



**UNIwersytet  
PRZYRODNICZY  
WE WROCLAWIU**

**WYDZIAŁ PRZYRODNICZO-TECHNOLOGICZNY**

**mgr inż. Klaudia Masztalerz**

**Wpływ właściwości fizyko-chemicznych roztworów  
osmotycznych na proces odwadniania surowców roślinnych i  
jakość suszu**

Influence of the physicochemical properties of osmotic solutions on the process of osmotic  
dehydration of plant materials and on the quality of the dried material

**Praca doktorska  
wykonana pod kierunkiem  
dr. hab. inż. Krzysztofa Lecha, prof. uczelni  
Instytut Inżynierii Rolniczej**

Wrocław 2021

*Słowa podziękowania kieruję do Promotora  
dr. hab. inż. Krzysztofa Lecha, prof. uczelni  
za nieocenione wsparcie, życzliwość i poświęcony czas  
oraz niezastąpioną pomoc przy realizacji badań, a także  
podczas przygotowywania niniejszej pracy doktorskiej*

*Pragnę także podziękować prof. dr hab. inż. Adamowi Figłowi  
za możliwość rozpoczęcia pracy doktorskiej pod jego opieką  
oraz za wszystkie dodatkowe możliwości rozwoju*

*Dziękuję także Współautorom publikacji,  
których pomoc i wsparcie  
umożliwiły powstanie niniejszej pracy doktorskiej*

*Szczególnie dziękuję mojemu Mężowi,  
bez którego to wszystko nie byłoby możliwe*

## Wykaz powiązanych tematycznie artykułów naukowych

L.p.	Publikacja	punkty MNiSW	IF	Udział %
1	<p><b>Masztalerz, K.</b>, Lech, K., Wojdyło, A., Nowicka, P., Michalska-Ciechanowska, A., &amp; Figiel, A. (2020). The impact of the osmotic dehydration process and its parameters on the mass transfer and quality of dried apples. <i>Drying Technology</i>, 1–13.</p> <p><a href="https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1741607">https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1741607</a></p> <p><i>Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na przeprowadzeniu procesów odwadniania osmotycznego oraz określeniu właściwości fizycznych i pomoc przy oznaczaniu właściwości chemicznych roztworów osmotycznych i odwadnianych materiałów, analizie uzyskanych wyników, przeprowadzeniu dyskusji i opracowywaniu manuskryptu.</i></p>	100	2,988	40
2	<p><b>Masztalerz, K.</b>, Figiel, A., Michalska-Ciechanowska, A., Wojdyło, A., Nowicka, P., &amp; Lech, K. (2020). The Effect of Filtration on Physical and Chemical Properties of Osmo-Dehydrated Material. <i>Molecules</i>, 25(22), 5412.</p> <p><a href="https://doi.org/10.3390/molecules25225412">https://doi.org/10.3390/molecules25225412</a></p> <p><i>Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na przeprowadzeniu procesów odwadniania osmotycznego oraz określeniu właściwości fizycznych oraz uczestnictwo przy oznaczaniu właściwości chemicznych roztworów osmotycznych i odwadnianych materiałów oraz analizie uzyskanych wyników, przeprowadzeniu dyskusji i opracowywaniu manuskryptu.</i></p>	100	3,267	50

---

Castillo-Gironés, S., **Masztalerz, K.**, Lech, K., Issa-Issa, H., Figiel, A., & Carbonell-Barrachina Á. A. (2021). Impact of osmotic dehydration and different drying methods on the texture and sensory characteristic of sweet corn kernels. *Journal of Food Processing and Preservation*. 40 1,405 40  
3 <https://doi.org/10.1111/jfpp.15383>

*Mój wkład w powstanie tej publikacji dotyczył uczestnictwa w przeprowadzeniu procesów odwadniania i suszenia, a także określania właściwości fizycznych wysuszonego materiału, analizy wyników i przeprowadzenia dyskusji oraz opracowania manuskryptu.*

---

**Masztalerz, K.**, Łyczko, J., Lech, K., Szumny, A., & Figiel, A. (2021). The effect of filtrated osmotic solutions based on chokeberry juice enriched with mint extract on volatile compounds in dried apples. *Journal of Food Process Engineering*. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13728> 100 1,703 50  
4

*Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu koncepcji oraz metodyki, przeprowadzeniu procesów odwadniania i suszenia oraz określeniu właściwości fizycznych roztworów osmotycznych oraz suszu, analizie uzyskanych wyników, przeprowadzeniu dyskusji i opracowywaniu manuskryptu.*

---

Łączna liczba punktów dokumentujących osiągnięcie naukowe wynosi 340 pkt. MNiSW. Sumaryczny IF dla ww. publikacji zgodnie z rokiem opublikowania wynosi IF=9,363.

Część przedstawionych wyników powstało w efekcie realizacji badań w ramach projektu Preludium 2019/33/N/NZ9/00247 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki (NCN) pt. „Wpływ właściwości fizyko-chemicznych roztworów osmotycznych z udziałem ekstraktów z ziół na proces wymiany masy podczas odwadniania osmotycznego i suszenia surowców roślinnych”, którego jestem Kierownikiem.

## **Spis treści**

<b>Wykaz powiązanych tematycznie artykułów naukowych .....</b>	<b>3</b>
<b>Streszczenie .....</b>	<b>6</b>
<b>Streszczenie w języku angielskim.....</b>	<b>9</b>
1. Wstęp.....	11
2. Hipotezy badawcze i cel pracy .....	15
3. Materiały i metody .....	17
3.1. Materiały .....	17
3.2. Odwadnianie osmotyczne .....	17
3.3. Suszenie.....	18
4. Wyniki i dyskusja .....	20
4.1. Wpływ parametrów procesowych na kinetykę odwadniania osmotycznego i jakość odwadnianego surowca.....	20
4.2. Wpływ właściwości fizycznych roztworów osmotycznych na kinetykę procesu i jakość odwadnianego surowca .....	21
4.3. Wpływ składu chemicznego roztworów osmotycznych na kinetykę procesu i jakość odwadnianego materiału .....	23
4.4. Wpływ właściwości fizykochemicznych roztworów osmotycznych (filtrowanych i niefiltrowanych) na kinetykę suszenia i jakość suszu .....	25
5. Podsumowanie i wnioski.....	28
6. Bibliografia.....	31
<b>Pozostały dorobek naukowy.....</b>	<b>36</b>
<b>Załączniki.....</b>	<b>37</b>

## Streszczenie

Celem niniejszej pracy doktorskiej, powstałej na podstawie cyklu czterech oryginalnych publikacji naukowych, było określenie wpływu właściwości fizykochemicznych roztworu osmotycznego uzyskanego na bazie zagęszczonych soków owocowych wzbogaconych koncentratami aromatów z ziół na kinetykę procesu odwadniania osmotycznego i dosuszania różnymi metodami. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury postawiono cztery hipotezy oraz wyznaczono zadania badawcze, których wykonanie pozwoliło na osiągnięcie założonego celu.

Pierwszym etapem badań było określenie wpływu parametrów procesu tj. mikrofal, ultradźwięków oraz obniżonego ciśnienia na kinetykę procesu odwadniania i jakość odwodnionego materiału (publikacja 1). Uzyskane wyniki badań pozwoliły stwierdzić korzystny wpływ zastosowania wymienionych parametrów procesowych (mikrofal, ultradźwięków i obniżonego ciśnienia) na przyrost substancji *SG* oraz utratę wody *WL*, a także znacząco przyczyniły się do zwiększenia zawartości związków polifenolowych TPC oraz pojemności przeciwutleniającej ABTS i FRAP. Stwierdzono, że korzystne działanie mikrofal wynikało z występowania nagrzewania w całej objętości materiału, które było szczególnie widoczne w początkowym okresie odwadniania. Zastosowanie obniżonego ciśnienia doprowadziło do zwiększenia powierzchni wymiany w materiale, a przez to na wyższy przyrost substancji *SG*. Prowadzenie odwadniania osmotycznego wspomaganego ultradźwiękami doprowadziło do rozluźnienia się struktury materiału dzięki czemu umożliwiło wnikanie związków o większej masie cząsteczkowej i wyższej aktywności biologicznej w głąb odwadnianego materiału.

Następnym krokiem było określenie wpływu właściwości fizycznych roztworów osmotycznych na kinetykę procesu odwadniania oraz na jakość odwadnianego surowca. Badania przeprowadzone w publikacji 2 obejmowały usunięcie związków o większej masie cząsteczkowej z zagęszczonego soku poprzez zastosowanie filtrów o porach różnej wielkości. Dzięki temu możliwe było zbadanie procesu selektywnego wnikania substancji z roztworu w trakcie odwadniania osmotycznego. Korzystny wpływ filtracji został potwierdzony zmianą aktywności wody oraz lepkości roztworu, a także pokazany za pomocą zdjęć SEM. Wpływ właściwości fizycznych roztworu na proces odwadniania został przedstawiony także w publikacji 4, która dotyczyła prowadzenia odwadniania osmotycznego materiału w roztworach osmotycznych na bazie filtrowanych i niefiltrowanych zagęszczonych soków owocowych z dodatkiem i bez dodatku ekstraktu z

mięty. Przedstawione wyniki badań wykazały korzystny wpływ filtracji na lepkość roztworu osmotycznego, a także na przyrost substancji *SG* i ubytek wody *WL* szczególnie w początkowym okresie odwadniania.

Wpływ składu chemicznego roztworu osmotycznego na właściwości fizykochemiczne odwadnianego materiału został przedstawiony w publikacji 2 i 4. Badania przedstawione w publikacji 2 wykazały, że zastosowanie filtrowanych roztworów nie wpływa na wyższą zawartość polifenoli w porównaniu do pozostałych wariantów, natomiast prowadzi do zwiększenia pojemności ABTS i FRAP na koniec procesu dla materiału odwadnianego w filtrowanym roztworze. Wyniki uzyskane w publikacji 4 pozwoliły stwierdzić, że usunięcie większych cząstek z zagęszczonego soku pozwoliło na uzyskanie znacznie wyższej zawartości związków lotnych (karwonu) w odwadnianym materiale, co wytłumaczono selektywnym wnikaniem substancji oraz większą zdolnością przemieszczania się mniejszych cząstek, które pozwoliły na głębsze wniknięcie związków lotnych do materiału. Wykazano, że najkorzystniejsze jest odwadnianie przez krótki okres czasu, gdyż pozwala na uzyskanie najwyższej zawartości związków lotnych.

Natomiast w publikacji 3 i 4 przedstawiono wpływ odwadniania osmotycznego prowadzonego w różnych roztworach osmotycznych na proces dosuszania przy użyciu metody konwekcyjnej, mikrofalowo-próżniowej oraz łączonej składającej się z konwekcyjnego podsuszania i dosuszania mikrofalowo-próżniowego, a także na jakość suszu. Badania przedstawione w publikacji 3 wskazują na znaczące skrócenie czasu suszenia przy użyciu różnych metod poprzez zastosowanie odwadniania osmotycznego jako obróbki wstępnej. Dodatkowo, odwadnianie w zagęszczonym soku jabłkowym wpłynęło na barwę oraz teksturę materiału, a także wpłynęło na uzyskanie znaczących różnic podczas analizy sensorycznej. W publikacji 4 przeprowadzono odwadnianie w filtrowanym i niefiltrowanym zagęszczonym soku owocowym z dodatkiem ekstraktu z mięty. Przeprowadzone badania wykazały znaczący wpływ filtracji na zawartość związków lotnych w suszonym materiale. Usunięcie większych cząstek z zagęszczonego soku wpłynęło na wniknięcie związków lotnych w głąb materiału, a przez to na ich zachowanie w procesie suszenia. Metoda konwekcyjna okazała się najlepsza, co prawdopodobnie było spowodowane większą wartością porowatości zamkniętej, która wpłynęła na dodatkowe zamykanie się związków lotnych w porach materiału, a przez to ich większą zawartość po procesie suszenia.

Przeprowadzone badania wnoszą nową wiedzę w zakresie prowadzenia procesu odwadniania osmotycznego w zagęszczonych sokach owocowych oraz wskazują na szczególną przydatność filtracji tego typu roztworów do uzyskiwania suszu o polepszonej jakości.

**Słowa kluczowe:** odwadnianie osmotyczne; suszenie; filtracja; właściwości fizyczne; zagęszczony sok



## Streszczenie w języku angielskim

The aim of this doctoral thesis, based on a series of four original scientific papers, was to determine the influence of the physicochemical properties of osmotic solutions obtained on the basis of concentrated fruit juices enriched with herbal aroma concentrates on the kinetics of the osmotic dehydration and drying using different methods. Based on the literature review, four hypotheses were formulated and research tasks were set. Implementation of the research tasks allowed to achieve the assumed goal.

The first stage of the research was to determine the effect of the process parameters, i.e. microwaves, ultrasounds and reduced pressure on the kinetics of the osmotic dehydration and the quality of dehydrated material (publication 1). The obtained results showed the beneficial effect of the application of the above-mentioned process parameters (microwaves, ultrasounds and reduced pressure) on the increase of solid gain *SG* and water loss *WL*, and significantly contributed to the increase in the content of total polyphenolic compounds (TPC) and antioxidant capacity (ABTS and FRAP). It was found that the beneficial effect of microwaves resulted from the occurrence of volumetric heating of the material, which was particularly visible in the initial period of dehydration. The application of reduced pressure led to the increase in the surface area in the material, and thus to a higher growth of *SG*. The ultrasound assisted osmotic dehydration led to the loosening of the structure of the material, which allowed for the penetration of compounds with a higher molecular weight and higher biological activity into the dehydrated material.

The next step was to determine the influence of physical properties of osmotic solutions on the kinetics of osmotic dehydration and the quality of dehydrated material. Research carried out in publication 2 involved the removal of compounds with a higher molecular weight from concentrated juice through the use of filters with pores of different sizes. Therefore, it was possible to recognize the process of selective penetration of the substances from osmotic solution into the material during osmotic dehydration. The beneficial effect of filtration was confirmed by the change in water activity and viscosity of the solution, and also confirmed by SEM images. The influence of physical properties of the osmotic solution on the dehydration process was also presented in publication 4, which concerned the osmotic dehydration of the material in osmotic solutions based on filtered and unfiltered concentrated fruit juices with and without the addition of mint extract. The presented test results showed a beneficial effect of filtration on the viscosity of the osmotic

solution, as well as on the increase of *SG* and *WL*, especially in the initial period of dehydration.

The influence of the chemical composition of osmotic solution on the physicochemical properties of dehydrated material was presented in publications 2 and 4. The studies presented in publication 2 showed that the use of filtered solutions did not result in a higher content of polyphenols compared to the other variants, but led to an increase in ABTS and FRAP capacity at the end of the process for material dehydrated in filtered solution. The results obtained in publication 4 allowed to conclude that the removal of particles with high molecular mass from the concentrated juice allowed to obtain a much higher content of volatile compounds (carvone) in the dehydrated material, which was explained by the selective penetration and greater mobility of smaller particles, which allowed for deeper penetration of volatile compounds into the material. Dehydration for a short time was shown to be most advantageous due to the highest volatile compounds content.

Publications 3 and 4 showed the effect of osmotic dehydration carried out in various osmotic solutions on the drying process using convective, vacuum-microwave and combined methods consisting of convective pre-drying and vacuum-microwave finishing drying, as well as on the quality of the dried material. The studies presented in publication 3 showed a significant reduction in drying time using different methods by using osmotic dehydration as a pre-treatment. Additionally, dehydration in concentrated apple juice influenced the color and texture of the material, and also contributed to obtaining significant differences during the sensory analysis. In publication 4, dehydration was carried out in filtered and unfiltered concentrated fruit juice with the addition of mint extract. The conducted research showed a significant influence of filtration on the content of volatile compounds in the dried material. The removal of larger particles from the concentrated juice influenced the penetration of volatile compounds into the material, and thus their behavior in the drying process. At the end, convective drying was recommended due to the higher value of closed porosity, which resulted in additional closure of volatile compounds in the pores of the material, and thus their higher content after the drying process.

Conducted research brings new knowledge in the field of osmotic dehydration carried out in concentrated fruit juices and indicates the particular usefulness of filtration of this type of solutions for obtaining dried material with improved quality.

**Keywords:** osmotic dehydration; drying; filtration; physical properties; concentrated juice

# Opis osiągnięcia

## 1. Wstęp

Odwadnianie osmotyczne (OD) jest procesem polegającym na dwukierunkowej wymianie masy spowodowanej różnicą stężeń między roztworem osmotycznym, a odwadnianym materiałem. W wyniku powstałej różnicy ciśnień osmotycznych, woda z odwadnianego materiału wypływa z surowca do roztworu osmotycznego, natomiast związki zawarte w roztworze osmotycznym wpływają do materiału. Dodatkowo, wypływająca woda zabiera z sobą inne drobnocząsteczkowe związki, w wyniku czego odwadniany materiał traci cenne substancje [1]. W celu zapewnienia odpowiedniej różnicy ciśnień osmotycznych proces odwadniania osmotycznego zachodzi w roztworze hipertonicznym. Powszechnie stosuje się proste roztwory osmotyczne na bazie sacharozy [2–4] lub chlorku sodu [5], a także roztwory powstałe z połączenia tych substancji [6,7]. Zastosowanie tego typu roztworów, poza usunięciem wody, prowadzi także do zwiększenia zawartości soli lub cukru w materiale, co może mieć negatywny wpływ na zdrowie [8,9].

Jednym ze sposobów minimalizacji negatywnego wpływu roztworów soli i cukrów na materiał roślinny jest zastosowanie alternatywnych roztworów osmotycznych, np. na bazie zagęszczonych soków warzywnych lub owocowych. Dotychczas przeprowadzono odwadnianie osmotyczne z wykorzystaniem m.in. zagęszczonego soku jabłkowego [10,11], winogronowego [12], aroniowego [13,14] oraz jabłkowo-wiśniowego [15]. Ponadto, pojawiły się badania prowadzone w roztworze sacharozy z dodatkiem soku z borówki i aronii [16] lub roztworze sacharozy z dodatkiem soku daktylowego [17]. Zastosowanie soków zagęszczonych lub dodatek tego typu soków do roztworu osmotycznego prowadzi nie tylko do usunięcia wody z materiału, ale także do zwiększenia potencjału bioaktywnego odwadnianego surowca [18].

Na przebieg procesu odwadniania osmotycznego ma wpływ wiele czynników związanych z cechami odwadnianego materiału, roztworu osmotycznego, jak i samych parametrów procesu. Do istotnych parametrów procesu należy m.in. czas trwania [19] oraz temperatura procesu [20], które są dość dobrze opisane w literaturze. Natomiast brakuje doniesień na temat wpływu ciśnienia, udziału ultradźwięków czy mikrofal na proces odwadniania osmotycznego prowadzonego w roztworze osmotycznym na bazie zagęszczonego soku.

Proces odwadniania osmotycznego jest zwykle prowadzony pod ciśnieniem atmosferycznym jednak część badań wskazuje, że zastosowanie dodatkowego

oddziaływania, np. w postaci prowadzenia procesu pod obniżonym ciśnieniem może mieć pozytywny wpływ na transport masy w trakcie odwadniania osmotycznego. W rezultacie, gaz znajdujący się w przestworach komórkowych ulega ekspansji, co prowadzi do wytworzenia się różnicy ciśnień między materiałem a otoczeniem. Powstała różnica ciśnień sprzyja usuwaniu powietrza z komórki, dzięki czemu zwiększa się powierzchnia wymiany, co wpływa na większą intensywność transportu składników między materiałem a roztworem osmotycznym [21]. Odwadnianie osmotyczne pod obniżonym ciśnieniem było prowadzone w badaniach przy użyciu jabłek [22], sałaty [23], śliwek [24] i melonów [25].

Kolejnym parametrem, który może wpłynąć na proces odwadniania osmotycznego jest oddziaływanie ultradźwiękami. Wynika to ze sposobu działania ultradźwięków, które prowadzą do szybkich zmian objętości próbki (kompresji i ekspansji), w rezultacie czego dochodzi do powstania pęcherzyków w materiale. Po zapadnięciu się tych pęcherzyków następuje zmiana temperatury, lepkości, napięcia powierzchniowego oraz tworzą się mikro kanały wewnątrz próbki, które ułatwiają transport masy z i do materiału [26]. W rezultacie wymagany czas odwadniania osmotycznego ulega znacznemu skróceniu [27]. Ultradźwięki były dotychczas stosowane w badaniach z użyciem dyni [28], jabłek [29], borówek [30], truskawek [31] czy czosnku [32] i wykazały pozytywne działanie na transport masy między odwadnianym surowcem a roztworem osmotycznym.

Istotny wpływ na proces odwadniania osmotycznego może mieć także zastosowanie mikrofal, które ze względu na nagrzewanie próbki w całej objętości wpływają na zwiększenie szybkości dyfuzji w porównaniu z klasycznym procesem odwadniania osmotycznego [33], co skutkuje skróceniem czasu trwania procesu.

Cechy odwadnianego surowca także wpływają na proces odwadniania osmotycznego. Istnieje wiele badań przedstawiających wpływ porowatości, wilgotności, kształtu oraz mikrostruktury surowca na proces odwadniania osmotycznego [34]. Mikrostruktura cząstek poddawanych odwadnianiu jest szczególnie istotna, gdy proces prowadzony jest w zagęszczonych sokach owocowych, które charakteryzują się obecnością wielu związków chemicznych o różnej masie cząsteczkowej [35]. Z tego względu, możliwość transportu dużych cząstek pochodzących z soku zagęszczonego jest ograniczona wielkością otworów komórkowych w odwadnianym materiale [36].

Jak wykazano w poprzednich badaniach, większe cząstki roztworu osmotycznego mogą akumulować się na zewnątrz odwadnianego materiału utrudniając nie tylko dalszy napływ substancji do materiału, lecz także usuwanie wody [37,38]. Ponadto, związki o większej masie cząsteczkowej poruszają się wolniej, co jest zgodne z prawem Einsteina-

Stocka, które mówi o tym, że im mniejsza masa cząsteczkowa tym szybciej zachodzi dyfuzja [39]. Cichowska i in. wykazali, że masa molowa cząstek wchodzących w skład roztworu osmotycznego jest jednym z najważniejszych parametrów wpływających na proces odwadniania osmotycznego [40].

Odwadnianie osmotyczne jest stosowane jako obróbka wstępna przed dalszym dosuszaniem przy użyciu innych metod. Zastosowanie odwadniania osmotycznego obniża aktywność wody, jednak nadal wymaga użycia innych metod w celu osiągnięcia bezpiecznych parametrów, przy których zostanie ograniczona aktywność mikroorganizmów, a materiał będzie stabilny mikrobiologicznie [41]. Z tego względu po wstępnym poduszeniu materiału przy użyciu odwadniania osmotycznego stosuje się dosuszanie różnymi metodami, np. konwekcyjną [28], mikrofalowo-próżniową oraz połączeniem tych dwóch metod [13].

Zarówno odwadnianie osmotyczne jak i suszenie przy użyciu różnych metod prowadzi do szeregu zmian w suszonym materiale, w tym znaczącej degradacji związków natywnych, np. w wyniku działania wysokiej temperatury [42]. Szczególnie istotne są zmiany zachodzące w profilu i zawartości związków lotnych. Badania nad suszeniem tymianku [43], majeranku [44] i bazylii wykazały, że suszenie metodą konwekcyjną prowadziło do wyższych strat związków lotnych w porównaniu do innych metod suszenia (mikrofalowo-próżniowej i łączonej). Natomiast, w przypadku suszenia rozmarynu większą zawartość związków lotnych zaobserwowano przy zastosowaniu metody konwekcyjnej [45]. Suszenie może także negatywnie wpływać na zawartość związków fenolowych oraz pojemność przeciwutleniającą w suszonym materiale jak wykazały wcześniejsze badania [46]. Ponadto, suszenie prowadzi do szeregu zmian właściwości fizykochemicznych, takich jak tekstura, barwa, skurcz, a także wilgotność, aktywność wody czy całkowita zawartość cukrów [47,48].

Zastosowanie odwadniania osmotycznego jako obróbki wstępnej przed dosuszaniem przy użyciu różnych metod może mieć pozytywny wpływ na jakość suszu. W badaniach nad odwadnianiem plasterów dyni w zagęszczonym soku aroniowym przed dosuszaniem mikrofalowo-próżniowym uzyskano aż 10-krotny wzrost zawartości polifenoli w porównaniu do materiału wysuszonego bez odwadniania osmotycznego [49]. Natomiast badania przeprowadzone przez Kowalską i in. [50] wykazały, że zastosowanie odwadniania osmotycznego jabłek w soku aroniowym wpłynęło na znaczny wzrost zawartości polifenoli, pojemności przeciwutleniającej a także witaminy C w jabłku po suszeniu w stosunku do świeżego materiału. Ponadto, istnieje sporo badań dotyczących wpływu odwadniania

osmotycznego prowadzonego w roztworach sacharozy oraz dwuskładnikowych roztworach sacharozy i chlorku sodu na zawartość związków lotnych [51–53]. Natywne związki lotne mają znaczący wpływ na zdrowie człowieka, wykazują działanie przeciwnowotworowe [54], przeciwzapalne [55] i antybakteryjne [56]. Mięta wykazuje natomiast dodatkowo działanie przeciwgrzybicze i wysoką pojemność przeciwutleniającą [57]. Wciąż brakuje doniesień na temat wpływu odwadniania osmotycznego prowadzonego w zagęszczonych sokach z dodatkiem ekstraktów z ziół na zawartość związków lotnych w wysuszonym produkcie.

Na podstawie przytoczonego przeglądu literatury sformułowano następujące problemy badawcze:

1. Czy zastosowanie obniżonego ciśnienia, ultradźwięków lub mikrofal podczas odwadniania osmotycznego w zagęszczonych sokach zwiększy wnikanie substancji z roztworu do odwadnianego materiału?
2. Czy odfiltrowanie największych cząstek w roztworze osmotycznym (zagęszczonym soku) zwiększy przyrost suchej substancji w materiale odwadnianym osmotycznie?
3. Czy skład zagęszczonego soku (filtrowany i nie filtrowany) wzbogacony w ekstrakt z ziół będzie miał wpływ na ilość lotnych związków zapachowych, które w procesie odwadniania osmotycznego wnikną do odwadnianego materiału?
4. Czy wprowadzenie lotnych związków zapachowych w procesie odwadniania osmotycznego w roztworach osmotycznych uzyskanych na bazie zagęszczonych soków i ekstraktów z ziół zmniejszy degradację lotnych związków w procesie dosuszania?

## 2. Hipotezy badawcze i cel pracy

### *Hipotezy badawcze*

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury sformułowano następujące hipotezy badawcze:

H1. Usunięcie większych cząstek z roztworu osmotycznego będzie sprzyjało przyrostowi suchej substancji *SG* w odwadnianym materiale dzięki głębszemu wnikananiu tych cząstek w strukturę odwadnianego materiału

H2. Wprowadzenie koncentratów aromatów roślin obniży potencjał chemiczny roztworu osmotycznego, który ma istotny wpływ na proces wymiany masy podczas odwadniania osmotycznego.

H3. Usunięcie związków o dużej masie cząsteczkowej z zagęszczonego soku wykorzystanego do procesu odwadniania osmotycznego surowców roślinnych z dodatkiem ekstraktów z ziół, spowoduje znaczący przyrost zawartości związków lotnych w odwadnianym materiale

H4. Wprowadzenie substancji z roztworów osmotycznych do odwadnianego materiału wypełni przestrzory międzykomórkowe, co spowoduje zatrzymanie związków lotnych wewnątrz surowca podczas dosuszania przy użyciu różnych metod

### ***Cel badań***

Celem badań przedstawionych w cyklu publikacji było określenie wpływu właściwości roztworu osmotycznego uzyskanego na bazie zagęszczonych soków wzbogacanych koncentratami aromatów z roślin na kinetykę procesu odwadniania osmotycznego i dosuszania różnymi sposobami oraz jakość odwadnianego surowca.

### ***Zadania badawcze***

Osiągnięcie powyższego celu wymagało realizacji następujących zadań badawczych:

1. Określenie wpływu parametrów procesowych (ultradźwięki, mikrofała, obniżone ciśnienie) na kinetykę odwadniania osmotycznego i jakość odwodnionego surowca
2. Określenie wpływu właściwości fizycznych roztworów osmotycznych na kinetykę procesu i jakość odwadnianego surowca
3. Określenie wpływu składu chemicznego roztworów osmotycznych na właściwości fizykochemiczne odwadnianego materiału i kinetykę procesu
4. Określenie wpływu właściwości fizykochemicznych roztworów osmotycznych (filtrowanych i niefiltrowanych) na kinetykę suszenia i jakość suszu



### 3. Materiały i metody

#### 3.1. Materiały

Jabłka (*Champion*), słodka kukurydza (*Overland*) oraz dynia (*Butternut*) wykorzystane w badaniach zostały zakupione w lokalnym sklepie (Wrocław, Polska). Natomiast zagęszczony sok jabłkowy i aroniowy został zakupiony w firmie Rauch Polska (Płońsk, Polska).

#### 3.2. Odwadnianie osmotyczne

Materiały wykorzystane w trakcie odwadniania osmotycznego, a także roztwory osmotyczne, parametry odwadniania osmotycznego oraz analizowane właściwości fizykochemiczne roztworów i surowców przedstawione są w Tabeli 1.

Tabela 1. Surowce, roztwory osmotyczne, parametry procesu oraz właściwości fizykochemiczne przedstawione w publikacjach wchodzących w skład cyklu.

Nr publikacji	Odwadniany surowiec	Roztwór osmotyczny	Parametry odwadniania osmotycznego	Właściwości fizykochemiczne roztworu i surowców
1	Jabłko	Zagęszczony sok aroniowy 40 °Brix	stosunek surowca do roztworu 1:3; temperatura: $40 \pm 2^\circ\text{C}$ ; czas: 120 min; <ul style="list-style-type: none"><li>• OD (odwadnianie osmotyczne): p=101.3 kPa</li><li>• OD-V (podciśnienie): p=50-60 kPa</li><li>• OD-U (ultradźwięki): p=101.3 kPa, 0.1 W·g<sup>-1</sup>, 40 kHz</li><li>• OD-M (mikrofale): p=101.3 kPa, 0.1 W·g<sup>-1</sup></li><li>• OD-U-V: p=50-60 kPa, ultradźwięki: 0.1 W·g<sup>-1</sup>, 40 kHz</li><li>• OD-M-V: p=50-60 kPa, mikrofale: 0.1 W·g<sup>-1</sup></li></ul>	Zawartość polifenoli ogółem (TPC) Pojemność przeciwutleniająca (ABTS, FRAP)

2	Dynia	Filtrowany i niefiltrowany zagęszczony sok aroniowy (40 °Brix); Filtraty uzyskane na filtrach o wymiarach: 8 µm; 5 µm 3 µm; 1,2 µm; 0,8 µm; 0,45 µm oraz 0,2 µm	stosunek surowca do roztworu 1:3; temp: 45 ± 2°C; czas trwania: 120 min;	Właściwości chemiczne: Zawartość polifenoli ogółem (TPC) Pojemność przeciwutleniająca (ABTS, FRAP)  Właściwości fizyczne: Struktura wewnętrzna – zdjęcia SEM Gęstość, Lepkość, Aktywność wody
3	Kukurydza cukrowa (obrana i wstępnie przygotowana przez 10 min)	Zagęszczony sok jabłkowy 40 °Brix	stosunek surowca do roztworu 1:3; temp: 60 ± 2°C; czas trwania: 90 min; ultradźwięki: 5 min	Analiza sensoryczna Analiza tekstury Barwa
4	Jabłko	Niefiltrowany zagęszczony sok aroniowy; Filtrowany (rozmiar filtrów: 3 µm oraz 0,2 µm) i niefiltrowany zagęszczony sok aroniowy z dodatkiem wodnego ekstraktu z mięty (4:1)	stosunek surowca do roztworu 1:3; temp: 35 ± 2°C; czas trwania: 120 min; ultradźwięki: 5 min  • OD – niefiltrowany zagęszczony sok aroniowy, • OD-M – niefiltrowany zagęszczony sok aroniowy z dodatkiem ekstraktu z mięty, • 3 µm OD-M – filtrowany (filtr 3 µm) zagęszczony sok aroniowy z ekstraktem z mięty, • 0,2 µm OD-M – filtrowany (filtr 0,2 µm) zagęszczony sok aroniowy z ekstraktem z mięty	Właściwości fizyczne: Aktywność wody, Lepkość, Właściwości chemiczne: SPME

### 3.3. Suszenie

W badaniach przedstawionych w cyklu publikacji wykorzystano suszenie sublimacyjne (FD), suszenie konwekcyjne (CD), suszenie mikrofalowo-próżniowe (VMD) oraz metodę łączoną polegającą na podsuszaniu konwekcyjnym i dosuszaniu mikrofalowo-próżniowym (CD/VMD). Parametry procesu oraz analizowane właściwości fizykochemiczne suszu przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Parametry procesu suszenia w publikacjach wchodzących w skład cyklu

Nr publikacji	CD	VMD	CD/VMD	FD	Właściwości fizykochemiczne suszu
3	-	<p>Warianty:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• OD/VMD</li> <li>• VMD</li> </ul> <p>Moc mikrofal: 480/240 W</p> <p>Redukcja mocy przy osiągnięciu temperatury 80°C</p>	<p>Warianty:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• OD/CD1h/VMD</li> <li>• OD/CD2h/VMD</li> <li>• OD/CD3h/VMD</li> <li>• CD1h/VMD</li> <li>• CD2h/VMD</li> <li>• CD3h/VMD</li> </ul> <p>Czas obróbki wstępnej OD: 90 min</p> <p>Czas trwania podsuszenia CD:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1 h</li> <li>2 h</li> <li>3 h</li> </ul> <p>Temperatura CD: 60°C</p> <p>Dosuszanie VMD:</p> <p>Moc mikrofal: 480/240 W</p> <p>Redukcja mocy przy osiągnięciu temperatury 80°C</p>	<p>Warianty:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• OD/FD</li> <li>• FD</li> </ul> <p>Czas trwania: 24 h</p> <p>Ciśnienie: 65 Pa</p> <p>Temperatura komory: -60°C</p> <p>Temperatura płyt: 30°C</p>	<p>barwa</p> <p>tekstura (TPA)</p> <p>analiza sensoryczna</p>
			<p>Warianty:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,2/VMD</li> <li>• NF/VMD</li> </ul> <p>Moc mikrofal: 480/120 W</p> <p>Redukcja mocy po osiągnięciu temperatury 80°C</p>	<p>Warianty:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,2/CD/VMD</li> <li>• NF/CD/VMD</li> </ul> <p>Czas obróbki wstępnej OD: 30 min</p> <p>Temperatura CD: 60°C</p> <p>Czas trwania CD: 30 min</p> <p>Dosuszanie VMD:</p> <p>Moc mikrofal: 480/120 W</p> <p>Redukcja mocy po osiągnięciu temperatury 80°C</p>	
4		<p>Warianty:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,2/CD</li> <li>• NF/CD</li> </ul> <p>Temperatura CD: 60°C</p>		-	

CD – suszenie konwekcyjne; VMD – suszenie mikrofalowo-próżniowe; FD – liofilizacja; 0,2 – odwadnianie osmotyczne w filtrowanym roztworze (filtr 0,2 μm); NF – odwadnianie osmotyczne w niefiltrowanym roztworze

## 4. Wyniki i dyskusja

### 4.1. Wpływ parametrów procesowych na kinetykę odwadniania osmotycznego i jakość odwadnianego surowca

Proces odwadniania osmotycznego opisuje się przy pomocy kinetyki procesu przedstawionej jako przyrost substancji *SG* lub ubytek wody *WL* w funkcji czasu. Na samym początku odwadniania osmotycznego dochodzi do bardzo intensywnej wymiany masy, która stopniowo spada aż do osiągnięcia parametrów równowagowych, co jest zgodne z wynikami poprzednich badań [18]. Odpowiednio dobrane parametry procesu mogą wpływać na kinetykę odwadniania. W publikacji 1 zbadano wpływ zastosowania ultradźwięków, mikrofal oraz obniżonego ciśnienia na kinetykę procesu odwadniania oraz na proces selektywnego wnikania związków aktywnych do odwadnianego materiału w wyniku zastosowania poszczególnych parametrów procesowych. Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie ultradźwięków miało zdecydowanie większy wpływ na ubytek wody *WL* niż pozostałe metody, co jest zgodne z badaniami przeprowadzonymi przez Zielińską i Markowskiego [58]. Może to wynikać z wpływu ultradźwięków na lepkość i napięcie powierzchniowe odwadnianego materiału, co ułatwia usuwanie wody (*WL*) [26]. Każdy z analizowanych wariantów pozwolił na zwiększenie *WL* w porównaniu do klasycznego odwadniania (OD), natomiast odwadnianie z zastosowaniem ultradźwięków pozwoliło na uzyskanie ponad 25% wyższej redukcji wody *WL* w odniesieniu do OD.

W przypadku przyrostu substancji *SG* najlepsze parametry osiągnięto dla wariantu OD, natomiast najniższe *SG* osiągnięto dla próbek odwadnianych z zastosowaniem ultradźwięków, co jest niezgodne z poprzednimi badaniami na żurawinie [58] oraz łodygach Pakchoi [59]. Stwierdzono, że może to wynikać z różnych właściwości fizycznych odwadnianych materiałów. W przypadku zastosowania ultradźwięków dochodzi do rozluźnienia struktury, co zwykle skutkuje poprawą przyrostu substancji. Niski wynik osiągnięty dla wariantu OD-U może wynikać z bardzo wysokich wartości parametru *WL*. Zdecydowana przewaga wypływającej wody nad przyrostem substancji mogła spowolnić przyrost masy. Zastosowanie mikrofal w trakcie odwadniania osmotycznego wpłynęło na wysoki przyrost masy w ciągu pierwszych 30 min trwania procesu, natomiast dłuższy czas odwadniania nie spowodował dalszego znaczącego przyrostu *SG*. Można to wyjaśnić szczególnym znaczeniem równomiernego nagrzewania próbki w całej objętości w wyniku działania mikrofal w początkowym okresie odwadniania. Szybsze osiągnięcie wymaganej temperatury pozwala na przyspieszenie wymiany masy w początkowym okresie [60]. Prowadzenie odwadniania osmotycznego pod obniżonym ciśnieniem miało szczególne znaczenie w ciągu pierwszych 15 minut trwania procesu. Wynika to z mechanizmu pozwalającego na usunięcie gazów znajdujących się w próbce a przez to na zwiększenie powierzchni wymiany.

Uzyskane wyniki *SG* wskazują także na wystąpienie selektywnego wnikania związków o różnych wielkościach. Na początku procesu odwadniania głównie małe cząstki biorą udział w procesie wymiany, co jest związane z wielkością otworów komórkowych, która waha się od 20 do 70 nm [61]. Następnie można zauważyć charakterystyczny spadek wartości *SG* po 60 minutach, po którym nastąpił wyraźny wzrost tego parametru. Prawdopodobnie było to spowodowane plazmolizą, czyli oderwaniem się protoplastu od ściany komórkowej, co poskutkowało niekontrolowanym napływem substancji do komórki.

Analiza właściwości chemicznych wykazała dużą korelację między zawartością polifenoli, a pojemnością przeciwutleniającą ABTS i FRAP. W przypadku klasycznego

odwadniania zauważono proporcjonalny przyrost ABTS wraz ze wzrostem *SG*, a następnie spadek ABTS po 90 minutach mimo dalszego wzrostu *SG*. Natomiast w przypadku pozostałych wariantów uzyskano wyższą zawartość ABTS w materiale przy znacznie niższym *SG*. Szczególnie jest to widoczne w przypadku OD-U, gdzie wraz z prawie 2-krotnie niższym *SG* wykazano znacząco wyższą pojemność przeciwutleniającą. Można to wyjaśnić obecnością związków o różnej masie cząsteczkowej w zagęszczonym soku aroniowym o różnej pojemności przeciwutleniającej oraz wystąpieniem selektywnego wnikania. Ze względu na wielkość otworów komórkowych w materiale w przypadku klasycznego odwadniania (OD) tylko cząstki o niewielkiej wielkości biorą udział w procesie, podczas gdy związki o dużej masie cząsteczkowej i wysokiej pojemności przeciwutleniającej pozostają w roztworze. Natomiast zastosowanie ultradźwięków czy obniżonego ciśnienia powoduje rozluźnienie struktury materiału oraz zwiększenie powierzchni wymiany [23,62,63] i pozwala na wniknięcie większych cząstek roztworu o wyższej pojemności przeciwutleniającej do materiału, a przez to wraz z niższym *SG* pozwala na uzyskanie wysokich wartości ABTS, FRAP i TPC. Badania wykazały, że odwadnianie z równoczesnym zastosowaniem ultradźwięków i obniżonego ciśnienia (OD-U-V) pozwoliło na uzyskanie najwyższego przyrostu pojemności przeciwutleniającej (ponad 4-razy wyższa niż dla świeżego surowca) przy niskim *SG*, co można wytłumaczyć synergistycznym działaniem tych dwóch parametrów.

Realizacja badań przedstawionych w publikacji 1 pozwoliła na określenie korzystnych parametrów procesu odwadniania osmotycznego prowadzonego w zagęszczonych sokach owocowych, a także poprzez realizację zadania 1 pozwoliła zbliżyć się do osiągnięcia założonego celu.

#### **4.2. Wpływ właściwości fizycznych roztworów osmotycznych na kinetykę procesu i jakość odwadnianego surowca**

W publikacji 2 przedstawiono proces odwadniania osmotycznego prowadzonego w filtrowanym i niefiltrowanym zagęszczonym soku aroniowym. W badaniach zastosowano filtry o różnych wielkościach porów (8  $\mu\text{m}$ ; 5  $\mu\text{m}$ ; 3  $\mu\text{m}$ ; 1,2  $\mu\text{m}$ ; 0,8  $\mu\text{m}$ ; 0,45  $\mu\text{m}$ ; 0,2  $\mu\text{m}$ ) i dla każdego z uzyskanych roztworów określono gęstość, lepkość i aktywność wody. Aktywność wody jest parametrem, za pomocą którego można wyznaczyć wartość potencjału chemicznego roztworu. Potencjał chemiczny, zależny od ciśnienia, temperatury i stężenia roztworu, jest definiowany jako określony stan energetyczny w odniesieniu do 1 mola substancji. Ciśnienie potrzebne do osiągnięcia stanu równowagi (czyli wyrównania potencjałów chemicznych) nazywane jest ciśnieniem osmotycznym i od jego gradientu zależy przebieg odwadniania osmotycznego [1]. Uzyskane wyniki wykazały, że filtracja roztworu osmotycznego miała znaczący wpływ na aktywność wody, z najwyższym wynikiem uzyskanym dla roztworu z najmniejszymi cząstkami OS<0,2  $\mu\text{m}$ , a najniższym dla roztworu niefiltrowanego (NF OS). Niższa wartość aktywności wody roztworu osmotycznego wywołuje większe różnice ciśnienia osmotycznego między roztworem a odwadnianym materiałem [60], a przez to ma istotny wpływ na kinetykę procesu.

Filtracja roztworu osmotycznego wpłynęła także na lepkość, z najniższą wartością osiągniętą dla roztworu OS 0,2  $\mu\text{m}$ , a największą dla roztworu niefiltrowanego (OS NF). Niższa lepkość ułatwia transport cząstek z roztworu osmotycznego do materiału, podczas gdy roztwór o większych cząstkach i wyższej lepkości może gromadzić się na zewnętrznej powierzchni odwadnianego materiału utrudniając lub całkowicie blokując wymianę masy

[38,61]. Kinetyka odwadniania *SG* dla dyni w filtrowanych i niefiltrowanych roztworach wykazała intensywny przyrost masy (*SG*) na początku procesu (<30 min) we wszystkich wariantach, który malał wraz z czasem odwadniania, co mogło być spowodowane spadkiem ciśnienia osmotycznego w wyniku transportu masy i rozcieńczenia roztworu osmotycznego. Podobne wyniki osiągnięto podczas odwadniania nasion granatu oraz dyni [17,61]. Materiał odwadniany w niefiltrowanym (NF OS) oraz filtrowanym (OS<8 μm) roztworze wykazał najniższe *SG* po 120 min trwania procesu, co było spowodowane akumulacją cząstek roztworu na zewnętrznej powierzchni materiału. Wystąpienie tego zjawiska potwierdzają także zdjęcia SEM, na których widoczna jest dodatkowa warstwa roztworu osmotycznego na powierzchni próbki. To zjawisko zostało także wcześniej omówione w badaniach innych autorów [37,38,62]. Po 120 min procesu, próbki odwadniane w filtrowanych roztworach osiągnęły podobną wartość *SG*, co można wyjaśnić niższą lepkością filtrowanych roztworów (w porównaniu do NF OS), a także mniejszą masą cząsteczkową. Cząstki o mniejszej masie cząsteczkowej wpływają szybciej i głębiej do odwadnianego materiału, co jest zgodne z prawem Einsteina-Stocka [39] i zostało stwierdzone także na zdjęciach SEM, które szczególnie dla roztworu z najmniejszymi cząstkami pokazują równomierne wypełnienie powierzchni komórek roztworem osmotycznym.

Najwyższą wartość utraty wody (*WL*) po 120 min procesu zaobserwowano dla niefiltrowanego wariantu. Mogło to być spowodowane obecnością dużych cząstek w tym roztworze, co prowadzi do większej utraty wody *WL* oraz niższego przyrostu substancji *SG* [63]. Natomiast dla OS<0,2 μm po 30 min trwania procesu zaobserwowano znacząco wyższą wartość *WL* w porównaniu z innymi wariantami, co mogło być spowodowane wyższym ciśnieniem osmotycznym, gdy małe cząstki biorą udział w procesie [64] lub mniejszym oporem, stawianym przez małe cząstki, który ułatwiał usuwanie wody z materiału. Efektywność procesu odwadniania osmotycznego została określona jako stosunek średnich wartości *WL/SG* dla całego okresu odwadniania osmotycznego. Badania w publikacji 2 wykazały brak statystycznych różnic *WL/SG* między poszczególnymi wariantami, co świadczy o niewielkim ogólnym wpływie filtracji na przebieg procesu, natomiast rozpatrując początkowy okres odwadniania (do 30 min) osiągnięto najwyższe *SG* i jedno z najwyższych wartości *WL* dla 1,2 μm i 0,2 μm OD-M.

Przedstawione wyniki wskazują na korzystny wpływ filtracji na kinetykę odwadniania osmotycznego, szczególnie gdy rozpatrywany jest krótki czas procesu (do 30 min), na co wskazuje najwyższe *SG* dla roztworów 1,2 μm i 0,2 μm OD-M. Jednakże uzyskane wyniki skłaniają do odrzucenia hipotezy H1 mówiącej o tym, że usunięcie większych cząstek z roztworu sprzyja przyrostowi substancji, ponieważ nie stwierdzono istotnego wpływu filtracji na *SG* w rozpatrywanym okresie (120 min). Proces jest bardziej złożony i nie tylko wielkość cząstek, ale także inne czynniki będą miały wpływ na kinetykę tego procesu.

W publikacji 4 przedstawiono wpływ filtracji zagęszczonego soku aroniowego oraz dodatku wodnego ekstraktu mięty do roztworu osmotycznego na zawartość karwonu w odwadnianym materiale oraz roztworze osmotycznym. Stwierdzono, że filtracja miała wpływ na lepkość roztworu, z niższymi wartościami osiągniętymi w przypadku filtrowanych roztworów, co potwierdza wyniki uzyskane w publikacji 2. Filtracja roztworu nie wpłynęła statystycznie istotnie na wartość pH. Natomiast zaobserwowano statystycznie istotny wzrost aktywności wody w przypadku roztworu niefiltrowanego z dodatkiem ekstraktu z mięty (OD-M) w porównaniu do innych wariantów, mogło być to związane z

niewielką różnicą stężeń roztworów. Dlatego otrzymane wyniki badań nie mogą potwierdzić hipotezy H2, że ekstrakt z aromatów obniży potencjał chemiczny roztworu osmotycznego. Filtracja roztworu osmotycznego wpłynęła na obniżenie aktywności wody w porównaniu do próbki niefiltrowanej ze względu na to, że stężenie tych roztworów było nieco wyższe.

Porównując wartości *SG* stwierdzono znacząco niższy przyrost substancji na początku procesu (<30 min) dla wariantu z filtrowanym sokiem i ekstraktem z mięty (0,2  $\mu\text{m}$  OD-M) w porównaniu z innymi wariantami. Mogło to być spowodowane mniejszą masą cząsteczkową, a także niższą lepkością tego roztworu, który wpływając do materiału ułatwiał usuwanie wody, a po początkowej intensywnej wymianie masy pozwolił na osiągnięcie najwyższego przyrostu masy. Tę tezę potwierdza także początkowo wysoka wartość *WL* dla niefiltrowanego roztworu, który osiągnął najniższą wartość *SG*.

Odwadnianie osmotyczne w filtrowanym roztworze (0,2  $\mu\text{m}$  OD-M) wykazało równocześnie wyższą utratę wody (*WL*) od pozostałych wariantów, co potwierdza wyniki uzyskane w publikacji 2. Na koniec procesu (po 120 min) najwyższe *SG* uzyskano dla 0,2  $\mu\text{m}$  OD-M. Nie wykazano statystycznych różnic w *WL* na koniec procesu między wariantami. Uzyskane wyniki wskazują, że po pierwszych 30 minutach nie było znaczących różnic między próbkami filtrowanymi i niefiltrowanymi, a także dodatek ekstraktu z mięty nie wpłynął znacząco na kinetykę procesu.

#### **4.3. Wpływ składu chemicznego roztworów osmotycznych na kinetykę procesu i jakość odwadnianego materiału**

Rodzaj zastosowanego roztworu osmotycznego w trakcie odwadniania osmotycznego wpływa na proces odwadniania osmotycznego, a jego skład chemiczny może znacząco wpływać na właściwości fizykochemiczne odwadnianego materiału. Stąd istotne jest określenie wpływu składu chemicznego roztworu osmotycznego na kinetykę procesu i jakość odwadnianych surowców.

W publikacji 2 przedstawiono wpływ filtracji zagęszczonego soku aroniowego na zawartość związków polifenolowych ogółem (total polyphenolic content, TPC) oraz pojemność przeciwutleniającą mierzoną za pomocą ABTS i FRAP.

Uzyskane wyniki pozwoliły stwierdzić, że filtracja roztworu znacząco wpłynęła na zawartość polifenoli oraz pojemność przeciwutleniającą odwadnianego materiału. Szczególnie stwierdzono, że usunięcie dużych cząstek z roztworu spowodowało spadek TPC oraz pojemności przeciwutleniającej (ABTS i FRAP) w roztworze. Wynika to z wysokiej zawartości cząstek o dużej masie cząsteczkowej, np. tanin w zagęszczonym soku aroniowym, które znacząco wpływają na wysoką wartość TPC, a przez to najwyższy poziom TPC osiągnięty przez niefiltrowany roztwór (NF OS). Warto jednak zaznaczyć, że drugi najwyższy wynik TPC został osiągnięty przez roztwór z najmniejszymi cząstkami (OS <0,2  $\mu\text{m}$ ). Wyniki te są niezgodne z wcześniejszymi badaniami, które wykazały, że roztwory z mniejszymi cząstkami zawierały też mniejszą ilość związków polifenolowych [35]. Jest to charakterystyczne dla materiałów biologicznych, które wykazują różne właściwości w zależności od czasu zbioru, stopnia dojrzałości, a także parametrów procesowych, które doprowadziły do uzyskania zagęszczonego soku [65]. Filtracja roztworów osmotycznych miała także znaczący wpływ na pojemność przeciwutleniającą mierzoną za pomocą ABTS i FRAP, z najwyższą wartością ABTS uzyskaną w przypadku roztworu niefiltrowanego (NF OS) oraz bardzo wysoką wartością FRAP dla roztworu niepoddanego filtracji. Wyjątkiem był wariant 0,8  $\mu\text{m}$  OS, który wykazał najwyższą wartość FRAP, wysoką wartość ABTS

oraz najniższą wartość TPC. Mogło to być spowodowane obecnością związków, które szczególnie mocno oddziałują z jonami żelaza [66]. Filtracja roztworów osmotycznych w większości przypadków spowodowała spadek TPC oraz ABTS i FRAP.

Odwadnianie w zagęszczonym soku spowodowało znaczący (nawet 6-krotny) przyrost TPC w odwadnianym materiale we wszystkich wariantach, co jest zgodne z wcześniejszymi badaniami [14,35] i wynika z właściwości soku aroniowego, który wykazuje bardzo wysoką zawartość związków polifenolowych [67]. Największy przyrost TPC zaobserwowano w ciągu pierwszych 15 min odwadniania, co wynika bezpośrednio z największego przyrostu masy na początku procesu. Filtracja zagęszczonego soku aroniowego wpłynęła także na proces selektywnego wnikania w trakcie odwadniania. Wariant z niefiltrowanym roztworem osmotycznym pozwolił na stały i równomierny przyrost TPC przy równoczesnym najniższym *SG*. Wynika to z obecności dużych cząstek w roztworze, które wykazują wysokie TPC. W przypadku niektórych filtrowanych roztworów po początkowym przyroście TPC zanotowano spadek zawartości polifenoli, a następnie znaczący przyrost na końcu procesu. Prawdopodobnie wynikało to z wystąpienia zjawiska plazmolizy, czyli odlepienia się protoplastu od ściany komórkowej, który doprowadził do niekontrolowanego napływu substancji z roztworu do materiału.

W przypadku pojemności przeciwutleniającej, nie zaobserwowano korelacji między TPC a ABTS i FRAP. Mogło to być spowodowane obecnością innych związków – witamin, związków lotnych – które wpłynęły na wyższą wartość przeciwutleniającą odwadnianego materiału. Podobnie jak w przypadku TPC, na początku procesu (<30 min) zaobserwowano znaczny (nawet 4-krotny) wzrost ABTS i FRAP w porównaniu do świeżego materiału. Było to spowodowane wysoką pojemnością przeciwutleniającą roztworu osmotycznego [67]. Początkowy znaczny wzrost ABTS i FRAP dla roztworu niefiltrowanego wynikał z obecności związków o dużej masie cząsteczkowej i równoczesnej wysokiej pojemności przeciwutleniającej. Natomiast akumulacja dużych cząsteczek na powierzchni próbki utrudniła napływ substancji z roztworu do materiału co spowodowało spadek ABTS i FRAP po 60 min trwania procesu. Równocześnie roztwory filtrowane, pozbawione związków o dużej masie cząsteczkowej mogły wpłynąć głębiej do materiału i tym samym spowodować znaczący wzrost pojemności przeciwutleniającej na koniec procesu [37].

W publikacji 4 przedstawiono wpływ filtracji i dodatku ekstraktu z mięty na udział związków lotnych w odwadnianym materiale. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że filtracja istotnie wpłynęła na udział karwonu w roztworze, z najniższym wynikiem uzyskanym dla roztworu o najmniejszych cząstkach (0,2  $\mu\text{m}$  OD-M). Wyniki udziału karwonu w przypadku materiału odwadnianego w filtrowanym roztworze wskazują, że usunięcie dużych cząstek z roztworu wpłynęło na wymianę masy między roztworem osmotycznym, a materiałem. Największy udział karwonu odnotowano w przypadku próbki odwadnianej w roztworze z najmniejszymi cząstkami przy równoczesnym najniższym *SG*. Świadczy to o selektywnym wnikaniu cząstek o różnej wielkości. Usunięcie związków o dużej masie cząsteczkowej pozwoliło na wniknięcie większej ilości związków lotnych do materiału. W przypadku roztworu niefiltrowanego wraz ze wzrostem *SG* malał udział karwonu w materiale, podczas gdy w przypadku obu próbek odwadnianych w filtrowanych roztworach udział karwonu wzrastał wraz z przyrostem substancji (*SG*). Mniejsze cząstki mają większą zdolność przemieszczania się, dzięki czemu ułatwiają wymianę masy między materiałem a roztworem osmotycznym [39]. Na uwagę zasługuje także udział karwonu w roztworze osmotycznym w trakcie odwadniania. Mimo początkowej wysokiej zawartości



karwonu w roztworze niefiltrowanym, napływ tego związku do materiału jest niewielki, a poziom karwonu w roztworze w trakcie procesu pozostaje znacząco wyższy niż w przypadku roztworu o najmniejszych cząstkach (0,2  $\mu\text{m}$  OD-M). Zwiększona zawartość związków lotnych w materiale odwadnianym w roztworze, z którego usunięto związki o dużej masie cząsteczkowej z zagęszczonego soku potwierdza słuszność założonej hipotezy H3.

Oba przytoczone badania wykazały, że filtracja wpływa znacząco na proces selektywnego wnikania podczas odwadniania osmotycznego, a szczególnie na zawartość związków aktywnych, tj. TPC, ABTS, FRAP oraz zawartości karwonu w materiale.

#### **4.4. Wpływ właściwości fizykochemicznych roztworów osmotycznych (filtrowanych i niefiltrowanych) na kinetykę suszenia i jakość suszu**

Odwadnianie osmotyczne prowadzone w zagęszczonych sokach owocowych poza redukcją zawartości wody w materiale wpływa także na zmianę właściwości fizycznych odwadnianego surowca. Dodatkowo, proces odwadniania znacząco wpływa na kinetykę dosuszania materiału przy użyciu różnych metod, a także na właściwości sensoryczne suszu.

W publikacji 3 przedstawiono wpływ odwadniania osmotycznego słodkiej kukurydzy w roztworze osmotycznym na bazie zagęszczonego soku jabłkowego na kinetykę procesu suszenia przy użyciu suszenia konwekcyjnego (CD), mikrofalowo-próżniowego (VMD) oraz metody łączonej (CD/VMD), a także na barwę, teksturę oraz właściwości sensoryczne wysuszonego materiału. Porównując kinetykę suszenia próbek wysuszonych różnymi metodami z odwadnianiem osmotycznym jako obróbką wstępną i bez odwadniania wykazały, znaczące skrócenie czasu suszenia dla próbek odwadnianych. Wynika to z redukcji wilgotności próbek o 24% w wyniku zastosowania odwadniania osmotycznego w porównaniu do świeżego materiału. Zastosowanie odwadniania przed podsuszaniem konwekcyjnym, wpłynęło także na znaczące skrócenie czasu dosuszania mikrofalowo-próżniowego.

Zastosowanie odwadniania osmotycznego miało znaczący wpływ na barwę wysuszonego materiału. W publikacji 3 przedstawiono analizę barwy dla kukurydzy cukrowej nieodwadnianej i odwadnianej w soku jabłkowym, a następnie wysuszonej przy użyciu różnych metod. Wyniki badań wykazały, że odwadniane próbki były ciemniejsze (niższa wartość  $L^*$ ) w porównaniu do próbek bez odwadniania. Wynika to ze zmiany barwy kukurydzy w efekcie napłynięcia soku jabłkowego. Próbki odwadniane wykazały także znacząco różną wartość parametrów  $a^*$  oraz  $b^*$ . Parametr pokazujący stopień całkowitej zmiany barwy ( $E^*$ ) był najwyższy dla próbek odwadnianych i wskazuje największą zmianę barwy w odniesieniu do próbki świeżej. Wynika to z nasączenia zagęszczonym sokiem jabłkowym, który zmienił barwę odwadnianych próbek. Efekt ten był wcześniej potwierdzony m.in. w badaniach nad wiśnią odwadnianą w różnych roztworach osmotycznych [11].

Proces odwadniania osmotycznego wpłynął także na analizę profilu tekstury (TPA). Próbki odwadniane miały ogólnie większą twardość TPA, spoistość oraz żuwalność. Wynika to z wypełnienia struktury materiału sokiem owocowym, co wpłynęło na wysokie wartości tych parametrów. Zastosowanie odwadniania osmotycznego w zagęszczonym soku jabłkowym przed właściwym dosuszaniem pozwoliło na uzyskanie sprężystego materiału, podczas gdy próbki wysuszone bez odwadniania były bardziej chrupiące. Potwierdzeniem tych wyników jest przeprowadzona analiza sensoryczna, która wykazała, że próbki

odwadniane miały intensywniejszą barwę, były bardziej słodkie i soczyste. Zastosowanie zagęszczonego soku jabłkowego w trakcie odwadniania wpłynęło na słodszy smak, ale także sprawiło, że smak kukurydzy był mniej wyczuwalny. Kukurydza odwadniania była także 2-razy twardsza niż kukurydza nieodwadniana. Zastosowanie odwadniania obniżyło także chrupkość. Stwierdzono, że zastosowanie odwadniania wpływa na parametry związane z twardością oraz spoistością, a także na smak i barwę odwadnianego materiału bez względu na zastosowaną metodę suszenia, co wynika bezpośrednio z zastosowania zagęszczonego soku jako roztworu osmotycznego.

Proces suszenia ma negatywny wpływ na zawartość związków lotnych oraz aktywność biologiczną suszonych materiałów. Odwadnianie osmotyczne w zagęszczonych sokach może prowadzić do wzrostu pojemności przeciwutleniającej i zawartości polifenoli w suszonym materiale, a także wpłynąć na jego cechy fizykochemiczne i sensoryczne. W publikacji 4 zbadano wpływ filtracji roztworu osmotycznego na bazie zagęszczonego soku aroniowego oraz ekstraktu mięty na kinetykę suszenia oraz na jakość suszu. Badania wykazały, że filtracja zagęszczonego soku aroniowego nie miała wpływu na proces dosuszania przy użyciu różnych metod, natomiast stwierdzono różnice między zastosowanymi metodami, z najkrótszym czasem osiągniętym w przypadku metody mikrofalowo próżniowej, a najdłuższym czasem dla metody konwekcyjnej.

Proces odwadniania osmotycznego miał znaczący wpływ na właściwości fizyczne suszonego materiału. Porowatość całkowita próbek odwadnianych w filtrowanych i niefiltrowanych roztworach i dosuszanych przy użyciu różnych metod była podobna, natomiast znaczące różnice odnotowano w przypadku porowatości zamkniętej i otwartej. Próbki dosuszane metodą konwekcyjną miały niższą porowatość otwartą i wyższą porowatość zamkniętą w porównaniu do pozostałych metod, co świadczy o tym, że metoda konwekcyjna sprzyjała zamykaniu się porów w materiale. Nieco wyższy (lecz statystycznie nieistotny) skurcz w przypadku tych próbek potwierdza ten wniosek.

Najwyższa zawartość karwonu została uzyskana dla próbki odwadnianej w filtrowanym roztworze i dosuszonej konwekcyjnie. Próbki dosuszane przy użyciu metody mikrofalowo-próżniowej wykazały najniższą zawartość karwonu bez względu na zastosowany wariant odwadniania osmotycznego (filtrowany i niefiltrowany roztwór). Filtracja roztworu osmotycznego miała istotny wpływ na zawartość karwonu w dosuszonym materiale, z prawie 2-krotnie wyższą zawartością karwonu w próbkach odwadnianych w filtrowanym roztworze. Usunięcie większych cząstek z roztworu wpłynęło na większą mobilność związków o małej masie cząsteczkowej, które dzięki temu mogły głębiej wpłynąć do materiału [36].

Dodatkowo, próbki suszone przy użyciu metody konwekcyjnej wykazały większą porowatość zamkniętą oraz nieco większy skurcz, co jest typowe dla tej metody [68]. Taka zmiana parametrów fizycznych doprowadziła do zamknięcia związków lotnych w głębi struktury, a dzięki temu wpłynęła na osiągnięcie wyższej zawartości karwonu w materiale. Natomiast mniejsza zawartość karwonu w próbkach dosuszanych przy użyciu metody mikrofalowo-próżniowej wynika z działania próżni, która doprowadziła do ekspansji materiału, a następnie rozerwania porów w próbce prowadząc do uwolnienia związków lotnych. Efekt ten był wzmocniony pulsacyjnym działaniem próżni, która dodatkowo wysysała związki lotne.

Wyniki uzyskane w publikacji 4 pozwalają potwierdzić prawdziwość hipotezy H4. Zastosowanie roztworów osmotycznych na bazie zagęszczonego soku i ekstraktu z mięty pozwoliło na wprowadzenie substancji z roztworu do odwadnianego materiału, a dzięki

temu nie tylko zwiększenie jego potencjału bioaktywnego, ale także na zachowanie związków lotnych w materiale po procesie suszenia. Ponadto, usunięcie dużych cząstek z roztworu (filtracja) pozwoliło na większą penetrację związków lotnych w głąb materiału, a dzięki temu większy stopień zachowania tych związków po suszeniu.

## 5. Podsumowanie i wnioski

W cyklu czterech publikacji stanowiącym osiągnięcie naukowe opisano procesy zachodzące w trakcie odwadniania osmotycznego jabłek, dyni i kukurydzy cukrowej w filtrowanych i niefiltrowanych roztworach osmotycznych na bazie zagęszczonych soków owocowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zastosowanie ultradźwięków w trakcie odwadniania osmotycznego w zagęszczonych sokach owocowych prowadzi do zwiększenia przyrostu masy *SG* oraz ubytku wody *WL*, a także ze względu na rozluźnienie struktury materiału przyczynia się do wnikania związków o dużej masie cząsteczkowej, dzięki czemu uzyskuje się większy przyrost zawartości polifenoli oraz pojemności przeciwutleniającej ABTS i FRAP w odwadnianym materiale. Badania przedstawione w publikacji 1 umożliwiły realizację zadania 1, a tym samym pozwoliły przybliżyć się do osiągnięcia celu pracy.

Zastosowanie filtracji zagęszczonych soków owocowych (publikacja 2) wpłynęło na właściwości roztworu osmotycznego poprzez obniżenie lepkości roztworu w wyniku usunięcia związków o dużej masie cząsteczkowej. Dodatkowo, roztwory o mniejszych cząstkach wykazały wyższą aktywność wody, a tym samym wyższy potencjał chemiczny co doprowadziło do większych różnic ciśnienia osmotycznego między odwadnianym materiałem a roztworem osmotycznym. Ponadto, badania wykazały korzystny wpływ filtracji w początkowym okresie odwadniania, a także wskazały na bardziej równomierne i głębsze wnikanie substancji z soku do materiału w przypadku zastosowania filtrowanego roztworu. Natomiast nie wykazano jednoznacznego wpływu filtracji na przyrost substancji *SG* w odwadnianym materiale.

Ponadto, w pracy wykazano pozytywny wpływ zastosowania odwadniania osmotycznego w zagęszczonym soku na kinetykę suszenia przy pomocy różnych metod (publikacja 3). Przeprowadzone badania wykazały, że odwadnianie osmotyczne znacząco skraca czas dosuszania, a także wpływa na teksturę, barwę i właściwości sensoryczne suszonych materiałów.

Wprowadzenie ekstraktu z mięty do filtrowanego soku aroniowego (publikacja 4) wpłynęło na osiągnięcie niższego przyrostu substancji *SG* oraz wysokiego ubytku wody *WL* w porównaniu do niefiltrowanego roztworu osmotycznego. Natomiast wykazano znacznie większą zawartość związków lotnych w materiale odwadnianym w filtrowanym roztworze. Stwierdzono, że wynika to z większej możliwości przemieszczania się cząstek o małej masie

cząsteczkowej, które umożliwiły głębsze wniknięcie związków lotnych. Ponadto, zastosowanie odwadniania w filtrowanych roztworach miało znaczący wpływ na zawartość związków lotnych w wysuszonym materiale. Badania wykazały, że zastosowanie suszenia konwekcyjnego wpłynęło na porowatość suszonych materiałów, tym samym doprowadziło do zamknięcia związków lotnych wewnątrz suszonego materiału, co pozwoliło na uzyskanie istotnie wyższej zawartości karwonu w materiale dosuszonym tą metodą.

Przeprowadzone badania pozwoliły na osiągnięcie celu badań, a także wskazują na przydatność filtracji zagęszczonego soku owocowego wykorzystywanego w procesie odwadniania osmotycznego, która zapewni przenoszenie większej ilości związków lotnych o małej masie cząsteczkowej do odwadnianego surowca, co w konsekwencji pozwoli zachować wyższą zawartość tych związków w suszonym produkcie.

### **Wnioski:**

1. Zastosowanie ultradźwięków, obniżonego ciśnienia oraz mikrofal w trakcie odwadniania osmotycznego w zagęszczonym soku aroniowym doprowadziło do zwiększenia przyrostu substancji *SG* i ubytku wody *WL*, a także pozwoliło na uzyskanie wyższej zawartości polifenoli i pojemności przeciwutleniającej w porównaniu do klasycznego odwadniania.
2. Zastosowanie filtrowanego zagęszczonego soku owocowego jako roztworu osmotycznego doprowadziło do uzyskania wysokiego *SG* i *WL* w początkowym okresie odwadniania (do 30 min.). Brak jednoznacznego wpływu filtracji na przyrost substancji *SG* w całym rozpatrywanym okresie odwadniania skłonił do odrzucenia hipotezy H1 dotyczącej wpływu usunięcia większych cząstek na przyrost *SG*.
3. Wprowadzenie ekstraktu aromatu z mięty do roztworu osmotycznego nie obniżyło potencjału chemicznego tego roztworu, co tym samym skłoniło do odrzucenia hipotezy H2.
4. Zastosowanie filtrowanego zagęszczonego soku wzbogaconego ekstraktem z mięty wpłynęło na kinetykę odwadniania tylko w początkowym okresie, natomiast nie wykazało znaczących różnic w całym rozpatrywanym okresie odwadniania.
5. Roztwór osmotyczny na bazie filtrowanego zagęszczonego soku oraz ekstraktu z mięty pozwolił na wprowadzenie i zatrzymanie większej ilości związków lotnych (karwonu) w porównaniu do materiału odwadnianego w niefiltrowanym roztworze, co potwierdziło słuszność hipotezy H3.

6. Wprowadzenie związków lotnych wraz z filtrowanym roztworem osmotycznym do materiału podczas odwadniania osmotycznego pozwoliło na zachowanie tych związków w trakcie dosuszania. Ponadto, usunięcie związków o dużej masie cząsteczkowej pozwoliło na większą penetrację związków lotnych w głąb materiału, w związku z tym potwierdzono hipotezę H4.
7. Zastosowanie dosuszania metodą konwekcyjną (CD) próbki odwadnianej w roztworze osmotycznym na bazie zagęszczonego soku owocowego oraz ekstraktu z mięty pozwoliło na zamknięcie związków lotnych wewnątrz materiału, a tym samym umożliwiło zachowanie tych związków w wysuszonym materiale.

### **Główne osiągnięcia:**

1. Wyznaczenie wpływu filtracji zagęszczonego soku owocowego na kinetykę odwadniania i jakość odwadnianego materiału
2. Wyznaczenie wpływu właściwości fizycznych (lepkości, aktywności wody) filtrowanych roztworów osmotycznych na kinetykę odwadniania oraz jakość odwadnianego materiału
3. Wyznaczenie wpływu odwadniania osmotycznego w filtrowanych i niefiltrowanych roztworach osmotycznych z dodatkiem ekstraktu z mięty na proces dosuszania przy pomocy różnych metod

## 6. Bibliografia

1. Lenart, A.; Lewicki, P. Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables. In *Handbook of Industrial Drying, Third Edition*; Mujumdar, A., Ed.; CRC Press, 2006 ISBN 978-1-57444-668-5.
2. Zenoozian, M.S.; Devahastin, S.; Razavi, M.A.; Shahidi, F.; Poreza, H.R. Use of Artificial Neural Network and Image Analysis to Predict Physical Properties of Osmotically Dehydrated Pumpkin. *Drying Technology* **2007**, *26*, 132–144, doi:10.1080/07373930701781793.
3. Azoubel, P.M.; da Rocha Amorim, M.; Oliveira, S.S.B.; Maciel, M.I.S.; Rodrigues, J.D. Improvement of Water Transport and Carotenoid Retention During Drying of Papaya by Applying Ultrasonic Osmotic Pretreatment. *Food Eng Rev* **2015**, *7*, 185–192, doi:10.1007/s12393-015-9120-4.
4. Bui, H.-T.; Makhlof, J.; Ratti, C. Osmotic Dehydration of Tomato in Sucrose Solutions: Fick's Law Classical Modeling. *Journal of Food Science* **2009**, *74*, E250–E258, doi:10.1111/j.1750-3841.2009.01177.x.
5. Sareban, M.; Souraki, B.A. Anisotropic Diffusion during Osmotic Dehydration of Celery Stalks in Salt Solution. *Food and Bioproducts Processing* **2016**, *98*, 161–172, doi:10.1016/j.fbp.2016.01.005.
6. Shamaei, S.; Emam-Djomeh, Z.; Moini, S. ULTRASOUND-ASSISTED OSMOTIC DEHYDRATION OF CRANBERRIES: EFFECT OF FINISH DRYING METHODS AND ULTRASOUND FREQUENCY ON TEXTURAL PROPERTIES: ULTRASOUND-OSMOTIC DEHYDRATION OF CRANBERRY. *Journal of Texture Studies* **2012**, *43*, 133–141, doi:10.1111/j.1745-4603.2011.00323.x.
7. Li, H.; Zhao, C.; Guo, Y.; An, K.; Ding, S.; Wang, Z. Mass Transfer Evaluation of Ultrasonic Osmotic Dehydration of Cherry Tomatoes in Sucrose and Salt Solutions: Ultrasonic Osmotic Dehydration of Tomato. *International Journal of Food Science & Technology* **2012**, *47*, 954–960, doi:10.1111/j.1365-2621.2011.02927.x.
8. Delahaye, F. Should We Eat Less Salt? *Archives of Cardiovascular Diseases* **2013**, *106*, 324–332, doi:10.1016/j.acvd.2013.01.003.
9. Codella, R.; Terruzzi, I.; Luzi, L. Sugars, Exercise and Health. *Journal of Affective Disorders* **2017**, *224*, 76–86, doi:10.1016/j.jad.2016.10.035.
10. Kowalska, H.; Marzec, A.; Domian, E.; Masiarz, E.; Ciużyńska, A.; Galus, S.; Malkiewicz, A.; Lenart, A.; Kowalska, J. Physical and Sensory Properties of Japanese Quince Chips Obtained by Osmotic Dehydration in Fruit Juice Concentrates and Hybrid Drying. *Molecules* **2020**, *25*, 5504, doi:10.3390/molecules25235504.
11. Nowicka, P.; Wojdyło, A.; Lech, K.; Figiel, A. Chemical Composition, Antioxidant Capacity, and Sensory Quality of Dried Sour Cherry Fruits Pre-Dehydrated in Fruit Concentrates. *Food and Bioprocess Technology* **2015**, *8*, 2076–2095, doi:10.1007/s11947-015-1561-5.
12. Escriche, I.; Garcia-Pinchi, R.; Andrés, A.; Fito, P. Osmotic Dehydration of Kiwifruit (*Actinidia Chinensis*): Fluxes and Mass Transfer Kinetics. *Journal of Food Process Engineering* **2000**, *23*, 191–205, doi:10.1111/j.1745-4530.2000.tb00511.x.
13. Cano-Lamadrid, M.; Lech, K.; Michalska, A.; Wasilewska, M.; Figiel, A.; Wojdyło, A.; Carbonell-Barrachina, Á.A. Influence of Osmotic Dehydration Pre-Treatment and Combined Drying Method on Physico-Chemical and Sensory Properties of Pomegranate Arils, Cultivar Mollar de Elche. *Food Chemistry* **2017**, *232*, 306–315,

doi:10.1016/j.foodchem.2017.04.033.

14. Lech, K.; Figiel, A.; Wojdyło, A.; Korzeniowska, M.; Serowik, M.; Szarycz, M. Drying Kinetics and Bioactivity of Beetroot Slices Pretreated in Concentrated Chokeberry Juice and Dried with Vacuum Microwaves. *Drying Technology* **2015**, *33*, 1644–1653, doi:10.1080/07373937.2015.1075209.
15. Konopacka, D.; Jesionkowska, K. THE USEFULNESS OF NATURAL CONCENTRATED FRUIT JUICES AS OSMOTIC AGENTS FOR OSMO-DEHYDRATED DRIED FRUIT PRODUCTION. *16*, 11.
16. Samborska, K.; Eliasson, L.; Marzec, A.; Kowalska, J.; Piotrowski, D.; Lenart, A.; Kowalska, H. The Effect of Adding Berry Fruit Juice Concentrates and By-Product Extract to Sugar Solution on Osmotic Dehydration and Sensory Properties of Apples. *J Food Sci Technol* **2019**, *56*, 1927–1938, doi:10.1007/s13197-019-03658-0.
17. Bchir, B.; Besbes, S.; Karoui, R.; Paquot, M.; Attia, H.; Blecker, C. Osmotic Dehydration Kinetics of Pomegranate Seeds Using Date Juice as an Immersion Solution Base. *Food Bioprocess Technol* **2012**, *5*, 999–1009, doi:10.1007/s11947-010-0442-1.
18. Nowicka, P.; Wojdyło, A.; Lech, K.; Figiel, A. Influence of Osmodehydration Pretreatment and Combined Drying Method on the Bioactive Potential of Sour Cherry Fruits. *Food Bioprocess Technol* **2015**, *8*, 824–836, doi:10.1007/s11947-014-1447-y.
19. Mundada, M.; Hathan, B.S.; Maske, S. Mass Transfer Kinetics during Osmotic Dehydration of Pomegranate Arils. *Journal of Food Science* **2011**, *76*, E31–E39, doi:10.1111/j.1750-3841.2010.01921.x.
20. García-Toledo, J.A.; Ruiz-López, I.I.; Martínez-Sánchez, C.E.; Rodríguez-Miranda, J.; Carmona-García, R.; Torruco-Uco, J.G.; Ochoa-Martinez, L.A.; Herman-Lara, E. Effect of Osmotic Dehydration on the Physical and Chemical Properties of Mexican Ginger (*Zingiber Officinale* Var. Grand Cayman). *CyTA - Journal of Food* **2016**, *14*, 27–34, doi:10.1080/19476337.2015.1039068.
21. de Jesus Junqueira, J.R.; Corrêa, J.L.G.; de Mendonça, K.S.; Resende, N.S.; de Barros Vilas Boas, E.V. Influence of Sodium Replacement and Vacuum Pulse on the Osmotic Dehydration of Eggplant Slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* **2017**, *41*, 10–18, doi:10.1016/j.ifset.2017.01.006.
22. Muszyński, S.; Kornarzyński, K.; Gładyszewska, B. Osmotic Dehydration of Apples Under Reduced Pressure Conditions. *Agricultural Engineering* **2016**, *20*, 135–143, doi:10.1515/agriceng-2016-0051.
23. Yuan, Y.; Tan, L.; Xu, Y.; Dong, J.; Zhao, Y.; Yuan, Y. Optimization of Processing Parameters for Lettuce Vacuum Osmotic Dehydration Using Response Surface Methodology. *Pol. J. Food Nutr. Sci.* **2018**, *68*, 15–23, doi:10.1515/pjfn-2017-0013.
24. Fante, C.; Corrêa, J.; Natividade, M.; Lima, J.; Lima, L. Drying of Plums (*Prunus* Sp, c.v Gulfblyze) Treated with KCl in the Field and Subjected to Pulsed Vacuum Osmotic Dehydration: PVOD of Plums. *International Journal of Food Science & Technology* **2011**, *46*, 1080–1085, doi:10.1111/j.1365-2621.2011.02619.x.
25. Ferrari, C.C.; Arballo, J.R.; Mascheroni, R.H.; Hubinger, M.D. Modelling of Mass Transfer and Texture Evaluation during Osmotic Dehydration of Melon under Vacuum: Osmotic Dehydration of Melon under Vacuum. *International Journal of Food Science & Technology* **2011**, *46*, 436–443, doi:10.1111/j.1365-2621.2010.02510.x.
26. Nowacka, M.; Wedzik, M. Effect of Ultrasound Treatment on Microstructure, Colour and Carotenoid Content in Fresh and Dried Carrot Tissue. *Applied Acoustics* **2016**, *103*, 163–171, doi:10.1016/j.apacoust.2015.06.011.



27. Fei, P.; Lifu, C.; Wenjian, Y.; Liyan, Z.; Yong, F.; Ning, M.; Qiuhui, H. Comparison of Osmotic Dehydration and Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration on the State of Water, Texture, and Nutrition of *Agaricus Bisporus*. *CyTA - Journal of Food* **2018**, *16*, 181–189, doi:10.1080/19476337.2017.1365774.
28. Çağlayan, D.; Barutçu Mazi, I. Effects of Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration as a Pretreatment and Finish Drying Methods on the Quality of Pumpkin Slices. *J Food Process Preserv* **2018**, *42*, e13679, doi:10.1111/jfpp.13679.
29. Mierzwa, D.; Kowalski, S.J. Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration and Convective Drying of Apples: Process Kinetics and Quality Issues. *Chemical and Process Engineering* **2016**, *37*, 383–391, doi:10.1515/cpe-2016-0031.
30. Celejewska, K.; Mieszczakowska-Fraç, M.; Konopacka, D.; Krupa, T. The Influence of Ultrasound and Cultivar Selection on the Biocompounds and Physicochemical Characteristics of Dried Blueberry (*Vaccinium Corymbosum* L.) Snacks: US Influence on Blueberry Dehydration.... *Journal of Food Science* **2018**, *83*, 2305–2316, doi:10.1111/1750-3841.14292.
31. Amami, E.; Khezami, W.; Mezrigui, S.; Badwaik, L.S.; Bejar, A.K.; Perez, C.T.; Kechaou, N. Effect of Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration Pretreatment on the Convective Drying of Strawberry. *Ultrasonics Sonochemistry* **2017**, *36*, 286–300, doi:10.1016/j.ultsonch.2016.12.007.
32. Feng, Y.; Yu, X.; Yagoub, A.E.A.; Xu, B.; Wu, B.; Zhang, L.; Zhou, C. Vacuum Pretreatment Coupled to Ultrasound Assisted Osmotic Dehydration as a Novel Method for Garlic Slices Dehydration. *Ultrasonics Sonochemistry* **2019**, *50*, 363–372, doi:10.1016/j.ultsonch.2018.09.038.
33. Azarpazhooh, E.; Ramaswamy, H.S. Evaluation of Diffusion and Azuara Models for Mass Transfer Kinetics during Microwave-Osmotic Dehydration of Apples under Continuous Flow Medium-Spray Conditions. *Drying Technology* **2009**, *28*, 57–67, doi:10.1080/07373930903430694.
34. Li, H.; Ramaswamy, H.S. Osmotic Dehydration: Dynamics of Equilibrium and Pseudo-Equilibrium Kinetics. *International Journal of Food Properties* **2010**, *13*, 234–250, doi:10.1080/10942910802331272.
35. Lech, K.; Michalska, A.; Wojdyło, A.; Nowicka, P.; Figiel, A. The Influence of the Osmotic Dehydration Process on Physicochemical Properties of Osmotic Solution. *Molecules* **2017**, *22*, 2246, doi:10.3390/molecules22122246.
36. Shi, J.; Le Maguer, M. OSMOTIC DEHYDRATION OF FOODS: MASS TRANSFER AND MODELING ASPECTS. *Food Reviews International* **2002**, *18*, 305–335, doi:10.1081/FRI-120016208.
37. Phisut, N. Factors Affecting Mass Transfer during Osmotic Dehydration of Fruits. *International Food Research Journal* **2012**, *19*, 7–18.
38. Antonyuk, S.; Heinrich, S.; Deen, N.; Kuipers, H. Influence of Liquid Layers on Energy Absorption during Particle Impact. *Particuology* **2009**, *7*, 245–259, doi:https://doi.org/10.1016/j.partic.2009.04.006.
39. Zhao, Y.; Xie, J. Practical Applications of Vacuum Impregnation in Fruit and Vegetable Processing. **2004**, *18*.
40. Cichowska, J.; Czyżewski, J.; Kowalska, H.; Witrowa-Rajchert, D. Efficiency of Osmotic Dehydration of Apples in Polyols Solutions. *Molecules* **2018**, *23*, 446, doi:10.3390/molecules23020446.
41. Pieters, B.; Assis, F.R.; Morais, R.M.S.C.; Morais, A.M.M.B. Quality of ‘Royal

Gala' Cut Apple during Osmotic Dehydration. *Braz. J. Food Technol.* **2020**, *23*, e2019059, doi:10.1590/1981-6723.05919.

42. Rocha R. P. Influence of Drying Process on the Quality of Medicinal Plants: A Review. *Journal of Medicinal Plants Research* **2011**, *5*, doi:10.5897/JMPRX11.001.

43. Calín-Sánchez, Á.; Figiel, A.; Lech, K.; Szumny, A.; Carbonell-Barrachina, Á.A. Effects of Drying Methods on the Composition of Thyme (*Thymus Vulgaris* L.) Essential Oil. *Drying Technology* **2013**, *31*, 224–235, doi:10.1080/07373937.2012.725686.

44. Calín-Sánchez, Á.; Figiel, A.; Lech, K.; Szumny, A.; Martínez-Tomé, J.; Carbonell-Barrachina, Á.A. Drying Methods Affect the Aroma of *Origanum Majorana* L. Analyzed by GC–MS and Descriptive Sensory Analysis. *Industrial Crops and Products* **2015**, *74*, 218–227, doi:10.1016/j.indcrop.2015.04.067.

45. Szumny, A.; Figiel, A.; Gutiérrez-Ortiz, A.; Carbonell-Barrachina, Á.A. Composition of Rosemary Essential Oil (*Rosmarinus Officinalis*) as Affected by Drying Method. *Journal of Food Engineering* **2010**, *97*, 253–260, doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.10.019.

46. Stępień, A.E.; Gorzelany, J.; Matłok, N.; Lech, K.; Figiel, A. The Effect of Drying Methods on the Energy Consumption, Bioactive Potential and Colour of Dried Leaves of Pink Rock Rose (*Cistus Creticus*). *Journal of Food Science and Technology* **2019**, *56*, 2386–2394, doi:10.1007/s13197-019-03656-2.

47. Macedo, L.L.; Vimercati, W.C.; da Silva Araújo, C.; Saraiva, S.H.; Teixeira, L.J.Q. Effect of Drying Air Temperature on Drying Kinetics and Physicochemical Characteristics of Dried Banana. *Journal of Food Process Engineering* **2020**, *43*, e13451, doi:10.1111/jfpe.13451.

48. Paengkanya, S.; Soponronnarit, S.; Nathakaranakule, A. Application of Microwaves for Drying of Durian Chips. *Food and Bioprocess Processing* **2015**, *96*, 1–11, doi:10.1016/j.fbp.2015.06.001.

49. Figiel, A.; Michalska, A. Overall Quality of Fruits and Vegetables Products Affected by the Drying Processes with the Assistance of Vacuum-Microwaves. *International Journal of Molecular Sciences* **2016**, *18*, 71, doi:10.3390/ijms18010071.

50. Kowalska, J.; Marzec, A.; Domian, E.; Galus, S.; Cieurzyńska, A.; Lenart, A.; Kowalska, H. The Use of Antioxidant Potential of Chokeberry Juice in Creating Pro-Healthy Dried Apples by Hybrid (Convection-Microwave-Vacuum) Method. *Molecules* **2020**, *25*, 5680, doi:10.3390/molecules25235680.

51. Luo, W.; Tappi, S.; Wang, C.; Yu, Y.; Zhu, S.; Dalla Rosa, M.; Rocculi, P. Effect of High Hydrostatic Pressure (HHP) on the Antioxidant and Volatile Properties of Candied Wumei Fruit (*Prunus Mume*) During Osmotic Dehydration. *Food Bioprocess Technol* **2019**, *12*, 98–109, doi:10.1007/s11947-018-2196-0.

52. An, K.; Tang, D.; Wu, J.; Fu, M.; Wen, J.; Xiao, G.; Xu, Y. Comparison of Pulsed Vacuum and Ultrasound Osmotic Dehydration on Drying of Chinese Ginger (*Zingiber Officinale* Roscoe): Drying Characteristics, Antioxidant Capacity, and Volatile Profiles. *Food Sci Nutr* **2019**, *7*, 2537–2545, doi:10.1002/fsn3.1103.

53. Heredia, A.; Peinado, I.; Rosa, E.; Andrés, A.; Escriche, I. Volatile Profile of Dehydrated Cherry Tomato: Influences of Osmotic Pre-Treatment and Microwave Power. *Food Chemistry* **2012**, *130*, 889–895, doi:10.1016/j.foodchem.2011.08.003.

54. Blowman, K.; Magalhães, M.; Lemos, M.F.L.; Cabral, C.; Pires, I.M. Anticancer Properties of Essential Oils and Other Natural Products. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine* **2018**, *2018*, 1–12, doi:10.1155/2018/3149362.

55. Salehi, B.; Mishra, A.P.; Shukla, I.; Sharifi-Rad, M.; Contreras, M. del M.; Segura-Carretero, A.; Fathi, H.; Nasrabadi, N.N.; Kobarfard, F.; Sharifi-Rad, J. Thymol, Thyme, and Other Plant Sources: Health and Potential Uses: Thymol, Health and Potential Uses. *Phytotherapy Research* **2018**, *32*, 1688–1706, doi:10.1002/ptr.6109.
56. Condò, C.; Anacarso, I.; Sabia, C.; Iseppi, R.; Anfelli, I.; Forti, L.; de Niederhäusern, S.; Bondi, M.; Messi, P. Antimicrobial Activity of Spices Essential Oils and Its Effectiveness on Mature Biofilms of Human Pathogens. *Natural Product Research* **2018**, 1–8, doi:10.1080/14786419.2018.1490904.
57. de Sousa Barros, A.; de Morais, S.M.; Ferreira, P.A.T.; Vieira, Í.G.P.; Craveiro, A.A.; dos Santos Fontenelle, R.O.; de Menezes, J.E.S.A.; da Silva, F.W.F.; de Sousa, H.A. Chemical Composition and Functional Properties of Essential Oils from Mentha Species. *Industrial Crops and Products* **2015**, *76*, 557–564, doi:10.1016/j.indcrop.2015.07.004.
58. Zielinska, M.; Markowski, M. Effect of Microwave-Vacuum, Ultrasonication, and Freezing on Mass Transfer Kinetics and Diffusivity during Osmotic Dehydration of Cranberries. *Drying Technology* **2018**, *36*, 1158–1169, doi:10.1080/07373937.2017.1390476.
59. Wu, X.-F.; Zhang, M.; Mujumdar, A.S.; Yang, C.-H. Effect of Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration Pretreatment on the Infrared Drying of Pakchoi Stems. *Drying Technology* **2019**, 1–12, doi:10.1080/07373937.2019.1608232.
60. Lech, K.; Michalska, A.; Wojdyło, A.; Nowicka, P.; Figiel, A. The Influence of Physical Properties of Selected Plant Materials on the Process of Osmotic Dehydration. *LWT* **2018**, *91*, 588–594, doi:10.1016/j.lwt.2018.02.012.
61. Lech, K.; Figiel, A.; Michalska, A.; Wojdyło, A.; Nowicka, P. The Effect of Selected Fruit Juice Concentrates Used as Osmotic Agents on the Drying Kinetics and Chemical Properties of Vacuum-Microwave Drying of Pumpkin. *Journal of Food Quality* **2018**, *2018*, 1–11, doi:10.1155/2018/7293932.
62. Goula, A.M.; Kokolaki, M.; Daftsiou, E. Use of Ultrasound for Osmotic Dehydration. The Case of Potatoes. *Food and Bioprocess Processing* **2017**, *105*, 157–170, doi:10.1016/j.fbp.2017.07.008.
63. Raoult-Wack, A.-L.; Guilbert, S.; Maguer, M.L.; Rios, G. SIMULTANEOUS WATER AND SOLUTE TRANSPORT IN SHRINKING MEDIA - PART 1. *Drying Technology* **1991**, *9*, 589–612, doi:10.1080/07373939108916698.
64. Saurel, R.; Raoult-Wack, A.-L.; Rios, G.; Guilbert, S. Mass Transfer Phenomena during Osmotic Dehydration of Apple I. Fresh Plant Tissue. *International Journal of Food Science & Technology* **2007**, *29*, 531–542, doi:10.1111/j.1365-2621.1994.tb02095.x.
65. Denev, P.; Kratchanova, M.; Petrova, I.; Klisurova, D.; Georgiev, Y.; Ognyanov, M.; Yanakieva, I. Black Chokeberry (*Aronia Melanocarpa* (Michx.) Elliot) Fruits and Functional Drinks Differ Significantly in Their Chemical Composition and Antioxidant Activity. *Journal of Chemistry* **2018**, *2018*, 9574587, doi:10.1155/2018/9574587.
66. Benzie, I.F.F.; Strain, J.J. The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of “Antioxidant Power”: The FRAP Assay. *Analytical Biochemistry* **1996**, *239*, 70–76, doi:10.1006/abio.1996.0292.
67. Oszmiański, J.; Wojdyło, A. *Aronia Melanocarpa* Phenolics and Their Antioxidant Activity. *Eur Food Res Technol* **2005**, *221*, 809–813, doi:10.1007/s00217-005-0002-5.
68. Chandra, A.; Kumar, S.; Tarafdar, A.; Nema, P.K. Ultrasonic and Osmotic Pretreatments Followed by Convective and Vacuum Drying of Papaya Slices. *J Sci Food Agric* **2020**, jsfa.10847, doi:10.1002/jsfa.10847.

## Pozostały dorobek naukowy

Dorobek publikacyjny obejmuje 10 publikacji naukowych z listy MNiSW (łącznie z publikacjami wchodzącymi w skład publikacji).

4. Sumaryczny Impact Factor IF według roku opublikowania 32,417 (łącznie z publikacjami wchodzącymi w skład cyklu)
5. Suma punktów za publikację wg. MNiSW: 950 (łącznie z osiągnięciem głównym)
6. Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS): 27 (bez autocytowań: 18)
7. Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS): 3

Ponadto:

- Pełnienie funkcji **Kierownika Projektu** w projekcie „Wpływ właściwości fizykochemicznych roztworów osmotycznych z udziałem ekstraktów z ziół na proces wymiany masy podczas odwadniania osmotycznego i suszenia surowców roślinnych” finansowanego w ramach konkursu Preludium 2019/33/N/NZ9/00247 finansowanego przez Narodowego Centrum Nauki (NCN)
- Udział w 3 innych projektach w roli **Wykonawcy** (Preludium oraz w dwóch Dolnośląskich Bonach na Innowacje)
- **Zagraniczne staże naukowe**

03.2020 – 04.2020	The University of Auckland, Auckland, Nowa Zelandia, Staż w zakresie suszenia rozpyłowego roztworów osmotycznych
08.2015 - 09.2015	Fundación Circe, Saragossa, Hiszpania, Staż w zakresie gospodarki odpadami (LCA of fruit pruning supply chain)
- Uczestnictwo w 9 konferencjach naukowych (w tym 4 w trakcie doktoratu)
- Zrecenzowane artykuły naukowe: 6

## **Załączniki**

- Załącznik 1 – Opublikowane prace wchodzące w skład cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych wraz z oświadczeniami współautorów