

mgr inż. Jan Piecko

Wpływ zastosowania ultradźwięków na zawartość związków bioaktywnych i właściwości reologiczne przetworów z wybranych owoców jagodowych

The effect of ultrasound application on the content of bioactive compounds
and rheological properties of products made from selected berries

Praca doktorska
Doctoral thesis

Promotor:

dr hab. Monika Mieszczakowska-Frać, prof. IO
Instytut Ogrodnictwa – Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Przechowywania i Przetwórstwa Owoców i Warzyw

Skierniewice, 2026

Podziękowania

Serdeczne podziękowania kieruję dla całego zespołu Zakładu Przechowywania i Przetwarzania Owoców i Warzyw pod kierownictwem dr hab. Moniki Mieszczakowskiej-Frąc, prof. IO-PIB, za możliwość zrealizowania badań, a w szczególności dla:

Łukasza Murgrabi

Moniki Stępowskiej

Moniki Zbrzeźniak

Wioli Jędrzejczak

Danuty Perzanowskiej

Karoliny Wieteski

Justyny Szwejd-Grzybowskiej

za Wasz niebagatelny wkład w realizację tych badań.

Dziękuję profesorowi Ryszardowi Kossonowi, dzięki któremu zaczęła się ta przygoda i który jako pierwszy we mnie wierzył.

Dziękuję Pani Alicji, Szymonowi, Annie, Paulinie, Ewie oraz Karolinie, których dobroć i serdeczność pomogły mi przetrwać trudne chwile.

Szczególne podziękowania dla mojej żony Ewy, która wbrew zdrowemu rozsądkowi zawsze mnie wspierała.

Dziękuję!

Skierniewice, dn. 23.03.2026

Tytuł / stopień naukowy Promotora: dr hab.

Imię i nazwisko Promotora: Monika Mieszczakowska-Frąc, prof. IO-PIB

Dziedzina naukowa: nauki rolnicze

Dyscyplina naukowa: rolnictwo i ogrodnictwo

**Dyrektor Szkoły Doktorskiej
„AgroBioTech PhD”**

Oświadczenie Promotora o przyjęciu rozprawy doktorskiej Pana

mgr inż. Jan Piecko

(tytuł/stopień / imię i nazwisko Autora rozprawy doktorskiej)

pt.: Wpływ zastosowania ultradźwięków na zawartość związków bioaktywnych i właściwości reologiczne przetworów z wybranych owoców jagodowych

Jako Promotor przyjmuję niniejszą rozprawę doktorską, która spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. z 2024 r. poz. 1571) oraz może być skierowana do dalszych etapów związanych z postępowaniem w sprawie nadania stopnia doktora w:

- dziedzinie nauk: nauki rolnicze
- dyscyplinie naukowej: rolnictwo i ogrodnictwo

23.03.2026 M. Mieszczakowska-Frąc
(data i podpis Promotora)

Oświadczenie Autora rozprawy doktorskiej

Świadomy odpowiedzialności prawnej oświadczam, że rozprawa doktorska przygotowana przeze mnie nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami prawa.

Oświadczam również, że przedstawiona rozprawa nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem stopnia naukowego w wyższej uczelni lub innej uprawnionej instytucji naukowej.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja rozprawy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.


23.03.2026

Streszczenie

Celem niniejszej rozprawy, składającej się z cyklu czterech oryginalnych publikacji, było określenie wpływu zastosowania ultradźwięków (UD) podczas przetwarzania wybranych gatunków owoców jagodowych na zawartość związków bioaktywnych oraz właściwości reologiczne otrzymanych przetworów. Potencjał aplikacyjny ultradźwięków w przemyśle spożywczym jest intensywnie badany ze względu na ich nietermiczny charakter, szczególnie istotny w kontekście obecności termolabilnych składników w żywności. Hipotezy badawcze oraz schemat prac eksperymentalnych sformułowano w sposób umożliwiający poszerzenie aktualnego stanu wiedzy w tym obszarze.

W ramach prac eksperymentalnych badano wpływ oddziaływania UD na trzy główne kierunki przetwarzania owoców: produkcję soków, przecierów i suszy. W przypadku soków UD zastosowano jako proces wspomagający ekstrakcję soku z miazgi owocowej oraz homogenizację wytłoczonego soku. Do badań wybrano owoce jagodowe o dużym znaczeniu gospodarczym w Polsce: truskawki, czarne porzeczki, maliny oraz jagodę kamczacką gatunek o wysokim potencjale wdrożenia do uprawy towarowej. W badaniach dotyczących soku i przecieru zastosowano homogenizator ultradźwiękowy o mocy 750 W. Natomiast wspomaganie suszenia realizowano poprzez ciągłe oddziaływanie UD o mocy 200 W, generowane przez płytowy emiter ultradźwiękowy.

W doświadczeniu opisanym w publikacji 1 wykazano, że obróbka ultradźwiękowa pulpy z owoców truskawek i malin prowadzi do zwiększenia wydajności uzysku soku, osiągając efekty porównywalne z maceracją enzymatyczną. W przypadku truskawek wzrost wydajności tłoczenia wyniósł 56% w porównaniu z próbą kontrolną. Jednocześnie stwierdzono, że efekt ultradźwięków jest zależny od gatunku, ponieważ w przypadku czarnej porzeczki niemożliwe było wytłoczenie soku z pulpy po oddziaływaniu UD na miazgę. Sok malinowy uzyskany po maceracji UD charakteryzował się największą zawartością antocyjanów, co skutkowało aktywnością przeciwutleniającą soku o 36,6% wyższą w porównaniu z kontrolą. Interesującym osiągnięciem jest wykazanie, że UD przyczyniają się do zmian na poziomie cząsteczkowym antocyjanów, zmieniając tym samym udział poszczególnych antocyjanów w soku malinowym.

Na podstawie wyników publikacji 2 stwierdzono, że homogenizacja ultradźwiękowa poprawia stabilność fizyczną soku truskawkowego poprzez zmniejszenie wielkości cząstek miąższu, nie powodując przy tym degradacji składników

bioaktywnych. Homogenizacja ultradźwiękowa zmniejszyła udział cząstek o rozmiarze powyżej 25 μm o 45%, przyczyniając się tym samym do ograniczenia sedymentacji w trakcie przechowywania.

Eksperyment przedstawiony w publikacji 3 dotyczył procesu suszenia plastrów truskawek wspomaganych ultradźwiękami, z uwzględnieniem wpływu zmienności odmianowej oraz zawartości związków bioaktywnych produktu finalnego. Otrzymane wyniki jednoznacznie potwierdziły, że technologia ultradźwiękowa skraca czas trwania procesu średnio o około 35%. Ponadto, uzyskane wyniki potwierdziły istotny wpływ cech odmianowych.

W publikacji 4 badania koncentrowały się na wpływie obróbki ultradźwiękowej pulpy z owoców jagodowych na właściwości otrzymanych przecierów. Jednym z osiągnięć pracy było wykazanie, że moment zastosowania ultradźwięków w schemacie technologicznym ma kluczowe znaczenie dla jakości produktu, przede wszystkim dla właściwości reologicznych przecieru. Pomiar właściwości mikroreologicznych wskazały na bardziej płynny charakter przecierów uzyskanych z wykorzystaniem ultradźwięków, a ocena sensoryczna potwierdziła wyższą ich homogeniczność.

Przeprowadzone eksperymenty potwierdzają wysoki potencjał zastosowania ultradźwięków w przetwórstwie owoców jagodowych, zarówno w kontekście poprawy retencji związków bioaktywnych, jak i kształtowania właściwości reologicznych przetworów. W niniejszej rozprawie kompleksowo udokumentowano wpływ ultradźwięków na przetwory z owoców jagodowych, wykazując silny wpływ gatunku i odmiany na uzyskane efekty, aspekt dotychczas słabo reprezentowany w literaturze. Badania wypełniają również lukę w literaturze dotyczącej wpływu obróbki ultradźwiękowej na właściwości sensoryczne produktów i zawierają elementy aplikacyjne dla wdrożenia w warunkach produkcji przemysłowej.

Słowa kluczowe: owoce jagodowe, związki bioaktywne, ultradźwięki, reologia, jakość

Abstract

The aim of this work, consisting of a series of four publications, was to determine the impact of the use of ultrasound (UD) during the processing of selected berry species on the content of bioactive compounds and the rheological properties of the resulting products. The application potential of ultrasound in the food industry is being intensively researched due to its non-thermal nature, which is particularly important in the context of the presence of thermolabile components in food. The research hypotheses and experimental work plan were formulated in a way that would expand the current state of knowledge in this area.

As part of the experimental work, the impact of UD was studied in three main areas of fruit processing: juices, purees and dried fruits. In the case of juices, UD was used both as a process supporting juice extraction from fruit pulp and as a tool for homogenising pressed juice. Berries of high economic importance in Poland were selected for the study: strawberries, blackcurrants, raspberries and hascap berries, a species with high potential for commercial cultivation. In the studies on juice and puree, a 750 W ultrasonic homogeniser was used. Drying was assisted by continuous exposure to 200 W UD generated by a disc-type ultrasonic emitter.

The experiment described in publication 1 showed that ultrasonic treatment of strawberry and raspberry pulp leads to an increase in juice yield, achieving effects comparable to enzymatic maceration. In the case of strawberries, the increase in pressing yield was 56% compared to the control sample. At the same time, it was found that the effect of ultrasound depends on the species, as in the case of blackcurrants it was impossible to extract juice from UD-treated pulp. Raspberry juice obtained after UD maceration showed the highest anthocyanin content, resulting in 36.6% higher antioxidant activity of the juice compared to the control. An interesting finding is that UD contributes to changes at the molecular level of anthocyanins, thereby altering the proportion of individual anthocyanins in raspberry juice.

Based on the results of publication 2, it was found that ultrasonic homogenisation improves the physical stability of strawberry juice by reducing the size of pulp particles without causing degradation of bioactive components. Ultrasonic homogenisation reduced the proportion of particles larger than 25 μm by 45%, thereby contributing to reduced sedimentation during storage.

The experiment presented in publication 3 concerned ultrasound-assisted drying of strawberry slices, taking into account cultivar variability and the content of bioactive compounds in the final product. The results obtained clearly confirmed that ultrasound

reduces the duration of the process by an average of approximately 35%. Furthermore, the results confirmed the significant influence of cultivar characteristics on the drying process.

In publication 4, the research focused on the effect of ultrasonic treatment of berry pulp on the properties of the resulting purees. One of the most important achievements of the work was to demonstrate that the timing of ultrasonic application in the technological scheme is crucial for product quality, especially for the rheological properties of the puree. Measurements of microrheological properties indicated a more fluid character of product obtained using ultrasound, and sensory evaluation confirmed their higher homogeneity.

The experiments conducted confirm the high potential of ultrasound application in berry processing, both in terms of improving the retention of bioactive compounds and shaping the rheological properties of processed products. This dissertation comprehensively documents the effect of ultrasound on berry fruit products, demonstrating the strong influence of species and cultivar on the results obtained, an aspect that has been poorly represented in the literature to date. The research also fills a gap in the literature on the effect of ultrasonic treatment on the sensory properties of products and includes application elements relevant for implementation under industrial production conditions.

Keywords: berries, bioactive compounds, ultrasound, rheology

SPIS TREŚCI

1. WYKAZ OPUBLIKOWANYCH, TEMATYCZNIE POWIĄZANYCH ARTYKUŁÓW NAUKOWYCH WCHODZĄCYCH W SKŁAD ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	3
1.1. PUBLIKACJA 1	3
1.2. PUBLIKACJA 2	3
1.3. PUBLIKACJA 3	3
1.4. PUBLIKACJA 4	3
1.5. DANE BIBLIOGRAFICZNE CYKLU PUBLIKACJI STANOWIĄCYCH ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ	3
2. WPROWADZENIE I PRZEGLĄD LITERATURY	5
2.1. OWOCE JAGODOWE	5
2.2. WARTOŚĆ PROZDROWOTNA OWOCÓW JAGODOWYCH	6
2.3. PRZETWÓRSTWO OWOCÓW JAGODOWYCH	9
2.4. WYKORZYSTANIE ULTRADŹWIĘKÓW W PRZETWÓRSTWIE ŻYWNOŚCI	10
2.4.1. Definicja i mechanizm działania ultradźwięków	11
2.4.2. Zastosowanie ultradźwięków w produkcji soków i przecierów	13
3. CEL PRACY I HIPOTEZY BADAWCZE	17
4. ZAKRES PRACY	18
5. MATERIAŁ BADAWCZY I METODY BADAŃ	21
5.1. SUROWIEC	21
5.2. ODDZIAŁYWANIE ULTRADŹWIĘKAMI	21
5.2.1. Obróbka ultradźwiękowa soku i pulpy z owoców	21
5.2.2. Wspomaganie ultradźwiękami procesu suszenia	22
5.3. SCHEMATY ZREALIZOWANYCH EKSPERYMENTÓW	23
6. DYSKUSJA WYNIKÓW I OSIĄGNIĘĆ CYKLU PUBLIKACJI	29
6.1. WPLYW OBRÓBKI ULTRADŹWIĘKOWEJ NA ZAWARTOŚĆ ZWIĄZKÓW BIOAKTYWNYCH W SOKU Z OWOCÓW JAGODOWYCH	29
6.2. HOMOGENIZACJA ULTRADŹWIĘKOWA MĘTNEGO SOKU Z TRUSKAWEK	33
6.3. ZASTOSOWANIE ULTRADŹWIĘKÓW W PROCESIE SUSZENIA OWOCÓW JAGODOWYCH NA PRZYKŁADZIE PLASTRÓW TRUSKAWEK	37
7. STWIERDZENIA I WNIOSKI	47
8. SPIS LITERATURY	50

1. Wykaz opublikowanych, tematycznie powiązanych artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej

1.1. Publikacja 1

Piecko, J.; Mieszczakowska-Frać, M.; Celejewska, K.; Szwejdą-Grzybowska, J. 2024. Impact of Ultrasound Pretreatment on Juice Yield and Bioactive Content in Juice Produced from Selected Berries Fruit. *Foods*, 13, 1231.

DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13081231>

Impact Factor: 5.1, MNiSW 100 pkt.

1.2. Publikacja 2

Piecko J.; Mieszczakowska-Frać M.; Szwejdą-Grzybowska J.; Celejewska K. 2024. Wpływ rodzaju homogenizacji na właściwości reologiczne i zawartość związków bioaktywnych w mętym soku z truskawek. *ŻYWNOSĆ. NAUKA. TECHNOLOGIA. JAKOŚĆ*, 31, 3(140), 171-185.

DOI: <https://doi.org/10.15193/zntj/2024/140/517>.

Impact Factor: brak, MNiSW 20 pkt.

1.3. Publikacja 3

Piecko, J.; Mieszczakowska-Frać, M.; Celejewska, K.; Dickinson, N.; Szwejdą-Grzybowska, J. Effect of Ultrasound-Assisted Convective Drying on the Content of Bioactive Compounds and Drying Rate of Strawberry Slices. *Appl. Sci.* 2025, 15, 8947.

DOI: <https://doi.org/10.3390/app15168947>.

Impact Factor: 2.5, MNiSW 100 pkt.

1.4. Publikacja 4

Piecko, J.; Mieszczakowska-Frać, M.; Dickinson, N.J.; Wrzodak, A.; Celejewska, K.; Frøst, M.B.; Lange, B.; Dandanell, C.; Lewandowicz, J.; Jankowska, P. 2026. Ultrasound Treatment in Berry Puree Production: Effects on Sensory, Rheological, and Chemical Properties. *Molecules*, 31, 260.

DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules31020260>.

Impact Factor: 4.6 , MNiSW 140 pkt.

Udział doktoranta w powyższych publikacjach: przygotowanie i przeprowadzenie eksperymentu, udział w analizach chemicznych, zestawienie wyników i ich analiza, przygotowanie pierwszej wersji artykułu, nanoszenie poprawek współautorów oraz poprawek wynikających z recenzji pracy podczas procesu publikacyjnego, pełnienie roli autora korespondencyjnego.

1.5. Dane bibliograficzne cyklu publikacji stanowiących rozprawę doktorską

Łączna liczba punktów artykułów wchodzących w skład rozprawy wynosi **360 pkt.**

Łączna wartość współczynnika Impact Factor czasopism, w których opublikowano artykuły wchodzące w skład rozprawy doktorskiej, wynosi **12,2.**

2. Wprowadzenie i przegląd literatury

2.1. Owoce jagodowe

Polska należy do czołowych producentów owoców jagodowych na świecie. Spośród krajów Unii Europejskiej to właśnie Polska odnotowuje największe zbiory malin i porzeczek, zajmuje drugie miejsce w produkcji borówki amerykańskiej i truskawki oraz jest znaczącym producentem agrestu i aronii [1]. W 2022 roku Polska odpowiadała za około 20% całkowitej produkcji owoców jagodowych w Unii Europejskiej [2]. Do gatunków o wysokim znaczeniu gospodarczym na terenie Unii Europejskiej zalicza się przede wszystkim truskawki o średniej rocznej produkcji wynoszącej około 3 mln ton. W dalszej kolejności największy udział w produkcji mają maliny (1,9 mln ton), porzeczki (łącznie czarna i czerwona – 1,2 mln ton) oraz borówki amerykańskie (0,5 mln ton) [3].

W ujęciu botanicznym jagoda to owoc, w którym owocnia jest gruba i soczysta, oraz w którym można wyróżnić trzy warstwy: zewnętrzną – egzokarp, zwykle zawierającą barwnik owocu; stosunkowo grubą warstwę pośrednią – mezokarp; oraz błoniastą wewnętrzną warstwę – endokarp [4]. Mięsista owocnia może zawierać jedno nasiono (np. w przypadku awokado), lub wiele nasion, jak u borówki amerykańskiej oraz porzeczki. Wśród owoców błędnie zaliczanych do owoców jagodowych znajdują się również owoce zbiorowe (wielopestkowiec), które powstają w wyniku oddzielnego dojrzewania owocolistków na wspólnym dnie kwiatowym. Mimo, że struktury te tworzą morfologicznie odrębne jednostki, wizualnie sprawiają wrażenie pojedynczego owocu, jak w przypadku rodzaju *Rubus* [4]. Jednym z typowych przykładów owoców postrzeganych jako owoc jagodowy są truskawki. Owoc ten również, z botanicznego punktu widzenia, nie jest jagodą, lecz owocem rzekomym (wieloorzeszkowiec), który powstaje poprzez rozrośnięcie dna kwiatowego [5]. Morfologicznie struktura owocu truskawki ma budowę nietypową, rzadko spotykaną w naturze.

Z punktu widzenia technologii żywności pojęcie owoców jagodowych odnosi się do grupy owoców, która jest niejednorodna botanicznie, stworzonej na potrzeby wyodrębnienia grupy surowców o zbliżonych cechach funkcjonalnych i technologicznych. W przetwórstwie żywności termin „owoce jagodowe” jest wymiennie stosowany z określeniem “owoce miękkie” i odnosi się do owoców o niewielkich rozmiarach, delikatnej strukturze tkankowej oraz intensywnym zabarwieniu. Ich delikatna struktura ogranicza ich trwałość pozbiorną i wymusza

szybkie przetwarzanie lub stosowanie metod utrwalania. Do tej grupy owoców zalicza się m.in. owoce z rodzaju *Fragaria* (truskawka), *Vaccinium* (borówka amerykańska, żurawina wielkoowocowa i borówka czarna), *Rubus* (maliny, jeżyny), *Ribes* (agrest oraz czarna i czerwona porzeczka), *Aronia* (aronia czarnoowocowa) oraz *Sambucus* (czarny bez) [6].

2.2. Wartość prozdrowotna owoców jagodowych

Owoce jagodowe są źródłem wielu związków bioaktywnych, wśród których szczególne znaczenie mają antocyjany, należące do grupy związków polifenolowy, a także witaminy (zwłaszcza witamina C, E oraz prowitamina A) oraz błonnik pokarmowy.

Do najważniejszych składników decydujących o prozdrowotnych właściwościach owoców jagodowych należą polifenole. Związki te szczególnie obficie występują w owocach takich jak porzeczka czarna, aronia, jagoda kamiczacka, malina, jeżyna czy truskawka. Polifenole są wtórnymi metabolitami roślinnymi powstającymi głównie na szlaku szikimowym [7]. Biorąc pod uwagę ich strukturę chemiczną, polifenole klasyfikuje się do pięciu głównych klas: flawonoidy (flawanole, izoflawony, antocyjany, flawanony, flawony, flawonole), kwasy fenolowe (kwasy hydroksybenzoesowe i hydroksycynamonowe), stilbeny, lignany, oraz taniny [8]. Pomimo setek, jeśli nie tysięcy lat zastosowania owoców jagodowych w medycynie tradycyjnej [9], dopiero od około 35 lat intensywnie bada się związki należące do grupy polifenoli i ich wpływ na zdrowie człowieka [8, 10]. Związkom polifenolowym przypisuje się dobroczynny wpływ na zdrowie człowieka, wynikający z ich zdolności do ograniczania stresu oksydacyjnego, właściwości przeciwmikrobiologicznych oraz aktywności przeciwnowotworowej [8]. Wykazano również, że polifenole mogą przyczyniać się do: zmniejszenia ryzyka rozwoju cukrzycy, otyłości, chorób sercowo-naczyniowych, oraz regulacji ciśnienia tętniczego krwi, a także wykazują właściwości neuroprotektoryjne [11, 12]. Główny mechanizm działania polifenoli dostarczanych wraz z żywnością polega na ograniczaniu negatywnych skutków stresu oksydacyjnego wywoływanego przez reaktywne formy tlenu i azotu, które powstają zarówno w mitochondriach (nieunikniony uboczny efekt tlenowego etapu oddychania komórkowego), jak i pod wpływem czynników środowiskowych między innymi zanieczyszczenia środowiska [12]. Związki polifenolowe neutralizują wolne rodniki oraz hamują procesy oksydacji lipidów i białek,

zachodzące między innymi pod wpływem promieniowania UV [13]. Pomimo wieloletnich badań epidemiologicznych, nadal brakuje jednoznacznie zdefiniowanego, referencyjnego poziomu spożycia polifenoli w diecie człowieka. Badania wskazują na kompleksowy i wielopoziomowy wpływ polifenoli na reakcje metaboliczne organizmu [14], co często wynika z ich synergistycznego działania z innymi grupami substancji bioaktywnych [15].

Zauważono, że korzystne efekty zdrowotne (na przykład w odniesieniu do ryzyka wystąpienia cukrzycy typu 2, czy chorób sercowo-naczyniowych) obserwuje się przy spożyciu powyżej około 500 mg flawonoidów na dobę [16]. Średnia zawartość związków fenolowych w owocach zazwyczaj wynosi około 200-300 mg/100 g świeżej masy [17], podczas gdy flawonoidy stanowią jedynie jej część. Natomiast w przypadku owoców czarnej porzeczki zawartość polifenoli może osiągnąć nawet około 500-1000 mg na 100 g świeżej masy [11], co pozycjonuje te owoce jako doskonałe źródło tych substancji w diecie. Wyjątkowo wartościową grupą związków należącą do polifenoli są antocyjany, rozpuszczalne w wodzie flawonoidy, które można określić mianem barwników owoców jagodowych. W owocach, w najwyższej koncentracji, występują w skórce i nadają jej barwę w odcieniach od różowej do ciemnogrnatowej. Funkcją antocyjanów w roślinie jest nadawanie owocom atrakcyjnego wyglądu po osiągnięciu dojrzałości. Zawartość antocyjanów w owocach jagodowych waha się od około 15 – 50 mg/100 g świeżej masy w truskawkach do około 880–1480 mg/100 g świeżej masy w aronii [18]. Antocyjany stanowią od 10 do 80% całkowitej zawartości polifenoli w owocach jagodowych [11]. Wartości te mogą podlegać znacznym wahaniom w zależności od odmiany, stopnia dojrzałości czy metody uprawy [18].

Wysoki potencjał bioaktywny owoców jagodowych wynika również z obecności kwasu L-askorbinowego, określanego mianem witaminy C. Kwas L-askorbinowy pełni w organizmie liczne funkcje metaboliczne, przede wszystkim jest silnym antyoksydantem, dzięki czemu uczestniczy w utrzymaniu równowagi oksydacyjno-redukcyjnej. Ponadto jest niezbędnym kofaktorem enzymów biorących udział w syntezie kluczowych związków, np. kolagenu, uczestniczy również w metabolizmie żelaza [19]. Spośród owoców jagodowych najbogatszym źródłem tej witaminy są owoce czarnej porzeczki, w których zawartość kwasu L-askorbinowego

wynosi, w zależności od metody uprawy i odmiany, od około 50 mg do 280 mg w 100 g świeżej masy [20, 21].

Wyjątkowo istotny, ze względu na właściwości odżywcze i prozdrowotne, jest błonnik pokarmowy, należący do grupy węglowodanów, których paradoksalnie układ pokarmowy człowieka nie jest w stanie strawić. Związki te definiuje się jako frakcję polisacharydów roślinnych, która jest oporna na trawienie przez enzymy przewodu pokarmowego człowieka i nie ulega hydrolizie w jelicie cienkim [22]. Będąc prebiotykiem, błonnik pokarmowy kształtuje florę mikroorganizmów w jelicie grubym, której obecność w układzie pokarmowym pełni wiele ważnych funkcji, chociażby wsparcie metabolizmu i układu odpornościowego [23]. Według najnowszych badań, spożycie błonnika pokarmowego może również wpływać na zdrowie psychiczne [24]. Głównymi źródłami błonnika w diecie są produkty pełnoziarniste, owoce (w szczególności jagodowe), warzywa, orzechy i nasiona oraz rośliny strączkowe [25]. Błonnik w owocach jagodowych występuje przede wszystkim w nasionach i skórce, których udział w ogólnej masie tych owoców jest zazwyczaj wysoki.

Na podstawie badań epidemiologicznych został ustalony zalecany poziom spożycia błonnika, który powinien wynosić około 25–30 g dziennie [23, 26]. Ilość ta uzależniona jest od płci, wieku oraz ogólnej kaloryczności diety. Odpowiedni poziom spożycia błonnika pokarmowego jest skorelowany ze zmniejszeniem częstości występowania niektórych chorób, w tym: układu krążenia, metabolicznych i nowotworowych [25]. Zasluguje na uwagę fakt, że podczas jednoczesnego trawienia błonnika pokarmowego i związków polifenolowych przez florę jelitową, dochodzi do efektu synergii. Podczas gdy błonnik jest pożywieniem dla mikroorganizmów, związki polifenolowe selektywnie modulują ich populacje w kierunku, który ma korzystny wpływ na zdrowie [15].

Szczególną frakcją błonnika pokarmowego są pektyny. Pektyny to polisacharydy o wysokiej masie cząsteczkowej zbudowane głównie z cząsteczek kwasu D-galakturonowego połączonych wiązaniami α , często o różnym stopniu metylacji oraz z bocznymi łańcuchami cukrów (np. arabinozy lub galaktozy) [19]. Pektyny wykazują różnorodną aktywność metaboliczną, m.in.: obniżają przyswajanie cholesterolu, glukozy i metali ciężkich oraz poprawiają przyswajanie żelaza, wapnia i magnezu dzięki redukcji pH treści jelitowej [27]. Związki należące do pektyn znajdują ogromne zastosowanie w technologii żywności. Ich właściwości różnią się w zależności od stopnia metylacji

i wykorzystywane są głównie jako środki żelujące, zagęstniki oraz zamienniki tłuszczu [28, 29].

Chociaż dla witamin, związków polifenolowych i błonnika udokumentowano wysoką wartość odżywczą i korzystny wpływ na zdrowie, zauważono również, że jedynie dobrze zbilansowana dieta może stanowić istotny element ograniczający ryzyko wystąpienia chorób [29]. Owoce jagodowe, szczególnie spożywane w zróżnicowanej kompozycji gatunków, mogą stanowić istotne źródło wymienionych powyżej związków bioaktywnych.

2.3. Przetwórstwo owoców jagodowych

Wysoka wartość przetwórcza owoców jagodowych wynika między innymi z obecności znacznych ilości barwników antocyjanowych, odpowiedniej zawartości kwasów organicznych oraz ich korzystnej proporcji do cukrów, a także wysokiej zawartości pektyn, co przyczynia się do uzyskania produktów o atrakcyjnych cechach sensorycznych i reologicznych.

Główne kierunki przetwarzania owoców jagodowych obejmują produkcję soków i przecierów, suszenie i mrożenie, a także wytwarzanie ekstraktów oraz fermentację (np. w celu produkcji napojów alkoholowych). Należy zauważyć, że część z tych działań stanowi jedynie pierwszy etap przetwarzania surowca. Przykładem może być produkcja soków, jedna z najczęściej stosowanych metod przetwarzania owoców jagodowych. Po zagęszczeniu soki te stanowią koncentraty wykorzystywane do produkcji wielu innych wyrobów, m.in. napojów. Koncentrat soku z czarnej porzeczki jest jednym z przykładów takiego półproduktu [1]. Podobna sytuacja dotyczy mrożonych owoców jagodowych – sektora, w którym Polska jest jednym z czołowych producentów [30]. Najwyższy udział w rynku mrożonych owoców jagodowych mają maliny i truskawki, które w tej postaci są wykorzystywane jako surowiec dla przetwórstwa, bądź trafiają do sprzedaży detalicznej.

Wraz ze wzrostem zainteresowania zdrową dietą zwiększyło się zapotrzebowanie na tzw. „żywność funkcjonalną” oraz naturalne dodatki do żywności, takie jak roślinne barwniki i przeciwutleniacze [31]. Suszone owoce jagodowe wpisują się w oba te segmenty rynku, dlatego popyt na nie systematycznie rośnie. W światowym handlu największy wolumen sprzedaży mają rodzynki (suszone winogrona), żurawina i borówka amerykańska [32]. Poza zastosowaniem jako dodatek do szerokiego

asortymentu produktów, susze tego typu są również dostępne w handlu detalicznym jako produkty do bezpośredniego spożycia w formie przekąski. Owoce jagodowe, dzięki dużej zawartości związków bioaktywnych, stanowią wartościowy surowiec do suszenia, dlatego zastosowanie metod ograniczających ich straty jest w pełni uzasadnione. W tym zakresie prowadzone są liczne badania oraz opracowywane nowe rozwiązania technologiczne sprzyjające zachowaniu potencjału prozdrowotnego, m.in. poprzez zastosowanie ultradźwięków. Ze względu na wysoką wartość odżywczą i prozdrowotną, jednymi z najczęściej badanych suszonych owoców jagodowych są maliny i rodzynki (suszone winogrona) [31].

Poważnym problemem w sektorze przetwórstwa owoców jagodowych jest nietrwałość surowca, objawiająca się skłonnością do szybkiego pleśnienia i fermentacji. Ponadto owoce jagodowe posiadają delikatną strukturę tkankową, przez co są podatne na uszkodzenia mechaniczne podczas zbioru, transportu i przetwarzania. Z tego względu po zbiorze konieczne jest natychmiastowe przetworzenie (np. na soki, przeciery lub susze) bądź zamrożenie owoców w celu przedłużenia ich przydatności do dalszego wykorzystania. Podczas obróbki technologicznej, szczególnie w procesach termicznych, dochodzi do degradacji wielu cennych składników bioaktywnych, takich jak antocyjany i witamina C, z tego względu coraz większe znaczenie odgrywają technologie przetwarzania niskotemperaturowego. W tym kontekście eksperymenty z wykorzystaniem ultradźwięków, ukierunkowane m.in. na poprawę wydajności produkcji poprzez skrócenie czasu obróbki surowca, mogą przyczynić się do dalszej optymalizacji całego procesu technologicznego.

2.4. Wykorzystanie ultradźwięków w przetwórstwie żywności

W ostatnich latach w przemyśle spożywczym obserwuje się rozwój technologii określanych jako technologie niekonwencjonalnego przetwarzania żywności (*ang. emerging food processing technologies*). Ich głównym celem jest poprawa wydajności procesów technologicznych przy jednoczesnym ograniczeniu degradacji składników odżywczych oraz bioaktywnych [33, 34]. Liczne badania wskazują, że ultradźwięki mają duży potencjał zastosowania w przetwórstwie owoców jagodowych, zarówno w kontekście poprawy retencji związków bioaktywnych w produktach, jak i modyfikacji ich właściwości reologicznych. Metoda ta znajduje zastosowanie w licznych gałęziach

przemysłu spożywczego ze względu na możliwość zwiększania wydajności procesów, przyspieszania wybranych reakcji chemicznych i enzymatycznych oraz intensyfikacji procesów związanych z wymianą masy i energii. W wielu przypadkach zastosowanie ultradźwięków umożliwia obniżenie temperatury oraz skrócenie czasu trwania danego procesu, co może sprzyjać lepszej retencji składników termolabilnych i tym samym uzyskaniu produktów o wyższej jakości.

2.4.1. Definicja i mechanizm działania ultradźwięków

Fale dźwiękowe, słyszalne dla człowieka (tzw. dźwięki słyszalne) mieszczą się w zakresie częstotliwości od 20 - 20 000 kHz [35]. Dźwięki o częstotliwości wyższej bądź niższej od tego zakresu są dla człowieka niesłyszalne i zaliczamy do nich m.in. ultradźwięki. Ultradźwięki są drganiami mechanicznymi cząsteczek o częstotliwości wyższej niż 16-20 kHz i podobnie jak dźwięk słyszalny, rozchodzą się w postaci fal sprężystych [36]. Urządzenia generujące falę ultradźwiękową nazywane są „sonikatorami” bądź „łazniami ultradźwiękowymi”, a zabiegi z ich wykorzystaniem nazywane są „sonikacją”. W niniejszej pracy terminy te będą stosowane jako synonimy generatorów ultradźwiękowych i zabiegów nimi wykonywanych. Wytwarzanie ultradźwięków wiąże się z przetwarzaniem innych form energii na falę ultradźwiękową, z tego powodu sercem aparatury jest przetwornik. Najczęściej stosowanymi przetwornikami, wykorzystywanymi zarówno w badaniach, jak i rozwiązaniach przemysłowych, są przetworniki piezoelektryczne, które zamieniają energię elektryczną na drgania wzbudzające falę sprężystą [35, 36]. W związku z zastosowaniem w medycynie, zwłaszcza w metodach obrazowania, ultradźwięki definiuje się również jako promieniowanie niejonizujące. Zakres częstotliwości najczęściej wykorzystywany w tej dziedzinie jest stosunkowo wysoki i wynosi od 2 do 15 MHz. W obrazowaniu wykorzystuje się zjawisko tłumienia fali (atenuacji), wynikające z kilku procesów: absorpcji (*ang. absorption*), odbicia (*ang. reflection*), rozpraszania (*ang. scattering*) oraz załamania, czyli refrakcji (*ang. refraction*) [37]. W oparciu o te zjawiska ultradźwięki znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach techniki pomiarowej, między innymi w nieniszczących metodach analizy płynów i ciał stałych oraz hydrolokacji. W tego typu zastosowaniach oddziaływanie ultradźwięków charakteryzuje się niskim natężeniem i nie prowadzi do powstawania zmian makroskopowych w ośrodku, na który działają, dlatego określa się je mianem ultradźwięków biernych [38]. Natomiast ultradźwięki czynne charakteryzują się natężeniem na tyle wysokim, że wywołują rejestrowane zmiany

makroskopowe w strukturze fizycznej, chemicznej lub biologicznej ośrodka. W przemyśle ultradźwięki są wykorzystywane do intensyfikacji operacji jednostkowych dzięki zjawisku kawitacji akustycznej [39]. Kawitacja akustyczna jest zjawiskiem zachodzącym w środowisku płynnym pod wpływem fal ultradźwiękowych o wysokiej intensywności generowanych przez przetwornik. Powodują one chwilową kompresję, która rozrywa ciecz, tworząc pęcherzyki gazu. Pęcherzyki te, po osiągnięciu maksymalnych stabilnych rozmiarów, gwałtownie rozpadają się, uwalniając zaabsorbowaną energię w warunkach wysokiej temperatury i zmian ciśnienia [40, 41]. Zdolność fal ultradźwiękowych do generowania intensywnych lokalnych różnic ciśnień i temperatur może wpływać na przyspieszenie reakcji chemicznych, a w konsekwencji na zwiększenie wydajności procesów. W przypadku ekstrakcji, kawitacja może wywoływać tzw. erozję tkanki roślinnej oraz sonoporację, które sprzyjają uwalnianiu związków bioaktywnych [42]. Kawitacja, obok zdolności do rozrywania ścian komórkowych i ograniczania wielkości związków wielkocząsteczkowych, powoduje również rozpad cząsteczek wody - sonolizę, której produktem są wolne rodniki [43]. Powstające rodniki tlenowe ($\bullet\text{OH}$) i hydroksylowe ($\bullet\text{H}$) mogą reagować m.in. z białkami i lipidami. W kontekście aktywności przeciwmikrobiologicznej jest to zjawisko pożądane. Natomiast utlenienie lipidów i białek może spowodować negatywne konsekwencje z punktu widzenia jakości żywności [44]. Jednakże, badania nad wpływem długotrwałego oddziaływania ultradźwięków o wysokim natężeniu na sok z wiśni wykazały, że zawarte w nim przeciwutleniacze skutecznie ograniczają działanie powstających wolnych rodników [45].

W przemyśle spożywczym ultradźwięki znalazły zastosowanie w wielu procesach, głównie dotyczących substancji płynnych, szczególnie dzięki zdolności do przyspieszania reakcji chemicznych i enzymatycznych, usprawniania koagulacji, dyspersji i krystalizacji [39]. Bardzo dobry efekt uzyskuje się przy zastosowaniu ultradźwięków jako narzędzia do usprawnienia ekstrakcji związków bioaktywnych [46]. Narzędzie to redukuje koszty procesu poprzez zmniejszenie zużycia rozpuszczalników oraz zapotrzebowania na energię. Zdecydowanie rzadziej ultradźwięki czynne są wykorzystywane w przypadku propagacji w powietrzu, np. w suszarnictwie żywności, gdzie pozostają technologią przede wszystkim eksperymentalną, znacznie częściej analizowaną w badaniach naukowych niż wdrożoną w praktyce przemysłowej [47]. Metody przetwórstwa żywności wykorzystujące ultradźwięki są zaliczane do technologii nietermicznych, ponieważ ich podstawowy mechanizm działania ma charakter

mechaniczny oraz opiera się na zjawisku kawitacji, a nie na oddziaływaniu termicznym. Zarówno w przypadku oddziaływania w środowisku płynnym, jak i gazowym, wzrost temperatury obserwowany podczas oddziaływania ultradźwiękami stanowi efekt uboczny absorpcji energii akustycznej oraz tarcia, a nie zasadniczy czynnik odpowiedzialny za przebieg procesu [48].

2.4.2. Zastosowanie ultradźwięków w produkcji soków i przecierów

Tradycyjne przetwarzanie owoców uwzględnia procesy opierające się na obróbce termicznej, co w kluczowy sposób przyczynia się do degradacji witamin, związków fenolowych oraz innych termolabilnych związków bioaktywnych surowca [49, 50]. W przetwórstwie owoców jagodowych na soki i przeciery, szczególny nacisk kładzie się na ograniczenie strat składników bioaktywnych [51]. Dlatego też technologie usprawniające poszczególne etapy procesu w sposób nietermiczny zyskują istotne znaczenie w tej gałęzi przemysłu spożywczego [52]. Ultradźwięki znajdują zastosowanie przede wszystkim na etapie obróbki surowca (np. w procesie wspomaganej ekstrakcji związków bioaktywnych) oraz jako element wspomagający proces pasteryzacji. Umożliwiają one redukcję intensywności obróbki termicznej (np. obniżenie temperatury pasteryzacji), a także zwiększenie stopnia homogeniczności soku i poprawę jego właściwości reologicznych [44]. Największe zainteresowanie, zarówno w badaniach naukowych, jak i w praktyce przemysłowej, wzbudza obróbka soku, co wynika przede wszystkim z łatwiejszej pod względem technicznym implementacji oraz integracji z istniejącymi instalacjami technologicznymi [51]. Sonikację mediów płynnych można przeprowadzać na dwa sposoby: (1) w zbiornikach wyposażonych w przetworniki ultradźwiękowe (łaźnie ultradźwiękowe) oraz (2) poprzez bezpośrednie zanurzenie sonotrod w cieczy (homogenizatory ultradźwiękowe).

Sonikacja może również kształtować właściwości reologiczne soków i przecierów poprzez zmniejszenie rozmiarów dużych cząsteczek miąższu, a także poprzez redukcję koloidów złożonych z zagregowanych cząsteczek [53]. Ponadto metoda ta może wpływać na modyfikację składu ilościowego i jakościowego pektyn [54]. Wynika to nie tylko z mechanicznego oddziaływania na te związki, lecz również z wpływu sonikacji na aktywność enzymów pektynolitycznych.

Jednym z efektów oddziaływania sonikacji na ciecz jest jej odgazowanie, rozumiane jako zmniejszenie zawartości rozpuszczonych gazów oraz usuwanie pęcherzyków powietrza uwieczonych w cieczy [51, 55]. Ta właściwość sonikacji może

mieć istotny wpływ, zarówno na ograniczenie utleniania związków bioaktywnych w sokach i przecierach, jak i na ułatwienie dozowania tych produktów oraz poprawę ich wyglądu w opakowaniu, na przykład poprzez eliminację piany, a w konsekwencji nieregularnego poziomu napełnienia [56]. Doniesienia literaturowe wskazują również na próby zastosowania ultradźwięków jako narzędzia do inaktywacji drobnoustrojów i enzymów [57], jednak to podejście nadal wymaga potwierdzenia skuteczności [58–60].

Aby podkreślić szeroki zakres potencjału wykorzystania sonikacji, należy dodać, że ultradźwięki są eksperymentalnie stosowane jako narzędzie modyfikacji przebiegu fermentacji soków, między innymi w celu zwiększenia wydajności produkcji wina [41]. Podsumowując, ultradźwięki znajdują zastosowanie w produkcji soków i przecierów na różnych etapach, a korzyści z ich zastosowania obserwuje się na wielu poziomach. Uzyskane wyniki eksperymentów polegających na obróbce ultradźwiękowej soków, przecierów i surowca do produkcji tych przetworów wskazują na potencjał tych metod w kontekście zawartości związków bioaktywnych oraz właściwości reologicznych. Należy jednak zwrócić uwagę, że uzyskane rezultaty w dużej mierze zależą od parametrów przeprowadzanych zabiegów, szczególnie czasu trwania oraz stosunku mocy stosowanych ultradźwięków na jednostkę objętości surowca. W niektórych przypadkach obiecujące rezultaty nie korespondują z możliwością aplikacji proponowanych rozwiązań w produkcji przemysłowej, bądź są nieuzasadnione ekonomicznie. Podkreśla się, że więcej uwagi należy poświęcić na rozwój systemów obróbki ultradźwiękowej przeznaczonych do stosowania w przemyśle, aby uzyskać więcej danych na temat wpływu sonikacji na jakość żywności [48]. Uważa się, że chociaż technologia ta jest bardzo obiecująca, należy ją rozwijać w oparciu o optymalizację do każdego zastosowania indywidualnie.

2.4.3. Zastosowanie ultradźwięków w procesie suszenia

Suszenie owoców jagodowych, zwłaszcza w całości, jest procesem wyjątkowo energochłonnym i czasochłonnym. W porównaniu z innymi metodami przetwarzania żywności suszenie wyróżnia się niższą efektywnością energetyczną [61]. W związku z aspektami ekonomicznymi i próbą obniżenia śladu węglowego, zarówno naukowcy, jak i przemysł dążą do optymalizacji procesu suszenia, co skutkuje licznymi modyfikacjami technologicznymi [62]. Jednym ze sposobów zwiększenia efektywności suszenia jest stosowanie ultradźwięków. Warto rozróżnić dwa rodzaje eksperymentów: (1) takie,

w których ultradźwięki stosowane są jako obróbka wstępna materiału, oraz (2) takie, w których ultradźwięki wykorzystywane są bezpośrednio w trakcie procesu suszenia. W niniejszej pracy omówione wyniki eksperymentów dotyczą drugiego przypadku, a więc suszenia wspomaganego ultradźwiękami.

Pomysł wykorzystania ultradźwięków jako czynnika wspomagającego proces suszenia nie jest nowy i pomimo 90 lat, które upłynęły od momentu, w którym pierwszy raz zostały zaproponowane [63], wciąż nie doczekały się powszechnego wdrożenia w suszarnictwie żywności. Badania przeprowadzone na wielu różnych materiałach wykazują, że zastosowanie ultradźwięków może prowadzić do skrócenia czasu trwania procesu suszenia nawet o ponad 50% w przypadku jabłek [64]. Do wspomagania suszenia wykorzystuje się ultradźwięki o wysokim natężeniu, ale niskiej częstotliwości (20-40 kHz) [65]. Jako główne mechanizmy działania ultradźwięków wskazuje się intensyfikację wymiany ciepła i masy [66], mikroskalowe przepływy wywołane kawitacją [65], tworzenie mikroskopijnych kapilar oraz obniżanie napięcia powierzchniowego i lepkości wody zawartej w suszonym materiale [67]. Zwraca się również uwagę na możliwość uzyskania wyższej jakości materiału suszonego poprzez skrócenie czasu procesu prowadzonego ze wspomaganie ultradźwiękami. W badaniach porównujących zawartość witamin i karotenoidów wykazano, że zastosowanie ultradźwięków w warunkach stosunkowo niskiej temperatury suszenia (45 °C) nie tylko skracało czas procesu, ale również sprzyjało lepszemu zachowaniu tych związków [68]. Co ciekawe, suszenie kostek z jabłek okazało się jeszcze skuteczniejsze w przypadku zastosowania ultradźwięków w temperaturze powietrza wynoszącej -10 °C [69]. W tym przypadku czas potrzebny do wysuszenia próbki owoców uległ skróceniu o ponad 80%, w porównaniu z procesem przeprowadzonym w tych samych warunkach bez wspomaganie ultradźwiękami. Na podstawie licznych doniesień stwierdzono, że wpływ ultradźwięków w suszeniu konwekcyjnym zmniejsza się w przypadku procesów prowadzonych w wysokiej temperaturze i/lub intensywnym przepływie powietrza. Należy zwrócić uwagę, że obniżenie temperatury procesu i przepływu powietrza prowadzi do obniżenia dynamiki odparowania wody. Innymi słowy, wpływ ultradźwięków jest tym większy, im mniej dynamiczny proces suszenia wspomagają. Na efekt zastosowania ultradźwięków wpływa również sposób ich aplikacji, dostarczana moc w przeliczeniu na jednostkę masy próbki oraz właściwości samego materiału suszonego [70]. W literaturze zwraca się uwagę na możliwy związek między skutecznością stosowania ultradźwięków a strukturą i teksturą suszonego materiału.

Zgodnie z tą teorią materiały o niskiej porowatości mogą wykazywać ograniczoną podatność na działanie ultradźwięków, co znajduje potwierdzenie w literaturze [71]. Tłumaczy się to brakiem możliwości wystąpienia zjawiska tzw. „efektu gąbki”, które ultradźwięki mogą wywoływać w materiale podczas suszenia. Efekt ten polega na intensyfikacji migracji wilgoci z głębszych warstw materiału ku jego powierzchni, wynikającej z okresowych, mikroskopijnych skurczów struktury surowca wywołanych przemieszczaniem się fali ultradźwiękowej. Regularne cykle ściskania i rozluźniania prowadzą do powstawania gradientów ciśnienia, które „napędzają” ruch wody z wnętrza materiału ku powierzchni [67]. Zjawisko “gąbki” obserwuje się przede wszystkim w materiałach wykazujących właściwości sprężyste, zdolnych do cyklicznych odkształceń, których impedancja akustyczna jest niższa.

Należy zwrócić uwagę, że badania procesu suszenia z wykorzystaniem ultradźwięków są zazwyczaj przeprowadzane w specjalnie do tego celu zaprojektowanych urządzeniach [65], co w znacznej mierze utrudnia implementację tej technologii w przemyśle w związku z dużymi kosztami inwestycyjnymi.

3. CEL PRACY I HIPOTEZY BADAWCZE

Celem pracy była ocena wpływu ultradźwięków stosowanych podczas produkcji przecierów, soków i suszu z wybranych owoców jagodowych na zawartość związków bioaktywnych i właściwości reologiczne tych produktów. W ramach zadań badawczych przedstawionych w publikacjach wchodzących w skład rozprawy doktorskiej wyodrębniono następujące cele szczegółowe:

- zastosowanie sonikacji jako narzędzia wspomagającego ekstrakcję związków bioaktywnych z surowca (miazgi) do produktów końcowych (soku i przecieru), z uwzględnieniem wpływu gatunku owoców jagodowych;
- wykorzystanie ultradźwięków jako procesu kształtującego właściwości reologiczne mętnego soku oraz przecieru, przy jednoczesnej ocenie wpływu na cechy sensoryczne;
- określenie wpływu odmiany na jakość suszu otrzymanego w procesie wspomagany ultradźwiękami;
- określenie optymalnego etapu zastosowania ultradźwięków w procesie produkcji przecieru z owoców jagodowych.

W celu weryfikacji wpływu zastosowania ultradźwięków na jakość produktów otrzymanych z owoców jagodowych sformułowano **trzy hipotezy badawcze**:

- I. Zastosowanie ultradźwięków podczas produkcji soku z owoców jagodowych zwiększa zawartość związków bioaktywnych i modyfikuje właściwości reologiczne otrzymywanego soku.
- II. Suszenie wspomagane ultradźwiękami pozwala na zachowanie wyższej zawartości związków bioaktywnych w suszu z owoców jagodowych niż suszenie konwekcyjne.
- III. Oddziaływanie ultradźwięków na pulpę z owoców jagodowych korzystnie wpływa na jakość sensoryczną, właściwości reologiczne oraz zawartość związków bioaktywnych w uzyskanych z niej produktów.

4. ZAKRES PRACY

Praca obejmuje eksperymenty dotyczące zastosowania ultradźwięków w trzech głównych kierunkach przetwarzania owoców jagodowych w przemyśle spożywczym: produkcja soków, przecierów oraz suszu. Surowce oraz metody przetwórcze wykorzystane w badaniach dobrano na podstawie aktualnej praktyki w przemyśle spożywczym (procesy typowe dla przetwórstwa owoców) oraz produkcji ogrodniczej (gatunki uprawiane przemysłowo w Polsce).

Przeprowadzono cztery eksperymenty technologiczne, z których każdy dotyczył innego aspektu lub metody przetwarzania owoców jagodowych. W ramach przeprowadzonych eksperymentów zwrócono uwagę na wpływ zastosowania ultradźwięków na zawartość związków fenolowych oraz kwasu L-askorbinowego, w wybranych przypadkach analizy uzupełniono o pomiar właściwości reologicznych, pomiar barwy bądź analizę sensoryczną. Oprócz parametrów jakościowych wytwarzanych soków, przecierów i suszu, szczególną uwagę poświęcono efektywności procesów produkcyjnych, rejestrując wydajność tłoczenia, przecierania oraz prędkości suszenia.

Zrealizowane zadania badawcze zostały wymienione i krótko scharakteryzowane w tabeli nr 1.

Tabela 1. Charakterystyka zadań badawczych realizowanych w ramach rozprawy

Nazwa zadania badawczego	Material	Opis	Publikacja
Zadanie 1. Wpływ oddziaływania ultradźwięków na pulpę z wybranych owoców jagodowych na jakość otrzymywanego soku.	malina, czarne porzeczki, truskawki	Eksperyment polegał na produkcji mętnego soku z wybranych owoców jagodowych z zastosowaniem różnych metod przygotowania miazgi przed procesem tłoczenia. Miazgę poddawano działaniu UD w celu intensyfikacji ekstrakcji związków bioaktywnych z miazgi do soku. Jako warianty porównawcze zastosowano macerację enzymatyczną oraz metodę łączącą działanie UD i enzymów. Umożliwiło to ocenę wpływu zastosowanych metod na wydajność procesu oraz jakość soku mętnego.	Publikacja 1
Zadanie 2. Jakość soku z truskawek homogenizowanego ultradźwiękami.	truskawki	Eksperyment polegał na porównaniu dwóch metod homogenizacji mętnego soku truskawkowego: ultradźwiękowej oraz wysokociśnieniowej. Mętny sok wykazuje silne skłonności do rozwarstwiania wynikające z naturalnej sedymentacji cząstek miąższu. W związku z tym sprawdzono skuteczność ultradźwięków w stabilizowaniu zmętnienia i ograniczeniu niekorzystnego rozwarstwiania soku, w porównaniu z coraz częściej stosowaną homogenizacją wysokociśnieniową.	Publikacja 2
Zadanie 3. Suszenie konwekcyjne wspomaganie ultradźwiękami owoców truskawek.	truskawki odmiany: 'Alba' i 'Florence'	Eksperyment polegał na porównaniu jakości suszu dwóch odmian truskawek, otrzymanego metodą konwekcyjną oraz metodą konwekcyjną wspomaganą ultradźwiękami. Ultradźwięki zastosowano jako narzędzie służące poprawie wydajności procesu suszenia. Wykorzystując ich zdolność do skracania czasu trwania procesu, zastosowano stosunkowo niską temperaturę suszenia, dzięki czemu technika ta wykazuje potencjał w poprawie jakości materiałów suszonych.	Publikacja 3
Zadanie 4. Oddziaływanie ultradźwięków na skład chemiczny i cechy reologiczne przecierów otrzymanych z owoców truskawek i jagody kamczackiej.	truskawki, jagoda kamczacka	Przeprowadzono eksperyment, w którym zastosowano obróbkę ultradźwiękową pulpy owocowej. Eksperyment zrealizowano w dwóch etapach. Pierwszy etap polegał na porównaniu wpływu momentu zastosowania ultradźwięków w procesie wytwarzania przecierów na ich lepkość oraz zawartość związków bioaktywnych. W drugim etapie oceniano wpływ udziału owoców na jakość uzyskanych przecierów.	Publikacja 4

Zakres badań zaplanowano tak, aby umożliwić sformułowanie wniosków dotyczących wpływu zastosowania ultradźwięków na jakość żywności otrzymywanej z wybranych owoców jagodowych, ze szczególnym uwzględnieniem zawartości związków bioaktywnych, m. in. kwasu L-askorbinowy, związków polifenolowych, w tym antocyjanów (Publikacje 1, 2, 3 i 4). Zmiany właściwości reologicznych w wyniku zastosowania sonikacji przedstawiono w Publikacjach 2 i 4. Szerszą analizę, uzupełnioną o ocenę sensoryczną, omówiono w Publikacji 4 dotyczącej przecierów.

Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano wnioski dotyczące potencjału zastosowania ultradźwięków w przetwórstwie owoców jagodowych oraz wpływu tej technologii na jakość wytwarzanych produktów.

Publikacje 1, 2 i 3 powstały w ramach realizacji zadań badawczych projektu „QualityBerry” pt. „Improving plant quality and economy for a more sustainable and efficient berry production”. Projekt realizowany w ramach Norweskiego Mechanizmu Finansowego na lata 2014-2021, Nr Umowy: NOR/POLNOR/QualityBerry/0014/2019-00. Publikacja 4 powstała w ramach realizacji zadań badawczych projektu „HortiFoodTrends” pt. ”Networking for excellence in the development of innovative, consumer oriented horticultural food products using the Living Lab approach”. Projekt finansowany przez program HORIZON-WIDERA-2023-ACCESS-02. Numer projektu: 101159293.

5. MATERIAŁ BADAWCZY I METODY BADAŃ

5.1. Surowiec

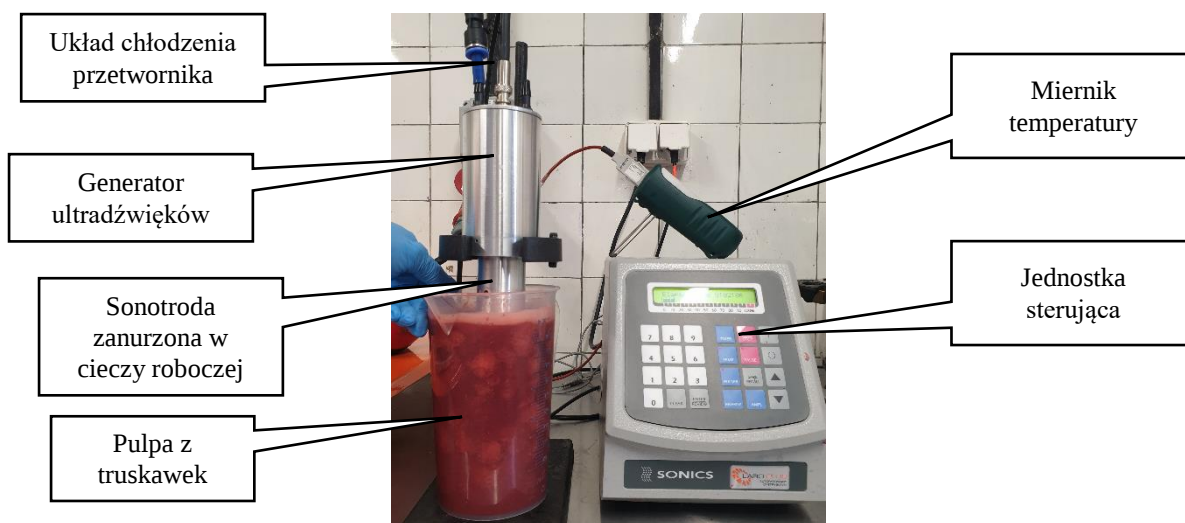
Surowiec wykorzystany w doświadczeniu pochodził z upraw towarowych i został zakupiony w okresie zbiorów w latach 2020-2024 od lokalnych producentów. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem czterech gatunków owoców jagodowych: truskawki (*Fragaria* × *ananassa* odmiany ‘Florence’, ‘Alba’, ‘Grandarosa’), maliny (*Rubus idaeus* odmiana ‘Polka’), czarnej porzeczki (*Ribes nigrum* odmiana ‘Tihope’) oraz jagody kamczackiej (*Lonicera caerulea* odmiana ‘Wojtek’). Bezpośrednio po transporcie owoce umyto, sortowano, a następnie powierzchniowo osuszono i zamrażano w temperaturze –25 °C. Zamrożony materiał przechowywano w szczelnych opakowaniach do czasu przeprowadzenia eksperymentów.

5.2. Oddziaływanie ultradźwiękami

5.2.1. Obróbka ultradźwiękowa soku i pulpy z owoców

Obróbkę ultradźwiękami w eksperymentach opisanych w Publikacjach 1, 2 i 4 przeprowadzono z użyciem laboratoryjnego homogenizatora ultradźwiękowego VCX-750 (Cole-Parmer, Vernon Hills, IL, USA) o mocy nominalnej 750 W i częstotliwości 20 kHz. Przykładowe stanowisko do obróbki ultradźwiękowej soku bądź pulpy z owoców zaprezentowano na Rys. 1. Urządzenie składa się z generatora, wyposażonego w przetwornik piezoelektryczny oraz wymiennej sondy (sonotrody) o średnicy 13 mm, umożliwiającej bezpośrednie przekazywanie energii ultradźwiękowej do próbki. Urządzenie wyposażone jest również w jednostkę sterującą pozwalającą na regulację amplitudy, pracę w trybie ciągłym lub impulsowym, programowanie czasu oraz kontrolę dostarczonej energii. Dodatkowa sonda umożliwia ciągłe monitorowanie temperatury próbki podczas pracy urządzenia. Podczas realizacji eksperymentów stosowano amplitudę wynoszącą 80%, wybraną na podstawie danych literaturowych i jako kompromis między skutecznością oddziaływania UD a ograniczeniem przegrzewania materiału oraz samego urządzenia. Podczas pracy końcówkę sonotrody

zanurzano w geometrycznym środku naczynia, a zawartość mieszano w celu równomiernej dystrybucji energii ultradźwiękowej.

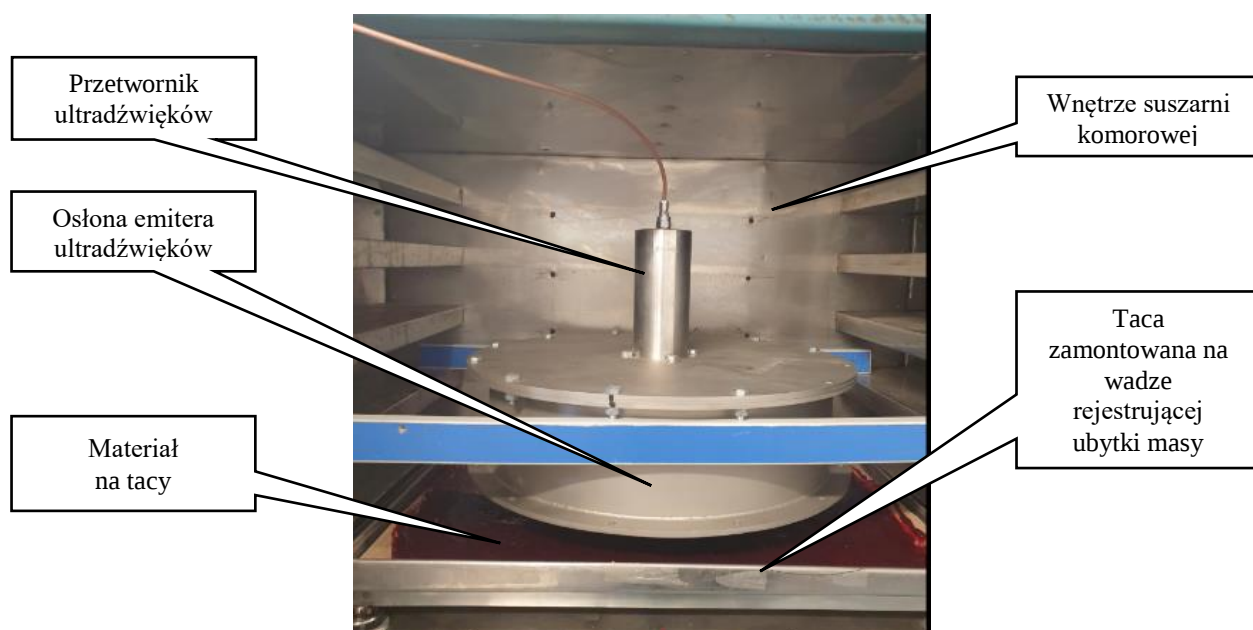


Rys. 1. Stanowisko do obróbki ultradźwiękowej pulpy z owoców.

5.2.2. Wspomaganie ultradźwiękami procesu suszenia

W doświadczeniu suszarniczym, opisanym w Publikacji 3, wykorzystano generator ultradźwiękowy typu AUS (*ang. air-borne ultrasonic system*) (Pusonics, Hiszpania). Jest to urządzenie ultradźwiękowe przeznaczone do generowania i kontrolowania intensywnego pola akustycznego w powietrzu w celu intensyfikacji procesów, szczególnie w zastosowaniach związanych z suszeniem. System składa się z piezoelektrycznego przetwornika, wzmacniacza oraz specjalnie zaprojektowanej płyty promieniującej, tworząc emiter ultradźwiękowy, który pracuje z częstotliwością rezonansową i przekazuje energię akustyczną przez powietrze do suszonego materiału. Rys. 2 przedstawia sposób zaimplementowania generatora w eksperymentalnej suszarni komorowej. Zespół przetwornika i promiennika jest zasilany przez dedykowany elektroniczny generator i moduł dopasowujący impedancję, który w sposób ciągły śledzi i utrzymuje rezonans, kontroluje moc wyjściową i amplitudę oraz zapewnia stabilną pracę w zmiennych warunkach obciążenia. W opisanym eksperymencie, promiennik ultradźwiękowy został zamontowany wewnątrz komory suszarki tak, aby powierzchnia promieniująca była skierowana w stronę materiału suszonego umieszczonego na sicie suszarniczym. W ten sposób nad materiałem wytworzono pole akustyczne o wysokiej intensywności, bez fizycznego kontaktu z nim. Rozmieszczenie materiału suszonego

ograniczono do zasięgu oddziaływania ultradźwięków, który wyznaczono eksperymentalnie. Przetwornik wyposażono również w system chłodzenia, aby zapobiegać przegrzaniu. W tym celu zastosowano węzownicę, przez którą przepływała woda o temperaturze 10 °C. Podczas trwania procesu moduł ultradźwiękowy pracował ze stałą, maksymalną wartością mocy, wynoszącą 200 W. Wartość tę ustalono na podstawie danych literaturowych.



Rys. 2. Stanowisko do suszenia wspomaganego ultradźwiękami, wyposażone w rejestrator masy materiału oraz temperatury powietrza w trakcie suszenia

5.3. Schematy zrealizowanych eksperymentów

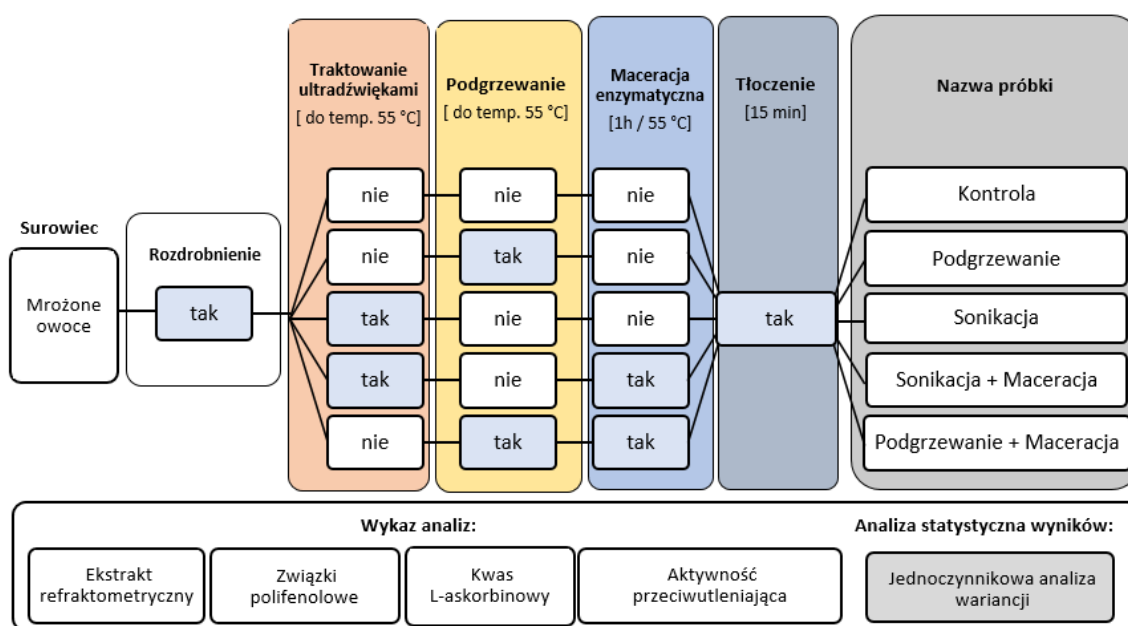
Rozdział przedstawia metody badawcze zastosowane w pracy doktorskiej, której celem było określenie wpływu ultradźwięków na zawartość związków bioaktywnych w przetwarzanych owocach jagodowych. W każdej z publikacji wchodzących w skład rozprawy skoncentrowano się na innym aspekcie tego zagadnienia, przy czym różnorodność stosowanych procesów przetwórczych, obejmujących produkcję soków, przecierów i suszu, wymagała zastosowania odmiennych schematów technologicznych wykorzystania ultradźwięków. W związku z tym w niniejszym rozdziale przedstawiono schematy realizacji badań, uwzględniające specyfikę procesu i sposób zastosowania

ultradźwięków. Szczegółowe opisy zastosowanych metod badawczych przedstawione są w każdej publikacji wchodzącej w cykl rozprawy doktorskiej.

Publikacja 1

Założeniem zadania badawczego było zastosowanie ultradźwięków do maceracji pulpy z owoców maliny, truskawki i czarnej porzeczki w produkcji soku. W eksperymencie testowano pięć schematów traktowania miazgi owocowej, obejmujących: zastosowanie ultradźwięków, macerację enzymatyczną, podgrzewanie do 55 °C, oraz łączenie dwóch z wymienionych metod (Rys. 3). Jako próbę kontrolną wytworzono sok z miazgi niepoddanej żadnemu z badanych traktowań.

Tłoczenie soku odbywało się w skali laboratoryjnej z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej Instron. Szczegółowy opis produkcji soku przedstawia publikacja 1.

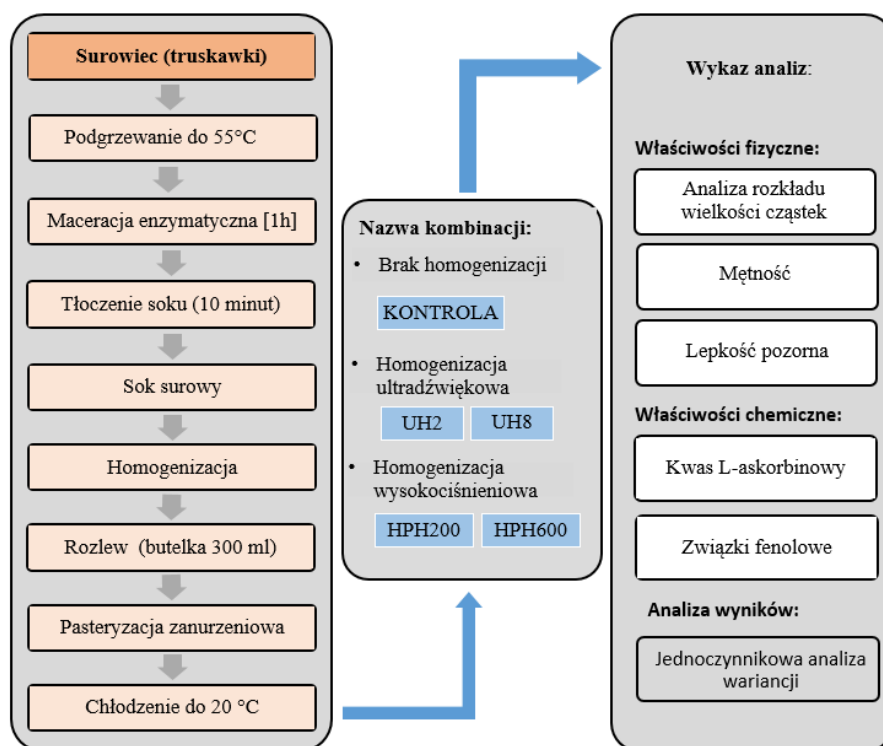


Rys. 3. Schemat produkcji soku z owoców malin, czarnych porzeczek i truskawek

Publikacja 2

Doświadczenie polegało na ocenie skuteczności homogenizacji ultradźwiękowej i wysokociśnieniowej w utrzymaniu jednorodności soku truskawkowego oraz ich wpływu na zawartość składników bioaktywnych. W pierwszym etapie wyprodukowano surowy sok mętny z owoców truskawki odm. ‘Grandarose’ przy użyciu prasy przekładkowej. Następnie sok poddano homogenizacji ultradźwiękowej

(750 W, 20 kHz) przez 2 minuty (UH2) lub 8 minut (UH8) oraz homogenizacji wysokociśnieniowej przy ciśnieniu 200 barów (HPH200) lub 600 barów (HPH600). Jako próbkę kontrolną wykorzystano sok niepoddany homogenizacji. Wszystkie próbki poddano pasteryzacji. Szczegółowy opis przebiegu eksperymentu przedstawiono w publikacji nr 2. Schemat poszczególnych procesów oraz zakres wykonanych analiz przedstawiono na Rys. 4.

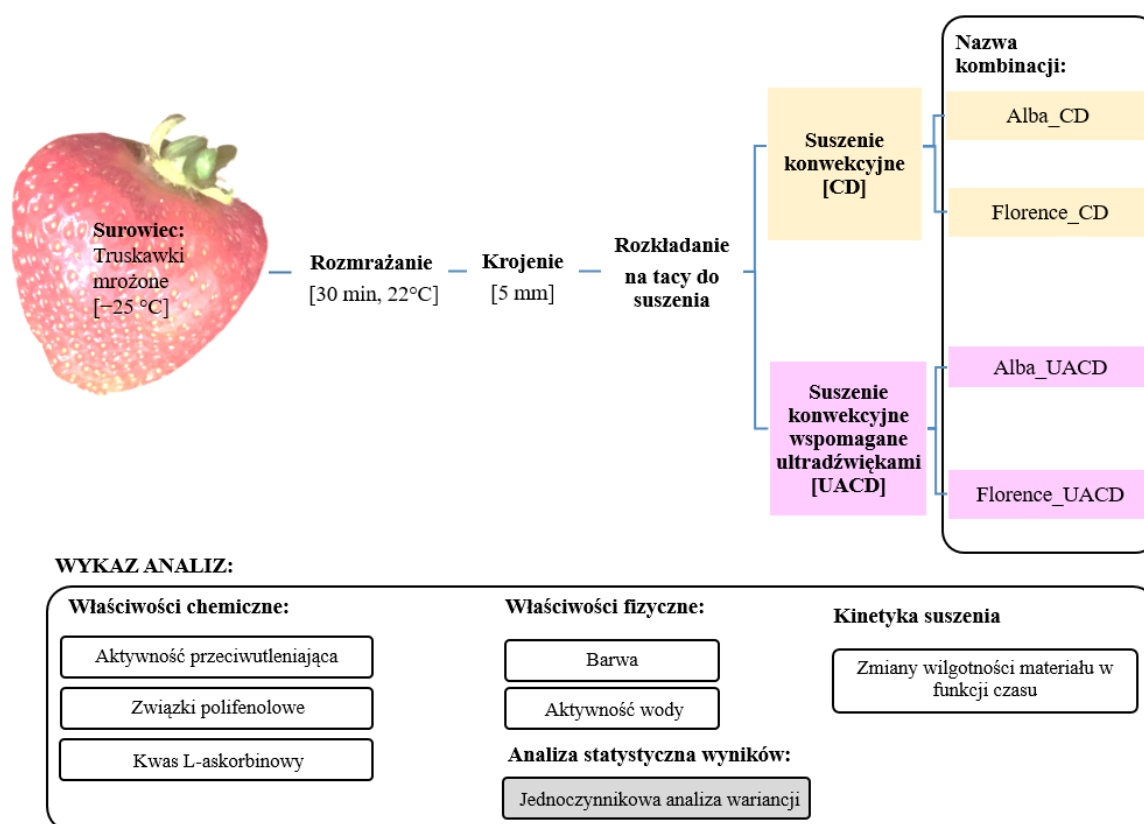


Rys. 4. Schemat produkcji homogenizowanych soków truskawkowych

Publikacja 3

Założeniem zadania badawczego było zastosowanie ultradźwięków w celu wspomagania procesu suszenia plastrów truskawek. W eksperymencie porównano jakość suszu otrzymanego metodą suszenia konwekcyjnego (obiekt kontrolny) z jakością suszu uzyskanego w procesie wspomaganym ultradźwiękami. Proces suszenia przeprowadzono w laboratoryjnej suszarni komorowej (Rys. 2). Wspomaganie ultradźwiękami realizowano przez aplikację ultradźwięków o mocy 200 W. W celu wyznaczenia prędkości suszenia rejestrowano masę materiału w trakcie procesu, na podstawie której obliczono zmiany jego wilgotności. Szczegółowy opis przebiegu eksperymentu

przedstawiono w publikacji nr 3. Schemat eksperymentu oraz zakres wykonanych analiz przedstawiono na Rys. 5.



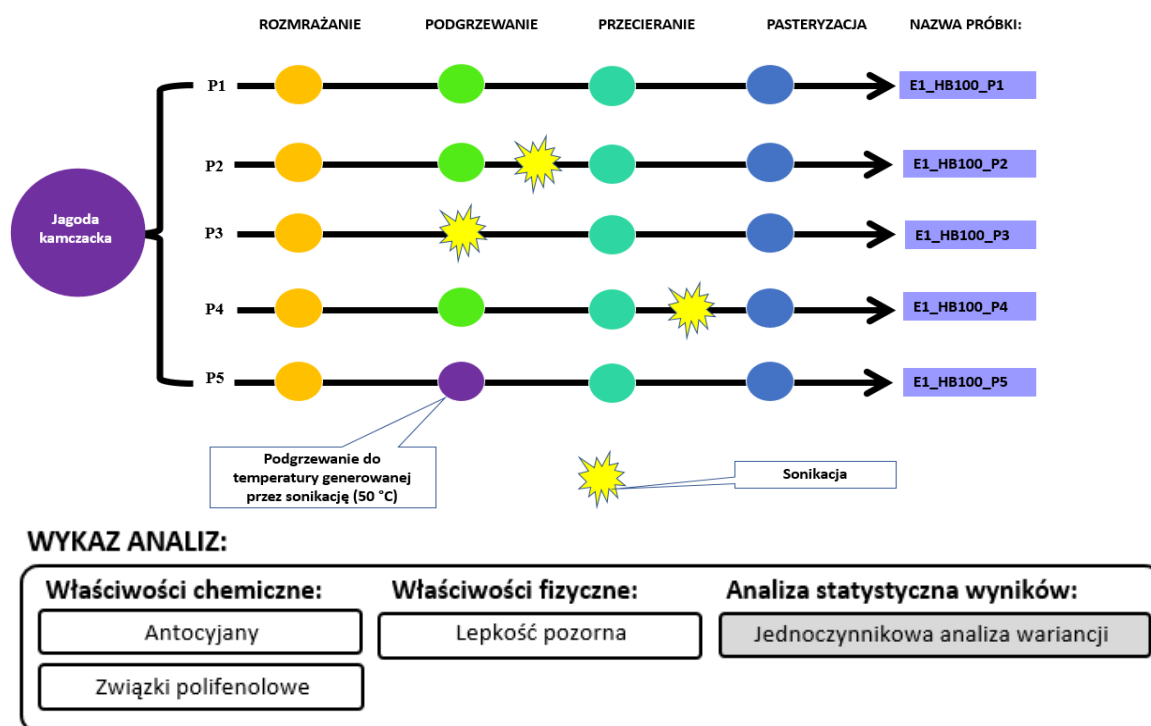
Rys. 5. Schemat dotyczący eksperymentu suszenia plastrów truskawek odmiany ‘Florence’ i ‘Alba’ ze wspomaganie ultradźwiękami (UACD) i bez wspomaganie (CD)

Publikacja 4

Doświadczenie polegało na ocenie wpływu zastosowania obróbki ultradźwiękowej na wydajność przecierania oraz na zawartość składników bioaktywnych i właściwości reologiczne uzyskanych przecierów z owoców truskawki i jagody kamczackiej.

W pierwszym etapie wyprodukowano przeciery z jagody kamczackiej, stosując pięć schematów produkcji w celu określenia znaczenia momentu aplikowania ultradźwięków w procesie technologicznym na parametry jakościowe przecieru. Jako obiekty kontrolne wykorzystano przecier uzyskany z pulpy niepoddanej obróbce ultradźwiękami oraz próbkę, w której pulpę podgrzano do temperatury generowanej przez ultradźwięki (50°C). W przypadku pozostałych obiektów (P1, P2, P4) pulpę owocową podgrzewano

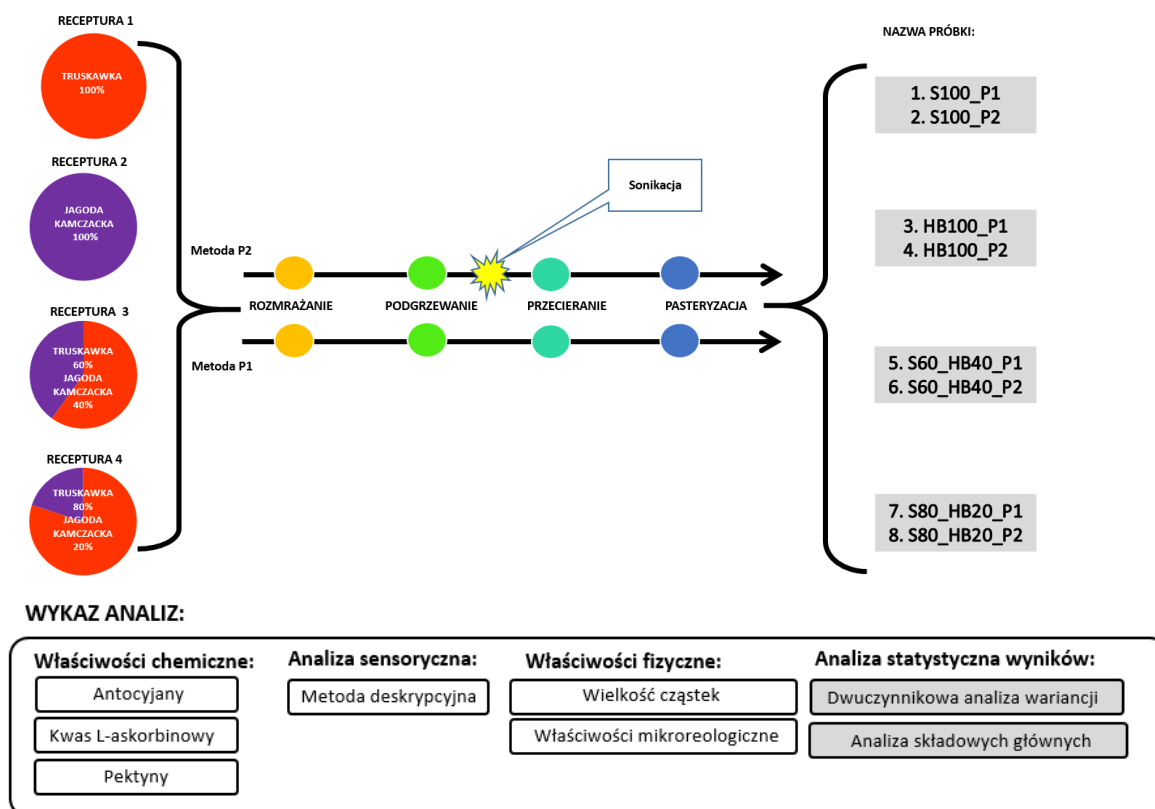
do temperatury 80°C. W obiekcie P3 proces podgrzewania zastąpiono sonikacją, której czas wynosił 10 minut. Schemat poszczególnych procesów oraz zakres wykonanych analiz etapu pierwszego tego eksperymentu przedstawiono na Rys. 6.



Rys. 6. Schemat technologiczny (P1 – P5) dotyczący „etapu I” eksperymentu z zastosowaniem ultradźwięków podczas produkcji przecierów z jagody kamczackiej

Na podstawie wyników analiz zawartości związków bioaktywnych oraz lepkości przecierów wybrano schemat z zastosowaniem obróbki ultradźwiękowej, wykazujący pożądaną wpływ na jakość produktu. Schemat P2, obok obiektu kontrolnego P1, zastosowano w drugim etapie eksperymentu, w którym badano przeciery uzyskane z pulpy składającej się z różnych proporcji jagody kamczackiej i truskawki (Rys. 7). W tej części eksperymentu analizowano właściwości mikroreologiczne, szczegółowo

oznaczano zawartość związków fenolowych oraz przeprowadzono analizę sensoryczną produktu. Szczegółowy opis przebiegu eksperymentu przedstawiono w publikacji nr 4.



Rys. 7. Schemat technologiczny (P1 – P2) dotyczący „etapu II” eksperymentu z zastosowaniem ultradźwięków podczas produkcji przecierów z jagody kamczackiej i truskawek

6. DYSKUSJA WYNIKÓW I OSIĄGNIĘĆ CYKLU PUBLIKACJI

6.1. Wpływ obróbki ultradźwiękowej na zawartość związków bioaktywnych w soku z owoców jagodowych

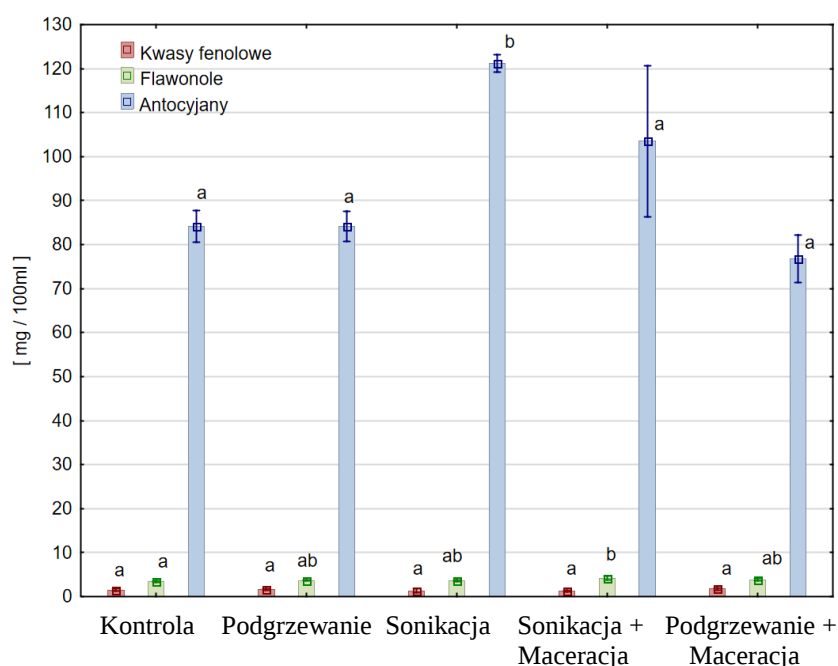
Publikacja 1: Piecko, J.; Mieszczakowska-Frąc, M.; Celejewska, K.; Szwejd-Grzybowska, J. 2024. *Impact of Ultrasound Pretreatment on Juice Yield and Bioactive Content in Juice Produced from Selected Berries Fruit*. *Foods*, 13, 1231. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13081231>

Prezentowana w niniejszej publikacji część badań była związana z weryfikacją hipotezy badawczej, zgodnie z którą zastosowanie ultradźwięków w procesie wytwarzania soków z owoców jagodowych sprzyja zwiększeniu zawartości związków bioaktywnych w otrzymanym soku. W badaniu tym ultradźwięki zastosowano podczas produkcji soku z owoców truskawki, czarnej porzeczki i maliny. Stanowiły one dodatkowy etap obróbki pulpy owocowej poprzedzający etap tłoczenia soku. Hipoteza dotycząca wzrostu zawartości związków bioaktywnych w wytłoczonym soku została sformułowana na podstawie założenia, że aktywność ultradźwięków sprzyja rozpadowi ścian komórkowych, umożliwiając tym samym uwolnienie związków polifenolowych [72]. W technologii produkcji soków jagodowych powszechnie stosuje się macerację enzymatyczną pulpy owocowej, podczas której enzymy rozkładają pektyny i inne składniki ścian komórkowej, ułatwiając uwalnianie soku z tkanek roślinnych oraz zwiększając wydajność tłoczenia [73, 74]. Należy podkreślić, że enzymy te wykazują najwyższą aktywność w temperaturze około 40–55 °C, dlatego w praktyce pulpa owocowa jest wstępnie podgrzewana w celu zapewnienia optymalnych warunków ich działania.

Celem przeprowadzonych badań była analiza wpływu poszczególnych czynników, tj. temperatury, maceracji enzymatycznej i fal ultradźwiękowych, stosowanych zarówno osobno, jak i w sekwencjach łączonych, na ekstrakcję związków fenolowych oraz kwasu L-askorbinowego. Obok analizy zawartości składników bioaktywnych analizowano także aktywność przeciwutleniającą oraz wydajność tłoczenia.

Osiągnięciem naukowym przeprowadzonych badań było określenie wpływu ultradźwiękowej obróbki pulpy owocowej na wydajność tłoczenia oraz ekstrakcję związków bioaktywnych podczas produkcji soków z wybranych owoców jagodowych. Istotnym wynikiem badań było wykazanie, że skuteczność ultradźwięków w procesie

tłoczenia soku zależy od właściwości strukturalnych surowca, gdyż w przypadku czarnej porzeczki zastosowanie ultradźwięków nie umożliwiło efektywnego uzyskania soku. Wytłoczenie soku z owoców czarnej porzeczki było możliwe jedynie w wariantach, w których stosowano macerację enzymatyczną. Natomiast w przypadku malin i truskawek wyniki wykazały, że zastosowanie ultradźwięków jako wstępnej obróbki pulpy owocowej może zwiększać wydajność tłoczenia soku w stopniu porównywalnym z maceracją enzymatyczną.



Rys. 8. Zawartość antocyjanów w soku malinowym uzyskanym po zastosowaniu pięciu schematów obróbki pulpy

Jak wykazano, efekt działania ultradźwięków jest zależny od właściwości materiału poddawanego zabiegowi, a ściślej od gatunku owoców. Spostrzeżenie to silnie koresponduje z ogólnymi wnioskami płynącymi z przeglądowych pracach dotyczących zastosowania ultradźwięków w żywności [48]. Przeprowadzona analiza wykazała, że zastosowanie ultradźwięków nie powodowało obniżenia całkowitej zawartości związków fenolowych w sokach z żadnego z trzech badanych gatunków owoców. Zaobserwowano jednak, że zastosowanie ultradźwięków sprzyja intensyfikacji ekstrakcji wybranych związków bioaktywnych do soku, jak to miało miejsce w przypadku malin. Potwierdzono, że sonikacja zwiększyła zawartość antocyjanów w soku z malin o około 40%, gdy była stosowana zamiast maceracji enzymatycznej oraz o około 30% gdy ją uzupełniała (Rys. 8). Oryginalnym elementem badań było wykazanie, że ultradźwięki

przyczyniają się do zmian na poziomie cząsteczkowym antocyjanów, modyfikując tym samym udział poszczególnych antocyjanów w soku z malin. Konsekwencje zmian w strukturze i profilu antocyjanów w sokach mogą mieć znaczenie podczas przechowywania [75], ujawniając się w postaci różnic stabilności barwy. Jednak zagadnienie to wymagałoby dalszych badań przechowalniczych, których w ramach tej pracy nie podjęto.

Istotnym osiągnięciem pracy było rozdzielenie wpływu temperatury od efektów mechanicznych i chemicznych działania ultradźwięków w procesie przetwarzania pulpy owocowej. W przypadku soku z truskawek temperatura i czas przetwarzania były ważniejszymi czynnikami wpływającymi na zawartość związków fenolowych i aktywność przeciwutleniającą niż sonikacja. Wniosek ten uwzględniono na etapie projektowania schematu procesu podczas realizacji eksperymentu związanego z produkcją przecierów (opisanym w Publikacji 4).

Wykazano, że zastosowanie ultradźwięków jako etapu wstępnej obróbki pulpy owocowej w produkcji soków z malin, truskawek i czarnej porzeczki powodowało obniżenie zawartości kwasu L-askorbinowego w porównaniu z próbą kontrolną. Skala zmian była jednak niewielka i porównywalna z efektami obserwowanymi przy zastosowaniu maceracji enzymatycznej. W badaniach potwierdzono wzrost całkowitej aktywności przeciwutleniającej w sokach z malin i czarnej porzeczki wyprodukowanych z udziałem ultradźwięków. Efekt ten może wynikać z intensyfikacji ekstrakcji związków bioaktywnych, oraz ograniczenia ich utleniania wskutek skrócenia czasu przetwarzania. Za aktywność przeciwutleniającą owoców jagodowych odpowiadają związki polifenolowe, witaminy (głównie kwas L-askorbinowy) oraz karotenoidy [11]. Jednakże istotny statystycznie wzrost ogólnej zawartości antocyjanów w porównaniu z obiektami kontrolnymi zaobserwowano jedynie w sokach z malin.

Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do zastosowań technologicznych. Optymalizacja parametrów procesu tłoczenia soku, polegająca na zastąpieniu maceracji enzymatycznej kilkuminutową obróbką ultradźwiękową, mogłaby skutkować potencjalnymi korzyściami ekonomicznymi. Rozwiązanie to pozwoliłoby nie tylko na skrócenie czasu, ale także na ograniczenie zużycia energii potrzebnej do podgrzewania pulpy przed tłoczeniem. Ponadto eliminowałoby konieczność dozowania preparatów

enzymatycznych oraz związane z tym kwestie logistyczne, takie jak ich transport i magazynowanie.

Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie ultradźwięków jako alternatywnej lub wspomagającej metody wstępnej obróbki pulpy owocowej może zwiększać wydajność tłoczenia soku oraz intensyfikować ekstrakcję wybranych związków bioaktywnych, przy czym skuteczność tej metody zależy od właściwości technologicznych przetwarzanego surowca. Owoce jagodowe, choć stanowią wspólną grupę surowców dla przemysłu przetwórstwa owocowo-warzywnego, charakteryzują się wyraźnymi różnicami gatunkowymi, co znalazło odzwierciedlenie w otrzymanych wynikach eksperymentu.

6.2. Homogenizacja ultradźwiękowa mętnego soku z truskawek

Publikacja 2: Piecko J.; Mieszczakowska-Frąc M.; Szweja-Grzybowska J.; Celejewska K. 2024. *Wpływ rodzaju homogenizacji na właściwości reologiczne i zawartość związków bioaktywnych w mętnym soku z truskawek. ŻYWNOSĆ. NAUKA. TECHNOLOGIA. JAKOŚĆ*, 31, 3(140), 171-185. DOI: <https://doi.org/10.15193/zntj/2024/140/517>.

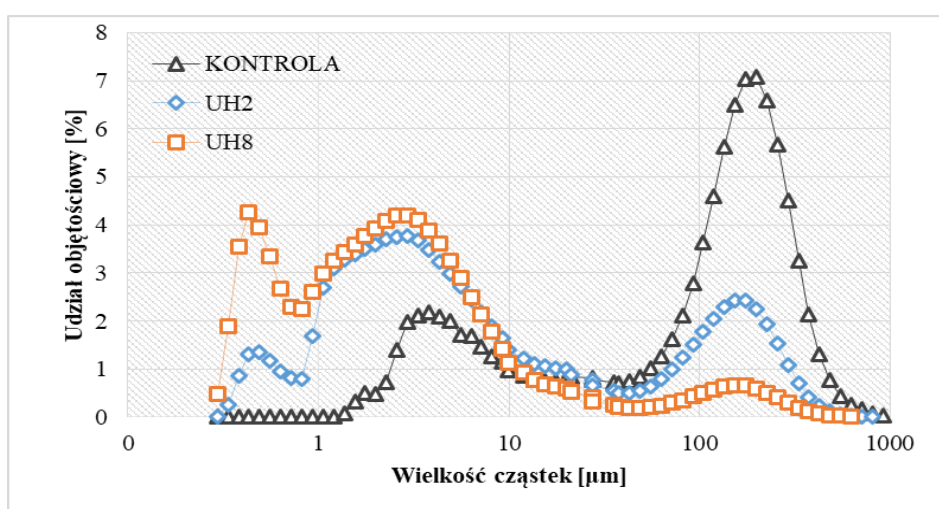
Współczesne ogrodnictwo, szczególnie w sektorze produkcji owoców jagodowych, wymaga wdrażania nowoczesnych technologii umożliwiających maksymalne wykorzystanie plonu oraz zachowanie wysokiej jakości wytworzonych produktów. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabierają fizyczne metody przetwarzania, takie jak homogenizacja, które umożliwiają kształtowanie właściwości fizykochemicznych produktów uzyskiwanych z owoców.

Badania przedstawione w publikacji 2, dotyczące wpływu rodzaju homogenizacji na właściwości reologiczne i zawartość związków bioaktywnych w mętnym soku z truskawek, dostarczają istotnych podstaw naukowych dla rozwoju nowoczesnych technologii przetwarzania surowców ogrodniczych.

Celem pracy była ocena, w jaki sposób zastosowana homogenizacja ultradźwiękowa kształtować będzie jakość mętnego soku truskawkowego, gdy zabieg zastosowany jest na wytłoczonym soku, jako jeden z etapów jego dalszego przetwarzania. Obok właściwości reologicznych soku analizowano również zawartość związków bioaktywnych. Wybrane cechy jakościowe soku poddanego homogenizacji ultradźwiękowej porównywano z sokiem homogenizowanym metodą wysokociśnieniową oraz z sokiem nie poddanym homogenizacji. Homogenizację wysokociśnieniową (HPH) wykorzystano jako metodę porównawczą, ponieważ jest to metoda o potwierdzonej wysokiej skuteczności [80] oraz jest ona powszechnie stosowana w dużych zakładach przetwórstwa żywności. Do doświadczeń wykorzystano sok otrzymany z owoców truskawek odmiany ‘Grandarosa’, czyli surowiec tej samej odmiany, który zastosowano w badaniach opisanych w publikacji 1, co umożliwiło kontynuację i rozszerzenie wcześniejszych badań o etap przetwarzania soku. Eksperyment dotyczył hipotezy stwierdzającej, że zastosowanie ultradźwięków w procesie wytwarzania soków z owoców jagodowych sprzyja

zwiększeniu zawartości związków bioaktywnych oraz modyfikuje właściwości reologiczne otrzymanych produktów.

Zastosowanie ultradźwięków, jako jedna z metod homogenizacji, prowadzi do zmniejszenia wielkości cząstek poprzez ich destrukcję oraz rozbijanie agregatów. W związku z tym w badaniach dokonano oceny zmian wielkości cząstek w soku po zastosowaniu tego zabiegu oraz określono jego wpływ na inne parametry jakościowe. Jak widać na Rys. 9, zabiegi homogenizacji istotnie zmniejszały średnią wielkość cząstek. W soku niehomogenizowanym około 75% wykrytych cząstek miało rozmiar większy niż 25 μm , podczas gdy w sokach homogenizowanych ultradźwiękowo nie więcej niż 30%.



Rys. 9. Rozkład wielkości cząstek w soku z truskawek homogenizowanym metodą ultradźwiękową (KONTROLA – sok nie homogenizowany, UH2 – sok homogenizowany 2 minuty, UH8 – sok homogenizowany 8 minut)

Ponadto wykazano zależność między czasem trwania homogenizacji ultradźwiękowej a rozkładem wielkości cząstek. W soku homogenizowanym przez 8 minut (UH8) udział cząstek o bardzo małych rozmiarach (0,2 – 1 μm) wynosił około 30% wszystkich wykrytych cząstek, podczas gdy w próbce homogenizowanej przez 2 minuty (UH2) wartość ta była trzykrotnie niższa. Podobną skuteczność rozbijania cząstek zaobserwowano w sokach homogenizowanych metodą wysokociśnieniową, niezależnie od ciśnienia (200 i 600 barów) zawartość cząstek z zakresu 0,2–1 μm wynosiła około 35%. Obydwie metody homogenizacji prowadziły więc do zwiększenia udziału mniejszych cząstek, co jest istotne z punktu widzenia jakości produktu [76]. Podsumowując skuteczność zabiegu, można stwierdzić, że zastosowanie ultradźwięków

przez 2 minuty było wystarczające, aby istotnie ograniczyć udział objętościowy dużych cząstek w soku.



Rys. 10. Porównanie stopnia sedymentacji soków po upływie 48 godzin w zależności od rodzaju homogenizacji (od lewej: KONTROLA, UH2, UH8, HPH200, HPH600) (fot. Piecko J. 2024)

Rysunek 10 przedstawia wizualne różnice między sokami homogenizowanymi z zastosowaniem ultradźwięków lub homogenizacji wysokociśnieniowej, a sokiem niehomogenizowanym (pierwsza próbka od lewej). Zdjęcie wykonano po upływie 48 h od przeprowadzenia homogenizacji w celu zobrazowania zmian zachodzących w produktach oraz zasymulowania wyglądu soku w opakowaniu jednostkowym podczas obrotu handlowego. Próbka kontrolna (KONTROLA) wykazywała wyraźną sedymentację, czego rezultatem było powstanie klarownej warstwy soku w górnej części butelki oraz osadu o jaśniejszej barwie na jej dnie. Pomiary mętności wykazały, że wszystkie soki poddane homogenizacji charakteryzowały się istotnie wyższym zmętnieniem w porównaniu z sokiem niehomogenizowanym. Najwyższe wartości uzyskano w sokach homogenizowanych ultradźwiękowo, a wydłużenie czasu zabiegu sprzyjało poprawieniu wartości tego parametru. W porównaniu z kontrolą zmętnienie wzrosło o 135% w próbce UH2 oraz o 179% w próbce UH8.

W ramach analizy właściwości reologicznych wykonano pomiar lepkości soków. Parametr ten jest jedną z najważniejszych właściwości fizycznych soków, która kształtuje m.in. stabilność zmętnienia [77] oraz jakość sensoryczną [78]. Odpowiednia lepkość soków sprzyja stabilizacji zmętnienia, zwiększając atrakcyjność wizualną produktu, a jednocześnie wpływa na jego percepcję sensoryczną poprzez regulację czasu

przebywania w jamie ustnej oraz sposobu jego rozprowadzania na powierzchni języka. Zastosowanie homogenizacji spowodowało wzrost lepkości we wszystkich badanych sokach. Soki homogenizowane ultradźwiękami charakteryzowały się lepkością: 4,9 mPa·s dla UH2 oraz 5,3 mPa·s dla UH8. Wartości te były istotnie wyższe niż w próbce kontrolnej, jednak niższe niż w sokach homogenizowanych wysokociśnieniowo.

Choć zarówno homogenizacja ultradźwiękowa, jak i wysokociśnieniowa zaliczane są do technologii nietermicznych, w praktyce każdemu z tych procesów towarzyszy wzrost temperatury medium. W warunkach przemysłowych efekt ten kompensuje się poprzez zastosowanie układów chłodzenia, które utrzymują stabilną temperaturę. W niniejszym badaniu nie stosowano dodatkowego chłodzenia, ponieważ obserwowany wzrost temperatury był niewielki (rzędu kilku stopni) i nie powodował istotnych zmian jakości soku, co potwierdziła analiza zawartości kwasu L-askorbinowego. Niewielkie przyrosty temperatury towarzyszące obu rodzajom homogenizacji nie wpływały także na ogólną zawartość związków fenolowych w badanych sokach. Tym samym wykazano, że homogenizacja soku z wykorzystaniem ultradźwięków jest metodą nie powodującą niekorzystnych zmian zawartości związków bioaktywnych, a jednocześnie charakteryzuje się wysoką skutecznością.

Istotnym osiągnięciem badań jest wykazanie aplikacyjnego potencjału homogenizacji ultradźwiękowej w produkcji soków mętnych. Zastosowanie tego zabiegu prowadzi do zmniejszenia wielkości cząstek fazy rozproszonej, co skutkuje zwiększeniem stabilności zawiesiny oraz ograniczeniem zjawiska sedymentacji. Poprawa stabilności fizycznej produktów ma istotne znaczenie technologiczne, ponieważ wpływa na jakość handlową produktów oraz ich trwałość podczas przechowywania. z punktu widzenia sektora ogrodniczego oznacza to możliwość zwiększenia wartości technologicznej owoców oraz rozszerzenia możliwości ich wykorzystania w przemyśle przetwórczym.

Przedstawione w Publikacjach 1 i 2 wyniki badań potwierdzają hipotezę badawczą zakładającą, że zastosowanie ultradźwięków w produkcji soku z owoców jagodowych zwiększa zawartość związków bioaktywnych oraz modyfikuje właściwości reologiczne soku. Wykazano, że sonikacja sprzyja intensyfikacji ekstrakcji wybranych związków bioaktywnych oraz wpływa na zmianę właściwości reologicznych mętnego soku truskawkowego, przyczyniając się do poprawy jego jakości.

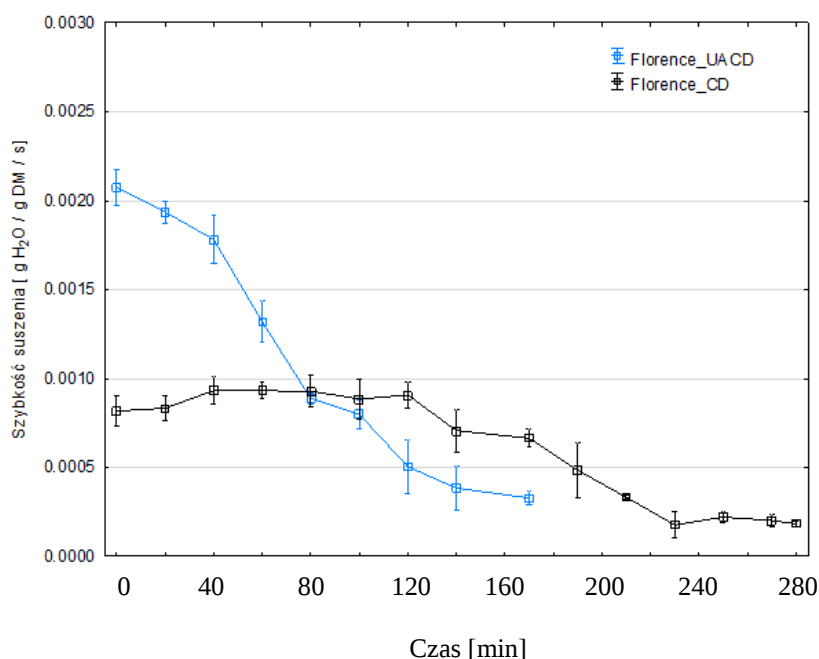
6.3. Zastosowanie ultradźwięków w procesie suszenia owoców jagodowych na przykładzie plastrów truskawek

Publikacji 3: Piecko, J.; Mieszczakowska-Frąc, M.; Celejewska, K.; Dickinson, N.; Szejda-Grzybowska, J. *Effect of Ultrasound-Assisted Convective Drying on the Content of Bioactive Compounds and Drying Rate of Strawberry Slices*. *Appl. Sci.* 2025, 15, 8947. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15168947>.

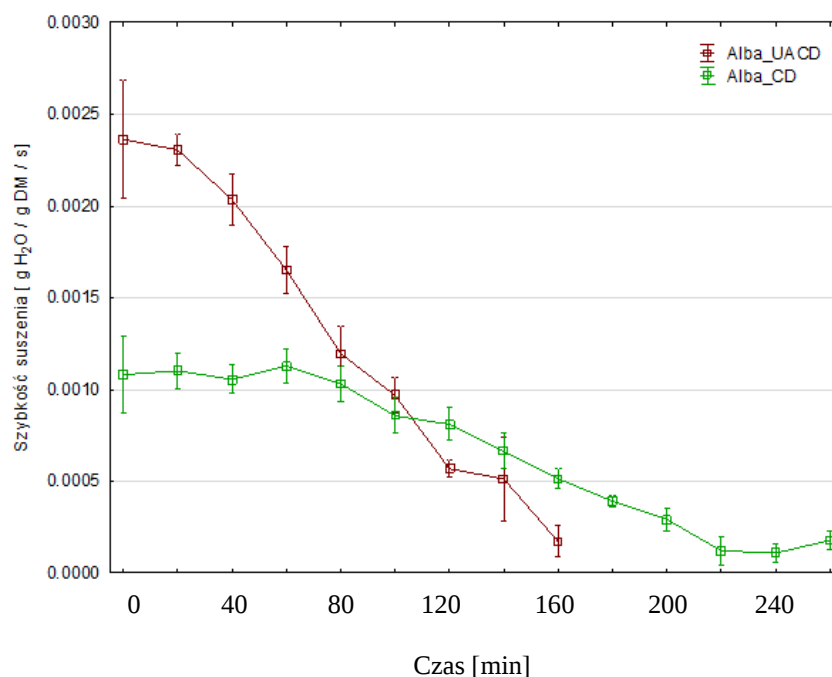
Zastosowanie ultradźwięków jako metody wspomagającej proces suszenia owoców stanowi jeden z intensywnie rozwijających się kierunków badań. W licznych pracach wykazano, że ultradźwięki przyczyniają się do intensyfikacji transportu masy poprzez zjawisko kawitacji. W konsekwencji obserwuje się skrócenie czasu suszenia oraz poprawę jakości produktu końcowego [70, 70]. Publikacja 3 dotyczy wykorzystania ultradźwięków w procesie suszenia owoców jagodowych na przykładzie truskawek. Celem niniejszego badania było porównanie szybkości suszenia oraz jakości suszonych plastrów truskawek uzyskanych w wyniku suszenia konwekcyjnego (CD) oraz suszenia konwekcyjnego wspomagane ultradźwiękami (UACD). W eksperymencie wykorzystano dwie odmiany truskawek: ‘Florence’ i ‘Alba’, analizując wpływ metody suszenia na jakość otrzymanego suszu. Jakość suszu oceniano na podstawie: zmiany barwy, zawartości związków polifenolowych, kwasu L-askorbinowego oraz aktywności przeciwutleniającej.

Najistotniejszymi czynnikami degradacji związków bioaktywnych w żywności są czas ekspozycji materiału na działanie temperatury i tlenu podczas przetwarzania. Długość trwania procesu bezpośrednio wpływa na jakość otrzymanego suszu [79] i stanowi istotne kryterium oceny technologii suszenia, zarówno w aspekcie zachowania składników wrażliwych na utlenianie, jak i efektywności energetycznej procesu. Na podstawie pomiaru ubytku masy w trakcie suszenia w badaniach własnych opracowano krzywe prędkości suszenia, definiowane jako stosunek masy odparowanej wody do masy suchej substancji na jednostkę czasu. Początkowa zawartość wody w owocach jagodowych jest bardzo wysoka; w przypadku truskawek stanowiących materiał badawczy wynosiła ona 90,7% dla odmiany ‘Florence’ oraz 91,4% dla odmiany ‘Alba’. Proces suszenia przerywano po osiągnięciu wilgotności materiału wynoszącej 20%. Czas trwania suszenia konwekcyjnego (CD) wyniósł 280 minut dla odmiany „Florence” i 260 minut dla odmiany „Alba”. Zastosowanie wspomagania ultradźwiękami skróciło czas suszenia w przypadku obu odmian. Dla odmiany ‘Florence’ czas procesu wyniósł 180

minut i był o 35,7% krótszy niż w suszeniu konwekcyjnym, natomiast dla odmiany ‘Alba’ suszenie wspomagane UD trwało 170 minut, co odpowiada skróceniu czasu suszenia o 34,6%. Podobne wyniki, wskazujące na skrócenie czasu suszenia w wyniku zastosowania ultradźwięków, opisano w literaturze również dla innych owoców [65], jednak mechanizm zjawiska nie został dotąd w pełni wyjaśniony [63]. Ilość doniesień naukowych dokumentujących wykorzystanie ultradźwięków podczas suszenia owoców jagodowych jest ograniczona. W jednym z eksperymentów wspomaganie procesu suszenia malin ultradźwiękami (o mocy 100 i 200 W) skutkowało skróceniem czasu suszenia odpowiednio o 54% i 64% [84]. W wspomnianym badaniu zastosowano moc ultradźwięków 200 W, jednak przy mniejszej masie materiału (50 g malin) niż w eksperymencie opisanym w Publikacji 3 (250 g truskawek), co może wyjaśniać różnice w obserwowanym skróceniu czasu suszenia. Zatem efektywność tego procesu była relatywnie niższa, gdy weźmiemy pod uwagę moc ultradźwięków na masę materiału.



Rys. 11. Szybkości suszenia plastrów truskawek odmiany ‘Florence’ suszonych ze wspomaganie ultradźwiękami (UACD) i bez wspomagania (CD)

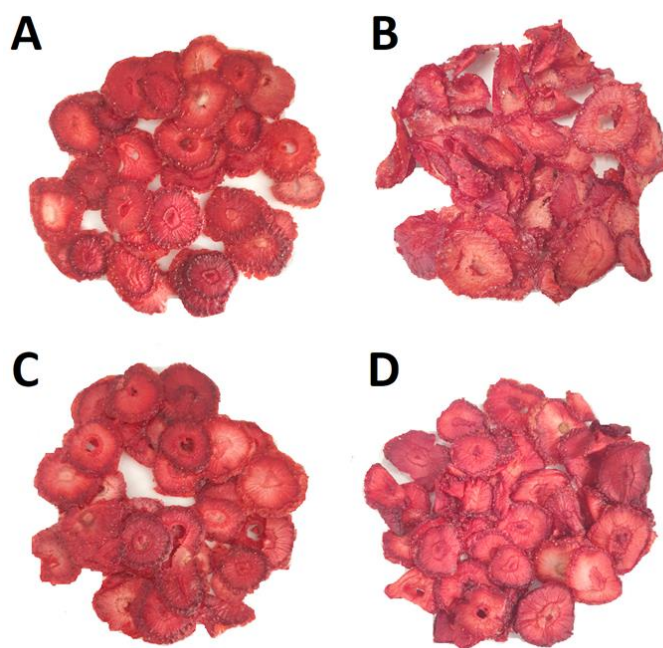


Rys. 12. Szybkości suszenia plastrów truskawek odmiany ‘Alba’ suszonych ze wspomaganie ultradźwiękami (UACD) i bez wspomagania (CD)

Z Rys. 11 i 12 wynika, że szybkość usuwania wody podczas suszenia konwekcyjnego (CD) pozostawała stosunkowo stała przez około 60 minut dla odmiany ‘Alba’ oraz 120 minut dla odmiany ‘Florence’, do momentu osiągnięcia tzw. krytycznej zawartości wilgoci. Etap ten odpowiada odparowaniu wody głównie z powierzchni produktu lub większych kapilar. W kolejnych fazach suszenia na krzywych można wyróżnić pierwszy i drugi okres malejącej szybkości suszenia. Drugi okres malejącej szybkości suszenia rozpoczął się w 220 minucie dla odmiany ‘Alba’ oraz 230 minucie dla odmiany ‘Florence’. Kinetyka obserwowanego procesu suszenia stanowi typowy przebieg krzywej suszenia konwekcyjnego. W przypadku suszenia wspomaganego ultradźwiękami nie obserwowano fazy stałej szybkości suszenia. Proces rozpoczynał się od okresu malejącej szybkości odparowania wody. W tym przypadku szybkość usuwania wody malała od początku aż do końca procesu, przy zachowaniu zbliżonego nachylenia krzywej. Tym samym wykazano, że zastosowanie ultradźwięków częściowo ogranicza opór dyfuzyjny związany z migracją wilgoci do powierzchni plastrów, podczas gdy w suszeniu konwekcyjnym opór ten stawał się bardziej istotny wraz ze spadkiem wilgotności próbki. Obserwowana wysoka skuteczność działania ultradźwięków może być związana z niewielką grubością plastrów, która w świeżym materiale wynosiła 5 mm, a na skutek skurczu tkanki w wysuszonych plastrach nie przekraczała 1 mm. Grubość

plastrów dostosowano do właściwości fali akustycznej, która wywiera głównie efekty powierzchniowe, a ich penetracja w głąb materiału jest ograniczona, typowo do kilku milimetrów warstwy powierzchniowej [80]. W literaturze brak pełnej zgodności co do wpływu ultradźwięków na kinetykę suszenia żywności, ponieważ opisano zarówno przypadki, w których największy efekt obserwowano w początkowej fazie suszenia, jak i takie, w których dominował on w okresie malejącej szybkości suszenia [47]. Rozbieżności te mogą wynikać z różnic we właściwościach matrycy (opór dyfuzyjny tkanek), a także z odmiennych konfiguracji urządzeń i warunków eksperymentalnych.

Plastry truskawek po wysuszeniu dwiema metodami dla obu odmian przedstawiono na Rys. 11. Niezależnie od zastosowanej metody suszenia zachowały one swój okrągły kształt i nie ulegały kruszeniu podczas zdejmowania z tac suszarniczych. W wyniku koncentracji barwników, materiał obu odmian charakteryzował się intensywnie czerwony kolorem. Chociaż zmiana barwy w oceny jakości suszu są zazwyczaj uznawane za zjawisko niepożądane, w tym wypadku zmianę tę można uznać za korzystną z punktu widzenia wizualnej oceny produktu.



Rys. 13. Suszone plastry truskawek: A – Alba_CD, B – Alba_UACD, C – Florence_CD, D – Florence_UACD (fot. Piecko J. 2025)

Proces suszenia doprowadził do obniżenia zawartości związków fenolowych w obu badanych odmianach truskawek, jednak kierunek tych zmian nie jest w pełni spójny między odmianami. Mimo wyraźnego przyspieszenia procesu nie stwierdzono

znaczących różnic w końcowej zawartości związków fenolowych pomiędzy suszem otrzymanym metodą konwekcyjną a suszem otrzymanym metodą wspomaganą ultradźwiękami. W przypadku odmiany 'Alba' stwierdzono wyższe poziomy niektórych związków fenolowych w plastrach suszonych z wykorzystaniem wspomagania ultradźwiękowego w porównaniu z klasycznym suszeniem konwekcyjnym.

Wbrew oczekiwaniom, krótszy czas suszenia nie przełożył się na lepszą retencję kwasu L-askorbinowego. Straty kwasu L-askorbinowego w odmianie 'Alba' przekraczały 57% niezależnie od metody, natomiast dla 'Florence' retencja wyniosła 73% dla CD oraz 68% dla UACD.

Z kolei z punktu widzenia aktywności przeciwutleniającej, technologia UACD okazała się korzystniejsza, ponieważ spadki tego parametru były mniejsze niż przy CD, a próbki suszone z użyciem ultradźwięków zachowały poziom aktywności przeciwutleniającej zbliżony do surowca.

Wyniki te pozwalają częściowo odnieść się do hipotezy badawczej zakładającej, że suszenie wspomagane ultradźwiękami umożliwia zachowanie wyższej zawartości związków bioaktywnych w suszu z owoców jagodowych niż suszenie konwekcyjne. W przypadku analizowanych plastrów truskawek hipoteza ta nie została w pełni potwierdzona w odniesieniu do związków bioaktywnych, ponieważ ich końcowa zawartość była zbliżona w obu wariantach suszenia. Niemniej jednak, ze względu na wyższą aktywność przeciwutleniającą suszu otrzymanego metodą wspomaganą ultradźwiękami, należy mieć na uwadze potrzebę indywidualnej optymalizacji warunków prowadzenia sonikacji. Potwierdzeniem tej tezy są doniesienia wykazujące, że pomiędzy odmianami truskawek występują m.in. różnice aktywności enzymów odpowiedzialnych za utlenianie związków fenolowych [81].

Istotnym ograniczeniem opisanego eksperymentu jest brak pełnej charakterystyki surowca oraz obiektywnej oceny stopnia dojrzałości owoców (np. na podstawie jędrności oraz analizy mikrostruktury tkanek), co mogłoby częściowo tłumaczyć zaobserwowane różnice jakości otrzymanego suszu. Dojrzewaniu owoców towarzyszą głębokie zmiany właściwości fizycznych i chemicznych, w tym zmiany w strukturze tkanek, a efektem tych zmian mogą być różnice przebiegu procesu suszenia [82]. Warto byłoby również uzupełnić analizy surowca o określenie aktywności oksydazy polifenolowej, co

umożliwiłoby również lepsze zrozumienie obserwowanych zmian zawartości antocyjanów.

Istotnym osiągnięciem o charakterze aplikacyjnym prowadzonych badań było wykazanie możliwości praktycznego zastosowania ultradźwięków w procesie suszenia poprzez integrację generatora ultradźwięków ze standardową suszarką konwekcyjną, bez konieczności jej istotnej modyfikacji. Rozwiązanie to pozwala ograniczyć jedną z głównych barier wdrożeniowych tej technologii, jaką jest wysoki koszt specjalistycznych suszarek ultradźwiękowych oraz trudności ich integracji z istniejącą infrastrukturą technologiczną.

Uzyskane wyniki wykazały, że zastosowanie ultradźwięków w takim układzie umożliwia skrócenie czasu suszenia przy jednoczesnym zachowaniu porównywalnego poziomu związków bioaktywnych w produkcie końcowym. Wskazuje to na potencjał tej technologii w intensyfikacji procesów suszenia surowców roślinnych w warunkach przemysłowych.

6.4. Wpływ zastosowania ultradźwięków na jakość przecierów z owoców jagodowych

Publikacja 4: Piecko, J.; Mieszczakowska-Frąć, M.; Dickinson, N.J.; Wrzodak, A.; Celejewska, K.; Frøst, M.B.; Lange, B.; Dandanell, C.; Lewandowicz, J.; Jankowska, P. 2026. *Ultrasound Treatment in Berry Puree Production: Effects on Sensory, Rheological, and Chemical Properties*. *Molecules*, 31, 260. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules31020260>.

W celu przetestowania hipotezy stwierdzającej, że oddziaływanie ultradźwięków na pulpę z owoców jagodowych korzystnie wpływa na jakość sensoryczną oraz zawartość związków bioaktywnych w uzyskanych z niej przecierach, przeprowadzono eksperyment z wykorzystaniem owoców jagody kamczackiej (odmiana ‘Wojtek’) i truskawek (odmiana ‘Florence’). Eksperyment przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym oceniano, w którym momencie zastosowanie ultradźwięków w procesie technologicznym produkcji przecieru z jagody kamczackiej jest najbardziej optymalne (Rys. 6; rozdz. 5.3). W tym celu obok obiektu kontrolnego (P1), gdzie nie stosowano obróbki ultradźwiękowej, wyprodukowano przecier, w którym obróbkę stosowano jako

dodatkowy etap przed przecieraniem (P2), zastępując podgrzewanie pulpy (P3) oraz stosując ją po przecieraniu (P4). W obiekcie P5, podgrzewano pulpę do temperatury generowanej przez ultradźwięki, w celu odróżnienia wpływu temperatury od innych efektów obróbki ultradźwiękowej. Jako kryteria wyboru schematu produkcji przyjęto wydajność przecierania, lepkość pozorną, całkowitą zawartość antocyjanów oraz całkowitą zawartość polifenoli.

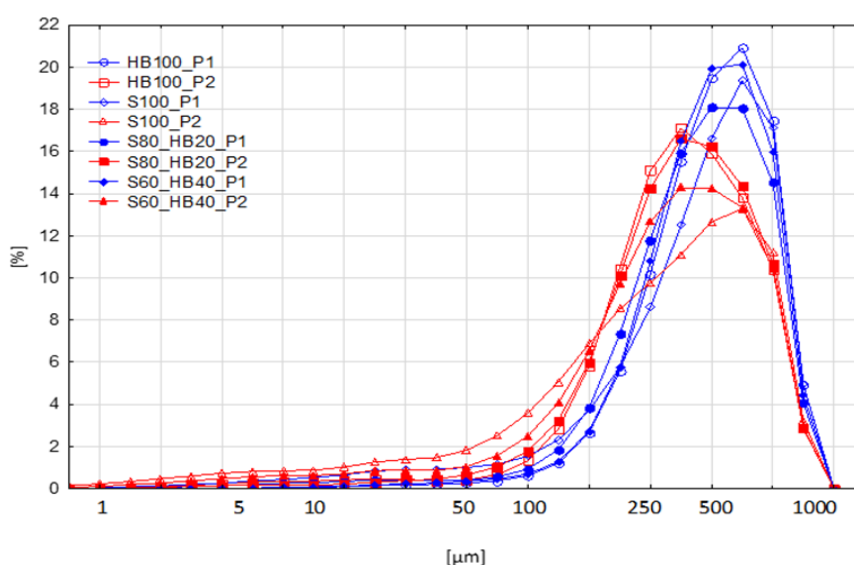
Próbki P1, P2 i P4 nie różniły się istotnie pod względem całkowitej zawartości związków fenolowych oraz antocyjanów ogółem, przy czym ich zawartość była o około 18% wyższa niż w próbkach P3 i P5. Obserwacja ta wskazuje, że obróbka cieplna była skuteczniejszym czynnikiem zwiększającym ekstrakcję związków bioaktywnych niż sonikacja. Wniosek ten jest zgodny z wynikami przedstawionymi w Publikacji 1 dotyczącymi soku z truskawek, w których wykazano, że obróbka termiczna surowca poprawia ekstrakcję tych związków.

Analiza lepkości przecierów pozwoliła na uwzględnienie właściwości reologicznych w procesie doboru optymalnej metody wytwarzania przecieru, również z punktu widzenia końcowej tekstury produktu. W badanych przecierach najwyższą lepkość pozorną uzyskano dla próbki P2, co sugeruje, że zastosowanie ultradźwięków jako dodatkowego etapu przetwarzania może korzystnie modyfikować konsystencję produktu.

Jednym z najważniejszych osiągnięć pracy było wykazanie, że moment zastosowania ultradźwięków w schemacie technologicznym ma kluczowe znaczenie dla jakości przecieru. Zastosowanie ultradźwięków przed procesem przecierania prowadzi do najlepszych efektów technologicznych, w tym poprawy wydajności i właściwości reologicznych przecieru z owoców jagodowych.

Do realizacji etapu II wybrano wariant P2 z zastosowaniem ultradźwięków, natomiast wariant P1 przyjęto jako próbę kontrolną (Rys. 7; rozdz. 5.3). Metody te zastosowano do produkcji czterech receptur przecierów: truskawka 100% (S100), jagoda kamczacka 100% (HB100) oraz mieszanek: truskawka 80% + jagoda kamczacka 20% (S80_HB20) i truskawka 60% + jagoda kamczacka 40% (S60_HB40). Receptury te analizowano pod kątem właściwości mikroreologicznych. Przeciery scharakteryzowano za pomocą wskaźników EI (indeks sprężystości), FI (indeks płynności), SLB (współczynnik równowagi ciecz/ciało stałe) i MVI (makroskopowy indeks lepkości). Zwiększenie udziału jagody kamczackiej w przecierach prowadziło do obniżenia EI oraz wzrostu MVI, co prawdopodobnie wynikało z większej zawartości fazy stałej (grubszej

skórki oraz fragmentów okrywy nasiennej wyekstrahowanych z surowca). Zastosowanie ultradźwięków we wszystkich badanych próbkach wpływało na właściwości przecieru w kierunku układu o wyższej płynności (spadek EI i MVI, wzrost FI i SLB), choć zmiany te nie zawsze były statystycznie istotne. Jednocześnie, pomimo, że literatura wskazuje, iż sonikacja może powodować depolimeryzację hydrokoloidów i spadek lepkości, w badanym przypadku nie zaobserwowano wyraźnego obniżenia lepkości makroskopowej. Analiza rozkładu wielkości cząstek w przecierach (Rys. 12) wykazała, że dla wariantu P1 modalna wartość średnicy mieściła się w zakresie 420–550 μm , natomiast dla wariantu P2 obniżyła się do 240–320 μm . Wyniki te wskazują, że zastosowanie ultradźwięków prowadzi do zmniejszenia wielkości cząstek dominującej frakcji.



Rys. 11. Rozkład wielkości cząstek w przecierach z jagody kamczackiej i truskawek wyprodukowanych przy użyciu ultradźwięków - P2 (czerwone linie); oraz bez obróbki ultradźwiękowej – P1 (niebieskie linie). Objaśnienie skrótów: HB - jagoda kamczacka; S – truskawka; 20, 40, 60, 80 – udział % owoców

Rozdrobnienie cząstek sprzyja otrzymaniu przecieru o bardziej jednolitej mikrostrukturze, co przekłada się na odczuwalną gładkość i jednorodność produktu. W celu lepszego zrozumienia zaistniałych różnic wykonano analizę sensoryczną próbek przecieru. Na podstawie otrzymanych ocen dla 24 deskryptorów dotyczących wyglądu, zapachu i smaku przecierów wykonano analizę składowych głównych (PCA). Dwie pierwsze składowe główne wyjaśniły łącznie 94,6% zmienności i ujawniły wyraźny podział próbek na grupy. Pierwsza składowa główna była związana głównie ze składem przecieru i różnicowała próbki z większym udziałem jagody kamczackiej (HB100,

S60_HB40) oraz próbki z przewagą truskawki (S100, S80_HB20). Druga składowa odzwierciedlała wpływ zastosowania ultradźwięków. Próbki przecierów otrzymanych z ich udziałem były powiązane z wyższą lepkością oraz większą jednorodnością tekstury, natomiast przeciery otrzymane bez zastosowania ultradźwięków charakteryzowały się wyraźną wyczuwalnością cząstek.

W celu stwierdzenia wpływu technologii na jakość przecierów analizowano również zawartość związków fenolowych i kwasu L-askorbinowego. Zaobserwowano istotny statystycznie efekt w próbce S80_HB20, gdzie metoda P2 zwiększyła zawartość kwasu L-askorbinowego o ok. 12%, podczas gdy w pozostałych przypadkach różnice były niewielkie i nieistotne. Analiza zawartości związków fenolowych wykazała, że pomimo stwierdzonej istotności statystycznej różnice w zawartości antocyjanów były nieznaczne z punktu widzenia wartości prozdrowotnej produktu. W opozycji do uzyskanych wyników pozostają wyniki badań nad zastosowaniem ultradźwięków do zwiększania ekstrakcji antocyjanów w procesie produkcji przecieru z malin, w którym wykazano ich wysoką skuteczność. Z badań tych wynika, że sonikacja o mocy 400 W, prowadzona przez 10 minut przy częstotliwości 20 kHz, może prowadzić do wzrostu zawartości antocyjanów o 12.6% [83]. Parametry te były zbliżone do zastosowanych w omawianej Publikacji 4, z tą różnicą, że eksperyment opisany w tej publikacji przeprowadzono na próbce o masie 1000 g, co skutkowało ponad 3-krotnie niższą mocą dostarczaną do materiału. Podobna sytuacja dotyczy eksperymentu suszarniczego opisanego w Publikacji 3, prowadzonego na plastrach z truskawek. W przytoczonej publikacji zbliżone parametry oddziaływania ultradźwięków zastosowano na próbce malin o pięciokrotnie niższej masie [79]. W obu przypadkach uzyskano bardziej korzystne rezultaty niż przedstawione w niniejszej rozprawie. Niemniej jednak, pod względem aplikacyjnym zdecydowanie trudniejsze do osiągnięcia ze względu na wysoki stosunek mocy ultradźwięków do jednostki masy materiału. W żadnym z opisanych w tej pracy eksperymentów nie stosowano chłodzenia, które w warunkach laboratoryjnych nie narażałoby większych problemów, natomiast w warunkach przemysłowych może mieć istotne znaczenie w bilansie energetycznym procesu [84].

Do najważniejszych osiągnięć naukowych tej publikacji należy wykazanie, że zastosowanie obróbki ultradźwiękowej w produkcji przecierów jagodowych prowadzi do istotnych zmian w mikrostrukturze układu, co przekłada się na modyfikację właściwości reologicznych, w tym zmniejszenie lepkości pozornej oraz poprawę jednorodności

produktu. Jednocześnie wykazano, że zastosowanie ultradźwięków nie powodowało istotnych strat antocyjanów i kwasu L-askorbinowego.

Istotnym osiągnięciem jest również kompleksowa ocena wpływu ultradźwięków na właściwości sensoryczne produktu. Wykazano, że odpowiednio dobrane parametry procesu nie powodują pogorszenia cech sensorycznych, takich jak smak, aromat i ogólna akceptowalność, a w niektórych przypadkach mogą przyczyniać się do poprawy percepcji jakości poprzez zwiększenie jednorodności i intensywności barwy. Wyniki te są szczególnie ważne w kontekście wdrażania technologii niekonwencjonalnych, ponieważ potwierdzają możliwość poprawy właściwości funkcjonalnych produktu bez negatywnego wpływu na jego cechy konsumenckie.

Na tle dostępnej literatury, koncentrującej się głównie na sokach, przedstawione wyniki stanowią, według najlepszej wiedzy autorów, pierwszą szczegółową charakterystykę wpływu zastosowania ultradźwięków przed przecieraniem na właściwości sensoryczne i fizykochemiczne przecierów z owoców jagodowych. Tym samym uzyskane wyniki potwierdzają słuszność postawionej hipotezy, zgodnie z którą oddziaływanie ultradźwięków na pulpę z owoców jagodowych korzystnie wpływa na jakość sensoryczną oraz właściwości reologiczne produktu. Chociaż nie wykazano wzrostu zawartości składników bioaktywnych w wyniku zastosowania ultradźwięków, ich poziom pozostawał na zbliżonym poziomie. Niemniej jednak zachowanie zawartości tych związków przy jednoczesnej poprawie właściwości fizykochemicznych czyni otrzymane przeciery z owoców jagodowych produktami o korzystnych właściwościach konsumenckich.

7. WNIOSKI

Ultradźwięki stanowią skuteczne narzędzie intensyfikacji procesów przetwórstwa owoców jagodowych, umożliwiające jednoczesną poprawę wydajności procesów i jakości produktu. Technologia wykazuje potencjał wdrożeniowy dla przemysłu spożywczego, szczególnie w kontekście poszukiwania szybkich i energooszczędnych metod przetwarzania owoców jagodowych. Na podstawie zrealizowanych eksperymentów sformułowano następujące wnioski szczegółowe przyporządkowane do trzech grup:

Wpływ ultradźwięków na związki bioaktywne:

- I. Efektywność działania ultradźwięków na zawartość związków bioaktywnych jest zależna od gatunku owoców jagodowych, przy czym najbardziej wyraźny efekt intensyfikacji ekstrakcji obserwuje się w przypadku malin, co wskazuje na istotną rolę cech strukturalnych i składu surowca w kształtowaniu skuteczności procesu.
- II. Zastosowanie ultradźwięków jako etapu wspomagającego obróbkę owoców malin prowadzi do zwiększenia zawartości antocyjanów i kwasu elagowego, co przekłada się na wzrost aktywności przeciwutleniającej soku.
- III. Wykazano, że zastosowanie ultradźwięków prowadzi do zmian na poziomie cząsteczkowym antocyjanów, powodując zmianę ich profilu jakościowego w soku malinowym.
- IV. Zastosowanie ultradźwięków jako czynnika wspomagającego suszenie plastrów truskawek nie powoduje istotnych zmian końcowej zawartości związków fenolowych w porównaniu z suszeniem konwekcyjnym, zapewniając porównywalny poziom ich retencji przy jednoczesnym przyspieszeniu procesu.
- V. Zaobserwowano różnice odmianowe w odpowiedzi na działanie ultradźwięków w procesie suszenia. W przypadku odmiany 'Alba' suszenie wspomagane ultradźwiękami sprzyjało zwiększeniu zawartości wybranych związków fenolowych w porównaniu z suszeniem konwekcyjnym.

- VI. Wyniki przeprowadzonych badań nie potwierdziły korzystnego wpływu ultradźwięków na zwiększenie ekstrakcji antocyjanów ze skórki owoców jagody kamczackiej w przypadku produkcji przecieru, jednak nie stwierdzono ich degradacji, co wskazuje na zachowanie stabilności tych związków.

Właściwości reologiczne i fizykochemiczne:

- VII. Wykazano, że zastosowanie homogenizacji ultradźwiękowej prowadzi do zmniejszenia rozmiaru cząstek fazy rozproszonej w mętym soku truskawkowym, co skutkuje poprawą stabilności fizycznej układów koloidalnych oraz ograniczeniem sedimentacji.
- VIII. Efektywność homogenizacji ultradźwiękowej mętnego soku była porównywalna z homogenizacją wysokociśnieniową, co wskazuje na jej wysoki potencjał aplikacyjny jako alternatywnej metody stabilizacji soków mętnych.
- IX. Zastosowanie ultradźwięków w produkcji przecierów z truskawek i jagody kamczackiej prowadzi do istotnych zmian właściwości reologicznych, związanych z redukcją wielkości cząstek oraz modyfikacją zawartości pektyn, co przejawia się wzrostem lepkości pozornej oraz zmianą charakteru mikroreologicznego układu.
- X. Zmiany strukturalne wywołane działaniem ultradźwięków przekładają się na poprawę cech sensorycznych przecierów, w szczególności ich homogeniczności, co wskazuje na korzystny wpływ tej technologii na jakość produktu końcowego.

Wydajność procesów:

- XI. Zastosowanie ultradźwięków jako obróbki wstępnej pulpy owocowej przed tłoczeniem istotnie zwiększa wydajność pozyskiwania soku z wybranych owoców jagodowych, osiągając efekty porównywalne z maceracją enzymatyczną. Jednak skuteczność tej metody jest silnie zależna od gatunku i ograniczona w przypadku surowców o bardziej zwartej strukturze, takich jak czarna porzeczka, dla której wykazano brak możliwości zastąpienia maceracji enzymatycznej ultradźwiękami.

- XII. Zastosowanie ultradźwięków jako czynnika wspomagającego suszenie plastrów truskawek istotnie przyspiesza przebieg procesu, skracając czas suszenia o około 35% w porównaniu z suszeniem konwekcyjnym, co przekłada się na zwiększenie efektywności procesu oraz ograniczenie jego energochłonności.

Główne osiągnięcia:

- I. Jednym z najważniejszych osiągnięć pracy było wykazanie, że moment zastosowania ultradźwięków w schemacie technologicznym ma kluczowe znaczenie dla jakości produktu, przede wszystkim dla właściwości reologicznych przecieru.
- II. Osiągnięciem rozprawy doktorskiej jest wykazanie możliwości zastosowania technologii ultradźwiękowej jako efektywnego narzędzia wspomagającego procesy przetwórstwa owoców jagodowych, prowadzącego do poprawy jakości, wartości funkcjonalnej oraz atrakcyjności rynkowej, a tym samym dostarczającego podstaw do optymalizacji procesów technologicznych o wysokim potencjale aplikacyjnym.

8. SPIS LITERATUREY

1. Polish Food; Kwartalnik ARiMR i MRiRW, Nr 3/2024; ISSN 1232-9541. Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa: Warszawa, Polska, 2024.
2. *Key Figures on the European Food Chain – 2023 Edition*; 2023; ISBN 978-92-68-07811-2.
3. FAOSTAT Available online: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QV> (accessed on 16 January 2026).
4. Fahn, A. (1974). *Plant Anatomy*. Oxford–New York Pergamon Press.
5. Fruit: Structure and Types | Research Starters | EBSCO Research Available online: <https://www.ebsco.com> (accessed on 16 January 2026).
6. Aguilera, J.M. Berries as Foods: Processing, Products, and Health Implications. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* **2024**, *15*, 1–26, doi:10.1146/annurev-food-072023-034248.
7. Quideau, S.; Deffieux, D.; Douat-Casassus, C.; Pouységu, L. Plant Polyphenols: Chemical Properties, Biological Activities, and Synthesis. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 586–621, doi:10.1002/anie.201000044.
8. Sun, C.; Zhao, C.; Guven, E.C.; Paoli, P.; Simal-Gandara, J.; Ramkumar, K.M.; Wang, S.; Buleu, F.; Pah, A.; Turi, V.; et al. Dietary Polyphenols as Antidiabetic Agents: Advances and Opportunities. *Food Front.* **2020**, *1*, 18–44, doi:10.1002/fft2.15.
9. Intharuksa, A.; Kuljarusnont, S.; Sasaki, Y.; Tungmunnithum, D. Flavonoids and Other Polyphenols: Bioactive Molecules from Traditional Medicine Recipes/Medicinal Plants and Their Potential for Phytopharmaceutical and Medical Application. *Molecules* **2024**, *29*, 5760, doi:10.3390/molecules29235760.
10. Santos-Buelga, C. Polyphenols and Human Beings: From Epidemiology to Molecular Targets. *Molecules* **2021**, *26*, 4218, doi:10.3390/molecules26144218.
11. Golovinskaia, O.; Wang, C.-K. Review of Functional and Pharmacological Activities of Berries. *Molecules* **2021**, *26*, 3904, doi:10.3390/molecules26133904.
12. Rudrapal, M.; Khairnar, S.J.; Khan, J.; Dukhyil, A.B.; Ansari, M.A.; Alomary, M.N.; Alshabrmi, F.M.; Palai, S.; Deb, P.K.; Devi, R. Dietary Polyphenols and Their Role in Oxidative Stress-Induced Human Diseases: Insights Into Protective Effects, Antioxidant Potentials and Mechanism(s) of Action. *Front. Pharmacol.* **2022**, *13*, 806470, doi:10.3389/fphar.2022.806470.
13. Rana, A.; Samtiya, M.; Dhewa, T.; Mishra, V.; Aluko, R.E. Health Benefits of Polyphenols: A Concise Review. *J. Food Biochem.* **2022**, *46*, e14264, doi:10.1111/jfbc.14264.
14. Rudrapal, M.; Rakshit, G.; Singh, R.P.; Garse, S.; Khan, J.; Chakraborty, S. Dietary Polyphenols: Review on Chemistry/Sources, Bioavailability/Metabolism, Antioxidant Effects, and Their Role in Disease Management. *Antioxidants* **2024**, *13*, 429, doi:10.3390/antiox13040429.
15. Cheng, B.; Feng, H.; Li, C.; Jia, F.; Zhang, X. The Mutual Effect of Dietary Fiber and Polyphenol on Gut Microbiota: Implications for the Metabolic and Microbial Modulation and Associated Health Benefits. *Carbohydr. Polym.* **2025**, *358*, 123541, doi:10.1016/j.carbpol.2025.123541.
16. Del Bo', C.; Bernardi, S.; Marino, M.; Porrini, M.; Tucci, M.; Guglielmetti, S.; Cherubini, A.; Carrieri, B.; Kirkup, B.; Kroon, P.; et al. Systematic Review on Polyphenol Intake and Health outcomes: Is There Sufficient Evidence to Define a Health-Promoting Polyphenol-Rich Dietary Pattern? *Nutrients* **2019**, *11*, 1355, doi:10.3390/nu11061355.
17. Scalbert, A.; Manach, C.; Morand, C.; Rémésy, C.; Jiménez, L. Dietary Polyphenols and the Prevention of Diseases. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2005**, *45*, 287–306, doi:10.1080/1040869059096.
18. Wu, X.; Beecher, G.R.; Holden, J.M.; Haytowitz, D.B.; Gebhardt, S.E.; Prior, R.L. Concentrations of Anthocyanins in Common Foods in the United States and

- Estimation of Normal Consumption. *J. Agric. Food Chem.* **2006**, *54*, 4069–4075, doi:10.1021/jf060300l.
19. Gertig, H.; Przysławski, J. *Bromatologia: Zarys Nauki o Żywności i Żywieniu*; Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2015;
 20. Cortez, R.E.; Gonzalez de Mejia, E. Blackcurrants (*Ribes Nigrum*): A Review on Chemistry, Processing, and Health Benefits. *J. Food Sci.* **2019**, *84*, 2387–2401, doi:10.1111/1750-3841.14781.
 21. Djordjević, B.; Šavikin, K.; Zdunić, G.; Janković, T.; Vulić, T.; Pljevljakušić, D.; Oparnica, C. Biochemical Properties of the Fresh and Frozen Black Currants and Juices. *J. Med. Food* **2013**, *16*, 73–81, doi:10.1089/jmf.2011.0256.
 22. Dhingra, D.; Michael, M.; Rajput, H.; Patil, R.T. Dietary Fibre in Foods: A Review. *J. Food Sci. Technol.* **2012**, *49*, 255–266, doi:10.1007/s13197-011-0365-5.
 23. Turner, N.D.; Lupton, J.R. Dietary Fiber1. *Adv. Nutr.* **2011**, *2*, 151–152, doi:10.3945/an.110.000281.
 24. Yang, M.; Cai, C.; Yang, Z.; Wang, X.; Li, G.; Li, J.; Liu, J.; Zhang, Z. Effect of Dietary Fibre on Cognitive Function and Mental Health in Children and Adolescents: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Food Funct.* **2024**, *15*, 8618–8628, doi:10.1039/d4fo02221a.
 25. Carlsen, H.; Pajari, A.-M. Dietary Fiber – a Scoping Review for Nordic Nutrition Recommendations 2023. *Food Nutr. Res.* **2023**, *67*, 10.29219/fnr.v67.9979, doi:10.29219/fnr.v67.9979.
 26. Reynolds, A.; Mann, J.; Cummings, J.; Winter, N.; Mete, E.; Morenga, L.T. Carbohydrate Quality and Human Health: A Series of Systematic Reviews and Meta-Analyses. *The Lancet* **2019**, *393*, 434–445, doi:10.1016/S0140-6736(18)31809-9.
 27. Wikiera, A.; Irla, M.; Mika, M. Health-promoting properties of pectin. *Postępy Hig. Med. Dośw.* **2014**, *68*, 590–596, doi:10.5604/17322693.1102342.
 28. Pijanowski, E.; Dłużewski, M.; Dłużewska, A. *Ogólna Technologia Żywności*; Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1984;
 29. Xiang, T.; Yang, R.; Li, L.; Lin, H.; Kai, G. Research Progress and Application of Pectin: A Review. *J. Food Sci.* **2024**, *89*, 6985–7007, doi:10.1111/1750-3841.17438.
 30. European Commission. Joint Research Centre. *Fruit and Vegetables Producer Organisations: Some Insights on Their Functioning Based on Data from Poland*; Publications Office: LU, 2018;
 31. Pateiro, M.; Vargas-Ramella, M.; Franco, D.; Gomes Da Cruz, A.; Zengin, G.; Kumar, M.; Dhama, K.; Lorenzo, J.M. The Role of Emerging Technologies in the Dehydration of Berries: Quality, Bioactive Compounds, and Shelf Life. *Food Chem. X* **2022**, *16*, 100465, doi:10.1016/j.fochx.2022.100465.
 32. International Nut and Dried Fruit Council Foundation (INC). Nuts & Dried Fruits Statistical Yearbook 2019/2020; INC: Reus, Spain, 2020. Available Online: https://inc.nutfruit.org/WpContent/Uploads/2021/09/1594640174_INC_Statistical_Yearbook_2019-2020.Pdf (Accessed 16 March 2026).
 33. Farahnaky, A.; Majzoobi, M.; Gavahian, M. Emerging Non-Thermal Food Processing Technologies: Editorial Overview. *Foods* **2022**, *11*, doi:10.3390/foods11071003.
 34. Gazda, P.; Glibowski, P. Advanced Technologies in Food Processing—Development Perspective. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 3617, doi:10.3390/app14093617.
 35. NDT Resource Center. Couplant. Available Online: <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/EquipmentTrans/Couplant.Xhtml> (Accessed 16 March 2026).
 36. Mckernan, N. Ultrasonic Transducers Explained: Your Ultimate Guide for Technology. *NDT Prod.* 2024.
 37. Poggi, C.; Palavecino, M. Ultrasound Principles and Instrumentation. *Surg. Open Sci.* **2024**, *18*, 123–128, doi:10.1016/j.sopen.2024.02.005.
 38. Banaszak J. - Metody akustyczne w badaniach inżynierskich - Pobierz pdf z Docer.pl Available online: <https://docer.pl/doc/n0x8n1c> (accessed on 21 January 2026).

39. Prempeh, N.Y.A.; Nunekpeku, X.; Murugesan, A.; Li, H. Ultrasound in the Food Industry: Mechanisms and Applications for Non-Invasive Texture and Quality Analysis. *Foods* **2025**, *14*, 2057, doi:10.3390/foods14122057.
40. Gevari, M.T.; Abbasiasl, T.; Niazi, S.; Ghorbani, M.; Koşar, A. Direct and Indirect Thermal Applications of Hydrodynamic and Acoustic Cavitation: A Review. *Appl. Therm. Eng.* **2020**, *171*, 115065, doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115065.
41. Taha, A.; Mehany, T.; Pandiselvam, R.; Anusha Siddiqui, S.; Mir, N.A.; Malik, M.A.; Sujayasree, O.J.; Alamuru, K.C.; Khanashyam, A.C.; Casanova, F.; et al. Sonoprocessing: Mechanisms and Recent Applications of Power Ultrasound in Food. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2024**, *64*, 6016–6054, doi:10.1080/10408398.2022.2161464.
42. Kumar, K.; Srivastav, S.; Sharanagat, V.S. Ultrasound Assisted Extraction (UAE) of Bioactive Compounds from Fruit and Vegetable Processing by-Products: A Review. *Ultrason. Sonochem.* **2020**, *70*, 105325, doi:10.1016/j.ultsonch.2020.105325.
43. Kohno, M.; Mokudai, T.; Ozawa, T.; Niwano, Y. Free Radical Formation from Sonolysis of Water in the Presence of Different Gases. *J. Clin. Biochem. Nutr.* **2011**, *49*, 96–101, doi:10.3164/jcfn.10-130.
44. Bhargava, N.; Mor, R.S.; Kumar, K.; Sharanagat, V.S. Advances in Application of Ultrasound in Food Processing: A Review. *Ultrason. Sonochem.* **2020**, *70*, 105293, doi:10.1016/j.ultsonch.2020.105293.
45. Aktı, N.; Yildiz, S. Exploring Ultrasound-Induced Free Radical Formation: A Comparative Study in Water and Sour Cherry Juice Using Glutathione and Terephthalic Acid Indicators. *Ultrason. Sonochem.* **2025**, *112*, 107193, doi:10.1016/j.ultsonch.2024.107193.
46. Chemat, F.; Rombaut, N.; Sicaire, A.-G.; Meullemiestre, A.; Fabiano-Tixier, A.-S.; Abert-Vian, M. Ultrasound Assisted Extraction of Food and Natural Products. Mechanisms, Techniques, Combinations, Protocols and Applications. A Review. *Ultrason. Sonochem.* **2017**, *34*, 540–560, doi:10.1016/j.ultsonch.2016.06.035.
47. Huang, D.; Men, K.; Li, D.; Wen, T.; Gong, Z.; Sunden, B.; Wu, Z. Application of Ultrasound Technology in the Drying of Food Products. *Ultrason. Sonochem.* **2020**, *63*, 104950, doi:10.1016/j.ultsonch.2019.104950.
48. Chavan, P.; Sharma, P.; Sharma, S.R.; Mittal, T.C.; Jaiswal, A.K. Application of High-Intensity Ultrasound to Improve Food Processing Efficiency: A Review. *Foods* **2022**, *11*, 122, doi:10.3390/foods1110122.
49. Wu, Y.; Liu, Y.; Jia, Y.; Feng, C.-H.; Zhang, H.; Ren, F.; Zhao, G. Effects of Thermal Processing on Natural Antioxidants in Fruits and Vegetables. *Food Res. Int.* **2024**, *192*, 114797, doi:10.1016/j.foodres.2024.114797.
50. Narra, F.; Piragine, E.; Benedetti, G.; Ceccanti, C.; Florio, M.; Spezzini, J.; Troisi, F.; Giovannoni, R.; Martelli, A.; Guidi, L. Impact of Thermal Processing on Polyphenols, Carotenoids, Glucosinolates, and Ascorbic Acid in Fruit and Vegetables and Their Cardiovascular Benefits. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **2024**, *23*, e13426, doi:10.1111/1541-4337.13426.
51. Roobab, U.; Abida, A.; Madni, G.M.; Ranjha, M.M.A.N.; Zeng, X.-A.; Mousavi Khaneghah, A.; Aadil, R.M. An Updated Overview of Ultrasound-Based Interventions on Bioactive Compounds and Quality of Fruit Juices. *J. Agric. Food Res.* **2023**, *14*, 100864, doi:10.1016/j.jafr.2023.100864.
52. Jadhav, H.B.; Annapure, U.S.; Deshmukh, R.R. Non-Thermal Technologies for Food Processing. *Front. Nutr.* **2021**, *8*, 657090, doi:10.3389/fnut.2021.657090.
53. Challana, V.; Kaimal, A.M.; Shirkole, S.; Sahoo, A.K. Comparative Analysis and Investigation of Ultrasonication on Juice Yield and Bioactive Compounds of Kinnow Fruit Using RSM and ANN Models. *Sci. Rep.* **2025**, *15*, 9859, doi:10.1038/s41598-025-94640-8.
54. Chen, L.; Chen, L.; Zhu, K.; Bi, X.; Xing, Y.; Che, Z. The Effect of High-Power Ultrasound on the Rheological Properties of Strawberry Pulp. *Ultrason. Sonochem.* **2020**, *67*, 105144, doi:10.1016/j.ultsonch.2020.105144.

55. Kuhn, W.L.; Hihn, J.-Y.; Solemslie, B.W.; Dahlhaug, O.G. Comparing and Combining Methods That Enhance Liquid–Gas Mass Transfer in a Batch Reactor: Ultrasonic Degassing, Aeration by Gas Bubbling, and Liquid Agitation. *Ultrason. Sonochem.* **2025**, *119*, 107389, doi:10.1016/j.ultsonch.2025.107389.
56. García-Torres, R.; Ponagandla, N.R.; Rouseff, R.L.; Goodrich-Schneider, R.M.; Reyes-De-Corcuera, J.I. Effects of Dissolved Oxygen in Fruit Juices and Methods of Removal. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **2009**, *8*, 409–423, doi:10.1111/j.1541-4337.2009.00090.x.
57. Lauteri, C.; Ferri, G.; Piccinini, A.; Pennisi, L.; Vergara, A. Ultrasound Technology as Inactivation Method for Foodborne Pathogens: A Review. *Foods* **2023**, *12*, 1212, doi:10.3390/foods12061212.
58. Sulaiman, A.; Farid, M.; Silva, F.V. Strawberry Puree Processed by Thermal, High Pressure, or Power Ultrasound: Process Energy Requirements and Quality Modeling during Storage. *Food Sci. Technol. Int.* **2017**, *23*, 293–309, doi:10.1177/1082013216685485.
59. Başlar, M.; Ertugay, M.F. The Effect of Ultrasound and Photosonication Treatment on Polyphenoloxidase (PPO) Activity, Total Phenolic Component and Colour of Apple Juice. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2013**, *48*, 886–892, doi:10.1111/ijfs.12015.
60. Evelyn; Silva, F.V.M. Inactivation of *Byssoschlamys Nivea* Ascospores in Strawberry Puree by High Pressure, Power Ultrasound and Thermal Processing. *Int. J. Food Microbiol.* **2015**, *214*, 129–136, doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2015.07.031.
61. Alex Martynenko, A.; Vieira, G.N.A. Sustainability of Drying Technologies: System Analysis. *Sustain. Food Technol.* **2023**, *1*, 629–640, doi:10.1039/D3FB00080J.
62. *Handbook of Industrial Drying*; Mujumdar, A.S., Ed.; 4th ed.; CRC Press: Boca Raton, 2014; ISBN 978-0-429-16976-2.
63. Baeghbali, V.; Niakousari, M.; Ngadi, M. An Update on Applications of Power Ultrasound in Drying Food: A Review. *J. Food Eng. Technol.* **2019**, *8*, 29–38, doi:10.32732/jfet.2019.8.1.29.
64. Sabarez, H.T.; Gallego-Juarez, J.A.; Riera, E. Ultrasonic-Assisted Convective Drying of Apple Slices. *Dry. Technol.* **2012**, *30*, 989–997, doi:10.1080/07373937.2012.677083.
65. Wu, J.; Zhang, L.; Fan, K. Recent Advances in Ultrasound-Coupled Drying for Improving the Quality of Fruits and Vegetables: A Review. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2022**, *57*, 5722–5731, doi:10.1111/ijfs.15935.
66. Kowalski, S.J.; Mierzwa, D.; Stasiak, M. Ultrasound-Assisted Convective Drying of Apples at Different Process Conditions. *Dry. Technol.* **2017**, *35*, 939–947, doi:10.1080/07373937.2016.1239631.
67. de la Fuente-Blanco, S.; Riera-Franco de Sarabia, E.; Acosta-Aparicio, V.M.; Blanco-Blanco, A.; Gallego-Juárez, J.A. Food Drying Process by Power Ultrasound. *Ultrasonics* **2006**, *44*, e523–e527, doi:10.1016/j.ultras.2006.05.181.
68. Fernandes, F.A.N.; Rodrigues, S.; García-Pérez, J.V.; Cárcel, J.A. Effects of Ultrasound-Assisted Air-Drying on Vitamins and Carotenoids of Cherry Tomatoes. *Dry. Technol.* **2016**, *34*, 986–996, doi:10.1080/07373937.2015.1090445.
69. Santacatalina, J.V.; Contreras, M.; Simal, S.; Cárcel, J.A.; Garcia-Perez, J.V. Impact of Applied Ultrasonic Power on the Low Temperature Drying of Apple. *Ultrason. Sonochem.* **2016**, *28*, 100–109, doi:10.1016/j.ultsonch.2015.06.027.
70. Musielak, G.; Mierzwa, D.; Kroehnke, J. Food Drying Enhancement by Ultrasound – A Review. *Trends Food Sci. Technol.* **2016**, *56*, 126–141, doi:10.1016/j.tifs.2016.08.003.
71. Clemente, G.; Sanjuán, N.; Cárcel, J.A.; Mulet, A. Influence of Temperature, Air Velocity, and Ultrasound Application on Drying Kinetics of Grape Seeds. *Dry. Technol.* **2014**, *32*, 68–76, doi:10.1080/07373937.2013.811592.
72. Han, H.; Wang, S.; Rakita, M.; Wang, Y.; Han, Q.; Xu, Q. Effect of Ultrasound-Assisted Extraction of Phenolic Compounds on the Characteristics of Walnut Shells. *Food Nutr. Sci.* **2018**, *9*, 1034–1045, doi:10.4236/fns.2018.98076.

73. Ribeiro, D.S.; Henrique, S.M.B.; Oliveira, L.S.; Macedo, G.A.; Fleuri, L.F. Enzymes in Juice Processing: A Review. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2010**, *45*, 635–641, doi:10.1111/j.1365-2621.2010.02177.x.
74. Wang, W.-D.; Xu, S.-Y.; Jin, M.-K. Effects of Different Maceration Enzymes on Yield, Clarity and Anthocyanin and Other Polyphenol Contents in Blackberry Juice. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2009**, *44*, 2342–2349, doi:10.1111/j.1365-2621.2007.01637.x.
75. Chen, J.; Du, J.; Li, M.; Li, C. Degradation Kinetics and Pathways of Red Raspberry Anthocyanins in Model and Juice Systems and Their Correlation with Color and Antioxidant Changes during Storage. *LWT* **2020**, *128*, 109448, doi:10.1016/j.lwt.2020.109448.
76. Zhu, D.; Shen, Y.; Wei, L.; Xu, L.; Cao, X.; Liu, H.; Li, J. Effect of Particle Size on the Stability and Flavor of Cloudy Apple Juice. *Food Chem.* **2020**, *328*, 126967, doi:10.1016/j.foodchem.2020.126967.
77. Genovese, D.B.; Lozano, J.E. Effect of Cloud Particle Characteristics on the Viscosity of Cloudy Apple Juice. *J. Food Sci.* **2000**, *65*, 641–645, doi:10.1111/j.1365-2621.2000.tb16065.x.
78. Deblais, A.; Hollander, E. den; Boucon, C.; Blok, A.E.; Veltkamp, B.; Voudouris, P.; Versluis, P.; Kim, H.-J.; Mellema, M.; Stieger, M.; et al. Predicting Thickness Perception of Liquid Food Products from Their Non-Newtonian Rheology. *Nat. Commun.* **2021**, *12*, 6328, doi:10.1038/s41467-021-26687-w.
79. Kowalski, S.J.; Pawłowski, A.; Szadzińska, J.; Łechtańska, J.; Stasiak, M. High Power Airborne Ultrasound Assist in Combined Drying of Raspberries. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2016**, *34*, 225–233, doi:10.1016/j.ifset.2016.02.006.
80. Schössler, K.; Thomas, T.; Knorr, D. Modification of Cell Structure and Mass Transfer in Potato Tissue by Contact Ultrasound. *Food Res. Int.* **2012**, *49*, 425–431, doi:10.1016/j.foodres.2012.07.027.
81. Chisari, M.; Barbagallo, R.N.; Spagna, G. Characterization of Polyphenol Oxidase and Peroxidase and Influence on Browning of Cold Stored Strawberry Fruit. *J. Agric. Food Chem.* **2007**, *55*, 3469–3476, doi:10.1021/jf063402k.
82. Deng, L.-Z.; Pan, Z.; Zhang, Q.; Liu, Z.-L.; Zhang, Y.; Meng, J.-S.; Gao, Z.-J.; Xiao, H.-W. Effects of Ripening Stage on Physicochemical Properties, Drying Kinetics, Pectin Polysaccharides Contents and Nanostructure of Apricots. *Carbohydr. Polym.* **2019**, *222*, 114980, doi:10.1016/j.carbpol.2019.114980.
83. Golmohamadi, A.; Moller, G.; Powers, J.; Nindo, C. Effect of Ultrasound Frequency on Antioxidant Activity, Total Phenolic and Anthocyanin Content of Red Raspberry Puree. *Ultrason. Sonochem.* **2013**, *20*, 1316–1323, doi:10.1016/j.ultsonch.2013.01.020.
84. Reay, D. Heat Recovery in the Food Industry. In *Handbook of Water and Energy Management in Food Processing*; Elsevier, 2008; pp. 544–569 ISBN 978-1-84569-195-0.

Załącznik 1

Publikacja 1

Piecko, J.; Mieszczakowska-Frać, M.; Celejewska, K.; Szwejda-Grzybowska, J. 2024. Impact of Ultrasound Pretreatment on Juice Yield and Bioactive Content in Juice Produced from Selected Berries Fruit. *Foods*, 13, 1231.
DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13081231>
Impact Factor: 5.1, MNiSW 100 pkt.

Article

Impact of Ultrasound Pretreatment on Juice Yield and Bioactive Content in Juice Produced from Selected Berries Fruit

Jan Piecko , Monika Mieszczakowska-Frać , Karolina Celejewska  and Justyna Szwejda-Grzybowska 

Fruit and Vegetable Storage and Processing Department, The National Institute of Horticultural Research, Konstytucji 3 Maja 1/3, 96-100 Skierniewice, Poland; monika.frac@inhort.pl (M.M.-F.); karolina.celejewska@inhort.pl (K.C.); justyna.grzybowska@inhort.pl (J.S.-G.)

* Correspondence: jan.piecko@inhort.pl

Abstract: The aim of the work was to investigate the effect of ultrasound application during juice pressing. The impact on pressing yield and extraction of bioactive compounds during production of juice from strawberry, blackcurrant and raspberry was evaluated. Juice pressing was carried out after four kinds of mash pretreatment. The tested objects were heated to 55 °C, treated by ultrasound, and/or macerated with an enzyme. The obtained juices were analyzed for the content of bioactive compounds and compared to the ‘Control’ sample, which was the juice pressed without any pretreatment. Although the results presented here do not conclusively show that enzymatic maceration can be completely replaced by the use of ultrasound, in the case of strawberry and raspberry fruit, juice yield after ultrasound treatment increased almost as much as after enzymatic maceration. Additionally, in the case of raspberry fruit, the antioxidant activity of the juice samples was definitely improved when ultrasound was used. The results from this experiment also showed that it is possible to separate the effect of temperature from the effect of mechanical and chemical actions in ultrasound treatment.

Keywords: ultrasound; strawberry; blackcurrant; raspberry; juice



Citation: Piecko, J.; Mieszczakowska-Frać, M.; Celejewska, K.; Szwejda-Grzybowska, J. Impact of Ultrasound Pretreatment on Juice Yield and Bioactive Content in Juice Produced from Selected Berries Fruit. *Foods* **2024**, *13*, 1231. <https://doi.org/10.3390/foods13081231>

Academic Editor: Bahar Aliakbarian

Received: 19 March 2024

Revised: 12 April 2024

Accepted: 16 April 2024

Published: 17 April 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

In addition to apples, of which Poland is one of the world’s largest producers, currants (6.0%), strawberries, and raspberries (6.0%) account for a significant share of total fruit production. Additionally, Poland is one of the largest producers of berry fruits in Europe [1]. In 2017, the combined yield of currants (blackcurrant and redcurrant), strawberries, and raspberries exceeded 400,000 tons, which accounted for 85% of the total berry fruit yield in Poland [2]. In detail, strawberry fruit accounted for 34%, blackcurrant fruit for 31%, while raspberry fruit accounted for 20% of the total crop production in 2018 [3]. The large scale of production translates into a large base of raw material available for processors, who are eager to use it. In some seasons, 68% of the strawberry harvest and as much as 78% of the raspberry harvest was allocated for processing [4]. Blackcurrant fruits are rarely consumed in their fresh form, but more often in liquid form, blended with other fruit juice, nectars, or other products, so it can be said that the entire harvest is directed for processing.

Berries are widely known for their positive effects on human health. Due to their low calorie (below 70 kcal), low fat (less than 0.5 g/100 g) [5], high dietary fiber content, presence of micronutrients and composition of phytochemicals—in particular anthocyanidins and vitamin C—berries occupy a very important place in the human diet. For example, blackcurrants have shown significant therapeutic potential in a number of conditions, confirmed by evidence from clinical trials. A review of the beneficial and therapeutic effects of blackcurrant consumption involves its effect on the brain, lungs, bones, kidneys, heart, and skin [6]. A similar feature applies to strawberries, the most widely consumed berry in Europe. Strawberries in clinical trials are considered in terms of their antioxidant, cardioprotective, anti-inflammatory, antihyperglycemic, antiobesity, anticancer, antimicrobial,

and neurodegenerative effects on human body [7]. Raspberries also contain a number of polyphenolic compounds with antioxidant properties, which play a significant role in reducing the risk of diseases, including chronic diseases, by mitigating the harmful effects of oxidative stress [8].

Sound waves at frequencies above 20 kHz are called ultrasound, and exhibit all the characteristic properties of sound waves except for the human ear's ability to perceive them. Depending on the frequency, ultrasound is divided into three categories: power ultrasound (20–100 kHz), high-frequency ultrasound (100 kHz–1 MHz) and diagnostic ultrasound (1–500 MHz). Ultrasounds in the range of frequency from 20 to 100 kHz have the ability to induce the phenomenon of cavitation, which involves the formation of gas bubbles. During the bubbles implosion, physical effects (microstreaming, microstreamers, microjets, and shock waves) and chemical reactions (sonolysis of water molecules and reactive oxygen species formation) can occur [9,10]. There are a large number of current and potential applications of ultrasound in food processing, the most common being cooking, freezing, drying, pickling, degassing, filtration, defoaming, emulsification, oxidation, and cutting [11]. The main advantage of using ultrasound-based technology is that it reduces the duration of the process, and improves the efficiency and hygiene of the process [12]. The use of ultrasound as an additional tool to inactivate microorganisms and enzymes in the preservation process is particularly beneficial [9,13]. It has also been shown that ultrasound has a synergistic effect on pectin hydrolyzing enzymes by modifying both the substrate structure and the enzyme itself, leading to more efficient pectin degradation [14], which is beneficial in juice production. Higher activities of pectin lyase and polygalacturonase after ultrasound application were observed, whereas in the case of pectin methylesterase, this ultrasound effect was not noticed. The degradation of pectin in the fruit mash before pressing is, in many cases, an unavoidable step to increase the efficiency of the process. On the other hand, pectin degradation products are released into the juice, increasing the fiber content and stabilizing anthocyanins in juice, which is also a desirable process in terms of the dietary value of the product [13]. Another potential direction of application is the ultrasound-assisted extraction of antioxidants from herbs or by-products of food production. Operating parameters of the devices used in the research work as ultrasonic amplitude, sonication time, extraction temperature and solvent-to-solid ratio are selected as crucial parameters for extraction optimization [15].

Despite numerous studies documenting great potential of ultrasound, there is no strong trend to replace traditional methods in favor of the ultrasound application, and compared to other emerging technologies, it is not the most frequently used [16]. It is pointed out that the main reason for such a situation is a poor understanding of ultrasound-based techniques and a commitment to tradition [12].

Keeping in mind the large scale of berry fruit production in Poland and the enormous health-promoting potential of blackcurrant, raspberry and strawberry, research aimed at increasing the transfer of bioactive compounds into juice seems meaningful. Ultrasound, considered a sustainable and environmentally friendly technology, is an interesting tool to achieve such a purpose. The research shows that, in selected cases, the use of technology based on the ultrasound treatment of mash before pressing the juice can replace enzymatic maceration, which shortens the process and can offer economic savings. Nowadays, it is a trend to produce fruit juices without using an enzymatic pre-treatment to maintain the highest possible level of fiber in the final product. However, depending on the kind of fruit, it can be difficult or even impossible to squeeze juice and omit enzymatic maceration. One of the possible solutions can be incorporating ultrasound into this process. The aim of this study was to compare the pressing efficiency and the content of bioactive compounds in juices produced with the ultrasound treatment of raw material from selected berries. Although ultrasound used in food processing is considered as a non-thermal method, the action of a high intensity sound waves causes an increase in temperature, which is sometimes overlooked. With the aim of separating the effect of temperature and ultrasound, an additional sample was included in the experiment where fruit pulp was heated to the

same temperature that the ultrasound generated after 10 min of exposure (55 °C-as the optimum temperature for the enzyme). The conducted experiment brings new data to the possibility of using ultrasound as a substitute for enzymatic maceration or as a complement to it in the case of raspberries, strawberries, and blackcurrant juice.

2. Materials and Methods

2.1. Plant Material

The fruit used in the study came from commercial cultivation and were purchased during the 2020 harvest season from local producers in central Poland. The experiment was conducted on 3 fruit species: strawberries (*Fragaria x ananassa* var. 'Florence'), red raspberries (*Rubus idaeus* var. 'Polka'), and blackcurrants (*Ribes nigrum* var. 'Tihope'). Immediately after being transported, the fruits were washed, sorted, and the stalks or other debris were removed and then cooled down to 2 °C. After that, the fruits were frozen and stored at −25 °C until processing.

2.2. Mash Treatment and Juice Pressing

The scheme of this experiment is presented in Figure 1. For each treatment, 200 g of fruit was crushed in a laboratory blender (Thermomix, Vorwerk, Wuppertal, Germany), after which fruit pulp was transferred to a glass beaker (250 mL). The 'Control' sample was pressed immediately. To consider the effect of temperature on juice quality, a 'Heated' sample was included in experiment. The 'Heated' sample was pressed after heating in the laboratory bath to 55 °C (an optimal temperature for the enzyme activity). The 'US' sample was pressed after sonication. The samples were treated in an ultrasonic homogenizer at a frequency of 20 KHz and 750 W power (Cole-Palmer Instrumental Company, VCX-750, Vernon Hills, IL, USA) with a 13 mm diameter probe. The ultrasonic processor operated with a constant amplitude of 80%. Ultrasonic processing was carried out for approximately 10 min and was terminated when the fruit pulp reached a temperature of 55 °C. During ultrasound treatment, fruit pulp was stirred to equalize ultrasound action throughout the beaker. This treatment was carried out by submerging the probe in a 250 mL glass beaker (height 9.5 cm, diameter 7.0 cm) and 200 mL of fruit mash was placed inside the beaker. The tip of the probe was submerged to half the depth of the beaker filling (3.0 cm). The 'US + E' sample was sonicated (ultrasound treatment procedure described above) and after enzyme addition, incubated in 55 °C for 1 h in a laboratory bath. The 'Heated + E' sample was pressed after mash heating in a laboratory bath to 55 °C, enzyme addition, and incubating in 55 °C for 1 h in a laboratory bath. When 'US + E' and 'Heated + E' samples are compared, the influence of ultrasound on enzymatic macerated fruit mash is considered. Different enzymes were used regarding the different fruit species. For strawberries and raspberries it was Pectinex® Ultra Passover (Novozymes, Glendale, CA, USA) and in the case of blackcurrants Pectinex® Ultra Color (Novozymes). The enzymatic treatment of the fruit was carried out with the chosen enzyme at a dose of 50 g/t. All samples were pressed for 15 min using the Instron 4303 texture analyzer, equipped with a special cylindrical container for juice pressing. The obtained juice was heated to 90 °C before chemical analysis in order to cut enzymatic reactions and microbiological spoilage. The experiment was conducted in three repetitions.

The pressing yield of the juice was calculated according to equation:

$$yield [\%] = \frac{weight\ of\ juice\ [g]}{weight\ of\ mash\ [g]} \times 100 \quad (1)$$

2.3. Chemical Analysis

2.3.1. Soluble Solids Content

The soluble solids content (°Bx) of juice samples was determined using the refractometric method and was carried out in three independent replicates (Mettler-Toledo,

refractometer type RE50, Schwerzenbach, Switzerland). The device is equipped with a system to stabilize the temperature of the sample during measurement to 20 °C.

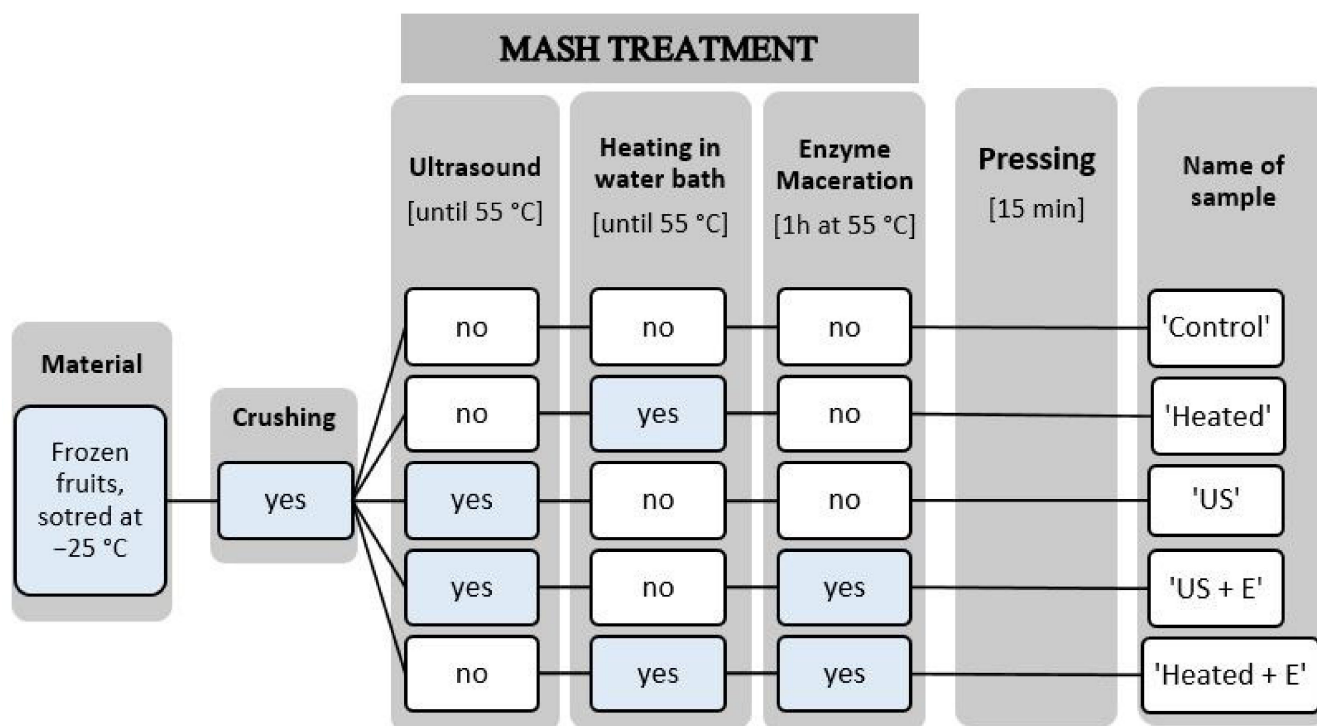


Figure 1. Scheme of the experiment.

2.3.2. HPLC Analysis of Polyphenols

A HPLC analysis of the phenolic compounds was performed according to the method described by Nielsen et al. [17] with some modifications using an Agilent 1200 series HPLC (Hewlett-Packard, Palo Alto, CA, USA) system equipped with a DAD detector. Separation was performed using a Phenomenex® Fusion RP column (250 mm × 4.6 mm; particle size 4 µm). The elution conditions were as follows: 1 mL min⁻¹, temperature 25 °C, wavelength: 280 nm (flavan-3-ols), 320 nm (phenolic acids), 360 nm (flavonol) and 520 nm (anthocyanins); mobile phase consisting of water: formic acid (95:5 (v/v)) (A), and acetonitrile (B) in gradient flow. The calculations of polyphenols were quantified by calibration with the standards of individual polyphenols. The polyphenol content was expressed in mg/100 mL of juice.

2.3.3. HPLC Analysis of L-Ascorbic, Malic and Citric Acid

The L-ascorbic, malic, and citric acid contents were determined using high-performance liquid chromatography (Agilent 1200 HPLC system, equipped with a DAD detector) using Supelcosil LC-18 column (250 mm × 4.6 mm; 5 µm) with a precolumn according to IFU procedures. A 1% phosphate-buffered solution KH₂PO₄, pH 2.5 was used as the mobile phase. The isocratic flow was 0.8 mL min⁻¹, at a temperature of 30 °C. The detection of L-ascorbic acid was performed by absorbance at 244 nm and 210 nm for malic and citric acid. The samples were homogenized in 6% HPO₃, and filtered through filter paper. The acids were quantified using a calibration curve for L-ascorbic, malic, and citric acids. The results were expressed as mg/100 mL of juice.

2.3.4. Antioxidant Activity

The antioxidant activity was determined according to Re et al. [18]. Free-radical scavenging activity was determined using the ABTS•+ radical cation. The sample (500 µL) was mixed with an ABTS•+ solution (5 mL). Next, the reaction was carried out for 6 min,

and the mixture was kept at room temperature in a dark place. Absorbance was measured at 734 nm using a spectrophotometer—the Cary 3E UV-Visible (Varian). At least four measurements were made for each sample at different concentrations to reduce the initial ABTS•+ solution absorbance from 20% to 80%. The linear regression method was applied to calculate the content of the sample, leading to a 50% decrease in the ABTS•+ solution absorbance, and recalculated to Trolox equivalents as mg per 100 mL of juice. The extract was prepared as follows: 10 mL of juice was mixed with 20 mL of 70% methanol and was then extracted for 10 min in an ultrasonic bath. The suspension was filtered through a Whatman No. 3 filter paper.

2.4. Statistical Analysis

The statistical analysis was performed with the use of STATISTICA 13 (Dell Inc., Tulsa, OK, USA). The HSD Tukey's test was selected for the comparison of the quality parameters of juices. The analysis of treatments ran as a completely randomized design and was conducted with one-way ANOVA. The means that comparison was performed at a significance level of $p < 0.05$.

3. Results and Discussion

3.1. Pressing Yield

Juice pressing yield is a parameter which reflects how much juice was obtained in relation to the amount of raw material taken for pressing. From the juice producers point of view, this is the most important parameter because the amount of juice obtained translates into the profitability of production. Each species included in the experiment behaved differently in terms of the effect of ultrasound treatment. In the case of raspberry fruit, the yield obtained in the 'Control' and 'Heated' juice samples gained 79.5% and 83.4%, respectively (Figure 2). Hence, the baseline pressing yield without any treatment was high, and heating the mash before pressing increased the pressing yield by only 3.9% compared to the 'Control'. The use of enzymatic maceration of raspberry mash ('Heated + E' sample) resulted in a 8.6% increase in the pressing yield, while when the mash was treated with ultrasound before maceration ('US + E' sample), a 9.6% increase was obtained compared to the 'Control'. Such results are in agreement with work comparing juice pressing efficiency, where the control juices from raspberry fruits (without maceration, heated to 50 °C) reached 75.0% yield. When enzymatic maceration was used, a yield of 84.9% was obtained [19]. When the juice was pressed immediately after ultrasound treatment 'US', the increase in pressing yield was comparable to the effect of enzyme maceration 'Heated + E', and increased by 5.8% compared to the 'Control'. Better results was observed in mulberry fruit as the juice yield after ultrasonic treatment increased by 27.0% compared to juice without mash treatment [20]. In the case of strawberry fruit, the observed results were quite different. In the case of the 'Control' and 'Heated' fruits, the pressing yields were low, and reached only 39.2% and 53.5%, respectively. Heating the strawberry mash caused a significant increase (by 14.3%) in the efficiency of the pressing process compared to the 'Control'. The use of enzyme maceration of strawberry mash 'Heated + E' caused a 56.5% increase in the yield. While the mash was treated with ultrasound before maceration 'US + E', a 53.5% increase was achieved when compared to the 'Control'. When the juice was pressed immediately after ultrasound treatment 'US', the increase in pressing yield was comparable to the effect of using enzyme maceration 'Heated + E' and amounted to 56.2% compared to the 'Control', and by 41.9% compared to the 'Heated' mash sample. In this case, ultrasonic treatment has equal efficacy in pectin degradation to that carried out with the enzymatic maceration of commercial products designed to treat berry mash before juice pressing. Sonication treatment replaced the effect of enzymatic maceration and enabled the juice to be pressed with profitable yield.

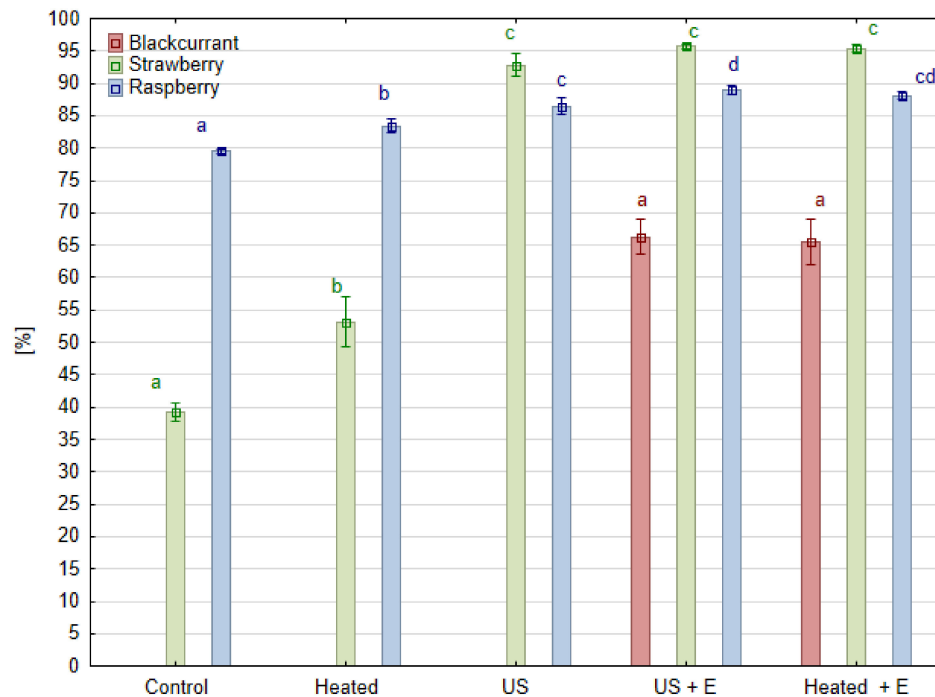


Figure 2. Juice yield (%) in different kinds of raspberry, strawberry, and blackcurrant mash treatment before pressing. Means, for one species, marked with the same letter in the same color do not differ significantly ($p = 0.05$) according to Tukey's test ($n = 3$).

Blackcurrant mash proved to be a much more difficult material to press and it was not possible to perform it after the 'Control' and 'Heated' pretreatment. This is in line with practice as enzyme preparations have been used in the juice processing industry since the 1930s [21]. During blackcurrant juice production, pectinolytic enzymes are indispensable for degrading pectins, which are released during mashing from the cell walls. In the case of blackberry fruit, similarly low yields were obtained by other authors when, before pressing, the mash was not subjected to enzymatic maceration. In one of these cases, the 'Control' juices (without maceration) had a low pressing yield of 37.6%. When maceration was used, juice yields varied, depending on the type of treatment before pressing, from 70.6% when the pulp was macerated immediately after heating to 50 °C and 70.4% when the mash was heated to 85 °C before maceration [19]. Even lower pressing yields were obtained in the experiment conducted on an industrial scale, where not subjecting the mash to enzymatic maceration allowed for obtaining only 31.0% of juice yield [22]. In our experimental design, heating the blackcurrant mash was not enough to make juice pressing possible. Treating the mash only with ultrasound also was not a sufficient processing method to allow for obtaining any amount of juice. The use of an enzyme maceration 'Heated + E' resulted in a pressing yield of 66.1%, while when the blackcurrant mash was treated with ultrasound before maceration 'US + E', a pressing yield of 67.7% was reached. Hence, in the case of blackcurrant, ultrasound treatment itself had no effect on the yield of juice. A similar effect on juice yield was obtained by other authors testing the ultrasound treatment in a laboratory bath over 5, 10, and 15 min. Regardless of the currant variety (black, red or white), the effect of the ultrasound treatment was insignificant [23]. In line with this statement, ultrasound treatment, enzymatic maceration, or heating showed no effect on juice yield of the *Berberis amurensis* Rupr. fruit mash [24]. However, from a study on similarly difficult to obtain banana juice, combining ultrasound with enzymatic maceration enabled a 17.3% higher yield in comparison to enzymatic maceration itself [25]. The increase in pressing efficiency after ultrasound mash treatment may be related to the reduction in viscosity caused by pectin degradation. Model studies of pectin solution indicate that ultrasonic treatment can reduce the viscosity of the solution to a level comparable to the

result of enzymatic maceration. This phenomenon is explained by a reduction in the number of agglomerates and changes in the particle structure, rather than a reduction in particle size, so the authors postulated that this treatment did not replace enzymatic maceration, but emphasized the synergistic effect of ultrasound and the activity of the pectin hydrolyzing enzyme [14].

3.2. Soluble Solids

The content of soluble solids is presented in Table 1. There were no statistical differences in the content of soluble solids in raspberry and blackcurrant juices, regardless of the kind of pretreatment. An increase in soluble solids was observed in strawberry juice after using a combination of ultrasound with enzymatic maceration ‘US + E’. The 4.0% increase, compared to the untreated ‘Control’, was presumably mainly due to the heating of fruit mash. Ultrasound applied without enzyme maceration had no effect, while the use of enzyme maceration (without ultrasound) increased soluble solid content by 3%, as did heating to 55 °C without ultrasound. Similar observations were noted on blueberry, blackcurrant, and raspberry fruit when the mash was heated to 50 °C and enzymatic maceration at this temperature was compared. The soluble solid content increased slightly for all three species [19]. Similar trends of total soluble solids content were observed, which ranged from 11.44 °Brix (for Control) to 11.95 °Brix when mulberry fruit mash was treated in an ultrasonic bath for 60 min [20]. In the case of banana mash treated with ultrasound, a significant increase in soluble solid content was shown only when the treatment was combined with enzymatic maceration [25].

Table 1. Soluble solids content [°Bx] in raspberry, strawberry, and blackcurrant juices obtained from differently treated mash.

Species	Sample–Mash Treatment				
	‘Control’	‘Heated’	‘US’	‘US + E’	‘Heated + E’
Raspberry	12.05 ± 0.26 a	12.04 ± 0.14 a	11.92 ± 0.37 a	11.89 ± 0.27 a	12.21 ± 0.24 a
Strawberry	7.25 ± 0.16 a	7.43 ± 0.05 ab	7.27 ± 0.19 a	7.54 ± 0.15 b	7.47 ± 0.08 ab
Blackcurrant	no juice	no juice	no juice	16.40 ± 0.09 a	16.50 ± 0.17 a

Means ± standard deviation; Means in the row marked with the same letter do not differ significantly ($p = 0.05$) according to Tukey’s test ($n = 3$).

Although ultrasound has great potential to improve extraction [9] it is not always applicable to the mash treatment process in juice production. In one example, in which three varieties of blackcurrant were used for the experiment, despite the fact that a small change was observed, the effect of ultrasound on the mash showed no trend [23]. Also, with regard to the effect of ultrasonic treatment of the juice, the impact on this parameter is not clear. In an experiment in which orange juice treated with different ultrasonic amplitude levels was used, no changes were shown in soluble solid content compared to the untreated ‘Control’ [26]. Consistent with this, treating grape juice with ultrasound, despite the long exposure time (90 min), did not change the content of the soluble solids [27]. On the other hand, treating carrot juice with ultrasound for 60 min allowed for the observation of an increase in the solubility of the sugar, and thus, an increase in soluble solid content [28].

3.3. Phenolic Compounds

The contents of the main classes of phenolic compounds for all samples tested are presented in Figures 3–5. In raspberry juice (Figure 3), the three classes of phenolic compounds were detected: phenolic acids, flavonols, and anthocyanins; in strawberry juice (Figure 4) four classes were marked: flavanols, phenolic acids, flavonols, and anthocyanins; in the case of blackcurrant juice (Figure 5) phenolic acids, flavonols, and anthocyanins were determined. Amongst the group of flavonoids, the most abundant subgroup found in berries fruit are anthocyanins, which dye their skin in intense colors. The results showed the posi-

tive effects of ultrasound application on this subgroup for raspberry juice, while no such relationship was observed for strawberry and blackcurrant juice. Table 2 shows the content of these compounds measured using the HPLC method in raspberry juice. In raspberry fruits treated with ultrasound before pressing ‘US’, and before enzyme maceration ‘US + E’, the content of these compounds increased compared to the untreated ‘Control’ by 40.3% and 34.2%, respectively. Anthocyanins in raspberry juice demonstrated interesting behavior upon ultrasound mash treatment. The content of cyanidin 3-sophoroside was more than ten times higher, while the content of cyanidin 3-rutinoside and cyanidin 3-glucosyl-rutinoside was almost ten times lower. Heating the mash without sonication did not affect the content of phenolic compounds, while enzymatic maceration slightly reduced their content compared to the ‘Control’. In this case, an effect of ultrasound was observed here, with no significant effect of temperature itself. Based on the results of this analysis, the content of cyanidin-3-sophoroside and cyanidin-3-glucoside increased after ultrasound treatment (‘US’ and ‘US + E’ samples) while cyanidin-3-glucosyl-rutinoside and cyanidin 3-rutinoside were negatively affected by ultrasound treatment. The content of cyanidin-3-sophoroside, compared to the ‘Control’ samples of raspberry juice, increased by 91.3% when ultrasound was applied before maceration ‘US + E’, while it increased by 102.9% when juice was pressed immediately after US treatment. In the case of cyanidin-3-glucoside, the content increased by 35% in ‘US + E’ sample, while it increased by 40.9% for ‘US’ juice. The different level of retention of individual anthocyanins is related to the fact that the stability of compound is influenced by its chemical structure [29].

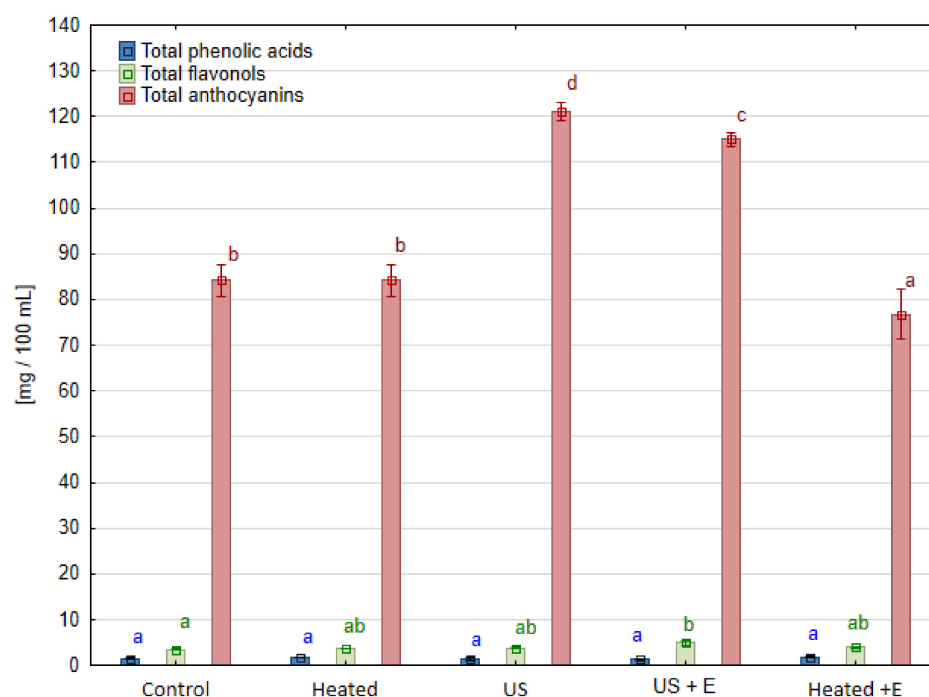


Figure 3. Phenolic compounds groups in raspberry juice obtained using different mash treatment. Means, for each phenolic group, marked with the same letter in the same color do not differ significantly ($p = 0.05$) according to Tukey’s test ($n = 3$).

The phenomenon observed in our research indicates the influence of US on the structure of the anthocyanin molecule. We hypothesize that ultrasound waves cause the rhamnose molecule to disconnect from cyanidin-3-rutinoside, transforming it into cyanidin-3-glucoside. However, in the case of the anthocyanin cyanidin-3-glucosyl-rutinoside, which contains two sugars: glucose and rutinose (α -L-rhamnosyl-glucoside), under the influence of US, rhamnose is also disjoined. In this way, anthocyanin containing two glucose molecules, i.e., sophoroside disaccharide, is formed, which is observed as increasing the content of sophoroside cyanidin.

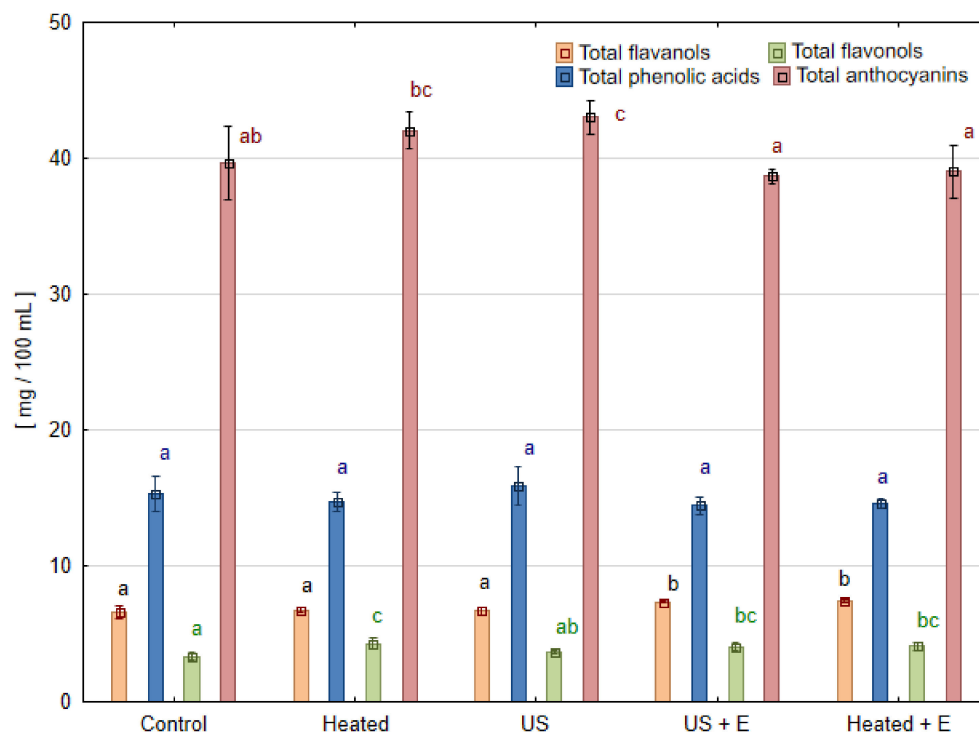


Figure 4. Phenolic compound groups in strawberry juice obtained after different mash treatment. Means, for each phenolic group, marked with the same letter in the same color do not differ significantly ($p = 0.05$) according to Tukey's test ($n = 3$).

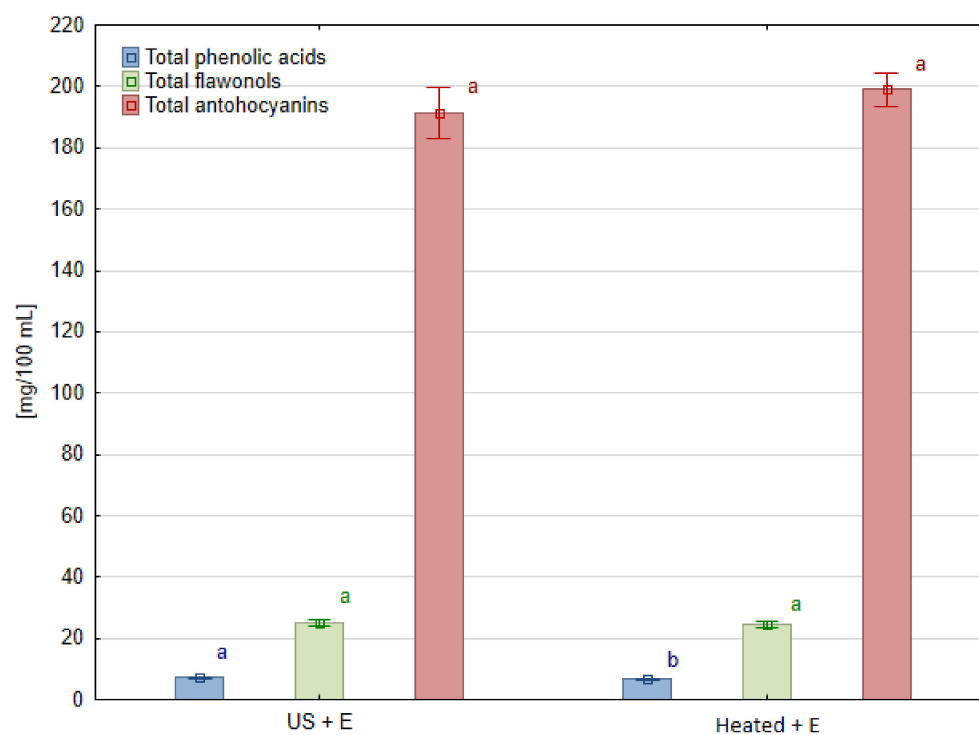


Figure 5. Phenolic compound groups in blackcurrant juice pressed after different mash treatment. Means, for each phenolic group, marked with the same letter in the same color do not differ significantly ($p = 0.05$) according to Tukey's test ($n = 3$).

Table 2. Contents of phenolic compounds (mg/100 mL) in raspberry juices obtained in different mash treatment.

	Sample	Control	Heated	US	US + E	Heated + E
PHENOLIC ACIDS	Chlorogenic acid derivative A	0.72 ± 0.03 a	0.73 ± 0.05 a	0.72 ± 0.07 ab	0.68 ± 0.04 a	0.82 ± 0.09 b
	Chlorogenic acid derivative B	0.80 ± 0.23 a	0.91 ± 0.07 a	0.64 ± 0.29 a	0.68 ± 0.14 a	0.93 ± 0.11 a
	Ellagic acid	11.05 ± 0.89 a	9.98 ± 0.96 a	14.32 ± 0.81 b	13.92 ± 1.13 b	12.72 ± 1.30 ab
FLAVONOLS	Quercetin derivative	0.32 ± 0.07 a	0.39 ± 0.03 a	0.32 ± 0.08 a	0.33 ± 0.05 a	0.41 ± 0.02 a
	Quercetin-rutinoside	0.47 ± 0.09 a	0.54 ± 0.06 ab	0.61 ± 0.07 b	0.88 ± 0.07 c	0.66 ± 0.02 b
	Quercetin-galactoside	0.39 ± 0.30 a	0.64 ± 0.05 a	0.23 ± 0.36 a	0.39 ± 0.48 a	0.68 ± 0.12 a
	Quercetin-glucoside	2.26 ± 0.25 a	2.15 ± 0.07 a	2.53 ± 0.33 a	2.6 ± 0.29 a	2.14 ± 0.11 a
ANTHOCYANINS	Cyanidin 3-sophoroside	51.06 ± 4.97 a	50.58 ± 4.66 a	103.58 ± 1.34 b	97.66 ± 1.24 b	43.24 ± 7.6 a
	Cyanidin 3-glucosyl-rutinoside	12.79 ± 0.94 b	12.61 ± 1.14 b	0.57 ± 0.21 a	0.66 ± 0.18 a	13.01 ± 1.43 b
	Cyanidin 3-glucoside	11.92 ± 0.31 a	12.52 ± 0.68 a	16.80 ± 0.65 b	16.09 ± 0.29 b	11.73 ± 0.78 a
	Cyanidin 3-rutinoside	8.41 ± 0.80 b	8.45 ± 0.90 b	0.26 ± 0.40 a	0.57 ± 0.14 a	8.82 ± 1.56 b ¹

¹ Means ± standard deviation; Means in the row marked with the same letter do not differ significantly ($p = 0.05$) according to Tukey's test ($n = 3$).

Moreover, the stability of anthocyanins in juice depends on many factors: temperature, the pH of the medium, access to light, the presence of oxygen, ascorbic acid, sugars, metal ions and enzyme activity [30]. Differences in anthocyanin stability were found depending on the medium or storage and processing conditions. For example, heating pomegranate juice at 90 °C for 5 h resulted in 76–87% loss of total anthocyanin [31], while when blueberry juice was heated to 100 °C, 32% anthocyanin degradation was observed after 20 min [32].

A significant impact of ultrasonic waves was also observed in the case of the content of ellagic acid in the tested raspberry juices (Table 2). Juices obtained from fruits treated with ultrasound ('US + E' and 'US') had 26–30% more ellagic acid than the 'Control' sample. The opposite effect was observed under heating alone ('Heated' sample), where the ellagic acid content was lower than in the control sample, about 10%.

Due to the higher content of pelargonidin-3-glucoside, cyanidin-3-glucoside, cyanidin 3-malonylglucoside, and pelargonidin 3-(6''-malonylglucoside) in strawberry juices pressed immediately after US treatment 'US' (Table 3), the total content of anthocyanins was higher compared to the 'Control' (Figure 4). The juice sample pressed immediately after ultrasound treatment ('US') showed a 19.7% increase in cyanidin-3-glucoside content and a 14.9% increase in pelargonidin-3-(6''-malonylglucoside) content when compared to the 'Control'. However, the content of these compounds in the 'US' sample was not significantly different from juice pressed after heating the 'Heated' sample, so it can be concluded that it was the temperature that mattered in the extraction of these compounds. Pelargonidin-3-glucoside, as the most abundantly present anthocyanins in strawberry juice, turned out to be stable regardless of ultrasound treatment or enzymatic maceration. The opposite behavior was seen in that of cyanidin-3-glucoside, which increased in all samples compared to the 'Control'. Pelargonidin-3-(6''-malonylglucoside) retention was different, increasing only in samples without maceration while ultrasound treatment had no effect on its content compared to the 'Control'.

Studying these results, it is possible to track down a slightly positive effect of the application of ultrasound on quercetin derivatives (A, B, C), but it is not enough to be significant for the total content of flavonols. What is more, the concentration of these compounds in the juice was very low (3–5 mg/100 mL). A much greater effect was observed in the study where the anthocyanin content of blackberry juice was investigated. In the samples produced with enzymatic maceration, up to 64.0% more of these compounds were recorded than in juice obtained without maceration [22].

Table 3. Contents of phenolic compounds (mg/100 mL) in strawberry juices pressed after different mash treatment.

	Sample	Control	Heated	US	US + E	Heated + E
FLAVANOLS	Procyanidin dimer B1	1.37 ± 0.05 a	1.64 ± 0.08 b	1.66 ± 0.27 b	1.80 ± 0.04 bc	1.90 ± 0.05 c
	Catechin	5.19 ± 0.43 abc	5.11 ± 0.17 ab	5.02 ± 0.17 a	5.52 ± 0.06 c	5.49 ± 0.09 bc
PHENOLIC ACIDS	Chlorogenic acid derivatives	15.26 ± 1.28 a	14.74 ± 0.71 a	15.94 ± 1.40 a	14.43 ± 0.69 a	14.64 ± 0.36 a
FLAVONOLS	Quercetin derivative A	0.17 ± 0.02 a	0.26 ± 0.04 b	0.27 ± 0.07 b	0.30 ± 0.01 b	0.28 ± 0.01 b
	Quercetin-3-rutinoside	1.61 ± 0.18 a	2.05 ± 0.21 b	1.60 ± 0.01 a	1.90 ± 0.24 ab	2.01 ± 0.20 b
	Quercetin-3-glucoside	0.11 ± 0.01 a	0.25 ± 0.32 a	0.11 ± 0.01 a	0.12 ± 0.01 a	0.11 ± 0.01 a
	Quercetin derivative B	0.27 ± 0.03 a	0.36 ± 0.02 bc	0.35 ± 0.05 b	0.40 ± 0.00 c	0.37 ± 0.02 bc
	Quercetin derivative C	0.11 ± 0.01 a	0.13 ± 0.01 b	0.13 ± 0.00 b	0.11 ± 0.00 a	0.11 ± 0.00 a
	Kaempferol-3-rutinoside	0.85 ± 0.05 a	0.95 ± 0.05 b	0.90 ± 0.03 ab	0.95 ± 0.06 b	0.96 ± 0.05 b
	Quercetin derivative D	0.24 ± 0.02 a	0.27 ± 0.01 b	0.27 ± 0.01 b	0.26 ± 0.01 ab	0.26 ± 0.01 ab
ANTHOCYANINS	Cyanidin-3-glucoside	2.03 ± 0.21 a	2.29 ± 0.06 ab	2.43 ± 0.28 b	2.35 ± 0.23 ab	2.31 ± 0.14 ab
	Pelargonidin-3-glucoside	32.82 ± 2.03 ab	34.34 ± 0.95 b	35.04 ± 0.95 b	31.62 ± 0.48 a	31.93 ± 1.66 a
	Pelargonidin-3-rutinoside	0.06 ± 0.05 a	0.08 ± 0.06 a	0.08 ± 0.01 a	0.06 ± 0.04 a	0.08 ± 0.01 a
	Cyanidin-3-malonylglucoside	0.25 ± 0.03 a	0.30 ± 0.01 bc	0.31 ± 0.01 c	0.28 ± 0.02 ab	0.28 ± 0.02 ab
	Pelargonidin-3-(6''-malonylglucoside)	4.51 ± 0.64 ab	5.04 ± 0.33 bc	5.18 ± 0.03 c	4.37 ± 0.06 a	4.42 ± 0.29 a ¹

¹ Means ± standard deviation; Means in the row marked with the same letter do not differ significantly ($p = 0.05$) according to Tukey's test ($n = 3$).

The contents of phenolic compounds in blackcurrant juices measured using the HPLC method are shown in Table 4. In the case of this fruit species, only methods of treatment containing enzymatic maceration allowed us to obtain juice samples, so the results concern only two experimental combinations: 'US + E' and 'Heated + E'. Particular anthocyanins, regardless of the treatment method used, were not statistically different, except for delphinidin 3-glucoside. Its content was lower in juice obtained after ultrasound treatment 'US + E' than in heated one 'Heated + E'. However, the total content of anthocyanins and flavonols did not differ (Figure 5). Overlooking the insignificant changes in most of the detected phenolic compounds, it can be noted that by replacing the heating of blackcurrant fruit mash with ultrasound treatment, 8.3% more quercetin-3-glucoside can be extracted into juice. Also, a 6.5% increase in the content of phenolic acids (chlorogenic acid derivatives) was observed in the 'US + E' juice compared to 'Heated + E' treatment.

Differences in the content of individual compounds after ultrasound treatment are also reported by other authors. For example, in a study where sonication was carried out in a laboratory bath, the total phenolic content increased by 8.0% after 5 min and 16.0% after 10 min of blackcurrant mash exposure. However, in the same study, anthocyanins content showed no change after ultrasound treatment [23]. The opposite results were obtained in the case of *Berberis amurensis* juice, where the total anthocyanin content increased by 67.3% when the mash was treated with ultrasound, compared to the juice obtained from the untreated sample. Specifically, an increase in anthocyanin content was associated with the content of peonidin-3-glucoside. However, the total content of phenolic compounds from the untreated mash was equal to that of the juice from the ultrasonically treated mash, while heating or enzymatic maceration of mash led to a 25% increase [24].

Very interesting results were obtained by using ultrasound in aqueous extraction from the solid parts of the fruit. Authors have provided evidence that, in the extraction of polyphenols from blackcurrant seeds and pomace, there is no need to use organic solvents when ultrasound was applied [21]. In an aqueous extraction solution, the propagation of ultrasound is much easier, and, therefore, the uniformity of the effect improves significantly. This phenomenon may be the reason for the lack of effectiveness in the treatment on dense substances such as blackcurrant fruit mash. It has also been noted that the content of some polyphenols can increase even when the juice is treated after squeezing, when the extraction efficiency of these compounds from the raw material is unrelated. This phenomenon is

explained by the release of cell wall-bound compounds that degrade during ultrasound-induced cavitation or the attachment of hydroxyl groups to phenolic rings [27].

Table 4. Contents of phenolic compounds (mg/100 mL) in blackcurrant juices obtained after different mash treatment.

	Sample	US + E	Heated + E
PHENOLIC ACIDS	Chlorogenic acid derivatives A	1.92 ± 0.06 b	1.79 ± 0.07 a
	Chlorogenic acid derivatives B	5.18 ± 0.16 b	4.90 ± 0.07 a
FLAVONOLS	unidentified flavonol B	10.09 ± 0.46 a	10.30 ± 0.48 a
	Quercetin-3-rutinoside	3.10 ± 0.08 a	3.03 ± 0.24 a
	Quercetin-3-galactoside	0.43 ± 0.05 a	0.41 ± 0.05 a
	Quercetin-3-glucoside	6.94 ± 0.26 b	6.41 ± 0.21 a
	Quercetin	0.13 ± 0.01 a	0.13 ± 0.02 a
ANTHOCYANINS	Delphinidin-3-glucoside	28.08 ± 1.28 a	29.45 ± 0.71 b
	Delphinidin-3-rutinoside	97.56 ± 4.56 a	101.19 ± 2.36 a
	Cyanidin-3-glucoside	8.53 ± 0.32 a	9.02 ± 0.49 a
	Cyanidin-3-rutinoside	52.75 ± 2.20 a	54.93 ± 1.83 a
	Peonidin-3-glucoside	2.19 ± 0.11 a	2.29 ± 0.04 a
	Peonidin-3-rutinoside	0.75 ± 0.04 a	0.77 ± 0.01 a ¹

¹ Means ± standard deviation. Means in the row marked with the same letter do not differ significantly. ($p = 0.05$) according to Tukey's test ($n = 3$).

3.4. Ascorbic, Malic, and Citric Acid

Table 5 shows the content of ascorbic, malic, and citric acids in the tested juices of the three berry species. Malic and citric acids are the main organic acids found in berry fruits [33]. Blackcurrant juices had the highest ascorbic acid content among the juices tested with an average value of 129 mg/100 mL. This is only slightly more than the content indicated by other authors studying ascorbic acid content in currant juices [23]. The ultrasound action during mash pretreatment did not affect the ascorbic acid content in the blackcurrant juice as it is shown in Table 5. A similar situation was observed in strawberry juice. The average content of ascorbic acid was 29.8 mg/100 mL, and individual treatments did not manifest any effect on ascorbic acid concentration. Raspberry juice contained the lowest amount of ascorbic acid among the samples tested, with an average value of 22.0 mg of ascorbic acid per 100 mL. At the same time, the type of mash treatment had the greatest impact on its content among tested fruit species. In the 'Control' juice sample, the ascorbic acid content was higher than in the other samples except from the 'Heated' juice where it was not statistically different. Ultrasound treatment 'US', as well as combined with maceration 'US + E' resulted in a slight reduction in ascorbic acid content. Maceration, in turn, ('Heated +E') resulted in the highest vitamin C decrease (17.2%) compared to the 'Control'. Ultrasound treatment 'US', as well as enzymatic maceration 'Heated + E', has a similar negative impact on ascorbic acid, decreasing its content by 14.2 and 14.9%, respectively.

A similar result was obtained by the authors comparing juice made with or without enzymatic maceration. In this case, maceration resulted in a 12.0% reduction in ascorbic acid content [22]. Several studies, however, indicated the positive effect of the ultrasound treatment on ascorbic acid content in juice. It is likely that this observation is due to the reduction in oxygen which can oxidize ascorbic acid. For example, vitamin C content of grapefruit juice significantly increased in a sonicated juice sample, compared to the untreated 'Control'. A 90 min ultrasound treatment of the juice resulted in an almost 30% increase in ascorbic acid content [27]. In this case, the only reason explaining this result may have been the inhibition of degradation. In another study, where white currant mash

was treated by ultrasound for 5 min, an increase in the content of vitamin C by 58% was recorded [23]. An even stronger effect was observed in mulberry juice, where the ascorbic acid content after 60 min of ultrasonic treatment increased by 73%, compared to juice obtained without mash treatment [20]. However, the effect of ultrasound mash treatment on the ascorbic acid content in fruit juices is not yet clear, and the results are inconsistent. For example, a study conducted on strawberry mash found a 20% decrease in ascorbic acid content in the juice after mash treatment with ultrasound in 50 °C [34]. An interesting look at the ascorbic acid content of the juices tested is their ability to meet the recommended daily intake (RDI). Because each juice has a different content of this vitamin, it should be considered separately. The RDI for ascorbic acid for people living around the world varies significantly depending on state regulations and ranges from 40 to 200 mg/day [35]. In the European Union, the RDI for ascorbic acid is different for each gender: 95 for women and 110 mg/day for man [36]. Considering the average RDI for both genders (102.5 mg/day), about 470 mL of raspberry juice, 345 mL of strawberry juice, and only 80 mL of blackcurrant juice must be consumed daily to meet the RDI for ascorbic acid.

Table 5. Contents of organic acids (mg/100 mL) in juices after different mash treatment.

Sample		Ascorbic Acid	Malic Acid	Citric Acid	Total
Raspberry	Control	24.57 ± 0.41 c	88.90 ± 5.00 b	2050 ± 58.00 a	2164 ± 56.00 a
	Heated	23.05 ± 1.07 bc	88.60 ± 7.80 b	2064 ± 59.00 a	2176 ± 63.00 a
	US	21.07 ± 1.47 ab	91.78 ± 6.30 b	1843 ± 201.00 a	1956 ± 196.00 a
	US + E	20.90 ± 0.86 ab	84.40 ± 9.80 a	1965 ± 95.00 a	2071 ± 86.00 a
	Heated + E	20.34 ± 0.71 a	82.10 ± 6.90 a	2054 ± 38.00 a	2160 ± 41.00 a
Strawberry	Control	33.12 ± 2.19 a	112.10 ± 27.70 ab	785.0 ± 71.00 a	931.0 ± 98.00 a
	Heated	29.86 ± 4.18 a	100.10 ± 16.20 ab	811.0 ± 39.00 a	941.0 ± 55.00 ab
	US	28.00 ± 3.34 a	90.30 ± 8.00 a	797.0 ± 12.00 a	915.0 ± 8.00 a
	US + E	29.58 ± 3.07 a	121.00 ± 12.50 b	888.0 ± 13.00 b	1038 ± 25.00 b
	Heated + E	28.47 ± 1.97 a	118.70 ± 19.50 ab	884.0 ± 33.00 b	1031 ± 56.00 b
Blackcurrant	Control	no juice	no juice	no juice	no juice
	Heated	no juice	no juice	no juice	no juice
	US	no juice	no juice	no juice	no juice
	US + E	129.00 ± 4.40 a	370.30 ± 30.40 a	4682 ± 97.00 a	5181 ± 110.0 a
	Heated + E	129.80 ± 1.90 a	401.80 ± 36.40 a	4718 ± 90.00 a	5250 ± 115.0 a ¹

¹ Means ± standard deviation. Means in the row marked with the same letter do not differ significantly ($p = 0.05$) according to Tukey's test ($n = 3$).

Blackcurrant juices appeared to contain the highest amount of malic and citric acid of average values of 386 and 4700 mg/100 mL, respectively, compared to strawberry and raspberry juice (Table 5). No effect of ultrasound treatment of mash before maceration on the content of the abovementioned acids was observed. Equally, in the case of strawberry juice, no effect of ultrasound application on the content of any of these acids was observed. Enzyme maceration has a positive impact on citric acid content in strawberry juice, an 11.5% increase was recorded for the 'US + E' sample and 10.7% for 'Heated + E'. The opposite behavior was observed for malic acid in raspberry. In comparison to the 'Control', juices that were obtained using maceration of the pulp before pressing 'US + E' and 'Heated + E' had 5.2 and 7.7% lower contents of malic acid, respectively.

3.5. Antioxidant Activity

The antioxidant activity of the juices measured by the ABTS test is shown in Figure 6. Its value ranged from 286.9 for raspberry juice to 966.5 [mg Trolox/100 mL] for blackcurrant

juice due to its high anthocyanins and ascorbic acid content. Raspberry juice, with the lowest antioxidant activity among the juices tested, simultaneously showed the strongest tendency for the positive effects of ultrasonic treatment. The use of enzymatic maceration resulted in a 14.5% increase in antioxidant activity, while when the raspberry mash was treated with ultrasound before maceration 'US + E', a 36.6% increase in antioxidant activity was obtained compared to the 'Control'. Juice produced immediately after ultrasonic treatment ('US') has a higher antioxidant activity than the 'Control' by 28.0%. Evidently, it can be observed that positive effect of ultrasound treatment exceeded the effect of enzymatic maceration alone. Additionally, the correlation analysis of antioxidant activity and phenolic compounds content in raspberry juice showed a statistically significant correlation ($r = 0.71$). In the case of juice obtained from strawberries, the effect of ultrasound is also observed, when the treatment was performed without maceration a 16.0% increase in antioxidant activity was reached compared to 'Control'. The combined treatment of sonication and maceration 'US + E' contributed to a 28.8% increase in its antioxidant activity. However, it can be noted that the juice obtained after maceration without sonication ('Heated') had similar antioxidant activity. Regardless of the method of pretreatment, blackcurrant juice had significantly higher antioxidant activity than the rest of the juices. However, a statistically significant increase in this parameter was observed under the effect of ultrasound treatment ('US + E') by 6.2% if compared to juice pressed after maceration ('Heated + E').

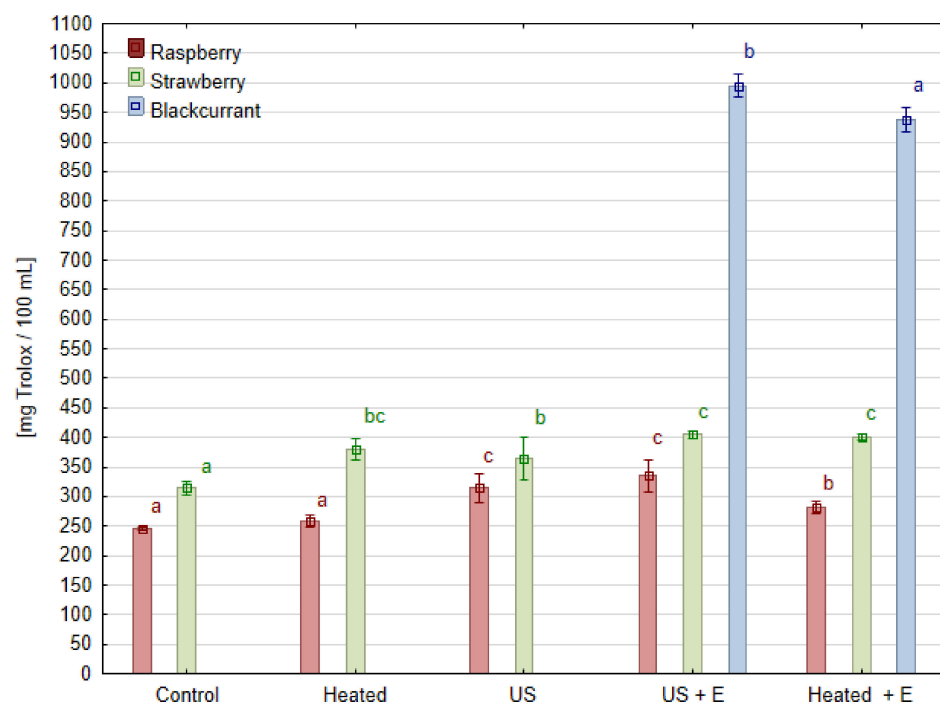


Figure 6. Antioxidant activity of juice obtained after different mash treatment. Means, for each species, marked with the same letter in the same color do not differ significantly ($p = 0.05$) according to Tukey's test ($n = 3$).

Similar results were obtained in the study where three currant cultivars were tested: after 10 min of ultrasound mash treatment in a laboratory bath, at least a 10% increase in antioxidant capacity was reported [23]. The positive effect of ultrasonic treatment on juice processing was also previously reported. For example, there was an increase in DPPH free radical scavenging activity and total antioxidant capacity in grape juice samples sonicated for 90 min by 11.6% and 30.5%, respectively [27]. Studies conducted on strawberries also show that the use of heat or ultrasonic treatment of the mash can result in an increase in the antioxidant activity of strawberry juice compared to juice from untreated mash [34].

Such results are very similar to those highlighted in this study concerning blackcurrant fruit, but it is also worth noting that the effect on raspberry mash was much stronger. However, negative or no effect of ultrasound treatment on antioxidant capacity is reported. The juice obtained from *Berberis amurensis* Rupr. fruit mash after ultrasound treatment has the same antioxidant activity as the untreated 'Control' sample, while the antioxidant activity of juices made from the mash subjected to enzymatic maceration or heating was 55% higher [24].

4. Conclusions

Berries, in particular blackcurrants, but also raspberries and strawberries are a good source of polyphenolic compounds and ascorbic acid. It is also a good material used in the production of juices, but it is usually blended with other ingredients to make fruit drinks or other food products of a better taste profile. In addition to the quality of the raw material used, an important issue remains the degree of retention of these compounds in juices, on which the use of ultrasound can favor.

As it is shown in the following work, depending on the species, the effect of ultrasound treatment is different. A vivid example is the yield of juice pressing, where in the case of blackcurrant fruit, the use of ultrasound without enzymatic maceration was not enough to make it possible to produce juice. While for strawberry and raspberry fruit, the effect was comparable to the use of enzyme maceration. Further research on optimization may lead to the development of a method to completely replace the enzyme maceration with a method involving several minutes of ultrasound treatment. Such a solution can result not only in saving time but also in saving the energy required to heat the mash. What is more, such a solution also eliminates the need for dosing enzyme preparations and demanding logistics connected to it. It is noteworthy that none of the samples tested showed a negative effect of ultrasound on the total content of phenolic compounds. In raspberry juices pressed after ultrasound treatments, a significant increase in anthocyanins was observed in comparison to others juice samples. Higher extraction efficiency and shorter time of juice processing is also a way to increase antioxidant activity, which has been observed in cases of raspberry and blackcurrant. Antioxidant activities of these juices pressed after ultrasound treatment were higher compared to juices obtained without such treatment. In the case of strawberry juice, the temperature and time of processing were more important factors affecting phenolic compound content and antioxidant. The results of the experiment showed that, in order to better compare juice quality, separating the effect of temperature from the effect of mechanical and chemical action of ultrasound treatment is required. However, studies have shown that the impact of ultrasound may affect the share of individual anthocyanins, as was observed in the case of raspberry fruits. Ultrasonic interference in the anthocyanin structure may be important during the storage of raspberry juices, but this would require further research.

The use of ultrasound to treat fruit mash before pressing is a relatively new concept, and the number of publications on the subject is still insufficient, especially regarding the number of technological solutions employed in scientific research.

Author Contributions: Conceptualization: J.P., M.M.-F. and K.C.; methodology: J.P., M.M.-F., K.C. and J.S.-G.; completing the data analysis and writing of the manuscript draft: J.P. and K.C.; reviewing, supervising, and revising the manuscript: M.M.-F. and K.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Norwegian Financial Mechanism. Project title: Improving plant quality and economy for a more sustainable and efficient berry production. Contract number: NOR/POLNOR/QualityBerry/0014/2019-00.

Informed Consent Statement: Not applicable.

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

Acknowledgments: We thank the staff of the Fruit and Vegetable Storage and Processing Department for their technical assistance.

Conflicts of Interest: The authors state that this research was conducted in the absence of commercial or financial relationships that could be comprehended as a potential conflict of interest.

References

1. Lemanowicz, M.; Krukowski, A. Comparisons of Qualitative and Quantitative Issues in the Fruit Supply Industries in The Netherlands, Poland, Greece, and Spain. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* **2009**, *84*, 13–17. [CrossRef]
2. National Center for Agricultural Support. *Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa*; National Center for Agricultural Support: Warsaw, Poland, 2018; ISBN 978-83-66255-00-5.
3. Central Statistical Office in Poland. Available online: <https://stat.gov.pl/en/> (accessed on 11 December 2023).
4. Gruzewska, A.; Gugala, M.; Zarzecka, K. Analiza rynku owoców jagodowych-wybrane elementy. *Zesz. Nauk. SGGW W Warszawie-Probl. Rol. Świat.* **2018**, *18*, 152–161. [CrossRef]
5. U.S. Department of Agriculture. Beltsville Human Nutrition Research Center. Food Data Central. Foundation Foods. Available online: <https://fdc.nal.usda.gov/> (accessed on 3 April 2024).
6. Gopalan, A.; Reuben, S.C.; Ahmed, S.; Darvesh, A.S.; Hohmann, J.; Bishayee, A. The Health Benefits of Blackcurrants. *Food Funct.* **2012**, *3*, 795. [CrossRef] [PubMed]
7. Afrin, S.; Gasparrini, M.; Forbes-Hernandez, T.Y.; Reboredo-Rodriguez, P.; Mezzetti, B.; Varela-López, A.; Giampieri, F.; Battino, M. Promising Health Benefits of the Strawberry: A Focus on Clinical Studies. *J. Agric. Food Chem.* **2016**, *64*, 4435–4449. [CrossRef] [PubMed]
8. Rao, A.V.; Snyder, D.M. Raspberries and Human Health: A Review. *J. Agric. Food Chem.* **2010**, *58*, 3871–3883. [CrossRef] [PubMed]
9. Rastogi, N.K. Opportunities and Challenges in Application of Ultrasound in Food Processing. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2011**, *51*, 705–722. [CrossRef] [PubMed]
10. Wu, T.Y.; Guo, N.; Teh, C.Y.; Hay, J.X.W. Theory and Fundamentals of Ultrasound. In *Advances in Ultrasound Technology for Environmental Remediation*; SpringerBriefs in Molecular Science; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2013; pp. 5–12. ISBN 978-94-007-5532-1.
11. Priyadarshini, A.; Rajauria, G.; O'Donnell, C.P.; Tiwari, B.K. Emerging Food Processing Technologies and Factors Impacting Their Industrial Adoption. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2019**, *59*, 3082–3101. [CrossRef]
12. Chemat, F.; Zill-e-Huma; Khan, M.K. Applications of Ultrasound in Food Technology: Processing, Preservation and Extraction. *Ultrason. Sonochem.* **2011**, *18*, 813–835. [CrossRef] [PubMed]
13. Butz, P.; Tauscher, B. Emerging Technologies: Chemical Aspects. *Food Res. Int.* **2002**, *35*, 279–284. [CrossRef]
14. Larsen, L.R.; Van Der Weem, J.; Caspers-Weiffenbach, R.; Schieber, A.; Weber, F. Effects of Ultrasound on the Enzymatic Degradation of Pectin. *Ultrason. Sonochem.* **2021**, *72*, 105465. [CrossRef] [PubMed]
15. Lv, J.-M.; Gouda, M.; Zhu, Y.-Y.; Ye, X.-Q.; Chen, J.-C. Ultrasound-Assisted Extraction Optimization of Proanthocyanidins from Kiwi (*Actinidia chinensis*) Leaves and Evaluation of Its Antioxidant Activity. *Antioxidants* **2021**, *10*, 1317. [CrossRef] [PubMed]
16. Khouryieh, H.A. Novel and Emerging Technologies Used by the U.S. Food Processing Industry. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2021**, *67*, 102559. [CrossRef]
17. Nielsen, I.L.F.; Haren, G.R.; Magnussen, E.L.; Dragsted, L.O.; Rasmussen, S.E. Quantification of Anthocyanins in Commercial Black Currant Juices by Simple High-Performance Liquid Chromatography. Investigation of Their pH Stability and Antioxidative Potency. *J. Agric. Food Chem.* **2003**, *51*, 5861–5866. [CrossRef] [PubMed]
18. Re, R.; Pellegrini, N.; Proteggente, A.; Pannala, A.; Yang, M.; Rice-Evans, C. Antioxidant Activity Applying an Improved ABTS Radical Cation Decolorization Assay. *Free Radic. Biol. Med.* **1999**, *26*, 1231–1237. [CrossRef] [PubMed]
19. Bender, C.; Killermann, K.V.; Rehmann, D.; Weidlich, H.H. Effect of Mash Enzyme and Heat Treatments on the Cellular Antioxidant Activity of Black Currant (*Ribes nigrum*), Raspberry (*Rubus idaeus*), and Blueberry (*Vaccinium myrtillus*) Juices. *CyTA-J. Food* **2017**, *15*, 277–283. [CrossRef]
20. Nguyen, C.; Nguyen, H. Ultrasonic Effects on the Quality of Mulberry Juice. *Beverages* **2018**, *4*, 56. [CrossRef]
21. Cortez, R.E. Characterization of Blackcurrant Berries (*Ribes nigrum*) and the Evaluation of Their Bioactive Compounds after Ultrasound-Assisted Water Extractions, Enzymatic Treatments, and Fermentation. Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign, IL, USA, 2019.
22. Laaksonen, O.A.; Mäkilä, L.; Sandell, M.A.; Salminen, J.-P.; Liu, P.; Kallio, H.P.; Yang, B. Chemical-Sensory Characteristics and Consumer Responses of Blackcurrant Juices Produced by Different Industrial Processes. *Food Bioprocess Technol.* **2014**, *7*, 2877–2888. [CrossRef]
23. Kidoń, M.; Narasimhan, G. Effect of Ultrasound and Enzymatic Mash Treatment on Bioactive Compounds and Antioxidant Capacity of Black, Red and White Currant Juices. *Molecules* **2022**, *27*, 318. [CrossRef] [PubMed]
24. Radziejewska-Kubzdela, E.; Szewngiel, A.; Ratajkiewicz, H.; Nowak, K. Effect of Ultrasound, Heating and Enzymatic Pre-Treatment on Bioactive Compounds in Juice from *Berberis amurensis* Rupr. *Ultrason. Sonochem.* **2020**, *63*, 104971. [CrossRef]
25. Bora, S.J.; Handique, J.; Sit, N. Effect of Ultrasound and Enzymatic Pre-Treatment on Yield and Properties of Banana Juice. *Ultrason. Sonochem.* **2017**, *37*, 445–451. [CrossRef]

26. Tiwari, B.K.; Muthukumarappan, K.; O'Donnell, C.P.; Cullen, P.J. Colour Degradation and Quality Parameters of Sonicated Orange Juice Using Response Surface Methodology. *LWT—Food Sci. Technol.* **2008**, *41*, 1876–1883. [[CrossRef](#)]
27. Aadil, R.M.; Zeng, X.-A.; Han, Z.; Sun, D.-W. Effects of Ultrasound Treatments on Quality of Grapefruit Juice. *Food Chem.* **2013**, *141*, 3201–3206. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
28. Zou, Y.; Jiang, A. Effect of Ultrasound Treatment on Quality and Microbial Load of Carrot Juice. *Food Sci. Technol.* **2016**, *36*, 111–115. [[CrossRef](#)]
29. Fleschhut, J.; Kratzer, F.; Rechkemmer, G.; Kulling, S.E. Stability and Biotransformation of Various Dietary Anthocyanins in Vitro. *Eur. J. Nutr.* **2006**, *45*, 7–18. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
30. Sui, X. Literature Review. In *Impact of Food Processing on Anthocyanins*; Springer Theses; Springer: Singapore, 2017; pp. 5–14. ISBN 978-981-10-2611-9.
31. Fischer, U.A.; Carle, R.; Kammerer, D.R. Thermal Stability of Anthocyanins and Colourless Phenolics in Pomegranate (*Punica granatum* L.) Juices and Model Solutions. *Food Chem.* **2013**, *138*, 1800–1809. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
32. Buckow, R.; Kastell, A.; Terefe, N.S.; Versteeg, C. Pressure and Temperature Effects on Degradation Kinetics and Storage Stability of Total Anthocyanins in Blueberry Juice. *J. Agric. Food Chem.* **2010**, *58*, 10076–10084. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Romero Rodriguez, M.A.; Vazquez Oderiz, M.L.; Lopez Hernandez, J.; Lozano, J.S. Determination of Vitamin C and Organic Acids in Various Fruits by HPLC. *J. Chromatogr. Sci.* **1992**, *30*, 433–437. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Radziejewska-Kubzdela, E. Effect of Ultrasonic, Thermal and Enzymatic Treatment of Mash on Yield and Content of Bioactive Compounds in Strawberry Juice. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 4268. [[CrossRef](#)]
35. Carr, A.C.; Lykkesfeldt, J. Discrepancies in Global Vitamin C Recommendations: A Review of RDA Criteria and Underlying Health Perspectives. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2021**, *61*, 742–755. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
36. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific Opinion on Dietary Reference Values for Vitamin C. *EFSA J.* **2013**, *11*, 3418. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Skierniewice, 10.06.2024

**Oświadczenie o wkładzie merytorycznym Autorów
w opracowaniu publikacji ^{1/}**

Jan Piecko

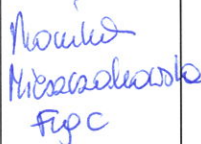
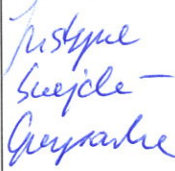
Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy w Skierniewicach

Oświadczenie dotyczy publikacji pt. :

**Impact of Ultrasound Pretreatment on Juice Yield and Bioactive Content in Juice
Produced from Selected Berries Fruit**

Foods, 2304-8158

**Jan Piecko, Monika Mieszczakowska-Frać, Karolina Celejewska, Justyna Szweja-
Grzybowska**

Lp.	Nazwisko i imię Autora	Opis wkładu merytorycznego	Afiliacja	Podpis Autora
1	mgr Piecko Jan	Analiza literatury, analiza wyników przygotowywanie treści artykułu	Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy	
2	dr hab. Monika Mieszczakowska- Frać, prof. IO-PIB	Redagowanie tekstu, pomoc w przygotowywaniu treści artykułu, wsparcie merytoryczne	Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy	
3	dr Justyna Szweja- Grzybowska	Udział w analizach	Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy	
4	dr Karolina Celejewska	Pomoc w przygotowywaniu treści artykułu	Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy	

¹ Wypełnia pierwszy Autor, a jeśli pierwszy Autor jest spoza Jednostki organizacyjnej współprowadzącej SD, do której przypisany jest doktorat, najwyżej wymieniany wśród Autorów pracownik danej jednostki współprowadzącej SD

Uprawnienia dotyczące wykorzystania publikacji

Nie są wymagane żadne specjalne uprawnienia do ponownego wykorzystania całości lub części artykułów opublikowanych przez MDPI, w tym rysunków i tabel. W przypadku artykułów opublikowanych na licencji Creative Common CC BY typu open access, każda część artykułu może być ponownie wykorzystana bez zezwolenia, pod warunkiem że zostanie wyraźnie cytowana. Ponowne wykorzystanie artykułu nie oznacza poparcia ze strony autorów lub MDPI. Ponadto autorzy nie potrzebują specjalnego zezwolenia, aby przesłać swoje badania do zewnętrznych repozytoriów. Polityka ta obejmuje wszystkie wersje artykułu, w tym wersję przesłaną, zaakceptowaną i opublikowaną.

Redakcja MDPI

Załącznik 2

Publikacja 2

Piecko J.; Mieszczakowska-Frać M.; Szweja-Grzybowska J.; Celejewska K. 2024. Wpływ rodzaju homogenizacji na właściwości reologiczne i zawartość związków bioaktywnych w mętnym soku z truskawek. *ŻYWNOSĆ. NAUKA. TECHNOLOGIA. JAKOŚĆ*, 31, 3(140), 171-185.

DOI: <https://doi.org/10.15193/zntj/2024/140/517>.

JAN PIECKO, MONIKA MIESZCZAKOWSKA-FRĄC,
JUSTYNA SZWEJA-GRZYBOWSKA, KAROLINA CELEJEWSKA

WPLYW RODZAJU HOMOGENIZACJI NA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE I ZAWARTOŚĆ ZWIĄZKÓW BIOAKTYWNYCH W MĘTNYM SOKU Z TRUSKAWEK

Streszczenie

Wprowadzenie. Zmętnienie jest istotnym parametrem jakościowym soków owocowych. Sedymentacja cząstek miąższu zawieszonych w soku może powodować negatywną oceną jakości produktu przez konsumentów. W związku z tym stabilizacja zmętnienia stanowi wyzwanie dla producentów soków. W pracy tej wykorzystano dwa rodzaje homogenizacji w celu eliminacji zjawiska rozwarstwiania się soku. Do badań wykorzystano mętny sok z owoców truskawek odmiany „Grandarosa”. Homogenizację wysokociśnieniową przeprowadzono przy pomocy homogenizatora Atomo 3.0 przy wartościach ciśnień 200 i 600 barów. Homogenizację ultradźwiękową przeprowadzono sonikatorem Sonics VCX 750 stosując moc 750W, przez 2 i 8 minut. W próbach soku analizowano rozkład wielkości cząstek metodą dyfrakcji laserowej, lepkość, stabilność zmętnienia, zawartość antocyjanów ogółem, związków fenolowych oraz zawartość kwasu askorbinowego.

Wyniki i wnioski. W przypadku homogenizacji ultradźwiękowej około 70 % obecnych w soku cząstek miało średnicę poniżej 25 µm, podczas gdy w soku niehomogenizowanym frakcja cząstek o średnicy poniżej 25 µm stanowiła 25 %. Homogenizacja wysokociśnieniowa, niezależnie od stosowanego ciśnienia, miała wyższą skuteczność rozbijania cząstek zmętnienia od homogenizacji ultradźwiękowej (około 90 % cząstek miało wielkość poniżej 25 µm). Homogenizacja przy ciśnieniu 200 barów spowodowała wzrost lepkości soku o 135 % (do 6,5 mPa·s) w porównaniu z sokiem niehomogenizowanym. Najwyższym poziomem zmętnienia charakteryzował się sok homogenizowany ultradźwiękowo przez 8 minut, którego zmętnienie wynosiło 2¹¹⁰ NTU. Średnia zawartość antocyjanów ogółem (6,0 mg/100 ml) oraz kwasu askorbinowego (16,8 mg/100 cm³) w soku truskawkowym nie uległa istotnej statystycznie zmianie niezależnie od rodzaju homogenizacji. Homogenizacja wysokociśnieniowa i ultradźwiękowa charakteryzują się wysoką skutecznością zmniejszania wielkości cząstek miąższu w soku z truskawek, przy czym żadna z nich nie powoduje istotnej degradacji antocyjanów i kwasu askorbinowego.

Słowa kluczowe: homogenizacja wysokociśnieniowa, homogenizacja ultradźwiękowa, rozmiar cząstek, zmętnienie, soki owocowe

*Mgr inż. J. Piecko, ORCID: 0000-0001-6838-9364; dr hab., prof. IO M. Mieszczakowska-Frąc ORCID: 0000-0001-8786-7990; dr J. Szweja-Grzybowska ORCID: 0000-0002-1260-5897; dr inż. K Celejewska ORCID: 0000-0003-3113-3722, Zakład Przechowalnictwa i Przetwórstwa Owoców i Warzyw, Instytut Ogródnictwa - Państwowy Instytut Badawczy, ul. Konstytucji 3 Maja 1/3, 96-100 Skierniewice.
Kontakt e-mail: jan.piecko@inhort.pl*

Wprowadzenie

Pozytywny wpływ spożycia owoców i ich przetworów na zdrowie, a w szczególności owoców jagodowych jest przedmiotem wielu badań naukowych. Wykazano związek ich spożywania ze zdrowiem człowieka m.in. poprzez zapobieganie występowania chorób przewlekłych [20]. Do przetworów owocowych należą m.in. soki. Dostępne produkty z tej kategorii to głównie soki klarowne oraz soki mętne. Produkcja soku klarownego uwzględnia proces klarowania, który wykonuje się po enzymatycznej hydrolizie pektyn. Polega on na usunięciu nierozpuszczalnych substancji stałych, których cząstki tworzą zawiesinę. Jak wykazano, zmętnienie to przede wszystkim cząstki ścian komórkowych, blaszki środkowej i błon komórkowych pochodzące z rozdrobnionych tkanek surowca, a więc są to głównie polisacharydy oraz niewielkie ilości białek, lipidów oraz związków polifenolowych [29, 33]. Natomiast sok mętny to produkt poddany procesowi pasteryzacji bezpośrednio po wytłoczeniu poprzedzonej jedynie filtracją usuwającą większe fragmenty miąższu. Do spożycia szczególnie polecane są soki mętne, jednakże badania nad wpływem spożycia soków jabłkowych mętnych i klarownych wskazują, że oba mają pozytywny wpływ na markery związane z chorobami układu krążenia, rakiem oraz chorobami neurodegeneracyjnymi [33]. Jednakże wykazano również, że klarowny sok jabłkowy ma niższą wartość prozdrowotną ponieważ zawiera mniejszą ilość błonnika, związków polifenolowych i innych składników odżywczych niż klarowny sok jabłkowy [29]. Choć współczesna dietetyka podkreśla, że jedzenie całych owoców ma wyższe wartości prozdrowotne niż przyjmowanie soków [2], to sok jest formą pokarmu łatwiejszą do spożycia. Dzięki temu można zwiększyć częstotliwość spożywania owoców i poprawić ogólną ich ilość w diecie. Przykładem jest sok z owoców granatu, który wykazuje silne działanie przeciwmiażdżycowe, przeciwnadciśnieniowe, przeciwutleniające oraz przeciwzapalne [31], jednak spożycie owoców w postaci nieprzetworzonej wymaga obrania ich z niejadalnych części. W badaniach dotyczących wpływu spożycia soków jagodowych na stan zdrowia ludzi również potwierdzono ich pozytywny wpływ [10]. Wykazano, że codzienne spożycie soku winogronowego przez okres 2 miesięcy może być skutecznym sposobem na dostarczanie przeciwutleniaczy, zmniejszających uszkodzenia DNA limfocytów w krwi [22]. Wysoki potencjał przeciwutleniający winogrona o ciemnym zabarwieniu skórki zawdzięczają m.in. związkom fenolowym, a w szczególności: antocyjanom i flawanolom [18]. W innym przypadku wykazano, że dzięki wysokiej zawartości kwasu askorbinowego w soku z żurawiny jego spożycie zwiększa aktywność przeciwutleniającą osocza krwi [24].

Truskawki są jednymi z najpopularniejszych owoców jagodowych na świecie. Dostępność tych owoców przez cały rok, zarówno jako produktu świeżego, jak i mrożonego, sprawia, że stanowią istotne źródło witamin, minerałów i związków polifenolowych w diecie. Badania epidemiologiczne i kliniczne udowodniły pozytywne efekty

zdrowotne spożycia truskawek, wskazując szczególnie na właściwości przeciwutleniające, przeciwzapalne i przeciwnadciśnieniowe [15]. Również sok z tych owoców jest godnym zainteresowania źródłem związków prozdrowotnych. Wykazano na przykład, że bogaty w antocyjany sok z truskawek jest skuteczny w hamowaniu mutagenezy [28], czyli procesu polegającego na powstawaniu mutacji DNA. Obok ważnego aspektu jakim jest atrakcyjność wizualna produktu, należy zauważyć, że mętny sok z truskawek charakteryzuje się wyższą zawartością związków fenolowych [9]. Wykazano również, że obecność zmętnienia może mieć pozytywny wpływ na stabilność antocyjanów zawartych w soku truskawkowym [21], w związku z czym stabilizacja zmętnienia ma również istotny wpływ na jakość przechowalniczą soku.

Homogenizacja w przemyśle sokowniczym przeprowadzana jest w celu zmniejszenia średniej wielkości cząstek, co prowadzi do zwiększenia stabilności nierozpuszczalnych składników soku. Wykorzystując różne metody homogenizacji, z powodzeniem można uzyskać sok mętny nieulegający sedymentacji. Technologia homogenizacji wysokociśnieniowej polega na pompowaniu płynu (np. soku owocowego) przez wąską szczelinę (zawór homogenizacyjny) pod wysokim ciśnieniem. Nagłe obniżenie ciśnienia po przekroczeniu szczeliny powoduje wzrost prędkości płynu i w konsekwencji dochodzi do zjawiska kawitacji, a cząstki narażone są na wysokie naprężenia mechaniczne, w wyniku których dochodzi do ich destrukcji. Zdolność tej metody homogenizacji do inaktywacji mikroorganizmów, poprawy właściwości reologicznych oraz do ograniczenia degradacji związków wrażliwych na temperaturę w żywności jest dobrze poznana i opisana w literaturze [17].

Metoda ta znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle, szczególnie w sektorze napojów i soków oraz stosowana w celu homogenizacji i poprawienia właściwości reologicznych. Konieczność stosowania układów aseptycznych jest głównym czynnikiem ograniczającym implementację jako alternatywnej metody utrwalania produktów spożywczych [23]. W przypadku ultradźwięków istnieje wiele potencjalnych zastosowań, m.in.: usprawnianie zamrażania i filtracji, przyspieszanie suszenia, wytrawiania, odgazowywanie, emulgowanie [5, 30]. Główną zaletą stosowania technologii opartej na ultradźwiękach jest skrócenie czasu trwania procesu oraz poprawa wydajności i higieny procesu [12]. Metoda ta znajduje również zastosowanie jako narzędzie do inaktywacji mikroorganizmów i enzymów [5, 7].

Jednakże stabilność zmętnienia soku jest zjawiskiem złożonym, w którym uczestniczy wiele mechanizmów i reakcji pomiędzy pektynami, białkami oraz związkami polifenolowymi [4]. Stosowanie homogenizacji nie zawsze przynosi spodziewane rezultaty, a aktualna wiedza nie pozwala wyjaśnić wszystkich przyczyn niestabilności soków. W związku z tym poszukuje się rozwiązań technologicznych poprawiających stabilność soków.

Celem niniejszej pracy było zbadanie wpływu rodzaju homogenizacji na rozkład wielkości cząstek miąższu, zmętnienie i zawartość związków bioaktywnych w sokach z truskawek. W pracy porównano wybrane parametry jakościowe soków homogenizowanych ultradźwiękowo bądź wysokociśnieniowo oraz soku niehomogenizowanego.

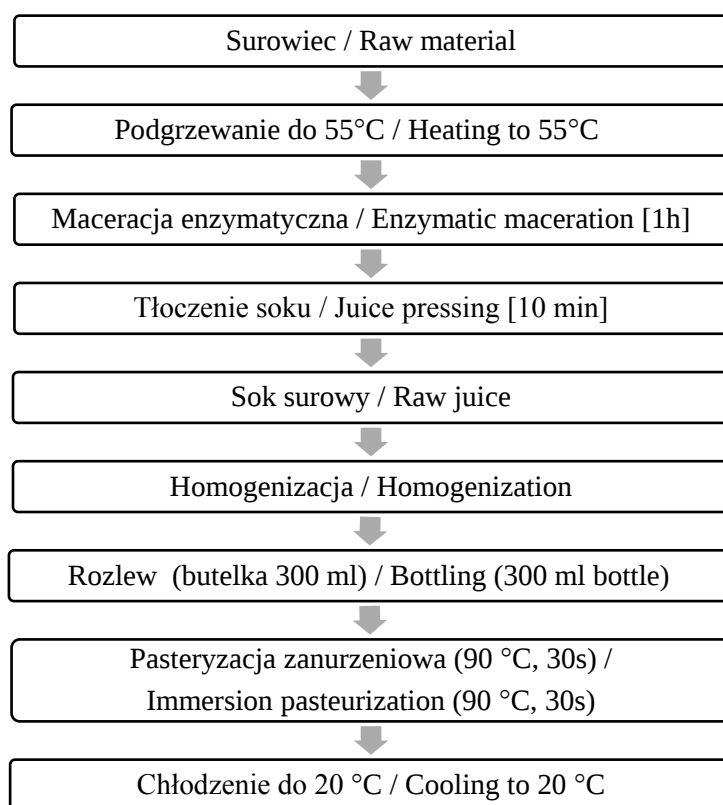
Przeprowadzone badania pozwalają poszerzyć wiedzę w zakresie możliwości produkcji soków mętnych z owoców truskawki. Z tej pogłębionej wiedzy skorzystać mogą zakłady przetwórstwa owoców, ponieważ problemy ze stabilnością zmętnienia soków są nadal kwestią nierozwiązaną. Homogenizacja ultradźwiękowa jako zabieg poprawiający stabilność zmętnienia soków jest alternatywą dla innych jej rodzajów m.in. dla homogenizacji wysokociśnieniowej, od której jest zdecydowanie łatwiejsza do implementacji i tańsza w eksploatacji.

Materiały i metody badań

Metoda uzyskania soku i procedura homogenizacji

Do badań wykorzystano owoce truskawek odm. 'Grandarosa' zakupione bezpośrednio u producenta, z plantacji komercyjnej zlokalizowanej w centralnej Polsce. W ciągu 2 godzin od zbioru owoce przewieziono do laboratorium, gdzie przeprowadzono mycie i usuwanie szypulek. Następnie owoce rozłożono w skrzynkach i zamrożono w komorze chłodniczej o temperaturze $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po upływie 24 godzin owoce przepakowano do szczelnych worków foliowych i przechowywano w stanie zamrożenia do dnia realizacji badań. Sok uzyskano w skali półtechnicznej metodą zaprezentowaną na schemacie (Ryc.1). Owoce po rozmrożeniu w kotle wyposażonym w płaszcz wodny, rozdrobniono na młynie Fryma (BASIS 91/55, Fryma-Maschinen AG, Rheinfelden, Niemcy), a następnie podgrzano do temperatury maceracji. Maceracje rozdrobnionych owoców prowadzono w temp $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ przez okres 1 godziny, wykorzystując preparat enzymatyczny Pectinex® Ultra Passover (Novozymes, Szwajcaria), stosując dawkę 50 g/t. Sok uzyskano wykorzystując prasę przekładkową (Voran Maschinen GmbH, Austria), stosując siłę nacisku 235 kN przez okres 10 minut. Wytłoczony sok następnie poddano dwóm rodzajom homogenizacji i rozlano do butelek o pojemności 250 cm^3 . W próbie kontrolnej sok rozlano do butelek bezpośrednio po tłoczeniu. Produkt pasteryzowano zanurzeniowo, stosując 30-sekundowy okres przetrzymywania w temp. $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Następnie butelki schładzano do temperatury pokojowej. Homogenizację wysokociśnieniową przeprowadzono przy pomocy homogenizatora Atomo 3.0 (Bertoli, Włochy), stosując ciśnienie 200 barów (HPH200) oraz 600 barów (HPH600). Homogenizację przy ciśnieniu 600 barów wykonano dwustopniowo, przy czym pierwszy zawór homogenizacyjny ustawiony został na 200 barów. Homogenizację ultradźwiękową przeprowadzono sonikatorem VCX 750 (Sonics & Materials, USA) o mocy znamionowej 750 W, generującym ultradźwięki o częstotliwość 20 kHz. Czas

zabiegu wynosił 2 minuty (UH2) lub 8 minut (UH8). Sok niehomogenizowany zastosowano jako próbę kontrolną (KONTROLA). Wykonano 2 powtórzenia technologiczne dla każdej kombinacji soku truskawkowego.



Rycina 1. Schemat technologiczny produkcji soku truskawkowego

Figure 1. Process diagram of strawberry juice production

Analiza rozkładu wielkości cząstek

W próbach analizowano rozkład wielkości cząstek metodą dyfrakcji laserowej (Bettersizer S3, Chiny). Czas pomiaru wynosił 30 s, wielkość cząstek została obliczona na podstawie teorii Mie. Urządzenie jest wyposażone w mieszadło zapobiegające sedimentacji cząstek poprzez cyrkulację próbki w układzie pomiarowym. Wynik analizy zaprezentowano jako rozkład procentowy przedstawiający zawartość poszczególnych frakcji cząstek, czyli ich udział objętościowy w całej próbce soku.

Analiza zmętnienia soku

Mętność (T_0) soków mierzono przy użyciu turbidymetru (Hach Company, Box 389, USA). Wyniki mętności podano w NTU (nefelometrycznych jednostkach mętności). Stabilność zmętnienia została określona po odwirowaniu przy użyciu wirówki laboratoryjnej (obroty $4200 \times g$ przez 15 min.) i obliczeniu procentu stabilności zmętnienia zgodnie z następującym wzorem: $T\% = T_s/T_0 \times 100$, gdzie: T_s – mętność soku odwirowanego, T_0 – początkowa mętność soku.

Analiza lepkości soku

Lepkość określono za pomocą wiskozymetru Brookfield LVDVII (Brookfield Eng., Middleboro, USA) przy obrotach wrzeciona 60 obr/min. Lepkość soku wyrażono w mPa·s.

Analiza zawartość kwasu L-askorbinowego

Zawartość kwasu L-askorbinowego oznaczono metodą HPLC przy użyciu systemu Agilent Technologies HPLC (seria 1200), wyposażonego w detektor diodowy (DAD). Separację zastosowano przy użyciu kolumny Supelcosil LC-18 (250 mm $\times$ 4,6 mm; 5 μ m) z kolumną wstępną i roztworem buforowym diwodorofosforanu potasu (1% KH_2PO_4 ; 2,5 pH) w fazie ruchomej. Kolumna była utrzymywana w temperaturze 30 °C, a szybkość przepływu fazy ruchomej wynosiła 0,8 cm³/min. Oznaczanie kwasu askorbinowego przeprowadzono przy długości fali 244 nm. Próbkę przed nastrzykiem były rozcieńczane w 6-procentowym HPO_3 . Wyniki wyrażono w mg/100 cm³ soku.

Analiza zawartości związków fenolowych

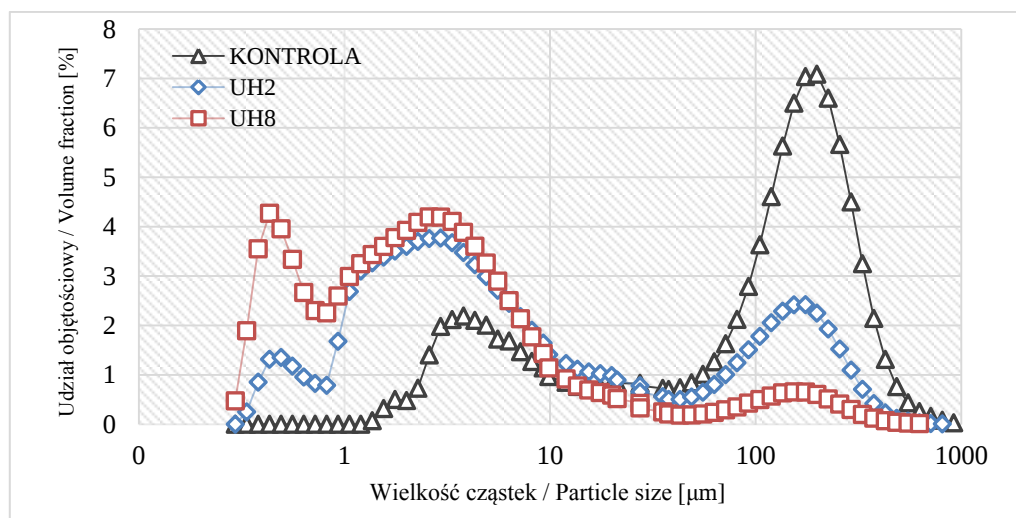
Analizę HPLC związków fenolowych przeprowadzono zgodnie z modyfikowaną metodą opisaną przez Nielsen i innych [19], przy użyciu Agilent HPLC Model HP 1200 wyposażonego w detektor diodowy (DAD). Separację przeprowadzono na kolumnie Phenomenex[®] Fusion RP (250 $\times$ 4,6 mm; wielkość cząstek 4 μ m) przy przepływie 1 cm³/min, w temperaturze 25 °C. Polifenole w eluacie były oznaczane przy długości fali 280 nm (flawan-3-ole), 320 nm (kwasy fenolowe), 360 nm (flawonole) i 520 nm (antocyjany).

Analiza statystyczna wyników

Jednoczynnikową analizę wariancji przeprowadzono przy użyciu programu STATISTICA 13 (Dell Inc., Tulsa, USA). Do porównania parametrów jakościowych soków wykorzystano test HSD Tukeya. Porównanie średnich przeprowadzono na poziomie istotności $p < 0,05$.

Wyniki i dyskusja

Rozkład wielkości cząstek w sokach homogenizowanych ultradźwiękowo zaprezentowano na Ryc. 2, a homogenizowanych wysokociśnieniowo – na Ryc. 3. Niezależnie od stosowanej metody homogenizacji średnia wielkość cząstek zawieszonych w soku uległa znacznemu zmniejszeniu. W przypadku soku niehomogenizowanego 27,7 % wykrytych cząstek posiadało rozmiar w zakresie poniżej 25 μm , podczas gdy dla soków homogenizowanych wysokociśnieniowo udział cząstek miąższu o wielkości poniżej 25 μm wynosił 88,5 %, a dla soków homogenizowanych ultradźwiękowo – 74,7 %. Biorąc pod uwagę wyniki uzyskane przez innych autorów, stwierdzające, że mętny sok to zawiesina cząstek o rozmiarach od 0,25 do 5 μm w przypadku soku jabłkowego [14], a $0,5 \div 2 \mu\text{m}$ w soku pomarańczowym⁴, przeanalizowano jaki procent cząstek w badanych sokach mieściło się w zakresie $0,25 \div 5 \mu\text{m}$. Dla soku niehomogenizowanego jedynie 13,9 % cząstek mieściła się w tym zakresie, podczas gdy w soku UH2 – 50,3 %, UH8 – 53,4 %, HPH200 – 66,7 % i HPH600 – 84,2 %. Zaobserwowano również różnice w rozkładzie cząstek w zależności od czasu trwania homogenizacji ultradźwiękowej oraz wykorzystanego ciśnienia. Sok UH8 posiadał dużą frakcję cząstek o wielkości w zakresie $0,2 \div 1 \mu\text{m}$ wynoszącą 30,3 % wszystkich wykrytych cząstek, podczas gdy sok UH2

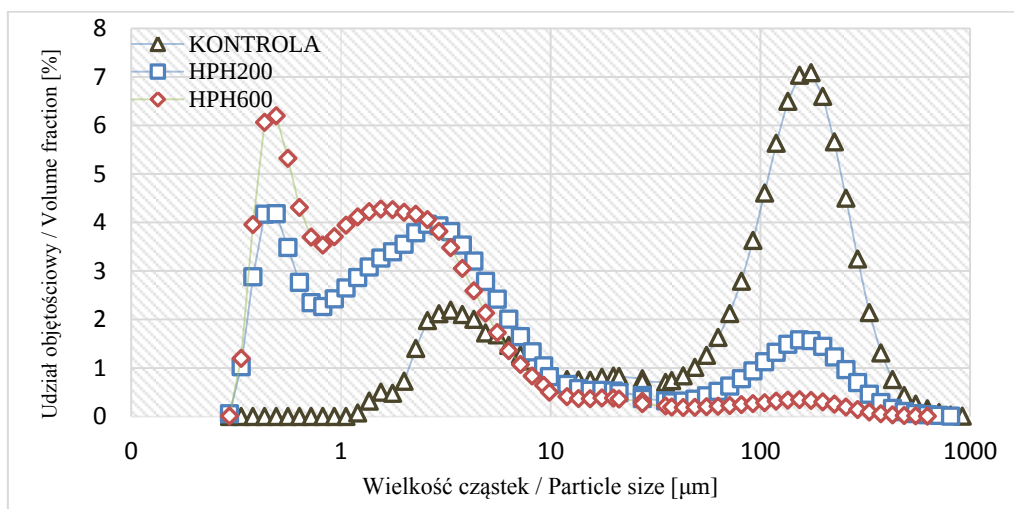


Rycina 2. Rozkład wielkości cząstek w soku z truskawek homogenizowanym metodą ultradźwiękową (KONTROLA- sok niehomogenizowany, UH2 – sok homogenizowany 2 minuty; UH8 - sok homogenizowany 8 minut)

Figure 2. Particle size distribution in ultrasonically homogenized strawberry juice (KONTROLA - un-homogenized juice, UH2 - homogenized juice 2 minutes; UH8 - homogenized juice 8 minutes)

posiadał 11,9 % cząstek w tym zakresie. Podobną różnicę stwierdzono w przypadku soków HPH200 i HPH600, dla których zawartość cząstek w tym zakresie wynosiła odpowiednio: 28,3 % oraz 41,9 %.

Obydwie metody homogenizacji miały zatem pozytywny wpływ na rozkład wielkości cząstek w soku przez zmniejszenie ich wielkości. Zastosowanie ultradźwięków przez 2 minuty lub homogenizacji przy ciśnieniu 200 barów wystarczyło aby zapewnić ograniczenie rozmiarów cząstek w soku. Podobny efekt uzyskano w przypadku soków z owoców cytrusowych homogenizowanych w ciśnieniu od 50 do 300 barów. Na podstawie tych badań stwierdzono, że wykorzystanie ciśnienia 200 barów umożliwia redukcję wielkości cząstek nie powodując negatywnych zmian m.in. zmiany barwy produktu [3]. Natomiast homogenizacja ultradźwiękowa z powodzeniem stosowana jest w przypadku tworzenia emulsji [8] oraz jako zabieg zmieniający właściwości reologiczne wielu produktów spożywczych [1]. Aktualnie zastosowanie homogenizacji ultradźwiękowej w przemyśle spożywczym ma szczególne zastosowanie w przypadku mleka [30] oraz napojów roślinnych zastępujących mleko krowie [6], ograniczając zjawisko sedymentacji w tych produktach.



Rycina 3. Rozkład wielkości cząstek w soku z truskawek homogenizowanym metodą wysokociśnieniową (Kontrola – sok niehomogenizowany, HPH200 – sok homogenizowany wysokociśnieniowo z zastosowaniem 200 barów, HPH600 – sok homogenizowany wysokociśnieniowo z zastosowaniem 600 barów).

Figure 3. Particle size distribution in strawberry juice homogenized by high-pressure method (Control - non-homogenized juice, HPH200 - 200 bar high-pressure homogenized juice, HPH600 - 600 bar high-pressure homogenized juice).

Ryc. 4 przedstawia wygląd soków truskawkowych po 48 godzinach od pasteryzacji soku. Zdjęcie obrazuje zróżnicowanie stabilności zmętniania soków homogenizowanych ultradźwiękami oraz wysokimi ciśnieniami w porównaniu z sokiem niehomogenizowanym. Sok, którego nie homogenizowano (kontrola) uległ wyraźnej sedymentacji, w wyniku której uzyskano sok klarowny w górnej części butelki i osad widoczny na dnie butelki. Pozostałe obiekty charakteryzują się różnym stopniem zmętnienia ustabilizowanym poprzez zastosowanie homogenizacji, dostrzegalne są jednak różnice pomiędzy obiektami. Podobne wyniki uzyskano, traktując ultradźwiękami soki pomarańczowe, w których przypadku nie zaobserwowano widocznej wizualnie separacji faz nawet po 4 dniach przechowywania soku [25].

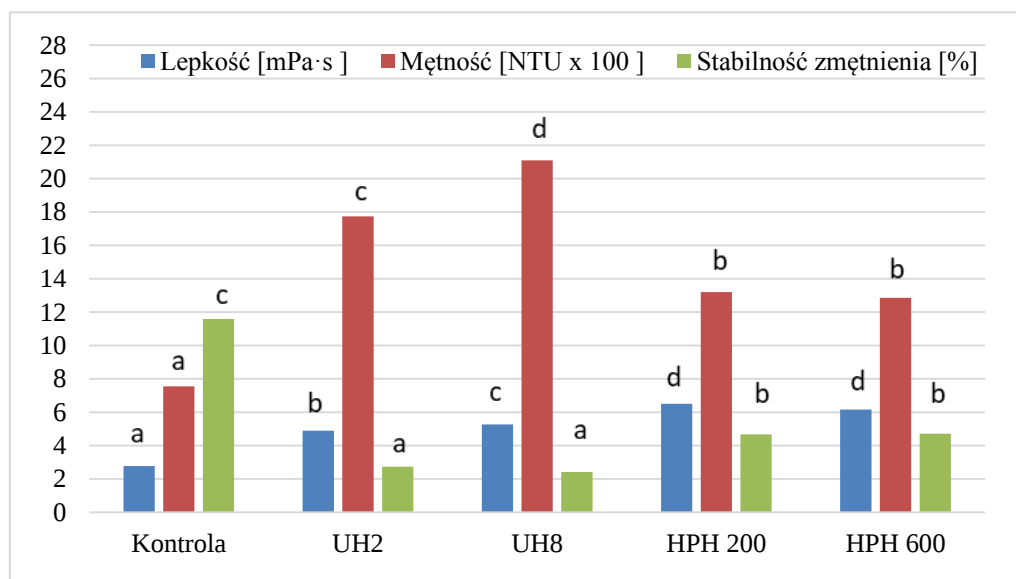


Rycina 4. Porównanie stopnia sedymentacji soków po 48 godzinach przechowywania w zależności od rodzaju homogenizacji (od lewej: KONTROLA, UH2, UH8, HPH200, HPH600)

Figure 4. The comparison of the sedimentation degree of juices after 48 hours of storage, depending on the homogenization treatment (from the left: CONTROL, UH2, UH8, HPH200, HPH600)

Pomiar mętności soku wykazał, że soki homogenizowane miały zdecydowanie wyższy poziom zmętnienia w porównaniu z sokiem niehomogenizowanym, którego zmętnienie wynosiło 755 NTU (Ryc. 5). Najwyższym poziomem zmętnienia charakteryzowały się soki homogenizowane ultradźwiękami, a czas procesu miał pozytywny wpływ na ten parametr. Zmętnienie tych soków było wyższe o 135 % dla UH2 i 179 % dla UH8 od zmętnienia soku niehomogenizowanego (KONTROLA). Na tej podstawie można stwierdzić, że wydłużony czas homogenizacji miał pozytywny wpływ na poziom zmętnienia. Natomiast soki homogenizowane wysokociśnieniowo nieznacznie różniły się od siebie pod tym względem. Poziom zmętnienia dla soku HPH200 wzrósł o 75 %, a dla soku HPH600 – o 70 % w porównaniu z sokiem niehomogenizowanym.

Jednakże obserwowane zmętnienie soków charakteryzowało się niską stabilnością. W porównaniu z niehomogenizowanym sokiem, którego zmętnienie miało stabilność na poziomie 11,6 %, soki homogenizowane miały niższą stabilność zmętnienia. Soki homogenizowane ultradźwiękowo miały średnio o 9,0 %, a soki homogenizowane wysokociśnieniowo – o 5,9 % niższą stabilność zmętnienia.



Rysina 5. Mętność, stabilność zmętnienia oraz lepkość soków w zależności od rodzaju homogenizacji (słupki oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie statystycznie przy $p < 0,05$; $n = 4$).

Figure 5. Turbidity, stability of turbidity and juice viscosity depending on the type of homogenization (bars labelled with the same letter correspond to results that show no statistically significant differences at $p < 0.05$; $n = 4$).

Pod wpływem homogenizacji wzrosła lepkość wszystkich badanych soków, która osiągnęła najwyższą wartość 6,5 mPa·s dla soku HPH200 (o 135 % więcej od soku niehomogenizowanego). Sok HPH600 charakteryzował się lepkością równą 6,2 mPa·s (o 122 % więcej od soku niehomogenizowanego). Soki homogenizowane ultradźwiękowo posiadały niższą lepkość wynoszącą 4,9 mPa·s dla soku UH2, a dla soku UH8 - 5,3 mPa·s. Obserwowany wzrost lepkości soków homogenizowanych nie był zatem skorelowany z poziomem zmętnienia. Przeciwnie obserwacje zanotowano w przypadku traktowania ultradźwiękami soków pomarańczowych [16], gdzie im dłużej trwało oddziaływanie, tym lepkość soku była niższa, jednocześnie obserwowano wzrost zmętnienia i jego stabilności. Zabiegi homogenizacji nie zawsze gwarantują przewidywalny efekt, ponieważ zjawisko stabilności zmętnienia nie zależy jedynie od wielkości cząstek. Jednym z kluczowych czynników wpływających na stabilność zmętnienia jest

również aktywność metyloesteraz pektynowych [32] (niebadanych w tej pracy), których podatność na traktowanie ultradźwiękami jest tematem wielu badań. Dodatkowo zauważa się wpływ pH oraz właściwej obróbki surowca na stabilność zmętnienia soków. W badaniach nad stabilnością soku z pomarańczy, w których skupiono się na interakcji składników i cząstek stanowiących zmętnienie soku, wykazano, że agregacja cząstek prowadząca do utraty stabilności zawiesiny zależy m.in. od zmian pH soku, ale jak podkreślają autorzy, mechanizm stabilności zmętnienia wciąż wymaga dalszych badań [11]. W przypadku soku z marchwi, zakwaszenie soku prowadziło do aglomeracji cząstek, a tym samym obniżenia stabilności zawiesiny i utraty zmętnienia [26]. W badaniu tym wykazano również, że zakwaszenie pulpy przed tłoczeniem poprawia stabilność zmętnienia uzyskiwanego soku, co świadczy o tym, że właściwy schemat technologiczny na początkowych etapach produkcji może mieć decydujący wpływ na jakość uzyskanego soku.

Zawartość kwasu L-askorbinowego i związków fenolowych w badanych próbkach soku została przedstawiona w Tab. 1. Zawartość kwasu L-askorbinowego w soku truskawkowym, niezależnie od sposobu traktowania, wynosiła średnio 16,3 mg/100 ml

Tabela 1. Zawartość kwasu L-askorbinowego oraz związków polifenolowych w soku truskawkowym homogenizowanym różnymi metodami

Table 1. The content of L-ascorbic acid and polyphenolic compounds in strawberry juice homogenized by different methods

Badany parametr [mg/100 cm ³]	KONTROLA	HPH200	HPH600	UH2	UH8
Kwas L-askorbinowy	15,76 ^a ± 0,84	15,74 ^a ± 1,04	16,31 ^a ± 0,74	18,27 ^a ± 0,04	15,24 ^a ± 1,69
Katechina	3,05 ^a ± 0,04	3,03 ^a ± 0,01	2,96 ^a ± 0,08	3,07 ^a ± 0,11	3,29 ^a ± 0,26
Pochodna kwasu chlorogenowego	1,65 ^a ± 0,01	1,62 ^a ± 0,01	1,62 ^a ± 0,01	1,64 ^a ± 0	1,63 ^a ± 0,01
Pochodne kwercetyny	1,71 ^a ± 0,01	1,66 ^a ± 0,06	1,63 ^a ± 0,03	1,71 ^a ± 0,04	1,71 ^a ± 0,01
Rutozyd-3- kwercetyny	0,15 ^a ± 0,02	0,16 ^a ± 0,01	0,14 ^a ± 0,01	0,16 ^a ± 0,02	0,17 ^a ± 0,01
Glukozyd-3-cyjanidyny	0,54 ^a ± 0,05	0,54 ^a ± 0,01	0,55 ^a ± 0,01	0,56 ^a ± 0,01	0,51 ^a ± 0,03
Glukozyd – 3 - pelargonidyny	5,34 ^a ± 0,07	5,47 ^a ± 0,02	5,52 ^a ± 0,03	5,78 ^a ± 0,1	5,33 ^a ± 0,23
Rutozyd – 3 - pelargonidyny	0,30 ^a ± 0,02	0,30 ^a ± 0,01	NW	0,31 ^a ± 0,1	0,29 ^a ± 0,01

Objaśnienia / Explanatory notes:

Średnie ± odchylenie standardowe; wartości liczbowe w wierszu oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie przy $p < 0,05$ (n=4). Objasnienie: NW – nie wykryto

Explanatory notes: Means ± standard deviation; numerical values in the line labelled with the same letter are not significantly different at $p < 0.05$ (n=4). Explanation: NW – not detected

soku i była niższa niż wskazują dane literaturowe [3, 4]. Obie badane metody homogenizacji nie wpłynęły istotnie na jej zawartość. Podobne rezultaty uzyskano, traktując ultradźwiękami próbki soku pomarańczowego, gdzie nie stwierdzono różnic w zawartości kwasu L-askorbinowego w porównaniu z sokiem nietraktowanym [16]. Wykryte w próbkach soku związki fenolowe należą do trzech grup flawonoidów: flawanole (katechina), flawonole (pochodne kwercetyny), antocyjany (glukozyd-3- cyjanidyny, glukozyd-3-pelargonidyny, rutozyd-3-pelargonidyny) oraz kwasów fenolowych (pochodna kwasu chlorogenowego), co jest zgodnie z danymi literaturowymi [34]. Zawartość glukozydu-3-pelargonidyny w badanych sokach była najwyższa spośród wykrytych antocyjanów (średnio 5,49 mg/100 ml). Związek ten w głównej mierze odpowiada za barwę truskawek [13]. Nie zaobserwowano żadnego wpływu zabiegów homogenizacji na zawartość związków fenolowych w badanych próbkach soku w porównaniu z sokiem niehomogenizowanym.

Nieznaczny wzrost temperatury występujący w obydwu badanych metodach homogenizacji nie stanowił czynnika powodującego degradację związków fenolowych. Oddziaływanie wysokim ciśnieniem oraz temperaturą do 100 °C na sok truskawkowy, jak wykazali Rodri i wsp. [27], nie powoduje znacznej degradacji antocyjanów.

Wnioski

1. Homogenizacja wysokociśnieniowa i ultradźwiękowa charakteryzują się wysoką skutecznością w zmniejszaniu wielkości cząstek w soku z truskawek.
2. Zmniejszenie wielkości cząstek pod wpływem obydwu homogenizacji może być postrzegane jako narzędzie do poprawy stabilności zmętnienia soków naturalnie mętnych z truskawek.
3. Homogenizacja wysokociśnieniowa i ultradźwiękowa nie wpływa w istotny statystycznie sposób na zawartość antocyjanów oraz kwasu L-askorbinowego w soku z truskawek.

Badania zrealizowane w ramach projektu badawczego „Optymalizacja procesu homogenizacji wysokociśnieniowej w produkcji innowacyjnych przetworów z owoców i warzyw” (ZPiPOiW/2/2020–6.2.20) finansowanego przez Ministerstwo Edukacji i Nauki oraz projektu polsko-norweskiego NOR/POLNOR/ QualityBerry 0014/2019-00/2019 finansowanego przez Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Projekt zrealizowany w ramach Norweskiego Mechanizmu Finansowego na lata 2014-2021. „Działamy razem na rzecz zieleni, konkurencyjna i sprzyjająca integracji społecznej Europa”.

Literatura

- [1] Aslam R., Alam M.S., Kaur J., Panayampadan A.S., Iqbal Dar O., Kothakota A., Pandiselvam R.: Understanding the effects of ultrasound processing on texture and rheological properties of food: *J. Texture Stud.*, 2022, 53, 6, 775-799.
- [2] Bazzano L.A., Li T.Y., Joshipura K.J., Hu F.B.: Intake of Fruit, Vegetables, and Fruit Juices and Risk of Diabetes in Women. *Diabetes Care*, 2008, 31, 7, 1311-1317.
- [3] Betoret E., Betoret N., Carbonell J. V., Fito P.: Effects of pressure homogenization on particle size and the functional properties of citrus juices. *J. Food Eng.*, 2009, 92, 1, 18-23.
- [4] Beveridge T.: Opalescent and Cloudy Fruit Juices: Formation and Particle Stability. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 2002, 42, 4, 317-337.
- [5] Bevilacqua A., Campaniello D., Speranza B., Altieri C., Sinigaglia M., Corbo M.R.: Two Nonthermal Technologies for Food Safety and Quality—Ultrasound and High Pressure Homogenization: Effects on Microorganisms, Advances, and Possibilities: A Review. *J. Food Prot.*, 2019, 82, 12, 2049-2064.
- [6] Bosiljkov T., Brnčić M., Tripalo B., Karlović S., Ukrainczyk M., Ježek D., Rimac Brnčić S.: Impact of ultrasound-enhanced homogenization on physical properties of soybean milk. *Chem. Engin. Trans.*, 2009, 17, 1029-1034.
- [7] Butz P., Tauscher B.: Emerging technologies: chemical aspects. *Food Res. Int.*, 2002, 35, 2-3, 279-284.
- [8] Canselier J. P., Delmas H., Wilhelm A.M., Abismaïl B.: Ultrasound Emulsification – An Overview. *J. Dispers. Sci. Technol.*, 2002, 23, 1-3, 333-349.
- [9] Cao X., Bi X., Huang W., Wu J., Hu X., Liao X.: Changes of quality of high hydrostatic pressure processed cloudy and clear strawberry juices during storage. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 2012, 16, 181-190.
- [10] Duthie S.J.: Berry phytochemicals, genomic stability and cancer: Evidence for chemoprotection at several stages in the carcinogenic process. *Mol. Nutr. Food Res.*, 2007, 51, 6, 665-674.
- [11] Ellerbee L., Wicker L.: Calcium and pH influence on orange juice cloud stability. *J. Sci. Food Agric.*, 2011, 91, 1, 171-177.
- [12] Fernandes F.A.N., Rodrigues S.: Application of Ultrasound and Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration in Drying of Fruits. *Dry. Technol.*, 2008, 26, 12, 1509-1516.
- [13] Garzón G.A., Wrolstad R.E.: Comparison of the Stability of Pelargonidin-based Anthocyanins in Strawberry Juice and Concentrate. *J. Food Sci.*, 2002, 67, 4, 1288-1299.
- [14] Genovese D.B., Lozano J.E.: Effect of Cloud Particle Characteristics on the Viscosity of Cloudy Apple Juice. *J. Food Sci.*, 2000, 65, 4, 641-645. Giampieri F., Forbes-Hernandez T.Y., Gasparrini M., Alvarez-Suarez J.M., Afrin S., Bompadre S., Quiles J.L., Mezzetti B., Battino M.: Strawberry as a health promoter: an evidence based review. *Food Funct.*, 2015, 6, 5, 1386-1398.
- [15] Gomes A., Costa A.L.R., Rodrigues P.D., Castro R.J.S.D., Silva E.K.: Sonoprocessing of freshly squeezed orange juice: Ascorbic acid content, pectin methylesterase activity, rheological properties and cloud stability”, *Food Control*, 2022, 131, #108391.
- [16] Levy R., Okun Z., Shpigelman A.: High-Pressure Homogenization: Principles and Applications Beyond Microbial Inactivation. *Food Eng. Rev.*, 2021, 13, 3, 490-508.
- [17] Lovino R., Baiano A., Pati S., Faccia M., Gambacorta G.: Phenolic composition of red grapes grown in Southern Italy. *Ital. J. Food Sci.* 2006, 18(2), 177-186.
- [18] Nielsen I.L.F., Haren G.R., Magnussen E.L., Dragsted L.O., Rasmussen S.E.: Quantification of Anthocyanins in Commercial Black Currant Juices by Simple High-Performance Liquid Chromatog-

- raphy. Investigation of Their pH Stability and Antioxidative Potency. *J. Agric. Food Chem.*, 2003, 51, 20, 5861-5866.
- [19] Oguntibeju O.O., Truter E.J., Esterhuyse A.J.: The Role of Fruit and Vegetable Consumption in Human Health and Disease Prevention. *Diabetes Mellitus - Insights and Perspectives*, InTech, 2013.
- [20] Oszmiański J., Wojdyło A.: Comparative study of phenolic content and antioxidant activity of strawberry puree, clear, and cloudy juices. *Eur. Food Res. Technol.*, 2009, 228, 4, 623-631.
- [21] Park Y. K., Park E., Kim J.-S., Kang M.-H. Daily grape juice consumption reduces oxidative DNA damage and plasma free radical levels in healthy Koreans. *Mutat. Res. Mol. Mech. Mutagen.*, 2003, 529, 1-2, 77-86.
- [22] Patrignani F., Lanciotti R.: Applications of High and Ultra High Pressure Homogenization for Food Safety. *Front. Microbiol.*, 2016, 7, #1132.
- [23] Pedersen C, Kyle J, Jenkinson Am, Gardner P, McPhail D, Duthie G. Effects of blueberry and cranberry juice consumption on the plasma antioxidant capacity of healthy female volunteers. *Eur. J. Clin. Nutr.*, 2000, 54(5), 405-408.
- [24] Priyadarshini A., Rajauria G., O'Donnell C.P., Tiwari B.K.: Emerging food processing technologies and factors impacting their industrial adoption. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 2019, 59, 19, 3082-3101.
- [25] Reiter M., Stuparić M., Neidhart S., Carle R.: The role of process technology in carrot juice cloud stability. *LWT - Food Sci. Technol.*, 2003, 36, 2, 165-172.
- [26] Rodrigo D., Van Loey A., Hendrickx M.: Combined thermal and high pressure colour degradation of tomato puree and strawberry juice. *J. Food Eng.*, 2007, 79, 2, 553-560.
- [27] Smith S.H., Tate P.L., Huang G., Magee J.B., Meepagala K.M., Wedge D.E., Larcom L.L.: Antimutagenic Activity of Berry Extracts. *J. Med. Food*, 2004, 7, 4, 450-455.
- [28] Soler C., Soriano J. M., Mañes J.: Apple-Products Phytochemicals and Processing: A Review. *Nat. Prod. Commun.*, 2009, 4, 5, 69-670.
- [29] Soria A. C. i Villamiel M.: Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Trends Food Sci. Technol.*, 2010, 21, 7, 323-331.
- [30] Stowe C.B.: The effects of pomegranate juice consumption on blood pressure and cardiovascular health. *Complement. Ther. Clin. Pract.*, 2011, 17, 2, 113-115.
- [31] Tiwari B.K., Muthukumarappan K., O'Donnell C.P., Cullen P.J.: Inactivation kinetics of pectin methylesterase and cloud retention in sonicated orange juice. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 2009, 10, 2, 166-171.
- [32] Vallée Marcotte B., Verheyde M., Pomerleau S., Doyen A., Couillard C.: Health Benefits of Apple Juice Consumption: A Review of Interventional Trials on Humans. *Nutrients*, 2022, 14, 4, #821.
- [33] Wang S.Y., Zheng W., Galletta G.J.: Cultural System Affects Fruit Quality and Antioxidant Capacity in Strawberries. *J. Agric. Food Chem.*, 2002, 50, 22, 6534-6542.

THE EFFECT OF HOMOGENIZATION TYPE ON RHEOLOGICAL PROPERTIES AND CONTENT OF BIOACTIVE COMPOUNDS IN CLOUDY STRAWBERRY JUICE

S u m m a r y

Background. Turbidity is an important quality parameter of fruit juices. Sedimentation of pulp particles suspended in juice may result in a negative assessment of the product's quality by consumers. Therefore, turbidity stabilization is a challenge for juice producers. In this study, two types of homogenization were used to constrain juice sedimentation. Cloudy juice made of the "Grandarosa" cv. strawberries was

used for the research. High-pressure homogenization was carried out with an Atomo 3.0 homogenizer at a pressure of 200 and 600 bar. Ultrasonic homogenization was carried out with a Sonics VCX 750 sonicator using 750W power for 2 and 8 minutes. The juice samples were analyzed for particle size distribution, viscosity, turbidity, total anthocyanin content, phenolic compounds and ascorbic acid content.

Results and conclusions. In the case of ultrasonic homogenization, approximately 70 % of the particles present in the juice had a diameter below 25 μm , while in non-homogenized juice, the fraction of particles with a diameter below 25 μm was only 25 %. High-pressure homogenization, regardless of the pressure used, had a higher efficiency in the fragmentation of turbidity particles than ultrasonic homogenization (approximately 90% of the particles below 25 μm in size). Homogenization at a pressure of 200 bar resulted in the highest increase in viscosity to 6.5 mPa·s, by 135 % more than the non-homogenized juice. The juice homogenized ultrasonically for 8 minutes had the highest turbidity level, with a turbidity of 2¹¹0 NTU. The average content of total anthocyanins (6 mg/100 cm³) and L-ascorbic acid (16.8 mg/100 cm³) in the strawberry juice did not differ statistically significantly, regardless of the type of homogenization. High-pressure homogenization and ultrasonic homogenization are highly effective in reducing the size of particles in strawberry juice, however, none of them significantly degrades the anthocyanins and ascorbic acid content.

Key words: high-pressure homogenization, ultrasonic homogenization, particle size, turbidity, fruit juices



**Oświadczenie o wkładzie merytorycznym Autorów
w opracowaniu publikacji ^{1/}**

Jan Piecko

Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy w Skierniewicach

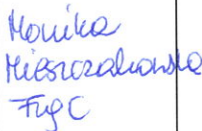
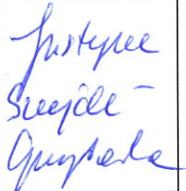
Oświadczenie dotyczy publikacji pt. :

**The effect of homogenization type on rheological properties and content of bioactive
compounds in cloudy strawberry juice /**

**wpływ rodzaju homogenizacji na właściwości reologiczne i zawartość związków
bioaktywnych w mętym soku z truskawek**

ŻYWNOSĆ. NAUKA. TECHNOLOGIA. JAKOŚĆ, 2024, tom 31, 3(140), 171-185

**Jan Piecko, Monika Mieszczakowska-Frąc, Justyna Szweja-Grzybowska, Karolina
Celejewska**

Lp.	Nazwisko i imię Autora	Opis wkładu merytorycznego	Afiliacja	Podpis Autora
1	mgr Piecko Jan	Analiza literatury, analiza wyników przygotowywanie treści artykułu	Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy	
2	dr hab. Monika Mieszczakowska- Frąc, prof. IO-PIB	Redagowanie tekstu, pomoc w przygotowywaniu treści artykułu, wsparcie merytoryczne	Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy	
3	dr Justyna Szweja- Grzybowska	Udział w analizach	Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy	
4	dr Karolina Celejewska	Pomoc w przygotowywaniu treści artykułu	Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy	

¹ Wypełnia pierwszy Autor, a jeśli pierwszy Autor jest spoza Jednostki organizacyjnej współprowadzącej SD, do której przypisany jest doktorat, najwyżej wymieniany wśród Autorów pracownik danej jednostki współprowadzącej SD

POLSKIE TOWARZYSTWO TECHNOLOGÓW ŻYWNOŚCI WYDAWNICTWO NAUKOWE PTTŻ

30-149 Kraków, ul. Balicka 122

Tel. 12 662-47-78 e-mail: redakcja@pttz.org www.wydawnictwo.pttz.org
NIP: 521-30-62-223 ISSN 2451-0777 (wersja on-line).

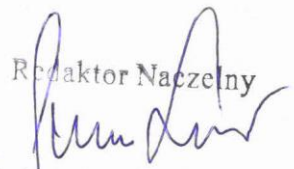
Kraków, 14.01.2026

**Szanowny Pan
mgr inż. Jan Piecko
Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Przechowywania i Przetwórstwa Owoców i Warzyw
ul. Pomologiczna 18
96-100 Skierniewice**

Wydawnictwo Naukowe Polskiego Towarzystwa Technologów Żywności wyraża zgodę na wykorzystanie artykułu pt. „*Wpływ rodzaju homogenizacji na właściwości reologiczne i zawartość związków bioaktywnych w mętym soku z truskawek*”, autorstwa Jana Piecko i wsp. opublikowanego w czasopiśmie Żywność. Nauka. Technologia. Jakość, 2024, 31, 3(140), 171-185, DOI: 10.15193/zntj/2024/140/517, jako części cyklu monotematycznych publikacji stanowiących rozprawę doktorską.

Z poważaniem

POLSKIE TOWARZYSTWO
TECHNOLOGÓW ŻYWNOŚCI
Wydawnictwo Naukowe PTTŻ
30-149 Kraków, ul. Balicka 122

Redaktor Naczelny

Prof. dr hab. inż. Lesław Juszczyk

Załącznik 3

Publikacja 3

Piecko, J.; Mieszczakowska-Frać, M.; Celejewska, K.; Dickinson, N.; Szwejd-Grzybowska, J. Effect of Ultrasound-Assisted Convective Drying on the Content of Bioactive Compounds and Drying Rate of Strawberry Slices. *Appl. Sci.* 2025, 15, 8947.
DOI: <https://doi.org/10.3390/app15168947>.

Article

Effect of Ultrasound-Assisted Convective Drying on the Content of Bioactive Compounds and Drying Rate of Strawberry Slices

Jan Piecko , Monika Mieszczakowska-Frać , Karolina Celejewska , Niall Dickinson and Justyna Szwejda-Grzybowska 

Fruit and Vegetable Storage and Processing Department, The National Institute of Horticultural Research, Konstytucji 3 Maja 1/3, 96-100 Skierniewice, Poland

* Correspondence: jan.piecko@inhort.pl

Abstract

The strawberry is the most widely consumed berry in Europe, with a high content of minerals and bioactive compounds. During drying, the bioactive compounds are concentrated, but also partially degraded due to the interaction of high temperature and oxygen, among other factors. In this study, the effect of ultrasound support during the drying of strawberry slices of two cultivars, ‘Florence’ and ‘Alba’, was investigated. The effect of ultrasound application on the rate of drying, the retention of phenolic compounds and ascorbic acid, as well as the total colour difference, was measured. The time of ultrasonic-assisted drying was shorter than unassisted drying for the ‘Florence’ and ‘Alba’ cultivars, respectively, 35.7% and 34.6%. In addition, the dried product obtained with ultrasound had comparable antioxidant activity and polyphenol content. It was also shown that ultrasound can be successfully used in convective dryers without major equipment modifications.

Keywords: ultrasound; convective drying; strawberry; bioactive compounds



Academic Editors: Agnieszka Nawirska-Olszańska and Maciej Oziębłowski

Received: 17 July 2025

Revised: 5 August 2025

Accepted: 12 August 2025

Published: 13 August 2025

Citation: Piecko, J.; Mieszczakowska-Frać, M.; Celejewska, K.; Dickinson, N.; Szwejda-Grzybowska, J. Effect of Ultrasound-Assisted Convective Drying on the Content of Bioactive Compounds and Drying Rate of Strawberry Slices. *Appl. Sci.* **2025**, *15*, 8947. <https://doi.org/10.3390/app15168947>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Drying, as one of the oldest methods of food preservation, has seen many modifications to make the process more efficient. Nevertheless, the drying process is still expensive due to the amount of energy needed to evaporate the water and the long time it takes. Moreover, drying of food brings adverse quality changes concerning: the decrease of bioactive compounds content, deterioration of colour, structural collapse and volume shrinkage, which affect sensory properties [1]. Ultrasound-assisted convective drying is one of the techniques by which the drying process can be accelerated and the dried material can have better quality compared to conventional drying techniques [2]. According to the literature, ultrasound-assisted drying was beneficial in reducing drying time, while positively influencing physicochemical properties, colour retention and rehydration ability, as well as carotenoids, ascorbic acid content and antioxidant capacity [3]. However, like any technique, it is subject to numerous limitations, which hinder its application industrially. One of the main issues concerns drying conditions, the optimization of which may be crucial to obtain a beneficial ultrasound (US) effect. In addition to humidity, temperature and air velocity, the impact of US in the drying process is also affected by the way it is applied and the properties of the dried material itself. For example, the impact of US in convection drying decreases as temperature increases. The same observations were made in the case of airflow, where the beneficial impact of US decreases with increasing airflow [4]. This is a serious limitation, since the lowering of air temperature and flow, further compromises

the speed of this process. It is also postulated that there is a relationship between the effectiveness of US application and the structure of the material being dried. It has been shown that materials of high volumetric density do not respond significantly in terms of drying kinetics to US assistance during drying [5]. This limitation may be explained by a low depth of penetration and propagation of US waves in materials of high density. It has been shown that in a porous material such as potato tissue, ultrasound does not transmit to a depth greater than 1 mm [6]. Therefore, the use of ultrasound in the drying process is justified only in limited cases. In order to maximize the potential of ultrasound in the drying of foodstuffs, further experimental data are required.

Strawberries are an important crop worldwide, with production exceeding 7.7 million tonnes in 2013 and have been constantly increasing [7] up to 10.5 million tonnes in 2023 [8]. China is the largest producer of strawberries in the world with nearly 3 million tons of production per year [9]. In our experiments, strawberry slices were used and they were dried in a chamber dryer. The aim of this study was to compare the drying rate and quality of dried strawberry slices obtained by convective drying (CD) and ultrasonic-assisted convective drying (UACD). An ultrasonic generator was installed inside the chamber of dryer, thus avoiding major modification of the dryer's construction. Such an experimental design was intended to test the possibility of easy application of ultrasonic energy in a chamber dryer in order to overcome another limitation of this technology, which is the high cost of the specialized equipment. The methodology used in this study allowed to compare the effect of US on drying kinetics, colour, polyphenol compounds, ascorbic acid content and antioxidant activity in dried strawberry slices. The low thickness (5 mm) of the samples and the soft texture of the strawberry tissue selected for this study was intended to exploit the potential of the US to accelerate the drying rate.

2. Materials and Methods

2.1. Plant Material

The strawberries (*Fragaria × ananasa* cv. 'Florence' and 'Alba') used in the study were purchased from producer in central Poland. Immediately after transport, the fruits were washed, sorted and the stalks were removed. The fruits, after surface drying, were frozen and stored at $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ until the day of experiment.

2.2. Drying Experiment

Fruits for drying were selected to obtain a homogeneous batch in terms of maturity and fruits size. 30 min before drying, the fruits were moved from the freezer and thawed at room temperature. Immediately before drying, the fruit was cut manually into slices (5 mm thick). The sample size was $250\text{ g} \pm 10\%$. The drying experiments were conducted in a laboratory chamber dryer with air recirculation (Figure 1), according to the diagram below (Figure 2). The equipment allows constant control of air velocity and temperature. Ultrasound-assisted convective drying (UACD) was performed by installing an airborne ultrasonic system (Pusonics, Madrid, Spain) inside the drying chamber, which is capable of generating a 22 kHz sound field with a maximum power of 200 W. The ultrasound transducer was placed 10 cm above the drying sample, with the sample spread out to completely occupy the ultrasound impacted area. The transducer was equipped with a cooling system isolated from the air flowing in the chamber, protecting it from overheating. Convective drying (CD), which in this study was the control to which the results were compared, was carried out when the ultrasound generator was switched off. As the impact of US is greater at mild drying conditions [4], the lowest possible temperature and airflow at which drying occurs at a reasonable rate was used. The experiments were carried out at one temperature level, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, and at a constant air velocity (2.5 m/s). The average

relative humidity of the air during drying was $15 \pm 2\%$. Each drying experiment was conducted in triplicate and the drying lasted until the sample lost 88% of its initial weight. Drying kinetics were determined by the initial moisture content of the fruit sample and by automatically weighing the samples at fixed intervals of 1 min. The initial moisture content was measured by drying to a constant weight in a laboratory vacuum dryer at 70 °C and 30 mBar pressure.

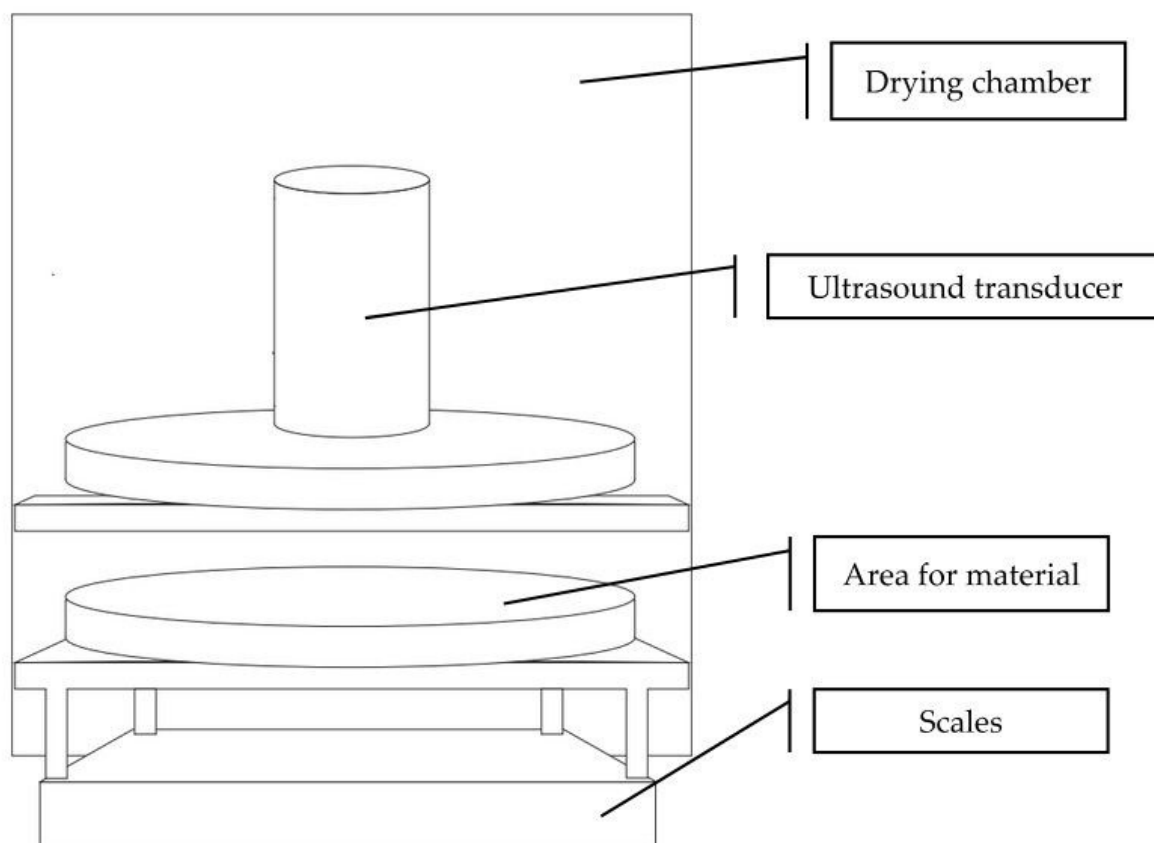


Figure 1. The drying experimental set-up.

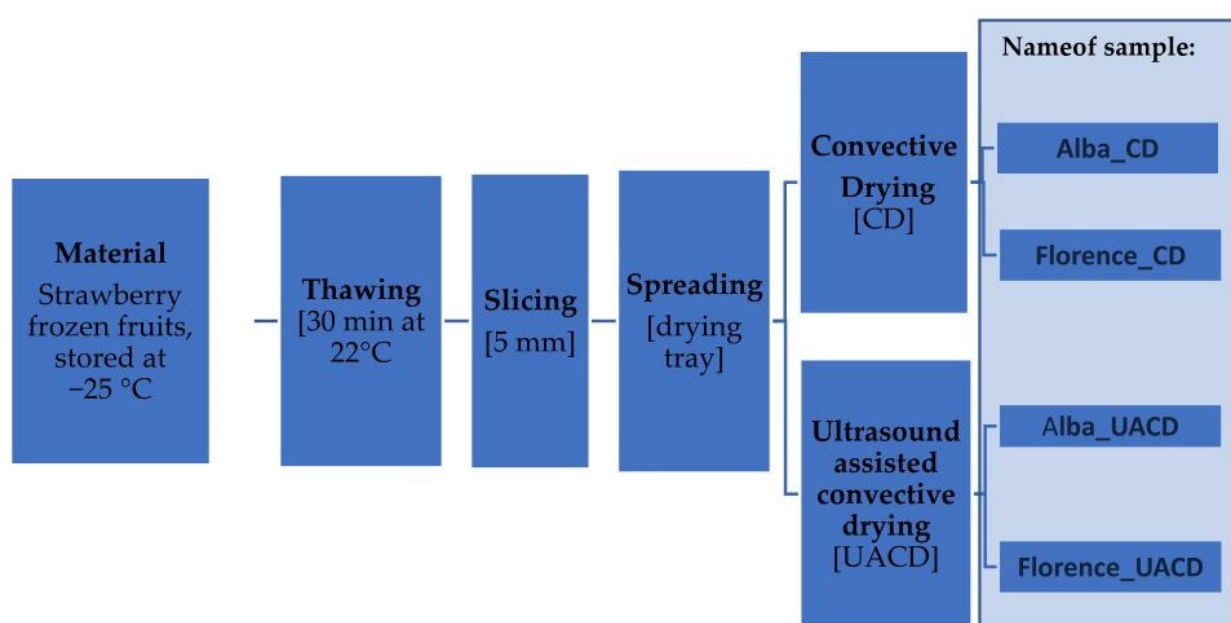


Figure 2. Scheme of the drying experiment conducted for 'Florence' and 'Alba' cultivars.

Prior to the main experiment, a preliminary evaluation was conducted using convective drying of fruit slices from four strawberry cultivars commercially cultivated in Poland: 'Alba', 'Rumba', 'Grandarosa' and 'Florence'. The drying rate, total colour difference and content of anthocyanins were taken into consideration during cultivar selection. One of the selection criteria was also the colour of the fruit cross-section, which is important from the perspective of visual appeal of dried slices. Based on these assessments, two cultivars, 'Alba' and 'Florence', were selected for the main experiment. The final dried mass of dried products obtained from the 'Alba' cultivar was 88.42% and 89.23% for Alba_CD and Alba_UACD, respectively. In the case of the 'Florence' cultivar, the final dried mass of dried products was lower, 80.19% and 77.05% for Florence_CD and Florence_UACD, respectively.

2.3. Colour Measurement

The values of the colour parameters of the raw material and dried strawberry slices were determined using a Konica Minolta CM-2500c spectrophotometer (Chiyoda, Tokyo, Japan). The instrument was calibrated before the measurements using a white standard. Measurements were made using CIE D65 illuminant. The parameter 'L' denotes brightness from 0 (dark) to 100 (bright), 'a' denotes green when negative (−) or red when positive (+) and 'b' denotes blue when negative (−) or yellow for positive (+) values. Measurements were made in 30 repetitions. Based on the determined values, the total colour difference (ΔE) was calculated using Equation (1):

$$\Delta E = \sqrt{((\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2)} \quad (1)$$

2.4. Analysis of Phenolic Compounds

Analysis of the phenolic compound content was carried out by the high-performance liquid chromatography method described by Nielsen et al. [10] using an Agilent 1200 series HPLC (Agilent Technologies, Waldbronn, Germany) with a system equipped with a DAD detector. Separation was performed using a Phenomenex® Fusion RP column (250 mm × 4.6 mm; particle size 4 µm). The elution conditions were as follows: 1 mL min^{−1}, temperature 25 °C, wavelength: 280 nm (flavan-3-ols), 320 nm (phenolic acids), 360 nm (flavonol) and 520 nm (anthocyanins); mobile phase consisting of water: formic acid (95:5 (v/v)) (A) and acetonitrile (B) in gradient flow. The calculations of polyphenols were quantified by calibration with the standards of individual polyphenols. The polyphenol content was expressed in mg·100 g^{−1} d.m.

2.5. Analysis of L-Ascorbic Acid

The L-ascorbic acid contents were determined by high-performance liquid chromatography method using an Agilent 1200 series HPLC system (Agilent Technologies, Waldbronn, Germany) equipped with a DAD detector. Separation was performed using a Supelcosil LC-18 column (250 mm × 4.6 mm; 5 µm) with a pre-column. A 1% phosphate-buffered aqueous solution of KH₂PO₄, pH 2.5 was used as the mobile phase with isocratic flow 0.8 mL min^{−1}, at a temperature of 30 °C. The detection of L-ascorbic acid was performed by absorbance at 244 nm. The samples were homogenized in 6% metaphosphoric acid, and filtered through filter paper. The calculations of acid content were quantified by calibration curve obtained with the standards of L-ascorbic acid and expressed in mg·100 g^{−1} d.m.

2.6. Antioxidant Activity

The antioxidant activity was determined according to Re et al. [11]. Free-radical scavenging activity was determined using the ABTS^{•+} radical cation. The reaction was carried out for 6 min and the mixture was kept at room temperature in a dark place.

Absorbance was measured at 734 nm using a spectrophotometer Cary 300 Bio UV-Visible (Varian, Belrose, Australia). At least four measurements were made for each sample at different concentrations to reduce the initial ABTS^{•+} solution absorbance from 20% to 80%. The linear regression method was applied to calculate the content of the sample, leading to a 50% decrease in the ABTS^{•+} solution absorbance, and recalculated to Trolox equivalents as mg per g of dried matter of the sample. The extract was prepared as follows: 2 g of sample was mixed with 50 mL of 70% methanol and was then extracted for 10 min. The suspension was filtered through a Whatman No. 3 filter paper (Global Life Sciences Solutions, Wilmington, NC, USA).

2.7. Water Activity

Water activity was determined using a computer-controlled HC2-AW (Rotronic AG, Bassersdorf, Switzerland). The sample was placed in a container under the measuring probe and the exchange of sample moisture with air inside the container is recorded until equilibrium is reached.

2.8. Dry Mass

The dry matter content was determined by a gravimetric method. This involved drying the sample to a constant weight under low pressure (3 kPa) at 70 °C.

2.9. Determination of Dry Basis Moisture Content and Drying Rate

The dry basis moisture and drying rate were determined using Equations (2) and (3):

$$\text{Dry basis moisture} = \frac{Mt - Md}{Md} \quad (2)$$

where Mt is the weight of sample at a given time [g] and Md is the dry mass of sample [g],

$$\text{Drying rate} = \frac{M0 - Mt}{\Delta t} \quad (3)$$

where M0 is the initial moisture content [g of water/g dry matter], Mt is the moisture content at a given time [g of water/g dry matter] and Δt is the time interval [s].

2.10. Statistical Analysis

The statistical analysis was performed by using STATISTICA 13 (Dell Inc., Tulsa, OK, USA). The analysis ran as a completely randomized design and was conducted with one-way ANOVA. The HSD Tukey's test was selected for the comparison of the quality parameters of dried samples. The comparison of means was performed at a significance level of $p < 0.05$.

3. Results and Discussion

3.1. Drying Rate

The initial moisture content of strawberry was 90.7% for 'Florence' cultivar and 91.4% for 'Alba'. Figures 3 and 4 present the changes in moisture content of dried strawberry slices during the drying process for both cultivars. At least three replicates were performed for each combination; the graphs show the averaged moisture changes (with bars of standard deviation). The use of ultrasonic assistance reduced the drying time for both cultivars. The duration of CD process was 280 min (16,800 s) for the 'Florence' cv. and 260 min (15,600 s) for the 'Alba' cv. For the 'Florence' cv., the process duration for UACD was 35.7% shorter than unassisted drying and lasted 180 min (10,800 s). For the 'Alba' cv. UACD lasted 170 min (10,200 s), thus was 34.6% shorter than unassisted drying. Similar results have been

reported in the literature on other berries, for example ultrasonic assistance (100 or 200 W) in drying raspberries reduced drying time by 54% and 64%, respectively [12]. As described by the authors, the contribution of ultrasound was mainly due to the ‘vibration effect’, as the most dominant factor in increasing mass transfer during drying. Enhanced drying rates have been observed by other authors in apple drying experiments. In the case of apple slices, it was found that the use of ultrasonic energy significantly reduces drying time. For example, when US power levels of 90 W were used, a 57% reduction in drying time was observed for 5-mm-thick apple slices [13]. Other authors used cylinders of 0.035 m in diameter and 0.005 m in height. In this case, the use of 200 W ultrasound intensified the heat and mass exchange to achieve a 48% reduction in drying time [14]. It was observed that the lower the process temperature and the lower the air flow in the dryer, the greater the observed impact of the US application. An even more effective example of apple drying was the use of low air temperature ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$), where an 80% reduction in process time was observed. In this case, a cube with a face surface area of 8.8 mm^2 was used [15].

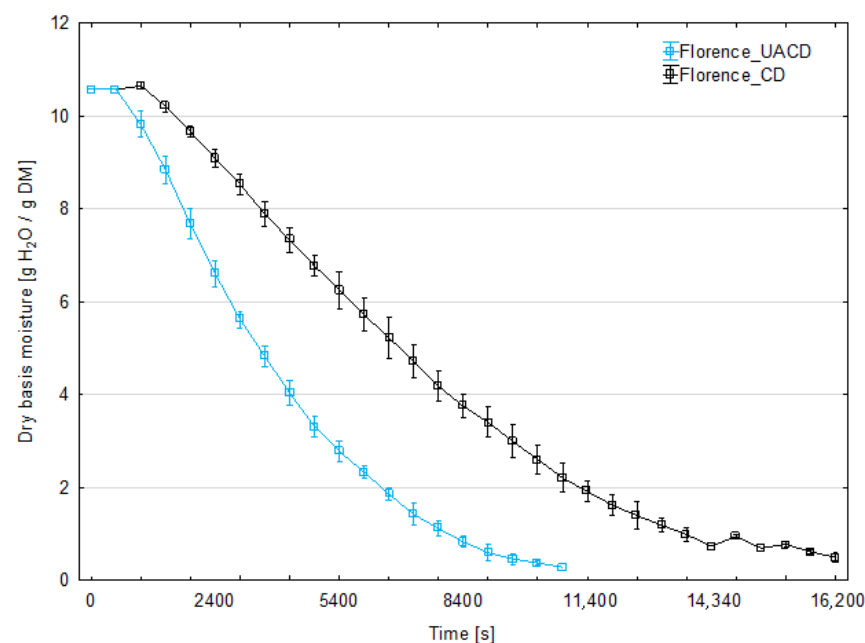


Figure 3. Changes in the moisture content of strawberry slices of the ‘Florence’ cultivar during drying with (UACD) and without (CD) ultrasound assistance.

Figures 5 and 6 show that the water removal rate for CD remains relatively constant for about 3600 s for the ‘Florence’ cultivar and 7200 s for the ‘Alba’ cultivar, until critical moisture content was achieved. This corresponds to a drying period in which the water evaporates from the surface of the product or only from the larger capillaries. During the subsequent drying stages, the first and second falling rate periods can be distinguished on the curves. This is the typical shape of the convective drying curve. In the case of UACD, constant rate drying period is absent and the drying started from the falling-rate period. In this case, the rate of water removal decreases from the very beginning, almost until the end of the drying process at the same slope in the case of ‘Alba’. UACD of ‘Florence’ drying curve is similar but it is possible to distinguish slope changes between the first and second part of the falling rate period. Typically, during the falling drying period, the rate at which water is removed decreases and the slope of the curve also gently decreases. This shows that the application of ultrasound has partially eliminated the resistance to the diffusion of moisture to the surface of the slices, which, in contrast, became increasingly significant during convective drying, perhaps due to an increasing viscosity of the aqueous phase. The high efficiency of the effect of ultrasound may be related to the small thickness of the slices,

which in the final stage of drying was no more than 1 mm. As has been shown, ultrasound does not transmit to a greater depth in the material than 1 mm [6] and therefore should affect the entire cross-section of the slices used in this experiment. However, in the case of ‘Florence’ it was observed that on the final stage of drying, the drying rate of material dried with ultrasound assistance was slower than ‘Alba’. Thus, the equilibrium moisture content value for these UACD drying conditions were higher (Figure 5). This may be due to the rapid evaporation of surface water and the formation of a layer of dried material, which hindered water removal during the falling rate drying period. Figures 5 and 6 show the drying rate during the drying process time. In these graphs, at the initial stage of drying, in case of UACD the process is very intensive, until it reached 4800 s and 6000 s for ‘Florence’ and ‘Alba’, respectively. It can be seen here that drying of ‘Florence’ was slower compared to the ‘Alba’ cultivar and in the early stages of the drying process this is clearly visible. The intersection of the CD and UACD graph lines is a very important point for comparing these drying processes. Based on this point, it is possible to infer at which point the ultrasound waves ceased to be important in shaping the drying dynamics. This corresponds strongly with other authors’ consideration of the significance of using ultrasound as a rate enhancer for the first stage or the second stage of drying. Scientific reports are not consistent in the influence of ultrasound on food drying kinetics. There are both reports indicating that the impact of ultrasound is greatest in the first phase of drying [16] and those that indicate its greater impact in the falling rate period of the process. For example, in the case of carrots, the improvement in drying dynamics occurred mainly at the beginning of the process, when external transfer was the controlling factor for the drying rate; in this case, ultrasound was responsible for a significant increase in heat and mass transfer coefficients [17]. An inverse trend was noted in a paper in which apple slices were dried, which generally shows a more significant effect during the falling rate period for samples dried with ultrasound compared to samples dried without ultrasound [13]. Following this reasoning, drying schemes have been proposed to optimize energy consumption more effectively, where ultrasound is applied after the completion of the first drying stage [18]. These discrepancies may be explained by the differing matrix properties of the materials conferring different internal diffusion resistance, or different equipment and/or experiment set-up.

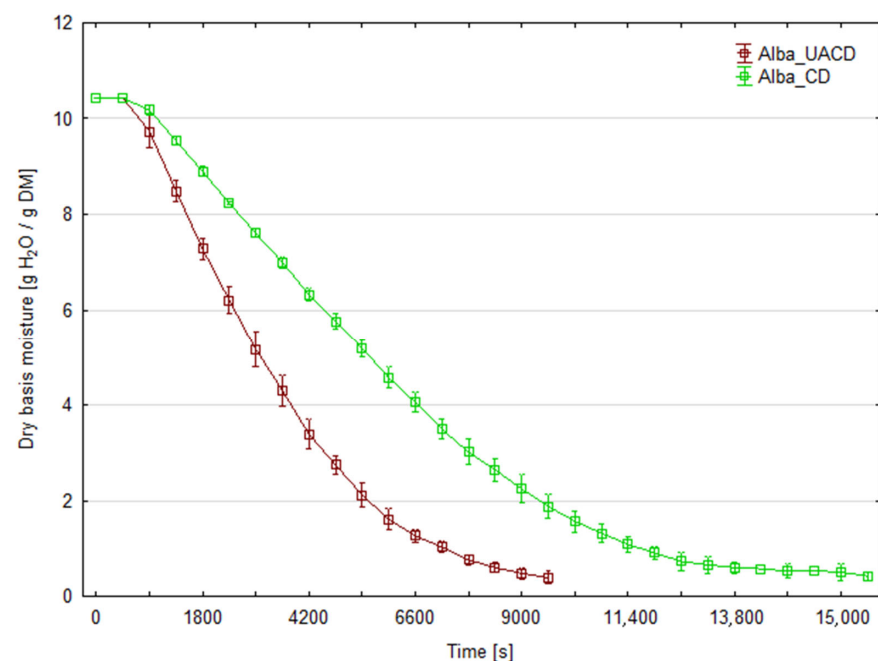


Figure 4. Changes in the moisture content of strawberry slices of the ‘Alba’ cultivar during drying with (UACD) and without (CD) ultrasound assistance.

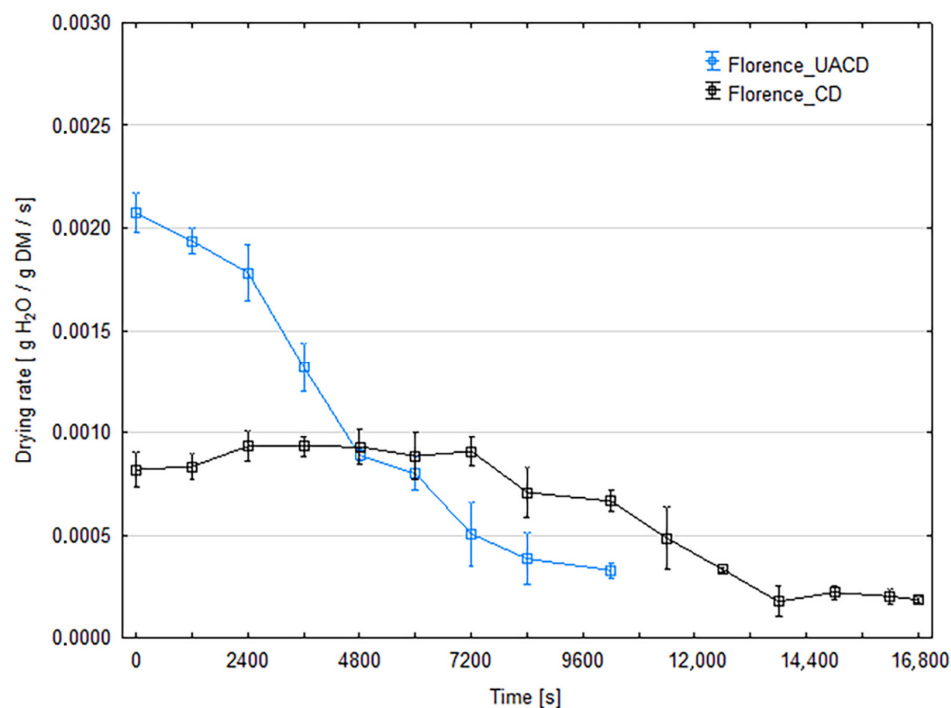


Figure 5. Drying rates of strawberry slices of the ‘Florence’ cultivar dried with (UACD) and without (CD) ultrasound assistance.

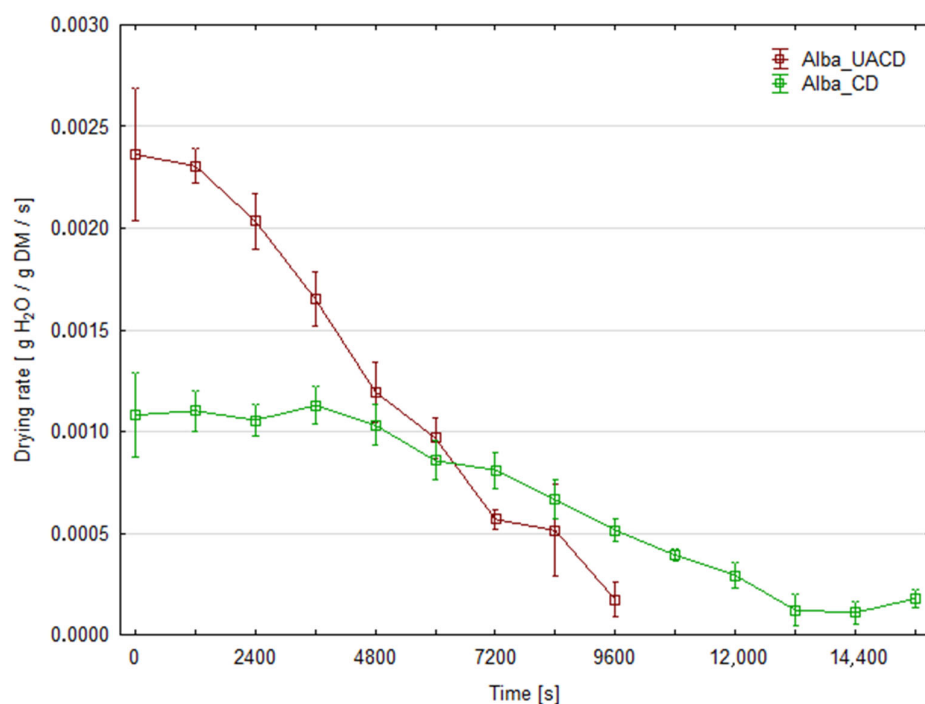


Figure 6. Drying rates of strawberry slices of the ‘Alba’ cultivar dried with (UACD) and without (CD) ultrasound assistance.

3.2. Colour

Colour, as one of the basic characteristics of processed food, is one of indicators of quality deterioration of raw material subjected to drying processes. As shown in Tables 1 and 2, drying strongly affected the colour of the strawberry slices. For both cultivars, the dried material was characterized by being darker, with more intensive red and yellow colours. In the case of the ‘Florence’, brightness (‘L’) decreased from an initial 41.92 for the raw material, to 34.29 and 33.16 after drying (Florence_CD and Florence_UACD, respectively).

For the ‘Alba’ cultivar, brightness decreased from an initial 42.43 for the raw material, to 34.92 and 34.73 after drying (Alba_CD and Alba_UACD, respectively). The direction and degree of changes in the brightness parameter is similar for both drying methods and both cultivars, indicating that factors like cultivar and drying method have no effect on the brightness of strawberry slices. The lower brightness of samples may be explained by the increased concentration of red and yellow coloured chemicals in the samples and/or due to the formation of dark pigments in the Maillard reaction [19]. As shown in Tables 1 and 2, it was observed that the values of redness (‘a’) and yellowness (‘b’), for all dried samples were significantly higher compared to the values for the raw material samples. The initial values of the ‘a’ parameter for Florence_Raw, 27.69 increased to 34.00 and 34.07 for Florence_CD and Florence_UACD, respectively. Similarly, the initial values of the ‘a’ parameter for Alba_Raw, 27.72 increased to 34.94 and 34.14 for Alba_CD and Alba_UACD, respectively. Such observations have also been made in other experiments on dried strawberries [20]. The reason for observing such changes may be the higher impact of increasing the concentration of anthocyanin pigments after drying than the induced degradation of these compounds, as strawberries are a material with an initial high water content. Although the degradation process of anthocyanins exposed to elevated temperature and oxygen during drying is strongly documented [21], in this case the effect of increasing the density of the material was more significant on the final level of ‘a’ and ‘b’ parameters of colour. The values of ΔE , which indicate total colour change, were 10.65 and 10.37 for Florence_CD and Florence_UACD, respectively. For ‘Alba’, the values of this parameter were similar and were 11.14 and 10.55 for Alba_CD and Alba_UACD, respectively. Similar results of ΔE measurement were obtained when the effect of drying temperature on strawberries was investigated, which was 9.53 at 50 °C [22]. Similar levels of colour difference after drying were observed for other berries. In experiments on raspberry, similar results of total colour difference ($\Delta E = 12.41$) were obtained after convective drying with 200 W of ultrasound power [12]. It is worth noting that these values are relatively low compared to the changes observed in experiments involving the drying of plant material. In an experiment comparing different methods of drying sweet peppers, the ΔE parameter took much higher values, ranging from 6.66 to 33.13, depending on the drying method [23]. However, in our results, ΔE for both cultivars is over 10. Such a result indicates a significant change in colour, which is perceived by the human eye as different colours [24].

Table 1. The colour parameters (L, lightness; a, red; b, yellow; ΔE , total colour difference) of strawberry slices of the ‘Florence’ cultivar under the influence of CD or UACD drying.

	L	a	b	ΔE
Florence_UACD	33.16 ± 6.05 b	33.07 ± 6.64 a	15.06 ± 4.04 a	10.37 ± 0.59 a
Florence_CD	34.29 ± 6.31 b	34.00 ± 5.55 a	15.44 ± 3.55 a	10.65 ± 0.20 a
Florence_Raw	41.92 ± 9.82 a	27.69 ± 5.78 b	12.30 ± 4.04 b ¹	-

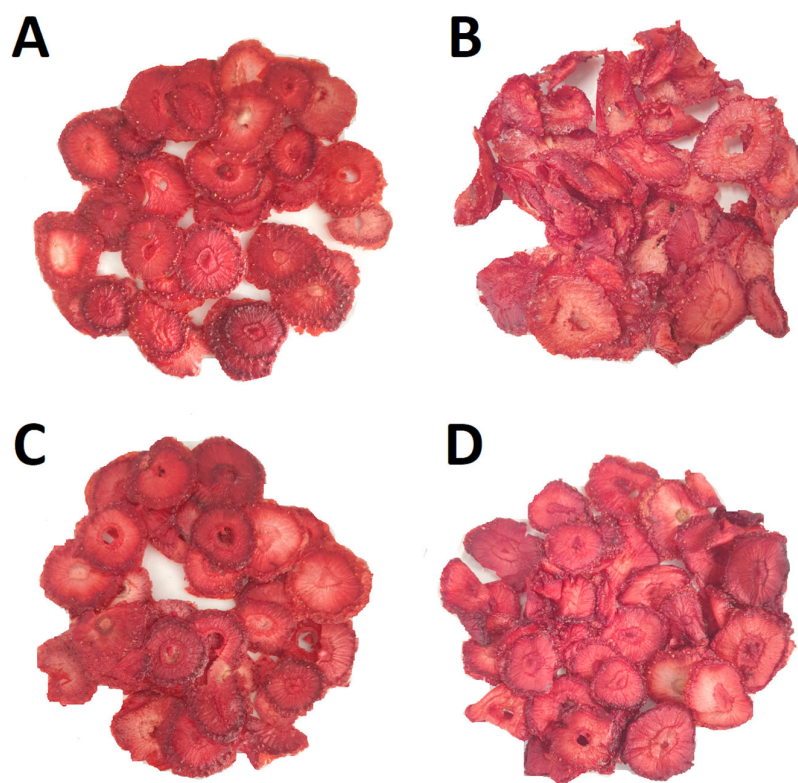
¹ Mean ± standard deviation; the same letters in columns indicate no statistical differences, $p = 0.05$; Tukey’s test ($n = 30$).

The photographs below (Figure 7) show strawberry slices after drying. ‘Alba’ and ‘Florence’ retained their round shape and did not crumble when removed from the drying tray. The material was intensely red for both cultivars. As mentioned earlier, the drying process significantly affected the colour of the slices ($\Delta E > 10$); however, since the colour of the slices became more red as a result of the concentration of dyes, it can be assumed that this change can be seen as a positive in terms of visual evaluation.

Table 2. The colour parameters (L, lightness; a, red; b, yellow; ΔE , total colour difference) of strawberry slices of the ‘Alba’ cultivar under the influence of CD or UACD drying.

	L	a	b	ΔE
Alba_UACD	34.73 $\pm$ 2.99 b	34.14 $\pm$ 2.65 a	15.64 $\pm$ 1.84 a	10.55 $\pm$ 1.43 a
Alba_CD	34.97 $\pm$ 2.31 b	34.94 $\pm$ 2.57 a	16.08 $\pm$ 1.83 a	11.14 $\pm$ 1.70 a
Alba_Raw	42.43 $\pm$ 6.33 a	27.72 $\pm$ 4.37 b	12.61 $\pm$ 2.95 b ¹	-

¹ Mean $\pm$ standard deviation; the same letters in columns indicate no statistical differences, $p = 0.05$; Tukey’s test ($n = 30$).

**Figure 7.** Dried strawberry slices: (A) Alba_CD, (B) Alba_UACD, (C) Florence_CD and (D) Florence_UACD.

3.3. Phenolic Compounds

In general, the drying process resulted in a decrease in phenolic compounds for both cultivars and for both drying methods. However, there have been deviations from this general observation and trends have not been consistent for different cultivars. Analysis of phenolic compounds content in Florence_CD and Florence_UACD samples (Table 3) indicates relatively low losses of these compounds in comparison to the raw material (Florence_Raw). Among flavanols, higher retention of polyphenols was observed in Florence_CD than in Florence_UACD, with the exception of procyanidin B1 where no significant differences were observed between samples. For phenolic acids, the highest concentration of the chlorogenic acid derivative is found in the Florence_CD sample [181.69 mg/100 g DM], followed by Florence_UACD [173.47 mg/100 g DM]. This is higher than in the Florence_Raw [161.48 mg/100 g DM]. No significant differences were observed for ellagic acid. In the flavonol section, where only quercetin-3-rutinoside was detected, the highest concentration of compound was found in the Florence_CD sample than in Florence_UACD. Among the anthocyanins, the most strongly represented group of polyphenols, Florence_CD and Florence_UACD samples show similar concentrations of most anthocyanins. However, in Florence_UACD, pelargonidin-3-(6''-malonylglucoside) and pelargonidin-3-glucoside

content is higher than in Florence_CD. The drying process, regardless of the method, caused a decrease in the content of polyphenols, especially flavanols and anthocyanins, but in the case of the 'Florence' cultivar the method of drying did not have a significant impact.

Table 3. Contents of phenolic compounds (mg/100 g DM) in raw and dried strawberry slices of the 'Florence' cultivar.

	Sample	Florence_CD	Florence_UACD	Florence_Raw
Flavanols	Unidentified flavanol A	30.33 ± 2.36 b	27.78 ± 1.39 a	36.41 ± 0.5 c
	Procyanidin B1	19.36 ± 1.00 a	18.26 ± 1.57 a	21.58 ± 0.74 b
	Catechin	19.88 ± 3.85 b	15.81 ± 1.44 a	19.83 ± 0.3 b
	Unidentified flavanol B	235.73 ± 18.76 b	208.81 ± 11.36 a	259.87 ± 0.29 c
Phenolic acids	Chlorogenic acid derivative	181.69 ± 4.11 c	173.47 ± 7.3 b	161.48 ± 1.91 a
	Ellagic acid	132.36 ± 17.28 a	142.17 ± 32.29 a	110.73 ± 2.69 a
Flavonols	Quercetin-3-rutinoside	39.51 ± 3.42 b	33.43 ± 1.22 a	42.07 ± 2.22 b
Anthocyanins	Cyanidin-3-glucoside	17.22 ± 0.71 a	17.13 ± 0.82 a	19.70 ± 2.20 b
	Pelargonidin-3-glucoside	295.29 ± 4.61 a	309.36 ± 16.17 a	354.18 ± 2.76 b
	Pelargonidin-3-rutinoside	2.73 ± 0.18 a	2.60 ± 0.22 a	3.60 ± 0.16 b
	Cyanidin-3-malonylglucoside	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	Pelargonidin-3-(6''-malonylglucoside)	47.12 ± 1.19 a	49.11 ± 2.17 a	51.51 ± 0.55 b ¹

¹ Mean ± standard deviation; means in rows marked with the same letter do not differ significantly ($p = 0.05$) according to Tukey's test ($n = 6$).

Slightly different changes in polyphenol composition after drying were observed in the case of the 'Alba' cultivar. Analysis of the content of phenolic compounds in Alba_CD, Alba_UACD and Alba_Raw showed significant differences, the direction of which varied from compound to compound (Table 4). Among flavanols, unidentified flavanol A and procyanidin B1 had similar values in all samples. Catechin and unidentified flavanol B had the highest content in Alba_UACD samples (280.92 mg/100 g DM), due to this, total flavanols were highest in Alba_UACD. For phenolic acids, the chlorogenic acid derivative reached the higher content in Alba_UACD samples (65.77 mg/100 g DM), than Alba_CD (60.98 mg/100 g DM). Anthocyanins, among other polyphenols, were the most susceptible group of compounds to drying-induced degradation. Cyanidin-3-glucoside, pelargonidin-3-glucoside, pelargonidin-3-(6''-malonylglucoside) showed the significant higher content in the raw material (10.95, 312.1, 65.51 mg/100 g DM, respectively) than in samples after drying. The drying process significantly reduced levels of those compounds, with the UACD method being less destructive than CD. For example, content of pelargonidin-3-glucoside (whose level among the anthocyanins was the highest in all the samples tested) in the Alba_UACD is about 14.34% higher compared to the Alba_CD. Pelargonidin-3-rutinoside content was also significantly lower in dried samples but no differences were observed between drying method. Cyanidin-3-malonylglucoside, of which content was below 1 mg/100 DM in all of samples, has a higher content in Alba_UACD sample. Total anthocyanin content was higher in UACD samples than CD (315.88 and 276.03 mg/100 g DM, respectively). In the case of 'Alba' cv., the drying process (regardless of method) had a significant effect on the content of phenolic compounds. However, it is worth emphasising that the UACD method generally allowed better preservation of these compounds compared to CD.

Table 4. Contents of phenolic compounds (mg/100 g DM) in raw and dried strawberry slices of ‘Alba’ cultivar.

	Sample	Alba_CD	Alba_UACD	Alba_Raw
Flavanols	Unidentified flavanol A	35.64 ± 1.98 a	38.4 ± 2.64 a	50.48 ± 1.55 b
	Procyanidin B1	39.88 ± 3.43 a	39.57 ± 0.83 a	40.56 ± 1.65 a
	Catechin	16.49 ± 1.62 a	21.87 ± 4.46 b	28.12 ± 0.56 c
	Unidentified flavanol B	269.98 ± 5.07 b	280.92 ± 4.11 c	243.44 ± 2.23 a
Phenolic acids	Chlorogenic acid derivative	60.98 ± 2.66 b	65.77 ± 2.08 c	54.6 ± 2.43 a
	Ellagic acid	78.35 ± 6.36 b	80.44 ± 7.29 b	61.1 ± 5.8 a
Flavonols	Quercetin-3-rutinoside	35.33 ± 1.77 b	39.07 ± 3.73 b	29.84 ± 0.51 a
Anthocyanins	Cyanidin-3-glucoside	8.28 ± 0.63 a	9.09 ± 0.39 b	10.95 ± 0.46 c
	Pelargonidin-3-glucoside	213.92 ± 8.2 a	244.59 ± 6.34 b	312.1 ± 9.08 c
	Pelargonidin-3-rutinoside	7.91 ± 0.83 a	8.46 ± 0.29 a	12.5 ± 0.39 b
	Cyanidin-3-malonylglucoside	0.61 ± 0.17 a	0.96 ± 0.24 b	0.65 ± 0.20 a
	Pelargonidin-3-(6''-malonylglucoside)	45.31 ± 1.59 a	52.78 ± 1.39 b	65.51 ± 1.83 c ¹

¹ Mean ± standard deviation; means in rows marked with the same letter do not differ significantly ($p = 0.05$) according to Tukey’s test ($n = 6$).

3.4. L-Ascorbic Acid, Antioxidant Activity and Water Activity

The results of L-ascorbic acid content and antioxidant activity analyses in raw and dried slices of ‘Florence’ cultivar (Florence_Raw, Florence_CD, Florence_UACD) is shown in Table 5 and of the ‘Alba’ cultivar (Alba_Raw, Alba_CD, Alba_UACD) is shown in Table 6. The recorded levels of L-ascorbic acid in the raw material are similar to levels showed by other authors for other cultivars of ripe strawberry fruit [9,25]. L-ascorbic acid content decreases significantly during drying regardless of drying method, with slightly higher losses in the UACD compared to CD. Florence_Raw was the sample of the highest L-ascorbic acid content (933.74 mg/100 g DM). In Florence_CD, L-ascorbic acid content (678.27 mg/100 g DM) was significantly lower (of about 27.4%) compared to the raw material. Florence_UACD has the lowest content between compared samples, 632.65 mg/100 g DM, a decrease of about 32.3% from the raw sample and 6.7% from Florence_CD. As for antioxidant activity, Florence_Raw has the lowest antioxidant activity (41.74 mg Trolox/g DM) when compared to dried material. The antioxidant activity of Florence_CD increased by 4.4% and Florence_UACD increased by 12% over Florence_Raw. So, despite some polyphenol and L-ascorbic acid degradation during the drying process, the antioxidant activity of the dried samples increased, with the UACD method achieving 7.3% higher values than CD method.

Table 5. L-ascorbic acid (mg/100 g DM), antioxidant activity (mg Trolox/g DM) and water activity in raw and dried strawberry slices of ‘Florence’ cultivar.

Sample	Ascorbic Acid [mg/100 g DM]	Antioxidant Activity [mg Trolox/g DM]	Water Activity
Florence_CD	678.27 ± 17.07 b	43.6 ± 0.51 b	0.58 ± 0.03 b
Florence_UACD	632.65 ± 14.58 a	46.76 ± 0.77 c	0.55 ± 0.02 a
Florence_Raw	933.74 ± 14.28 c	41.74 ± 0.23 a ¹	-

¹ Means in rows marked with the same letter do not differ significantly ($p = 0.05$) according to Tukey’s test ($n = 6$).

Table 6. L-ascorbic acid (mg/100 g DM), antioxidant activity (mg Trolox/g DM) and water activity in raw and dried strawberry slices of the ‘Alba’ cultivar.

Sample	L-Ascorbic Acid [mg/100 g DM]	Antioxidant Activity [mg Trolox/g DM]	Water Activity
Alba_CD	417.78 ± 5.44 a	29.92 ± 0.4 a	0.52 ± 0.01 b
Alba_UACD	412.00 ± 5.84 a	32.16 ± 0.17 b	0.50 ± 0.01 a
Alba_Raw	989.2 ± 6.12 b	32.92 ± 0.06 b ¹	-

¹ Mean ± standard deviation; means in column marked with the same letter do not differ significantly ($p = 0.05$) according to Tukey’s test ($n = 6$).

As in the case of ‘Florence’, in ‘Alba’ cultivar L-ascorbic acid has highest content (989.2 mg/100 g DM) in Alba_Raw sample, significantly higher than in dried samples. A similar decrease after drying (about 58%), compared to the raw material was observed for both drying method (CD and UACD). Differences in the antioxidant activity of dried samples compared to the raw material vary depending on the drying method. In the case of Alba_CD antioxidant activity, a decrease of 9.1% (29.92 mg Trolox/g DM) compared to the raw sample was observed. Alba_UACD antioxidant activity is 32.16 mg Trolox/g DM (a decrease of about 2.3% compared to raw sample), which was determined to be statistically insignificant.

The level of L-ascorbic acid degradation during convective drying depends on many factors, among others: air temperature, air humidity, drying time, material moisture and other material properties [1]. Therefore, the level of degradation of L-ascorbic acid in the material described in this experiment may vary depending on the cultivar and the drying method. In an experiment conducted at the same temperature as in our work (50 °C), on strawberry fruit, significantly lower levels of L-ascorbic acid retention were recorded, with dried samples containing six times less of the vitamin than the raw material [22]. Water activity in dried food is an important characteristic affecting safety and stability of the product during storage. A cut-off value of 0.61 is usually taken to ensure the overall microbiological stability of the product [26]. In this context all dried strawberry samples fall within these limits (Tables 5 and 6). Although water activity also affects organoleptic properties and it should be noted that fruit snacks with a water activity higher than 0.55 lack crunchiness and may therefore be perceived as having less sensory appeal [27].

4. Conclusions

In this study, the use of ultrasound reduced drying time by 35%, on average, for both cultivars. This is a significant difference, enabling energy and time savings during the drying process. However, from our perspective, equal, if not more important, is the quality of the obtained material. Since a shorter drying time typically favours the preservation of bioactive compounds, it might be expected that a higher retention of L-ascorbic acid in material dried by the UACD method would be observed; however, this was not the case. The drying process led to significant losses of L-ascorbic acid in both cultivars tested, with the ‘Alba’ cultivar showing significantly higher losses. In the ‘Alba’ cultivar, L-ascorbic acid losses exceeded 57% regardless of whether CD or UACD was applied. In contrast, the ‘Florence’ cultivar showed higher retention rates, with 68% retention for UACD and 73% for CD. In terms of antioxidant activity, the UACD method resulted in smaller decreases compared to CD. Interestingly, samples dried using UACD retained higher levels of antioxidant activity equivalent to those of raw fruit, suggesting that UACD better preserves the bioactive compounds responsible for this property. In the ‘Florence’ cultivar, antioxidant activity even exceeded the levels observed in the raw material, suggesting increased availability of some compounds during extraction. Thus, the UACD method seems to be more favourable for producing materials with high antioxidant

activity, although it is less effective in preserving L-ascorbic acid in dried strawberry slices. No statistically significant differences in colour parameters were observed between drying methods for both cultivars. However, higher retention of anthocyanins, a key contributor to strawberry redness, was noted in Alba_UACD samples, but differences were too small to be detected by colour measurements. We acknowledge that one of the limitations of our study is the lack of detailed chemical profiling using the LC-MS method, which restricts the comprehensive characterization of polyphenolic compounds. Future research should address this issue by using advanced analytical techniques to enable a more thorough understanding of the effects of ultrasound on the structural properties of polyphenols. Such knowledge can, among other things, explain the effect of ultrasound treatment on the stability of these compounds.

In technological experiments, it is relatively uncommon to compare the effects of treatments or processes on different cultivars of the same fruit species in the same study, as is the case here. It is usually assumed that the fruit of a given cultivar represents the species. Such an approach ignores the conclusions of many research papers in which differences in the impact of cultivar have been demonstrated, of which this paper is also an example. This study challenges this assumption by highlighting significant differences in the quality of dried materials obtained using CD or UACD methods. Explaining the cause of these differences is an important issue that needs to be clarified. A separate issue is the degree of fruit maturity which, from a research perspective, should also be taken into account. Thus, the potential reason for these differences may be the degree of maturity of the fruit taken for drying experiment. Strawberry ripening is a complex process that involves significant changes in the physical and chemical properties of the fruit. The degree of ripeness, which in this study was assessed visually during sample preparation, can affect, among other things, fruit structure. For example, differences in drying dynamics between cultivars may be explained by material characteristics such as fruit firmness. A porous microstructure facilitates mass transfer processes and enhances ultrasound wave propagation through the material. Conversely, structural damage to the fruit tissue can hinder water migration toward the surface of the drying product, thereby limiting the efficiency of moisture removal. In addition to the structure, the effectiveness of ultrasound-assisted drying is significantly influenced by the water content of the material. During the initial phase of drying, the presence of high moisture content and a more open cellular structure promote effective ultrasound energy absorption. However, in the later stages, the formation of a dense, compact structure impedes further propagation of ultrasonic waves, leading to an increased reflection of ultrasound wave from the material's surface. Experimental observations indicated that the 'Florence' cultivar exhibited a longer drying time compared to 'Alba', resulting in prolonged exposure of high-moisture tissue to elevated temperatures (during drying). Under such conditions, thermally induced chemical and enzymatic reactions are intensified, which may account for the lower retention of anthocyanins in the 'Florence' samples. In contrast, the shorter exposure time of the 'Alba' cultivar likely contributed to higher preservation of thermolabile bioactive compounds. It should also be noted that in this experiment, during the drying process, only the temperature of the drying air was monitored, whereas the temperature of the material itself was not measured. From an engineering standpoint, monitoring of the product temperature would provide valuable insights; however, its measurement poses technical challenges due to the requirement for non-contact methods, such as infrared pyrometry, which may yield limited accuracy depending on surface emissivity, which can change during drying. The observed differences in both drying dynamics and material quality across cultivars underscore the need for further research. In conclusion, the use of ultrasonic assistance in the drying process of strawberry slices significantly reduces the drying time and the dried material

has quality parameters comparable to those achieved in convection drying. This finding underscores the prospect of integrating ultrasonic generators into chamber dryers without the need for major design modifications, thus reducing investment costs and facilitating the industrial application of this technology.

Author Contributions: Conceptualization: J.P., M.M.-F. and K.C.; methodology: J.P., K.C., M.M.-F. and J.S.-G.; validation: M.M.-F. and N.D.; investigation: N.D.; resources: J.P.; data curation: M.M.-F.; writing—original draft preparation: J.P.; writing—review and editing: K.C. and N.D.; visualization: J.P.; supervision: M.M.-F. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Norwegian Financial Mechanism. Project title: Improving plant quality and economy for a more sustainable and efficient berry production. Contract number: NOR/POLNOR/QualityBerry/0014/2019-00.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

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

Acknowledgments: The authors thank the staff of the Fruit and Vegetable Storage and Processing Department for their assistance.

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

References

1. Omolola, A.O.; Jideani, A.I.O.; Kapila, P.F. Quality Properties of Fruits as Affected by Drying Operation. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2017**, *57*, 95–108. [CrossRef]
2. Zhang, Y.; Abatzoglou, N. Review: Fundamentals, Applications and Potentials of Ultrasound-Assisted Drying. *Chem. Eng. Res. Des.* **2020**, *154*, 21–46. [CrossRef]
3. Wu, J.; Zhang, L.; Fan, K. Recent Advances in Ultrasound-Coupled Drying for Improving the Quality of Fruits and Vegetables: A Review. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2022**, *57*, 5722–5731. [CrossRef]
4. Musielak, G.; Mierzwa, D.; Kroehnke, J. Food Drying Enhancement by Ultrasound—A Review. *Trends Food Sci. Technol.* **2016**, *56*, 126–141. [CrossRef]
5. Clemente, G.; Sanjuán, N.; Cárcel, J.A.; Mulet, A. Influence of Temperature, Air Velocity, and Ultrasound Application on Drying Kinetics of Grape Seeds. *Dry. Technol.* **2014**, *32*, 68–76. [CrossRef]
6. Schössler, K.; Thomas, T.; Knorr, D. Modification of Cell Structure and Mass Transfer in Potato Tissue by Contact Ultrasound. *Food Res. Int.* **2012**, *49*, 425–431. [CrossRef]
7. Simpson, D. The Economic Importance of Strawberry Crops. In *The Genomes of Rosaceous Berries and Their Wild Relatives*; Hytönen, T., Graham, J., Harrison, R., Eds.; Compendium of Plant Genomes; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018; pp. 1–7, ISBN 978-3-319-76019-3.
8. FAOSTAT 2023. Available online: <https://www.fao.org/Faostat/En/#data/QCL> (accessed on 1 May 2025).
9. Newerli-Guz, J.; Śmiechowska, M.; Drzewiecka, A.; Tylingo, R. Bioactive Ingredients with Health-Promoting Properties of Strawberry Fruit (*Fragaria x Ananassa* Duchesne). *Molecules* **2023**, *28*, 2711. [CrossRef]
10. Nielsen, I.L.F.; Haren, G.R.; Magnussen, E.L.; Dragsted, L.O.; Rasmussen, S.E. Quantification of Anthocyanins in Commercial Black Currant Juices by Simple High-Performance Liquid Chromatography. Investigation of Their pH Stability and Antioxidative Potency. *J. Agric. Food Chem.* **2003**, *51*, 5861–5866. [CrossRef]
11. Re, R.; Pellegrini, N.; Proteggente, A.; Pannala, A.; Yang, M.; Rice-Evans, C. Antioxidant Activity Applying an Improved ABTS Radical Cation Decolorization Assay. *Free Radic. Biol. Med.* **1999**, *26*, 1231–1237. [CrossRef]
12. Kowalski, S.J.; Pawłowski, A.; Szadzińska, J.; Łechtańska, J.; Stasiak, M. High Power Airborne Ultrasound Assist in Combined Drying of Raspberries. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2016**, *34*, 225–233. [CrossRef]
13. Sabarez, H.T.; Gallego-Juarez, J.A.; Riera, E. Ultrasonic-Assisted Convective Drying of Apple Slices. *Dry. Technol.* **2012**, *30*, 989–997. [CrossRef]
14. Kowalski, S.J.; Mierzwa, D.; Stasiak, M. Ultrasound-Assisted Convective Drying of Apples at Different Process Conditions. *Dry. Technol.* **2017**, *35*, 939–947. [CrossRef]

15. Santacatalina, J.V.; Contreras, M.; Simal, S.; Cárcel, J.A.; Garcia-Perez, J.V. Impact of Applied Ultrasonic Power on the Low Temperature Drying of Apple. *Ultrason. Sonochem.* **2016**, *28*, 100–109. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Bantle, M.; Hanssler, J. Ultrasonic Convective Drying Kinetics of Cliffish During the Initial Drying Period. *Dry. Technol.* **2013**, *31*, 1307–1316. [[CrossRef](#)]
17. Aversa, M.; Van Der Voort, A.-J.; De Heij, W.; Tournois, B.; Curcio, S. An Experimental Analysis of Acoustic Drying of Carrots: Evaluation of Heat Transfer Coefficients in Different Drying Conditions. *Dry. Technol.* **2011**, *29*, 239–244. [[CrossRef](#)]
18. Beck, S.M.; Sabarez, H.; Gaukel, V.; Knoerzer, K. Enhancement of Convective Drying by Application of Airborne Ultrasound—A Response Surface Approach. *Ultrason. Sonochem.* **2014**, *21*, 2144–2150. [[CrossRef](#)]
19. Murata, M. Browning and Pigmentation in Food through the Maillard Reaction. *Glycoconj. J.* **2021**, *38*, 283–292. [[CrossRef](#)]
20. Biernacka, B.; Dziki, D.; Rudy, S.; Krzykowski, A.; Polak, R.; Dziki, L. Influence of Pretreatments and Freeze-Drying Conditions of Strawberries on Drying Kinetics and Physicochemical Properties. *Processes* **2022**, *10*, 1588. [[CrossRef](#)]
21. Enaru, B.; Dreţcanu, G.; Pop, T.D.; Stănilă, A.; Diaconeasa, Z. Anthocyanins: Factors Affecting Their Stability and Degradation. *Antioxidants* **2021**, *10*, 1967. [[CrossRef](#)]
22. Tekgöl, Y.; Erten, E.S. Quality Properties and Headspace Volatiles of Hot Air-Dried Strawberries. *An. Acad. Bras. Ciênc.* **2022**, *94*, e20201277. [[CrossRef](#)]
23. Deng, L.-Z.; Yang, X.-H.; Mujumdar, A.S.; Zhao, J.-H.; Wang, D.; Zhang, Q.; Wang, J.; Gao, Z.-J.; Xiao, H.-W. Red Pepper (*Capsicum Annuum* L.) Drying: Effects of Different Drying Methods on Drying Kinetics, Physicochemical Properties, Antioxidant Capacity, and Microstructure. *Dry. Technol.* **2018**, *36*, 893–907. [[CrossRef](#)]
24. Mokrzycki, W.S.; Tatol, M. Colour Difference ΔE —A Survey. *Mach. Graph. Vis.* **2011**, *4*, 383–411.
25. Olsson, M.E.; Ekvall, J.; Gustavsson, K.-E.; Nilsson, J.; Pillai, D.; Sjöholm, I.; Svensson, U.; Åkesson, B.; Nyman, M.G.L. Antioxidants, Low Molecular Weight Carbohydrates, and Total Antioxidant Capacity in Strawberries (*Fragaria* × *Ananassa*): Effects of Cultivar, Ripening, and Storage. *J. Agric. Food Chem.* **2004**, *52*, 2490–2498. [[CrossRef](#)]
26. Tapia, M.S.; Alzamora, S.M.; Chirife, J. Effects of Water Activity (a_w) on Microbial Stability as a Hurdle in Food Preservation. In *Water Activity in Foods*; Barbosa-Cánovas, G.V., Fontana, A.J., Schmidt, S.J., Labuza, T.P., Eds.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2020; pp. 323–355, ISBN 978-1-118-76831-0.
27. Roudaut, G. Water Activity and Physical Stability. In *Water Activity in Foods*; Barbosa-Cánovas, G.V., Fontana, A.J., Schmidt, S.J., Labuza, T.P., Eds.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2020; pp. 255–269, ISBN 978-1-118-76831-0.

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

**Oświadczenie o wkładzie merytorycznym Autorów
w opracowaniu publikacji ^{1/}**

Jan Piecko

Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy w Skierniewicach

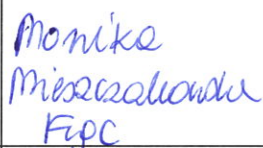
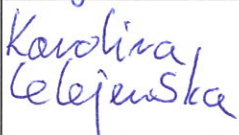
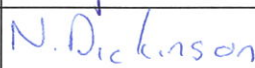
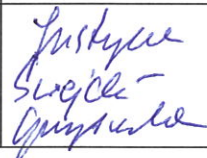
Oświadczenie dotyczy publikacji pt. :

**Wpływ suszenia konwekcyjnego wspomaganego ultradźwiękami na retencję związków
bioaktywnych i szybkość suszenia plasterków truskawek**

**Effect of Ultrasound-Assisted Convective Drying on retention of bioactive compounds
and drying rate of strawberry slices**

Applied Sciences, 15(16), 8947.

Jan Piecko , Monika Mieszczakowska-Frąc, Karolina Celejewska, Niall Dickinson, and
Justyna Szwej-da-Grzybowska

Lp.	Nazwisko i imię Autora	Opis wkładu merytorycznego	Afiliacja	Podpis Autora
1	Piecko Jan	Analiza literatury, przeprowadzenie eksperymentu, analiza statystyczna wyników przygotowywanie treści artykułu,	Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy	
2	Mieszczakowska-Frąc Monika	Redagowanie tekstu, pomoc w przygotowywaniu treści artykułu, wsparcie merytoryczne	Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy	
3	Karolina Celejewska	Pomoc w przygotowywaniu treści artykułu	Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy	
4	Niall Dickinson	Pomoc w przygotowywaniu treści artykułu	Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy	
5	Justyna Szwejda-Grzybowska	analiza HPLC, zestawienie wyników	Instytut Ogrodnictwa - Państwowy Instytut Badawczy	

¹ Wypełnia pierwszy Autor, a jeśli pierwszy Autor jest spoza Jednostki organizacyjnej współprowadzącej SD, do której przypisany jest doktorat, najwyżej wymieniany wśród Autorów pracownik danej jednostki współprowadzącej SD

Uprawnienia dotyczące wykorzystania publikacji

Nie są wymagane żadne specjalne uprawnienia do ponownego wykorzystania całości lub części artykułów opublikowanych przez MDPI, w tym rysunków i tabel. W przypadku artykułów opublikowanych na licencji Creative Common CC BY typu open access, każda część artykułu może być ponownie wykorzystana bez zezwolenia, pod warunkiem że zostanie wyraźnie cytowana. Ponowne wykorzystanie artykułu nie oznacza poparcia ze strony autorów lub MDPI. Ponadto autorzy nie potrzebują specjalnego zezwolenia, aby przesłać swoje badania do zewnętrznych repozytoriów. Polityka ta obejmuje wszystkie wersje artykułu, w tym wersję przesłaną, zaakceptowaną i opublikowaną.

Redakcja MDPI

Załącznik 4

Publikacja 4

Piecko, J.; Mieszczakowska-Frać, M.; Dickinson, N.J.; Wrzodak, A.; Celejewska, K.; Frøst, M.B.; Lange, B.; Dandanell, C.; Lewandowicz, J.; Jankowska, P. 2026. Ultrasound Treatment in Berry Puree Production: Effects on Sensory, Rheological, and Chemical Properties. *Molecules*, 31, 260.

DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules31020260>.

Impact Factor: 4.6 , MNiSW 140 pkt.

Article

Ultrasound Treatment in Berry Puree Production: Effects on Sensory, Rheological, and Chemical Properties

Jan Piecko ^{1,*} , Monika Mieszczakowska-Frać ¹ , Niall J. Dickinson ¹ , Anna Wrzodak ¹ ,
Karolina Celejewska ¹ , Michael Bom Frøst ² , Belinda Lange ², Charlotte Dandanell ², Jacek Lewandowicz ³ 
and Patrycja Jankowska ³

- ¹ Fruit and Vegetable Storage and Processing Department, The National Institute of Horticultural Research, Konstytucji 3 Maja 1/3, 96-100 Skierniewice, Poland; monika.mieszczakowska@inhort.pl (M.M.-F.); niall.dickinson@inhort.pl (N.J.D.); anna.wrzodak@inhort.pl (A.W.); karolina.celejewska@inhort.pl (K.C.)
² Department of Food Science, Design and Consumer Behaviour, University of Copenhagen, Rolighedsvej 26, 1958 Frederiksberg, Denmark; mbf@food.ku.dk (M.B.F.); belinda@food.ku.dk (B.L.); chd@food.ku.dk (C.D.)
³ Department of Food Concentrates and Starch Products, Prof. Waław Dąbrowski Institute of Agriculture and Food Biotechnology—State Research Institute, Starołęcka 40, 61-361 Poznań, Poland; jacek.lewandowicz@ibprs.pl (J.L.); patrycja.jankowska@ibprs.pl (P.J.)
 * Correspondence: jan.piecko@inhort.pl

Abstract

Berries are a valuable source of health-promoting substances, including vitamins, microelements, and polyphenols. Optimising the extraction efficiency of these compounds during processing is crucial to minimise their loss into the waste stream. Ultrasound technology is recognised as a sustainable and promising tool for improving extraction; however, previous literature has not sufficiently addressed the optimal point of its application in fruit puree processing, and its impact on the sensory properties of the final product has only occasionally been explored. As one of the first reports, this study aimed to determine the optimal moment for ultrasound application within a puree production scheme. In the second stage of the experiment, four recipes based on strawberry and haskap berry were tested. The results demonstrated the potential for enhancing sensory quality of puree by using an ultrasound treatment. It was found that the ultrasound-treated purees showed significantly higher pectin levels and improved rheological properties, while the content of anthocyanins and L-ascorbic acid remained mainly unchanged. This indicates that the non-thermal nature of ultrasound treatment can induce positive changes from a sensory and rheological point of view without causing the degradation of health-promoting compounds, offering a viable strategy for improving berry puree quality.

Keywords: haskap berry; strawberry; ultrasound; puree production; anthocyanins; viscosity



Academic Editor: Nazimah Hamid

Received: 12 December 2025

Revised: 2 January 2026

Accepted: 7 January 2026

Published: 12 January 2026

Copyright: © 2026 by the authors.

Licensee MDPI, Basel, Switzerland.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

1. Introduction

Berries such as strawberries (*Fragaria × ananassa*) and haskap berries (*Lonicera caerulea*) are a rich source of health-promoting compounds and have high processing value [1,2]. The health-promoting properties of berries are primarily due to polyphenolic compounds, including anthocyanins [3], which are pigments that colour the skin of these fruits, usually dark blue. These fruits are also a source of numerous vitamins, microelements, and dietary fibre [4]. Alongside juices, the production of berry purees is one of the key methods of processing berry fruits, and in many cases, it is the optimal method [5]. Fruit purees, especially those made from berries, are a valuable component in the creation of other products,

such as puree juices, i.e., smoothies, a range of other products, and are also recently sold as ready-to-eat products. Due to the level of nutrient transfer from the raw material to the final product, purees deserve much more attention than juices, as they usually contain significantly more dietary fibre and minerals [6]. Due to their short shelf life, berries undergo various preservation and processing methods, the main commercial applications of which are freezing, juice and purée production, drying, fermentation, and extract production [7]. However, in general, food processing causes a partial loss of bioactive compounds [8], and attempts to optimise the process are still being researched. One direction in production optimisation may be the use of ultrasound, which is successfully used both in analytical methods in laboratories and in food industry production [9]. The use of ultrasound in food processing is a versatile and highly effective technique used in industry to produce, among other things, uniform mixtures [10]. The basic mechanism is based on acoustic cavitation: high-frequency sound waves generate alternating cycles of high and low pressure in the liquid, causing microbubbles to form, expand, and collapse rapidly [11]. This process creates intense local shear forces, shock waves, and micro-jets that grind particles, break down cell walls, and disperse or emulsify even highly viscous and difficult-to-process liquids [10]. Based on literature data, the modification of rheological properties, including viscosity, particle size distribution, transformation, and pectin content, are among the most important parameters subject to change as a result of ultrasound application [12]. In terms of product bioactivity, carotenoids, anthocyanins, and ascorbic acid are among the compounds whose content may change under the influence of ultrasound [13]. Ultrasound treatment can also increase process efficiency [14] and therefore deserves attention, both for its economic value and for the current trend towards reducing waste production.

Although the fundamental mechanisms of US are well established, its specific application and optimisation parameters for raw materials such as haskap berry and strawberry remain underexplored, particularly in the context of minimising production waste and maximising the extraction of bioactive compounds from berry skins generated as by-products during puree production. Therefore, this study investigates the impact of ultrasound treatment of fruit pulp on the quality parameters of the resulting purees, with the aim of enhancing extraction efficiency and promoting beneficial rheological properties. The experimental design comprised two stages: first, to identify the optimal production step for ultrasound application, and second, to evaluate the effect of the composition of ultrasound-treated fruit pulp on the quality of the final strawberry–haskap berry puree. The obtained purees were analysed for L-ascorbic acid, anthocyanins, and total pectin content, while sensory attributes and rheological properties were also assessed.

2. Results and Discussion

2.1. Stage I of Experiment—Processing Method Selection

Figure 1 below shows the results of the puree processing yield, total polyphenol content (TPC), and total anthocyanin content (TAC) in purees obtained from haskap berries using five production methods (P1–P5). The puree yield was calculated as the percentage of obtained puree weight compared to raw material weight. This value has the greatest economic significance because it directly reflects the efficiency of puree production. The P2 and P4 methods, in which US treatment was applied before or after pureeing, were characterised by the highest efficiency, amounting to $86.7 \pm 2.6\%$ and $82.2 \pm 1.7\%$, respectively. Method P2 (US before pureeing) had an increase in efficiency of 6.6% compared to P1 (control). The puree yield obtained with method P4 did not differ significantly from the methods P1 ($80.1 \pm 0.5\%$) and P3 ($81.2 \pm 0.6\%$). A significantly lower yield was obtained with method P5 ($77.4 \pm 0.6\%$), which was not ultrasound-assisted and in which the pulp temperature was lower ($50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Replacing the heating stage (pulp heating up to $80\text{ }^{\circ}\text{C}$)

with ultrasound treatment (method P3) did not result in higher efficiency compared to P1 (control). However, treatment P3 significantly increased the yield of the puree compared to the control sample P5. This observation clearly confirms that, in addition to the temperature effect, US definitely had a beneficial impact on processing yield. Comparing the highest- and the lowest-yielding methods (P2 and P5, respectively), the difference was 9.3%.

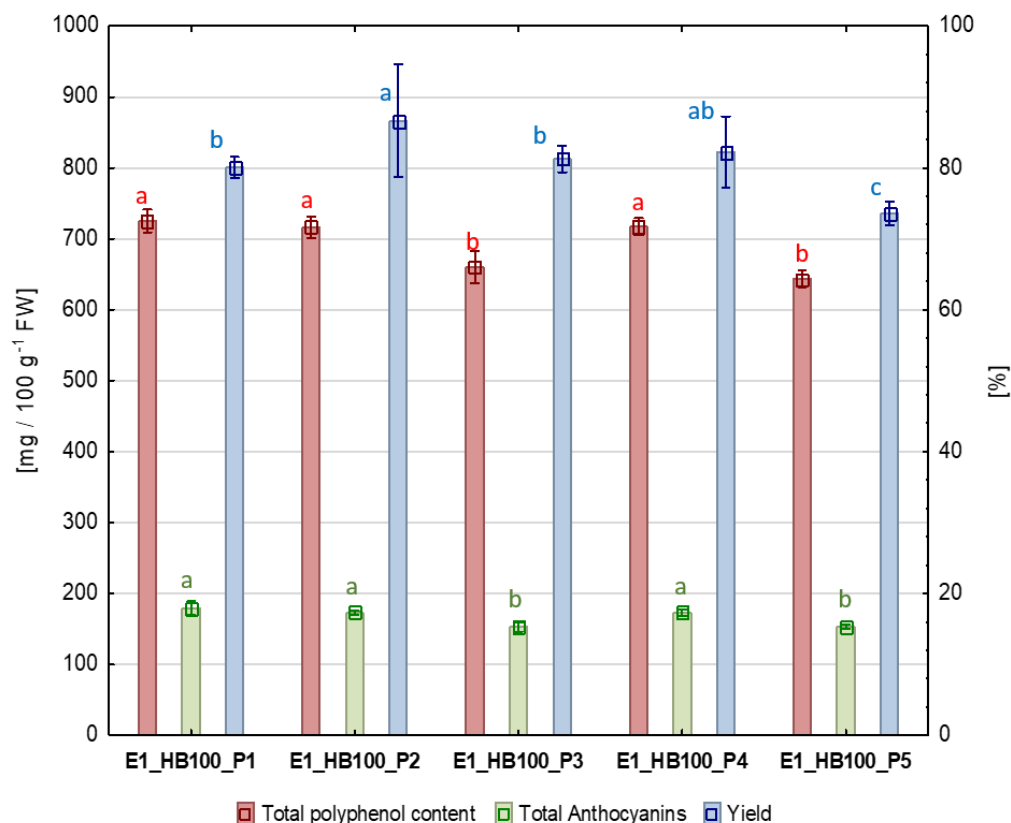


Figure 1. Processing yield [%], TPC (total polyphenols content), and TAC (total anthocyanins content) [mg 100 g⁻¹ FW] in haskap berry purees using ultrasound. P1: puree without ultrasound treatment; P2: ultrasound treatment before pureeing; P3: ultrasound treatment before pureeing, without heating; P4: ultrasound treatment after pureeing; and P5: puree heated to match the temperature reached during ultrasound processing. Means marked with the same letter and in the same color do not differ significantly ($p < 0.05$) according to HSD Tukey's test ($n = 6$).

To determine the impact of ultrasound treatment on the content of health-promoting compounds, an analysis of TPC and TAC was performed (Figure 1). The TPC in objects P1, P2, and P4 did not differ significantly from each other and averaged 719.67 ± 13.74 mg 100 g⁻¹ FW. The content of these compounds in this group was 17.8% higher than in objects P3 and P5. Methods P3 and P5 did not differ significantly from each other in terms of the content of these compounds and averaged 651.9 ± 18.38 mg 100 g⁻¹ FW. Due to the higher susceptibility of anthocyanins to degradation under the influence of processing (mainly under the influence of temperature, oxygen, and light), they can be a good indicator of the overall loss of nutritional value of food. An analysis of TAC was performed to supplement the information on the quality of the purees obtained. Similar to TPC, objects P1, P2, and P4 did not differ significantly in terms of the amount of TAC, averaging 175.08 ± 6.40 mg/100 g⁻¹ FW. The total anthocyanin content in objects P3 and P5 also did not differ significantly and averaged 153.10 ± 4.71 mg/100 g⁻¹ FW. Neither adding US treatment to the production scheme nor replacing heating with ultrasound treatment resulted in higher TPC and TAC in the purees compared to control method (P1). Processing temperature had a greater positive impact on the content of these compounds than the use

of ultrasound. There are some discrepancies here with regard to the available literature. In an article concerning the impact of ultrasound at different frequencies and power levels on enzyme activity and bioactive compounds in strawberry puree, the results indicated a high potential for this technology to replace temperature treatment [15], which was not reflected in the results we received. Furthermore, no negative impact of ultrasound was observed; in P4, where ultrasound was used as an additional treatment, there was no degradation of these compounds. A study examining the content of phenolic compounds at different stages of digestion of haskap berry puree showed that the use of ultrasound to prepare the puree increased the TPC and TAC of the digested samples, thereby enhancing their antioxidant capacity and antiproliferative activity [16]. An increase in TPC of digested samples was observed with increasing ultrasound power. In contrast, the opposite was observed for anthocyanins: the higher the power, the lower the TAC level. These findings, combined with the results obtained in our study, confirm the potential of ultrasound as a tool that can help combine economic and health-promoting aspects in berry processing. In studies on raspberry and blueberry purees, US had a slightly different effect depending on the raw material: it increased the total flavonoid content, reduced TAC, and increased TPC only in raspberry puree [17]. However, in this case, 400 watts of ultrasound power was applied to a 500 mL sample, and the purees were diluted 1:1 with distilled water before treatment. This reduced density may have increased the efficiency of US energy transfer to the sample, which may explain these observations. However, in a study using a completely different material—prebiotic soursop whey beverage—the total polyphenol content increased with increasing ultrasound power, despite a significant increase in temperature [18]. In this case, a power of 200 to 600 W was applied to a 25 mL sample, and the treatment lasted 3 min. Similarly, in experiments with fruit and vegetable juices (orange, lime, carrot, and spinach juice), ultrasound proved to be significantly better in terms of preserving TPC compared to thermal pasteurisation [19]. For a 250 mL sample, a power of 100 W was applied at a frequency of 20 kHz for 15 min, while maintaining the temperature at 30 °C. These experiments confirmed a similar observation that we noted in our work, namely that ultrasound itself does not have a negative effect on the TPC. This conclusion is true, but it has its limitations. In an experiment using a product slightly thicker than juice—a smoothie, and therefore somewhat more similar to the product tested in this study—US treatment for 1–10 min in some cases led to a reduction in TPC, especially at maximum amplitude values [20]. In this experiment, 9.2, 13.3, and 22.8 W cm^{−2} of ultrasound power were applied to a 200 mL of sample. Therefore, it can be assumed that changes in bioactive compounds depend largely on the parameters used in the experiments, particularly processing time and applied power. Clearly, the nature and properties of the matrix also have an impact on TPC levels following US treatment. The observed effect of ultrasound on the content of polyphenols and anthocyanins may also depend on the characteristics and content of other compounds in the treated material. The effect of AA content on anthocyanin degradation has been partially investigated [21], indicating that this process may be slowed down by its presence in the product. Therefore, AA content in the material may affect the observed anthocyanin degradation level. The effect of pH on anthocyanin extraction was also investigated. For example, in a study on anthocyanins extraction from jaboticaba berries, the optimal extraction conditions in an ultrasonic bath at a frequency of 40 kHz were a pH of 1.5 and a treatment time of 30 min [22].

Viscosity is one of the fundamental parameters determining the quality of fruit purees. Higher viscosity contributes to product stability during storage [23] and, as an important rheological property, also positively influences sensory perception [24]. Among the tested samples, P2 showed the highest apparent viscosity (1108 mPa·s), followed by P1 (698 mPa·s) (Table 1). The remaining purees (P3, P4, and P5) exhibited significantly lower

values, ranging from 335 to 170 mPa·s. The obtained results suggest that the application of ultrasound as an additional processing step (method P2) may enhance the apparent viscosity of puree.

Table 1. Apparent viscosity [mPa·s] of the haskap berry puree using ultrasound.

Sample	Apparent Viscosity [mPa·s]
E1_HB100_P1	698 ± 82 c
E1_HB100_P2	1108 ± 100 d
E1_HB100_P3	185 ± 15 a
E1_HB100_P4	335 ± 43 b
E1_HB100_P5	170 ± 22 a

P1: puree without ultrasound treatment; P2: ultrasound treatment before pureeing; P3: ultrasound treatment before pureeing, without heating; P4: ultrasound treatment after pureeing; and P5: puree heated to match the temperature reached during ultrasound processing. Values are expressed as mean ± SD ($n = 6$). Different letters indicate statistically significant differences between samples ($p < 0.05$) according to HSD Tukey's test.

The available literature on this subject is limited. Much more often than purees, juices or nectars have been the subject of research concerning ultrasound treatment effects on viscosity. For example, in the case of mango nectar enriched with pectins, ultrasound treatment initially increases, but over time gradually decreases, the apparent viscosity [25]. Similar results were obtained for strawberry pulp [26], with sudden changes in rheological properties. In this case, the reduction in product viscosity was associated with a decrease in the molecular weight of pectin compounds. The observation was related to the degradation of water-soluble pectins. These results indicate that US treatment must be tailored to the desired effects. A decrease in the apparent viscosity of orange juice has also been observed with increasing ultrasound processing time [27]. Similar results have been reported for changes in the viscosity of tomato juice [28] and fruit smoothies, in cases which ultrasound treatment led to a reduction in product viscosity [20], especially at higher amplitudes and longer treatment times. The effect of ultrasound on the rheological properties and consistency of apple, cranberry, and berry juices has also been observed, and it can be concluded that ultrasound can shape rheological properties, but the effects depend on specific process settings like amplitude, duration, and treatment temperature [19].

By integrating the results of TPC, TAC, yield, and apparent viscosity of the obtained purees, the P2 method was selected as the most promising. Although it did not increase the content of bioactive compounds, it significantly improved the rheological properties of the puree sample and had a positive effect on yield. In the further part of the study, the results discussed will concern the comparison of the quality of the purees obtained by using this method (P2) with the control puree (obtained by the P1 method).

2.2. Result for Stage II of the Experiment—Evaluation of the Ultrasound Treatment for Different Recipes

2.2.1. Microrheological Properties

Microrheological properties of purees were characterised by elasticity index (EI), fluidity index (FI), solid–liquid balance (SLB), and macroscopic viscosity index (MVI) (Table 2). The analysis was performed to compare the impact of US treatment and puree recipes on product properties that may affect, among other things, the sensory perception of puree and its stability. The above parameters refer to analyses performed on a microscopic scale and only partially and to a limited extent reflect the macroscopic properties of the products. The recipe and processing conditions caused significant changes in the viscoelastic behaviour of the samples studied. Strawberry puree (S100_P1) when compared to haskap berry puree

(HB100_P1), had significantly higher EI and SLB ($p < 0.05$). If we also take into account the fact that this sample had a higher FI and lower MVI (although neither was statistically significant), we can conclude that parameters indicate liquid-like characteristics of the S100_P1 puree, although EI values still reflect relatively higher elasticity compared to the other samples. In the case of S60_HB40_P1 and S80_HB20_P1 purees, increasing the proportion of haskap berries led to a decrease in EI and an increase in MVI. This observation can be explained by the properties of the raw material: haskap berries have a significantly higher proportion of solid fragments, such as a much thicker skin than strawberry fruit. Thus, in the case of HB purees, suspended skin fragments and particle agglomerates may affect all microrheological results. The effect of US was also quite consistent for all samples regardless of their composition, leading to more liquid-like behaviour. This was manifested by all microrheological parameters studied, i.e., a decrease in MVI and EI and an increase in FI and SLB, although not always statistically significant at $p < 0.05$. The above observations are in line with studies that indicate that US treatment may lead to depolymerisation of hydrocolloids [25]. However, this would result in a noticeable reduction in the viscosity of the product, which is not the case here (as shown in Table 1, changes in the opposite direction), indicating that the phenomena are more complex and ambiguous in interpretation.

Table 2. Microrheological properties of haskap berry and strawberry purees produced with ultrasound treatment before pureeing.

Sample	Elasticity Index (nm^{-2})	Fluidity Index (Hz)	Solid–Liquid Balance (-)	Microscopic Viscosity Index ($\text{nm}^{-2}\cdot\text{s}$)
HB100_P1	0.0017 ± 0.0001 ab	0.72 ± 0.29 a	0.52 ± 0.00 a	0.0050 ± 0.0021 c
HB100_P2	0.0013 ± 0.0001 a	2.84 ± 1.77 ab	0.60 ± 0.03 bc	0.0010 ± 0.0005 abc
S100_P1	0.0030 ± 0.0004 c	0.94 ± 0.58 a	0.62 ± 0.02 bc	0.0035 ± 0.0019 abc
S100_P2	0.0017 ± 0.0000 ab	5.32 ± 0.25 b	0.72 ± 0.01 d	0.0004 ± 0.0000 a
S60_HB40_P1	0.0021 ± 0.0003 b	0.80 ± 0.31 a	0.55 ± 0.03 ab	0.0047 ± 0.0024 bc
S60_HB40_P2	0.0014 ± 0.0001 a	3.89 ± 2.04 ab	0.63 ± 0.06 bc	0.0008 ± 0.0007 ab
S80_HB20_P1	0.0023 ± 0.0004 b	1.01 ± 0.51 a	0.59 ± 0.01 ab	0.0035 ± 0.0012 abc
S80_HB20_P2	0.0015 ± 0.0001 ab	5.13 ± 1.39 b	0.68 ± 0.01 cd	0.0004 ± 0.0001 a

P1: without ultrasound treatment; P2: with ultrasound treatment. HB: haskap berry; S: strawberry; followed by the puree proportion of 20 to 100%. Means for samples marked with the same letters do not differ significantly ($p < 0.05$) according to Tukey's HSD test ($n = 6$).

To analyse more deeply the relationship between the microrheological properties of the investigated fruit purees, PCA was performed. The PCA data plots represent over 85% of the total variance between samples (Figure 2). The first principal component primarily accounts for discrimination among samples based on their composition, which is largely correlated with variations in sample viscosity. On the other hand, the second principal component differentiates samples based on ultrasound treatment, which can be linked to differences in elastic and viscous behaviour. It should also be noted that S100 puree (regardless of ultrasound treatment) had the most distinct microrheological properties. This also indicates that even a relatively small amount of haskap berry can lead to changes in the microrheology of the puree.

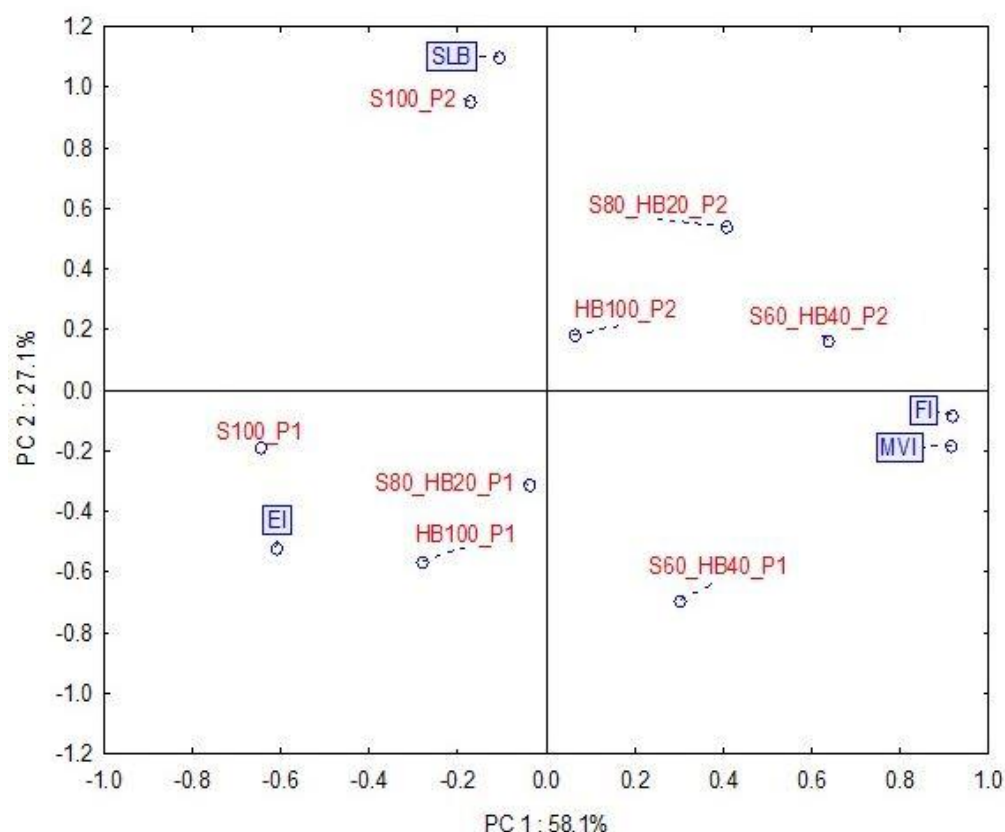


Figure 2. PCA score plot for microrheological properties of haskap berry and strawberry purees. Red labels—samples (P2: produced with ultrasound treatment before pureeing; P1: produced without ultrasound treatment; HB: haskap berry; S: strawberry; followed by the puree proportion 20–100%). Blue labels—microrheological properties: EI—elasticity index [nm^{-2}], FI—fluidity index [Hz], SLB—solid–liquid balance [–], and MVI—macroscopic viscosity index [$\text{nm}^{-2}\cdot\text{s}$].

In the case of the S100 and S60_HB40 recipes, samples subjected to US (P2 purees) exhibited a significantly higher FI compared to their untreated counterparts (P1) (Table 2). The SLB significantly increased in all recipes after US, except for the S60_HB40 puree, indicating a transition towards less viscous behaviour. As can be seen in the PCA plot, two groups of samples with similar rheological properties that differ from each other can be identified. Samples S100, S80_HB20, and HB100 produced using method P1 form a group characterised by a lower EI. The group of samples consisting of HB100, S60_HB40, and S80_HB20 produced using the P2 method exhibited similar properties due to higher SLB and FI levels. Based on these results, it can be concluded that US treatment causes a reduction in viscosity at zero shear and elasticity on a microscopic scale, as well as an increase in fluidity. These findings confirm the efficacy of US as a texture-modifying technology for fruit purees, consistently reducing viscoelastic properties on the microscale. Furthermore, ultrasound processing can enhance the smoothness and structural stability of the puree, conferring a sensory perception of greater “homogeneity” compared to P1 products, which appear more prone to phase separation. Microrheology, as a relatively new method, is not often used to study the mechanical properties of foods such as fruit juices or purees and has more often been used for testing gels and emulsions [29]. Micro- and macro-rheological results are usually consistent for homogeneous materials, whereas in heterogeneous systems they may vary significantly [30]. Fruit purees are precisely such highly heterogeneous systems, containing both large and small particle fractions. This study confirmed the presence of a wide spectrum of particles and a shift in particle size distribution towards smaller particles after the application of ultrasound, which is directly

related to the micro-textural properties of purees. Therefore, when analysing the results of particle motion-based analysis, which measures local viscoelastic properties, it should not be directly translated into the macroscopic properties of puree, as this discrepancy was confirmed by previous studies [31]. As demonstrated in the first part of the experiment, where haskap berry purees were analysed, US treatment can lead to increase in apparent viscosity (Table 1). When analysing the results of microrheological measurements together with the results of apparent viscosity, it should be noted that at this stage it is not possible to fully assess whether the direction of change is positive. On the one hand, an increase in viscosity is positive in terms of product stability and sensory evaluation. On the other hand, the results of the microrheological analysis indicate a shift in the product's characteristics towards fluid behaviour, which is also important from the point of view of industrial production processes (e.g., pumping and bottling).

2.2.2. Particle Size Distribution

The particle size distribution was examined in the puree samples (Figure 3). The mode diameter of the distribution, i.e., the particle diameter at which the graph reaches its highest percentage value (corresponding to the most numerous particle fraction), for samples obtained using the P1 method was in the range of 420–550 μm ; the exception was S80_HB20_P1, with the mode in the range of 320–420 μm . The modal diameter value for samples obtained using method P2 was in the lower range of 240–320 μm . In this case, S100_P2 was the exception, with a mode diameter at 420–550 μm . For all formulations (except S100), US treatment resulted in a reduction in the mode. The maximum for S100_P1 and S100_P2 falls within the same particle diameter range, but its relative value is significantly lower (from $19.36 \pm 0.80\%$ to $13.27 \pm 1.97\%$, respectively).

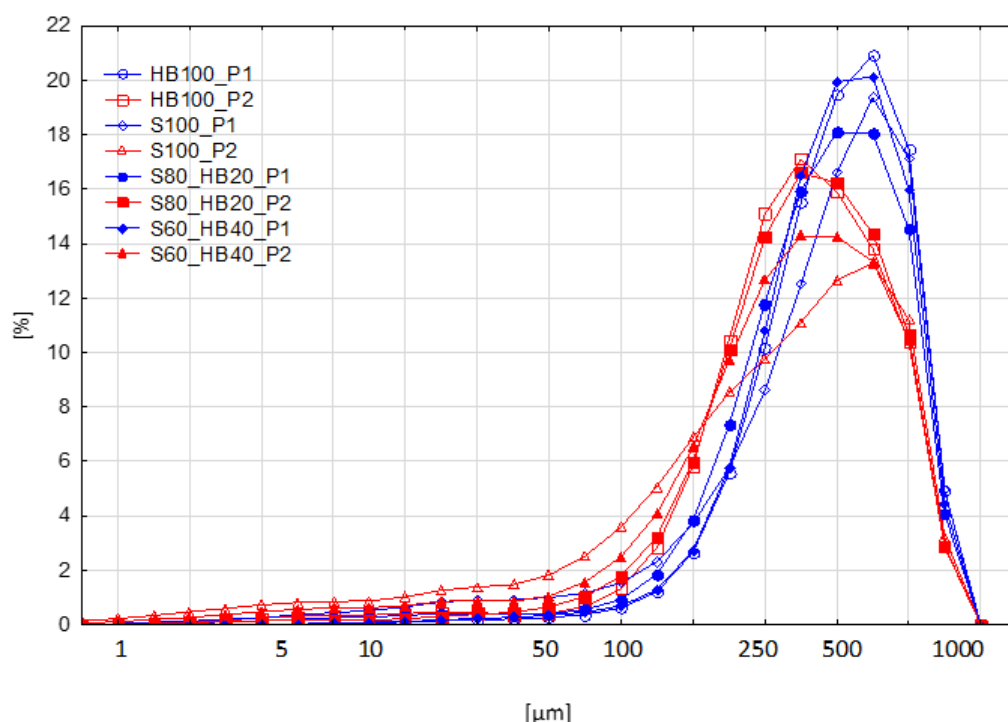


Figure 3. Particle size distribution of haskap berry and strawberry purees produced with ultrasound treatment before pureeing. P1: without ultrasound treatment (blue); P2: with ultrasound treatment (red). HB: haskap berry; S: strawberry; followed by the puree proportion of 20 to 100%.

Table 3 presents the values of particle size parameters (D10, D50, D90, and SPAN) for both production methods (P1 and P2). In order to enable the comparison of data and

identification of extreme values, Table 3 was transformed using conditional formatting in the form of a heat map. For each parameter (D10, D50, D90, SPAN), an automatic colour scale was applied, where the colour of the cell corresponds to the numerical value of a given sample within the column. The analysis indicates that samples treated with ultrasound (P2) generally have smaller particles than control samples (P1), as evidenced by significantly lower D10, D50, and D90 values in purees obtained using the P2 method. At the same time, the SPAN for P2 purees was higher, meaning a broader particle size distribution. The ultrasound treatment did not substantially reduce the diameter of the largest particle group but led to an enrichment in small particles, resulting in a broader particle size distribution.

Table 3. Particle size distribution parameters (D10, D50, D90, and SPAN) of haskap berry and strawberry purees produced with ultrasound treatment before pureeing. P1: without ultrasound treatment; P2: with ultrasound treatment. HB: haskap berry; S: strawberry; followed by the puree proportion of 20 to 100%.

SAMPLE	D10	D50	D90	SPAN
HB100_P1	176.77 ± 4.03 f	382.68 ± 10.64 d	651.1 ± 10.75 cb	1.24 ± 0.02 a
HB100_P2	119.48 ± 1.22 d	286.85 ± 7.5 ab	586.28 ± 10.42 a	1.63 ± 0.03 c
S100_P1	95.09 ± 8.56 c	366.38 ± 16.83 cd	649.87 ± 13.68 cb	1.52 ± 0.05 c
S100_P2	36.21 ± 4.09 a	257.57 ± 31.94 a	592.67 ± 42.32 ab	2.17 ± 0.14 e
S80_HB20_P1	142.23 ± 2.97 e	346.52 ± 25.66 c	622.88 ± 48.64 ab	1.38 ± 0.04 b
S80_HB20_P2	116.62 ± 5.02 d	292.02 ± 11.07 b	586.52 ± 25.7 a	1.61 ± 0.05 c
S60_HB40_P1	171.95 ± 4.9 f	369.47 ± 10.51 cd	638.75 ± 15.46 cb	1.26 ± 0.02 a
S60_HB40_P2	71.24 ± 4.48 b	270.67 ± 9.84 ab	587.52 ± 12.9 a	1.91 ± 0.05 d

The lowest values in the column are marked in red, intermediate values in yellow, and the highest values in green. Values are expressed as mean ± SD ($n = 6$). Different letters indicate statistically significant differences between samples processed without (P1) and with ultrasound (P2), ($p < 0.05$) according to Tukey's HSD test. P1: without ultrasound treatment; P2: with ultrasound treatment. HB: haskap berry; S: strawberry; followed by the puree proportion of 20 to 100%.

Other authors have similar results, where cavitation and shear forces caused by US led to a reduction in particle size [32,33]. The particle size distribution of control and ultrasound-treated mango nectar [25] is remarkably similar to the results obtained in this study. As in our case, the reduction in the group of large particles was accompanied by an increase in the number of the smallest particles, while no significant changes in SPAN were observed. The observed results generally correspond to the practical application of ultrasound—homogenisation [34]. With appropriately selected parameters, ultrasound waves cause the rupture of cell walls and membranes. It has been proven that the right processing time and frequency can cause the rupture of cells in pathogenic organisms, among others, thus enabling ultrasound to reduce the amount of these organisms in food. For example, in experiments with suspensions of *Escherichia coli* cells, inactivation was achieved by continuous treatment with ultrasound after several dozen minutes at a frequency of 2 MHz and peak intensities in the range of 2.25–8.7 W/cm² [35]. In a publication in which ultrasonic homogenisation was applied to aqueous cellulose solutions [36], a significant reduction in particle size was observed, combined with an increase in SPAN, exactly as in the case in the studies discussed here. The most effective treatment parameters were a frequency of 20 kHz for several dozen minutes at a temperature of 40–50 °C, resulting in the greatest reduction in particle size. Both the literature example given and the conclusions from our experience demonstrate the potential of ultrasound to increase the solubility of long-chain carbohydrates.

2.2.3. Sensory Analysis

The relationships between sensory descriptors (Table 4) and product samples are illustrated in Figure 4. On the basis of the scree plot, two principal components were selected as the optimal number of underlying dimensions, which together accounted for 94.6% of the variation in sensory descriptors of the assessed puree samples. The biplot displays the first and second principal components, which explain 87.2% and 7.4% of the total variance in the sensory data, respectively. The distribution of samples and descriptors along these axes reflects the major trends and discriminative factors observed among the tested purees. Factor 1 (vertical axis) divided the tested samples into two groups with different sensory characteristics as an effect of the recipe of the samples (raw material mixture from which the products were made). The left side of the graph is occupied by samples with 100% or 40% haskap berries (HB100 and S60_HB40). In contrast, the right-hand side of the graph is occupied by samples made mostly from strawberries—S100 and S80_HB20. The arrangement of the samples maintained a logical order—moving from the left to the right side of the graph—the samples reflected the gradual increase in strawberry content. Such a distribution of samples on the plot was associated with all descriptors of taste, appearance, and aftertaste. This confirms the methodological correctness in the composition of samples and the proper training of assessors. Returning to the main objectives of the experiment, it is important to look at the division of groups that Factor 2 evokes (horizontal axis).

Table 4. Applied sensory descriptors for analysis of haskap berry and strawberry purees produced with ultrasound treatment before pureeing.

No.	Descriptor	Definition	Abbreviation	Reference Material
Smell (Intensity when sniffed)				
1	Overall Intensity	Overall complicity of the smell of the sample	S_Overall Intensity	-
2	Strawberry	Specific smell of strawberry	S_Strawberry	Boiled strawberry
3	Haskap	Specific smell of haskap berry	S_Haskapberry	Sample HB_100
Taste (Intensity when tasted)				
4	Sour	Basic taste—overall sour	T_Sour	Solution: 1.2 g citric acid/ 1 L water
5	Sweet	Basic taste—overall sweet	T_Sweet	Solution: 12 g sucrose/ 1 L water
6	Bitter	Basic taste—overall bitter	T_Bitter	Solution: 0.54 g caffeine/ 1 L water
7	Strawberry	Taste of strawberry	T_Strawberry	Fresh strawberry fruit
8	Haskap	Taste of haskap berry	T_Haskapberry	Sample HB100
9	Lemon/sour	Taste of lemon sourness	T_LemonSour	Lemon juice freshly pressed
10	Watery	A watery flavour (diluted)	T_Watery	-
11	Earthy	A flavour of soil	T_Earthy	Fresh beetroot, grated
12	Unripe berries	Specific taste of unripe berries	T_Unripe	Mixture of unripe berries: red currant/black currant/raspberry
13	Off flavour	Foreign flavour, not typical for fruit preserves	T_Off flavour	-

Table 4. Cont.

No.	Descriptor	Definition	Abbreviation	Reference Material
Aftertaste (Counting 1–5 and then evaluating aftertaste)				
14	Sour aftertaste	Overall sour aftertaste-	AT_Sour	-
15	Bitter aftertaste	Overall bitter aftertaste	AT_Bitter	-
16	Astringent	Dry sensation on teeth, when moving tongue over after ingestion	AT_Astringent	Chokeberry juice (purchased on the market)
17	Duration of aftertaste	Length of flavour persistence in the mouth within 10 s	AT_Duration	-
Other modalities				
18	Shiny	Concern surface, degree of shine	Shiny	Sample HB100_P1
19	Silky matt/cloudy	Concern surface, how much it is silky-matt and cloudy	Silky matt/cloudy	Sample S100_P2
20	Particles	Look at the back of the spoon and count the number of particles	Particles	-
21	Homogeneous	Visual assessment of the degree of unevenness in the sample structure	Homogeneous	-
22	Viscosity	Take a sample with a spoon and pour it back into the container—assess the viscosity visually	Viscosity	-
Appearance				
23	Colour: black	Compared to printed references	Black	Colour—RAL 9005
24	Colour: red	Compared to printed references	Red	Colour—RAL 0104040

HB100_P1: haskap berry puree without ultrasound treatment; S100_P2: strawberry puree with ultrasound treatment.

All ultrasound-treated samples were projected on the upper side of the graph (P2 samples). Thus, samples where ultrasound was not used were placed on the lower part of the graph (P1 samples). The distribution of samples on the plot was associated mainly with differences in textural characteristics of samples. The descriptors that strongly characterised the P2-labelled samples were, first of all, Viscosity and Homogeneous—both concerning the texture of the sample. On the contrary, the samples labelled P1 were characterised by the presence of fruit particles, as evidenced by the strongly downward-loading descriptor Particles. The Earthy descriptor (not statistically significant) is not interesting from the point of view of the objectives of the study, but interesting for methodological reasons of evaluating the results and the experiment carried out. Its projection in the centre of the PCA graph clearly demonstrates the absence of correlation with the processing method and sample composition. With regard to the evaluation of smell, only three descriptors were used. What can be considered positive is that the descriptors of the characteristic aroma of the fruit used in the samples (strawberry, haskap berry, or a mixture of both) were evaluated in accordance with the actual composition. It can therefore be assumed that the use of ultrasound did not introduce significant changes in the volatile

compound composition of the samples (which were not examined instrumentally in this study). Although not statistically significant, it is noteworthy that in three out of four sample pairs the total smell complexity (S_Overall intensity) was judged to be lower in P2 samples. That can suggest that some negative influence of ultrasound treatment can be found on the smell of purees. Similarly, the colour red (characteristic of strawberry puree) and the colour black (characteristic of haskap berry puree) were assessed without difficulty. The descriptors Silky/matt/cloudy and Shiny also acted as opposites and were assessed according to this approach. Consequently, samples with a high proportion of haskap berry (100% and 40%)—were characterised by low Cloudy scores and were seen as highly Shiny. Texture concerning descriptors (Homogeneous, Particle, Viscosity) behaved in a similar and mutually consistent manner. Samples in the P2 group that were treated with ultrasound were assessed as more homogeneous, and their viscosity was rated higher, which is in line with the rheological properties of the products. Unfortunately, for the viscosity parameter (perhaps due to the difficulty of evaluation), the results did not show clear differences, and in the case of samples composed of both fruit species, they were evaluated at a similar level. In the case of basic flavours, only the sour flavour evidently divided the samples into a low-acid group (100 or 80% strawberry) and a high-acid group (100% or 40% haskap berry). Analysis of basic taste scores does not allow any further conclusions to be drawn about the two puree production methods used. The effect of product composition can be seen even more clearly in the case of aftertastes (Astringency, Sour, Duration). For example, assessors discriminated perfectly between samples, and the assessment of aftertaste persistence length (Duration) depended on the level of compounds present in the samples.

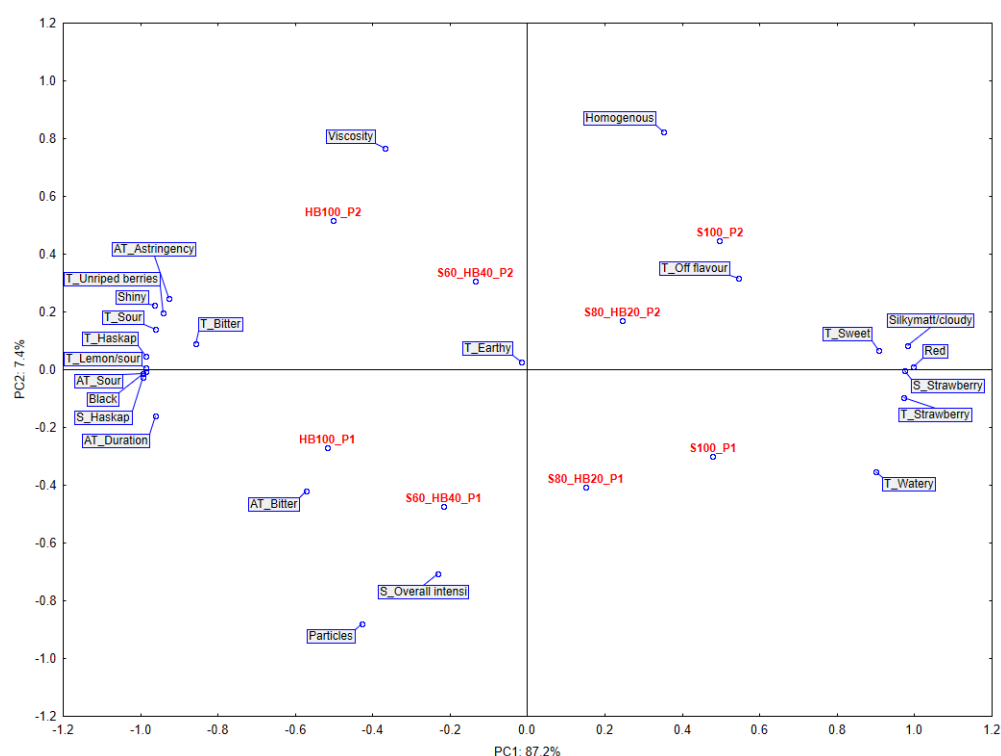


Figure 4. Principal Component Analysis (PCA) from sensory descriptive analysis of haskap berry and strawberry purees produced with ultrasound treatment before pureeing. P1: without ultrasound treatment; P2: with ultrasound treatment. HB: haskap berry; S: strawberry; followed by the puree proportion of 20 to 100%.

Most publications on the effect of ultrasound on sensory quality in fruit processing concern juices. The literature on sensory changes in purees due to ultrasound treatment is extremely limited. Despite the fact that juices are a different product group from purees and

that ultrasound is mainly used as a tool to partially replace pasteurisation, comparison of the results obtained with juice seems to be relevant, as the most important thing is to confirm what effects ultrasound has on sensory profiles. On the basis of literature, ultrasound treatment during production of juices and purees generally maintains or improves sensory quality. For example, in a study conducted on orange juice [37], it was proven that the use of ultrasound does not have a negative impact, while also highlighting the strong potential of this technology in food processing as an alternative to thermal processing. In the case of grape juice [38], sensory analysis demonstrated that ultrasound contributed to the improvement of sensory characteristics of the juices in a ranking test in which assessors received four samples (one control sample and three other with different levels of ultrasound treatment). A recent review article [39] emphasises that products processed using US generally have better overall sensory acceptability compared to juices processed conventionally. However, the authors also highlight that sensory properties of products obtained through the use of US are an aspect that is often neglected.

2.2.4. Anthocyanins

The results of the anthocyanin content analysis by the HPLC method are summarised in Table 5. The highest total content of the six anthocyanins was observed in sample HB100_P1 (331.02 ± 12.40 mg/100 g⁻¹ FW), which was statistically significantly higher than that in HB100_P2 (319.99 ± 7.67 mg/100 g⁻¹ FW). Among all puree samples, only this recipe exhibited a statistically significant effect of the processing method, where ultrasound treatment (P2) resulted in an unfavourable reduction in total anthocyanin content compared to the control process (P1). The lowest total anthocyanin concentrations were found in S100_P1 and S100_P2 samples, at 22.58 ± 0.75 and 22.52 ± 0.24 mg/100 g⁻¹ FW, respectively, with pelargonidin-3-glucoside being the dominant compound in these samples. In other purees (S60_HB40 and S80_HB20), anthocyanin levels scaled consistently with the proportion of haskap and strawberry used. For these mixed samples, no statistically significant differences between processing methods were observed for any of the six anthocyanins, with the exception of cyanidin-3-glucoside in S80_HB20_P1 (53.50 ± 0.8 mg/100 g⁻¹ FW) and S80_HB20_P2 (51.56 ± 1.05 mg/100 g⁻¹ FW), where a significant negative effect was detected. It is worth noting that a 20% addition of haskap berries to strawberry puree resulted in a 3.5-fold increase in anthocyanin concentration compared to pure strawberry puree, while a 40% addition resulted in a 6-fold increase.

Table 5. Anthocyanin content of haskap berry and strawberry purees produced with ultrasound treatment before pureeing.

Sample	Method	Cyanidin-3-Glucoside	Cyanidin-3-Malonylglucoside	Cyanidin-3-Rutinoside	Cyanidin-3,5-Diglucoside	Pelargonidin-3-Glucoside	Peonidin-3-Glucoside	Total Anthocyanins
[mg/100 g]								
HB100	P1	282.31 ± 10.34 a	0 $\pm$ a	24.06 ± 0.84 a	15.05 ± 0.57 a	2.64 ± 0.15 a	6.96 ± 0.64 a	331.02 ± 12.4 a
	P2	272.87 ± 5.78 a	0 $\pm$ a	23.37 ± 0.63 a	14.5 ± 0.65 a	2.55 ± 0.29 a	6.71 ± 0.63 a	319.99 ± 7.67 a
S100	P1	1.1 ± 0.21 a	0.35 ± 0.03 a	0 $\pm$ a	0 $\pm$ a	21.13 ± 0.62 a	0 $\pm$ a	22.58 ± 0.75 a
	P2	1.38 ± 0.13 a	0.39 ± 0.06 a	0 $\pm$ a	0 $\pm$ a	20.74 ± 0.16 a	0 $\pm$ a	22.52 ± 0.24 a
S60_HB40	P1	105.98 ± 3.34 a	0.47 ± 0.05 b	8.99 ± 0.19 a	5.94 ± 0.2 a	15.57 ± 0.75 a	2.67 ± 0.16 a	139.62 ± 2.82 a
	P2	100.69 ± 1.13 b	0.55 ± 0.02 a	8.64 ± 0.17 b	6.04 ± 0.14 a	14.92 ± 0.42 a	2.55 ± 0.19 a	133.4 ± 1.26 b
S80_HB20	P1	53.5 ± 0.8 a	0.26 ± 0.2 a	4.78 ± 0.08 a	3.23 ± 0.35 a	18.9 ± 0.98 a	1.49 ± 0.06 a	82.17 ± 1.25 a
	P2	51.56 ± 1.05 b	0.37 ± 0.19 a	4.66 ± 0.21 a	3.28 ± 0.13 a	18.11 ± 0.61 a	1.54 ± 0.16 a	79.52 ± 1.16 b

P1: without ultrasound treatment; P2: with ultrasound treatment. HB: haskap berry; S: strawberry; followed by the puree proportion of 20 to 100%. Means for samples marked with the same letters do not differ significantly ($p < 0.05$) according to Tukey's HSD test ($n = 6$).

In experiments involving the use of ultrasound as a tool to enhance anthocyanin extraction, it has proven to be highly effective [40]. It is worth noting that the ultrasound exposure in this case was 60 min in an ultrasonic bath with a frequency of 40 kHz and

a power of 185 W, and no negative effect of treatment time on anthocyanin content was observed. However, it has also been noted that lower US treatment temperatures are favourable for the extraction of anthocyanins, and even temperatures around 50 degrees can negatively affect anthocyanin content [41,42]. However, US treatment of fruit pulp can lead to completely different conclusions, as in our study, where generally no effect of ultrasound on anthocyanin content was observed. The results obtained by other authors are inconsistent in this area, providing both evidence of positive and negative effects of ultrasound. In the case of pulp made from purple tamarillo fruit, US for 10 min resulted in a significant increase in delphinidin-3-rutinoside (+115%) and pelargonidin-3-rutinoside (+270%) content [43]. The results of the experiments conducted depend to a large extent on the choice of methodological parameters. Among generally positive observations of anthocyanin behaviour in experiments attempting to replace traditional pasteurisation with US treatment at elevated temperatures, it has also been reported that ultrasound treatment at 55 °C for 9 min can reduce total anthocyanin content by 7.1% compared to untreated strawberry juice [44]. Additionally, the mechanism of anthocyanin degradation was identified in a model experiment, where a strong correlation was found between the rate of pelargonidin-3-glucoside degradation and the rate of $\bullet\text{OH}$ production [45]. This shows that, as in the case of AA degradation, the breakdown of bioactive compounds such as anthocyanins can be caused by the formation of free radicals due to cavitation.

2.2.5. Total Pectin Content

The pectin content in food products is of great importance for both their quality and nutritional value. In terms of product quality, a higher pectin content results in higher viscosity and density, which are also important for the visual quality of products. If there is a sufficient amount of pectin in the product, there is no separation, i.e., the product is more stable [46]. In terms of nutritional value, the pectin content in food products promotes proper intestinal peristalsis and has a proven beneficial effect on human health [47]. No significant effect of the recipe on the pectin content was found, and its average content for all recipes was $3512.75 \pm 174.86 \text{ mg kg}^{-1} \text{ FW}$ (Figure 5). This result is slightly higher than those reported in the literature data, which indicate pectin contents in raw strawberries and haskap berries at levels of 1 to 2% [48,49].

A significant effect of processing method on pectin content was observed in the tested purees (Figure 5). The average total pectin content across all tested samples was $3673.75 \pm 25.47 \text{ mg kg}^{-1} \text{ FW}$. For each recipe, samples obtained with the use of ultrasound were characterised by a statistically significantly higher total pectin content. This is consistent with the fact that ultrasound is a tool for efficient pectin extraction [50].

Pectin content in products is strongly linked to the sensory quality of products, as food consistency is crucial to food perception [51]. Therefore, during sensory evaluation of samples using the descriptive method, the analysis was supplemented with parameters such as Homogeneous, Viscosity, and Particles. PCA was performed to determine the relationship between total pectin content and selected key sensory descriptors for texture and consistency of the purees. Two components (PC1 and PC2) explained 89.7% of the total variance (Figure 4).

On Figure 6, we can see a visualisation of the analysis with the location of the samples (biplot chart). Based on the location of the descriptors, it can be concluded that the descriptor Viscosity had the greatest impact on the first component (63.5% of the total variance). The upper right quadrant, where this descriptor is located, also includes three purees produced by the P2 method. Sample S100_P2 is located in the upper left quadrant of the graph, which indicates that it was perceived as less viscous despite having a similar pectin content. Sensory evaluation and instrumental measurement often produce different

results when assessing food texture and consistency, since human perception is influenced by many factors and interpretation by assessors may not align with objective instrumental data—making the correlation between both approaches not always consistent [52]. In fact, observing the lack of correlation between the measurement methods under study helps to gain knowledge about aspects that are not immediately apparent.

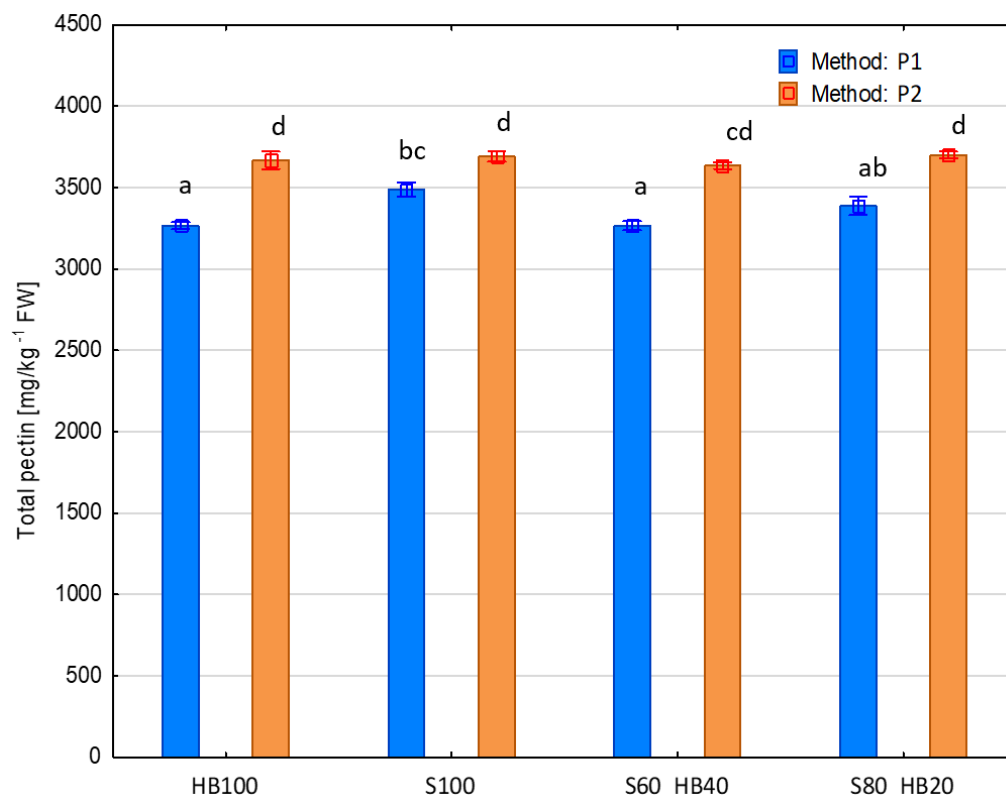


Figure 5. Total pectin content [mg kg^{-1} FW] of haskap berry and strawberry purees produced with ultrasound treatment before pureeing. Mean for samples marked with the same letter do not differ significantly ($p < 0.05$) according to Tukey's HSD test ($n = 6$). P1: without ultrasound treatment; P2: with ultrasound treatment. HB: haskap berry; S: strawberry; followed by the puree proportion of 20 to 100%.

In the case of the second component, explaining 26.2% of the total variance, a high correlation was found between pectin content and the Homogeneous descriptor, and a negative correlation with the Particles descriptor. There is consistency in the data presented here, showing a simultaneous increase in total pectin content and homogeneity.

The presented results concern the impact of US treatment on fruit pulp prior to pureeing. By having access to all the tissues that make up the fruit, acoustic cavitation and shear forces disrupt the cell walls, substantially enhancing the availability and extraction efficiency of pectin. This is well established, as ultrasound application induces intensive breakdown of cellular structures, facilitates the release of pectin, and accelerates both diffusion and penetration phenomena during extraction [50], leading to an increased concentration of pectin in the final product, as it is shown in Figure 5. Although partial degradation of soluble fraction of pectin may also occur [25], the overall pectin yield resulting from structural disintegration, in the case of this study, significantly outweighs this effect.

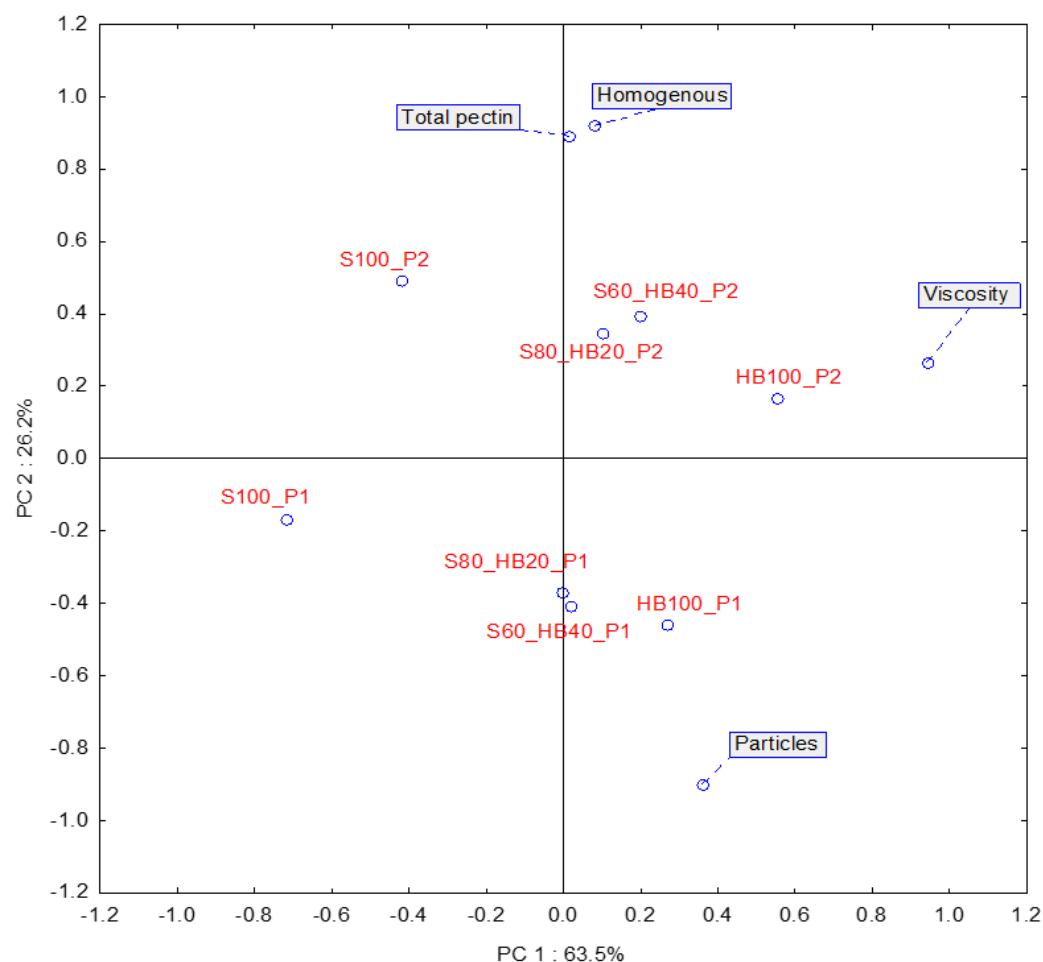


Figure 6. Principal Component Analysis (PCA) from selected sensory descriptors and total pectin content of haskap berry and strawberry purees produced with ultrasound treatment before pureeing. The plot reveals the interrelationship between descriptors (in blue) and samples (in red). P1: without ultrasound treatment; P2: with ultrasound treatment. HB: haskap berry; S: strawberry; followed by the puree proportion of 20 to 100%.

2.2.6. Organic Acids

The content of organic acids and the statistical differences are detailed in Figure 7. Three organic acids—L-ascorbic, malic, and citric acid—were investigated in this study. Technologically, citric and malic acids are valuable components found in fruit raw materials. They not only lower product pH to ensure stability after pasteurisation but also contribute to an appropriate sensory profile. AA is widely considered an important indicator of overall food product quality. As an essential vitamin for humans, the recommended daily intake of AA, according to current European dietary reference values [53], is 80 mg per day. When analysing the impact of processing, the preservation level of AA can serve as an indicator for the proper application of processing methods, such as maintaining appropriate time and temperature regimes. The recipe containing 100% haskap berry (HB_100) showed the highest content of all three tested acids: 29.49 ± 0.74 , 861.56 ± 17.12 , and 2255.15 ± 36.77 mg/100 g FW for L-ascorbic, malic, and citric acid, respectively. Conversely, the 100% strawberry recipe (S100) contained the lowest levels of these compounds: 11.35 ± 1.47 , 287.92 ± 18.54 , and 680.26 ± 26.36 mg/100 g FW, for L-ascorbic, malic, and citric acid, respectively. The differences between the contents of all three acids for these two recipes were statistically significant ($p < 0.05$). Logically, the intermediate recipes (S80_HB20 and S60_HB40) contained intermediate acid levels, with a slight increase corresponding to the higher proportion of haskap berries. The processing method impacted the content

of these compounds in only a few limited cases. For AA, the type of processing used was statistically significant only in the S80_HB20 sample, where a 12% increase was noted with the P2 method. In all other samples, the differences were not significant, although the acid content was consistently slightly higher with the P2 method.

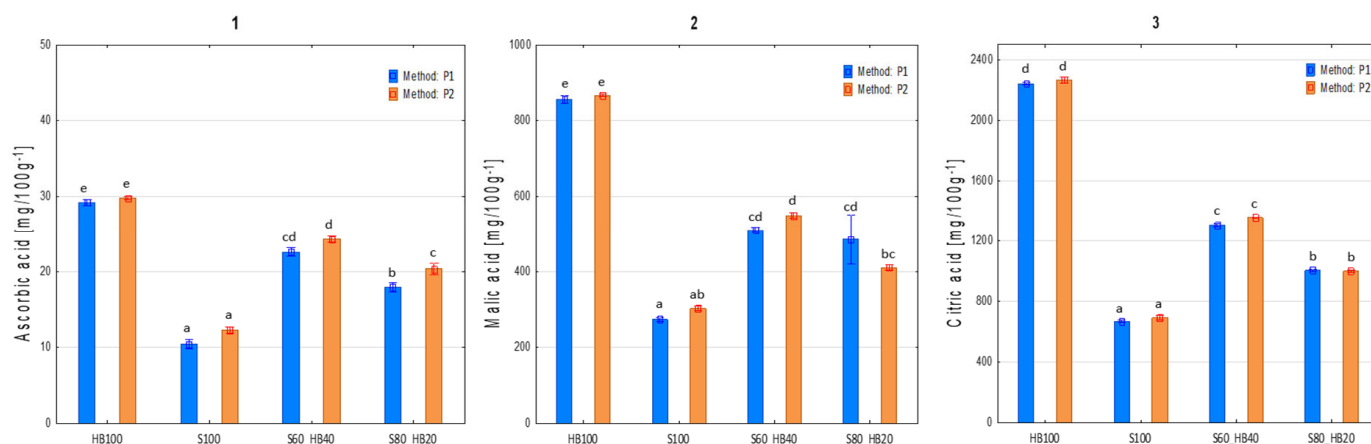


Figure 7. Organic acid content of haskap berry and strawberry purees produced with ultrasound treatment before pureeing. 1—ascorbic acid (AA) (left), 2—malic acid (middle), 3—citric acid (right). Means for samples marked with the same letters do not differ significantly ($p < 0.05$) according to Tukey's HSD test 705 ($n = 6$). P1: without ultrasound treatment; P2: with ultrasound treatment. HB: haskap berry; S: strawberry; followed by the puree proportion of 20 to 100%.

Based on these data, it can be concluded that the processing method had no significant effect on malic and citric acid content in any of the tested recipes. Ultrasound treatment (P2) applied during the processing of strawberry and haskap berry purees did not significantly affect the content of malic and citric acid but may have had a beneficial effect on the content of AA. In some cases, observations by other authors suggest opposite results. In the case of raspberry and blueberry purees, the use of ultrasound had a degrading effect on AA, causing a 30% reduction in the content of this compound [17]. Similarly, studies using tomato puree have shown an increase in ascorbate peroxidase activity, resulting in a decrease in AA concentration [54]. Ascorbate peroxidase is an enzyme involved in the decomposition of hydrogen peroxide using AA as an electron donor, resulting in oxidation and a consequent reduction in puree products. The activity of this enzyme during storage or processing of tomato puree promotes the degradation of AA, significantly reducing its content in the final product. When comparing these results with our study, it should be noted that ultrasound in those cases was applied to the material without heat treatment; thus, ascorbate peroxidase remained active. On the contrary, in our experiment, the product was heat-treated before treatment, which proved to be a better solution in terms of AA content, possibly due to the inactivation of enzymes responsible for the degradation of AA. In experiments with fruit and vegetable juices (orange, sweet lime, carrot, and spinach juices), similar results were obtained even when treating the material before heat treatment. In some cases, ultrasound treatment proved to be significantly superior to thermal pasteurisation in terms of AA content [19]. The authors attributed this effect as being closely related to the temperature of the pasteurisation process itself, as temperature is the main cause of AA depletion [55].

However, the results obtained from other studies do not always support this conclusion. One example is a comprehensive study on ultrasound treatment of red raspberry puree and AA solutions (used as a model system), which systematically investigated the effect of varying ultrasound frequencies and power over 10 min intervals of sample collection [56]. That study paid particular attention to temperature increases during sonication

and demonstrated that AA degradation is influenced not only by thermal effects, but also by the formation of free radicals induced by acoustic cavitation. Although the mechanism of AA degradation during cavitation is not yet fully understood, research suggests that two main effects (thermolysis and reaction with free radicals) are the most likely causes of AA degradation during ultrasound treatment [57].

3. Materials and Methods

3.1. Plant Material

The raw material used in the experiment came from commercial cultivation and was purchased during the 2024 harvest season from local producers. The experiment was conducted on two fruit species: strawberries (*Fragaria × ananassa* cv. ‘Florence’) and haskap berry (*Lonicera caerulea* L. cv. ‘Wojtek’). Immediately after transport, the fruits were washed, sorted, and frozen at $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ until processing.

3.2. Preparation of Samples—Experiment Plan

The experiment was conducted in two stages. In the first one, it was investigated which of the proposed technological schemes (Figure 8) for obtaining puree with ultrasound would be optimal. Ultrasound (US) was used as an additional treatment before pulping (P2), after pulping (P4), or as an alternative to heating the raw material (P3). In evaluating the combinations, the yield of puree (as a percentage of the raw material), viscosity, total anthocyanin content, and total polyphenol content were taken into account.

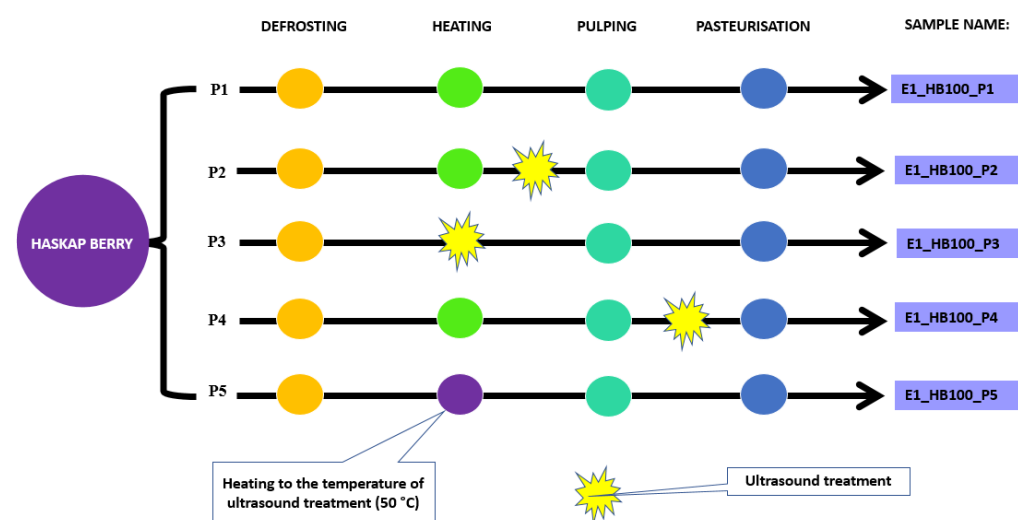


Figure 8. Diagram of “stage I” of the experiment with ultrasound treatment in different sequences of haskap berry puree production.

In the first stage of the experiment, haskap berry fruits (without additives) were used as raw material, which correspond to the aim of the work—to increase the content of bioactive compounds in the final product by ultrasound treatment. Samples labelled P1 and P5 were control objects (produced without ultrasound) against which the results from the other samples were compared. The sample labelled P5 was an additional control object, produced without ultrasound but heated to the same temperature as that generated by US. Since we observed increased temperatures upon ultrasound treatment, this control negates that effect by matching the heating temperature to the temperature observed during ultrasound treatment in P2, P3, and P4.

Ultrasonic treatment (UT) (P2–P4) was carried out on 1000 g fruit samples for 10 min. The samples were treated in an ultrasonic homogeniser at a frequency of 20 KHz (Cole-Palmer Instrumental Company, VCX-750, Vernon Hills, IL, USA) equipped with a 13 mm

diameter probe. The device operated at a constant amplitude of 80%, using the maximum power of the device (750 W). The probe tip was immersed in the fruit pulp at the geometric centre of the container, 10 cm below the surface.

Heating of fruits to 80 °C (P1, P2, P4), as well as heating to 50 °C (P5), was carried out in a metal pot on an electrical cooktop. In order to enable ultrasound treatment, pre-shredding was necessary for combinations in which heating to 80 °C was not used. Pre-shredding of frozen fruit (objects P3 and P5) was carried out in a Thermomix (250 g portions, 5 s). Three technological repetitions were performed for each production scheme (P1–P5) in stage I.

All purees samples prepared according to schemes P1–P5 were pasteurised at 90 °C for 20 min, then cooled and analysed. After verifying the results of the analyses of the purees from stage I, combination P2 was selected to carry out stage II, (see Figure 9 for a diagram of the experimental scheme of stage II). The P1 method was used as the control. In this part of the experiment, the selected processing methods were tested on four recipes: strawberry—100% (S100); haskap berry—100% (HB100); strawberry—80% + haskap berry—20% (S80_HB20); strawberry—60% + haskap berry—40% (S60_HB40). After making purees for the four recipes according to schemes P1 and P2, all analyses were performed immediately. Three technological repetitions were performed for each puree recipe.

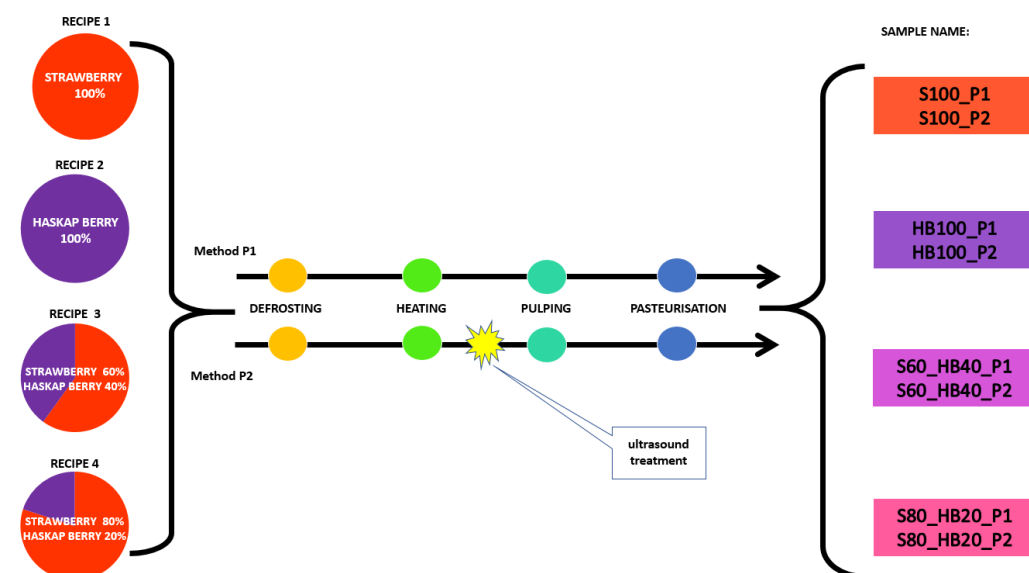


Figure 9. Diagram of “stage II” of the experiment with ultrasound treatment during haskap and strawberry purees production with four different recipes.

3.3. Physico-Chemical Analysis

3.3.1. Apparent Viscosity

Viscosity was determined using a Brookfield LVDVII viscometer (Brookfield Eng., Middleboro, MA, USA), following the method initially proposed by Jenni et al. [58]. Measurements were performed at a constant spindle speed of 60 rpm and a sample temperature of 20 °C. Before analysis, the samples were transferred into 100 mL glass beakers and equilibrated at 20 °C until a constant temperature was reached (approximately 2 h). During incubation, the beakers were covered with lids to minimise evaporation and prevent the formation of a dried layer on the surface. The Brookfield spindle was then immersed in the sample (in the centre of the beaker) to the depth marked on the spindle and operated at the set rotational speed. Apparent viscosity of the puree was expressed in mPa·s.

3.3.2. Total Anthocyanins Content (TAC)

Total anthocyanin content was determined by the pH differential method described by Giusti and Wrolstad [59], using a Cary 3000 Bio UV–visible spectrophotometer (Varian, Melbourne, Australia). Anthocyanin content was obtained using the standard pH differential equation and the final values were normalised to the sample mass. Anthocyanin concentrations were calculated assuming cyanidin-3-glucoside as the reference compound, with a molar absorptivity of $\epsilon = 28,800 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ and a path length of 1 cm. Results were expressed as mg cyanidin-3-glucoside equivalents per 100 g fresh weight of puree.

3.3.3. Total Polyphenol Content (TPC)

Total polyphenol content was measured spectrophotometrically following the method initially proposed by Singleton and Rossi [60]. A total of 10 g of samples were homogenised with 70% ethanol and centrifuged for 10 min at 20,000 rpm. An aliquot of 0.4 mL supernatant was mixed with 1.6 mL sodium carbonate solution (7.5% *w/v*), followed by the addition of 2 mL Folin–Ciocalteu phenol reagent diluted with distilled water 1:10, was added. Incubation was carried out for 30 min at ambient temperature in the absence of light. Absorbance was measured at a wavelength of 765 nm, and polyphenol content was expressed as gallic acid equivalents per 100 g^{−1} fresh weight of puree.

3.3.4. Microrheological Properties

Microrheological properties of the purees were examined using diffusing wave spectroscopy (DWS) with a Rheolaser Master Lab 6 device (Formulation, Toulouse, France). Measurements were performed in full characterisation mode using 20 mL glass vials, ensuring the absence of air bubbles. Samples were analysed at ambient temperature controlled by the device's built-in thermostatic system. During the measurement, the relationships between the correlation functions of scattered light intensity over time were recorded, and the microrheological parameters describing the behaviour of the system were determined from them. The following parameters were determined: elasticity index (EI; nm^{−2}), solid–liquid balance (SLB), macroscopic viscosity index (MVI; nm^{−2}·s), and fluidity index (FI; Hz), which describe the proportion of elastic and viscous components and the mobility of particles in the tested samples.

3.3.5. Particle Size Distribution

Particle size distribution was analysed by laser diffraction method (Bettersizer S3, Dandong, China). Measurement time was 30 s, and particle size was calculated based on Mie theory. The instrument is equipped with a stirrer to prevent sedimentation of the particles by circulating the water solution of the sample through the measuring system. The result of the analysis is presented as a percentage distribution of individual particle fractions. Based on D10, D50, and D90 particle distribution parameters, span was calculated according to equation:

$$\text{SPAN} = (\text{D90} - \text{D10})/\text{D50} \quad (1)$$

where

SPAN—width or broadness of a particle size distribution;

D90—the particle size at which 90% of the particles are smaller than this value;

D10—the particle size at which 10% of the particles are smaller than this value;

D50—the median particle size, where 50% of the particles are smaller and 50% are larger.

3.3.6. Sensory Analysis

Descriptive sensory analysis was performed by a panel of ten trained panellists (eight women, mean age 31.4 years). Panellists were selected and trained according to ISO

guidelines (ISO 8586-2, International Standard Organisation, 2023) [61]. Sensory sessions were conducted at the University of Copenhagen, Department of Food Science. Sensory facilities complied with ISO guidelines for the design of test rooms (ISO 8589, International Standard Organisation, 2007) [62]. Evaluation sessions took place in a sensory laboratory. Samples were labelled with random three-digit codes. A 15 cm unstructured scale with relevant end-point anchors was used for all descriptors. Samples were poured in 60 mL cups and stored at 20 °C for at least one hour before serving. Data were collected digitally with a software dedicated for sensory assessment (Fizz, Biosystemes, Couternon, France). For palate-cleansing, room temperature water and plain crackers were used. Three tasting replicates were conducted in separate sessions. In the first stage of sensory training, panel members were asked to taste the provided puree samples and consider how they would describe their appearance, aroma, and taste. To facilitate this task, the panellists were given a list of terms prepared by the laboratory staff, with the clarification that they could reject any of the proposed terms or suggest additional ones. Particular attention was paid to the degree of agreement between panellists in the selection and acceptance of individual sensory descriptors. A reference list (Table 3) was also delivered by scientific staff, followed by a discussion stage with the assessors. In the second stage, the panellists were trained for the assessment of the puree samples. Twenty-four descriptors were chosen for the final evaluation belonging to four categories: appearance, smell, texture, taste, and aftertaste.

3.3.7. Pectin

Total pectin content was determined according to the spectrophotometric method with carbazole in a sulfuric acid medium, as described by Taylor et al. [63]. One gram of puree was extracted with hot 95% ethanol (85 °C) to remove soluble sugars and washed with 63% ethanol. The alcohol-insoluble residue was treated with 10 mL of 1 N NaOH for 15 min, and the extract was filtered. A total of 1 mL of the extract was reacted with 0.5 mL of a 0.1% alcoholic solution of carbazole and 6 mL of concentrated H₂SO₄ heated at 85 °C for 5 min, and after cooling, the absorbance was measured at 525 nm. Pectin content was calculated from a galacturonic acid calibration curve and expressed as mg D-(+)-galacturonic acid per kg fresh weight of puree.

3.3.8. HPLC Analysis of Anthocyanins

The analysis of anthocyanin content was conducted in accordance with the method described by Mieszcakowska-Frac et al. [64], using high-performance liquid chromatography with an Agilent 1200 system (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) equipped with a diode array detector. Separation was performed using a Phenomenex® Fusion RP column (250 mm × 4.6 mm, 4 µm; Phenomenex, Torrance, CA, USA). Gradient elution was applied at a flow rate of 1 mL min⁻¹ and a column temperature of 25 °C, with eluent 1 consisting of water and formic acid (95:5, *v/v*) and eluent 2 consisting of acetonitrile. Anthocyanins were detected at a wavelength of 520 nm. Extractions were carried out from 5 g of puree homogenised in 70% methanol (JT Baker Chemicals, Phillipsburg, NJ, USA), and the supernatant prior to analysis was filtered through a 0.45 µm syringe filter. Quantification of anthocyanins was performed using external calibration curves prepared for each anthocyanin standard. Anthocyanin content was expressed as mg 100 g⁻¹ fresh weight of puree.

3.3.9. HPLC Analysis of L-Ascorbic, Malic, and Citric Acids

The content of L-ascorbic, malic, and citric acids was analysed using high-performance liquid chromatography with an Agilent 1200 (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) with a diode array detector. An SUPELCO SIL LC-18 reversed-phase column (C18, 250 × 4.6 mm, 5 µm; Supelco, Bellefonte, PA, USA) with a pre-column was used.

A 1% KH_2PO_4 solution adjusted to pH 2.5 served as the mobile phase at a flow rate of 0.8 mL min^{-1} (isocratic elution) and the column temperature was set at 30°C . Detection of L-ascorbic acid (AA) was performed at 244 nm, whereas malic and citric acids were monitored at 210 nm. Acids were extracted by homogenising 2.5 g of puree in a 6% HPO_3 solution, after which the supernatant was filtered through filter paper. Quantification of acids was carried out using external calibration curves prepared for each standard. The results were expressed as mg per 100 g^{-1} fresh weight of puree.

3.3.10. Statistical Analysis of Data from “Stage I” of the Experiment

The results obtained were analysed in a completely randomised design using one-way analysis of variance (ANOVA), separately for each parameter analysed. To compare the mean values of apparent viscosity, process yield, total polyphenol content (TPC), and total anthocyanin content (TAC) in purees, Tukey’s HSD test was used as a post hoc test. Differences between means were considered statistically significant at a significance level of $p < 0.05$. Statistical analyses were performed using STATISTICA 13 (Dell Inc., Tulsa, OK, USA).

3.3.11. Statistical Analysis of Data from “Stage II” of the Experiment

Statistical analysis was performed with the use of STATISTICA 13 (Dell Inc., Tulsa, OK, USA). Treatments were analysed in a completely randomised design using two-way ANOVA. Tukey’s HSD test was selected for the comparison of particle size distribution, pectin content, HPLC results for anthocyanins and organic acids in purees. The comparison was performed at a significance level of $p < 0.05$.

Data from descriptive sensory analysis and microrheological properties analysis were analysed in STATISTICA 13 software (Dell Inc., Tulsa, OK, USA). To evaluate major patterns among samples and product characteristics and to reduce the dimensionality of the dataset, Principal Component Analysis (PCA) was applied. Results were visualised on two-dimensional biplots, enabling interpretation of similarities and differences among the projected samples.

4. Conclusions

The study demonstrated that the application of US treatment as an additional treatment prior to pureeing effectively enhanced both the yield and apparent viscosity of the obtained purees. Analysis indicated that US treatment influenced the microrheological properties, shifting their characteristics toward more fluid-like behaviour. These structural modifications were closely related to particle size reduction and pectin interactions, which collectively contributed to the observed rheological changes, though not always in the expected direction. Particle size distribution analysis confirmed that US treatment produced smaller particles but resulted in a broader size distribution, whereas sensory evaluation combined with Principal Component Analysis (PCA) distinguished US-treated samples from untreated ones. Purees processed with US received higher scores for the descriptors Homogeneous and Viscosity. Regardless of the recipe, pectin content increased following US treatment. However, sensory perception differed substantially from the measured pectin content, suggesting that production technology and raw material characteristics play a decisive role in shaping the final product properties. US application during the processing of strawberry and haskap berry purees did not significantly affect malic or citric acid content but had a beneficial influence on L-ascorbic acid levels. A decrease in total anthocyanin content was observed in selected samples, suggesting that compound stability during ultrasound exposure depends strongly on the characteristics of the medium and the chemical nature of individual compounds. Comparison with literature data proved

challenging due to the scarcity of studies investigating ultrasound application prior to pureeing of fruit pulp. Most published works focus on ultrasound-assisted juice extraction, microbial stabilisation, or texture modification. Thus, this research represents, to the best of the authors' knowledge, the first detailed analysis of US treatment effects on the sensory and physico-chemical characteristics of berry purees when used as an additional treatment before pureeing.

Nevertheless, several limitations of the processing scheme should be emphasised. Efficient propagation of ultrasonic waves requires a sufficient liquid phase, whereas fruit pulps typically exhibit high viscosity and a dense structure. The low dry matter content of strawberries and haskap berries enabled the effective use of US in this study; however, this approach may not be universally applicable to other fruits. Although dilution of raw material has been proposed in some studies to facilitate sonication, such practice alters product composition and is thus not recommended for high-quality or clean-label products. Furthermore, combining ultrasound with thermal treatment compromises its non-thermal character; therefore, temperature input should be minimised during implementation.

Although ultrasound treatment did not enhance the extraction of anthocyanins from berry skins, it demonstrated a marked influence on the rheological behaviour and processing efficiency of berry purees. The observed shift toward more liquid-like microrheological behaviour, accompanied by increased apparent viscosity, highlights ultrasound's potential to modify flow properties and improve processing conditions in industrial environments.

Further research should focus on the possibility of repeating the observations on a larger scale and implementing the technology in an industrial system, as the mechanism of action of ultrasound, the effectiveness and safety of the technology, are already well recognised.

Author Contributions: Conceptualisation: J.P. and M.M.-F.; methodology: J.P., M.B.F., M.M.-F., B.L., C.D., A.W., J.L. and P.J.; validation: M.M.-F.; investigation: M.M.-F., J.P. and K.C.; resources: B.L. and C.D.; data curation: M.M.-F. and M.B.F.; writing—original draft preparation: J.P.; writing—review and editing: M.M.-F., K.C. and N.J.D.; visualisation: J.P., J.L. and P.J.; supervision: M.M.-F. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was supported by the European Union's Horizon Europe research and innovation programme under grant agreement No. 101159293 (HortiFoodTrends: Networking for excellence in the development of innovative, consumer-oriented horticultural food products using the Living Lab approach).

Institutional Review Board Statement: Ethical review and approval were waived for this study due to the use of de-identified data from sensory evaluation, which did not allow the identification of individual participants.

Informed Consent Statement: Written informed consent was obtained from each sensory panel participant prior to their inclusion in the study.

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

Acknowledgments: The authors thank the staff of the Fruit and Vegetable Storage and Processing Department at the National Institute of Horticultural Research and Department of Food Science, Design and Consumer Behaviour at the University of Copenhagen, for their assistance.

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

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

S	Strawberry
HB	Haskap Berry
US	Ultrasound Treatment
AA	Ascorbic Acid
TPC	Total Polyphenol Content
TAC	Total Anthocyanin Content
EI	Elasticity Index
FI	Fluidity Index
SLB	Solid–Liquid Balance
MVI	Macroscopic Viscosity Index
PCA	Principal Component Analysis
FW	Fresh Weight

References

1. Molina, A.K.; Vega, E.N.; Pereira, C.; Dias, M.I.; Heleno, S.A.; Rodrigues, P.; Fernandes, I.P.; Barreiro, M.F.; Kostić, M.; Soković, M.; et al. Promising Antioxidant and Antimicrobial Food Colourants from *Lonicera caerulea* L. var. kamtschatica. *Antioxidants* **2019**, *8*, 394. [CrossRef] [PubMed]
2. Newerli-Guz, J.; Śmiechowska, M.; Drzewiecka, A.; Tylingo, R. Bioactive Ingredients with Health-Promoting Properties of Strawberry Fruit (*Fragaria* x *Ananassa* Duchesne). *Molecules* **2023**, *28*, 2711. [CrossRef] [PubMed]
3. Golovinskaia, O.; Wang, C.-K. Review of Functional and Pharmacological Activities of Berries. *Molecules* **2021**, *26*, 3904. [CrossRef] [PubMed]
4. Bader Ul Ain, H.; Tufail, T.; Javed, M.; Tufail, T.; Arshad, M.U.; Hussain, M.; Gull Khan, S.; Bashir, S.; Al Jbawi, E.; Abdulaali Saewan, S. Phytochemical Profile and Pro-Healthy Properties of Berries. *Int. J. Food Prop.* **2022**, *25*, 1714–1735. [CrossRef]
5. JBT Corporation. *Technologies for Processing Value-Added Berry Fruit Products*; White Paper; JBT Corporation: Chicago, IL, USA, 2021. Available online: <https://www.jbtc.com/foodtech/innovation/case-studies-and-white-papers/> (accessed on 15 September 2025).
6. Nawirska-Olszańska, A.; Biesiada, A.; Sokół-Łętowska, A.; Kucharska, A.Z. Effect of Preparation and Storage Conditions on Physical and Chemical Properties of Puree, Puree Juices and Cloudy Juices Obtained from Pumpkin with Added Japanese Quince and Strawberries. *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca* **2016**, *44*, 183–188. [CrossRef]
7. Aguilera, J.M. Berries as Foods: Processing, Products, and Health Implications. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* **2024**, *15*, 1–26. [CrossRef]
8. Al-Juhaimi, F.; Ghafoor, K.; Özcan, M.M.; Jahurul, M.H.A.; Babiker, E.E.; Jinap, S.; Sahena, F.; Sharifudin, M.S.; Zaidul, I.S.M. Effect of Various Food Processing and Handling Methods on Preservation of Natural Antioxidants in Fruits and Vegetables. *J. Food Sci. Technol.* **2018**, *55*, 3872–3880. [CrossRef]
9. Chemat, F.; Rombaut, N.; Sicaire, A.-G.; Meullemiestre, A.; Fabiano-Tixier, A.-S.; Abert-Vian, M. Ultrasound Assisted Extraction of Food and Natural Products. Mechanisms, Techniques, Combinations, Protocols and Applications. A Review. *Ultrason. Sonochem.* **2017**, *34*, 540–560. [CrossRef]
10. Zhu, X.; Das, R.S.; Bhavya, M.L.; Garcia-Vaquero, M.; Tiwari, B.K. Acoustic Cavitation for Agri-Food Applications: Mechanism of Action, Design of New Systems, Challenges and Strategies for Scale-Up. *Ultrason. Sonochem.* **2024**, *105*, 106850. [CrossRef]
11. McHugh, T. Putting Ultrasound to Use in Food Processing. *Food Technol.* **2016**, *70*, 72–74. Available online: <https://www.ift.org/news-and-publications/food-technology-magazine/issues/2016/december/columns/processing-ultrasound-use-in-food-processing> (accessed on 11 September 2025).
12. Chen, L.; Chen, L.; Zhu, K.; Bi, X.; Xing, Y.; Che, Z. The Effect of High-Power Ultrasound on the Rheological Properties of Strawberry Pulp. *Ultrason. Sonochem.* **2020**, *67*, 105144. [CrossRef]
13. Mahmoud, M.; Alelyani, M.; Ahmed, A.M.; Fagiry, M.A.; Alonazi, B.; Abdelbasset, W.K.; Davidson, R.; Osman, H.; Khandaker, M.U.; Musa, M.A.; et al. Ultrasonic Technology as a Non-Thermal Approach for Processing of Fruit and Vegetable Juices: A Review. *Int. J. Food Prop.* **2023**, *26*, 1114–1121. [CrossRef]
14. Bhargava, N.; Mor, R.S.; Kumar, K.; Sharanagat, V.S. Advances in Application of Ultrasound in Food Processing: A Review. *Ultrason. Sonochem.* **2020**, *70*, 105293. [CrossRef]
15. Tsikrika, K.; Chu, B.; Bremner, D.H.; Lemos, A. Effect of Ultrasonic Treatment on Enzyme Activity and Bioactives of Strawberry Puree. *Int. J. Food Sci. Amp Technol.* **2022**, *57*, 1739–1747. [CrossRef]

16. Wu, W.; Ma, X.; Wang, Y.; Yu, Y.; Huo, J.; Huang, D.; Sui, X.; Zhang, Y. Amplifying Bioactivity of Blue Honeysuckle (*Lonicera caerulea* L.) Fruit Puree through Ultrasonication: Antioxidant and Antiproliferative Activity. *Ultrason. Sonochem.* **2025**, *112*, 107179. [CrossRef] [PubMed]
17. Medina-Meza, I.G.; Boioli, P.; Barbosa-Cánovas, G.V. Assessment of the Effects of Ultrasonics and Pulsed Electric Fields on Nutritional and Rheological Properties of Raspberry and Blueberry Purees. *Food Bioprocess Technol.* **2016**, *9*, 520–531. [CrossRef]
18. Guimarães, J.T.; Silva, E.K.; Ranadheera, C.S.; Moraes, J.; Raices, R.S.L.; Silva, M.C.; Ferreira, M.S.; Freitas, M.Q.; Meireles, M.A.A.; Cruz, A.G. Effect of High-Intensity Ultrasound on the Nutritional Profile and Volatile Compounds of a Prebiotic Soursop Whey Beverage. *Ultrason. Sonochem.* **2019**, *55*, 157–164. [CrossRef]
19. Khandpur, P.; Gogate, P.R. Effect of Novel Ultrasound Based Processing on the Nutrition Quality of Different Fruit and Vegetable Juices. *Ultrason. Sonochem.* **2015**, *27*, 125–136. [CrossRef]
20. Keenan, D.F.; Tiwari, B.K.; Patras, A.; Gormley, R.; Butler, F.; Brunton, N.P. Effect of Sonication on the Bioactive, Quality and Rheological Characteristics of Fruit Smoothies. *Int. J. Food Sci. Amp Technol.* **2012**, *47*, 827–836. [CrossRef]
21. Nikkhah, E.; Khaiamy, M.; Heidary, R.; Azar, A.S. The Effect of Ascorbic Acid and H₂O₂ Treatment on the Stability of Anthocyanin Pigments in Berries. *Turk. J. Biol.* **2010**, *34*, 47–53. [CrossRef]
22. Chua, L.S.; Thong, H.Y.; Soo, J. Effect of pH on the Extraction and Stability of Anthocyanins from Jaboticaba Berries. *Food Chem. Adv.* **2024**, *5*, 100835. [CrossRef]
23. Queiroz, F. Optimization for Sensory and Nutritional Quality of a Mixed Berry Fruit Juice Elaborated with Coconut Water. *Food Sci. Technol.* **2020**, *40*, 985–992. [CrossRef]
24. Wendin, K.; Ekman, S.; Bülow, M.; Ekberg, O.; Johansson, D.; Rothenberg, E.; Stading, M. Objective and Quantitative Definitions of Modified Food Textures Based on Sensory and Rheological Methodology. *Food Nutr. Res.* **2010**, *54*, 5134. [CrossRef] [PubMed]
25. Huang, B.; Zhao, K.; Zhang, Z.; Liu, F.; Hu, H.; Pan, S. Changes on the Rheological Properties of Pectin-Enriched Mango Nectar by High Intensity Ultrasound. *LWT* **2018**, *91*, 414–422. [CrossRef]
26. Xing, Y.; Xue, Y.; Yang, X.; Wang, K.; Li, M.; Wang, J.; Xu, H. Ultrasonic Treatment Changes the Rheological Properties of Strawberry Pulp via Alterations in Particle Size and the Physicochemical Properties of Pectin. *Food Hydrocoll.* **2025**, *159*, 110576. [CrossRef]
27. Arya, S.S.; More, P.R.; Das, T.; Hilares, R.T.; Pereira, B.; Arantes, V.; da Silva, S.S.; Santos, J.C.D. Effect of Hydrodynamic Cavitation Processing on Orange Juice Physicochemical and Nutritional Properties. *J. Agric. Food Res.* **2023**, *14*, 100781. [CrossRef]
28. Terán Hilares, R.; Dos Santos, J.G.; Shiguematsu, N.B.; Ahmed, M.A.; Da Silva, S.S.; Santos, J.C. Low-Pressure Homogenization of Tomato Juice Using Hydrodynamic Cavitation Technology: Effects on Physical Properties and Stability of Bioactive Compounds. *Ultrason. Sonochem.* **2019**, *54*, 192–197. [CrossRef]
29. Moschakis, T. Microrheology and Particle Tracking in Food Gels and Emulsions. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* **2013**, *18*, 311–323. [CrossRef]
30. Yang, N.; Lv, R.; Jia, J.; Nishinari, K.; Fang, Y. Application of Microrheology in Food Science. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* **2017**, *8*, 493–521. [CrossRef]
31. Ortega, F.; Ritacco, H.; Rubio, R.G. Interfacial Microrheology: Particle Tracking and Related Techniques. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* **2010**, *15*, 237–245. [CrossRef]
32. Bi, X.; Hemar, Y.; Balaban, M.O.; Liao, X. The Effect of Ultrasound on Particle Size, Color, Viscosity and Polyphenol Oxidase Activity of Diluted Avocado Puree. *Ultrason. Sonochem.* **2015**, *27*, 567–575. [CrossRef]
33. Suo, G.; Zhou, C.; Su, W.; Hu, X. Effects of Ultrasonic Treatment on Color, Carotenoid Content, Enzyme Activity, Rheological Properties, and Microstructure of Pumpkin Juice during Storage. *Ultrason. Sonochem.* **2022**, *84*, 105974. [CrossRef] [PubMed]
34. Chemat, F.; Khan, M.K. Applications of Ultrasound in Food Technology: Processing, Preservation and Extraction. *Ultrason. Sonochem.* **2011**, *18*, 813–835. [CrossRef] [PubMed]
35. Dakubu, S. Cell Inactivation by Ultrasound. *Biotechnol. Bioeng.* **1976**, *18*, 465–471. [CrossRef] [PubMed]
36. Csiszar, E.; Szabo, Z.; Balogh, O.; Fekete, E.; Koczka, K. The Role of the Particle Size Reduction and Morphological Changes of Solid Substrate in the Ultrasound-Aided Enzymatic Hydrolysis of Cellulose. *Ultrason. Sonochemistry* **2021**, *78*, 105711. [CrossRef]
37. Khandpur, P.; Gogate, P.R. Understanding the Effect of Novel Approaches Based on Ultrasound on Sensory Profile of Orange Juice. *Ultrason. Sonochem.* **2015**, *27*, 87–95. [CrossRef]
38. Comarella, C.G.; Sautter, C.K.; Ebert, L.C.; Penna, N.G. Polifenóis totais e avaliação sensorial de suco de uvas Isabel tratadas com ultrassom. *Braz. J. Food Technol.* **2012**, *15*, 69–73. [CrossRef]
39. Carneiro, G.R.; Pimentel, T.C. Unraveling the Potential of Ultrasound Processing from the Consumer Perspective: A Review on Sensory Characteristics and Perception. *Food Biosci.* **2025**, *68*, 106789. [CrossRef]
40. Wang, W.; Jung, J.; Tomasino, E.; Zhao, Y. Optimization of Solvent and Ultrasound-Assisted Extraction for Different Anthocyanin Rich Fruit and Their Effects on Anthocyanin Compositions. *LWT-Food Sci. Technol.* **2016**, *72*, 229–238. [CrossRef]
41. Hu, W.; Gong, H.; Li, L.; Chen, S.; Ye, X. Ultrasound Treatment on Stability of Total and Individual Anthocyanin Extraction from Blueberry Pomace: Optimization and Comparison. *Molecules* **2019**, *24*, 2621. [CrossRef]

42. Dumitraşcu, L.; Enachi, E.; Stănciuc, N.; Aprodu, I. Optimization of Ultrasound Assisted Extraction of Phenolic Compounds from Cornelian Cherry Fruits Using Response Surface Methodology. *CyTA-J. Food* **2019**, *17*, 814–823. [\[CrossRef\]](#)
43. Rohilla, S.; Mahanta, C.L. Phytochemical Composition and In-Vitro Bioaccessibility of Phenolics in Different Varieties of Tamarillo (*Solanum betaceum*) Fruits: Effect of the High-Pressure Homogenization and Ultrasonication. *Food Chem. Adv.* **2024**, *4*, 100673. [\[CrossRef\]](#)
44. Dubrovi, I.; Herceg, Z.; Jambrak, A.R.; Badanjak, M.; Dragovi, V. Effect of High Intensity Ultrasound and Pasteurization on Anthocyanin Content in Strawberry Juice. *Food Technol. Biotechnol.* **2011**, *49*, 196–204.
45. Sun, J.; Mei, Z.; Tang, Y.; Ding, L.; Jiang, G.; Zhang, C.; Sun, A.; Bai, W. Stability, Antioxidant Capacity and Degradation Kinetics of Pelargonidin-3-Glucoside Exposed to Ultrasound Power at Low Temperature. *Molecules* **2016**, *21*, 1109. [\[CrossRef\]](#)
46. Neckebroek, B.; Verkempinck, S.H.E.; Van Audenhove, J.; Bernaerts, T.; de Wilde d'Estmael, H.; Hendrickx, M.E.; Van Loey, A.M. Structural and Emulsion Stabilizing Properties of Pectin Rich Extracts Obtained from Different Botanical Sources. *Food Res. Int.* **2021**, *141*, 110087. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
47. Nutrition and Health Effects of Pectin: A Systematic Scoping Review of Human Intervention Studies. Nutrition Research Reviews. Cambridge Core. Available online: <https://www.cambridge.org/core/journals/nutrition-research-reviews/article/nutrition-and-health-effects-of-pectin-a-systematic-scoping-review-of-human-intervention-studies/01BF0759F09A2BBC419F333B8B1D4FF9> (accessed on 4 November 2025).
48. Legentil, A.; Guichard, I.; Piffaut, B.; Haluk, J.P. Characterization of Strawberry Pectin Extracted by Chemical Means. *LWT-Food Sci. Technol.* **1995**, *28*, 569–576. [\[CrossRef\]](#)
49. Wojdyło, A.; Jáuregui, P.N.N.; Carbonell-Barrachina, Á.A.; Oszmiański, J.; Golis, T. Variability of Phytochemical Properties and Content of Bioactive Compounds in *Lonicera caerulea* L. var. kamtschatica berries. *J. Agric. Food Chem.* **2013**, *61*, 12072–12084. [\[CrossRef\]](#)
50. Kumar, K.; Srivastav, S.; Sharanagat, V.S. Ultrasound Assisted Extraction (UAE) of Bioactive Compounds from Fruit and Vegetable Processing by-Products: A Review. *Ultrason. Sonochem.* **2020**, *70*, 105325. [\[CrossRef\]](#)
51. Sharma, S.; Wani, K.M.; Mujahid, S.M.; Jayan, L.S.; Rajan, S.S. Review on Pectin: Sources, Properties, Health Benefits and Its Applications in Food Industry. *J. Future Foods* **2026**, *6*, 205–219. [\[CrossRef\]](#)
52. Saleh, M.; Lee, Y. Instrumental Analysis or Human Evaluation to Measure the Appearance, Smell, Flavor, and Physical Properties of Food. *Foods* **2023**, *12*, 3453. [\[CrossRef\]](#)
53. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific Opinion on Dietary Reference Values for Vitamin C. *EFSA J.* **2013**, *11*, 3418. [\[CrossRef\]](#)
54. Oliveira, V.S.; Rodrigues, S.; Fernandes, F.A.N. Effect of High Power Low Frequency Ultrasound Processing on the Stability of Lycopene. *Ultrason. Sonochem.* **2015**, *27*, 586–591. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
55. Alvarado, J.D.; Palacios Viteri, N. Effect of temperature on the aerobic degradation of vitamin C in citric fruit juices. *Arch. Latinoam. Nutr.* **1989**, *39*, 601–612. [\[PubMed\]](#)
56. Golmohamadi, A.; Möller, G.; Powers, J.; Nindo, C. Effect of Ultrasound Frequency on Antioxidant Activity, Total Phenolic and Anthocyanin Content of Red Raspberry Puree. *Ultrason. Sonochem.* **2013**, *20*, 1316–1323. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
57. Valdramidis, V.P.; Cullen, P.J.; Tiwari, B.K.; O'Donnell, C.P. Quantitative Modelling Approaches for Ascorbic Acid Degradation and Non-Enzymatic Browning of Orange Juice during Ultrasound Processing. *J. Food Eng.* **2010**, *96*, 449–454. [\[CrossRef\]](#)
58. Briggs, J.L.; Steffe, J.F. Using Brookfield Data and the Mitschka Method to Evaluate Power Law Foods. *J. Texture Stud.* **1997**, *28*, 517–522. [\[CrossRef\]](#)
59. Giusti, M.M.; Wrolstad, R.E. Characterization and Measurement of Anthocyanins by UV-Visible Spectroscopy. *Curr. Protoc. Food Anal. Chem.* **2001**, *00*, F1.2.1–F1.2.13. [\[CrossRef\]](#)
60. Singleton, V.L.; Rossi, J.A. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-phosphotungstic Acid Reagents. *Am. J. Enol. Vitic.* **1965**, *16*, 144–158. [\[CrossRef\]](#)
61. ISO 8586:2012; Sensory Analysis—General Guidelines for the Selection, Training and Monitoring of Selected Assessors and Expert Sensory Assessors. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2012.
62. ISO 8589:2007; Sensory Analysis—General Guidance for the Design of Test Rooms. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2007.
63. Taylor, K.A.; Buchanan-Smith, J.G. A Colorimetric Method for the Quantitation of Uronic Acids and a Specific Assay for Galacturonic Acid. *Anal. Biochem.* **1992**, *201*, 190–196. [\[CrossRef\]](#)
64. Mieszczakowska-Frać, M.; Dickinson, N.J.; Konopacka, D. Effect of Postharvest Ripening on the Phytochemical Composition and Antioxidant Properties of Fruits from Ten Plum (*Prunus domestica* L.) Cultivars. *Agronomy* **2025**, *15*, 1351. [\[CrossRef\]](#)

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Skierniewice, 10.02.2026

**Statement on the authors' substantive contribution
to the publication**

Jan Piecko
National Institute of Horticultural Research

This statement concerns the publication entitled:

**Ultrasound Treatment in Berry Puree Production: Effects on Sensory, Rheological, and
Chemical Properties.**

Molecules, ISSN 1420-3049

**Piecko, J.; Mieszczakowska-Frać, M.; Dickinson, N.J.; Wrzodak, A.; Celejewska, K.;
Frøst, M.B.; Lange, B.; Dandanell, C.; Lewandowicz, J.; Jankowska, P.**

Lp.	Nazwisko i imię Autora	Opis wkładu merytorycznego	Afiliacja	Podpis Autora
1	Piecko Jan	literature review, conducting the experiment, performing part of the physicochemical and sensory analyses, data analysis, preparation of the article	National Institute of Horticultural Research	
2	Monika Mieszczakowska-Frać	assistance in planning the experiment, verification of results, supervision of the experiment, editing of the manuscript content	National Institute of Horticultural Research	
3	Niall Dickinson	editing of the manuscript content, language correction of the manuscript	National Institute of Horticultural Research	
4	Anna Wrzodak	assistance in analysing sensory evaluation results, text editing	National Institute of Horticultural Research	

5	Karolina Celejewska	assistance in preparing the article, participation in analyses	National Institute of Horticultural Research	Karolina Celejewska
6	Michael Bom Frøst	planning and supervision of sensory analysis, support in data analysis	University of Copenhagen	Michael Bom Frøst
7	Belinda Lange	management of sensory analysis, conducting panelist training	University of Copenhagen	Belinda Lange
8	Charlotte Dandaneil	supervision and optimisation of data acquisition from sensory evaluation	University of Copenhagen	Charlotte Dandaneil
9	Jacek Lewandowicz	assistance in selecting the method of analysis for evaluating microrheological properties, support in analysing the results	Institute of Agricultural and Food Biotechnology	Jacek Lewandowicz
10	Patrycja Jankowska	support in the analysis of microrheological properties	Institute of Agricultural and Food Biotechnology	Patrycja Jankowska

Uprawnienia dotyczące wykorzystania publikacji

Nie są wymagane żadne specjalne uprawnienia do ponownego wykorzystania całości lub części artykułów opublikowanych przez MDPI, w tym rysunków i tabel. W przypadku artykułów opublikowanych na licencji Creative Common CC BY typu open access, każda część artykułu może być ponownie wykorzystana bez zezwolenia, pod warunkiem że zostanie wyraźnie cytowana. Ponowne wykorzystanie artykułu nie oznacza poparcia ze strony autorów lub MDPI. Ponadto autorzy nie potrzebują specjalnego zezwolenia, aby przesłać swoje badania do zewnętrznych repozytoriów. Polityka ta obejmuje wszystkie wersje artykułu, w tym wersję przesłaną, zaakceptowaną i opublikowaną.

Redakcja MDPI

