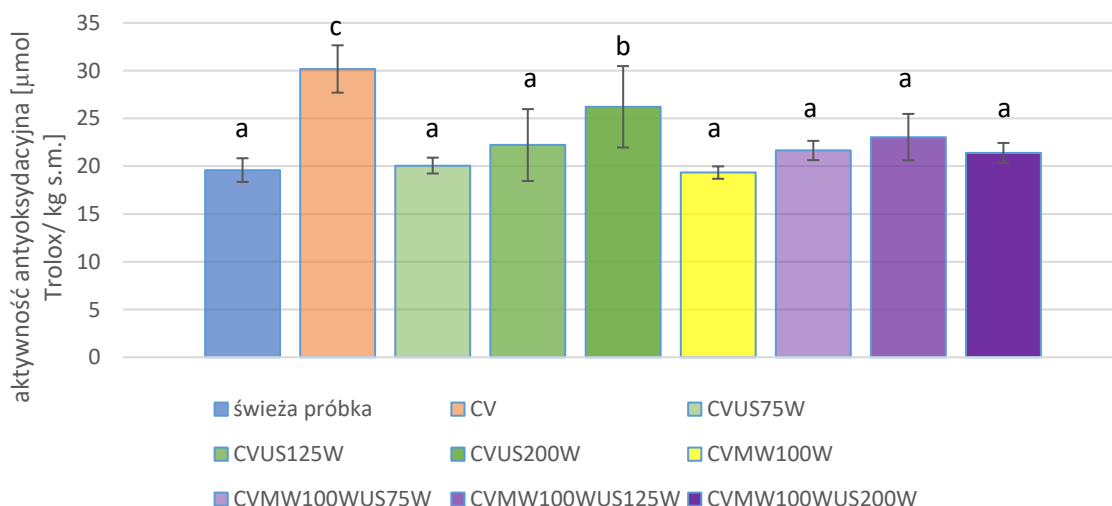
polifenoloksydaz i peroksydaz, co może prowadzić do degradacji związków fenolowych [272]. Jednocześnie w próbach tych może być również aktywna amoniako-liaza fenyloalaniny (PAL, ang. *phenylalanine ammonia-lyase*), na co wskazuje akumulacja związków fenolowych [273].

W świeżej marchwi dominującymi związkami były kwas chlorogenowy (CHA) i izokumaryna (IC), podczas gdy pochodne kwasu p-kumarowego (P-CAD) nie zostały wykryte. Inne zidentyfikowane związki to: kwas ferulowy (FA), pochodne kwasu hydroksycynamonowego (HCAD) i kwas kawowy (CA) (rys. 64). Wysoka zawartość IC w świeżej próbce wynika prawdopodobnie z syntezy tego związku podczas rozdrabniania surowca przed ekstrakcją. Według danych literaturowych, IC jest związkiem często syntetyzowanym w marchwi w warunkach stresowych, np. podczas obierania i rozdrabniania [274] [275] [276]. Podobnie, wysoka zawartość CHA w świeżej próbce może być częściowo związana z syntezą tego związku podczas procesu rozdrabniania przed ekstrakcją.

We wszystkich wysuszonych próbach odnotowano istotnie ($p < 0,05$) niższą zawartość IC w porównaniu ze świeżym materiałem i wykryto pochodne kwasu p-kumarowego (p-CAD). P-CAD jest prekursorem IC powstającym w warunkach stresowych, jak również kwasów hydroksycynamonowych, w tym kwasów chlorogenowych i ferulowych [274] [275] [276].

11.2.3.3. Zdolność antyoksydacyjna

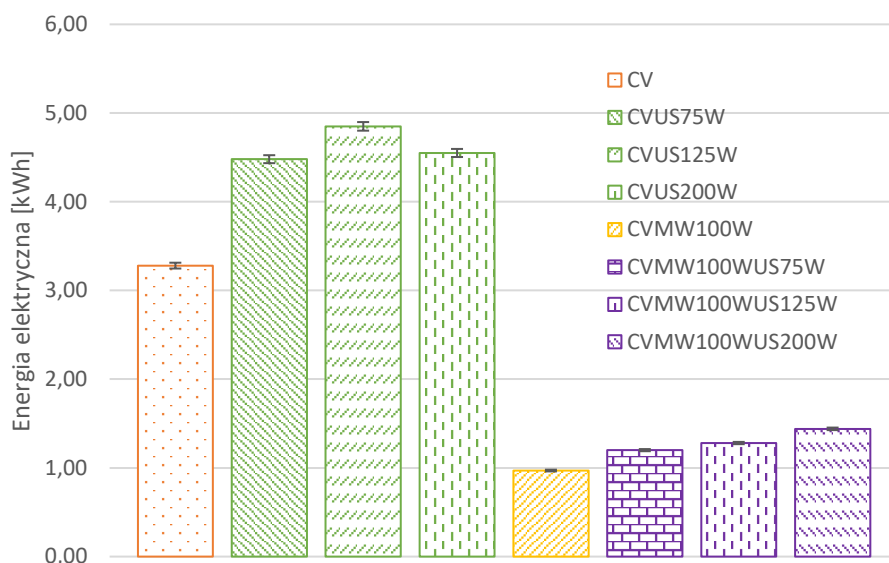
Zbadano również zdolność antyoksydacyjną (metodą ABTS) dla surowca oraz otrzymanych suszy. Wyniki przedstawiono na rysunku 64. Zaobserwowano zależność między zastosowaną mocą ultradźwięków a aktywnością antyoksydacyjną: im wyższa moc ultradźwięków, tym wyższa aktywność przeciwutleniająca suszonego materiału. Jednak zmiany zdolności przeciwutleniającej nie były związane z zawartością związków fenolowych w badanych próbach (patrz Rys. 63). Ten brak korelacji może wynikać z możliwości powstawania produktów reakcji Maillarda podczas suszenia, które również wykazują potencjał antyoksydacyjny.



Rysunek 64. Aktywność antyoksydacyjna w marchwi zwyczajnej i w otrzymanych z niej suszach

11.2.4. Energochłonność procesu

Zużycie energii elektrycznej w poszczególnych procesach suszenia zestawiono na rysunku 65.



Rysunek 65. Zużycie energii elektrycznej dla procesów suszenia marchwi zwyczajnej

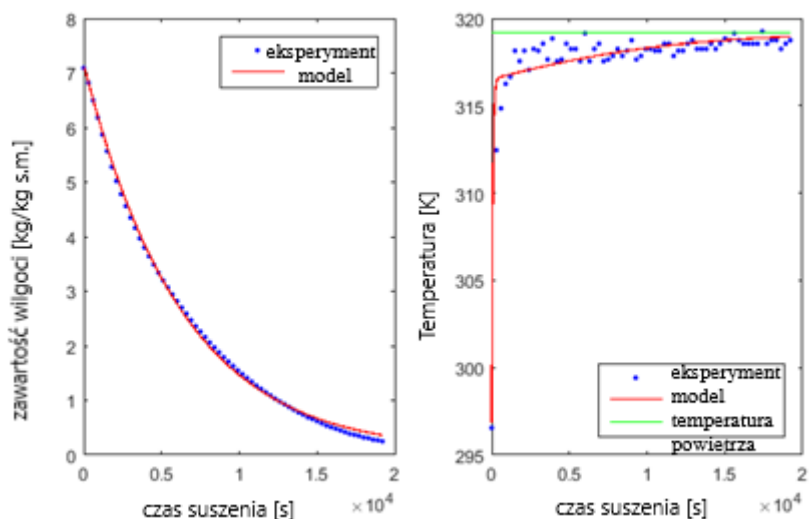
Największym zużyciem energii elektrycznej charakteryzowały się procesy wspomagane ultradźwiękami, gdzie zużycie energii było średnio o 41% wyższe niż dla procesu konwekcyjnego. Wynika to ze stosunkowo długiego czasu prowadzenia procesu, gdzie skrócenie czasu suszenia nie było na tyle duże, aby skompensować dodatkowy nakład energii w stosunku do suszenia konwekcyjnego. Najmniejsze zużycie energii odnotowano w przypadku procesu prowadzonego wg CVMW100W (redukcja zużycia energii o 63%), ze względu na krótki czas suszenia, oraz tylko jedno dodatkowe źródło energii. W procesach hybrydowych CVMW100US75, CVMW100US125 oraz CVMW100US200 zużycie energii było nieco (od 19-33%) większe niż dla procesu CVMW100W, ze względu na dodatkowe zastosowanie ultradźwięków. W tych procesach zużycie wzrastało proporcjonalnie do zaaplikowanej mocy ultradźwięków, przy zbliżonym czasie suszenia.

11.2.5. Modelowanie procesu

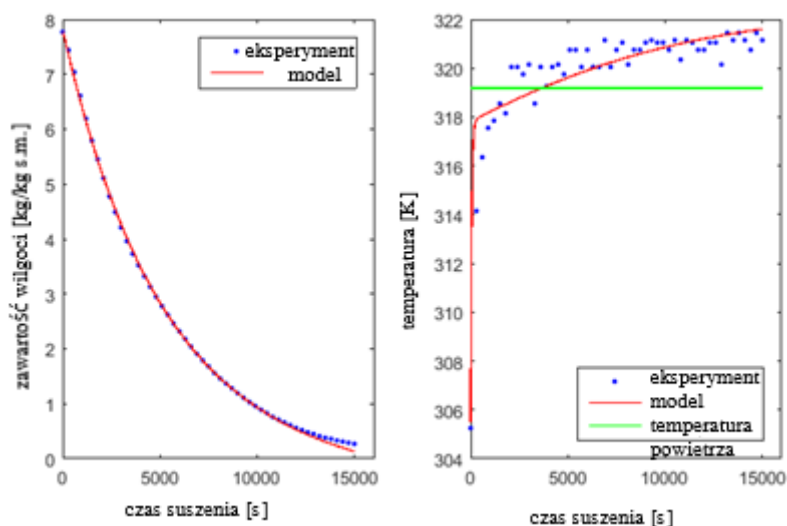
11.2.5.1. Walidacja kinetyki suszenia

Metoda przedstawiona w rozdziale 3 została wykorzystana do określenia parametrów modelu suszenia konwekcyjnego (CV) i suszenia konwekcyjnego z zastosowaniem ultradźwięków o różnej mocy (75 W, 125 W, 200 W) dla marchwi zwyczajnej.

Przykładowe porównania eksperymentalnej i teoretycznej (numerycznej) kinetyki suszenia przedstawiono na rysunkach 66, 67. Przedstawione rysunki pokazują bardzo dobre dopasowanie danych eksperymentalnych i numerycznych. Modelowanie kinetyki suszenia było możliwe dla wszystkich rozpatrywanych przypadków.



Rysunek 66. Kinetyka suszenia konwekcyjnego (CV): porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych



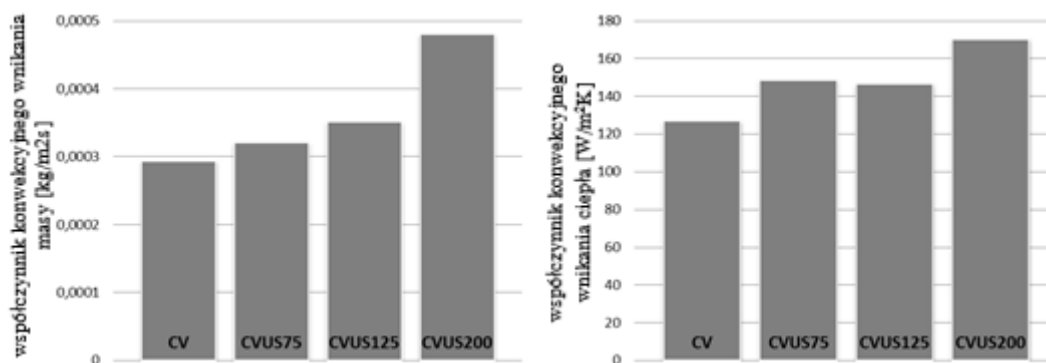
Rysunek 67. Kinetyka suszenia ultradźwiękowego suszenia konwekcyjnego (CVUS200W): porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych

Tabela 18 i rysunek 68 przedstawiają obliczone wartości współczynników transferu masy (h_m) i ciepła (h_T). Wykazano, że zastosowanie ultradźwięków bardzo poprawia wartości efektywnych współczynników konwekcyjnego przenoszenia masy h_m i ciepła h_T . Stwierdzono również, że absorpcja ultradźwięków ΔQ była bardzo mała.

Tabela 14. Szacunkowe wartości współczynników przenikania masy h_m i ciepła h_T , dodatkowe źródło ciepła Q w różnych procesach oraz zwiększenie szybkości suszenia DRE.

Program suszenia	CV	CVUS75W	CVUS125W	CVUS200W
współczynnik konwekcyjnego przenikania masy $h_m \cdot 10^4$ [kg/m ² s]	2,930	3,205	3,508	4,799
współczynnik konwekcyjnego przenikania ciepła h_T [W/m ² K]	126,708	148,469	146,514	170,205

dotatkowe źródło ciepła ΔQ [W]	-	0,079	0,253	0,454
zwiększenie szybkości suszenia DRE [kg/s]	-	$3,374 \cdot 10^{-7}$	$6,270 \cdot 10^{-7}$	$8,399 \cdot 10^{-7}$



Rysunek 68. Współczynniki transportu masy h_m i ciepła h_T podczas suszenia konwekcyjnego oraz suszenia konwekcyjnego wspomaganego ultradźwiękami.

11.2.5.2. Efektywność suszenia

Wyniki modelowania procesu umożliwiają analizę skuteczności zastosowania ultradźwięków. W tym celu należy określić dodatkowe parametry. Szybkość suszenia DR wyraża szybkość spadku wilgotności materiału podczas suszenia w funkcji czasu i jest określana jako

$$DR(t) = -m_s \frac{dx}{dt} = A_m h_m \ln \frac{\varphi|_{\partial B} p_{vs}(T_m)}{\varphi_a p_{vs}(T_a)}, \quad (30)$$

Średnia szybkość suszenia ADR wyraża średnią funkcję szybkości suszenia DR, gdzie t_{eq} jest czasem suszenia, w którym zawartość wilgoci w próbce osiąga stan równowagi, tj.

$$ADR = \frac{1}{t_{eq}} \int_0^{t_{eq}} DR(t) dt. \quad (31)$$

Średni czas suszenia konwekcyjnego i ultradźwiękowego suszenia konwekcyjnego określono doświadczalnie i był on równy $t_{eq}^{CV} = 320$ min, $t_{eq}^{CVUS75} = 290$ min, $t_{eq}^{CVUS125} = 270$ min oraz $t_{eq}^{CVUS200} = 250$ min. Zwiększenie szybkości suszenia ZSS definiuje się jako różnicę między ADR^{CVUS} wspomaganym ultradźwiękami a średnią szybkością suszenia konwekcyjnego ADR^{CV}

$$DRE = ADR^{CVUS} - ADR^{CV}. \quad (32)$$

Wartości zwiększenia szybkości suszenia ZSS przedstawiono w tabeli 18.

Stwierdzono, że ultradźwięki powodowały duże zwiększenie szybkości suszenia. To ulepszenie zaowocowało trzema efektami związanymi ze stosowaniem ultradźwięków, mianowicie „efektem wibracji”, „efektem ogrzewania” i „efektem synergicznym” [138]. Ultradźwięki powodują drgania powietrza w pobliżu powierzchni próbki, co poprawia transfer wilgoci. Pociąga to za sobą wzrost współczynnika przenoszenia masy h_m . Efekt ten nosi nazwę „efektu wibracji”. Poprawa wymiany ciepła i absorpcja energii ultradźwiękowej powoduje wzrost temperatury powierzchni próbki. Skutkuje to pewną poprawą transferu masy i nazywane jest „efektem ogrzewania”. Oba wyżej wymienione efekty

wspierają się wzajemnie, powodując poprawę szybkości suszenia addytywnego zwaną „efektem synergistycznym”. Aby określić ilościowo „efekt wibracji”, „efekt ogrzewania” i „efekt synergiczny”, szybkość suszenia w procesie SSUS wspomaganym ultradźwiękami można przedstawić jako sumę

$$DR^{US}(t) = DR_{CV}^{US}(t) + DR_v^{US}(t) + DR_T^{US}(t) + DR_s^{US}(t), \quad (33)$$

gdzie $DR_{CV}^{US}(t)$, $DR_v^{US}(t)$, $DR_T^{US}(t)$ and $DR_s^{US}(t)$ oznaczają udziały efektów suszenia w czystym suszeniu konwekcyjnym, odpowiednio „efekt wibracji”, „efekt ogrzewania” i „efekt synergiczny”. Poszczególne akcje są opisane poniższymi równaniami:

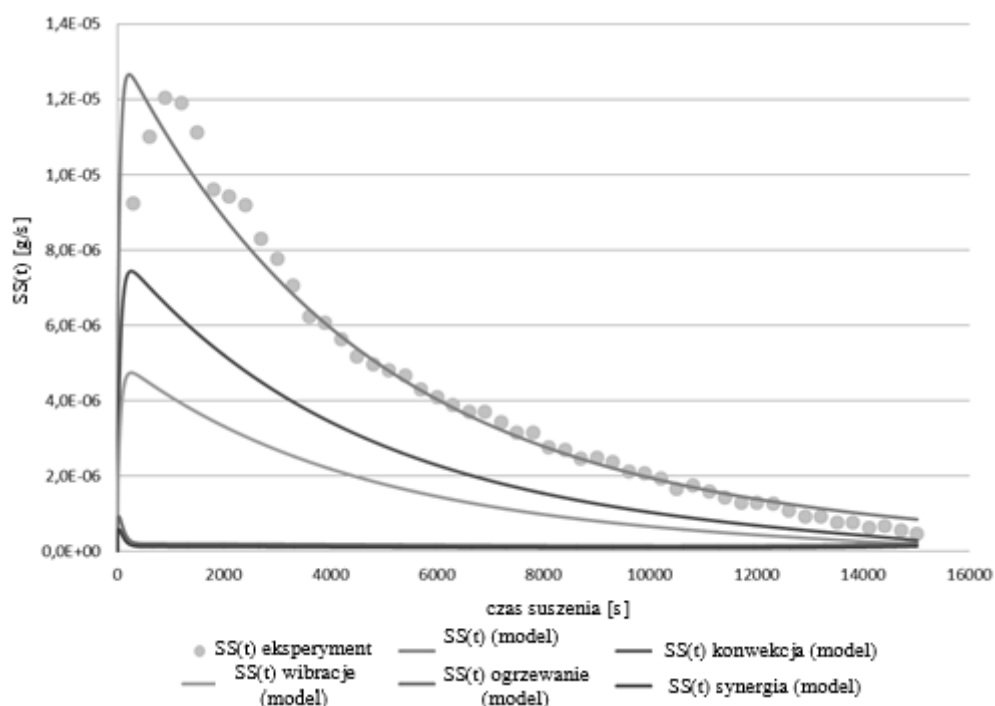
$$DR_{CV}^{US}(t) = A_m h_m^{CV} \ln \frac{[\varphi |_{\partial B} p_{vs}(T_m)]^{CV}}{\varphi_a p_{vs}(T_a)}, \quad (34)$$

$$DR_v^{US}(t) = A_m \Delta h_m \ln \frac{[\varphi |_{\partial B} p_{vs}(T_m)]^{CV}}{\varphi_a p_{vs}(T_a)}, \quad (35)$$

$$DR_T^{US}(t) = A_m h_m^{CV} \ln \frac{[\varphi |_{\partial B} p_{vs}(T_m)]^{US}}{[\varphi |_{\partial B} p_{vs}(T_m)]^{CV}}, \quad (36)$$

$$DR_s^{US}(t) = A_m \Delta h_m \ln \frac{[\varphi |_{\partial B} p_{vs}(T_m)]^{US}}{[\varphi |_{\partial B} p_{vs}(T_m)]^{CV}}. \quad (37)$$

Eksperymentalna i modelowa szybkość suszenia, jak również udział tych efektów w szybkości suszenia (dla procesu CVUS200W) są przedstawione na rysunku poniżej.



Rysunek 69. Eksperymentalna i modelowa szybkość suszenia oraz „efekt wibracji”, „efekt ogrzewania” i „efekt synergiczny” w funkcji czasu

Uzyskane wyniki wyraźnie wskazują na bardzo wysoki udział „efektu wibracji” w wymianie masy. Jednocześnie stwierdzono, że udział pozostałych dwóch efektów jest niewielki. Stosunki trzech efektów ultradźwiękowych, wyrażonych przez:

$$CDRE_v = \frac{\int_0^{t_{eq}^{CVUS}} DR_v^{US}(t) dt}{\int_0^{t_{eq}^{CVUS}} DR_{CV}^{US}(t) dt} \cdot 100\%, \quad (38)$$

$$CDRE_T = \frac{\int_0^{t_{eq}^{CVUS}} DR_T^{US}(t) dt}{\int_0^{t_{eq}^{CVUS}} DR_{CV}^{US}(t) dt} \cdot 100\%, \quad (39)$$

$$CDRE_s = \frac{\int_0^{t_{eq}^{CVUS}} DR_s^{US}(t) dt}{\int_0^{t_{eq}^{CVUS}} DR_{CV}^{US}(t) dt} \cdot 100\%, \quad (40)$$

można zdefiniować do ilościowego określenia wpływu poszczególnych efektów. Na przykład w przypadku procesu CVUS200W stosunki efektów były następujące:

$$CDRE_v = 63,79\%,$$

$$CDRE_T = 7,61\%,$$

$$CDRE_s = 4,85\%.$$

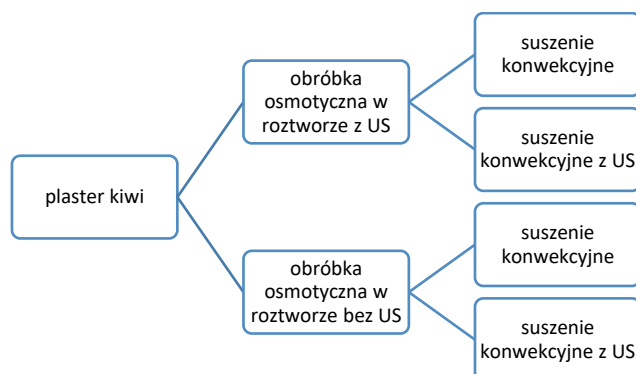
Te obliczone wartości potwierdzają szczególne znaczenie „efektu wibracji” w suszeniu wspomaganym ultradźwiękami.

11.3. Podsumowanie i wnioski

Zastosowanie ultradźwięków w suszeniu konwekcyjnym plastrów marchwi intensyfikuje wymianę masy w stosunku do procesu suszenia konwekcyjnego, przez co czas suszenia może zostać zredukowany od 10 do 22%, odpowiednio do wzrastającej mocy ultradźwięków. Intensyfikacja suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego za pomocą ultradźwięków nie jest oczywista, natomiast czas suszenia może zostać zredukowany nawet o 81% (dla CVUS200WMW100W) w stosunku do suszenia metodą CV. Analiza składu suszonej marchwi dowodzi, że procesy wspomagane ultradźwiękami o mniejszej mocy mają pozytywny wpływ na jakość produktu w odniesieniu do zawartości karotenoidów (retencja karotenoidów o 2%-25% wyższa niż dla suszenia konwekcyjnego) jak również całkowitą zmianę barwy pozwalając osiągnąć ΔE od 41 do 10% (odpowiednio do wzrastającej mocy ultradźwięków) mniejszą niż przy suszeniu konwekcyjnym. Z kolei w przypadku związków fenolowych najlepszy efekt odnotowano dla suszy otrzymanych poprzez suszenie konwekcyjne przy wspomaganie ultradźwiękami o mocy 200W. Zmiany jakości suszy mogą być związane z działaniem enzymów w tkance marchwi podczas suszenia w niskiej temperaturze. Matematyczne modelowanie kinetyki suszenia dostarcza pewnych informacji na temat współczynników przenikania ciepła i masy oraz wartości skutecznej absorpcji ultradźwięków w próbie. Przedstawiony model dobrze odzwierciedla dane eksperymentalne. Jak wykazano, „efekt wibracji” jest czynnikiem nadrzędnym, ale „efekt ogrzewania” i „efekt synergiczny” są również znaczące.

12. Efektywność suszenia kiwi po odwadnianiu osmotycznym

W tej części pracy badano wpływ ultradźwięków na odwadnianie osmotyczne oraz suszenie konwekcyjnego owoców kiwi. Zbadano także wpływ różnych roztworów hipertonicznych na efektywność procesu. Zaproponowano następujący schemat badań:



Rysunek 70. Schemat badań dla plasterków kiwi poddanych obróbce osmotycznej

Owoce kiwi zakupiono na lokalnym targowisku. Owoce charakteryzowały się podobnymi wymiarami i dojrzałością oraz nie posiadały uszkodzeń mechanicznych. Owoce kiwi były przechowywane w temperaturze 4°C, bez dostępu światła. Wybrane losowo owoce były wyciągane na godzinę przed procesem, w celu wyrównania temperatury z otoczeniem. Kiwi było myte i obierane ze skórki, a następnie krojone na plastry o grubości 7 mm i 32 mm średnicy. Masa uzyskanych plasterków użytych w doświadczeniu wynosiła 6,4±0,1 g. Próby były poddawane obróbce osmotycznej (klasycznej, lub z wykorzystaniem ultradźwięków (US)), a następnie suszone przez 300 min w temperaturze 60°C i przepływie powietrza 2 m/s konwekcyjnie lub konwekcyjnie z zastosowaniem ultradźwięków (US) o mocy 200 W. Jako roztwory hipertoniczne wykorzystano 50% roztwory sacharozy (SAC), sorbitolu (SOR) i erytrytolu (ERY). Roztwory przygotowywane były w temperaturze pokojowej i otrzymywane poprzez rozpuszczenie substancji osmotycznie czynnej w wodzie destylowanej. Po rozpuszczeniu dodatkowo następowało półgodzinne mieszanie za pomocą mieszadła laboratoryjnego. Obróbkę osmotyczną przeprowadzono w wannie ultradźwiękowej, opisaniej w rozdziale 6.1 w temperaturze 35°C. Oznaczenia użyte w opisie badań oraz zastosowane parametry procesowe zostały zestawione w tabeli poniżej.

Tabela 15. Zestawienie parametrów procesowych i oznaczeń dla odwadniania plasterków kiwi

substancja osmotycznie czynna	odwadnianie osmotyczne				suszenie konwekcyjne			
	temperatura [°C]	czas [min]	US	akronim	przepływ powietrza [m/s]	temperatura [°C]	US (200 W)	akronim
sacharoza	35	30	+	OUSSAC50	2	60	+	OUSSAC50US
			-	OSAC50			-	OUSSAC50CV
			+	OSAC50US			+	OSAC50US
			-	OSAC50CV			-	OSAC50CV
sorbitol	35	30	+	OUSSOR50	2	60	+	OUSSOR50US
			-	OSOR50			-	OUSSOR50CV
			+	OSOR50US			+	OSOR50US
			-	OSOR50CV			-	OSOR50CV
erytrytol	35	30	+	OUSERY50	2	60	+	OUSERY50US
			-	OERY50			-	OUSERY50CV
			+	OERY50US			+	OERY50US
			-	OERY50CV			-	OERY50CV

Wykorzystane w badaniach związki osmoaktywne należą do grupy dwucukrów (sacharoza) oraz do alkoholi cukrowych (polioli) (sorbitol i erytrytol). Alkohole cukrowe należą do spożywczych środków słodzących, które powodują mniejszą odpowiedź glukozy we krwi i mogą być metabolizowane bez insuliny, będąc jednocześnie związkami naturalnymi. Słodycz alkoholi cukrowych jest zwykle mniejsza niż sacharozy. Rola wybranych do badań alkoholi cukrowych nie kończy się na nadaniu słodkiego smaku żywności. Erytrytol ((2R,3S)-butano-1,2,3,4-tetraol) należy do humektantów (substancji pochłaniających wilgoć), oraz stosuje się go jako substancję intensyfikującą smak. Naturalnie występuje w małych ilościach w owocach i warzywach, niektórych porostach oraz w czerwonym winie, piwie a także sosie sojowym. Posiada on zerową wartość energetyczną oraz indeks glikemiczny, przy czym nie jest metabolizowany w organizmie człowieka i jest wydalany w niezmienionej formie razem z moczem. Jest bezpieczny dla osób chorujących na cukrzycę oraz nie powoduje próchnicy zębów. Erytrytol posiada dużą stabilność temperaturową oraz stabilność w środowisku kwaśnym i zasadowym, a także nie bierze udziału w enzymatycznym brązowieniu opisanym reakcjami Maillarda. Działa redukująco w stosunku do wolnych rodników. Sorbitol ((2S,3R,4R,5R)-heksano-1,2,3,4,5,6-heksol) podobnie do erytrytolu występuje naturalnie w niewielkiej ilości w owocach i niektórych warzywach. Stosowany jest także w przemyśle jako humektant, substancja wypełniająca, sekwestrant (substancja zapobiegająca zmianom smaku, konsystencji i barwy żywności), stabilizator oraz zagęszczacz. Ma niską wartość energetyczną oraz niski indeks glikemiczny, jak również nie powoduje próchnicy [277].

12.1. Kinetyka procesu

12.2.1. Kinetyka odwadniania osmotycznego

W celu określenia efektywnego czasu odwadniania osmotycznego przeprowadzono badanie kinetyki procesu w czasie 120 min. W czasie pierwszej godziny próby były wyciągane z roztworu, osuszane i ważone co 10 min, a w pozostałym czasie co 15 min. Otrzymane wyniki zaprezentowano na rysunku 71. Zawartość wilgoci (MC z ang. *moisture content*) w materiale była liczona wg wzoru:

$$MC = \frac{m_t - s_i}{m_i}, \quad (41)$$

$$MR = \frac{MC_t - MC_{eq}}{MC_i - MC_{eq}} \quad (42)$$

gdzie:

m_t – masa próby w czasie t [g],

s_i – masa suchego materiału [g],

m_i – masa początkowa próby [g],

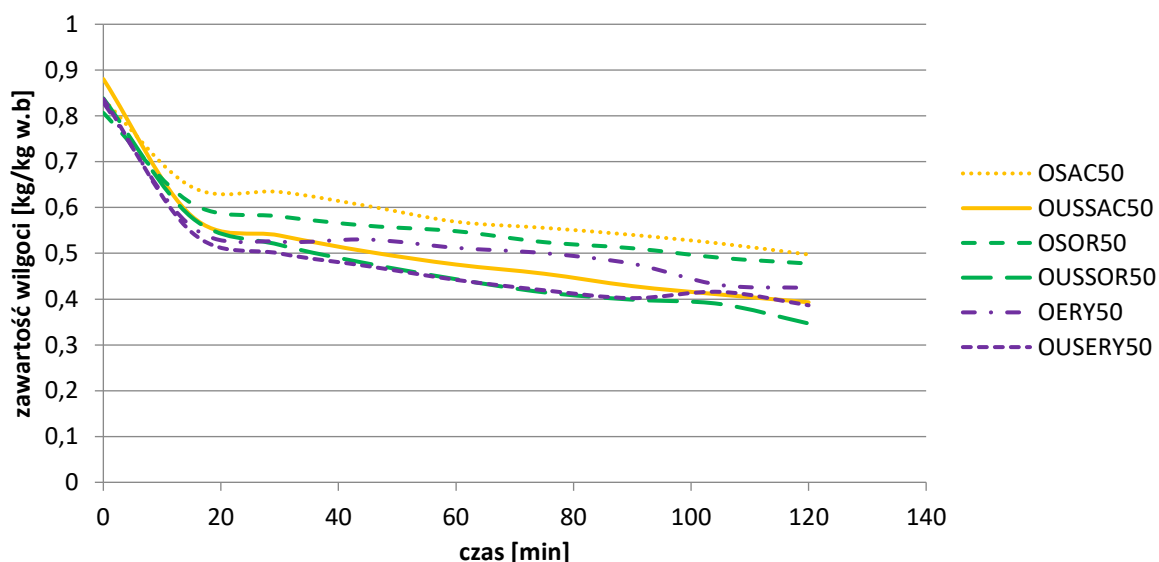
MC_t – zawartość wilgoci w czasie t ,

MC_{eq} – równowagowa zawartość wilgoci,

MC_i – początkowa zawartość wilgoci w materiale.

Za najkorzystniejszy czas obróbki osmotycznej przyjęto 30 min. W wybranym czasie ubytek wilgoci z materiału był największy i wynosił od 25 do 45% w odniesieniu do wartości początkowej, przy czym dla prób otrzymanych w procesach OSAC50 i OUSSOR50 występowała odpowiednio najmniejsza i największa redukcja wilgoci), a odwadniany plaster owocu pozostawał zwarty (nie rozpadał się). We wszystkich zbadanych przypadkach odwadnianie osmotyczne przeprowadzone w obecności ultradźwięków dawało lepsze rezultaty. Dowodzi to pozytywnego wpływu ultradźwięków na kinetykę

odwadniania dla wszystkich zbadanych substancji osmotycznie czynnych gdzie końcowa wilgotność materiału była mniejsza o 27, 24 i 19% w stosunku do ich odpowiedników bez zastosowania ultradźwięków, odpowiednio dla próbek odwadnianych w roztworze sorbitolu, sacharozy i erytrytoli (rysunek 71). Podobne wyniki wskazujące na poprawę wymiany masy przez ultradźwięki dla plastrów kiwi uzyskali Nowacka i inni [278]. Wykonali oni dodatkowo zdjęcia SEM, pozwalające na przypuszczenie, że większa wymiana masy może być spowodowana przez tworzenie mikrokanalów, jak również przez wyraźne zmiany w strukturze.



Rysunek 71. Kinetyka odwadniania osmotycznego plastrów kiwi

Wyznaczono także ubytek wilgoci w odwadnianym materiale (WL, ang. *water loss*), który mówi o ilości wody dyfundującej z materiału biologicznego do roztworu pod wpływem różnic ciśnienia osmotycznego między badanym materiałem a roztworem oraz przyrost suchej substancji (SG, ang. *solid gain*), opisującej ilość substancji stałej dyfundującej z roztworu do materiału, pomniejszonej o ilość substancji stałej dyfundującej z materiału do roztworu (wartości znikome), dla odwadniania prowadzonego przez 120 min. Wartości parametrów były liczone wg wzorów:

$$WL = \frac{(m_i - m_t) + (s_{OD} - s_i)}{m_i}, \quad (43)$$

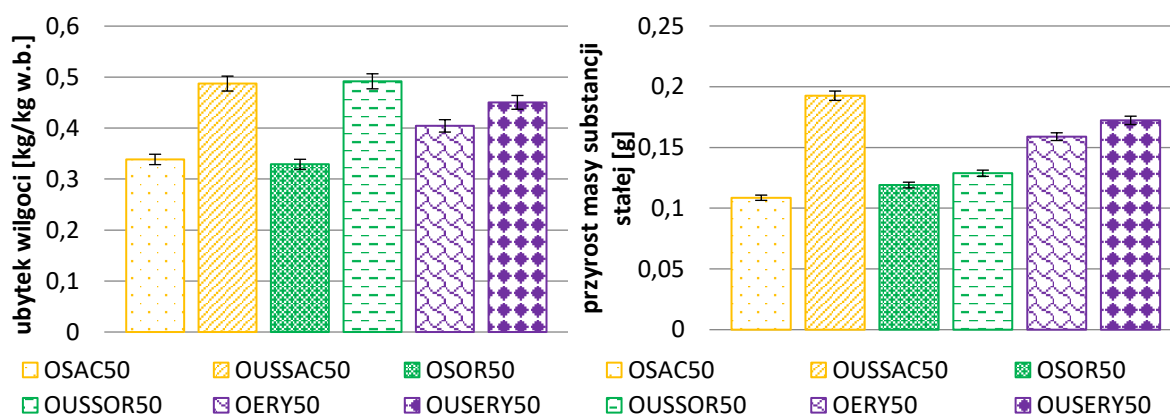
$$SG = \frac{s_{OD} - s_i}{m_i}, \quad (44)$$

gdzie:

s_{OD} – sucha substancja materiału po osmozie,

s_i – sucha substancja materiału bez osmozy.

Suchą substancję badanych próbek wyznaczono poprzez suszenie w temperaturze 105 °C w suszarce konwekcyjnej do uzyskania stałej masy. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 72.

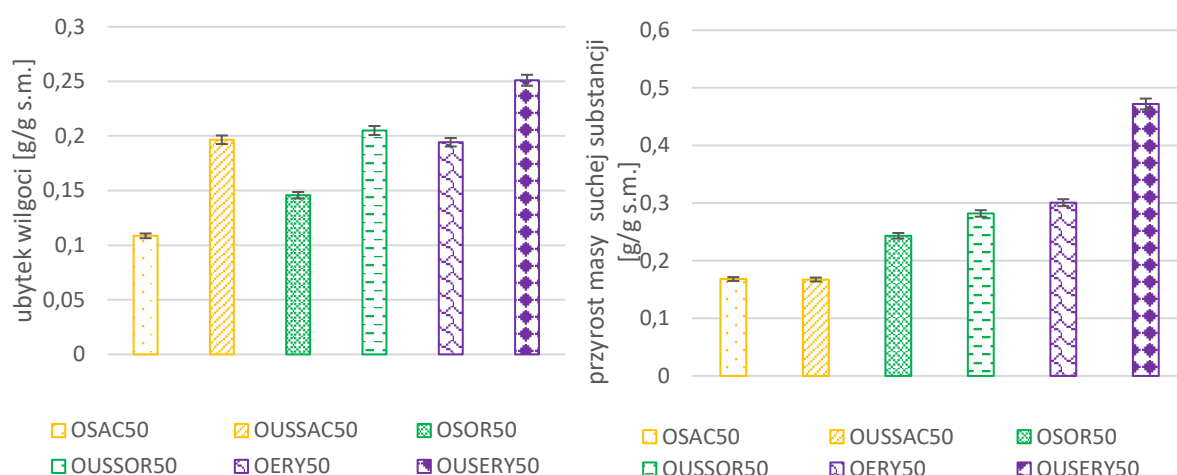


Rysunek 72. Ubytek wilgoci oraz przyrost suchej substancji j podczas osmotycznego odwadniania owocu kiwi (120 min)

Większym ubytkiem wilgoci oraz przyrostem suchej substancji charakteryzowały się próby odwadniane osmotycznie z wykorzystaniem ultradźwięków (o 11% do 55% dla WL i o 8% -77% dla SG, odnosząc je do wartości otrzymanych dla prób odwadniania bez US). Może być to spowodowane dodatkowym indukowaniem przez ultradźwięki zmian w strukturze owocu, zapoczątkowanych przez proces osmotyczny, gdzie osmoza sprzyja zmianom podobnym do dojrzewania owocu, tj. pęcznienie ściany komórkowej i rozpuszczanie się blaszki środkowej. W wyniku tych zmian materiał jest bardziej podatny na transport masy w obu kierunkach [279]. Porównując wartości WL i SG (rysunek 72) dla prób odwadnianych w roztworach sorbitolu i sacharozy można zauważyć, że uzyskane wielkości są bardzo zbliżone, (za wyjątkiem wartości SG dla prób podanych procesowi OUSOR), co może świadczyć o podobnym zachowaniu tych związków podczas długotrwałego odwadniania.

Dla prób odwadnianych z udziałem ultradźwięków największe ubytki wilgoci zanotowano w roztworach sacharozy i sorbitolu, natomiast największy przyrost suchej substancji dla prób odwadnianych w roztworze sacharozy. Próby odwadniane w erytrytolu wykazały najmniejszy wpływ ultradźwięków na odwadnianie osmotyczne. Najkorzystniejsze w tym przypadku wydaje się być odwadnianie w 50% roztworze sorbitolu, gdzie przy najwyższym ubytku wilgoci zanotowano najmniejszy przyrost masy substancji osmotycznie czynnej. Bardzo podobne rezultaty ubytku wilgoci dla prób kiwi odwadnianych w roztworze sacharozy bez ultradźwięków uzyskali Fathi i inni [280], którzy badania wykonywali w temperaturze 40°C i stężeniu roztworu 60%. Również Panagiotou i inni [246], uzyskali podobną redukcję wilgoci dla owocu kiwi dla roztworu sacharozy w zakresie ubytku wilgoci i przyrostu suchej substancji, prowadząc proces w podobnych warunkach.

Analizując czas 30 minut, który przyjęto jako najkorzystniejszy do przeprowadzenia procesu odwadniania można zauważyć, że utrata wilgoci w tym czasie wynosiła od 32 do 55% wartości uzyskanej dla czasu 120 min. Ubytek wilgoci dla czasu 30 minut był od 30% do 80% wyższy dla osmozy z ultradźwiękami niż w przypadku osmozy klasycznej. Wartości parametru SG dla czasu 30 minut były większe dla procesów z zastosowaniem ultradźwięków (od 16 do 57%) dla roztworów sorbitolu i erytrytolu, natomiast dla roztworu sacharozy przyrost masy suchej substancji był taki sam, bez względu na rodzaj obróbki wstępnej. Przyrost masy suchej substancji w czasie 30 minut był większy od 54 do 170% niż dla czasu 120 minut, za wyjątkiem procesu OUSSAC50, gdzie wartość parametru SG była o 13% mniejsza. Można przypuszczać, że w czasie 30 min układ nie osiągnął równowagi, która ustala się między stężeniem wewnątrz próby i zewnętrznym roztworem hipertonicznym. Wyniki uzyskane dla parametrów WL i SG przedstawiono na rysunku 73. W czasie 30 min odwadniania największy ubytek wody w badanych próbach uzyskano dla erytrytolu a następnie sorbitolu. Przy czym w przypadku sorbitolu odnotowano mniejszy przyrost suchej substancji (SG).



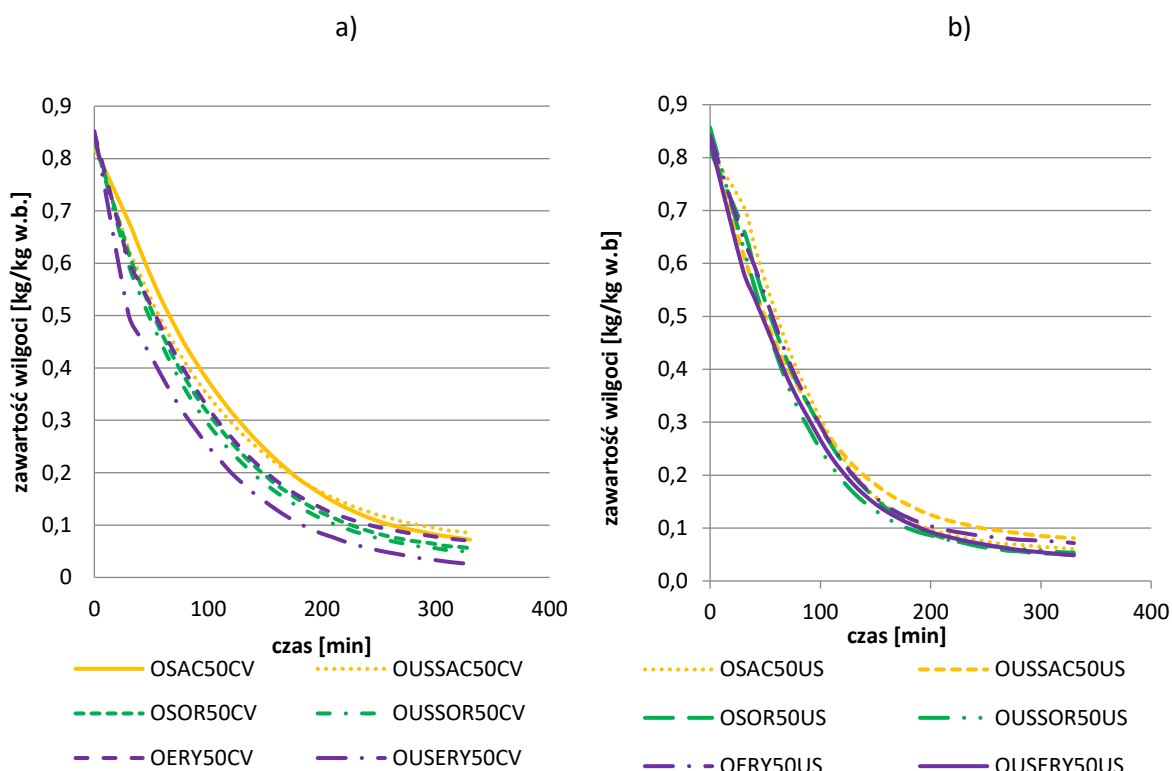
Rysunek 73. Parametry SG i WL dla procesu odwadniania w czasie 30 min

12.2.2 Kinetyka suszenia konwekcyjnego z/bez zastosowania ultradźwięków

Po wstępnej obróbce osmotycznej (30 min) kolejnym etapem było suszenie przez 300 min w warunkach konwekcyjnych lub z zastosowaniem podczas tego procesu ultradźwięków o mocy 200 W. Wykresy przedstawiające kinetykę suszenia, uwzględniające także ubytek wilgoci podczas wstępnej obróbki osmotycznej zaprezentowano na rysunku 74. Dla próbek suszonych konwekcyjnie, najniższą końcową wilgotność materiału odnotowano dla plastrów kiwi odwadnianych w erytrytolu (OUSERY50CV), wynoszącą 0,025 [kg/kg w.b]. W kolejności rosnącej, wartości końcowe zawartości wilgoci w badanych próbkach kształtowały się następująco: OUSSOR50CV, OSOR50CV, OERY50CV, OSAC50CV i OUSSAC50CV. Na podstawie powyższej zależności można stwierdzić, że susze odwadniane osmotycznie z wykorzystaniem ultradźwięków w roztworach polioli charakteryzowały się większym ubytkiem wilgoci w porównaniu do próbek odwadnianych bez zastosowania ultradźwięków.

Podobne krzywe suszenia otrzymali Simal i inni, 2005, gdzie dla różnych temperatur (w tym 60 °C) zaobserwowano specyficzne krzywe o malejącej szybkości suszenia charakterystycznej dla drugiego okresu suszenia dla owocu kiwi w dojrzałości konsumpcyjnej, w odróżnieniu od kiwi niedojrzałego, lub na w pół dojrzałego, gdzie wyróżnili dodatkowy I okres suszenia [281].

W przypadku próbek suszonych konwekcyjnie z zastosowaniem US wpływ zastosowania ultradźwięków na etapie odwadniania (porównując do próbek odwadnianych bez ich zastosowania), na przebieg krzywych suszenia był mniejszy i dotyczył tylko polioli. W tych przypadkach można zaobserwować nieznacznie szybszy ubytek wilgoci.



Rysunek 74. Kinetyka suszenia konwekcyjnego plastrów kiwi odwadnianych osmotycznie a) bez ultradźwięków, b) z ultradźwiękami

Na rysunku 75, dodatkowo przedstawiono przebieg krzywych temperaturowych uzyskanych dla procesu suszenia prób odwadnianych w erytrytolu (przebieg krzywych temperaturowych dla suszenia prób odwadnianych w roztworze sacharozy lub sorbitolu był zbliżony). Krzywe temperaturowe dla procesu suszenia wspomaganego przez US pokazują, że temperatura powietrza suszącego została osiągnięta już po ok. 20 minutach trwania procesu, w porównaniu do procesu konwekcyjnego, gdzie temperaturę 60°C uzyskano po ok. 170 minutach. Krzywe temperaturowe ukazują duże różnice w temperaturze badanych prób. Różnica temperatury dla prób suszonych metodą CV i ze wspomaganie US wynosiła ok. 6,5 °C, co stanowi największą zanotowaną różnicę spośród wszystkich badanych w niniejszej pracy prób. Różnica ta może świadczyć o wpływie substancji osmotycznie czynnej na nagrzewanie powierzchni. Może być to efektem nagrzewania powierzchni podczas procesu w wyniku zastosowania fal akustycznych. Przedstawione wyniki wskazują na erytrytol oraz sorbitol jako czynniki osmotycznie czynne pozwalające na uzyskanie mniejszej zawartości wilgoci w finalnym produkcie od 17 do 70% w porównaniu do prób odwadnianych w roztworze sacharozy.

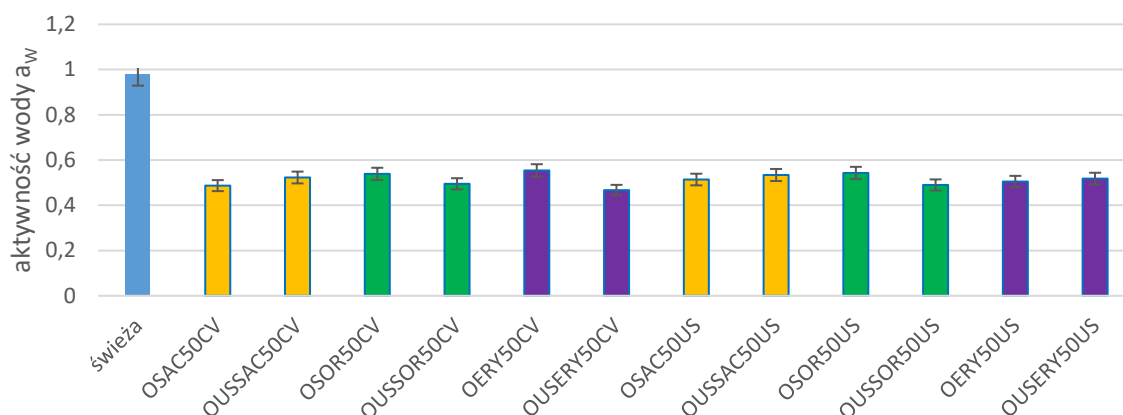


Rysunek 75. Krzywe temperaturowe w procesie suszenia dla próbek odwadnianych w roztworze erytrytolu

12.2. Jakość produktu

12.2.1. Aktywność wody

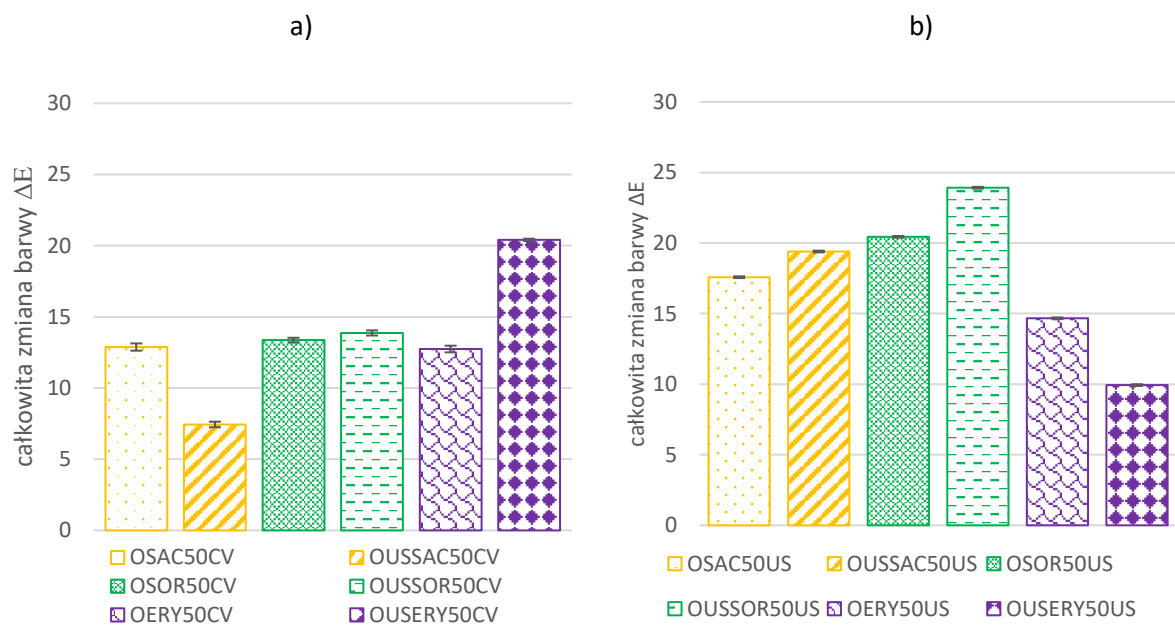
Próbki kiwi po suszeniu konwekcyjnym i konwekcyjno-ultradźwiękowym zostały zbadane pod kątem aktywności wody. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na wykresie 76. Wszystkie uzyskane wyniki kwalifikują otrzymane próbki do obszaru bezpiecznego, w którym nie rozwijają się mikroorganizmy. Zaprezentowane wyniki pokazują, że zastosowanie ultradźwięków w suszeniu próbek odwadnianych osmotycznie nie spowodowało znaczących zmian w końcowej aktywności wody próbek. Jednocześnie, na podstawie badań przeprowadzonych przez Gianotti i inni [282], na plasterkach kiwi, zastosowanie roztworów cukru o dużym stężeniu (40-65%) powoduje powstanie bariery ograniczającej adhezję mikroorganizmów na powierzchni próbki, nawet przy aktywności wody materiału na poziomie 0,85. Może być to spowodowane ograniczeniem mobilności mikroorganizmów, ze względu na zwiększoną lepkość powierzchni. Dzięki temu nie byłoby konieczne usuwanie wilgoci do osiągnięcia wilgotności materiału bliskiej wilgotności równowagowej przez co byłoby możliwe uzyskanie produktu o lepszych właściwościach tekstury, zbliżonej do materiału świeżego.



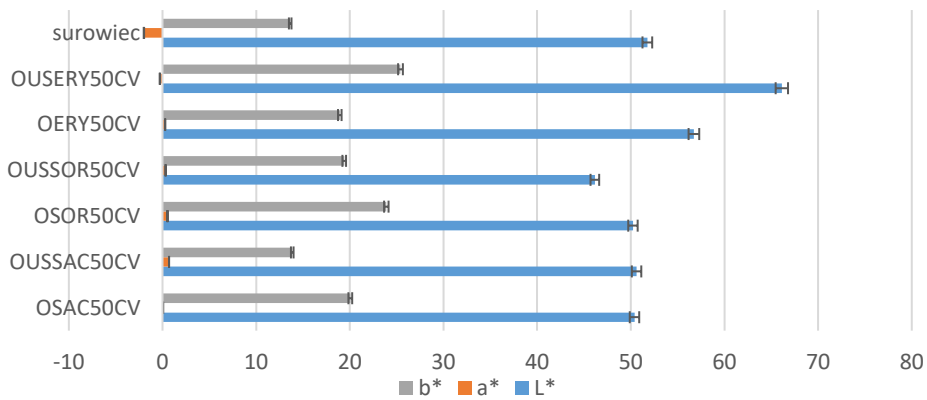
Rysunek 76. Aktywność wody w próbkach kiwi po obróbce osmotycznej oraz suszeniu konwekcyjnym

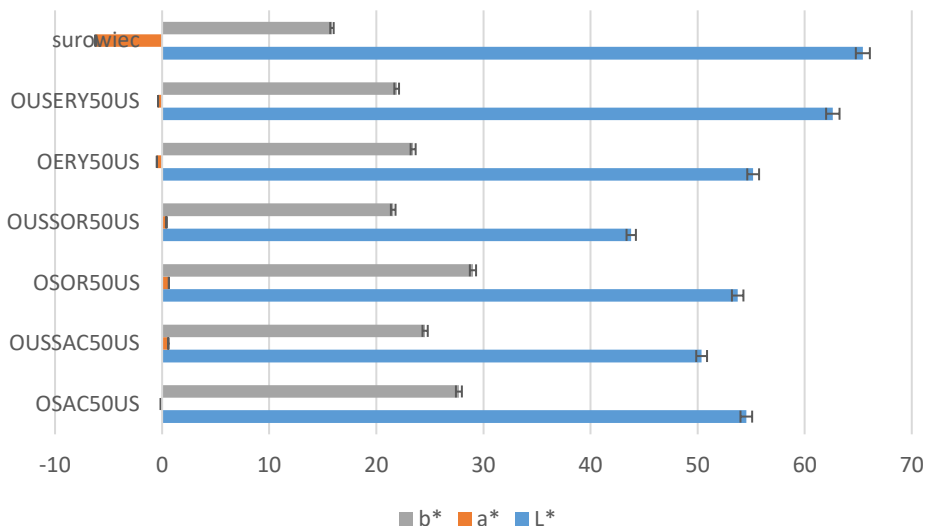
12.2.2. Zmiana barwy

Zmianę barwy ΔE określono w stosunku do barwy plasterów otrzymanych ze świeżych owoców kiwi. Otrzymane wyniki dla w. w. parametru oraz poszczególnych składowych barwy ($L^*a^*b^*$) zaprezentowano na rysunkach 77 i 78. Na podstawie zaprezentowanych wyników można stwierdzić, że generalnie próby suszone z zastosowaniem ultradźwięków cechowały się większą całkowitą zmianą barwy w odniesieniu do prób suszonych konwekcyjnie, gdzie średnia różnica między nimi wyniosła około 31%. W przypadku większości prób poddanych osmozie z ultradźwiękami (OUS) odnotowano mniejszą całkowitą zmianę barwy po suszeniu konwekcyjnym (CV) w porównaniu do suszenia konwekcyjno-ultradźwiękowego (US). Jednak odwrotną zależność zaobserwowano dla prób odwodnionych w erytrytolu (ERY). Wartość ΔE dla plasterów kiwi odwodnionych w ERY i poddanych procesowi OUS i CV była wyższa niż dla prób poddanych tylko osmozie (O). Na podstawie zaprezentowanych wyników można stwierdzić, że w większości przypadków próby suszone z zastosowaniem ultradźwięków charakteryzowały się większą średnią zmianą barwy (była ona o około 4,2% wyższa) w porównaniu do próbek suszonych konwekcyjnie. Najmniejszą całkowitą zmianę barwy odnotowano dla próbek otrzymanych w procesie OUSSAC50CV, gdzie różnica ΔE między próbką świeżą a suszoną wyniosła $7,44 \pm 0,02$. Największą zmianę barwy dla próbek suszonych konwekcyjnie oznaczono dla próbek suszonych metodą OUSERY50CV, i wyniosła ona $20,41 \pm 0,08$. W tym przypadku różnica barwy wynikała z silnej krystalizacji erytrytolu na powierzchni próbki, o czym świadczy wartość parametru L^* (rysunek 75). Dla suszenia konwekcyjnego z udziałem US, najlepszy wynik uzyskano dla próby otrzymanej metodą OUSERY50US ($9,94 \pm 0,02$), a największą różnicę barwy dla suszu uzyskanego z procesu OUSSOR50US ($23,92 \pm 0,1$). W analizowanym przypadku całkowita zmiana barwy może w dużej mierze zależeć od indywidualnych właściwości zastosowanej substancji osmotycznie czynnej. Dla erytrytolu zastosowanie osmozy klasycznej w obróbce wstępnej skutkuje podobną wartością ΔE , niezależnie od metody suszenia badanych próbek. Natomiast zastosowanie ultradźwięków zmienia diametralnie różnicę między próbkami suszonymi metodą konwekcyjną i konwekcyjno-ultradźwiękową powodując różnicę kształtującą się na poziomie 51% na korzyść metody z US. Podobną zależność, choć nie tak jaskrawo zaznaczoną, można przyjąć dla próbek odwadnianych w roztworze sacharozy, choć trend dla próbek odwadnianych z ultradźwiękami jest przeciwny. W przypadku roztworu sorbitolu wyraźnie lepsze rezultaty uzyskano dla suszenia konwekcyjnego, przy czym nie odnotowano wpływu obróbki wstępnej na całkowitą zmianę barwy. Zastosowanie ultradźwięków w procesie suszenia spowodowało zwiększenie różnicy zmiany barwy między próbką suszoną a świeżą, przy czym porównując próby uzyskane metodą OSOR50US i OUSSOR50US, mniej korzystne było zastosowanie ultradźwięków dla próbek poddanych ich działaniu w obróbce wstępnej.



Rysunek 77. Całkowita zmiana barwy plastrów kiwi a) dla suszenia konwekcyjnego, b) dla suszenia konwekcyjno-ultradźwiękowego





Rysunek 78. Zmiana poszczególnych parametrów barwy w otrzymanych suszach w odniesieniu do surowca

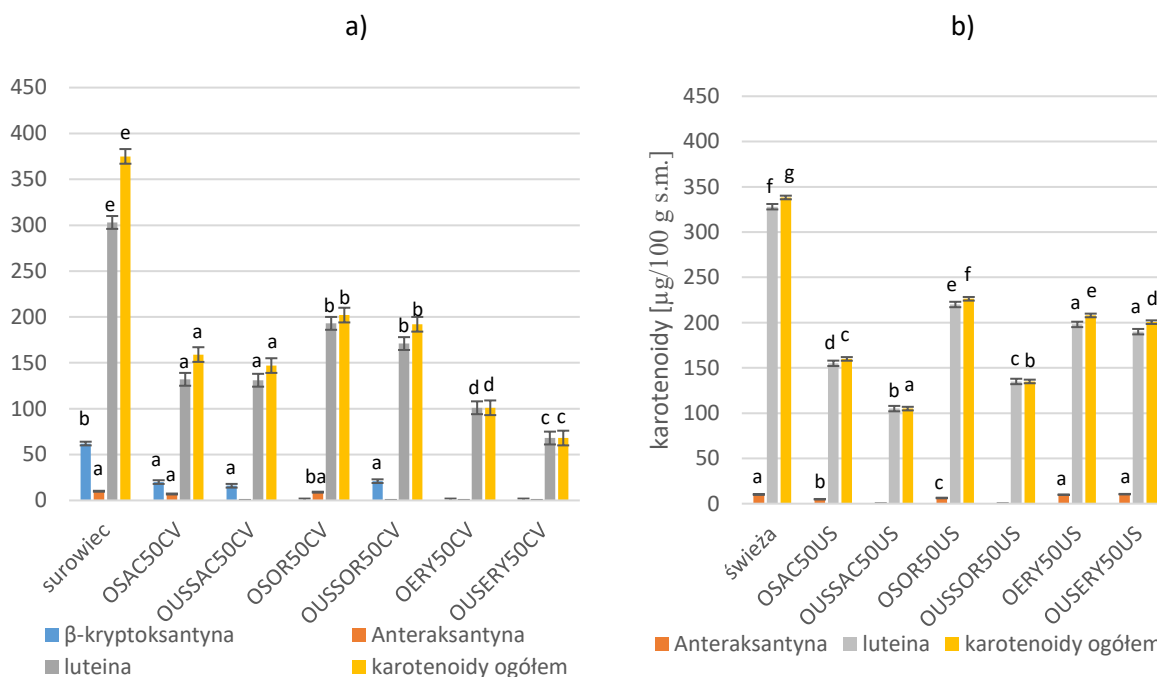
Dla większości zbadanych prób (za wyjątkiem tych odwadnianych w erytrytolu i suszonych metodą CV) odnotowano spadek wartości parametru L* (jasność próbki). Pokrywa się to z wynikami uzyskanymi przez Wanga i innych [283], oraz Diamante i innych [284]. Odnotowali oni także małe zmiany w zakresie parametru a* w kierunku wartości dodatnich. Także Simal i inni, odnotowali wzrost parametrów a* i b* oraz spadek parametru L* dla dojrzałych plasterów owocu kiwi poddawanych osmozie i procesowi suszenia [281]. Na powierzchni prób otrzymanych metodą OERY50CV i OUSERY50CV, erytrytol mocno wykryształizował, co spowodowało wzrost wartości parametru L*. W badaniach prowadzonych przez Maskana, także zanotowano wyniki zbliżone do uzyskanych przez autorkę dla plasterów kiwi suszonych w temperaturze 60 °C [285]. Zmiany między barwą próbki świeżej a suszonej pogłębiały się w przypadku zastosowania mikrofal. Można to odnieść do podobnej, choć nie tak drastycznej zmiany, odnotowanej w przypadku zastosowania ultradźwięków, jako dodatkowego źródła mocy, które mogą potęgować kinetykę zmiany barwy wywołane rozkładem barwników termolabilnych. We wszystkich analizowanych próbkach odnotowano zmianę parametru a* w kierunku wartości dodatnich. Ma to szczególne znaczenie dla owocu kiwi, gdzie intensywnie zielona barwa jest wyznacznikiem jakości i jest pożądana przez konsumenta. Większą średnią zmianę parametru a* odnotowano dla próbek suszonych z ultradźwiękami. Zmiany parametru a* mogą wynikać z zastosowania osmotycznej obróbki wstępnej. W czasie tego procesu barwniki dyfundują do roztworu co może powodować częściową utratę barwy. Zastosowanie ultradźwięków może intensyfikować ten proces, dodatkowo częściowo uszkadzając błonę komórkową [286]. Za barwę zieloną w owocach (parametr a*) odpowiada w szczególności chlorofil. Jest on związkiem wrażliwym na temperaturę [287]. Chlorofil może również ulegać przemianie do feofityny, opisanej przez Weemaes i innych [288], wpływając na utratę barwy zielonej.

12.2.3. Retencja składników fitochemicznych

12.2.3.1. Retencja karotenoidów

Na rysunku 79 przedstawiono wyniki dotyczące retencji karotenoidów w badanych plasterkach kiwi. We wszystkich badanych suszach odnotowano znaczącą redukcję zawartości tych związków

w porównaniu do ich zawartości w surowcu. Może być to spowodowane utlenianiem karotenoidów oraz wzrostem porowatości materiału. Największą retencją karotenoidów ogółem dla próbek suszonych metodą CV cechowały się próbki odwadniane w roztworze sorbitolu, zachowując ich niemal 54%. Podobnie, dla próbek suszonych konwekcyjnie przy wspomaganiu ultradźwiękowym najlepsze zachowanie badanych związków wykazano dla próbek otrzymanych metodą OSOR50US, gdzie retencja wyniosła około 46%. W przypadku próbek suszonych metodą CV nie wykazano znaczącego wpływu osmotycznej obróbki wstępnej z ultradźwiękami na zachowanie karotenoidów ogółem, natomiast w przypadku erytrytolu, zmiana była znacząca na niekorzyść zastosowania US. W przypadku aplikowania ultradźwięków podczas suszenia konwekcyjnego, odnotowano duże różnice między próbkami poddanymi obróbce wstępnej metodą OUS i O, na niekorzyść OUS.



Rysunek 79. Retencja karotenoidów w odwadnianych osmotycznie plastrach kiwi a) retencja przy suszeniu konwekcyjnym, b) retencja przy suszeniu konwekcyjno-ultradźwiękowym

Większą średnią retencją karotenoidów charakteryzowały się próby suszone konwekcyjnie z zastosowaniem ultradźwięków, zachowując ok. 51% zawartości początkowej, podczas, gdy dla suszenia konwekcyjnego, zachowano ok. 38% tych związków. Może być to spowodowane zmniejszeniem zawartości tlenu przez szybkie jego usuwanie, wywołane efektami kawitacyjnymi przez ultradźwięki, co powoduje większą ich stabilność [289]. Uzyskane dane odpowiadają wynikom przedstawionym przez Fernandes i inni [120], gdzie w tych samych warunkach suszono pomidory koktajlowe. W przypadku β-kryptoksantyny, najlepszą retencję odnotowano dla próbek otrzymanych metodą OUSSOR50CV (34%), oraz dla obu próbek odwadnianych w roztworze sacharozy, gdzie retencja wyniosła 32 i 26 % odpowiednio dla OSAC50CV i OUSAC50CV. Wyniki te pokrywają się z danymi przedstawionymi przez Udomkun i inni, 2015 dla plastrów papai, odwadnianej w roztworze sacharozy, gdzie uzyskano 22-77% utratę tego związku [290]. Generalnie, dane przedstawione w literaturze mówią o degradującym wpływie suszenia w temperaturach powyżej 30 °C na zawartość β-kryptoksantyny, jedynie zastosowanie liofilizacji może ograniczyć te straty. W pozostałych próbach nie stwierdzono obecności β-kryptoksantyny. Zawartość luteiny w suszu wykazywała podobną tendencję jak w przypadku ogólnej zawartości karotenoidów. Luteina jest jednym z głównych składników tworzących plamkę żółtą w ludzkim oku, dlatego jej zachowanie jest szczególnie istotne z punktu widzenia właściwości prozdrowotnych suszu. W pracach poświęconych badaniom nad

zachowaniem tego składnika wykazano degradujący wpływ suszenia gorącym powietrzem na zawartość luteiny (23-95%), a uzyskanie średnio 44% dla suszonych plastrów kiwi otrzymanych metodą CV i 51% dla suszy z procesu US wydaje się być zadawalające [289].

12.2.3.2. Zawartość związków fenolowych

Wyniki dotyczące zawartości związków fenolowych w badanych próbach kiwi zostały zebrane i przedstawione w tabeli 20. We wszystkie suszach odnotowano spadek zawartości związków fenolowych w stosunku do próby świeżej. Najwyższą zawartość badanych związków odnotowano dla prób odwadnianych osmotycznie w roztworze sorbitolu, gdzie, zarówno dla suszenia konwekcyjnego jak i konwekcyjno-ultradźwiękowego, uzyskano retencję fenoli na poziomie około 96%. Najmniejszą zaś retencję związków fenolowych zanotowano dla suszy z procesu OUSSAC50CV (47%). Zarówno dla próbek suszonych konwekcyjnie jak i z zastosowaniem ultradźwięków, ogólna zawartość związków fenolowych była mniejsza dla prób odwadnianych osmotycznie z zastosowaniem ultradźwięków. Równocześnie, różnice między próbami O i OUS były znacząco mniejsze dla suszenia z ultradźwiękami. Może to wynikać z niszczenia ścian komórkowych przez ultradźwięki, dzięki czemu uwalniane są związki fenolowe, może to częściowo tłumaczyć wyższą zawartość niektórych fenoli w stosunku do próby świeżej. Ogólna niższa zawartość fenoli w suszach może być tłumaczona degradującym działaniem wysokiej temperatury podczas suszenia. Podobne rezultaty uzyskali Wang i inni, który także po suszeniu w temperaturze 65°C odnotowali znaczący spadek zawartości związków fenolowych [283]. Zbliżone wyniki uzyskali także Chottamom i inni [291], dla owocu morwy odwadnianego w roztworach sacharozy, sorbitolu i maltozy, odnotowując lepsze rezultaty dla sorbitolu w porównaniu do sacharozy i podobny procent zatrzymania związków fenolowych ogółem.

Tabela 6. Zawartość związków fenolowych w próbkach kiwi

	HBA $\left[\frac{mg}{100g\ s.m.}\right]$	PCA $\left[\frac{mg}{100g\ s.m.}\right]$	CA $\left[\frac{mg}{100g\ s.m.}\right]$	p-CA $\left[\frac{mg}{100g\ s.m.}\right]$	KW $\left[\frac{mg}{100g\ s.m.}\right]$	KF $\left[\frac{mg}{100g\ s.m.}\right]$	Fenole ogółem $\left[\frac{mg}{100g\ s.m.}\right]$
surowiec I	39,1±0,7 d	47,2±0,9 f	64,7±2,4 b	10,7±0,3 b	5,01±0,15 c	1,96±0,16 ab	168,7±3,6 c
OSAC50CV	30,2±0,5 b	37,8±0,7 d	44,2±2,8 d	11,5±0,6 b	3,76±0,05 a	1,89±0,05 ab	129,4±3,6 b
OUSSAC50CV	13,8±1,8 a	25,9±2,1 a	27,7±3,6 a	7,25±0,76 a	3,31±0,54 ab	2,11±0,33 ab	80,1±8,8 d
OSOR50CV	28,1±3,2 b	31,1±1,6 bc	88,9±3,3 e	7,24±0,68 a	4,52±0,43 c	2,21±0,21 a	162,1±7,5 c
OUSSOR50CV	15,6±1,7 a	31,5±1,6 c	37,8±1,2 c	6,55±1,29 a	2,84±0,22 b	1,77±0,14 b	96,0±6,3 a
OERY50CV	21,9±2,9 c	27,9±0,7 ab	62,5±2,2 b	6,31±0,47 a	3,34±0,33 ab	1,90±0,18 ab	123,9±5,5 b
OUSERY50CV	16,0±2,1 a	42,0±2,4 e	28,6±2,7 a	6,79±0,55 a	3,51±0,38 a	2,20±0,24 a	99,1±6,3 a
surowiec II	20,4±0,1 b	64,9±1,3 c	62,3±0,3 a	12,7±0,29 d	8,39±0,01 a	3,52±0,35 a	177,3±1,59 f
OSAC50US	17,6±1,0 a	55,4±0,8 d	53,6±1,2 bc	10,4±1,2 b	6,27±0,05 d	3,52±0,14 a	146,8±0,04 c
OUSSAC50US	17,2±0,5 a	43,1±1,7 a	56,4±3,8 c	12,5±1,24 c	5,45±0,1 c	3,24±0,05 ab	137,9±1,2 a
OSOR50US	18,9±0,3 d	64,1±1,4 c	67,4±5,6 a	9,25±0,9 ab	7,38±0,12 b	2,66±0,14 c	169,6±6,0 e
OUSSOR50US	13,3±0,8 c	49,9±1,7 b	49,0±2,8 b	8,31±0,99 a	7,15±0,71 b	2,84±0,31 bc	130,6±6,5 b
OERY50US	25,1±1,0 e	50,1±0,2 b	64,0±0,9 a	9,32±0,43 ab	8,32±0,01 a	3,14±0,26 ab	160,1±0,9 d
OUSERY50US	20,5±0,7 b	43,5±0,6 a	43,1±4,4 d	19,9±1,06 e	7,90±0,15 a	3,16±0,27 ab	138,0±4,0 a

gdzie: HBA – kwasy hydroksybenzoesowe (ang. *hydroxy-benzoic acids*), PCA – procyanidyna (ang. *procyanidin*), CA – kwas kawowy (ang. *caffeic acid*), p-CA – kwas p-kumarowy (ang. *p-cumaric acid*), KW - kwercetyna (ang. *quercetin*), KF – kemferol (ang. *kempferol*), oraz: wartości oznaczone symbolami a – f, różnią się między sobą statystycznie

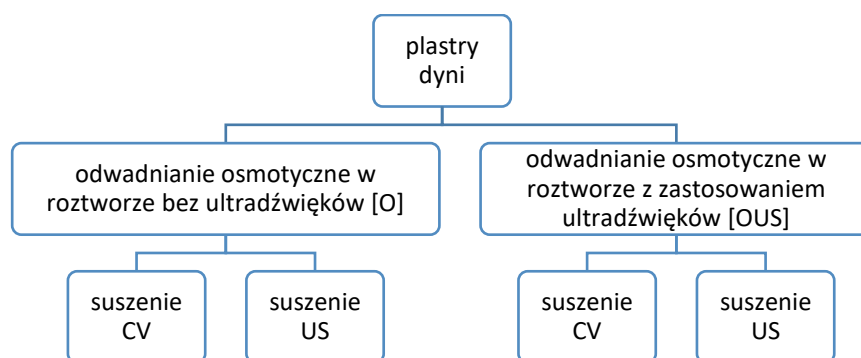
12.3. Podsumowanie i wnioski

Proces odwadniania osmotycznego plastrów kiwi najbardziej efektywnie przebiegał w czasie pierwszych 30 min. Zastosowanie ultradźwięków w obróbce wstępnej, pozwoliło uzyskać większą redukcję zawartości wilgoci w badanych plastrach (o 19 do 27% dla WL) oraz większy przyrost suchej substancji (od 16 do 57% dla SG) w porównaniu do prób poddanych zwykłej osmozie. Najlepszy efekt związany z ubytkiem wilgoci na etapie odwadniania uzyskano dla erytrytolu i sorbitolu. Przy czym dla 50% roztworu sorbitolu, odnotowano niższy przyrost suchej substancji. W przypadku zawartości związków bioaktywnych, zastosowanie ultradźwięków na etapie odwadniania spowodowało spadek zawartości karotenoidów i związków fenolowych odpowiednio o 10% i 19% w otrzymanych suszach w porównaniu do prób odwadnianych na drodze zwykłej osmozy. Użycie ultradźwięków na etapie suszenia wpłynęło na mniejszą wilgotność końcową suszonego konwekcyjnie materiału zwłaszcza w przypadku zastosowania polioli jako substancji osmoaktywnych. Użycie ultradźwięków na drugim etapie procesu (suszenie konwekcyjne) nie zmieniało w istotny sposób kinetyki procesu, natomiast pozytywnie wpływało na zachowanie jakości suszu w odniesieniu do związków fenolowych (68% średnia retencja dla CV i 83% dla US) i karotenoidów (38% średnia retencja dla CV i 51% dla US).

Nie stwierdzono wpływu zastosowania ultradźwięków zarówno na etapie odwadniania osmotycznego, jak i suszenia na aktywność wody w suszu. Wszystkie badane próby cechowały się wartością aktywności wody poniżej 0,6. Próby suszone z zastosowaniem ultradźwięków charakteryzowały się większą całkowitą zmianą barwy w odniesieniu do prób suszonych konwekcyjnie, gdzie średnia różnica między nimi wyniosła około 31%. W przypadku większości prób poddanych osmozie z ultradźwiękami (OUS) odnotowano mniejszą całkowitą zmianę barwy po suszeniu konwekcyjnym (CV) w porównaniu do suszenia konwekcyjno-ultradźwiękowego (US). Jednak odwrotną zależność zaobserwowano dla prób odwodnionych w erytrytolu (ERY). Wykazano, że stosowanie alkoholi cukrowych jako zamienników dla zwykłego cukru, może skutkować uzyskaniem lepszego zachowania zawartości karotenoidów oraz związków fenolowych w porównaniu do sacharozy, zwłaszcza dla suszenia konwekcyjnego wspomaganego ultradźwiękami. Tym samym zastosowanie polioli w odwadnianiu osmotycznym jako alternatywy dla sacharozy, wydaje się być dobrym rozwiązaniem dla uzyskania produktów o mniejszej wartości energetycznej przeznaczonych dla osób cierpiących np. na otyłość czy cukrzycę. Spośród stosowanych substancji osmotycznie czynnych najlepsze właściwości odnotowano dla sorbitolu, pozwalającego osiągnąć dobry efekt odnoszący się zarówno do kinetyki procesu, jak i jakości otrzymanego suszu. Lepsze wyniki uzyskane dla sorbitolu w porównaniu do erytrytolu mogą wynikać z większej masy cząsteczkowej tego pierwszego, co może przekładać się m.in. na utworzenie szczelniejszej warstwy zabezpieczającej przed czynnikami degradującymi przy powierzchni materiału.

13. Efektywność suszenia dyni zwyczajnej po odwadnianiu w roztworze binarnym

W końcowej części pracy badano wpływ odwadniania osmotycznego wspomaganego ultradźwiękami dyni w roztworze binarnym, a następnie suszenia w warunkach konwekcyjnych i konwekcyjno-ultradźwiękowych na kinetykę procesu i jakość otrzymanych suszy. Zbadano również kinetykę oraz jakość plastrów dyni nie poddanych obróbce wstępnej. Świeże, sezonowe jagody dyni zwyczajnej (*Cucurbita pepo* L.) o masie ok. 20 kg, zostały zakupione na lokalnym targowisku i posłużyły do badań. Materiał był przechowywany w temperaturze 4°C bez dostępu światła. Na pół godziny przed rozpoczęciem badań surowiec był wyciągany z chłodziarki w celu wyrównania temperatury z otoczeniem. Owoc dyni myto, obierano, a następnie krojono w plastry o grubości 0,5 cm, z których wycinano okręgi o średnicy 3,2 cm. Masa plastrów, które poddawano osmotycznej obróbce wstępnej wynosiła $18,5 \pm 0,05$ g. Obróbkę wstępną przeprowadzano w roztworze binarnym (dwuskładnikowym), składającym się z sorbitolu lub sacharozy i chlorku sodu, rozpuszczonych w wodzie destylowanej. Stężenie sacharozy/sorbitolu wynosiło 30 lub 60% wagowych, natomiast stężenie chlorku sodu 5% wagowych. Obróbkę osmotyczną przeprowadzono w temperaturze 35°C w celu ograniczenia efektu temperaturowego, w warunkach osmozy klasycznej (O) lub osmozy z ultradźwiękami (OUS). Graficzne przedstawienie schematu badań zostało zaprezentowane na rysunku 81. Wstępnie zbadano kinetykę odwadniania osmotycznego w czasie dwóch godzin. Następnie, prowadzono badania z 30-minutową obróbką osmotyczną i dalej suszono w warunkach konwekcyjnych (CV) lub konwekcyjnych z zastosowaniem ultradźwięków (US), do wilgotności końcowej 0,04 [kg/kg masy początkowej]. Suszenie konwekcyjne prowadzono w temperaturze 50 °C i przepływie powietrza suszącego 2 m/s. Wspomaganie ultradźwiękowe procesu suszenia prowadzono stosując moc US 200W. Po procesie próby były poddane badaniom jakościowym.



Rysunek 80. Schemat badań dla suszenia dyni po osmotycznej obróbce wstępnej

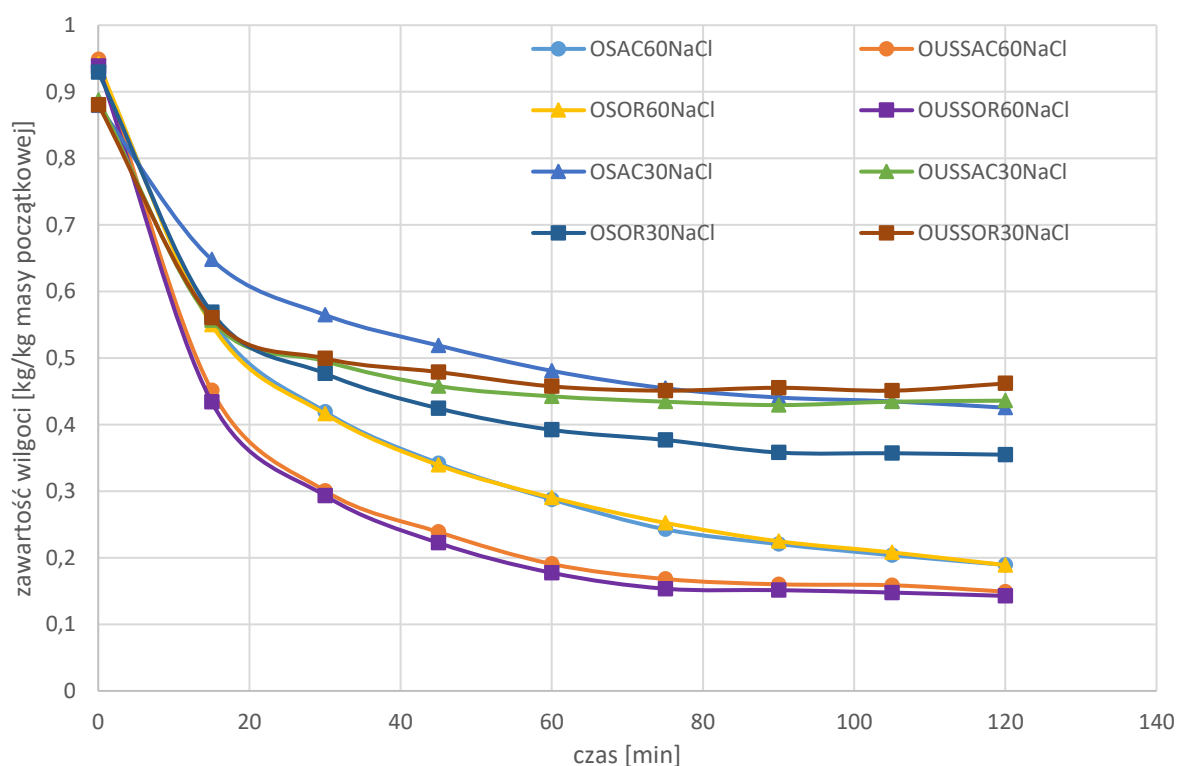
Warunki procesowe a także odpowiadające im skróty stosowane w dalszym opracowaniu zestawiono w tabeli 21. Obliczenia dotyczące zawartości wilgoci, zawartości suchej substancji, ubytku wilgoci etc. przeprowadzono analogicznie jak w rozdziale 12.

Tabela 21. Zestawienie warunków procesowych i skrótów w badaniach nad dynią zwyczajną

roztwór osmotycznie czynny	odwadnianie osmotyczne				suszenie konwekcyjne			
	stężenie [% wagowy]	czas [min]	US	akronim	przepływ powietrza [m/s]	temperatura [°C]	US (200 W)	akronim
sacharoza /chlorek sodu (SACNaCl)	60/5	30	+	OUSSAC60NaCl	2	50	+	OUSSAC60NaCIUS
				OSAC60NaCl				OUSSAC60NaCICV
			-	OUSSOR60NaCl				OSAC60NaCIUS
				OSOR60NaCl				OSAC60NaCICV
			+	OUSSOR60NaCl				OUSSOR60NaCIUS
				OSOR60NaCl				OUSSOR60NaCICV
sacharoza /chlorek sodu (SACNaCl)	30/5	30	+	OUSSAC30NaCl			+	OUSSAC30NaCIUS
				OSAC30NaCl				OUSSAC30NaCICV
			-	OUSSOR30NaCl				OSAC30NaCIUS
				OSOR30NaCl				OSAC30NaCICV
			+	OUSSOR30NaCl				OUSSOR30NaCIUS
				OSOR30NaCl				OUSSOR30NaCICV
sorbitol /chlorek sodu (SORNaCl)	60/5	30	+	OUSSOR60NaCl			+	OUSSOR60NaCIUS
				OSOR60NaCl				OUSSOR60NaCICV
			-	OUSSOR60NaCl				OSOR60NaCIUS
				OSOR60NaCl				OSOR60NaCICV
			+	OUSSOR60NaCl				OUSSOR60NaCIUS
				OSOR60NaCl				OUSSOR60NaCICV

13.1. Kinetyka procesu

Przeprowadzono badanie kinetyki odwadniania osmotycznego O i OUS w czasie dwóch godzin. Pomiar przeprowadzany był co 15 min. Wyniki zmian zawartości wilgoci w materiale w czasie procesu zaprezentowano na rysunku 81.



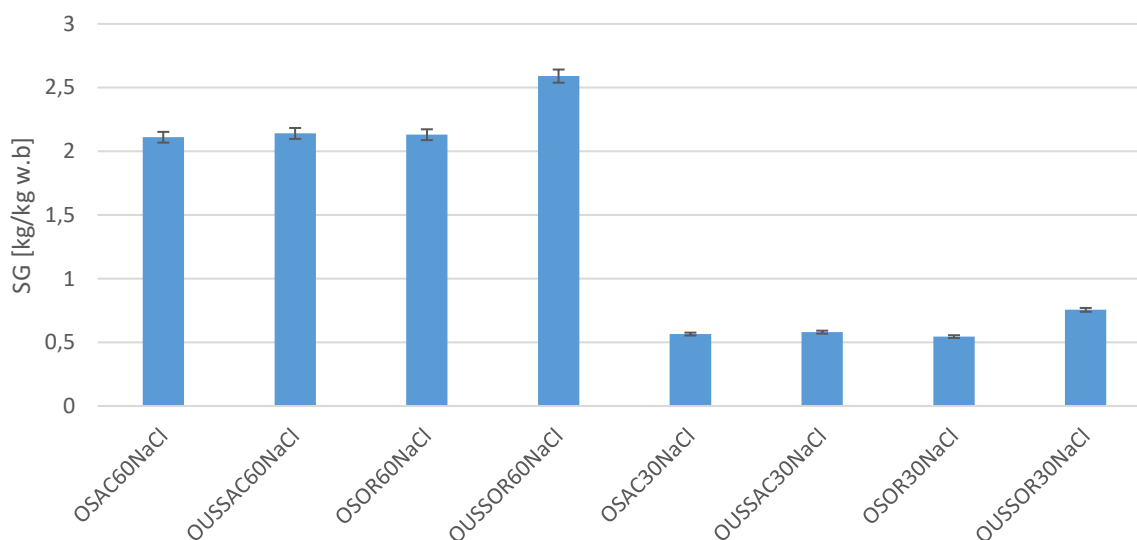
Rysunek 81. Zmiany zawartości wilgoci w dyni podczas odwadniania osmotycznego

Analiza porównawcza została przeprowadzona dla pierwszych 30 min procesu, dla których odnotowano największe tempo odwadniania. Na rysunku 81 zauważalny jest wpływ stężenia

substancji osmoaktywnej na kinetykę procesu. Krzywe dla prób odwadnianych przy 60%-owym stężeniu sorbitolu lub sacharozy mają większy kąt nachylenia i średnia zawartość wilgoci po 30 min odwadniania była mniejsza o około 68% w stosunku do średniej zawartości wilgoci otrzymanej dla prób odwadnianych przy 30% stężeniu substancji osmoaktywnej. Podobne wyniki obrazujące wpływ stężenia na zawartość wilgoci w odwadnianych jabłkach, marchwi oraz pomidorach koktajlowych otrzymali także inni autorzy (Lenart, 1992, Tortoe, 2010, Azoubel i Murr, 2004). Wykazali, że większe różnice potencjału osmotycznego między próbką a roztworem prowadzą do większej prędkości dyfuzji składników [292] [293] [294].

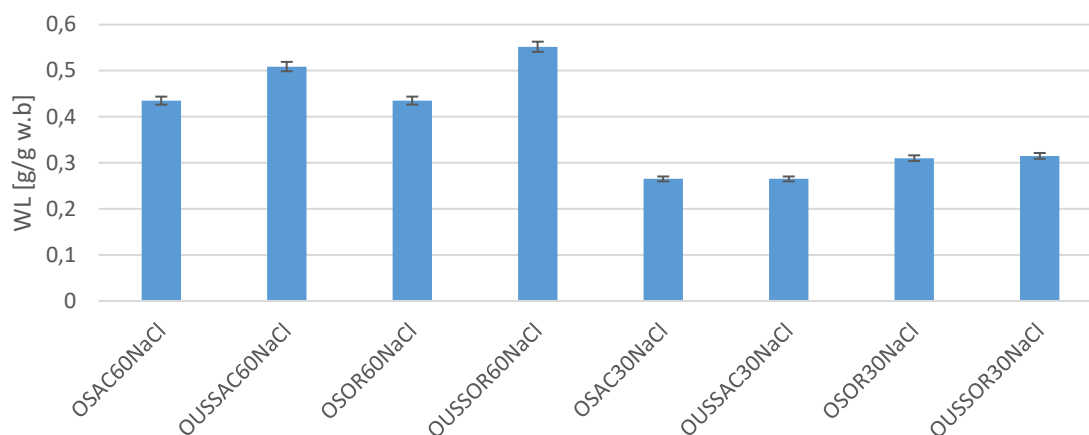
Rozważając wpływ obróbki wstępnej można zauważyć, że użycie ultradźwięków podczas osmozy obniża zawartość wilgoci w materiale średnio o około 26% w porównaniu do zwykłej osmozy, poprawiając kinetykę procesu (wyjątek stanowią próby odwadniane w roztworze 30%, w których nie odnotowano takiego efektu). Efekt ten może być związany ze zjawiskiem kawitacji, wywołującym turbulencje przy powierzchni próbki oraz naprzemienne ścisnięcia i rozprężania materiału.

Dla przeprowadzonego procesu obliczono przyrost zawartości substancji suchej oraz ubytek wilgoci w odwadnianych osmotycznie próbkach dyni. Uzyskane wyniki zaprezentowano na rysunku 82 i 83.



Rysunek 82. Przyrost suchej substancji podczas odwadniania osmotycznego plastrów dyni po 30 min procesu

Największym przyrostem substancji suchej charakteryzowały się próby OUSSOR60NaCl, a najmniejszym próby OSAC30NaCl, OUSSAC30NaCl i OSOR30NaCl. Na podstawie rysunku 82 można więc stwierdzić, że mniejszy (średnio o 73%) przyrost masy dla roztworów o stężeniu 30% substancji osmoaktywnej. Porównując odwadnianie osmotyczne z udziałem lub bez ultradźwięków, odnotowano większy przyrost masy w OUS dla prób odwadnianych w sorbitolu, natomiast dla roztworów sacharozy różnica między przyrostem suchej substancji zarówno dla stężenia roztworu 30 i 60% była nieistotna. Podobną zależność odnotowano dla 30 minut odwadniania owoców kiwi, co może świadczyć o silnym wpływie sacharozy jako substancji osmoaktywnej na proces osmozy.

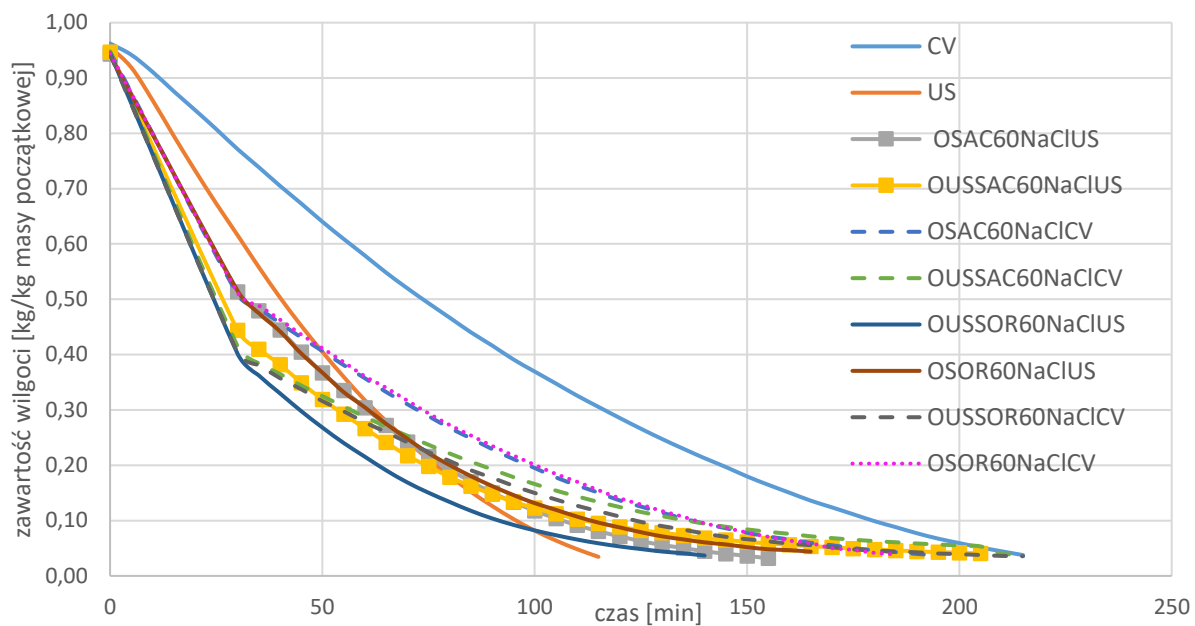


Rysunek 83. Ubytek wilgoci podczas odwadniania osmotycznego plasterów dyni w czasie 30 min

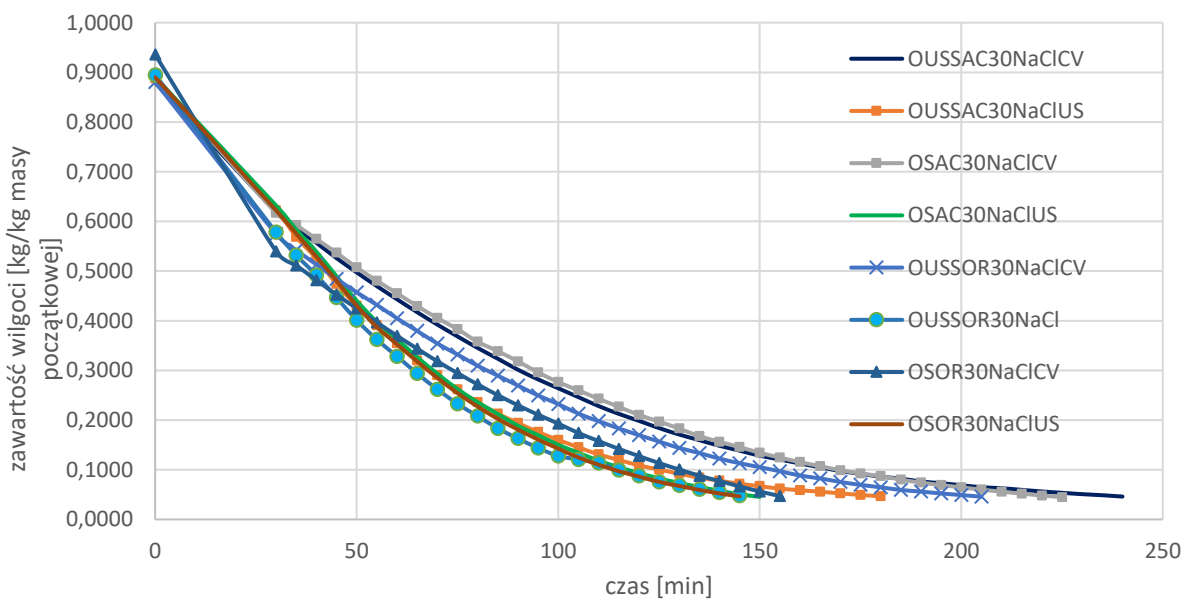
Na rysunku 83 przedstawiono ubytek wilgoci z materiału podczas procesu odwadniania. Można zauważyć, że kluczową rolę odegrało stężenie substancji osmoaktywnych, gdzie dla stężenia 60% ubytek wilgoci był średnio o 40% większy niż dla stężenia 30%. Odnotowano również, że dla stężenia 60% duży wpływ odgrywają ultradźwięki, gdzie ubytek wilgoci był o 17 i 27% większy dla prób odwadnianych w OUS (odpowiednio dla SAC60NaCl i SOR60NaCl). Dla stężenia 30% wpływ obróbki wstępnej na ubytek wilgoci był nieistotny.

Porównując otrzymane wyniki dotyczące ubytku wilgoci z danymi literaturowymi czy też prowadzonym procesem odwadniania osmotycznego w roztworze 50% sacharozy czy sorbitolu dla kiwi, można zaobserwować wpływ dodatku chlorku sodu na poprawę kinetyki procesu. M. in. Pan i inni [295] dla dyni odwadnianej w roztworze sacharozy o stężeniach 30 i 65%, odnotowali taki efekt dodatku chlorku sodu. Wilgotność badanego przez nich materiału po 2 godzinach osmozy w roztworze dwuskładnikowym była około czterokrotnie mniejsza, niż w przypadku roztworu jednoskładnikowego. Różnice te mogą wynikać ze wzrostu ciśnienia osmotycznego, powodującego wzmożoną dyfuzję składników z i do roztworu. Dla potwierdzenie tego efektu dla dyni należałoby przeprowadzić dodatkowe badania.

Następnym krokiem było przygotowanie wstępnie odwodnionych w czasie 30 min prób dyni (wg wcześniej opisanej procedury), po czym suszenie ich metodą konwekcyjną. Krzywe suszenia dla w. w. procesów przedstawiono na rysunkach 84 i 85. Dodatkowo, na wykresie 84 przedstawiono krzywe uzyskane dla materiału bez obróbki wstępnej, suszone metodą CV i US.



Rysunek 84. Kinetyka suszenia dla plastrów dyni odwadnianej w roztworze o 60% stężeniu substancji osmoaktywnej



Rysunek 85. Kinetyka suszenia dla plastrów dyni odwadnianej w roztworze 30%

Tabela 22. Zestawienie czasów suszenia dla dyni

akronim	czas suszenia [min]
CV	215
US	110
OUSSAC60NaCICV	190
OUSSAC60NaCIUS	180
OSAC60NaCICV	170
OSAC60NaCIUS	125
OUSSOR60NaCICV	190
OUSSOR60NaCIUS	115
OSOR60NaCICV	160
OSOR60NaCIUS	140
OUSSAC30NaCICV	240
OUSSAC30NaCIUS	185
OSAC30NaCICV	225
OSAC30NaCIUS	150
OUSSOR30NaCICV	180
OUSSOR30NaCIUS	145
OSOR30NaCICV	155
OSOR30NaCIUS	145

Najkrótszymi czasami przebiegu procesu charakteryzowały się próby bez obróbki wstępnej poddane suszeniu ze wspomaganie ultradźwiękami (US) (110 min). Najdłuższe czasy uzyskano dla prób odwadnianych osmotycznie lub osmotycznie z ultradźwiękami w roztworze sacharozy o stężeniu 30%, poddanych suszeniu konwekcyjnemu, gdzie czas suszenia wynosił odpowiednio 225 i 240 min. Uzyskane wyniki wskazują na istotny wpływ ultradźwięków na przebieg procesu suszenia plasterów dyni. Redukcja czasu suszenia wspomaganego przez US w odniesieniu do metody CV wynosiła 49%. Korzystny wpływ ultradźwięków na przebieg procesu suszenia dyni może być związany z dużą porowatością oraz włóknistą strukturą tego surowca. Dla prób odwadnianych zarówno w przypadku wspomaganie ultradźwiękowego, jak i bez ultradźwięków, odnotowano krótszy czas suszenia (średnio o około 20%) w przypadku suszenia konwekcyjnego z ultradźwiękami w porównaniu do prób suszonych konwekcyjnie. Potwierdza to pozytywny wpływ ultradźwięków na wymianę masy, również w warunkach utrudnionej dyfuzji wilgoci, spowodowanej dodatkową warstwą utworzoną przez substancję osmoaktywną.

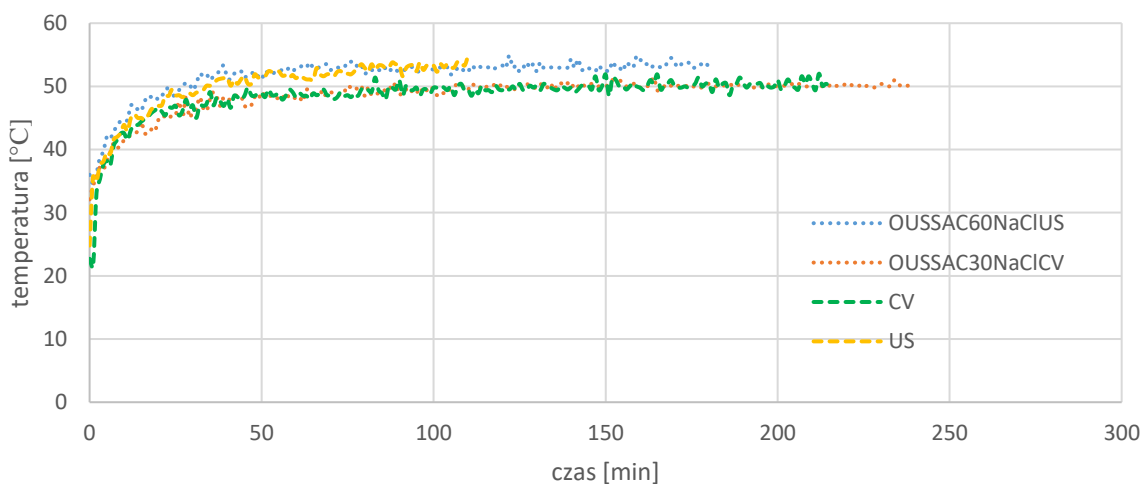
Zastosowanie odwadniania osmotycznego dla plasterów dyni suszonych konwekcyjnie skutkowało skróceniem czasu suszenia w porównaniu do prób niepoddanych obróbce wstępnej o średnio 23%, z wyjątkiem prób odwadnianych w 30% roztworze sacharozy. Z kolei zastosowanie ultradźwięków podczas odwadniania dla tych prób skutkowało mniejszą redukcją czasu suszenia (o około 13%). Wyniki uzyskane dla suszenia konwekcyjnego dobrze przekładają się na krzywe suszenia uzyskane dla dyni przez Garcia i innych [296], którzy podobnie jak w tej pracy, uzyskali poprawę transportu wilgoci w materiale dla prób odwadnianych osmotycznie w 60%-owym roztworze sacharozy i suszonego w temperaturze 50°C, w odniesieniu do materiału nie poddanemu obróbce. Uzyskane wyniki dodatkowo powiązali ze zwiększonym współczynnikiem dyfuzji wilgoci. Znaczącą redukcję zawartości wilgoci w próbach potwierdzają także badania Lenart i Flink, 1984, gdzie na przykładzie

ziemniaka wykazali oni, że niewielki dodatek soli w roztworze wodnym sacharozy powodował duże obniżenie zawartości wody w porównaniu do roztworu jednoskładnikowego, zawierającego sacharozę o tym samym stężeniu [297].

W przypadku suszenia konwekcyjnego z ultradźwiękami, obróbka wstępna plasterów dyni zarówno w przypadku stosowania, jak i bez ultradźwięków, skutkowało wydłużeniem czasu suszenia w porównaniu do prób suszonych z pominięciem procesu odwadniania osmotycznego.

Dłuższym średnim czasem suszenia charakteryzowały się próby odwadniane w roztworze sacharozy. Takie zjawisko może być spowodowane niemal dwukrotnie większą masą cząsteczkową substancji (sacharoza – 342 g/mol, sorbitol – 182 g/mol), która przy jednakowym stężeniu może tworzyć bardziej gęstą, grubszą i zwartą warstwę na powierzchni materiału, blokując powierzchnię próbki.

Dodatkowo, na rysunku 86, zaprezentowane zostały wybrane krzywe temperaturowe odpowiadające krzywom kinetycznym opatrzonym tymi samymi akronimami. Na wykresie umieszczono tylko wybrane krzywe z tego względu, że pozostałe mają niemal identyczny przebieg i nie wnoszą dodatkowych treści. Jak przedstawiono na rysunku poniżej, krzywe odpowiadające procesom suszenia w warunkach konwekcyjnych przebiegają podobnie, temperatura medium grzewczego osiągnięta została około 90 minuty procesu, zarówno dla prób poddanych, jak i nie poddanych obróbce wstępnej. Podobnie, dla prób suszonych z zastosowaniem ultradźwięków, nie odnotowano wpływu obróbki wstępnej na temperaturę procesu, a temperatura osiągnięta przez próbki jest o około 3,5°C wyższa, niż w przypadku prób suszonych metodą CV.



Rysunek 86. Krzywe temperaturowe dla wybranych procesów suszenia próbek dyni zwyczajnej

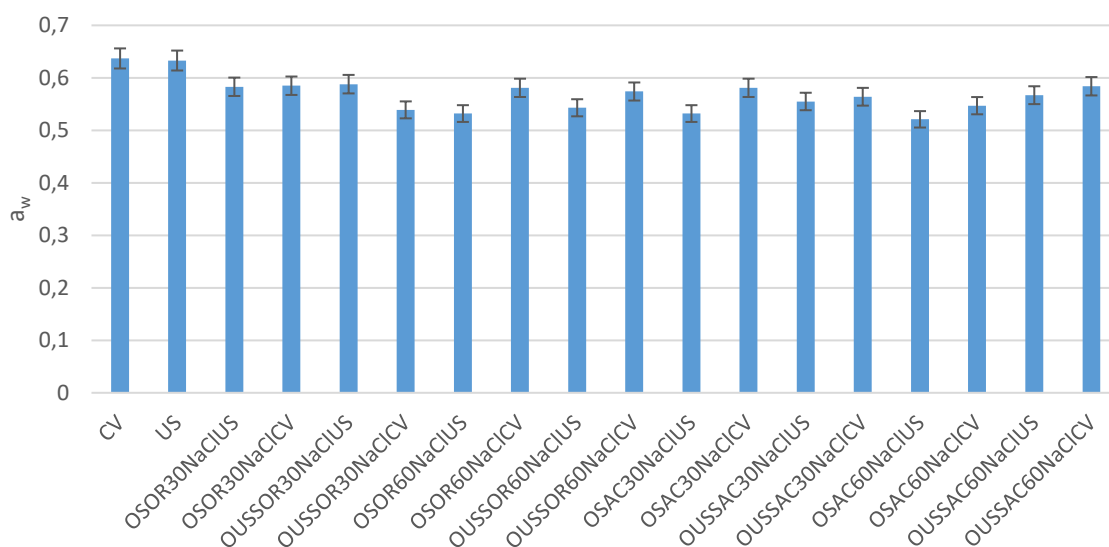
Temperatury zarejestrowane dla próbek dyni odwadnianej w roztworze binarnym są niższe niż w przypadku próbek kiwi, omówionych w poprzednim rozdziale. Można to odnieść do wyników uzyskanych przez Lenart i Flink [297], którzy zaobserwowali gromadzenie się sacharozy w warstwie podpowierzchniowej próbki, tworząc cienką barierę i zagęszczając strukturę powierzchni. W przypadku soli, zaobserwowano znacznie głębsze wnikanie jej cząsteczek w strukturę tkanki dyni poddawanej osmozie. Dodatek soli w roztworze hipertonicznym skutecznie utrudniał tworzenie zwartej warstwy powierzchniowej, umożliwiając osiągnięcie wyższych szybkości dyfuzji. Mogło to spowodować ułatwienie dyfuzji wilgoci z głębi materiału do jego powierzchni, umożliwiając stałe odparowywanie wody na granicy faz, obniżając jego temperaturę.

13.2. Jakość produktu

13.2.1. Aktywność wody

Na rysunku 87 zaprezentowano wartości aktywności wody uzyskane dla próbek dyni ze wszystkich przeprowadzonych wariantów suszenia. Najwyższą aktywnością wody charakteryzowały się próby suszone bez obróbki wstępnej ($0,635 \pm 0,02$). Na podstawie danych literaturowych można zakwalifikować wyniki uzyskane dla suszonych próbek jako znajdujące się w obszarze zabezpieczonym przed rozwojem większości mikroorganizmów. Takie wartości a_w (średnio o 12% wyższe niż w przypadku próbek odwadnianych osmotycznie) mogą wynikać z tzw. „podpływaną” soku znajdującego się w komórkach materiału w czasie procesu suszenia do jego powierzchni. W wyniku tego następuje zmiana rozmieszczenia substancji rozpuszczalnych i osadzanie się ich na powierzchni materiału. W konsekwencji, powoduje to nadprogramowy skurcz suszonego materiału oraz jego większą sztywność, oraz skuteczne zablokowanie powierzchni materiału, utrudniające dyfuzję wilgoci do powierzchni [298]. Niższa aktywność wody próbek odwadnianych osmotycznie w porównaniu do próbek CV i US może także wynikać z dodatku soli, którego dodanie do roztworu może powodować zwiększenie siły napędowej procesu osmozy przy jednoczesnym obniżeniu a_w [297].

Wyniki uzyskane dla próbek odwadnianych osmotycznie są zgodne z wynikami uzyskanymi w wyniku suszenia konwekcyjnego dyni w roztworze sacharoza/chlorek sodu przez Junqueira i innych [299]. Równocześnie, wyniki Junqueira i innych dowodzą dość łagodnego wpływu ultradźwięków na materiał, w porównaniu do mikrofal, gdzie uzyskane wyniki były niemal dwukrotnie niższe.



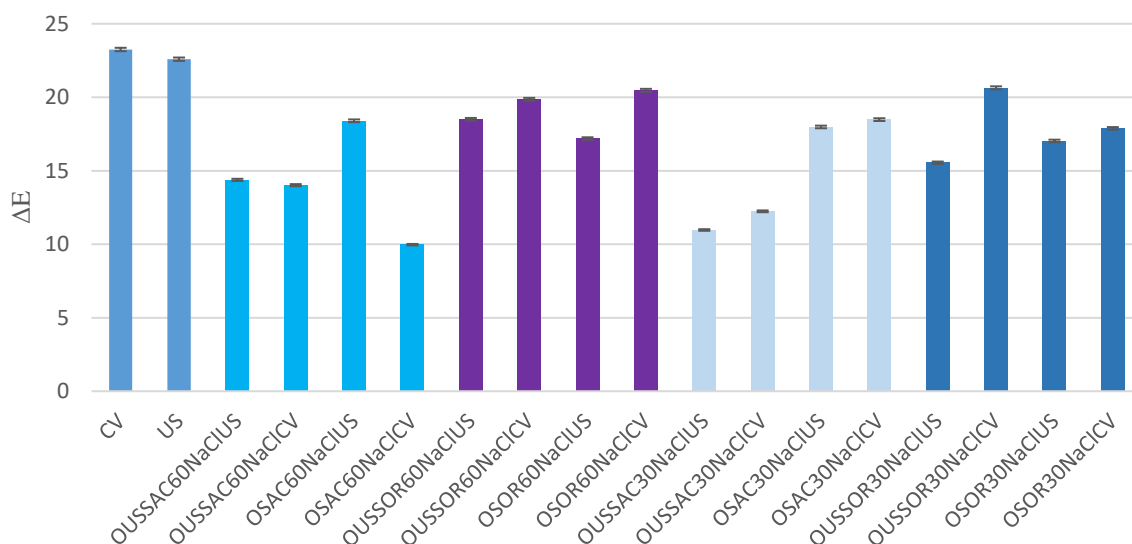
Rysunek 87. Aktywność wody dla suszonych próbek dyni zwyczajnej

Nie odnotowano wpływu żadnych parametrów procesowych na finalną wartość a_w . Dla wszystkich zbadanych próbek wyniki są zbliżone i nie można stwierdzić jakiegokolwiek korelacji ze stężeniem substancji osmoaktywnej, jej rodzajem, rodzajem obróbki wstępnej, czy metodą suszenia próby.

13.2.2. Zmiana barwy

Całkowitą zmianę barwy (ΔE) suszy w odniesieniu do surowca zaprezentowano na rysunku 88. Najwyższą całkowitą zmianę barwy odnotowano dla próbek suszonych bez wstępnej obróbki osmotycznej. W tym przypadku, zarówno wartość ΔE dla CV ($23,25 \pm 0,08$), jak i dla US ($22,59 \pm 0,05$) były

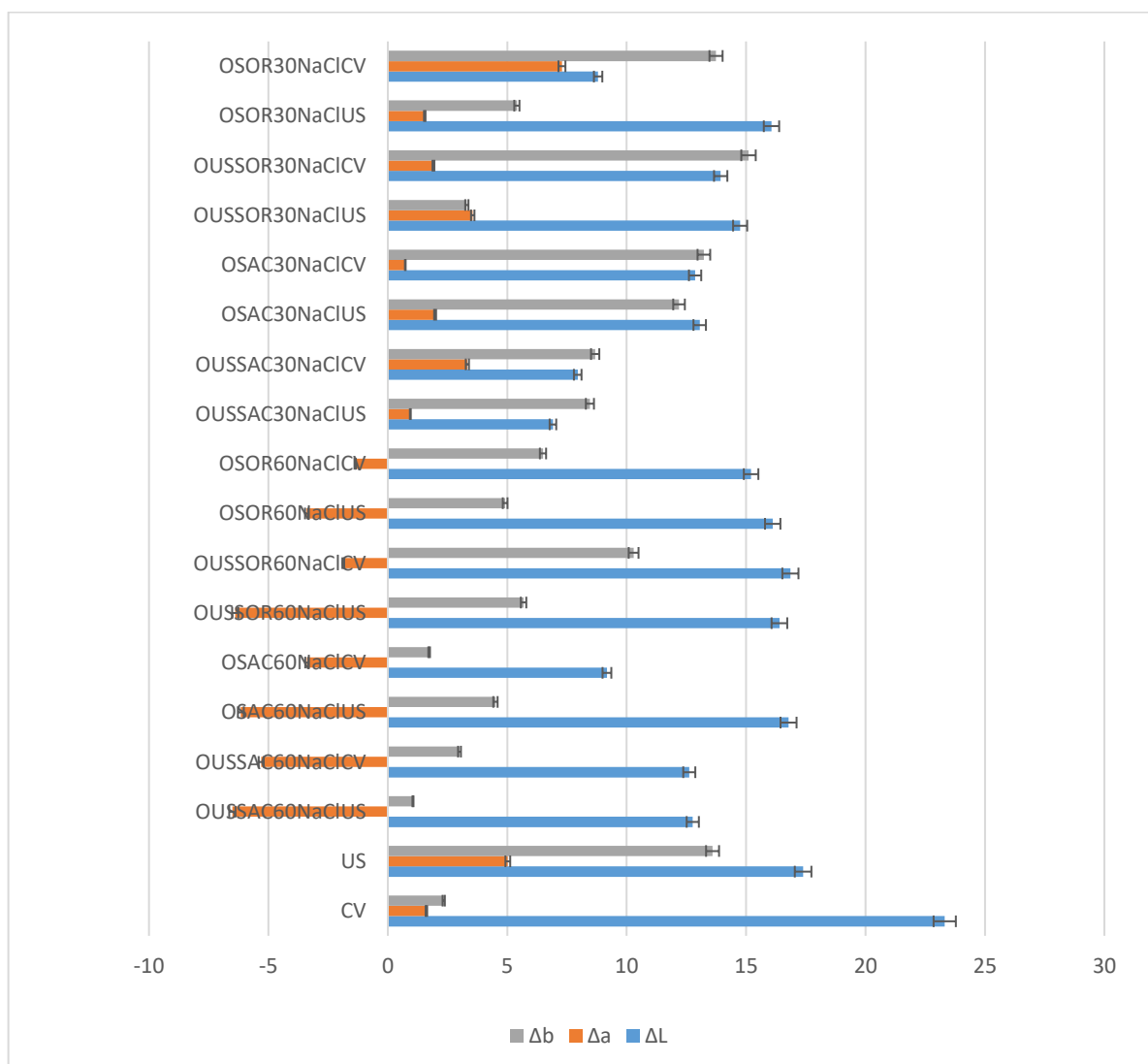
większe od średniej wartości ΔE dla pozostałych prób o około 28%. Wyniki te potwierdzają pozytywny wpływ obróbki wstępnej na zachowanie barwy badanych prób. Najmniejszą wartość ΔE oznaczono dla próby przygotowanej wg OSAC60NaClCV i jej wartość wynosiła $9,97 \pm 0,1$. Biorąc pod uwagę wpływ rodzaju substancji osmotycznie czynnej na zachowanie barwy badanych prób odnotowano korzystniejszy wpływ sacharozy, zarówno w stężeniu 60 jak i 30%, w porównaniu do próbek odwadnianych w sorbitolu. W przypadku 60% stężenia substancji osmoaktywnej, średnia wartość całkowitej zmiany barwy była o około 25% niższa dla próbek odwadnianych w roztworze SAC60 w porównaniu do plasterów dyni odwadnianej w roztworze SOR60, a dla próbek odwadnianych w roztworze 30% o około 16%. Rozpatrując wpływ stężenia substancji osmoaktywnej na całkowitą zmianę barwy, w przypadku roztworów sacharozy lepsze wyniki uzyskano dla próbek odwadnianych w roztworze SAC60, o około 5% w stosunku do roztworu SAC30. W przypadku sorbitolu odnotowano odwrotną zależność, gdzie próby odwadniane w roztworze SOR30 wykazały o około 6,5% mniejszą wartość ΔE w odniesieniu do próbek odwadnianych w roztworze SOR60. Następnym rozpatrywanym kryterium porównawczym jest wpływ metody obróbki wstępnej na zachowanie barwy w badanych suszach. Biorąc pod uwagę średnie wartości ΔE , nie obserwuje się wpływu obróbki wstępnej przy stężeniu substancji osmoaktywnej 60% dla sorbitolu (porównując ΔE dla próbek OUSSOR60NaClCV i OUSSOR60NaClUS z OSORNaClCV i OSORNaClUS różnice barwy mieszczą się w zakresie 3% -6%). W przypadku sacharozy niekorzystny efekt zastosowania US podczas osmozy odnotowano dla suszenia konwekcyjnego. Dla próbek odwadnianych w roztworze SAC30 obserwuje się lepsze (o 36%) (porównując wartości średnie ΔE dla próbek OUSSAC30NaClUS i OUSSAC30NaClCV z OSAC30NaClUS i OSAC30NaClCV) zachowanie barwy dla osmozy z ultradźwiękami, natomiast dla próbek odwadnianych w roztworze SOR30, zanotowano 9,5% mniejszą całkowitą zmianę barwy jedynie dla próbek suszonych konwekcyjnie. Biorąc pod uwagę metodę suszenia dla próbek odwadnianych, w większości przypadków wykazano lepsze zachowanie barwy dla próbek suszonych z wykorzystaniem ultradźwięków, gdzie wartość parametru ΔE była od 6 do 15% niższa. Wyjątek stanowiła próba odwadniana w roztworze SAC60.



Rysunek 88. Zmiana barwy dla suszonych próbek dyni zwyczajnej

Dodatkowo przeprowadzono analizę wartości składowych barwy L^* , a^* i b^* dla wszystkich suszonych próbek, w odniesieniu do świeżego materiału. Otrzymane dane przedstawiono na rysunku 89. Największym rozjaśnieniem (przesunięciem składowej L^* w kierunku dodatnim) charakteryzowały się próby nie poddane obróbce wstępnej (CV i US). Parametr L^* miał największy wpływ na całkowitą

zmianę barwy dla wszystkich zbadanych próbek odwadnianych w roztworze SAC60 i SOR60, natomiast w przypadku próbek odwadnianych w roztworze SOR30 i SAC30, dominujące znaczenie miał parametr b^* . Największym rozjaśnieniem (największym przyrostem ΔL) spośród odwadnianych próbek charakteryzowały się próby odwadniane w roztworze sorbitolu o stężeniu 60% (SOR60) gdzie ΔL wynosiła 16,14 [-] a najmniejszą próby odwadniane w roztworze sacharozy o stężeniu 30% (SAC30), dla których ΔL była o 37% mniejsza. W przypadku obu substancji osmotycznie-czynnych, większe przesunięcie parametru L^* w stronę dodatnią następowało dla większego stężenia. Tak jak w przypadku całkowitej zmiany barwy, nie odnotowano wpływu metody obróbki wstępnej (porównując analogiczne pary próbek) na wartość L^* dla 60%-owego stężenia substancji osmoaktywnej (dla których średnie wartości wyniosły $12,69 \pm 0,21$ i $12,97 \pm 0,11$ [-] oraz $16,63 \pm 0,33$ i $15,66 \pm 0,18$ [-]) (odpowiednio dla par: OUSSAC60NaCIUS, OUSSAC60NaCICV; OSAC60NaCIUS, OSAC60NaCICV; OUSSOR60NaCIUS, OUSSOR60NaCICV i OSOR60NaCIUS, OSOR60NaCICV), natomiast w przypadku stężenia 30%, zależność była taka jak uzyskana w przypadku ΔE . Wpływ rodzaju suszenia był znikomy na składową L^* dla próbek SOR60 i SAC30 (porównując średnie dla OUSSOR60NaCIUS i OSOR60NaCIUS z OUSSOR60NaCICV i OSOR60NaCICV), gdzie średnie ΔL wyniosły $16,25 \pm 0,13$ i $16,03 \pm 0,14$ oraz dla analogicznych par SAC30 $9,98 \pm 0,12$ i $10,4 \pm 0,21$, jednakże negatywny wpływ US odnotowano dla SAC60 i SOR30, gdzie różnice dla analogicznych par liczb wyniosły 26%.



Rysunek 89. Składowe barwy L^* , a^* i b^* dla próbek uzyskanych z dyni zwyczajnej

Kolejno oceniono wpływ warunków suszenia na wartość parametru a^* . Zaobserwowano następującą zależność: dla wszystkich próbek odwadnianych w roztworach o stężeniu substancji osmoaktywnej 60%, parametr a^* uległ zredukowaniu w kierunku barwy zielonej. Wielkość tej zmiany była uzależniona zarówno od metody suszenia, jak i obróbki wstępnej. Większy spadek wartości parametru a^* (różnica rzędu 43% w odniesieniu do surowca) następowała przy zastosowaniu ultradźwięków w obróbce wstępnej w porównaniu do próbek odwadnianych w warunkach osmozy klasycznej, gdzie parametr a^* był mniejszy o 35%. W przypadku zastosowania 30% stężenia roztworu podobną zależność odnotowano tylko w przypadku próbek odwadnianych w roztworze sacharozy o stężeniu 30% (SAC30) w odniesieniu do wpływu obróbki wstępnej, gdzie zanotowano 16% -ową różnicę dla prób OUSSAC30 i 10% -ową różnicę dla prób OSAC30. W pozostałych przypadkach (próby SOR30) większą (o 13% w odniesieniu do surowca) utratę barwy czerwonej zanotowano dla obróbki osmotycznej O, oraz dla próbek poddanych suszeniu konwekcyjnemu CV, gdzie różnica wyniosła 15%.

Parametr b^* , odpowiadający za udział barwy żółtej w barwie badanych prób dyni również wykazywał znaczące zmiany w zależności od zastosowanych warunków procesu. We wszystkich zbadanych przypadkach odnotowano przesunięcie składowej barwy b^* w kierunku dodatnim (w kierunku barwy żółtej). Stężenie roztworu hipertonicznego decydowało o intensywności barwy żółtej, gdzie większe (średnia różnica b^* między próbkami odwadnianymi w roztworze 30 i 60% wyniosła 50%) przesunięcie w kierunku dodatnim odnotowano dla mniejszego stężenia roztworu hipertonicznego. Porównując wpływ substancji osmotycznej można stwierdzić, że większy wpływ na parametr b^* miał sorbitol (przy stężeniu 60%) dla którego średnia Δb była o 38% mniejsza niż średnia Δb notowana dla 60%-owego roztworu sacharozy, natomiast dla SAC30 i SOR30, wpływ substancji był niewielki (średnia różnica wynosiła około 10%). Wpływ obróbki wstępnej (porównując pary wyników uzyskanych dla tych samych programów jak w przypadku parametru L^* i a^*) była większy w przypadku roztworu sorbitolu dla którego różnica między obróbką osmotyczną z ultradźwiękami a osmozą klasyczną wynosiła 15%, natomiast dla roztworów sacharozy różnice wynosiły około 6%. Określając wpływ metody suszenia na parametr b^* można stwierdzić, że dla roztworu sacharozy różnica między CV i US wynosiła około 14%, natomiast dla roztworów sorbitolu zaobserwowano większe o około 37% przesunięcie w kierunku barwy żółtej dla prób suszonych metodą CV.

Podobne rezultaty zmian składowych barwy dla mięszu dyni uzyskali Guine i Barroca [300], w procesie liofilizacji. Potwierdza to możliwość uzyskania dobrej jakości produktów uzyskanych na drodze obróbki osmotycznej, bez konieczności dużych nakładów energii, jak w przypadku liofilizacji. Badania nad odwadnianiem dyni olbrzymiej, a następnie suszeniem, przeprowadzili Falade i Shogaolu [301]. W ich przypadku, dla stężenia sacharozy 60°Brix i temperatury suszenia 50°C, uzyskali oni przyciemnienie próbki, przesunięcie a^* w kierunku czerwieni, odwrotnie niż w przypadku przeprowadzonych przez autorkę badań, oraz przesunięcie b^* w kierunku żółci, zgodnie z przedstawionymi wynikami. Może być to spowodowane brakiem dodatku soli w zaproponowanym przez nich roztworze. Utratę barwy czerwonej dla dyni odwadnianej w roztworze binarnym sacharozy i chlorku sodu, a następnie suszonej konwekcyjnie w temperaturze 60°C odnotowali również Junqueira i inni. Nie odnotowali oni znaczących zmian w zakresie parametrów L^* i b^* [299].

13.2.3. Retencja składników bioaktywnych

Dla suszu z dyni zwyczajnej przeprowadzono analizę retencji składników bioaktywnych takich jak karotenoidy oraz związki fenolowe. Zestawienie wyników przedstawiono w podrozdziałach poniżej.

13.2.3.1. Retencja karotenoidów

Wyniki retencji wybranych karotenoidów (luteina oraz β -karoten) oraz ich sumaryczną ilość w otrzymanych suszach zestawiono w tabeli 23. Średnie zachowanie tych związków w otrzymanych suszach wynosiło 67% w odniesieniu do ich zawartości w surowcu. Spośród badanych suszy, najwyższą zawartość badanych związków odnotowano w próbach suszonych metodą OSOR60NaCIUS, gdzie sumaryczna retencja karotenoidów wynosiła 87%, natomiast najmniejszą zawartością charakteryzowały się próby suszone metodą OUSSOR60NaCICV (49%). Biorąc pod uwagę wpływ stężenia substancji osmotycznie czynnej, mniejszą retencją karotenoidów charakteryzowały się próbki odwadniane w roztworze o stężeniu 30%, gdzie retencja badanych związków była o 4-6% mniejsza, niż dla roztworów 60% .

Analizując wpływ metody obróbki wstępnej na retencję karotenoidów można stwierdzić, że wyłączając próby odwadniane w SAC60, zastosowanie ultradźwięków na etapie obróbki wstępnej generowało większe straty karotenoidów w otrzymanych suszach (średnio straty te wynosiły 14%). Zmniejszenie zawartości karotenoidów podczas obróbki osmotycznej, ze względu na ograniczony dostęp tlenu, nie może być związana z ich nadmiernym utlenianiem. Pan i inni, 2003 stwierdzili, że ilość karotenoidów wymytych podczas odwadniania jest równa ich zawartości w roztworze osmotycznym. Wykazali oni wprost proporcjonalną zależność między stratami karotenoidów a utratą wody [295]. Zastosowanie ultradźwięków na etapie obróbki wstępnej mogło się przyczynić do dodatkowego zwiększenia transportu masy w obu kierunkach, generując większe straty badanych związków.

Porównując próby poddane tej samej obróbce wstępnej, suszone w warunkach konwekcyjnych lub konwekcyjnych z ultradźwiękami, wyższą (od około 1 do 38%) retencję karotenoidów ogółem odnotowano dla suszy uzyskanych metodą suszenia z US. Relatywnie podobne wyniki, biorąc pod uwagę średnią wartość procentową retencji karotenoidów, dla prób odwadnianych w roztworze sacharozy i kwasu cytrynowego i suszonych konwekcyjnie uzyskała Konopacka i inni, dla dyni olbrzymiej [302].

Tabela 7. Zestawienie retencji karotenoidów w suszu z dyni zwyczajnej

akronim	luteina [$\mu\text{g/g s.s.}$]	β -karoten [$\mu\text{g/g s.s.}$]	suma karotenoidów [$\mu\text{g/g s.s.}$]
świeży materiał	288 \pm 5	300 \pm 9	588 \pm 14
CV	263 \pm 0	145 \pm 6	408 \pm 6
US	267 \pm 2	146 \pm 5	413 \pm 7
OUSSAC60NaCICV	130 \pm 4	293 \pm 5	423 \pm 9
OUSSAC60NaCIUS	161 \pm 5	267 \pm 11	428 \pm 16
OSAC60NaCICV	151 \pm 5	241 \pm 12	392 \pm 17
OSAC60NaCIUS	140 \pm 6	259 \pm 10	399 \pm 16
OUSSOR60NaCICV	148 \pm 4	140 \pm 12	288 \pm 14
OUSSOR60NaCIUS	169 \pm 10	294 \pm 4	463 \pm 14
OSOR60NaCICV	190 \pm 7	161 \pm 6	351 \pm 13
OSOR60NaCIUS	245 \pm 5	267 \pm 10	512 \pm 15
OUSSAC30NaCICV	173 \pm 5	126 \pm 7	299 \pm 12
OUSSAC30NaCIUS	181 \pm 4	172 \pm 10	353 \pm 14
OSAC30NaCICV	154 \pm 9	170 \pm 7	324 \pm 15
OSAC30NaCIUS	215 \pm 12	280 \pm 5	495 \pm 17
OUSSOR30NaCICV	248 \pm 4	93 \pm 6	341 \pm 10

OUSSOR30NaCIUS	253±9	132±5	385±14
OSOR30NaCICV	256±11	133±8	389±19
OSOR30NaCIUS	208±13	227±11	435±24

Również Guiamba i inni, uzyskali podobne pod względem zachowania karotenoidów wyniki dla mango odwadnianego w roztworze chlorku wapnia i sacharozy. W swojej pracy dowiedli pozytywnego wpływu odwadniania w roztworach wieloskładnikowych na zatrzymanie składników fitochemicznych [303]. Dużo większe straty karotenoidów wykazali w swojej pracy Azoubel i inni, dla plasterów papai odwadnianej przez 30 min w obecności ultradźwięków i następnie suszonych konwekcyjnie. W ich przypadku straty karotenoidów były na poziomie 54%, podczas, gdy w niniejszej pracy średni spadek zawartości tych związków wyniósł 33%. Różnica mogła być spowodowana dodatkiem soli, który spowodował zmniejszenie szybkości reakcji enzymatycznych [304]. Zatrzymanie karotenoidów na poziomie 74% dla dyni liofilizowanej odnotowali Dirim i Caliskan, 2012, co pozwala odnieść otrzymane wyniki do wyników uzyskanych dla znacznie droższej metody [305].

Na retencję poszczególnych karotenoidów w badanych próbach wpływ miało stężenie substancji osmoaktywnej użytej na etapie odwadniania. Dla β -karotenu korzystniejsze było zastosowanie stężenia 60%, natomiast dla luteiny - 30%, niezależnie od stosowanej substancji osmoaktywnej.

13.2.3.2. Retencja związków fenolowych

Wyniki dotyczące retencji związków fenolowych w suszu z dyni zwyczajnej zestawiono w tabeli 24. Najwyższą zawartość badanych związków odnotowano w próbach suszonych bez wstępnej obróbki osmotycznej, gdzie retencja polifenoli, w odniesieniu do zawartości tych związków w surowcu, wynosiła 82 i 86% odpowiednio dla prób suszonych metodą CV i US. Można zauważyć, że tak jak w przypadku retencji karotenoidów, zatrzymanie fenoli było wyższe dla suszenia z zastosowaniem ultradźwięków. Takie wyniki pokrywają się z rezultatami uzyskanymi przez Siriamornpun i inni, 2015, gdzie również zaobserwowano znaczącą redukcję ogólnej zawartości związków fenolowych dla prób poddanych osmotycznej obróbce wstępnej w porównaniu do prób bez obróbki wstępnej [306]. Dla prób poddanych wstępnej obróbce osmotycznej, średnia retencja związków fenolowych wynosiła około 41%, czyli była dwukrotnie niższa od tej uzyskanej dla prób bez obróbki wstępnej suszonych metodą CV i US. Świadczy to o silnym wpływie procesu osmozy na zawartość związków fenolowych w suszu. Najwyższą retencję fenoli dla prób O i OUS odnotowano dla prób z procesu OSAC60NaCICV (~55%), a najmniejszą dla plasterów dyni otrzymanych wg OUSSOR30NaCICV (~30%). Wyniki te nie pokrywają się z rezultatami uzyskanymi dla karotenoidów.

Tak, jak to miało miejsce w przypadku karotenoidów, większą średnią retencję związków fenolowych odnotowano w próbach odwadnianych w roztworze o większym stężeniu substancji osmoaktywnej (SAC60 i SOR60) (średni poziom retencji 46,5%). W próbach odwadnianych w roztworze o 30% stężeniu substancji osmoaktywnej retencja fenoli była na poziomie o 13% niższym. Nie stwierdzono wpływu użytej substancji osmotycznie czynnej na retencje badanych związków w otrzymanych suszach dyni.

Analizując wpływ obróbki wstępnej można zauważyć, że istotne różnice między próbami O i OUS można zaobserwować tylko dla tych odwadnianych w 60-procentowym roztworze sacharozy, gdzie różnica w zawartości badanych związków wynosiła około 5,5%, na korzyść prób OUS. We wszystkich pozostałych przypadkach nie odnotowano wpływu zastosowania ultradźwięków podczas obróbki osmotycznej na retencję związków fenolowych.

Biorąc pod uwagę wpływ ultradźwięków użytych w procesie suszenia na zawartość związków fenolowych można zauważyć, że istotne różnice między próbami suszonymi metodą CV i US występują tylko przy stężeniu substancji osmoaktywnej 60%. Wyniki uzyskane zarówno dla prób odwadnianych w SOR60, jak i SAC60 wskazują na negatywny wpływ suszenia konwekcyjnego z ultradźwiękami na zachowanie związków fenolowych w otrzymanych suszach. Zawartość związków fenolowych w próbach suszonych metodą US była dla plasterów dyni odwadnianych w SAC60 i w SOR60 były odpowiednio o ~13% i ~6% niższe niż dla suszonych konwekcyjnie.

Zbliżone rezultaty retencji związków fenolowych uzyskali Naknean i inni, 2013 dla owocu kantalupy, odwadnianego w roztworach sacharozy i sorbitolu. Wyniki uzyskane przez w. w. autorów wskazują na retencję fenoli na poziomie 60 i 65% (sorbitol, sacharoza) w porównaniu do surowca.

Straty związków fenolowych, abstrahując od obróbki osmotycznej, mogą być także spowodowane temperaturą suszenia. Rodriguez i inni, 2015 wskazują, że podczas suszenia w temperaturze poniżej 60°C, polifenolooksydazy mogą być są nadal aktywne, co może powodować rozkład związków fenolowych [307].

Tabela 8. Zestawienie retencji związków fenolowych w suszu z dyni

akronim	CHA [mg/100g d.m.]	CA [mg/100g d.m.]	SA [mg/100g d.m.]	suma fenoli [mg/100g d.m.]
świeży materiał	256±12	40,0±5,0	240±11	536±28
CV	224±5	15,5±1,4	203±9	443±15
US	222±16	38,3±0,8	201±1	461±17
OUSSAC60NaClCV	187±13	24,4±4,2	71±3	282±20
OUSSAC60NaClUS	166±11	16,7±2,2	72±9	255±22
OSAC60NaClCV	209±11	11,5±1,0	75±5	296±17
OSAC60NaClUS	126±2	9,3±0,0	46±4	181±6
OUSSOR60NaClCV	168±13	21,6±2,8	63±6	252±21
OUSSOR60NaClUS	168±14	17,0±2,1	59±8	244±24
OSOR60NaClCV	185±11	21,1±1,0	71±0	277±12
OSOR60NaClUS	136±9	23,7±0,8	66±4	225±13
OUSSAC30NaClCV	75±2	7,7±0,6	85±9	167±11
OUSSAC30NaClUS	89±5	10,4±3,4	82±6	182±14
OSAC30NaClCV	91±0	5,2±0,5	87±6	183±6
OSAC30NaClUS	88±0	15,5±0,9	84±8	188±8
OUSSOR30NaClCV	84±4	9,7±2,6	71±6	165±12
OUSSOR30NaClUS	133±1	14,1±1,3	70±0	217±2
OSOR30NaClCV	84±11	11,3±2,8	98±2	193±15
OSOR30NaClUS	95±10	15,2±4,5	71±2	181±16

gdzie: CHA – kwas chlorogenowy, CA – kwas kawowy, SA – kwas syringowy

13.3. Podsumowanie i wnioski

W tej części pracy badano wpływ obróbki osmotycznej, rodzaju substancji osmoaktywnej, stężenia roztworu hipertonicznego oraz metody suszenia na kinetykę oraz jakość suszu. Za najbardziej efektywny czas odwadniania osmotycznego plastrów dyni uznano pierwsze 30 min. Odnotowano znaczący wpływ stężenia roztworu hipertonicznego na kinetykę odwadniania osmotycznego, gdzie przy stężeniu 60% stwierdzono średnio o 68% większy ubytek wilgoci niż dla stężenia 30%, natomiast rodzaj substancji nie miał na nią większego wpływu. Zastosowanie jako obróbki wstępnej osmozy z ultradźwiękami, w przypadku roztworu o 60% stężeniu substancji osmoaktywnej, skutkowało większym do 27% ubytkiem wilgoci w porównaniu do zastosowania osmozy klasycznej. W przypadku prób odwadnianych w roztworze 60% odnotowano jednak około 3,5 krotnie większy przyrost suchej substancji w porównaniu do prób odwadnianych w roztworze 30%, niezależnie od zastosowanej substancji osmoaktywnej. Najkrótszym czasem suszenia charakteryzowały się próby suszone konwekcyjnie ze wspomaganiem ultradźwiękowym, które nie zostały poddane procesowi odwadniania osmotycznego. Z kolei zastosowanie odwadniania osmotycznego dla plastrów dyni suszonych konwekcyjnie bez ultradźwięków skutkowało skróceniem czasu suszenia w porównaniu do prób niepoddanych obróbce wstępnej o średnio 23%, z wyjątkiem prób odwadnianych w 30% roztworze sacharozy. Zastosowanie ultradźwięków podczas odwadniania dla prób suszonych metodą CV skutkowało mniejszą redukcją czasu suszenia (10%). Dłuższym średnim czasem suszenia charakteryzowały się próby odwadniane w roztworze sacharozy.

Nie odnotowano wpływu żadnego czynnika na końcową aktywność wody w badanych próbach. Zmiana barwy prób poddanych obróbce wstępnej była mniejsza o około 28% od wartości ΔE dla prób bez osmotycznej obróbki wstępnej, co potwierdza jej pozytywny wpływ na finalną barwę produktu. Najlepsze średnie rezultaty uzyskano dla prób odwadnianych w 60% roztworze sacharozy i chlorku sodu, następnie dla SAC30NaCl, SOR30NaCl i SOR60NaCl, (w których wartości ΔE były większe o odpowiednio 5, 20 i 25%) .

Zastosowanie osmotycznej obróbki wstępnej skutkowało zmniejszeniem zawartości fitozwiązków, zarówno karotenoidów (średnio o około 3%) jak i fenoli (średnio o około 44%), w porównaniu do prób suszonych bez obróbki wstępnej. Próby odwadniane z zastosowaniem ultradźwięków cechowały się o około 14% większymi stratami karotenoidów niż próby poddane osmozie klasycznej, natomiast próby suszone konwekcyjnie z zastosowaniem ultradźwięków cechowały się większym zachowaniem tych związków (do 38%) w porównaniu do suszenia konwekcyjnego. W przypadku fenoli średnia różnica w zawartości między próbami poddanymi osmozie z ultradźwiękami a osmozą klasyczną była niewielka i wynosiła około 1%, natomiast wpływ ultradźwięków w procesie suszenia skutkowało zmniejszeniem ich retencji o około 3%. Zastosowanie roztworu o stężeniu substancji osmoaktywnej 60% skutkowało lepszą retencją związków fenolowych i karotenoidów w porównaniu do roztworu 30%.

Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy zbadano wpływ ultradźwięków stosowanych na etapie odwadniania osmotycznego (owoce kiwi i dyni) oraz suszenia konwekcyjnego surowców roślinnych na kinetykę tych procesów oraz wybrane parametry jakości otrzymanych suszy. Pod uwagę wzięto następujące parametry jakości: barwę mierzoną w systemie CIE L*a*b*, aktywność wody, stopień rehydratacji oraz zawartość składników o znaczeniu bioaktywnym. Do badań posłużyły takie owoce i warzywa jak: jabłka odmian 'Lobo', 'Ligol' oraz 'Rubin', burak ćwikłowy, ziemniak, kiwi, marchew zwyczajna oraz dynia zwyczajna, zróżnicowane pod względem struktury i zawartości związków o potencjale bioaktywnym. Dodatkowo określono wpływ mikrofal na suszenie konwekcyjne oraz konwekcyjno-ultradźwiękowe na przykładzie buraka ćwikłowego i marchwi zwyczajnej w odniesieniu do wyżej wspomnianych parametrów.

We wszystkich zbadanych przypadkach ultradźwięki miały pozytywny wpływ na kinetykę procesu, zarówno w przypadku osmotycznej obróbki wstępnej, jak i suszenia konwekcyjnego. Dla odwadniania osmotycznego jako najbardziej efektywny czas uznano pierwsze 30 min, dla których prowadzono dalsze rozważania. Zastosowanie ultradźwięków w obróbce wstępnej spowodowało wyższy ubytek wilgoci (WL) (od 19% do 27% dla owocu kiwi oraz od 17% do 27% w przypadku dyni zwyczajnej odwadnianej w roztworze o 60% stężeniu substancji osmoaktywnej) w porównaniu do osmozy klasycznej. Jednocześnie odnotowano większy przyrost suchej substancji (od 16% do 57% w przypadku owocu kiwi odwadnianych w roztworach polioli oraz 22% w przypadku dyni zwyczajnej odwadnianej w 60% roztworze sorbitolu). Na kinetykę odwadniania wpływ miało stężenie roztworu odwadniającego. Dla roztworów o stężeniu 60% stwierdzono średnio o 68% większy ubytek wilgoci niż dla stężenia 30%. W przypadku owoców kiwi większy ubytek wilgoci odnotowano dla roztworów polioli niż sacharozy. Przy czym dla polioli odnotowano wyższy wzrost suchej substancji w surowcu (od 16% do 57% dla kiwi oraz 21% dla dyni) w porównaniu z sacharozą, rosnący zgodnie z malejącą masą cząsteczkową czynnika osmoaktywnego.

Skrócenie czasu suszenia podczas suszenia konwekcyjnego było zależne przede wszystkim od mocy zastosowanych ultradźwięków (największą redukcję czasu suszenia w każdym przypadku zanotowano dla najwyższej zadanej mocy US – 200 W, przy badanych poziomach mieszczących się w zakresie 50 W-200 W), jak również od użytego surowca, jego struktury (ten aspekt wymaga dalszych badań). Dla plasterków dyni suszonych z wykorzystaniem energii akustycznej czas suszenia był krótszy od 7% do 33% przy odwadnianiu w roztworze 30% i od 5 do 39% dla prób odwadnianych w roztworze 60% w porównaniu z suszeniem konwekcyjnym. W przypadku wyników uzyskanych dla suszenia różnych odmian jabłek największą redukcję czasu suszenia uzyskano dla odmiany 'Lobo', gdzie redukcja czasu suszenia była na poziomie 46% (w odniesieniu do CV), z kolei dla odmian 'Rubin' i 'Ligol' wynosiła ona odpowiednio 39 i 36%. W przypadku buraka ćwikłowego czas suszenia uległ redukcji o 26%, dla ziemniaka o 42%, dla marchwi zwyczajnej o 22% a dla dyni zwyczajnej 49% (próby niepoddane obróbce wstępnej) oraz średnio o 22% (dla prób poddanych osmotycznej obróbce wstępnej). Biorąc pod uwagę podział na owoce i warzywa (gdzie warzywa charakteryzują się większą twardością i mniejszą zawartością wilgoci), można zauważyć, że wśród warzyw zanotowano znacząco mniejszą (o średnio około 20%), pomijając ziemniaka oraz dynię, które charakteryzują się odmienną strukturą mięszu) redukcję czasu suszenia w odniesieniu do średniej redukcji czasu suszenia owoców, która wynosiła 42%. Wyjątek spośród warzyw stanowił m.in. ziemniak, dla którego redukcja czasu suszenia przy zastosowaniu konwekcji z US była niemal dwukrotnie większa. Z badań Jakubczyk i Uziak [308] wynika, że pomimo zbliżonych wartości naprężeń maksymalnych dla buraka i różnych odmian ziemniaka (ok. 200 kPa) otrzymanych podczas testu ściskania, maksymalna siła cięcia wynosiła

odpowiednio powyżej 8N oraz od 4N do 7N. Co wskazuje na różnice w strukturze w. w. materiałów roślinnych.

Podsumowując, najmniejsza redukcja czasu suszenia wystąpiła dla marchwi zwyczajnej, a największa dla jabłka odmiany 'Lobo', gdzie wyniki różniły się o 24% przy tej samej mocy ultradźwięków. Potwierdza to wpływ twardości oraz struktury tkanki roślinnej na podatność na falę akustyczną. Pozwala to również potwierdzić pozytywny wpływ ultradźwięków na kinetykę procesu. Opierając się na badaniach przeprowadzonych dla różnych odmian jabłek można powiedzieć, że twardość materiału nie jest jedynym wyznacznikiem determinującym jego podatność na ultradźwięki. Przy podobnej twardości oraz jednorodności gatunkowej, kluczowa okazuje się unikalna budowa mikrostruktury na poziomie komórkowym. Grubość ścian komórkowych, średnia wielkość komórek, porowatość tkanki będą determinować podatność materiału na modyfikujące działanie ultradźwięków.

Zastosowanie mikrofal o mocy 100W podczas suszenia konwekcyjnego również miało wpływ na kinetykę procesu. Czas suszenia uległ skróceniu o 69% i 79% odpowiednio dla buraka i marchwi. Zastosowanie kombinacji ultradźwięków (75W, 100W, 125W, 200W) i mikrofal pozwalało na dodatkowe skrócenie czasu suszenia (o około 8% i 12% dla marchwi i buraka), porównując do wartości uzyskanych w procesie konwekcyjno-mikrofalowym.

Całkowite zużycie energii podczas suszenia określono dla następujących surowców: jabłka, buraka, ziemniaka i marchwi. Największą redukcję zużycia energii w wyniku zastosowania ultradźwięków w procesie suszenia konwekcyjnego odnotowano dla jabłka i wynosiła ona 54% oraz 30% odpowiednio dla mocy 200 W i 100 W. Dla ziemniaka redukcja w.w. parametru wynosiła 22% dla ultradźwięków o mocy 200 W i 12 % dla 100 W. Dla surowców o twardszej, zwartej strukturze (burak, marchew) nie stwierdzono redukcji zużycia energii pod wpływem zastosowania US. Dla buraka zużycie energii podczas suszenia konwekcyjnego wspomaganego ultradźwiękami było porównywalne do procesu suszenia konwekcyjnego. Natomiast dla marchwi odnotowano 41% wzrost wartości w. w. parametru. Z kolei procesy suszenia z wykorzystaniem mikrofal o mocy 100 W, cechowały się bardzo dużą redukcją zużycia energii elektrycznej, gdzie różnica między procesem CVMW a CV wynosiła 61% i 63% odpowiednio dla buraka i marchwi. Tłumaczone to może być omówionym wcześniej znaczącym skróceniem czasu suszenia. Procesy suszenia hybrydowego charakteryzowały się zbliżonym zużyciem energii do procesu CVMW. Przy czym dla buraka (CVUS100WMW100W) zużycie energii było 70% niższe niż w przypadku suszenia konwekcyjnego a dla marchwi od 56% do 63% odpowiednio dla, CVMW100US200, CVMW100US75.

Wpływ zastosowania US na etapie odwadniania osmotycznego na całkowitą zmianę barwy otrzymanych suszy (barwę surowca przyjęto jako referencyjną) zbadano dla dwóch surowców: kiwi i dyni. Uzyskane wyniki były niejednoznaczne. W przypadku kiwi dla prób poddanych osmozie z ultradźwiękami (OUS) w roztworze sacharozy lub sorbitolu odnotowano odpowiednio mniejszą (o 42%) lub porównywalną z odwadnianiem osmotycznym wartość całkowitej zmiany barwy po suszeniu konwekcyjnym (CV). Odwrotną zależność zaobserwowano dla prób odwodnionych w erytrytolu (ERY), gdzie wartość ΔE dla prób odwadnianych przy wspomaganie US była wyższa o 60% w stosunku do prób poddanych klasycznej osmozie. W przypadku obróbki osmotycznej plastrów kiwi suszonych konwekcyjnie ze wspomaganie US, odnotowano wzrost wartości ΔE o 10%-17% dla prób odwadnianych w roztworze sacharozy i sorbitolu na niekorzyść US wprowadzonych na etapie odwadniania. Natomiast w przypadku erytrytolu barwa produktu została zachowana w większym stopniu dla obróbki osmotycznej z zastosowaniem ultradźwięków (mniejsza wartość ΔE o 32%). Dla dyni zwyczajnej różnica barwy dla prób odwadnianych z US w roztworze sacharozy w większości przypadków była mniejsza niż dla odwadnianych bez wspomaganie ultradźwiękowego (różnica

w granicach 22%-40% pomiędzy wartościami dla prób odwadnianych z i bez US)). W przypadku sorbitolu różnice pomiędzy próbkami odwadnianymi z i bez udziału US były mniej zauważalne. Najmniejszą różnicę barwy w porównaniu do surowca uzyskano dla próbek odwadnianych w 50% lub 60% roztworze sacharozy. Sacharoza w mniejszym stopniu wnikała do tkanki na etapie odwadniania niż poliole co mogło się przełożyć na mniejszą zmianę barwy otrzymanych suszy w stosunku do surowca.

Odnosząc się do wspomaganie suszenia poprzez ultradźwięki, w większości przypadków stwierdzono pozytywny wpływ na zmianę barwy otrzymanych suszy. Wyjątek stanowiły plastry kiwi suszone metodą CVUS, dla których wartość ΔE była o 31% wyższa niż dla próbek suszonych konwekcyjnie. Jedynie dla próbek odwadnianych w erytrytolu odnotowano odwrotny efekt. Analizując całkowitą zmianę barwy dla suszenia z zastosowaniem ultradźwięków można zauważyć, że na wartość tego parametru duży wpływ miała struktura surowca. Największą różnicę pomiędzy wartościami ΔE suszy otrzymanych metodą konwekcyjną ze wspomaganie ultradźwiękowym a uzyskanych poprzez suszenie konwekcyjne (około 40%) odnotowano dla buraka oraz marchwi, przy czym w przypadku buraka dla mocy ultradźwięków 200 W, natomiast dla marchwi – 75 W. Dla surowców o luźniejszej strukturze różnica w wartości ΔE pomiędzy próbkami suszonymi metodą CVUS a CV mieściła się odpowiednio w przedziale 7%-8% (ziemniak); 9%-28% (lepszy efekt obserwowano dla niższej mocy-100 W-jabłka) oraz 6 - 15% (dynia). Zastosowanie mikrofal podczas suszenia konwekcyjnego miało również pozytywny wpływ na barwę otrzymanych suszy. Dla buraka różnica wartości ΔE pomiędzy suszem otrzymanym metodą CVMW a CV była na poziomie 33%, a dla marchwi wynosiła 53%. W przypadku suszenia hybrydowego (CVMWUS) dla buraka odnotowano negatywny efekt, dla marchwi z kolei wraz ze wzrastającą mocą US (200 W) odnotowano niższą wartość zmiany barwy (do 41%) w porównaniu z próbkami otrzymanymi metodą CV.

Biorąc pod uwagę aktywność wody w suszach owocowych i warzywnych, nie odnotowano wpływu ultradźwięków stosowanych podczas osmozy na wartość tego parametru. Wszystkie próby cechowały się podobną aktywnością wody, a czynnikiem mającym wpływ na ten parametr jakości była osmoza. W suszach poddanych osmotycznej obróbce wstępnej a_w była o 12% niższa niż w próbach, gdzie pominięto ten etap procesu technologicznego. Wpływ ultradźwięków, stosowanych na etapie suszenia, na aktywność wody odnotowano dla takich surowców jak: jabłka (różnice pomiędzy a_w dla suszy otrzymanych w wyniku suszenia konwekcyjnego a konwekcyjnego ze wspomaganie US były w zakresie 10-15% ('Rubin', 'Ligol') na korzyść US. Z warzyw redukcję aktywności wody przy zastosowaniu ultradźwięków odnotowano jedynie w przypadku buraka (około 28%). W wyżej wymienionych surowcach odnotowano wpływ mocy US na a_w . Wyższa moc (200W) dawała lepszy efekt. Natomiast w przypadku marchwi i ziemniaka nie odnotowano wpływu ultradźwięków na aktywność wody otrzymanych suszy. Zastosowanie mikrofal podczas suszenia przyczyniło się również do spadku aktywności wody, dla buraka ćwikłowego o 30% a dla marchwi o 13% w odniesieniu do suszenia konwekcyjnego. Kombinacja ultradźwięków i mikrofal jako dwóch dodatkowych źródeł energii pozwoliła na dodatkowe obniżenie aktywności wody w stosunku do próbek suszonych metodą konwekcyjno-mikrofalową tylko dla buraka (3%).

W przypadku obróbki wstępnej, zastosowanie ultradźwięków powodowało straty karotenoidów, w stosunku do próbek poddanych osmozie klasycznej. Dla owoców kiwi, susze otrzymane metodą konwekcyjną poddawane odwadnianiu ze wspomaganie ultradźwiękowym w roztworze sacharozy i sorbitolu wykazywały około 5-8% większe straty karotenoidów w odniesieniu do próbek poddanych klasycznemu odwadnianiu. Wyjątek stanowiły próby odwadniane w erytrytolu gdzie straty dla analogicznych metod obróbki wynosiły 33%. Natomiast w suszach uzyskanych metodą konwekcyjną wspomaganą przez US, straty karotenoidów wynikające z zastosowania US na etapie

obróbki wstępnej prowadzonej w roztworach sacharozy i sorbitolu wynosiły 33%, a w przypadku erytrytolu 4%. W suszu z dyni zwyczajnej odnotowano podobną tendencję i tak, różnica w ogólnej zawartości karotenoidów między procesem OUSCV a OCV wynosiła 12%, a między próbkami poddanymi procesom OUSUS i OUS różnica ta wynosiła 17%. Biorąc pod uwagę skład roztworu odwadniającego, to z punktu widzenia retencji karotenoidów w suszu, dla kiwi najkorzystniejsze było zastosowanie polioli jako czynnika osmoaktywnego, w przypadku dyni nie stwierdzono takiej zależności, z kolei korzystniejsze było 60% niż 30% stężenie związków osmoaktywnych w roztworze.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono pozytywny wpływ zastosowania ultradźwięków podczas suszenia konwekcyjnego na zawartość karotenoidów w badanym materiale. Na przykładzie marchwi, kiwi i dyni można zauważyć, że zawartość karotenoidów była odpowiednio o 25%, 13% i 38% wyższa niż w próbach suszonych metodą CV. Jednocześnie odnotowano negatywny wpływ mikrofal na retencję karotenoidów, zarówno w próbach suszonych metodą CVMW, jak i metodą hybrydową CVMWUS, gdzie zawartość karotenoidów spadła o 18% w porównaniu z suszami uzyskanymi poprzez suszenie konwekcyjne.

W przypadku związków fenolowych, zastosowanie ultradźwięków podczas osmozy, w większości przypadków powodowało większe ich straty w badanych próbach, niż w wyniku obróbki osmotycznej (O) bez wspomaganie. Susz otrzymany z owoców kiwi odwadniany przy wspomaganie ultradźwiękowym i suszony konwekcyjnie wykazywał średnio o 33% mniejszą retencję fenoli niż próby otrzymane poprzez klasyczną osmozę. Natomiast w przypadku suszy otrzymanych poprzez odwadnianie z US i suszenie metodą CVUS różnica w zawartości badanych związków wynosiła 14% w odniesieniu do zawartości fenoli w próbach poddanych osmozie. W przypadku dyni zwyczajnej zastosowanie ultradźwięków w obróbce osmotycznej i dalsze suszenie konwekcyjne skutkowało średnio o 7% mniejszą retencją fenoli, a w przypadku suszenia z użyciem ultradźwięków różnica wynosiła około 16%, ale na korzyść obróbki osmotycznej z ultradźwiękami. Przy czym dla dyni odnotowano również niekorzystny wpływ samej obróbki osmotycznej na zawartość związków fenolowych w otrzymanych suszach. Obróbka osmotyczna generowała straty zawartości badanych związków w otrzymanych suszach w odniesieniu do prób suszonych bez jej udziału (44% mniejsza zawartość związków fenolowych). Korzystny wpływ zastosowania polioli (głównie sorbitolu) jako związków osmoaktywnych na zawartość związków fenolowych odnotowano jedynie dla plasterów kiwi. Lepsze zachowanie związków fenolowych odnotowano również przy zastosowaniu 60% w porównaniu do 30% roztworu odwadniającego, niezależnie od stosowanej substancji osmoaktywnej. W badanych plasterach dyni odwadnianych w roztworze 60%, zawartość związków fenolowych była średnio o 36% wyższa.

Analizując wpływ ultradźwięków stosowanych podczas suszenia konwekcyjnego na zawartość związków fenolowych, znajdujących się w tkance roślinnej, w większości przypadków można zauważyć pozytywną tendencję. W przypadku plasterów kiwi w próbach suszonych konwekcyjnie w temperaturze 60°C przy wspomaganie ultradźwiękowym (200W) stwierdzono średnio wyższą o 28% zawartość związków fenolowych niż dla prób suszonych konwekcyjnie. Dla marchwi ta różnica była mniejsza i wynosiła około 8% (temperatura suszenia 45°C, moc US 200 W), przy czym przy malejącej mocy US (125 W, 75 W) nie odnotowano takiego efektu. Dla dyni korzystny wpływ ultradźwięków na zawartość fenoli odnotowano jedynie w przypadku suszenia CVUS (50°C, 200W) bez obróbki wstępnej, gdzie stwierdzono o 4% większą retencję. Użycie mikrofal (100 W) w połączeniu z suszeniem konwekcyjnym generalnie obniżało retencję fenoli w materiale, w odniesieniu do suszenia konwekcyjnego, gdzie dla CVMW100W odnotowano 69%-owy spadek badanych związków. Podobnie, zastosowanie kombinacji CVUSMW w większości przypadków skutkowało obniżeniem zawartości związków fenolowych od 42% do 72% w porównaniu z suszami otrzymanymi metodą konwekcyjną.

Na podstawie przeprowadzonych w niniejszej pracy badań sformułowano następujące wnioski:

- ✚ Zastosowanie ultradźwięków podczas odwadniania osmotycznego plasterów kiwi i dyni intensyfikuje wymianę masy. Ubytek wilgoci w badanych próbach był o 19%-27% wyższy niż w przypadku klasycznej osmozy, przy jednocześnie wyższym przyroście suchej substancji.
- ✚ Na kinetykę odwadniania osmotycznego miał wpływ skład oraz stężenie roztworu. Jako bardziej efektywny uznano 60-procentowy roztwór substancji osmoaktywnej w porównaniu z 30-procentowy. W przypadku plasterów kiwi, lepszy efekt, związany z ubytkiem wilgoci, odnotowano dla polioli (erytrytol, sorbitol) niż sacharozy.
- ✚ Zastosowanie ultradźwięków korzystnie wpływa na kinetykę suszenia konwekcyjnego, zarówno dla materiałów poddanych osmotycznej obróbce wstępnej, jak i materiałów nie poddanych takiej obróbce, gdzie czas suszenia można zredukować odpowiednio o 5% - 39% lub o 22 - 49% w porównaniu z suszeniem konwekcyjnym.
- ✚ Na kinetykę procesu suszenia z wykorzystaniem ultradźwięków miała wpływ przede wszystkim ich moc oraz struktura surowca. Największą redukcję czasu suszenia, w porównaniu do suszenia konwekcyjnego, w każdym przypadku odnotowano dla najwyższej zadanej mocy US – 200 W, przy badanych poziomach mieszczących się w zakresie 75 W-200 W. Wśród warzyw charakteryzujących się zwartą tkanką (marchew, burak) stwierdzono o około 20% niższą redukcję czasu suszenia w odniesieniu do średniej redukcji czasu suszenia dla pozostałych badanych surowców (jabłko, ziemniak, dynia), która wynosiła 42%.
- ✚ Zastosowanie mikrofal pozytywnie wpływa na kinetykę procesu suszenia, zarówno w kombinacji z suszeniem konwekcyjnym, jak i konwekcyjno-ultradźwiękowym, gdzie czas procesu można zredukować w porównaniu do suszenia konwekcyjnego o 68% oraz 79% odpowiednio dla buraka ćwikłowego i marchwi. Zastosowanie ultradźwięków do układu suszenia konwekcyjno-mikrofalowego dodatkowo poprawia kinetykę procesu (skrócenie czasu suszenia o dodatkowe 12%).
- ✚ Całkowite zużycie energii podczas suszenia warunkuje struktura surowca. Zastosowanie ultradźwięków z suszeniem konwekcyjnym skutkowało redukcją zużycia energii dla jabłka i ziemniaka. W przypadku takich surowców jak marchew i burak nie odnotowano zmniejszenia zużycia energii podczas procesu. Dla w. w. warzyw korzeniowych efekt ten uzyskano w procesach prowadzonych przy wspomaganie mikrofalowym (suszenie konwekcyjno-mikrofalowe i konwekcyjno-ultradźwiękowo-mikrofalowe).
- ✚ Wpływ zastosowania ultradźwięków na etapie odwadniania osmotycznego na barwę otrzymanych suszy był niejednoznaczny. Najmniejszą różnicę barwy otrzymanych suszy w porównaniu do surowca uzyskano dla prób odwadnianych w 50% lub 60% roztworze sacharozy.
- ✚ W większości przypadków stwierdzono pozytywny wpływ suszenia konwekcyjnego wspomaganego ultradźwiękami na zmianę barwy otrzymanych suszy. Największą różnicę pomiędzy wartościami ΔE dla suszy otrzymanych metodą konwekcyjną ze wspomaganie ultradźwiękowym a uzyskanych poprzez suszenie konwekcyjne odnotowano dla buraka oraz marchwi (wartości niższe o około 40%). Dla surowców o luźniejszej strukturze takich jak: ziemniak, jabłko, dynia, wartości ΔE dla prób suszonych metodą konwekcyjno-ultradźwiękową były o 6%-28% niższe niż dla suszonych konwekcyjnie.

- ✚ Zastosowanie mikrofal podczas suszenia konwekcyjnego miało pozytywny wpływ na barwę otrzymanych suszy. W przypadku suszenia hybrydowego (CVMWUS) dla buraka odnotowano negatywny efekt, dla marchwi z kolei wraz ze wzrastającą mocą US (200 W) odnotowano niższą wartość zmiany barwy (do 41%) w porównaniu z próbami otrzymanymi metodą konwekcyjną.
- ✚ Nie wykazano wpływu ultradźwięków w obróbce osmotycznej na końcową aktywność wody produktu. W suszeniu konwekcyjnym zastosowanie ultradźwięków redukowało a_w od 1% do 15% dla jabłek i od 14% do 28% dla buraka ćwikłowego. Wyższa moc ultradźwięków (200W) dawała lepszy efekt. Nie stwierdzono wpływu ultradźwięków stosowanych na etapie suszenia na aktywność wody suszy z ziemniaka i marchwi. Zastosowanie mikrofal podczas suszenia konwekcyjnego dawało podobny efekt jak ultradźwięki w przypadku buraka i powodowało obniżenie aktywności wody w suszach z marchwi (13%). Kombinacja ultradźwięków i mikrofal jako dwóch dodatkowych źródeł energii pozwoliła na nieznaczne dodatkowe obniżenie aktywności wody w stosunku do prób suszonych metodą konwekcyjno-mikrofalową tylko dla buraka (3%).
- ✚ Zastosowanie ultradźwięków na etapie odwadniania osmotycznego w większości przypadków przyczyniło się do spadku zawartości związków fenolowych i karotenoidów w otrzymanych suszach. Korzystny wpływ na retencję w. w. związków w otrzymanych suszach miało zastosowanie polioli do odwadniania plasterów kiwi oraz 60% roztworu substancji osmoaktywnej w przypadku dyni.
- ✚ Odnotowano pozytywny wpływ zastosowania ultradźwięków podczas suszenia konwekcyjnego na retencję związków o potencjale bioaktywnym. Wzrost retencji karotenoidów i fenoli w stosunku do ich zawartości w suszach otrzymanych metodą konwekcyjną wynosił odpowiednio 13%-38% oraz 4%-28% (dla marchwi, kiwi i dyni). Jednocześnie odnotowano negatywny wpływ mikrofal na retencję badanych związków zarówno w próbach suszonych metodą konwekcyjno-mikrofalową, jak i metodą hybrydową.
- ✚ Zastosowanie ultradźwięków podczas odwadniania osmotycznego badanych surowców roślinnych poprawia kinetykę procesu, ma jednak negatywny wpływ na jakość otrzymanych suszy. Zastosowanie polioli (sorbitol, erytrytol) w roztworze odwadniającym oraz 60-procentowego roztworu substancji osmoaktywnej pozwala uzyskać najlepsze efekty biorąc pod uwagę kinetykę procesu oraz jakość otrzymanych suszy.
- ✚ Wspomaganie suszenia poprzez ultradźwięki poprawia kinetykę procesu i przyczynia się do otrzymania produktu o barwie w większym stopniu zbliżonej do surowca i o wyższej zawartości związków fenolowych i karotenoidów w porównaniu do suszy otrzymanych metodą konwekcyjną. Wielkość uzyskanego efektu zależna jest w dużej mierze od mocy ultradźwięków oraz struktury surowca. Dla surowców o mniej zwartej strukturze (dynia, jabłko, ziemniak) uzyskano lepsze efekty związane z kinetyką procesu, z kolei korzystniejszy efekt odnoszący się do jakości produktu, odnotowano dla surowców o zwartej strukturze (marchew, burak). Przeprowadzenie procesu suszenia przy wspomaganiu mikrofalowym korzystnie wpływa na kinetykę, jednak przyczynia się do pogorszenia jakości otrzymanych suszy.

Wykaz dorobku naukowego

Publikacje

- G. Musielak, D. Mierzwa, J. Kroehnke, Food drying enhancement by ultrasound – A review, *Trends in Food Science & Technology*, Volume 56, October 2016, 126-141, **IF 5.191**
- D. Mierzwa, S. J. Kowalski, J. Kroehnke, Hybrid Drying of Carrot Preliminary Processed with Ultrasonically Assisted Osmotic Dehydration, *Food Technology and Biotechnology*, 2017 55(2): 197–205, **IF 0.891**
- J. Szadzińska, J. Łechtańska, J. Kroehnke, Non-stationary convective drying assisted with microwaves and ultrasound, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 2016, 203-204
- J. Kroehnke, G. Musielak, A. Boratyńska, Convective Drying of Potato Assisted by Ultrasound, *PhD Interdisciplinary Journal*, 2014, 57-65.
- G. Musielak, D. Mierzwa, J. Kroehnke, Mechanisms of Drying Acceleration by Ultrasounds. Proceedings of the 9th International Drying Symposium IDS 2014, Lyon, France, August 24-27, 2014.
- J. Kroehnke, Badanie wpływu ultradźwięków na kinetykę suszenia różnych odmian jabłek, *Materiały Konferencyjne nr 7, XXXIX Studencja Konferencja Naukowa Częstochowa*, 28 Maj, 2015
- J. Kroehnke, E. Radziejewska-Kubzdela, G. Musielak, M. Stasiak, R. Biegańska-Marecik, Ultrasonic-assisted and microwave-assisted convective drying of carrot – drying kinetics and quality analysis, Proceedings of the 5th European Drying Conference EuroDrying'2015, Budapest, Hungary, October 21-23, 2015
- J. Kroehnke, J. Szadzińska, E. Radziejewska-Kubzdela, R. Biegańska-Marecik, G. Musielak, D. Mierzwa, Osmotic dehydration and convective drying of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) – The influence of ultrasound on process kinetics and product quality, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 71: 105377, **IF 6,513**

Konferencje

- J. Kroehnke, G. Musielak, A. Boratyńska, Convective Drying of Potato Assisted by Ultrasound, *BIOTECH*, Gdańsk 2014
- J. Kroehnke, Badanie wpływu ultradźwięków na kinetykę suszenia różnych odmian jabłek, *XXXIX Studencja Konferencja Naukowa*, Częstochowa 2015
- J. Kroehnke, E. Radziejewska-Kubzdela, G. Musielak, M. Stasiak, R. Biegańska-Marecik, Ultrasonic-assisted and microwave-assisted convective drying of carrot – drying kinetics and quality analysis, 5th European Drying Conference EuroDrying'2015, Budapest, 2015

Postery

- G. Musielak, D. Mierzwa, J. Kroehnke, Food Drying Acceleration Due to Ultrasonic Application – a Review, *Book of Abstracts of 2nd Euro-Mediterranean Symposium Fruit & Veg Processing*, Avignon, France 4-6 April 2016

- J. Kroehnke, J. Szadzińska, E. Radziejewska-Kubzdela, Convective drying of kiwi (*Actinidia deliciosa*) pretreated by ultrasonic-assisted osmotic dehydration, Book of Abstracts of 2nd Euro-Mediterranean Symposium Fruit & Veg Processing, Avignon, France 4-6 April 2016
- J. Kroehnke, J. Szadzińska, E. Radziejewska-Kubzdela, G. Musielak, R. Biegańska-Marecik, Ultrasound-assisted osmotic dehydration and convective drying of kiwifruit, Ultrasonics 2016, Caparicia, Portugal 6-8 June 2016
- J. Kroehnke, J. Łechtańska, G. Musielak, Convective drying enhanced with ultrasound of various apple varieties, Ultrasonics 2016, Caparicia, Portugal 6-8 June 2016

Literatura

- [1] G. Musielak, Zaawansowane techniki suszenia, Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2013.
- [2] E. Czernyszewicz, „Konsumenckie spojrzenie na jakość jabłek,” *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska Lublin-Polonia*, tom 17, nr 2, pp. 70-82, 2007.
- [3] G. Musielak, D. Mierzwa i J. Kroehnke, „Food drying enhancement by ultrasound - A review,” *Trends in Food Science&Technology*, tom 56, pp. 126-141, 2016.
- [4] A. Kaleta, K. Górnicki, R. Winiczenko i A. Chojnacka, „Evaluation of drying models of apple (var. Ligol) dried in a fluidized bed dryer,” *Energy Conversion and Management*, tom 67, pp. 179-185, 2013.
- [5] F. Monforti-Ferrario i I. Pinedo Pascua, „Energy use in the EU food sector: State of play and opportunities for improvement,” European Commission, Luxembourg, 2015.
- [6] S. J. Kowalski, Thermomechanics of Drying Process, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2003.
- [7] D. Witrowa-Rajchert, „Nowe trendy w suszeniu żywności,” Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Warszawa, 2009.
- [8] A. S. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying, 3 red., Oxford: Taylor & Francis Group, LLC, 2007.
- [9] J. R. D. Finzer, M. A. Sfredo, G. D. B. Sousa i J. R. Limaverde, „Dispersion coefficient of coffee berries in vibrated bed dryer,” *Journal of Food Engineering*, tom 79, pp. 905-912, 2007.
- [10] D. Witrowa-Rajchert i M. Radecka-Wierzbička, „Wpływ techniki suszenia konwekcyjnego na wybrane wyznaczniki jakości suszonej tkanki roślinnej,” *Inżynieria Rolnicza*, tom 9, nr 9, pp. 387--395, 2005.
- [11] M. Boruch i K. Nowakowska, Technologia spożywczych suszów ziemniaczanych, Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 1996.
- [12] R. Dolińska i J. R. Warchlewski, „Przyszłościowe technologie żywności z udziałem mikrofal i ich wpływ na składniki żywności,” *Przemysł spożywczy*, tom 57, nr 11, pp. 2-7, 2003.
- [13] J. Ł. Wilk, „Prawne uregulowania dotyczące klasyfikacji fal elektromagnetycznych,” *TTS. Technika Transportu Szynowego*, tom 12, pp. 1643-1646, 2015.
- [14] K. Surówka, „Mikrofałe i ich zastosowanie w technologii żywności,” *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, tom 1, nr 1, pp. 13-21, 1994.
- [15] S. W. Kingman i N. A. Rowson, „Microwave treatment of minerals-a review,” *Minerals Engineering*, tom 11, nr 11, pp. 1081-1087, 1998.

-
- [16] D. Bogdal i A. Prociak, *Microwave-Enhanced Polymer Chemistry and Technology*, London: John Wiley & Sons, 2008.
- [17] W. Reszke, „Mikrofale i ich zastosowanie w chemii analitycznej,” *Analityka: nauka i praktyka*, tom 3, pp. 29-31, 2001.
- [18] D. Stuerger, „Microwave-material interactions and dielectric properties, key ingredients for mastery of chemical microwave processes,” w *Microwaves in organic synthesis, 2nd edn.*, Weinheim, Wiley-VCH, 2006, pp. 1-61.
- [19] C. Okeke, A. E. Abioye i Y. Omosun, „Microwave Heating Application in Food Processing,” *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, tom 9, nr 4, pp. 29-34, 2014.
- [20] S. Costanzo, *Microwave Materials Characterization*, London: IntechOpen, 2012.
- [21] Y. Wang, Y. Li, S. Wang, L. Zhang, M. Gao i J. Tang, „Review of dielectric drying of foods and agricultural products,” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, tom 4, nr 1, pp. 1-19, 2011.
- [22] D. Jain, J. Tang, P. D. Perow, Z. Tang i S. Sablani, „Effect of changes in salt content and food thickness on electromagnetic heating of rice, mashed potatoes and peas in 915 MHz single mode microwave cavity,” *Food Research International*, in press.
- [23] R. Wang, M. Zhang, A. S. Mujumdar i H. Jiang, „Effect of salt and sucrose content on dielectric properties and microwave freeze drying behavior of re-structured potato slices,” *Journal of Food Engineering*, tom 106, pp. 290-297, 2011.
- [24] A. K. Datta i R. C. Anantheswaran, *Handbook of microwave technology for food applications*, New York: Marcel Dekker, Inc. All Rights Reserved, 2001.
- [25] R. Vijay, *Investigation of the dielectric properties of some fruits and vegetables at microwave frequencies*, Jaipur: The IIS University, 2014.
- [26] S. Kumar, *Studies on microwave propagation properties of some biological tissues*, Hyderabad: Jawaharlal Nehru Technological University, 2012.
- [27] R. R. Mishra i A. M. Sharma, „Microwave–material interaction phenomena: Heating mechanisms, challenges and opportunities in material processing,” *Composites: Part A*, tom 81, pp. 78-97, 2016.
- [28] T. Auksornisri, J. Tang, Z. Tang i H. Lin, „Dielectric properties of rice model food systems relevant to microwave sterilization process,” *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, tom 45, pp. 98-105, 2018.
- [29] M. Leiker i M. A. Adamska, „Energy efficiency and drying rates during vacuum microwave drying of wood,” *Holz als Roh- und Werkstoff*, tom 62, nr 3, pp. 203-208, 2004.
- [30] M. A. M. Khraisheh, W. A. M. McMinn i T. R. A. Magee, „Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying,” *Food Research International*, tom 37, p. 497–503, 2004.

-
- [31] M. Zhang, J. Tang, A. S. Mujumdar i S. Wang, „Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables,” *Trends in Food Science & Technology*, tom 17, pp. 524-534, 2006.
- [32] N. R. Council, *Microwave Processing of Materials*, Washington, DC: The National Academies Press, 1994.
- [33] L. Hansson i A. L. Antti, „Design and performance of an industrial microwave drier for on-line drying of wood component,” w *8th IUFRO Wood Drying Conference*, Brasov, 2003.
- [34] H. Feng i J. Tang, „Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed,” *Journal of Food Science*, tom 63, nr 4, pp. 679-683, 1998.
- [35] C. Contreras, M. E. Martin-Esparza, A. Chiralt i N. Martinez-Navarette, „Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry,” *Journal of Food Engineering*, tom 88, pp. 55-64, 2008.
- [36] A. Andres, C. Bilbao i P. Fito, „Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air–microwave dehydration,” *Journal of Food Engineering*, tom 63, pp. 71-78, 2004.
- [37] E. Horuz, H. Bozkurt, H. Karatas i M. Maskan, „Effects of hybrid (microwave-convective) and convective drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries,” *Food Chemistry*, tom 230, pp. 295-305, 2017.
- [38] F. Lule i T. Koyuncu, „Convective and Microwave Drying Characteristics of Sorbus Fruits (*Sorbus domestica* L.),” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, tom 195, pp. 2634-2643, 2015.
- [39] S. R. S. Dev, P. Geetha, V. Orsat, Y. Garipey i G. S. V. Raghavan, „Effects of Microwave-Assisted Hot Air Drying and Conventional Hot Air Drying on the Drying Kinetics, Color, Rehydration, and Volatiles of *Moringa oleifera*,” *Drying Technology*, pp. 1452-1458, 2011.
- [40] H. Darvishi, A. R. Asl, A. Asghari, M. Azadbakht, G. Najafi i J. Khodaei, „Study of the Drying Kinetics of Pepper,” *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, tom 13, pp. 130-138, 2014.
- [41] O. M. Kesbi, M. Sadeghi i S. A. Mireei, „Quality assessment and modeling of microwave-convective drying of lemon slices,” *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, tom 9, nr 3, pp. 216-223, 2016.
- [42] T. Funebo i T. Ohlsson, „Microwave-assisted Air Dehydration of Apple and Mushroom,” *Journal of Food Engineering*, tom 38, pp. 353-367, 1998.
- [43] G. P. Sharma i S. Prasad, „Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves,” *Energy*, tom 31, p. 1921–1926, 2006.
- [44] A. Motevali, S. Minaei, A. Banakar, B. Ghobadian i D. Hosain, „Energy analyses and drying kinetics of chamomile leaves in microwave-convective dryer,” *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, tom 15, pp. 179-187, 2016.

-
- [45] M. Zarein, S. H. Samadi i B. Ghobadian, „Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices,” *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, tom 14, pp. 41-47, 2015.
- [46] A. Chahbani, N. Fakhfakh, M. A. Balti, M. Mabrouk, H. El-Hatmi, N. Zouari i N. Kechaou, „Microwave drying effects on drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity of green peas (*Pisum sativum* L.),” *Food Bioscience*, tom 25, pp. 32-38, 2018.
- [47] B. Raghavan, L. J. Rao i K. O. Abraham, „Effect of drying methods on the flavour quality of marjoram (*Oreganum majorana* L.),” *Molecular Nutrition and Food Research*, tom 41, pp. 159-161, 1997.
- [48] J. Dong, X. Ma, Z. Fu i Y. Guo, „Effects of microwave drying on the contents of functional constituents of *Eucommia ulmoides* flower tea,” *Industrial Crops and Products*, tom 34, pp. 1102-1110, 2011.
- [49] I. Alibas Ozkan, B. Akbudak i N. Akbudak, „Microwave drying characteristics of spinach,” *Journal of Food Engineering*, tom 78, pp. 577-583, 2007.
- [50] I. Alibas, „Determination of Drying Parameters, Ascorbic Acid Contents and Color Characteristics of Nettle Leaves During Microwave-, Air- and Combined Microwave-Air-Drying,” *Journal of Food Process Engineering*, tom 33, pp. 213-233, 2010.
- [51] M. Maskan, „Microwave/air and microwave finish drying of banana,” *Journal of Food Engineering*, tom 44, pp. 71-78, 2000.
- [52] D. G. Prabhanjan, H. S. Ramaswamy i G. S. V. Raghavan, „Microwave-assisted Convective Air Drying of Thin Layer Carrots,” *Journal of Food Engineering*, tom 25, pp. 283-293, 1995.
- [53] Y. Soysal, „Microwave Drying Characteristics of Parsley,” *Biosystems Engineering*, tom 89, nr 2, pp. 167-173, 2004.
- [54] G. Ren i F. Chen, „Drying of American Ginseng (*Panax quinquefolium*) Roots by Microwave-Hot Air Combination,” *Journal of Food Engineering*, tom 35, pp. 433-443, 1998.
- [55] J. R. Warchalewski, J. Gralik, R. Zawirska-Wojtasiak, J. Zabielski i R. Kuśnierz, „The Evaluation of Wheat Grain Odour and Color after Gamma and Microwave Irradiation,” *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, tom 1, nr 1, 1998.
- [56] E. S. Siguemoto, J. A. Wilhelms Gut, A. Martinez i D. Rodrigo, „Inactivation kinetics of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in apple juice by microwave and conventional thermal processing,” *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, tom 45, pp. 84-91, 2018.
- [57] I.-S. Woo, I.-K. Rhee i H.-D. Park, „Differential Damage in Bacterial Cells by Microwave Radiation on the Basis of Cell Wall Structure,” *Applied and Environmental Microbiology*, tom 66, nr 5, p. 2243–2247, 2000.

-
- [58] L. Najdovski, A. Z. Dragas i V. Kotnik, „The killing activity of microwaves on some non-sporogenic and sporogenic medically important bacterial strains,” *Journal of Hospital Infection*, tom 19, nr 4, pp. 239-247, 1991.
- [59] E. P. Papadakis, „Ultrasonic Velocity and Attenuation: Measurement Methods with Scientific and Industrial Applications,” *Physical Acoustic*, tom 12, pp. 277-374, 1976.
- [60] B. G. S. Raj, R. N. R. Ramprasad, A. M. Asiri, J. J. Wu i S. Anandan, „Ultrasound assisted synthesis of Mn₃O₄ nanoparticles anchored graphene nanosheets for supercapacitor applications,” *Electrochimica Acta*, tom 156, pp. 127-137, 2015.
- [61] F. J. Fry, *Ultrasound: Its Applications in Medicine and Biology*, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978.
- [62] Ł. K. Kaczmarek i P. P. Lewicki, „Zastosowanie technik ultradźwiękowych w przetwarzaniu żywności,” *Przemysł Spożywczy*, tom 9, nr 59, pp. 34-36, 2005.
- [63] j4p4n, „Sonar Display,” <https://openclipart.org/detail/300234/sonar-display>, 2018-04-09.
- [64] J. P. Monchalin, „Optical detection of ultrasound,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, tom 33, pp. 485-499, 1986.
- [65] A. Śliwiński, *Ultradźwięki i ich zastosowania*, Warszawa: Wydawnictwo WNT, 2001.
- [66] A. Rezek-Jambrak, V. Lelas, Z. Herceg, M. Badanjak i Z. Werner, „Primjena ultrazvuka visoke snage u sušenju voća i povrća,” *Kemija u industriji*, tom 59, nr 4, pp. 169-177, 2010.
- [67] P. Greguss, „The mechanism and possible applications of drying by ultrasonic irradiation,” *Ultrasonics*, tom 1, nr 2, pp. 83-86, 1963.
- [68] Y. H. Hui i E. Ozgul Evranuz, *Handbook of Vegetable Preservation and Processing*, Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [69] M. W. A. Kuijpers, D. van Eck, M. F. Kemmere i J. T. F. Keurentjes, „Cavitation-induced reactions in high-pressure carbon dioxide,” *Science*, tom 298, nr 5600, pp. 1969-1971, 2002.
- [70] S. Abbas, K. Hayat, E. Karangwa, M. Bashari i X. Zhang, „An Overview of Ultrasound-Assisted Food-Grade Nanoemulsions,” *Food Engineering Reviews*, tom 5, nr 3.
- [71] S. Barnett, „Nonthermal issues: Cavitation—Its nature, detection and measurement,” *Ultrasound in Medicine & Biology*, tom 24, nr S1, pp. 11-21, 1998.
- [72] A. Mulet, J. A. Carcel, N. Sanjuan i K. Bon, „New Food Drying Technologies – Use of Ultrasound,” *Food Science and Technology International*, tom 9, nr 3, pp. 215-221, 2003.
- [73] C. Ozuna, J. A. Carcel, J. V. Garcia-Perez i A. Mulet, „Improvement of water transport mechanisms during potato drying by applying ultrasound,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, tom 91, nr 14, pp. 2511-2517, 2011.
- [74] N. Lebovka, E. Vorobiev i F. Chemat, *Enhancing Extraction Processes in the Food Industry*, Boca Raton: CRC Press, 2012.

-
- [75] S. J. Kowalski i A. Pawłowski, „Intensification of apple drying due to ultrasound enhancement,” *Journal of Food Engineering*, tom 156, pp. 1-9, 2015.
- [76] H. Huang i D. Paramo, „Broadband Electrical Impedance Matching for Piezoelectric Ultrasound Transducers,” *IEEE transaction on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control*, tom 58, nr 12, pp. 2699-2707, 2011.
- [77] J. V. Garcia-Perez, J. A. Carcel, A. Mulet, E. Riera i J. A. Gallego-Juarez, „Ultrasonic drying for food preservation,” w *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*, Cambridge, United Kingdom, 2015, pp. 875-910.
- [78] S. de la Fuente-Blanco, E. Riera-Franco de Sarabia, V. M. Acosta-Aparicio, A. Blanco-Blanco i J. A. Galego-Juarez, „Food drying process by power ultrasound,” *Ultrasonics*, tom 44, pp. 523-527, 2006.
- [79] V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, R. V. Barsukov, D. S. Abramenko i A. N. Lebedev, „Studies of ultrasonic dehydration efficiency,” *Journal of Zhojiang University of Science A*, tom 12, nr 4, pp. 247-254, 2011.
- [80] J. V. Garcia-Perez, J. A. Carcel, S. de la Fuente-Blanco i E. Riera-Franco de Sarabia, „Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: Parametric study,” *Ultrasonics*, tom 44, pp. 539-543, 2006.
- [81] N. S. Terefe, R. Buckow i C. Versteeg, „Quality-Related Enzymes in Plant-Based Products: Effects of Novel Food-Processing Technologies Part 3: Ultrasonic Processing,” *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, tom 55, pp. 147-158, 2015.
- [82] R. M. S. Cruz, J. F. Rubilar, P. A. Ulloa, J. A. Torres i M. C. Vieira, „New Food Processing Technologies: Development and Impact on the Consumer Acceptability,” w *Food Quality: Control, Analysis and Consumer Concerns*, New York, Nova Science, 2011.
- [83] X. Cao, C. Cai, Y. Wang i X. Zheng, „The inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in bayberry juice during thermal and ultrasound treatments,” *Innovative Food Science&Emerging Technologies*, tom 45, p. 169, 2018.
- [84] S. Rodriguez, F. A. N. Fernandes, J. V. Garcia-Perez i J. A. Carcel, „Influence of Ultrasound-Assisted Air-Drying and Conventional Air-Drying on the Activity of Apple Enzymes,” *Journal of Food Processing and Preservation*, tom 41, nr 2, 2017.
- [85] M. Barteri, M. Diociaiuti, A. Pala i S. Rotella, „Low frequency ultrasound induces aggregation of porcine fumarase by free radical production,” *Biophysical Chemistry*, tom 111, pp. 35-42, 2004.
- [86] K. Rajewska i D. Mierzwa, „Influence of ultrasound on the microstructure of plant tissue,” *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017.
- [87] A. Puig, I. Perez-Munuera, J. A. Carcel, I. Hernando i J. V. Garcia-Perez, „Moisture loss kintics and microstructural changes in eggplant (*Solanum melongera* L.) during conventional and ultrasonically assisted convective drying,” *Food and Bioproducts Processing*, tom 90, nr 4, pp. 624-632, 2012.

-
- [88] F. Vallespir, L. Crescenzo, O. Rodriguez, F. Marra i S. Simal, „Intensification of Low-Temperature Drying of Mushroom by Means of Power Ultrasound: Effects on Drying Kinetics and Quality Parameters,” *Food and Bioprocess Technology*, tom 12, nr 5, pp. 839-851, 2019.
- [89] J. V. Garcia-Perez, C. Ortuno, A. Puig, J. A. Carcel i I. Perez-Munuera, „Enhancement of water transport and microstructural changes induced by high-intensity ultrasound application on orange peel drying,” *Food and Bioprocess Technology*, tom 5, nr 6, pp. 2256-2265, 2012.
- [90] J. V. Garcia-Perez, J. A. Carcel, E. Riera, C. Rossello i A. Mulet, „Intensification of low-temperature drying by usind ultrasound,” *Drying Technology*, tom 30, nr 11-12, pp. 1199-1208, 2012.
- [91] C. Ortuno, J. V. Garcia-Perez, J. A. Carcel, A. Fermentia i A. Mulet, „Modelling of ultrasonically assisted convective drying of eggplant,” w *Proceedings of the 17th international drying symposium (IDS 2010)*, Magdeburg, 2010.
- [92] J. V. Garcia-Perez, C. Ozuna, C. Ortuno, J. A. Carcel i A. Mulet, „Modeling ultrasonically assisted convective drying of eggplant,” *Drying Technology*, tom 29, nr 13, pp. 1499-1509, 2011.
- [93] E. K. Mendez, C. E. Orrego, D. L. Manrique, J. D. Gonzalez i D. Vallejo, „Power ultrasound application on convective drying of banana (*Musa paradisiaca*), mango (*Magnifera indica* L.) and guava (*psidium guajava* L.),” *World Academy of Science, Engineering and Technology*, tom 9, pp. 560-565, 2015.
- [94] E. Souza da Silva, S. C. Rupert Brandao, A. Lopes da Silva, J. H. Fernandes da Silva, A. C. Duarte Coelho i P. M. Azoubel, „Ultrasound-assisted vacuum drying of nectarine,” *Journal of Food Engineering*, tom 246, pp. 119-124, 2019.
- [95] J. V. Garcia-Perez, J. A. Carcel, E. Riera i A. Mulet, „Influence of the applied acoustic energy on the drying of carrots and lemon peel,” *Drying Technology*, tom 27, nr 2, pp. 281-287, 2009.
- [96] J. V. Garcia-Perez, J. A. Carcel, J. Benedito i A. Mulet, „Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying,” *Food and Bioproducts Processing*, tom 85, nr 3, pp. 247-254, 2007.
- [97] Y. Tao, J. Zhang, S. Jiang, Y. Xu, P.-L. Show, Y. Han, X. Ye i M. Ye, „Contacting ultrasound enhanced hot-air convective drying of garlic slices: Mass transfer modeling and quality evaluation,” *Journal of Food Engineering*, tom 235, pp. 79-88, 2018.
- [98] Z. H. Tekin, M. Baslar, S. Karasu i M. Kilicli, „Dehydration of green beans using ultrasound-assisted vacuum drying as a novel technique: drying kinetics and quality parameters,” *Journal of Food Processing and Preservation*, tom 41, nr 6, pp. --, 2017.
- [99] M. Bantle i T. M. Eikevik, „Parametric study of high-intensity ultrasound in the atospheric freeze drying if peas,” *Drying Technology*, tom 29, nr 10, pp. 1230-1239, 2011.
- [100] Z. Yang, X. Li, Z. Tao, N. Luo i F. Yu, „Ultrasound-assisted heat pump drying of pea seed,” *Drying Technology*, tom 36, nr 16, pp. 1958-1969, 2018.

-
- [101] J. V. Santacatalina, D. Fissore, J. A. Carcel, A. Mulet i J. V. Garcia-Perez, „Model-based investigation into atmospheric freeze drying assisted by power ultrasound,” *Journal of Food Engineering*, tom 151, pp. 7-15, 2015.
- [102] O. Rodriguez, J. V. Santacatalina, S. Simal, J. V. Garcia-Perez, A. Fermentia i C. Rossello, „Influence of Power Ultrasound Application on Drying Kinetics of Apple and Its Antioxidant and Microstructural Properties,” *Journal of Food Engineering*, tom 129, pp. 21-29, 2014.
- [103] M. H. Ahmad-Qasem, J. V. Santacatalina, E. Barrajon-Catalan, V. Micol, J. A. Carcel i J. V. Garcia-Perez, „Influence of Drying on the Retention of Olive Leaf Polyphenols Infused Into Dried Apple,” *Food and Bioprocess Technology*, tom 8, nr 1, pp. 120-133, 2015.
- [104] H. T. Sabarez, J. A. Gallego-Juarez i E. Riera, „Ultrasonic-Assisted Convective Drying of Apple Slices,” *Drying Technology*, tom 30, nr 9, pp. 989-997, 2012.
- [105] J. A. Gallego-Juarez, E. Riera, S. de la Fuente Blanco, G. Rodriguez-Corral, V. M. Acosta-Aparicio i A. Blanco, „Application of High-Power Ultrasound for Dehydration of Vegetables: Processes and devices,” *Drying Technology*, tom 25, nr 11, pp. 1893-1901, 2007.
- [106] C. Ozuna, A. Mulet, J. V. Garcia-Perez, E. Riera i J. A. Carcel, „Influence of vegetable structure on ultrasonically assisted convective drying,” w *Proceedings of the 19th international drying symposium (IDS 2014)*, Lyon, 2014.
- [107] C. Ozuna, T. G. Alvarez-Arenas, E. Riera, J. A. Carcel i J. V. Garcia-Perez, „Influence of material structure on air-borne ultrasonic application in drying,” *Ultrasonics Sonochemistry*, tom 21, nr 3, pp. 1235-1243, 2014.
- [108] J. V. Santacatalina, O. Rodriguez, S. Simal, J. A. Carcel, A. Mulet i J. V. Garcia-Perez, „Ultrasonically enhanced low-temperature drying of apple: influence on drying kinetics and antioxidant potential,” *Journal of Food Engineering*, tom 138, pp. 35-44, 2014.
- [109] J. V. Santacatalina, M. Contreras, S. Simal, J. A. Carcel i J. V. Garcia-Perez, „Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of apple,” *Ultrasonics Sonochemistry*, tom 28, pp. 100-109, 2016.
- [110] J. V. Santacatalina, J. V. Garcia-Perez, C. Rossello, A. Mulet i J. A. Carcel, „Combined effect of temperature and air velocity on low-temperature drying of apple assisted by power ultrasound,” w *Proceedings of the 19th international drying symposium (IDS 2014)*, Lyon, 2014.
- [111] C. Moreno, A. Mulet, F. Mas, C. Rossello i J. A. Carcel, „Antioxidant potential of atmospheric freeze drying apples as affected by ultrasound application and sample surface,” w *Proceedings of the 5th european drying conference (Eurodrying'2015)*, Budapest, 2015.
- [112] K. Schossler, H. Jager i D. Knorr, „Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper,” *Journal of Food Engineering*, tom 108, nr 1, pp. 103-110, 2012.
- [113] S. J. Kowalski, „Ultrasound in wet materials subjected to drying: A modeling study,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, tom 84, pp. 998-1007, 2015.

-
- [114] S. J. Kowalski, D. Mierzwa i M. Stasiak, „Ultrasound-assisted convective drying of apples at different drying conditions,” w *Proceedings of 5th european drying conference (Eurodrying'2015)*, Budapest, 2015.
- [115] J. Banaszak i A. Pawłowski, „Influence of Ultrasound Assist During Hot Air Drying on Properties of Dried Apple Crisps,” *Chemical and Process Engineering*, tom 39, nr 3, p. 263–270, 2018.
- [116] J. Banaszak i A. Pawłowski, „Influence of ultrasound drying on properties of dried apple crisps,” w *Proceedings of 5th european drying conference (Eurodrying'2015)*, Budapest, 2015.
- [117] S. J. Kowalski i D. Mierzwa, „US-assisted convective drying of biological materials,” *Drying Technology*, tom 33, nr 13, pp. 1601-1613, 2015.
- [118] M. L. Magalhaes, S. J. M. Cartaxo, M. I. Gallao, J. V. Garcia-Perez, J. A. Carcel, S. Rodrigues i F. A. N. Fernandes, „Drying intensification combining ultrasound pre-treatment and ultrasound-assisted air drying,” *Journal of Food Engineering*, tom 215, pp. 72-77, 2017.
- [119] F. A. N. Fernandes, S. Rodrigues, J. V. Garcia-Perez, J. A. Carcel i A. Mulet, „Evaluation of vitamin preservation and availability on ultrasound-assisted air drying of apples (Royal Gala var.),” w *Proceedings of the 19th international drying symposium (IDS 2014)*, Lyon, 2014.
- [120] F. A. N. Fernandes, S. Rodrigues, J. V. Garcia-Perez i J. A. Carcel, „Effects of ultrasound-assisted air-drying on vitamins and carotenoids of cherry tomatoes,” *Drying Technology*, tom 34, nr 8, p. 986–996, 2016.
- [121] S. J. Kowalski, D. Mierzwa i M. Stasiak, „Ultrasound-assisted convective drying of apples at different process conditions,” *Drying Technology*, tom 35, nr 8, pp. 939-947, 2017.
- [122] D. Konopacka, R. Parosa, J. Piecko, A. Połubok i K. Siucińska, „Ultrasoundµwave hybrid drying device for colored fruit preservation - Product quality and energy efficiency,” w *Proceedings of the 8th asia-pacific drying conference*, Kuala-Lumpur, 2015.
- [123] Y. Tao, M. Han, X. Gao, Y. Han, P.-L. Show, C. Liu, X. Ye i G. Xie, „Applications of water blanching, surface contacting ultrasound-assisted air drying, and their combination for dehydration of white cabbage: Drying mechanism, bioactive profile, color and rehydration property,” *Ultrasonics - Sonochemistry*, w druku.
- [124] S. J. Kowalski, A. Pawłowski, J. Szadzińska, J. Łechatńska i M. Stasiak, „High power airborne ultrasound assist in combined drying of raspberries,” *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, tom 34, pp. 225-233, 2016.
- [125] J. Szadzińska, J. Łechatńska, R. Pashminehazar, A. Kharaghani i E. Tsotsas, „Microwave- and ultrasound-assisted convective drying of raspberries: Drying kinetics and microstructural changes,” *Drying Technology*, tom 37, nr 1, pp. 1-12, 2019.
- [126] E. M. G. C. do Nascimento, A. Mulet, J. L. R. Ascheri, C. W. P. de Carvalho i J. A. Carcel, „Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of passion fruit peel,” *Journal of Food Engineering*, tom 170, pp. 108-118, 2016.

-
- [127] J. A. Carcel, J. V. Garcia-Perez, E. Riera i A. Mulet, „Improvement of convective drying of carrot by applying power ultrasound - Influence of mass load density,” *Drying Technology*, tom 29, nr 2, pp. 174-182, 2011.
- [128] J. V. Garcia-Perez, J. A. Carcel, S. de la Fuente-Blanco i E. Riera-Franco de Sarabia, „Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: Parametric study,” *Ultrasonics*, tom 44, pp. 539-543, 2006.
- [129] J. V. Garcia-Perez, J. A. Carcel, J. Benedito, E. Riera i A. Mulet, „Drying of a low porosity product (carrot) as affected by power ultrasound,” *Defect and Diffusion Forum*, Tomy %1 z %2273-276, pp. 764-769, 2008.
- [130] J. Kroehnke, E. Radziejewska-Kubzdela, G. Musielak i M. Stasiak, „Ultrasonic-assisted and microwave - assisted convective drying of carrots: Drying kinetics and quality analysis,” w *Proceedings of the 5th european drying conference (Eurodrying'2015)*, Budapest, 2015.
- [131] M. Aversa, A. -J. Van der Voort, W. de Heij, B. Tournois i S. Curcio, „An experimental analysis of acoustic drying of Carrots: Evaluation of heat transfer coefficients in different drying conditions,” *Drying Technology*, tom 29, nr 2, pp. 239-244, 2011.
- [132] W. Sawicka, A. Mulet, J. Bon, N. Perez-Muelas, S. Simal i J. A. Carcel, „Influence of freezing and ultrasound application on drying of meat,” w *Proceedings of the 5th european drying conference (Eurodrying'2015)*, Budapest, 2015.
- [133] J. A. Carcel, R. I. Nogueira, J. V. Garcia-Perez, N. Sanjuan i E. Riera, „Ultrasound effects on the mass transfer processes during drying kinetic of olive leave (*Olea Europea* var. Serrana),” *Defect and Diffusion Forum*, Tomy %1 z %2297-301, pp. 1083-1090, 2010.
- [134] E. Vieira Da Silva Junior, L. Lins de Melo, R. A. Batista de Medeiros, Z. M. Pimenta Barros i P. M. Azoubel, „Influence of ultrasound and vacuum assisted drying on papaya quality parameters,” *LWT*, tom 97, pp. 317-322, 2018.
- [135] K. Schossler, H. Jager i D. Knorr, „Novel contact ultrasound system for the accelerated freeze-drying of vegetables,” *Innovative Food Science&Emerging Technologies*, tom 16, pp. 113-120, 2012.
- [136] J. A. Carcel, D. Castillo, S. Simal i A. Mulet, „Influence of temperature and ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of red pepper,” *Drying Technology*, pp. 1-8, 2018.
- [137] J. Szadzińska, J. Łechtańska i S. J. Kowalski, „Microwave and ultrasonic assisted convective drying of green pepper: Drying kinetics and quality,” w *Proceedings of the 5th european drying conference (Eurodrying'2015)*, Budapest, 2015.
- [138] J. Szadzińska, J. Łechtańska, S. J. Kowalski i M. Stasiak, „The effect of high power airborne ultrasound and microwaves on convective drying effectiveness and quality of green pepper,” *Ultrasonics Sonochemistry*, tom 34, pp. 531-539, 2017.
- [139] J. A. Carcel, J. V. Garcia-Perez, E. Riera i A. Mulet, „Influence of high-intensity ultrasound on kinetics of persimmon,” *Drying Technology*, tom 25, nr 1, pp. 185-183, 2007.

-
- [140] A. Kouchakzadeh i P. Ghobadi, „Modeling of ultrasonic-convective drying of pistachios,” *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, tom 14, nr 4, pp. 144-149, 2012.
- [141] A. Kouchkzadeh, „The effect of acoustic and solar energy on drying process of pistachios,” *Energy Conversion and Management*, tom 67, pp. 351-356, 2013.
- [142] M. Bantle i T. M. Eikevik, „A study of the energy efficiency of convective drying systems assisted by ultrasound in the production of clipfish,” *Journal of Cleaner Production*, tom 65, pp. 217-223, 2014.
- [143] M. Bantle i J. Hanssler, „Ultrasonic convective drying kinetics of clipfish during the initial drying period,” *Drying Technology*, tom 31, nr 11, pp. 1307-1316, 2013.
- [144] C. Ozuna, J. A. Carcel, P. M. Walde i J. V. Garcia-Perez, „Low-temperature drying of salted cod (*Gadus morhua*) assisted by high power ultrasound: Kinetics and physical properties,” *Innovative Food Science&Emerging Technologies*, tom 23, pp. 146-155, 2014.
- [145] A. V. Fedorov, I. A. Fedorchenko, S. B. An, J. H. Lee i K. M. Choo, „Physical and mathematical modeling of acousto-convective drying of rice,” *Journal of Engineering Physics and Thermodynamics*, tom 83, nr 1, pp. 72-82, 2010.
- [146] Y. G. Korobeinikov, G. V. Trubacheev, A. V. Fedorov, K. M. Choo, D. M. Jeong i Y. I. Kim, „Experimental investigation of the acoustic-convective drying of unhusked Korean rice,” *Journal of Engineering Physics and Thermodynamics*, tom 81, nr 4, pp. 676-679, 2008.
- [147] A. Jafari i D. Zare, „Ultrasound-assisted fluidized bed drying of paddy: Energy consumption and rice quality aspects,” *Drying Technology*, tom 35, nr 7, pp. 893-902, 2017.
- [148] J. Szadzińska, S. J. Kowalski i M. Stasiak, „Microwave and ultrasound enhancement of convective drying of strawberries: Experimental and modeling efficiency,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, tom 103, p. 1065–1074, 2016.
- [149] J. Gamboa-Santos, A. Montilla, J. A. Carcel, M. Villamiel i J. V. Garcia-Perez, „Air-borne ultrasound application in the convective drying of stawberry,” *Journal of Food Enginnering*, tom 128, pp. 132-139, 2014.
- [150] J. Gamboa-Santos, A. Montilla, A. C. Soria, J. A. Carcel, J. V. Garcia-Perez i M. Villamiel, „Impact of power ultrasound on chemical and physico-chemical quality indicators of stawberries dried by convection,” *Food Chemistry*, tom 161, pp. 40-46, 2014.
- [151] J. Rodriguez, A. Mulet i J. Bon, „Influence of high-intesity ultrasound on drying kinetics in fixed beds of high porosity,” *Journal of Food Enginnering*, tom 127, pp. 93-102, 2014.
- [152] Y. Liu, Y. Sun, S. Miao, F. Li i D. Luo, „Drying characteristics of ultrasound assisted hot air drying of Flos *Lonicerae*,” *Journal of Food Science and Technology*, tom 52, nr 8, pp. 4955-4964, 2015.
- [153] G. Clemente, N. Sanjuan, J. A. Carcel i A. Mulet, „Influence of temperature, air velocity and ultrasound application on drying kinetics of grape seeds,” *Drying Technology*, tom 32, nr 1, pp. 68-76, 2014.

-
- [154] L. Cruz, G. Clemente, A. Mulet, M. H. Ahmad-Qasem, E. Barrajon-Catalan i J. V. Garcia-Perez, „Air-borne ultrasonic application in the drying of grape skin: Kinetic and quality consideration,” *Journal of Food Engineering*, tom 168, pp. 251-258, 2016.
- [155] J. V. Garcia-Perez, J. A. Carcel, S. Simal, M. A. Garcia-Alvarado i A. Mulet, „Ultrasonic intensification of grape stalk convective drying: Kinetic and energy efficiency,” *Drying Technology*, tom 31, nr 8, pp. 942-950, 2013.
- [156] K. Schossler, T. Thomas i D. Knorr, „Modification of cell structure and mass transfer in potato tissue by contact ultrasound,” *Food Research International*, tom 49, nr 1, pp. 425-431, 2012.
- [157] J. Kroehnke, G. Musielak i A. Boratyńska, „Convective Drying of Potato Assisted by Ultrasound,” *PhD Interdisciplinary Journal*, pp. 57-65, 2014.
- [158] D. B. MacDougall, *Colour in food. Improving quality*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2002.
- [159] J. Gliński, J. Horabik i J. Lipiec, *Encyclopedia od Agrophysics*, Dordrecht : Springer, 2011.
- [160] G. V. Barbosa-Canovas, A. J. Fontana, Jr, S. J. Schmidt i T. P. Labuza, *Water Activity in Foods. Fundamentals and Application*, Oxford: Blackwell Publishing, 2007.
- [161] Z. Pałacha, „Aktywność wody ważny parametr trwałości żywności,” *Przemysł spożywczy*, tom 4, pp. 22-26, 2008.
- [162] H. -D. Belitz, W. Grosch i P. Schieberle, *Food Chemistry*, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [163] J. Gadomska, T. Sadowski i M. Buczkowska, „Ekologiczna żywność jako czynnik sprzyjający zdrowiu,” *Problemy higieny i epidemiologii*, tom 95, nr 3, pp. 556-560, 2014.
- [164] T. Wolski, I. D. Karwat i A. Najda, „Kontaminacja i suplementacja żywności a zdrowie,” *Postępy fizjoterapii*, Tomy %1 z %21-2, pp. 35-41, 2005.
- [165] N. N. Potter i J. H. Hotchkiss, *Food Science*, V red., New York: International Thomson Publishing, 1995.
- [166] C. K. Sen, L. Packer i O. Hanninen, *Handbook of Oxidants and Antioxidants in Exercise*, Amsterdam: Elsevier Science B. V., 2000.
- [167] U. Gawlik-Dziki, „Fenolokwasy jako bioaktywne składniki żywności,” *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, tom 4, nr 41, pp. 29-40, 2004.
- [168] J. Kołodziejczyk-Czepas, M. Szejka, A. Pawlak i H. M. Żbikowska, „Właściwości przeciutleniające kwasi kawowego i jego pochodnych,” *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, tom 3, nr 100, pp. 5-17, 2015.
- [169] K. Pei, J. Ou, J. Huang i S. Ou, „p-Coumaric acid and its conjugates: dietary sources, pharmacokinetic properties and biological activities,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, tom 96, nr 9, pp. 2952-2962, 2016.

-
- [170] A. Kosiorek, J. Oszmiański i J. Golański, „Podstawy do zastosowania polifenoli roślinnych jako nutraceutyków o właściwościach przeciwplytkowych,” *Postępy Fitoterapii*, tom 2, pp. 108-117, 2013.
- [171] F. Adamicki, „Postęp w rozwoju nowych technologii w przechowywalnictwie warzyw,” *Zeszyty problemowe postępów nauk rolniczych*, tom 527, pp. 15-27, 2008.
- [172] A. Parus, „Przeciwutleniające i farmakologiczne właściwości kwasów fenolowych,” *Postępy Fitoterapii*, tom 1, pp. 48-53, 2013.
- [173] J. Oszmiański, A. Wojdyło i P. Matuszewski, „Zmiany zawartosci zwiaskow fenolowych podczas produkcji zageszczonego soku truskawkowego w warunkach przemyslowych,” *Żywność Nauka Technologia Jakość*, tom 14, nr 1, pp. 94-104, 2007.
- [174] M. Nowacka, D. Witrowa-Rajchert i J. Ruła, „Wpływ procesów technologicznych na aktywność przeciwutleniającą i zawartość polifenoli w tkance jabłka,” *Postępy Techniki Przemysłu Spożywczego*, nr 2, pp. 12-15, 2011.
- [175] H. Bojarowicz i A. Płowec, „Wpływ witaminy A na kondycję skóry,” *Problemy higieny i epidemiologii*, tom 91, nr 3, pp. 352-356, 2010.
- [176] J. Higdon, *An evidence-based approach to vitamins and minerals health benefits and intake recommendations*, New York: Thieme Medical Publishers, Inc., 2003.
- [177] T. P. Coultate, *Food. The Chemistry of Its Components*, IV red., Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2002.
- [178] E. Cadenas i L. Packer, *Handbook of antioxidants*, 2 red., Basel: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [179] A. Kaleta, K. Górnicki i U. Siwińska, „Wpływ metod obróbki wstępnej stosowanych w procesie konwekcyjnego suszenia na kinetykę rehydratacji suszu z korzenia pietruszki,” *Acta Scientiarum Polonorum, Technica Agraria*, tom 4, nr 1, pp. 19-28, 2005.
- [180] P. P. Lewicki, „Some Remarks on Rehydration of Dried Foods,” *Journal of Food Engineering*, tom 36, pp. 81-87, 1998.
- [181] A. Choińska, K. Górnicki, R. Winiczenko i A. Kaleta, „Wpływ warunków rehydratacji na zmianę objętości cząstek krajanki suszu z jabłek,” *Postępy techniki przetwórstwa żywności*, tom 1, pp. 47-50, 2014.
- [182] T. Kudra, „Energy Aspects of Drying,” *Drying Technology*, tom 22, nr 5, pp. 917-932, 2004.
- [183] A. M. Castro, E. Y. Mayorga i F. L. Moreno, „Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review,” *Journal of Food Engineering*, tom 223, pp. 152-167, 2018.
- [184] S. J. Kowalski i A. Pawłowski, „Modelling of kinetics in stationary and intermittent drying,” *Drying Technology*, tom 28, nr 8, pp. 1023-1031, 2010.
- [185] G. Musielak i J. Banaszak, „Non-linear heat and mass transfer during convective drying of kaolin cylinder under non-steady conditions,” *Transport in Porous Media*, tom 66, pp. 121-134, 2007.

-
- [186] C. Strumiłło, *Foundations of the Drying Theory and Technology*, Warsaw: WNT, 1983.
- [187] A. Krupowicz, *Numerical Methods of Initial Value Problems of Ordinary Differential Equations*, Warsaw: PWN, 1986.
- [188] H. H. Rosenbrock, „An automatic method for finding the greatest or least value of a function,” *The Computer Journal*, tom 3, nr 3, pp. 175-184, 1960.
- [189] M. Stasiak, G. Musielak i D. Mierzwa, „Optimization method for the evaluation of convective heat and mass transfer effective coefficients and energy sources in drying process,” *Energies* **13**, 6577 (2020) doi:10.3390/en13246577
- [190] Y. H. Hui, *Food Biochemistry & Food Processing*, Oxford: United Kingdom, 2006.
- [191] D. R. GUS, „Wyniki produkcji roślinnej w 2016 roku,” *Informacje i opracowania statystyczne*, Warszawa, 2017.
- [192] A. Borowska, „Zmiany na rynku jabłek w Polsce z uwzględnieniem jabłek regionalnych,” *Roczniki ekonomii rolnictwa i rozwoju obszarów wiejskich*, tom 100, nr 1, pp. 162-167, 2013.
- [193] D. C. Ferree i I. J. Warrington, *Apples: Botany, Production and Uses*, Cambridge: CABI Publishing, 2003.
- [194] K. G. Lapsley, F. E. Escher i E. Hoehn, „The Cellular Structure of Selected Apple Varieties,” *Food Structure*, tom 11, pp. 339-349, 1992.
- [195] V. I. Candrawinata, J. B. Golding, P. D. Roach i C. E. Stathopoulos, „Total phenolic content and antioxidant activity of apple pomace aqueous extract: effect of time, temperature and water to pomace ratio,” *International Food Research Journal*, tom 21, nr 6, pp. 2337-2344, 2014.
- [196] A. Podśędek, J. Wilska-Jeszka, B. Anders i J. Markowski, „Compositional characterisation of some apple varieties,” *European Food Research and Technology*, tom 210, pp. 268-272, 2000.
- [197] „<https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/171688/nutrients>,” [Online]. [Data uzyskania dostępu: 09 05 2020].
- [198] J. Czapski, „Wykorzystanie owoców i warzyw w produkcji żywności funkcjonalnej,” *Żywność*, tom 4, nr 21, pp. 90-101, 1999.
- [199] A. Olejnik, J. Tomczyk, K. Kowalska i W. Grajek, „Rola naturalnych składników diety w chemioprewencji nowotworów jelita grubego,” *Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej*, tom 64, pp. 175-187, 2010.
- [200] B. Suarez, A. L. Alvarez, Y. Dineiro Garcia, G. del Barrio, A. Picinelli Lobo i F. Parra, „Phenolic profiles, antioxidant activity and in vitro antiviral properties of apple pomace,” *Food Chemistry*, tom 120, p. 339–342, 2010.
- [201] T. Hołubowicz, *Sadownictwo w Wielkopolsce*, Poznań: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1987.

-
- [202] Z. Kawecki, T. Kawecka i B. Wierzbicka, *Ogrodnictwo - wybrane zagadnienia*, Łomża: Wydawnictwo Wyższej Szkoły Agrobiznesu w Łomży, 1997.
- [203] R. L. Granger, S. Khanizadeh i Y. Groleau, „Performance of four apple cultivars grafted on four rootstocks,” *HortScience*, tom 29, nr 5, pp. 475-476, 1994.
- [204] M. Kosmala i K. Kołodziejczyk, „Procyjanidyny najpopularniejszych w Polsce deserowych odmian jabłek,” *ŻYWNOŚĆ. Nauka. Technologia. Jakość*, tom 2, nr 47, pp. 124-134, 2006.
- [205] A. Mike-Jeziorska, „Jabłoń domowa 'Lobo',”
http://cdn24.ogrod.smcloud.net/s/user_photos/thumbnails/50632_8fd9f4cbd67a90b7_1024x768_crop_rozmiar-niestandardowy.jpg, 01.05.2019.
- [206] „https://www.fresh-market.pl/files/1183127960/jablka_lobo_390_041.jpg,” 01.05.2019.
- [207] G. Pierzynowska-Korniak, R. Zadernowski, J. Fornal i J. Nesterowicz, „The Microstructure of selected apple varieties,” *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, tom 5, nr 2, 2002.
- [208] S. Kierczyńska, „Apple Consumers' Preferences on the Example of the Poznan University of Life Science Students,” *Journal of Agribusiness and Rural Development*, tom 4, nr 30, pp. 83-93, 2013.
- [209] <https://orzesek.info/img/odmiany/ligol.jpg>.
- [210] <https://www.google.com/url?sa=i&source=imgres&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiZitOUobnhAhWsw8QBHWvACI4QjRx6BAgBEAU&url=https%3A%2F%2Fpl.all.biz%2Fjablka-odmiany-ligol-256142&psig=AOvVaw0mQkxHV3LRMnvcH5KWI7F&ust=1554564224867309>.
- [211] A. Konarska, „Morphological, histological and ultrastructural changes in fruit epidermis of apple *Malus Domestica* cv. Ligol (Rosaceae) at fruit set, maturity and storage,” *Acta Biologica Cracoviensia*, tom 56, nr 2, pp. 35-48, 2014.
- [212] R. Biegańska-Marecik i J. Czapski, „Porównanie przydatności odmian jabłek do produkcji plasterków o małym stopniu przetworzenia,” *Acta Scientiarum Polonorum*, tom 2, nr 2, pp. 115-127, 2003.
- [213] [https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjA4eHpobnhAhXFdJoKHJY-BuQQjRx6BAgBEAU&url=https%3A%2F%2Fpl.wikipedia.org%2Fwiki%2FRubin_\(jab%25C5%2582o%25C5%2584\)&psig=AOvVaw08EjVR-37IVy0itG7OF1vV&ust=1554564339722786](https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjA4eHpobnhAhXFdJoKHJY-BuQQjRx6BAgBEAU&url=https%3A%2F%2Fpl.wikipedia.org%2Fwiki%2FRubin_(jab%25C5%2582o%25C5%2584)&psig=AOvVaw08EjVR-37IVy0itG7OF1vV&ust=1554564339722786).
- [214] <https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjB3OSMornhAhXj6aYKHQnMA-IQjRx6BAgBEAU&url=https%3A%2F%2Fpl.depositphotos.com%2F37280685%2Fstock-photo-rubin-variety-apples-lying-in.html&psig=AOvVaw08EjVR-37IVy0itG7OF1vV&ust=1554>.

-
- [215] S. Porebski, M. Leja, J. Skrzyński i P. Banach, „Wpływ podkładek karłowych na wzrost i owocowanie jabłoni odmiany "Rubin",” *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, tom 539, nr 2, 2009.
- [216] I. Szot, „Jakość kwiatów i owoców w zależności od ich lokalizacji w koronie drzew jabłoni odmiany "Rubin",” *Acta Agrophysica*, tom 15, nr 1[177], 2010.
- [217] B. Łata, M. Przeradzka i M. Binkowska, „Great Differences in Antioxidant Properties Exist between 56 Apple Cultivars and Vegetation Seasons,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, tom 53, nr 23, p. 8970–8978, 2005.
- [218] J. Wruss, G. Waldenberger, S. Huemer, P. Uygun, P. Lanzerstorfer, U. Muller, O. Hoglinger i J. Weghuber, „Compositional characteristics of commercial beetroot products and beetroot juice prepared from seven beetroot varieties grown in Upper Austria,” *Journal of Food Composition and Analysis*, tom 42, pp. 46-55, 2015.
- [219] <https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiyoOArrnhAhXwwosKHaLnDEMqjRx6BAgBEAU&url=https%3A%2F%2Fwww.rynek-rolny.pl%2Fartykul%2Fwszystko-o-uprawie-buraka-cwiklowego-to-wartowiedziec.html&psig=AOvVaw2H10sSZA7WyQ6PenGuqRB>.
- [220] M. Knaflewski, W. Krzesiński i A. Małachowski, *Biologia i odmianoznawstwo roślin warzywnych*, Poznań: Wydawnictwo Akademii Rolniczej, 1999.
- [221] A. A. Szopińska i M. Gawęda, „Comparison of yield and quality of red beet roots cultivated using conventional, integrated and organic method,” *Journal of Horticultural Research*, tom 21, nr 1, pp. 107-114, 2013.
- [222] F. Stagnari, A. Galieni, S. Specca i M. Pisante, „Water stress effects on growth, yield and quality traits of red beet,” *Scientia Horticulturae*, tom 165, pp. 13-22, 2014.
- [223] W. Gabel i K. M. Świeżyński, *Hodowla i nasiennictwo ziemniaka*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1977.
- [224] I. Stypa, „Jadalne odmiany ziemniaka w walce z otyłością,” IHAR, Bonin, 2015.
- [225] B. Przygoda, H. Kunachowicz, I. Nadolna i K. Iwanow, *Wartość odżywcza wybranych produktów spożywczych i typowych potraw*, Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2019.
- [226] W. Leszczyński, „Jakość ziemniaka konsumpcyjnego,” *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, tom 4, nr 25, pp. 5-26, 2000.
- [227] H. C. Thompson i W. C. Kelly, *Vegetable Crops*, New York: McGraw Hill Book Company Inc., 1957.
- [228] K. Konstankiewicz, M. Gancarz, A. Król i K. Pawlak, „Wyznaczanie parametrów struktury tkanki mięsistej bulwy ziemniaka odmian 'Danusia' i 'Kuba',” *Technica Agraria*, tom 1, nr 2, pp. 23-32, 2002.

-
- [229] E. Troncoso, R. Zuniga, C. Ramirez, J. Parada i J. C. Germain, „Microstructure of Potato Products: Effect on Physico-Chemical Properties and Nutrient Bioavailability,” *Food*, tom 3, nr Special Issue 2, pp. 41-54, 2009.
- [230] B. Krzysztofik, „Wpływ miejsca przechowywania na zmiany cech jakościowych bulw ziemniaka,” *Acta Agrophysica*, tom 11, nr 2, pp. 449-456, 2008.
- [231] B. Pyryt i H. Kolenda, „Wpływ odmiany ziemniaków i sposobu ich obróbki kulinarnej na zawartość kadmu i ołowiu w bulwach po ugotowaniu,” *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, tom 1, nr 46, pp. 114-120, 2006.
- [232] B. Pyryt i H. Kolenda, „Charakterystyka jakości sensorycznej bulw gotowanych w zależności od odmiany ziemniaka i sposobu gotowania,” *Bromatologia. Chemia. Toksykologia*, tom 42, nr 3, pp. 386-390, 2009.
- [233] J. Chotkowski i I. Stypa, „Odmiany ziemniaków - charakterystyka tabelaryczna,” IHAR, Bonin, 2010.
- [234] J. Jakowska, M. Pietraszko i B. Lutomirska, „Analiza stabilności plonowania wybranych odmian ziemniaka (*Solanum tuberosum* L.) na glebie lekkiej,” *Fragmenta Agronomica*, tom 32, nr 3, pp. 32-43, 2015.
- [235] Ł. Ochnik, „Wpływ budowy wewnętrznej korzenia marchwi na rozkłady przemieszczeń i nacisków powierzchniowych przy ściskaniu promieniowym,” Praca magisterska, Instytut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław, 2007.
- [236] K. Jąder, „Zmiany w konsumpcji owoców i ich przetworów w Polsce w latach 1998-2012,” *Roczniki Naukowe Ekonomii Rolnictwa i Rozwoju Obszarów Wiejskich*, tom 1013, pp. 98-106, 2014.
- [237] „<https://ogrodnik.sklep.pl/images/produkty/4213.jpg>,” 06.04.2019.
- [238] K. Usha, M. Thakre, A. K. Goswami i N. G. Deepak, *Fundamental of Fruit Production*, New Delhi: Indian Agricultural Research Institute, 2014.
- [239] J. K. Kundu i K.-S. Chun, „The Promise of Dried Fruits in Cancer Chemoprevention,” *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, tom 15, pp. 3343-3352, 2014.
- [240] N. Motohashi, S. Yoshiaki, M. Kawase, S. Tani, H. Sakagami, K. Satoh, H. Nakashima, I. Mucsi, A. Varga i J. Molnar, „Cancer prevention and therapy with kiwifruit in Chinese folklore medicine: a study of kiwifruit extracts,” *Journal of Ethnopharmacology*, tom 81, nr 3, pp. 357-364, 2002.
- [241] E. Bursal i I. Gulcin, „Polyphenol contents and in vitro antioxidant activities of lyophilised aqueous extract of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*),” *Food Research International*, tom 44, nr 5, pp. 1482-1489, 2011.
- [242] „http://cdn5.ogrod.smcloud.net/s/user_photos/thumbnails/129259_dynea_1024x768_crop_rozmiar-niestandardowy.jpg,” 06.04.2019.

-
- [243] A. Nawirska, A. Sokół-Łętowska, A. Z. Kucharska, A. Biesiada i M. Bednarek, „Porównanie zawartości frakcji włókna pokarmowego w odmianach dyni z gatunku *Cucurbita Maxima* i *Cucurbita pepo*,” *ŻYWNOSĆ. Nauka. Technologia. Jakość*, tom 1, nr 56, pp. 65-73, 2008.
- [244] Z. Zdrojewicz, A. Błaszczuk i M. Wróblewska, „Pumpkin – healthy, but forgotten,” *Medycyna Rodzinna*, tom 2, pp. 70-74, 2016.
- [245] B. Kuczyński, A. Gramza-Michałowska, J. Kobus-Cisowska i D. Kmiecik, „Działanie prozdrowotne pestek dyni,” *Przemysł spożywczy*, tom 70, nr 11, pp. 37-39, 2016.
- [246] N. M. Panagiotou, V. T. Karathanos i Z. B. Maroulis, „Effect of osmotic agent on osmotic dehydration of fruits,” *Drying Technology*, tom 17, nr 1 i 2, pp. 175-189, 1999.
- [247] D. Witrowa-Rajchert i P. L. Piotr, „Rehydration properties of dried plant tissues,” *International Journal of Food Science and Technology*, tom 41, p. 1040–1046, 2006.
- [248] B. Stępień, M. Paślawska i B. Jaźwiec, „Wpływ metody suszenia na zdolność do rehydracji suszonej pietruszki,” *Inżynieria Rolnicza*, tom 4, nr 129, pp. 251-256, 2011.
- [249] M. Cybul i R. Nowak, „Przegląd metod stosowanych w analizie właściwości antyoksydacyjnych wyciągów roślinnych,” *Herba Polonica*, tom 54, nr 1, pp. 68-78, 2008.
- [250] R. Re, N. Pellegrini, A. Proteggente, A. Pannala, M. Yang i C. Rice-Evans, „Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay,” *Free Radical Biology and Medicine*, tom 26, nr 9, pp. 1231-1237, 1999.
- [251] M. Beigi, „Hot air drying of apple slices: dehydration characteristics and quality assessment,” *Heat and Mass Transfer*, tom 52, nr 8, pp. 1435-1442, 2016.
- [252] R. Zaremba, E. Biller i A. Ekielski, „Zmiany barwy jabłek w czasie przebiegu procesu suszenia konwekcyjnego,” *Inżynieria Rolnicza*, tom 5, nr 93, pp. 429-435, 2007.
- [253] D. Wichrowska, K. Gościńska, T. Knapowski i W. Kozera, „Wpływ metod suszenia na barwę plastrów wybranych odmian jabłek,” w *Rola procesów technologicznych w kształtowaniu jakości żywności*, Kraków, Polskie Towarzystwo Technologów Żywności, 2016, pp. 23-33.
- [254] K. Wilczyński, Z. Kobus, R. Nadulski i M. Szmigielski, „Assessment of the Usefulness of the Twin-Screw Press in Terms of the Pressing Efficiency and Antioxidant Properties of Apple Juice,” *Processes — Open Access Journal*, tom 8, nr 101, 2020.
- [255] J. Marousek, L. Kolar, M. Vochozka, V. Stehel i A. Marouskova, „Biochar reduces nitrate level in red beet,” *Environmental Science and Pollution Research*, tom 25, pp. 18200-18203, 2018.
- [256] S. V. Gokhale i S. S. Lele, „Dehydration of Red Beet Root (*Beta vulgaris*) by Hot Air Drying: Process Optimization and Mathematical Modeling,” *Food Science and Biotechnology*, tom 20, nr 4, pp. 955-964, 2011.
- [257] S. V. Gokhale i S. S. Lele, „Betain content and antioxidant activity of *Beta vulgaris*: Effect of hot air convective drying and storage,” *Journal of Food Processing and Preservation*, tom 38, nr 1, pp. 585-590, 2014.

-
- [258] M. Kowczyk-Sadowy, S. Obidziński, M. Joka i J. Piekut, „Ocena zawartości związków fenolowych i aktywności wody w wybranych warzywach poddanych suszeniu,” *Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego*, tom 18, nr 2/4, pp. 19-23, 2016.
- [259] K. J. Chua, A. S. Mujumdar, S. K. Chou, M. N. A. Hawlader i J. C. Ho, „Convective drying of banana, guava and potato pieces: Effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics and color change,” *Drying Technology*, tom 18, nr 4-5, pp. 907-936, 2000.
- [260] J. Bondaruk i M. Markowski, „Wpływ mikrofalowo-próżniowego odwadniania kostki ziemniaczanej na jakość suszu,” *Inżynieria Rolnicza*, tom 9, nr 1, pp. 41-47, 2005.
- [261] G. Marquez i M. C. Anon, „Influence of Reducing Sugars and Amino Acids in the Color Development of Fried Potatoes,” *Journal of Food Science*, tom 51, nr 1, pp. 157-160, 1986.
- [262] V. Lavelli, B. Zanoni i A. Zaniboni, „Effect of water activity on carotenoid degradation in dehydrated carrots,” *Food Chemistry*, tom 104, nr 4, pp. 1705-1711, 2007.
- [263] H. Nahimana, A. S. Mujumdar i M. Zhang, „Drying and radial shrinkage characteristics and changes in color and shape of carrot tissues (*Daucus carota* L) during air drying,” *African Journal of Biotechnology*, tom 10, nr 68, pp. 15327-15345, 2011.
- [264] P. P. Lewicki i E. Duszczek, „Color change of selected vegetables during convective air drying,” *International Journal of Food Properties*, tom 1, nr 3, pp. 263-273, 1998.
- [265] I. Doymaz, „Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices,” *Heat and Mass Transfer*, tom 53, nr 1, pp. 25-35, 2017.
- [266] J. Frias, E. Penas, M. Ullate i C. Vidal-Valverde, „Influence of drying by convective air dryer or power ultrasound on the vitamin C and β -carotene content of carrots,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, tom 58, pp. 10539-10544, 2010.
- [267] Y. W. Park, „Effect of freezing, thawing, drying and cooking on carotene retention in carrots, broccoli and spinach,” *Journal of Food Science*, tom 52, pp. 1022-1025, 1987.
- [268] A. C. Soria, M. Corzo-Martinez, A. Montilla, E. Riera, J. Gamboa-Santos i M. Villamiel, „Chemical and physicochemical quality parameters in carrots dehydrated by power ultrasound,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, tom 58, nr 13, pp. 7715-7722, 2010.
- [269] W. Q. Yan, M. Zhang, L. L. Huang, J. Tang, A. S. Mujumdar i J. C. Sun, „Studies on different combined microwave drying of carrots pieces,” *International Journal of Food Science & Technology*, tom 45, nr 10, pp. 2141-2148, 2010.
- [270] H. H. Nijhuis, H. M. Torringa, S. Muresan, D. Yuksel, C. Leguijt i W. Kloek, „Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables,” *Trends in Food Science and Technology*, tom 9, nr 1, pp. 13-20, 1998.
- [271] N. Ghanem, D. Mihoubi, N. Kechaou i N. B. Milhoubi, „Microwave dehydration of three citrus peel cultivars: Effect on water and oil retention capacities, color, shrinkage and total phenols content,” *Industrial Crops and Products*, tom 40, pp. 167-177, 2012.

-
- [272] M. C. Garau, S. Simal, C. Rosello i A. Fermenta, „Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties of dietary fibre and antioxidant capacity of orange (*Citrus aurantium* v. *Canoneta*) by-products,” *Food Chemistry*, tom 104, pp. 1014-1024, 2007.
- [273] L. R. Howard i L. E. Griffin, „Lignin formation and surface discoloration of minimally processed carrots sticks,” *Journal of Food Science*, tom 58, pp. 1065-1067, 1993.
- [274] A. Becerra-Moreno, J. Benavides, L. Cisneros-Zevallos i D. A. Jacobo-Velazquez, „Plants as biofactories: glyphosate-induced production of shikimic acid and phenolic antioxidants in wounded carrots tissue,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, tom 60, pp. 11378-11386, 2012.
- [275] D. A. Jacobo-Velazquez, G. B. Martinez-Hernandez, S. Del C Rodriguez, C. M. Cao i L. Cisneros-Zevallos, „Plants as biofactories: physiological role of reactive oxygen species on the accumulation of the phenolic antioxidants in carrots tissue under wounding and hyperoxia stress,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, tom 59, pp. 6583-6593, 2011.
- [276] B. B. Surjadinata i L. Cisneros-Zevallos, „Biosynthesis of phenolic antioxidants in carrots tissue increases with wounding intensity,” *Food Chemistry*, tom 134, pp. 615-624, 2012.
- [277] M. Grembecka, „Sugar alcohols—their role in the modern world of sweeteners: a review,” *European Food Research and Technology*, tom 241, pp. 1-14, 2015.
- [278] M. Nowacka, U. Tylewicz, L. Laghi, M. Dalla Rosa i D. Witrowa-Rajchert, „Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration,” *Food Chemistry*, tom 144, pp. 18-25, 2014.
- [279] V. Panarese, L. Laghi, P. Annamaria, U. Tylewicz, M. Dalla Rosa i P. Rocculi, „Effect of osmotic dehydration on *Actinidia deliciosa* kiwifruit: A combined NMR and ultrastructural study,” *Food Chemistry*, tom 132, nr 4, pp. 1706-1712, 2012.
- [280] M. Fathi, M. Mohebbi i S. M. Ali Razavi, „Application of Image Analysis and Artificial Neural Network to Predict Mass Transfer Kinetics and Color Changes of Osmotically Dehydrated Kiwifruit,” *Food and Bioprocess Technology*, tom 4, p. 1357–1366, 2011.
- [281] S. Simal, A. Fermenta, J. A. Carcel i C. Rosello, „Mathematical modelling of the drying curves of kiwi fruits: influence of the ripening stage,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, tom 85, p. 425 – 432, 2005.
- [282] A. Gianotti, G. Sacchetti, M. E. Guerzoni i M. Dalla Rosa, „Microbial aspects on short-time osmotic treatment of kiwifruit,” *Journal of Food Engineering*, tom 49, nr 2, pp. 265-270, 2001.
- [283] J. Wang, H.-W. Xiao, J.-H. Ye, J. Wang i V. Raghavan, „Ultrasound Pretreatment to Enhance Drying Kinetics of Kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) Slices: Pros and Cons,” *Food and Bioprocess Technology*, tom 12, p. 865–876, 2019.
- [284] L. Diamante, M. Durand, G. Savage i L. Vanhanen, „Effect of temperature on the drying characteristics, colour and ascorbic acid content of green and gold kiwifruits,” *International Food Research Journal*, tom 17, pp. 441-451, 2010.

-
- [285] M. Maskan, „Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying,” *Journal of Food Engineering*, tom 48, pp. 169-175, 2001.
- [286] A. Ciużyńska, H. Kowalska, K. Czajkowska i A. Lenart, „Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food,” *Trends in Food Science & Technology*, tom 50, p. 186e192, 2016.
- [287] Y. Fuke, K. Sasago i H. Matsuoka, „Determination of Chlorophylls in Kiwi Fruit and Their Changes during Ripening,” *Journal of Food Science*, tom 50, nr 5, pp. 1220-1223, 1985.
- [288] C. Weemaes, V. Ooms, Indrawati, L. Ludikhuyze, I. Van den Broeck, A. Van Loey i M. Hendrickx, „Pressure-Temperature Degradation of Green Color in Broccoli Juice,” *Journal of Food Science*, tom 64, nr 3, pp. 504-508, 1999.
- [289] S. Kamiloglu, G. Toydemir, D. Boyacioglu, J. Beekwilder, R. D. Hall i E. Capanoglu, „A Review on the Effect of Drying on Antioxidant Potential of Fruits and Vegetables,” *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, tom 56, pp. S110-S129, 2016.
- [290] P. Udomkun, M. Nagle, B. Mahayothee, D. Nohr, A. Koza i J. Müller, „Influence of air drying properties on non-enzymatic browning, major bio-active compounds and antioxidant capacity of osmotically pretreated papaya,” *LWT - Food Science and Technology*, tom 60, pp. 914-922, 2015.
- [291] P. Chottamom, R. Kongmanee, C. Manklang i S. Soponronnarit, „Effect of Osmotic Treatment on Drying Kinetics and Antioxidant Properties of Dried Mulberry,” *Drying Technology*, tom 30, p. 80–87, 2012.
- [292] A. Lenart, „Mathematical modelling of osmotic dehydration of apple and carrot,” *Polish Journal of Food Nutrition Science*, tom 1, pp. 1-33, 1992.
- [293] C. Tortoe, „A review of osmodehydration for food industry,” *African Journal of Food Science*, tom 4, nr 6, pp. 303-324, 2010.
- [294] P. M. Azoubel i F. E. X. Murr, „Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomatoes,” *Journal of Food Engineering*, tom 61, pp. 291-295, 2004.
- [295] Y. K. Pan, L. J. Zhao, Y. Zhang, G. Chen i A. S. Mujumdar, „Osmotic Dehydration Pretreatment in Drying of Fruits and Vegetables,” *Drying Technology*, tom 21, nr 6, pp. 1101-1114, 2003.
- [296] C. C. Garcia, M. A. Mauro i M. Kimura, „Kinetics of osmotic dehydration and air-drying of pumpkins (*Cucurbita moschata*),” *Journal of Food Engineering*, tom 82, p. 284–291, 2007.
- [297] A. Lenart i J. M. Flink, „Osmotic concentration of potato. Criteria for the end point of the osmotic process,” *Journal of Food Science and Technology*, tom 19, pp. 45-63, 1984.
- [298] A. Ciużyńska, A. Lenart i P. Kawka, „Wpływ temperatury liofilizacji i metod suszenia na wybrane właściwości suszonej dyni,” *Acta Agrophysica*, tom 20, nr 1, pp. 39-51, 2013.

-
- [299] J. R. d. J. Junqueira, J. L. G. Correa i D. B. Ernesto, „Microwave, convective, and intermittent microwave-convective drying of pulsed vacuum osmodehydrated pumpkin slices,” *Journal of Food Processing & Preservation*, tom 41, nr 6, p. p.n/a, 2017.
- [300] R. P. F. Guine i M. J. Barroca, „Effect of drying treatments on texture and color of vegetables (pumpkin and green pepper),” *Food and Bioproducts Processing*, tom 90, p. 58–63, 2012.
- [301] K. O. Falade i O. T. Shogaolu, „Effect of pretreatments on air-drying pattern and color and dried pumpkin (*Cucurbita maxima*) slices,” *Journal of Food Process Engineering*, tom 33, nr 6, pp. 1129-1147, 2010.
- [302] D. Konopacka, A. Seroczyńska, A. Korzeniewska, K. Jesionkowska, K. Niemirowicz-Szczytt i W. Płocharski, „Studies on the usefulness of *Cucurbita maxima* for the production of ready-to-eat dried vegetable snacks with a high carotenoid content,” *LWT - Food Science and Technology*, tom 43, nr 2, pp. 302-309, 2010.
- [303] I. Guiamba, L. Ahrne, M. A. M. Khan i U. Svanberg, „Retention of β -carotene and vitamin C in dried mango osmotically pretreated with osmotic solutions containing calcium or ascorbic acid,” *Food and Bioproducts Processing*, tom 98, pp. 320-326, 2016.
- [304] P. M. Azoubel, M. da Rocha Amorim, S. S. B. Oliveira, M. I. S. Maciel i J. D. Rodrigues, „Improvement of Water Transport and Carotenoid Retention During Drying of Papaya by Applying Ultrasonic Osmotic Pretreatment,” *Food Engineering Reviews*, tom 7, nr 2, pp. 185-192, 2015.
- [305] S. N. Dirim i G. Caliskan, „Determination of the effect of freeze drying process on the production of pumpkin (*Cucurbita moschata*) puree powder and the powder properties,” *The journal of food*, tom 37, nr 4, pp. 203-210, 2012.
- [306] S. Siriamornpun, J. Ratseewo, N. Kaewseejan i N. Meeso, „Effect of osmotic treatments and drying methods on bioactive compounds in papaya and tomato,” *RSC Advances*, tom 5, nr 24, p. 18579–18587, 2015.
- [307] M. M. Rodriguez, A. Rodriguez i R. H. Mascheroni, „Color, Texture, Rehydration Ability and Phenolic Compounds of Plums Partially Osmodehydrated and Finish-Dried by Hot Air,” *Journal of Food Processing and Preservation*, tom 39, nr 6, pp. 2647-2662, 2015.
- [308] E. Jakubczyk i D. Uziak, „Charakterystyka instrumentalnych metod badania właściwości mechanicznych wybranych owoców i warzyw,” *Inżynieria Rolnicza*, tom 11, nr 71, pp. 181-189.
- [309] G. Łysiak, „The influence of harvest maturity and basic macroelement content in fruit on the incidence of diseases and disorders after storage of the ‘Ligol’ apple cultivar,” *Folia Horticulturae*, tom 25, nr 1, pp. 31-39, 2013.
- [310] B. Sieliwanowicz, A. H. Hałasińska, M. Trzcńska, A. Jakubowski, J. Lipowski i S. Skąpska, „Zmiany zawartości związków fenolowych, parametrów barwy i aktywności przeciwutleniającej w czasie przechowywania soków z wybranych odmian jabłek,” *Acta Scientiarum Polonorum*, tom 4, nr 1, pp. 83-91, 2005.

-
- [311] D. Lizarraga, C. Lozano, J. J. Briede, J. H. van Delft, S. Tourino, J. J. Centelles, J. L. Torres i M. Cascante, „The importance of polymerization and galloylation for the antiproliferative properties of procyanidin-rich natural extracts,” *The FEBS Journal*, tom 274, p. 4802–4811, 2007.
- [312] V. Cheynier, J. Rigaud i J. M. R. da Silva, *Structure of Procyanidin Oligomers Isolated from Grape Seeds in Relation to Some Their Chemical Properties*, New York: Plenum Press, 1992, pp. 281-294.
- [313] P. J. Gentile, „Method and Apparatus for the Prevention of Scorching of Fabric Subjected to Microwave Heating”. USA Patent 5325600, 05 06 1994.
- [314] K. Sacilik, A. Konuralp Elicin i U. Guran, „Drying kinetics of U” ryani plum in a convective hot-air dryer,” *Journal of Food Engineering*, tom 76, pp. 362-368, 2006.
- [315] Y. Tulek, „Drying Kinetics of Oyster Mushroom (*Pleurotus ostreatus*) in a Convective Hot Air Dryer,” *Journal of Agricultural Science and Technology*, tom 13, pp. 655-664, 2011.
- [316] G. Łysiak, „The influence of harvest maturity and basic macroelement content in fruit on the incidence of diseases and disorders after storage of the ‘Ligol’ apple cultivar,” *Folia Horticulturae*, tom 25, nr 1, pp. 31-39, 2013.
- [317] T. Guz, „Komputerowa ocena obrazów w ocenie rozkładu skrobi podczas dojrzewania jabłek,” *Inżynieria Rolnicza*, tom 7, pp. 199-207, 2006.
- [318] B. Maniak, W. Wójcik, B. Dobrzański i R. Rybczyński, „Zastosowanie chitozanu w produkcji mało przetworzonych jabłek,” *Acta Scientiarum Polonorum. Technologia Alimentaria*, tom 2, nr 1, pp. 41-51, 2003.
- [319] B. Kiczorowska, „Kumulacja ołowiu i kadmu w skórce i mięszu wybranych odmian jabłek,” *Ochrona środowiska i zasobów naturalnych*, tom 40, pp. 365-371, 2009.
- [320] M. Michalak, K. Paradowska i A. Zielińska, „Możliwości wykorzystania w kosmetologii wybranych olejów roślinnych jako źródła karotenoidów,” *Postępy fitoterapii*, tom 19, nr 1, pp. 10-17, 2018.
- [321] „Ziemniak w walce z otyłością,”
<http://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news,403041,ziemniak-w-walce-z-otyloscia.html>,
22.04.2019.
- [322] J. Pokorny, N. Yanishlieva i M. Gordon, *Antioxidants in Food*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2001.
- [323] L. B. Rockland i S. K. Nishi, „Influence of water activity on food product quality and stability,” *Food Technology*, tom 34, nr 4, p. 42, 1980.
- [324] N. Dilbaghi i S. Sharma, „Food spoilage, food infections and intoxications caused by microorganisms and methods for their detection,” *Food and Industrial Microbiology*, 2007.

-
- [325] R. F. Witzel, R. W. Burnham i J. W. Onley, „Threshold and suprathreshold perceptual color differences,” *Journal of the Optical Society of America*, tom 63, nr 5, pp. 615-625, 1973.
- [326] G. A. Bray, S. J. Nielsen i B. M. Popkin, „Consumption of high-fructose corn syrup in beverages may play a role in the epidemic of obesity,” *The American Journal of Clinical Nutrition*, tom 79, pp. 537-543, 2005.
- [327] K. Parker, S. Michelle i V. C. Nwosu, „High fructose corn syrup: Production, uses and public health concerns,” *Biotechnology and Molecular Biology Review*, tom 5, nr 5, pp. 71-78, 2010.
- [328] C. D. Nora, C. D. Muller, G. S. de Bona, A. D. O. Rios, P. F. Hertz, A. de Jong Jablonski i S. H. Flores, „Effect of processing on the stability of bioactive compounds from red guava (*Psidium cattleianum* Sabine) and guabiju (*Myrcianthes pungens*),” *Journal of Food Composition and Analysis*, tom 34, pp. 18-25, 2014.
- [329] J. Mazur, P. Sobczak, J. Grochowicz, M. Panasiewicz i K. Zawiślak, „Dynamika procesu suszenia konwekcyjnego sera parmezan na cele przyprawowe,” *Inżynieria Rolnicza*, tom 9, nr 11, pp. 317-323, 2005.
- [330] B. Hiranvaracha, S. Devahastin i N. Chiewchan, „Effects of acid pretreatments on some physicochemical properties of carrot undergoing hot air drying,” *Food and Bioprocess Processing*, tom 89, nr 2, pp. 116-127, 2011.