



Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie

Instytut Nauk o Żywności

mgr inż. Magdalena Karwacka

**Analiza wpływu reformulacji składu
surowcowego na wybrane właściwości
liofilizowanych przekąsek owocowo-
warzywnych wytworzonych z zastosowaniem
wytłoków owocowych oraz pektyny
jako dodatków strukturotwórczych**

Analysis of the effect of reformulation on selected properties
of freeze-dried fruit and vegetable snacks obtained with fruit
pomace and pectin as structure-forming additives

Rozprawa doktorska
Doctoral thesis

Rozprawa doktorska wykonana pod kierunkiem
prof. dr hab. Moniki Janowicz
Instytut Nauk o Żywności
Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji

Promotor pomocniczy:
dr hab. inż. Sabina Galus, prof. SGGW
Instytut Nauk o Żywności
Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji

Warszawa, 2025

Oświadczenie promotora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że niniejsza rozprawa została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora.

Data 18.02.2025..... Czytelny podpis promotora [podpis]

Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

Świadoma odpowiedzialności prawnej, w tym odpowiedzialności karnej za złożenie fałszywego oświadczenia, oświadczam, że niniejsza rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami prawa, w szczególności z ustawą z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (tj. z dnia 28 października 2022 r., Dz.U. z 2022 r. poz. 2509 ze zm.)

Oświadczam, że przedstawiona rozprawa nie była wcześniej podstawą żadnej procedury związanej z uzyskaniem stopnia naukowego doktora.

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

Przyjmuję do wiadomości, że rozprawa doktorska poddana zostanie procedurze antyplagiatowej.

Data 18.02.2025..... Czytelny podpis autora rozprawy [podpis]

Streszczenie

Analiza wpływu reformulacji składu surowcowego na wybrane właściwości liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wytworzonych z zastosowaniem wyłoków owocowych oraz pektyny jako dodatków strukturotwórczych

Celem pracy była ocena wpływu reformulacji składu surowcowego, ze szczególnym uwzględnieniem dodatków strukturotwórczych, na wybrane właściwości fizykochemiczne i użytkowe liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych, wytworzonych z zastosowaniem wyłoków owocowych oraz niskometylowanej pektyny jabłkowej. Matrycą stosowaną w badaniach były przekąski marchwiowo-pomarańczowe, do wytworzenia których użyto niskometylowanej pektyny jabłkowej, jako dodatku referencyjnego, lub proszków z suszonych wyłoków owocowych z jabłek, czarnych porzeczek oraz aronii. Zakres badań obejmował analizę wpływu rodzaju dodatku na wartość odżywczą, stabilność przechowalniczą oraz ślad węglowy liofilizowanych przekąsek, a także wpływ udziału poszczególnych dodatków w recepturze na wybrane cechy fizykochemiczne, w tym zawartość i aktywność wody, higroskopijność, barwę, właściwości mechaniczne, mikrostrukturę oraz zawartość składników bioaktywnych. Ponadto, dokonano analizy potencjału strukturotwórczego proszków z wyłoków owocowych w obecności jonów wapnia.

Analiza otrzymanych wyników wykazała, że zastosowanie proszków z wyłoków owocowych jako zamiennika pektyny zwiększało zawartość białka, tłuszczu i składników mineralnych, ale też zmniejszenie zawartości błonnika w liofilizowanych przekąskach. Dodatek proszków z wyłoków owocowych powodował wprowadzenie do układu składników bioaktywnych o właściwościach przeciwutleniających, co dodatkowo korzystnie wpływało na wartość prozdrowotną badanych produktów. Badania przechowalnicze wykazały, że wybrane cechy produktów strukturyzowanych zarówno pektyną, jak i proszkami z wyłoków owocowych zmieniały się w czasie przechowywania, szczególnie pod względem barwy i zawartości składników bioaktywnych. Największe zmiany zaobserwowano podczas przechowywania w temperaturze 40°C.

Proszki z wyłoków owocowych wykazały potencjał strukturotwórczy i istotnie wpłynęły na właściwości matrycy badanych produktów, jednakże efekt otrzymany po ich zastosowaniu był znacznie mniejszy niż po dodaniu pektyny. Po wprowadzeniu do układu jonów wapnia zaobserwowano tendencję w stronę poprawy właściwości strukturotwórczych wyłoków, jednak otrzymane wyniki nie były jednoznaczne. Wraz ze zwiększaniem udziału proszków z wyłoków owocowych w recepturze, nastąpiło zwiększanie twardości i zmniejszanie porowatości liofilizowanych przekąsek, a zwarta i mniej porowata struktura przyczyniła się do zmniejszenia zdolności produktów do pochłaniania pary wodnej z otoczenia.

Z uwagi na sposób wytwarzania liofilizowanych przekąsek według opracowanego schematu technologicznego bez wprowadzania dodatkowych operacji oraz modyfikacji jego przebiegu, reformulacja składu i zastąpienie pektyny proszkami z wyłoków owocowych nie wpłynęło na zużycie energii i ślad węglowy procesu otrzymywania gotowych produktów. Niemniej jednak, wykorzystanie produktów ubocznych przetwórstwa owoców wpisuje się w założenia koncepcji zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym.

Słowa kluczowe: liofilizowane przekąski, pektyna, wyłoki jabłkowe, wyłoki z czarnych porzeczek, wyłoki z aronii

Summary

Analysis of the effect of reformulation on selected properties of freeze-dried fruit and vegetable snacks obtained with fruit pomace and pectin as structure-forming additives

The aim of this study was to evaluate the effect of reformulation of the raw material formulation, with particular emphasis on structure-forming additives, on selected physicochemical and functional properties of freeze-dried fruit and vegetable snacks made using fruit pomace and low-methoxyl apple pectin. The matrix used in the study was carrot-orange snacks, for which low-methoxyl apple pectin was used as a reference additive, or dried fruit pomace powders from apples, blackcurrants and chokeberries. The scope of the study included an analysis of the effect of additive type on the nutritional value, storage stability and carbon footprint of freeze-dried snacks, as well as the effect of the proportion of each additive in the recipe on selected physicochemical characteristics, including water content and activity, hygroscopicity, colour, mechanical properties, microstructure and content of bioactive compounds. In addition, the structure-forming potential of fruit pomace powders in the presence of calcium ions was analysed.

Analysis of the results showed that the use of fruit pomace powders as a substitute for pectin increased the protein, fat and mineral content, but also reduced the fibre content of the freeze-dried snacks. The addition of fruit pomace powders resulted in the introduction of bioactive components with antioxidant properties into the system, which had an additional beneficial effect on the health-promoting value of the tested products. Storage studies showed that selected characteristics of products structured with both pectin and fruit pomace powders changed during storage, especially in terms of colour and content of bioactive components. The greatest changes were observed during storage at 40°C.

Fruit pomace powders showed structure-forming potential and significantly influenced the matrix properties of the analysed products, however, the effect obtained after their application was significantly less than after the addition of pectin. When calcium ions were introduced into the system, a trend towards an improvement in the structure-forming properties of the pomace was observed, but the results obtained were inconclusive. As the proportion of fruit pomace powder in the formulation increased, there was an increase in the hardness and a decrease in the porosity of the freeze-dried snacks. The compact and less porous structure contributed to a decrease in the ability of the products to absorb water vapour from the environment.

Given the way freeze-dried snacks were produced according to the developed technological scheme without introducing additional operations and modifying its course, reformulation of the composition and replacement of pectin with fruit pomace powders did not affect the energy consumption and carbon footprint of the manufacturing process. Nevertheless, the use of fruit processing by-products fits in with the concept of sustainability and circular economy.

Keywords: freeze-dried snacks, pectin, apple pomace, blackcurrant pomace, chokeberry pomace

Spis treści

WYKAZ PUBLIKACJI STANOWIĄCYCH ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ....	11
1. PRZEGLĄD LITERATURY	13
2. CEL PRACY I HIPOTEZY BADAWCZE	24
3. ORGANIZACJA BADAŃ, MATERIAŁY I METODYKA	25
3.1 Organizacja badań.....	25
3.2 Materiał i metodyka – opis skrócony.....	28
3.2.1 Materiał badany – etap I i II	28
3.2.2 Metody technologiczne – etap I, II i III	28
3.2.3 Metody analityczne.....	29
3.2.3.1 Zużycie energii i szacowanie śladu węglowego – etap I (P2)	29
3.2.3.2 Badanie składu chemicznego przekąsek – etap IIA (P3)	29
3.2.3.3 Badanie zmian wybranych właściwości fizykochemicznych podczas przechowywania – etap IIB (P4)	30
3.2.4 Materiał badany – etap III (P5, P6, P7)	31
3.2.5 Metody analityczne – etap III (P5, P6, P7)	32
3.2.6 Metody statystyczne	33
4. OMÓWIENIE I DYSKUSJA WYNIKÓW	34
4.1 Określenie zużycia energii i śladu węglowego procesu technologicznego wytwarzania liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych .	34
4.2 Wpływ dodatku proszków z wyłoków owocowych na wartość odżywczą liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych	37
4.3 Wpływ zastosowanych dodatków i warunków przechowywania na stabilność przechowalniczą liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych	42
4.4 Wpływ dodatku proszków z wyłoków owocowych i pektyny na zawartość związków bioaktywnych, właściwości strukturalne i mechaniczne oraz właściwości związane z obecnością i powinowactwem do wody	50
5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	72

6.	SPIS LITERATURY	75
7.	DOROBK NAUKOWY	85
8.	PUBLIKACJE STANOWIĄCE ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ ORAZ OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORÓW	91

WYKAZ PUBLIKACJI STANOWIĄCYCH ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ

- P1. Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2022).** Effect of structure and texture forming additives on properties of freeze-dried snacks–review®. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 130-141. (MEiN: 20)
- P2. Karwacka M., Rybak K., Smetana S., Galus S., Janowicz M. (2022).** Analysis of selected functional properties, resource demands, and energy consumption of freeze-dried vegetable snacks. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(7), e16721. (IF₂₀₂₂: 2,5; MEiN: 40)
- P3. Karwacka M., Rybak K., Świeca M., Galus S., Janowicz M. (2022).** The Effect of the Addition of Selected Fruit Pomace Powders and Pectin as Carrier Agents on the Nutritional Value of Freeze-Dried Snacks. *Sustainability*, 14(20), 13012. (IF₂₀₂₂: 3,9; MEiN: 100)
- P4. Karwacka M., Ciurzyńska A., Galus S., Janowicz M. (2024).** The Effect of Storage Time and Temperature on Quality Changes in Freeze-Dried Snacks Obtained with Fruit Pomace and Pectin Powders as a Sustainable Approach for New Product Development. *Sustainability*, 16(11), 4736. (IF₂₀₂₄: 3,3; MEiN: 100)
- P5. Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2024).** The effect of apple pomace powder and calcium ions on selected physicochemical properties of freeze-dried carrot-orange-ginger snacks. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(3), 1713-1722. (IF₂₀₂₄: 3,3; MEiN: 100)
- P6. Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2024).** Development and physicochemical characteristics of multicomponent freeze-dried snacks obtained with blackcurrant pomace powder and calcium ions as structuring agents. *Journal of Food Science and Technology*, 61(7), 1363-1373. (IF₂₀₂₄: 2,6; MEiN: 70)
- P7. Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2024).** Application of chokeberry pomace as pectin substitute in nonconventional freeze-dried snacks: physicochemical characteristics of the products. *European Food Research and Technology*, 250(12), 2921-2933. (IF₂₀₂₄: 3; MEiN: 70)

Sumaryczny IF publikacji wynosi **18,6**. Liczba punktów ministerialnych wynosi **500** pkt. Wartości współczynników Impact Factor poszczególnych publikacji podano w oparciu o dane udostępnione w Journal Citation Report w roku publikacji, punkty ministerialne podano w oparciu o „Wykaz czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych wraz z przypisaną liczbą punktów”, stanowiących załącznik do komunikatu Ministra Edukacji i Nauki z dnia 5 stycznia 2024 roku.

1. PRZEGLĄD LITERATURY

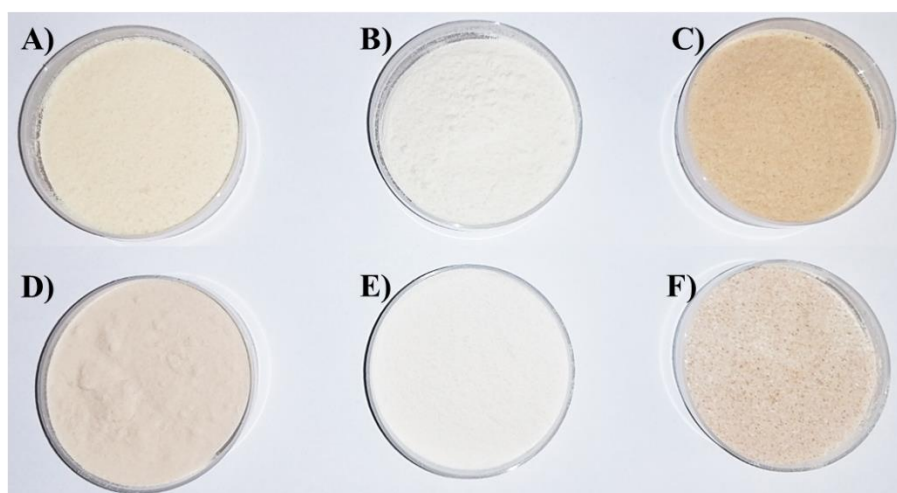
Według ogólnie przyjętej definicji, przekąski to rodzaj produktów spożywczych, konsumowanych pomiędzy głównymi posiłkami. Ich cechy projektuje się w celu zaspokojenia „małego głodu”, wynikającego często z zachcianek żywieniowych. Należy również zauważyć, że przekąski to produkty, które przyciągają konsumentów swoimi atrybutami teksturalnymi i sensorycznymi (Silva-Espinoza i wsp. 2021). Są one przeznaczone do spożycia między głównymi posiłkami lub jako ich potencjalne zamienniki. W dzisiejszych czasach, gdy świadomość konsumentów znacznie wzrosła w odniesieniu do kwestii żywieniowych i środowiskowych, producenci są zobowiązani do sprostanienia ich oczekiwaniom poprzez wprowadzanie wysokiej jakości, zdrowych i zrównoważonych produktów, mogących zastąpić słodyczne i wysokotłuszczowe przekąski dostępne na rynku spożywczym (Ciurzyńska i wsp. 2019). Najnowsze doniesienia (Frederiksen i wsp. 2025) pokazują, że decyzje o wyborze prozdrowotnych przekąsek są najczęściej determinowane przez świadomość wartości odżywczej, poczucie głodu oraz potrzebę nagrodzenia się, natomiast wybór „niezdrowych” przekąsek jest konsekwencją kuszących atrybutów sensorycznych produktów, potrzebą nagrodzenia się oraz zagłuszaniem negatywnych emocji. Ponadto, spośród zdrowych przekąsek konsumenci najczęściej sięgają po świeże owoce i warzywa, produkty mleczne o niskiej zawartości tłuszczu i cukru, przetworzone produkty na bazie owoców i warzyw oraz orzechy, a wśród przekąsek określonych mianem „niezdrowych” dominują lody, produkty mleczne wysokotłuszczowe i o dużej zawartości cukru oraz szeroka gama produktów zbożowych i smażonych. W badaniach Uliano i wsp. (2024) przyjrano się stosunkowi włoskich konsumentów do zdrowych i funkcjonalnych przekąsek w postaci batonów. Okazało się, że spożycie takich produktów jest okazjonalne, a ich wybór silnie zależy od wartości żywieniowej i ceny, natomiast aspekt środowiskowy związany ze zrównoważoną produkcją jest ważny, jednak schodzi na dalszy plan i nie wpływa istotnie na decyzję konsumentów.

Owoce i warzywa są najczęściej rekomendowane jako prozdrowotne przekąski, będące naturalnym źródłem składników odżywczych i związków bioaktywnych, z których wiele może zostać utraconych podczas przetwarzania. Ze względu na wysoką zawartość wody, wydłużenie okresu przydatności do spożycia owoców i warzyw zapewnia m.in. suszenie, którego głównym celem jest zmniejszenie zawartości i aktywności wody w materiale. Przetwarzanie, w tym suszenie, tkanki roślinnej może

powodować zauważalne zmiany barwy, tekstury i składu chemicznego produktów w porównaniu z surowcem. Pod względem jakości gotowego produktu, ogólnej atrakcyjności, właściwości fizykochemicznych oraz retencji związków bioaktywnych, liofilizacja jest uważana za najkorzystniejszą metodę konserwacji owoców i warzyw (Bhatta i wsp. 2020). Podczas tego procesu, zmniejszone ciśnienie w komorze suszarki umożliwia prowadzenie usuwania wody w niższej temperaturze w porównaniu z innymi technikami stosowanymi w suszarnictwie. Ze względu na ograniczoną ekspozycję na kontakt z powietrzem i obniżoną temperaturę, reakcje utleniania i degradacja termiczna są znacznie ograniczone (Nowak i Jakubczyk, 2020). Dzięki temu produkty otrzymywane w wyniku procesu liofilizacji zachowują kształt zbliżony do pierwotnego kształtu surowca poddawanego suszeniu oraz charakteryzują się atrakcyjną teksturą i dużą porowatością, co prowadzi do poprawy biodostępności składników bioaktywnych (Ciurzyńska i wsp. 2015; Pollini i wsp. 2022). Niemniej jednak przetwarzanie żywności nie jest jedynym czynnikiem wpływającym na jej wartość żywieniową. Produkty spożywcze są złożonymi i dynamicznymi matrycami, a procesy przetwarzania, w tym liofilizacja, powodują interakcje pomiędzy komponentami żywności, czego konsekwencją jest występowanie korzystnych lub niekorzystnych zmian jakości (Harguindeguy i Fissore, 2020). W ten sposób atrakcyjność żywności, zarówno w odniesieniu do właściwości fizycznych, jak i chemicznych, może się zmieniać i być projektowana między innymi poprzez modyfikowanie receptur (Van Gunst i wsp. 2018).

Badania dotyczące projektowania liofilizowanych przekąsek wieloskładnikowych pokazują, że do ich wytworzenia niezbędne są nośniki, które wspierają tworzenie struktury, tekstury i właściwości funkcjonalnych, a w efekcie pozwalają na opracowanie innowacyjnych, restrukturyzowanych produktów o pożądanych i powtarzalnych cechach (Ciurzyńska i wsp. 2020; Silva-Espinoza i wsp. 2020b; Jakubczyk i wsp. 2021, 2022; Karwacka i wsp. 2021). Potrzeba stosowania składników teksturotwórczych, określanych także nośnikami, wynika z niskiej temperatury przejścia szklistego węglowodanów prostych zawartych w surowcach roślinnych, co ma szczególne znaczenie w przypadku produktów o dużej zawartości cukrów. Dlatego związki o dużej masie cząsteczkowej (m.in. biopolimery), takie jak hydrokoloidy, białka i błonniki, są stosowane w celu zwiększenia temperatury przejścia szklistego, co pozytywnie wpływa na jakość i stabilność produktów (Muzaffar i Kumar, 2017; Silva-Espinoza i wsp. 2020b). Niska temperatura przejścia szklistego powoduje przemianę fazową, a w konsekwencji niepożądane zmiany, takie jak kleistość, zbrylanie,

załamywanie struktury, w wyniku których produkty tracą kruchość i stają się gumowate (Silva-Espinoza i wsp. 2020b). Dodatek nośników skutkuje uzyskaniem produktów o lepszej i stabilnej jakości, jednak poszczególne substancje stosowane w tej roli na swój sposób wpływają na charakterystykę liofilizatów pod względem właściwości mechanicznych, chemicznych i funkcjonalnych (Ciurzyńska i wsp. 2019). Ponadto, dodatek hydrokoloidów pełni także funkcję ochronną względem obecnych w materiale związków bioaktywnych i zwiększa zawartość błonnika, dzięki czemu pozytywnie wpływa na wartość odżywczą produktów (Li i Nie 2016; Donno i wsp. 2019; Wang i wsp. 2020; Silva-Espinoza i wsp. 2021). Liofilizowane żele hydrokoloidowe z dodatkiem komponentów owocowych i warzywnych wciąż są przedmiotem badań, jednak na polskim rynku dostępne są owocowe i owocowo-warzywne batony strukturyzowane, stabilizowane synergicznym kompleksem na bazie pektyny z inuliną i/lub maltodekstryną (Celiko, 2022).



Rys. 1. Przykłady hydrokoloidów wykorzystywanych w przetwórstwie żywności: **A)** guma guar, **B)** mączka chleba świętojańskiego, **C)** pektyna niskometylowana, **D)** guma arabska, **E)** alginian sodu i **F)** pektyna wysokometylowana.

Hydrokoloidy to długołańcuchowe węglowodany i białka, których właściwości, w tym zdolność do adsorpcji wody, silnie zależą od ich struktury molekularnej i konfiguracji cząsteczek (Milani i Maleki, 2012; Ciurzyńska i wsp. 2017; Cassanelli i wsp. 2018) w połączeniu z czynnikami zewnętrznymi, np.: pH, zawartością cukru i siłą jonową roztworu (Ciurzyńska i wsp. 2015, 2017, 2020). Ze względu na swoje właściwości funkcjonalne hydrokoloidy są stosowane w przemyśle spożywczym do różnych celów, w tym do osiągnięcia efektu żelowania, emulgowania, zagęszczania, powlekania, tworzenia struktury i tekstury (Milani i Maleki, 2012). Przykłady

hydrokoloidów, stosowanych w przemyśle spożywczym, przedstawiono na **rysunku 1**. Zastosowanie ich umożliwia wytworzenie porowatych matryc, porównywalnych do struktur komórkowych tkanek np. roślinnych, ale charakteryzujących się zestawem zaprojektowanych i kontrolowanych właściwości (Ciurzyńska i wsp. 2015; Feng i wsp. 2024). Hydrokoloidy rozpuszczają się lub pęcznieją po zmieszaniu z wodą, tworząc trójwymiarową sieć, która w środowisku wodnym sprawia, że materiał jest plastyczny i lepki, natomiast po usunięciu wody w odpowiednich warunkach – twardy i kruchy (Ciurzyńska i wsp. 2020; Jakubczyk i wsp. 2022). Uzyskanie suchych żeli z zachowaniem wewnętrznej struktury jest możliwe dzięki zastosowaniu metody suszenia opartej na zjawisku sublimacji (liofilizacja), która pozwala na usunięcie wody bez ingerencji w strukturę molekularną i wiązania pomiędzy składnikami odwadnianej matrycy (Ciurzyńska i wsp. 2017).

Jednym z powszechnie stosowanych w przemyśle spożywczym hydrokoloidów jest pektyna. Jest to długołańcuchowy polisacharyd, pozyskiwany ze ścian komórkowych roślin, a w skali przemysłowej są to najczęściej jabłka oraz owocowe cytrusowe (Chandel i wsp. 2022). Struktura molekularna pektyny jest bardzo zróżnicowana w zależności od jej pochodzenia, jednak głównym budulcem są zazwyczaj powtarzające się jednostki kwasu *D*-galakturonowego, połączone wiązaniami α -1,4-glikozydowymi, oraz łańcuchy boczne zbudowane z neutralnych cukrów (Constenla i wsp. 2002; Pancierz i wsp. 2022). Żelowanie pektyny jest determinowane przez jej właściwości fizykochemiczne, a także czynniki środowiskowe, takie jak pH, obecność cukrów i białek oraz jonów indukujących tworzenie trójwymiarowej sieci żeli (Chan i wsp. 2017). Jednym z głównych warunków, różnicujących strukturę pektyny i odpowiadających za jej właściwości funkcjonalne, jest stopień estryfikacji, zgodnie z którym pektyny można podzielić na formy wysoko- i niskometylowane. Żelowanie pektyny wysokometylowanej wymaga ściśle określonych warunków, takich jak kwaśne pH (<3,5) i duża zawartość cukru. Pektyna niskometylowana jest aktywowana przez interakcje z jonami metali, dzięki czemu może być wykorzystywana w matrycach charakteryzujących się szerokim zakresem pH i niskim stężeniem cukru (Wan i wsp. 2021). Spośród wielu mikro- i makroskładników, jony wapnia zostały dokładnie zbadane i są często zalecane jako katalizator tworzenia sieci żelowych w roztworach pektyn (Capel i wsp. 2006; Kastner i wsp. 2012; Celus i wsp. 2018; Wan i wsp. 2021). Indukują one tworzenie sieciujących wiązań jonowych między grupami karboksylowymi, obecnymi w cząsteczkach pektyn, a żelowanie jonowe zapobiega zapadaniu się struktury materiału podczas odwadniania (Groult i wsp. 2021).

Łącząc te determinanty oraz najnowsze doniesienia o ryzyku występowania niedoboru wapnia w populacji, szczególnie wśród mieszkańców krajów rozwijających się (Shlisky i wsp. 2022), wprowadzenie do składu produktów spożywczych jonów wapnia, może potencjalnie wspomóc proces żelowania i poprawić wartość odżywczą uzyskanych produktów.

Biorąc pod uwagę obecne potrzeby związane z dążeniem do zrównoważonego rozwoju, badane są różne sposoby zmniejszenia wpływu „nowej” żywności na środowisko, takie jak modyfikacja procesów technologicznych lub receptur w ramach gospodarki w obiegu zamkniętym (Nayak i Bhushan, 2019). Pektyny komercyjnie są pozyskiwane najczęściej z produktów ubocznych i odpadów przemysłu rolno-spożywczego, w tym wyłoków owocowych, a zatem jej produkcja częściowo wpisuje się w politykę gospodarki w obiegu zamkniętym i waloryzacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego. Produkcja pektyn obejmuje trzy główne etapy, w tym wstępną obróbkę surowca, ekstrakcję enzymatyczną lub nieenzymatyczną oraz oczyszczanie, a każdy z nich wiąże się ze znacznym zużyciem zasobów i energii. Procesy te można optymalizować poprzez modyfikację wybranych parametrów, takich jak pH, temperatura lub czas procesu (Adetunji i wsp. 2017; Muhidinov i wsp. 2021; Chandel i wsp. 2022; Ciriminna i wsp. 2022). Ze względu na stosunkowo niski koszt i dobrze znane właściwości strukturo- i teksturotwórcze, pektyny są stosowane w szerokiej gamie produktów spożywczych, począwszy od przetworów owocowych, a skończywszy na innowacyjnych materiałach opakowaniowych przeznaczonych do kontaktu z żywnością (Ventura i wsp. 2013; Butler i wsp. 2023). Obecnie na polskim rynku są dostępne liofilizowane batony na bazie koncentratów owocowych wytworzone z dodatkiem pektyn jako jednego z dodatków strukturotwórczych (Celiko, 2022). Niemniej jednak, wciąż prowadzone są badania nad możliwościami zastosowania pektyn oraz innych hydrokoloidów, jako substancji umożliwiających projektowanie liofilizowanej żywności wygodnej (Ciurzyńska i wsp. 2015; Hu i wsp. 2022). Ponadto, ostatnie badania pokazały nowe propozycje w zakresie rozwoju innowacyjnych produktów wieloskładnikowych, które mogą stanowić alternatywę dla konwencjonalnych rozwiązań, polegających na stosowaniu hydrokoloidów. Jednym z trendów jest waloryzacja produktów ubocznych przemysłu spożywczego poprzez ich zastosowanie w roli składnika żywności, dzięki czemu nowe produkty wpisują się w trendy zrównoważonej produkcji żywności, co stanowi ich wartość dodaną. W zakresie liofilizowanych przekąsek, podjęto próby wykorzystania pełnowartościowego wysortu warzywnego jako surowca bazowego oraz

połączenia lub całkowitego zastąpienia tradycyjnych komponentów strukturotwórczych wyciekami owocowymi. Pozwoliło to na opracowanie nowych produktów oraz ograniczenie niekorzystnego wpływu na środowisko poprzez korzystanie z surowców odpadowych i mniej przetworzonych (Ciurzyńska i wsp. 2020, 2022; Karwacka i wsp. 2021).



Rys. 2. Przykłady proszków z suszonych wycieków z jabłek (A), malin (B), czarnych porzeczek (C) i aronii (D).

Wycieki to produkt uboczny produkcji soków, koncentratów oraz win, który składa się z części stałych miąższu, skórek oraz nasion owoców poddawanych procesowi tłoczenia (Acan i wsp. 2021). Ze względu na stosunkowo wysoką zawartość wody, w celu poprawienia stabilności przechowalniczej i uzyskania wysokiej jakości produktu możliwego do dalszego przetworzenia, wycieki często poddawane są procesowi suszenia (Diez-Sánchez i wsp. 2021). Na **rysunku 2** przedstawiono fotografie proszków uzyskanych przez rozdrabnianie suszonych wycieków z jabłek oraz wybranych owoców jagodowych. Suszone wycieki uzyskane z różnych owoców jagodowych zawierają zwykle ponad 90% suchej substancji, której skład chemiczny tworzą między innymi białko (2–17%), tłuszcz (0,6–22%), węglowodany (do 90%), popiół (0,7–7%) i błonnik pokarmowy ogółem w zakresie od 16 do nawet 96%. Wycieki jagodowe zawierają również duże ilości polifenoli i innych związków bioaktywnych, które są odpowiedzialne za wysoką zdolność antyoksydacyjną (Reißner i wsp. 2019; Diez-Sánchez i wsp. 2021). Dla porównania, przybliżony skład suszonych wycieków jabłkowych prezentuje się następująco: białko (1,2–6,9%), tłuszcz (0,3–8,5%), cukry proste (14–72,5%), popiół

(0,5–4,3%) oraz zawartość błonnika pokarmowego ogółem osiągająca wartości do 82%. Wytłoki jabłkowe są także bogate w związki bioaktywne oraz mikro- i makroelementy (Antonic i wsp. 2020). Ponadto, wytłoki owocowe są bogatym źródłem pektyn, dzięki czemu po poddaniu ich obróbce hydrotermicznej w odpowiednich warunkach (Eblaghi i wsp. 2021), wykazują duży potencjał do kreowania tekstury i struktury produktów spożywczych. Ze względu na ich skład, wartość użytkową oraz stosunkowo niską cenę wytłoki owocowe zwykle są zagospodarowywane jako pasza dla zwierząt. Jednak dzięki tym atrybutom, możliwości wprowadzenia wytlóków do receptur nowych produktów spożywczych stały się ważnym przedmiotem badań naukowych (Majerska i wsp. 2019; Acan i wsp. 2021). W publikowanych pracach autorzy często podkreślają, że dodatek sproszkowanych wytlóków owocowych pozytywnie wpływał na stabilność, wartość odżywczą i funkcjonalną produktów spożywczych, w tym na zwiększenie aktywności przeciwutleniającej i zawartości błonnika, a nawet zapobieganie procesom psucia mikrobiologicznego i utleniania lipidów, powodując jednocześnie znaczące zmiany sensoryczne i teksturalne, które nie zawsze były uznawane za atrakcyjne i korzystne (Wang i wsp. 2019; Antonic i wsp. 2020; Diez-Sánchez i wsp. 2021; Santos i wsp. 2023).

Wytłoki jabłkowe to główny produkt uboczny, pozostający po procesach przemysłowego przetwarzania jabłek. Polska jest jednym z wiodących producentów jabłek na świecie. Jak podaje GUS, w 2023 roku polscy sadownicy zebrali 3,9 mln ton tych owoców (GUS, 2024). Ponad połowa zbiorów przeznaczona jest do produkcji soków i koncentratów, natomiast około 30% przetwarzanego surowca to stałe części surowca, pozostające jako produkt uboczny. Na podstawie danych statystycznych szacuje się, że polski przemysł spożywczy generuje ponad 600 000 ton wytlóków jabłkowych rocznie (Czubaszek i wsp. 2022). Jak wspomniano wcześniej, skład chemiczny tego typu produktów ubocznych może różnić się w zależności od odmiany surowca, uprawy i technologii stosowanej podczas przetwarzania, a zawartość procentowa poszczególnych składników może wahać się w granicach od kilku do kilkudziesięciu procent w zależności od analizowanej partii. Według dostępnej literatury zawartość pektyny może oscylować w zakresie od 3 do ponad 30% (Antonic i wsp. 2020; Morales-Contreras i wsp. 2020). Wytłoki jabłkowe były już stosowane jako dodatek do produktów piekarsko-ciastkarskich (Jannati i wsp. 2018; Zlatanović i wsp. 2019; Liang i wsp. 2020; Usman i wsp. 2020; Cantero i wsp. 2022), mięsnych (Rather i wsp. 2015; Younis i Ahmad, 2015; Yadav i wsp. 2016; Parkash Scholar i wsp. 2021; Thangavelu i wsp. 2022), mlecznych (Wang i wsp. 2019, 2020; Popescu i wsp. 2022) i innych (Antonic i wsp. 2020). W opublikowanych

dotychczas pracach naukowych zauważono, że dodanie proszku z wyłoków jabłkowych wpływa na jakość badanych produktów, w tym na właściwości reologiczne i mechaniczne, barwę, skład chemiczny, stabilność, a także atrakcyjność sensoryczną. W większości przypadków przeprowadzone badania wykazały pozytywne zmiany jakości opracowanych produktów. Jednak optymalny udział wyłoków w recepturze, przy którym obserwowano korzystny wpływ na wybrane właściwości, różnił się w zależności od rodzaju produktu. Niektóre cechy żywności, zwłaszcza w aspekcie tekstury i atrybutów sensorycznych, były określane jako zbyt intensywne, aby je zaakceptować. Przykładem mogą być badania produktów piekarskich i ciastkarskich, w których do 25% użytej mąki zastąpiono proszkiem z wyłoków jabłkowych. Badane ciastka (Liang i wsp. 2020; Usman i wsp. 2020) wraz ze zwiększającą się ilością dodawanych wyłoków stawały się bardziej płaskie, gumowate i mniej porowate. W produktach mięsnych, takich jak pasztety oraz kielbasy z dodatkiem do 9% wyłoków jabłkowych, zauważono zwiększoną gumowatość, a także twardość oraz mniejszą soczystość wyrobów (Rather i wsp. 2015; Younis i Ahmad 2015; Yadav i wsp. 2016). Ponadto w wielu przypadkach przeprowadzona ocena sensoryczna wykazała wystąpienie niekorzystnego posmaku, choć w zależności od rodzaju produktu, zakresy ilości dodatku proszków z wyłoków, w przypadku których nie występowały niekorzystne zmiany sensoryczne, wynosiły od kilku do kilkudziesięciu procent.

Poza jabłkami, Polska jest jednym z głównych producentów czarnych porzeczek. Według szacunków Głównego Urzędu Statystycznego powierzchnia upraw porzeczek, w tym porzeczek czarnych, stale rośnie. W 2023 r. zbiory owoców czarnej porzeczki zostały oszacowane na 91,5 tys. ton, co stanowi około 70% całkowitej produkcji na terenie Unii Europejskiej (GUS, 2024). Jagody czarnych porzeczek uprawiane są głównie w celu zastosowania jako surowiec do produkcji soków (60%) i dżemów. Ilość generowanych odpadów poprodukcyjnych jest znacząca, dlatego konieczne jest poszukiwanie nowych sposobów ich zagospodarowania w możliwie najbardziej korzystny i efektywny sposób (Kraciński, 2014; Cortez i Gonzalez de Mejia, 2019). Wyłoki z owoców czarnej porzeczki wykazują dużą wartość odżywczą i prozdrowotną dzięki zawartości związków bioaktywnych i błonnika (Xue i wsp. 2022). Czarne porzeczki są również bogate w pektynę, której właściwości zostały poznane i kompleksowo scharakteryzowane (Pancerz i wsp. 2022). Tak jak pozostałości z innych surowców, wyłoki z czarnych porzeczek zwykle są wykorzystywane jako pożywna pasza dla zwierząt oraz surowiec do ekstrakcji związków bioaktywnych i barwników. Ponadto,

wytłoki porzeczkowe badano również w aspekcie możliwości wykorzystania ich w roli składnika wzbogacającego i poprawiającego właściwości funkcjonalne wybranych produktów spożywczych, głównie piekarskich i cukierniczych, w których zaobserwowano głównie pozytywne zmiany, wynikające z wprowadzenia tego surowca jako jednego ze składników (Majerska i wsp. 2019). Częściowe zastąpienie mąki pszennej proszkami z suszonych wytlóków z owoców czarnej porzeczki oraz innych owoców jagodowych pozwoliło na otrzymanie ciastek o lepiej ocenianych cechach sensorycznych, takich jak wygląd, smak i zapach, bogatszym składzie chemicznym, w tym zwiększonej zawartości związków bioaktywnych oraz błonnika. Nie zaobserwowano niekorzystnych zmian, wynikających z nieprawidłowości przebiegu procesu technologicznego na skutek reformulacji receptury. Ponadto stwierdzono, że zwiększona zawartość błonnika może znacznie obniżyć indeks glikemiczny takich ciastek (Siemianowska i wsp. 2016; Tańska i wsp. 2016; Radzymińska i wsp. 2017; Alongi i wsp. 2019).

Aronia czarnoowocowa także jest jednym z powszechnie uprawianych w Polsce owoców jagodowych. Według danych opublikowanych przez Główny Urząd Statystyczny produkcja aronii w 2023 roku wyniosła 53,5 tysięcy ton (GUS, 2024). Znaczna część zebranych owoców jest stosowana do produkcji soków, przy czym około 12,8–22,6% przetworzonego surowca pozostaje do zagospodarowania w postaci wytlóków (Vagiri i Jensen, 2017). Biorąc pod uwagę bogactwo związków bioaktywnych, w tym związków fenolowych, antocyjanów i innych przeciwutleniaczy, produkty uboczne z przetwórstwa owoców aronii zostały rozpoznane jako cenny materiał, który może być wykorzystany jako składnik innowacyjnej i zrównoważonej żywności projektowanej (Raczkowska i wsp. 2022). Dotychczas prowadzono wiele badań odnośnie możliwości pozyskiwania związków bioaktywnych i barwników z wytlóków aroniowych, a także wpływu różnych nośników i technik przetwarzania na właściwości fizykochemiczne ekstraktów i proszków z tego surowca, które mogłyby być stosowane w przemyśle spożywczym jako dodatki wzbogacające (Michalska-Ciechanowska i wsp. 2021; Roda-Serrat i wsp. 2022). Ponadto, w celu lepszego poznania ich potencjału do wykorzystania w żywności, szczegółowo scharakteryzowano także właściwości fizykochemiczne i technologiczne wytlóków aroniowych (Reißner i wsp. 2019). Ze względu na potencjalne korzyści, płynące z dodatku wytlóków z aronii do produktów spożywczych, podjęto próby wykorzystania ich między innymi w kruchych ciastkach, koktajlach mlecznych i wyrobach mięsnych (Diez-Sánchez i wsp. 2020; Raczkowska

i wsp. 2022). Zaobserwowano, że chleby z dodatkiem proszków z wytlóków w ilości nie większej niż 6% masy mąki charakteryzowały się niemal trzykrotnie większą twardością, ponadto po wypieku osiągały mniejszą objętość, a gęstość ich mięksamu była większa, co w efekcie wpłynęło na niskie noty otrzymane podczas oceny sensorycznej (Cacak-Pietrzak i wsp. 2023). Niemniej jednak, zarówno w chlebach, jak i w ciastkach wraz z dodatkiem produktów ubocznych produkcji soków z czarnej aronii zauważono istotne zwiększenie zawartości błonnika i związków bioaktywnych w badanych wypiekach (Raczkowska i wsp. 2022; Cacak-Pietrzak i wsp. 2023). Badano również wpływ parametrów procesowych ekstruzji na błonnik pokarmowy i profil związków bioaktywnych zawartych w wytlókach z aronii, wskazując na cenne właściwości strukturyzujące i wysoką jakość uzyskanych teksturatów (Schmid i wsp. 2021). Dodatkowo, ciastka i produkty piekarskie wzbogacone produktami ubocznymi przetwórstwa owocowego, w tym wytlókami z aronii, wykazały zwiększoną wartość odżywczą (Krajewska i Dziki, 2023).

Podsumowując, na rynku żywności obserwuje się ciągle rosnące zapotrzebowanie na przekąski, czyli produkty wygodne do spożycia, łatwo dostępne i atrakcyjne dla konsumenta, a jednocześnie odżywcze i przyjazne środowisku. Przykładem takich produktów mogą być suszone sublimacyjnie przekąski owocowe i warzywne. Połączenie liofilizacji i strukturotwórczych dodatków do żywności, takich jak hydrokoloidy, charakteryzujące się silnymi właściwościami żelującymi, pozwala na otrzymywanie wysokiej jakości projektowanych produktów. Jednym z powszechnie stosowanych hydrokoloidów, którego potencjał strukturotwórczy został już wykorzystany podczas produkcji liofilizowanych przekąsek, jest pektyna, pozyskiwana z produktów ubocznych, takich jak skórki i wylłoki owocowe. Podążając za obecnymi trendami, związanymi ze zrównoważonym rozwojem i gospodarką cyrkularną, podejmowane są próby skrócenia łańcuchów przetwarzania żywności, między innymi w celu ograniczenia szkodliwego wpływu przemysłu rolno-spożywczego na środowisko. Biorąc to pod uwagę oraz uwzględniając potencjał produktów ubocznych w postaci wylłoków owocowych, wynikający z ich składu, od wielu lat badania naukowe koncentrowały i koncentrują się na poszukiwaniu nowych możliwości ich zagospodarowania. Niejednokrotnie potwierdzono efektywność dodatku wylłoków owocowych jako komponentów, które mogą kształtować właściwości strukturalne i teksturalne oraz wartość odżywczą szerokiej gamy innowacyjnych, przyjaznych środowisku produktów spożywczych.

W związku z powyższym, ideą prowadzonych badań było zastosowanie proszków z wycieków owocowych jako zrównoważonych składników alternatywnych dla hydrokoloidów, które umożliwiają otrzymanie liofilizowanych przekąsek o powtarzalnych i akceptowalnych właściwościach teksturalnych oraz zwiększonej wartości żywieniowej. Założono także, że zastosowanie wycieków w roli zamiennika pektyny pozwoli na zmniejszenie ilości przemysłowych odpadów rolno-spożywczych, a także umożliwi skrócenie łańcucha przetwarzania dzięki pominięciu procesu ekstrakcji pektyn i ograniczeniu ilości odpadów i ścieków generowanych podczas tego procesu.

2. CEL PRACY I HIPOTEZY BADAWCZE

Głównym celem pracy była ocena wpływu reformulacji składu surowcowego, ze szczególnym uwzględnieniem dodatków strukturotwórczych, na wybrane właściwości fizykochemiczne i użytkowe liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wytworzonych z wykorzystaniem proszków z wycieków owocowych oraz pektyny jabłkowej.

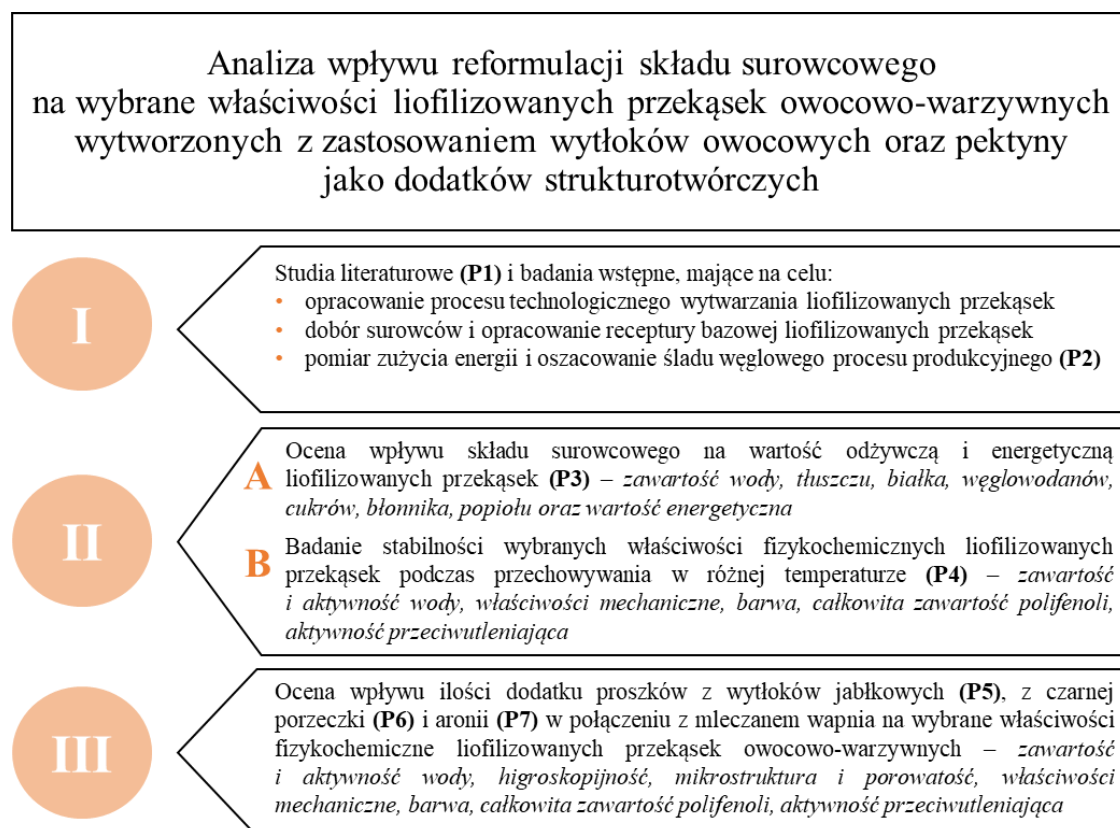
Przeprowadzone badania miały na celu weryfikację następujących hipotez:

- H1.** Zastosowanie proszków z wycieków owocowych jako zamiennika pektyny jabłkowej spowoduje redukcję śladu węglowego liofilizowanych przekąsek oraz zmniejszenie ogólnego wpływu na środowisko.
- H2.** Zastąpienie pektyny jabłkowej jako dodatku strukturotwórczego w liofilizowanych przekąskach owocowo-warzywnych proszkami z wycieków owocowych wpłynie korzystnie na wartość odżywczą produktów.
- H3.** Liofilizowane przekąski owocowo-warzywne, wytworzone z dodatkiem proszków z wycieków owocowych lub pektyny będą stabilne podczas przechowywania przez okres przynajmniej 12 miesięcy.
- H4.** Reformulacja składu liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych przez wprowadzenie i/lub zwiększenie udziału wycieków owocowych, poza zwiększeniem wartości żywieniowej, spowoduje wzmocnienie struktury oraz wpłynie na stabilność matrycy liofilizatów poprzez ograniczenie ich zdolności do pochłaniania wilgoci z otoczenia.

3. ORGANIZACJA BADAŃ, MATERIAŁY I METODYKA

3.1 Organizacja badań

Badania będące podstawą naukową niniejszej rozprawy były prowadzone w trzech głównych etapach, które pozwoliły na weryfikację postawionych wcześniej hipotez badawczych. Ogólny plan badawczy przedstawiono na **rysunku 3**.



Rys. 3. Schemat organizacji badań z uwzględnieniem artykułów, w których opublikowano wyniki

Etap I obejmował opracowanie literaturowe i badania wstępne. Rezultaty przeglądu badań naukowych prowadzonych w kraju i na świecie skutkowały powstaniem publikacji przeglądowej (**P1**) i nakreśliły założenia do postawienia hipotez badawczych, których weryfikację przedstawiono w rozdziale 4 niniejszego opracowania, omawiając wyniki uzyskane podczas prowadzonych badań. Celem badań wstępnych było opracowanie procesu technologicznego wytwarzania liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych, którego kompleksowość pozwoliłaby na stosowanie go zarówno do wytworzenia produktów z dodatkiem konwencjonalnych składników strukturotwórczych – hydrokoloidów – jak i proszków z wycisków owocowych w roli ich zamienników. Podczas doboru kolejnych etapów procesu technologicznego i ich

parametrów, wykonano pomiary zużycia energii, na podstawie których oszacowano ślad węglowy dla opracowanej technologii wytwarzania liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych oraz sporządzono bilans materiałowy surowców, wykorzystanych do produkcji przekąsek w skali laboratoryjnej. Zakres prac na tym etapie obejmował także przygotowanie podstawowej receptury liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych z dodatkiem różnych hydrokoloidów jako dodatków strukturotwórczych, spośród których niskometylowaną pektynę jabłkową (nazywaną dalej również pektyną jabłkową i/lub pektyną) wybrano jako surowiec stanowiący materiał odniesienia. Subiektywna ocena możliwości zastosowania wyłoków z różnych surowców, pozwoliła na wybranie produktów przemysłowych w postaci proszków z wyłoków jabłkowych oraz z czarnych porzeczek jako składników wykazujących potencjał do zastąpienia hydrokoloidu (niskometylowanej pektyny jabłkowej) w recepturze przekąsek. Finalnie, bazę surowcową do produkcji przekąsek stanowiła mrożona marchew (60%), sok pomarańczowy (30%), świeży imbir (0,4%), mleczan wapnia (0,1%) oraz woda jako dopełnienie receptury. Czynnikiem zmienny stanowił dodatek pektyny jabłkowej (1,5%), proszku z wyłoków jabłkowych lub proszku z wyłoków z czarnych porzeczek w ilości równej 2%. Materiał został przebadany pod kątem podstawowych właściwości fizycznych. Wyniki przeprowadzonych analiz wyselekcjonowanych próbek zostały opublikowane w artykule **P2** i posłużyły do weryfikacji **hipotezy 1**.

Etap II został podzielony na dwie części A i B. Wybrane zagadnienia z obu części wykonywane były jednocześnie i obejmowały realizację dwóch niezależnych zadań badawczych, których przedmiotem był materiał doświadczalny, którego skład został opracowany w etapie I. Pierwsze zadanie, wykonane w części A etapu II, miało na celu określenie i porównanie wpływu wybranych w badaniach wstępnych dodatków na skład chemiczny, a zarazem wartość odżywczą i energetyczną liofilizowanych przekąsek. W zakres prac wchodziło oznaczenie zawartości wody, tłuszczu, białka, błonnika pokarmowego, węglowodanów ogółem niebędących błonnikiem, w tym cukrów (sacharoza, fruktoza, glukoza) oraz popiołu. Eksperymentalnie wyznaczono także wartość energetyczną produktów. Otrzymane wyniki zostały opublikowane w artykule **P3** i posłużyły do weryfikacji **hipotezy 2**. Zadaniem części B etapu II było zbadanie stabilności wybranych cech jakościowych liofilizowanych przekąsek z dodatkiem pektyny jabłkowej, wyłoków jabłkowych oraz wyłoków z czarnych porzeczek podczas przechowywania w różnych temperaturach. Wybrano następujące warunki przechowywania:

- temperatura chłodnicza 4°C – w celu przetestowania zachowania w warunkach powszechnie stosowanych do przechowywania żywności chłodzonej;
- temperatura pokojowa 25°C – w celu określenia zmian, które potencjalnie mogą wystąpić podczas ekspozycji w sklepie lub gospodarstwie domowym;
- temperatura 40°C w celu przeprowadzenia przyspieszonych testów trwałości, co pozwala na ocenę wpływu wyższej temperatury i możliwej utraty jakości po wydłużeniu czasu przechowywania.

Wybrane cechy przekąsek były badane bezpośrednio po wytworzeniu oraz po 1, 3, 6 i 12 miesiącach przechowywania. Zakres badań obejmował analizę zawartości i aktywności wody, barwy, właściwości mechanicznych oraz całkowitej zawartości polifenoli i aktywności przeciwutleniającej. Wyniki z tego etapu zostały opublikowane w artykule **P4** i posłużyły do weryfikacji hipotezy **3**.

Etap III polegał na zbadaniu wpływu udziału w recepturze dobranych dodatków strukturotwórczych na wybrane cechy fizykochemiczne liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych. Podstawowa receptura przekąsek stosowana podczas poprzednich etapów została zmodyfikowana poprzez zastosowanie koncentratu soku pomarańczowego w ilości 10% zamiast soku, co pozwoliło na zwiększenie ilości wody służącej do obróbki hydrotermicznej dodatków. Proces technologiczny pozostał bez zmian. Na tym etapie porównywano wpływ ilości (1, 3, 5%) proszków z wyłoków jabłkowych oraz z czarnych porzeczek, a także pektyny jabłkowej (0,5 i 1,5%) na wybrane cechy produktów. Dodatkowo, taki sam eksperyment przeprowadzono z wykorzystaniem proszku z wyłoków z aronii. Ponadto, czynnikiem zmiennym w przypadku zastosowania proszków z wyłoków wszystkich rodzajów owoców, było stężenie mleczanu wapnia (0, 0,01 i 0,05%), który z założenia miał wspierać proces żelowania i poprawiać właściwości teksturo- i strukturotwórcze wyłoków. W zakres pracy na tym etapie wprowadzono badanie liofilizowanych przekąsek pod kątem zawartości i aktywności wody, higroskopijności, właściwości tekstury, porowatości i mikrostruktury, barwy oraz zawartości polifenoli i aktywności przeciwutleniającej. W przekąskach z dodatkiem proszków z wyłoków z aronii oznaczono również zawartość antocyjanów. Wyniki opublikowano w artykułach **P5**, **P6** i **P7**, odpowiednio w przypadku proszków z wyłoków jabłkowych, z czarnych porzeczek oraz aronii. Na ich podstawie zweryfikowano hipotezę **4**.

3.2 Materiał i metodyka – opis skrócony

3.2.1 Materiał badany – etap I i II

Materiał badany stanowiły liofilizowane przekąski marchwiowo-pomarańczowe wytworzone z dodatkiem proszków z wycieków owocowych (Greenherb) lub niskometylowanej pektyny jabłkowej (Hortimex). Podstawowa receptura składała się z 60% mrożonej marchwi (Unifreeze), 30% soku pomarańczowego (Tymbark), 0,4% świeżego imbiru oraz 0,01% mleczanu wapnia (Agnex). Badaniom poddano 3 warianty przekąsek, do których dodano 2% proszku z wycieków jabłkowych lub 2% proszku z wycieków z czarnych porzeczek lub 1,5% niskometylowanej pektyny jabłkowej, całość dopełniano wodą. Szczegółową recepturę i kodowanie próbek przedstawiono w **tabeli 1**.

Tab. 1. Stosowane oznaczenia i skład surowcowy liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych

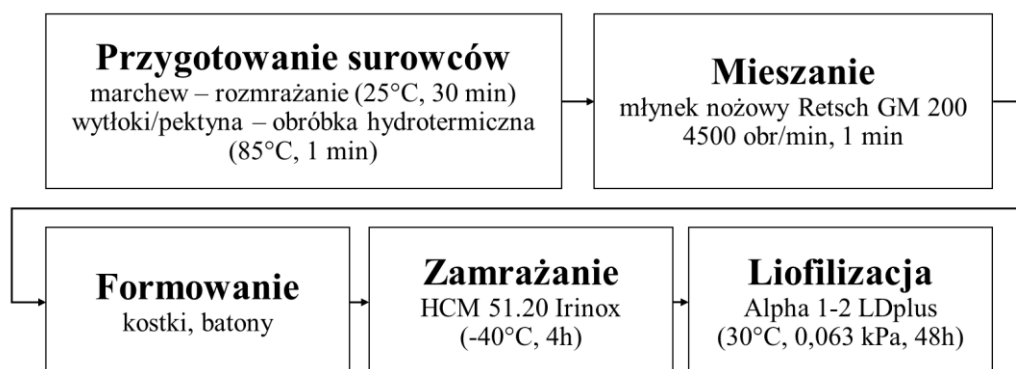
Kod próbki	Marchew	Sok pomarańczowy	Imbir	Woda	Proszek z wycieków AP/BP *	Pektyna	Mleczan wapnia
				%			
COG-AP				7,5	2	-	
COG-BP	60	30	0.4	7,5	2	-	0,1
COG-LMP				8	-	1,5	

* w zależności od rodzaju proszku z wycieków owocowych, kody analizowanych wariantów zawierają symbole odpowiadające danemu surowcowi: AP – wycieki jabłkowe, BP – wycieki z czarnych porzeczek, LMP – niskometylowana pektyna jabłkowa

3.2.2 Metody technologiczne – etap I, II i III

Przekąski przygotowywano w skali laboratoryjnej zgodnie ze schematem przedstawionym na **rysunku 4**. Marchew rozmrażano w temperaturze pokojowej (ok. $25 \pm 2^\circ\text{C}$). Wodę z mleczanem wapnia podgrzewano na płycie grzejnej do osiągnięcia temperatury 85°C , po czym do roztworu dodawano proszek z wycieków lub niskometylowaną pektynę jabłkową. Mieszkankę inkubowano w temperaturze 85°C przez 1 min ciągle mieszając. Następnie, wszystkie składniki w odpowiednich proporcjach blendowano w młynku nożowym (Grindomix GM 200, Retsch) z prędkością ostrzy 4500 obr/min przez 1 min. Tak przygotowane masy przenoszono do silikonowych forem i zamrażano w zamrażarce szokowej (Irinex) w temperaturze -40°C przez 4 godziny. Materiał liofilizowano w urządzeniu Alpha 1-2 LD plus (Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen GmbH) w temperaturze półek 30°C pod ciśnieniem 0,063 kPa przez około 48 godzin. Wysuszone próbki pakowano w wielowarstwowe (PET/AI/PE) opakowania do żywności (Pakmar) nieprzepuszczalne dla powietrza, wody oraz światła

i przechowywano w temperaturze pokojowej przez 24-48 godzin w celu ustabilizowania materiału.



Rys. 4. Schemat technologiczny wytwarzania liofilizowanych przekąsek z dodatkiem proszków z wycieków owocowych lub niskometylowanej pektyny jabłkowej

3.2.3 Metody analityczne

3.2.3.1 Zużycie energii i szacowanie śladu węglowego – etap I (P2)

Pomiar zużycia energii był prowadzony podczas badań wstępnych, mających na celu opracowanie technologii wytwarzania przekąsek. Za pomocą watomierza Energy Logger 4000 zmierzono zużycie energii wykorzystywanych w procesie urządzeń elektrycznych (szczegółowe dane w metodyce artykułu **P2**). Dodatkowo w niniejszym opracowaniu na podstawie otrzymanych wyników oraz współczynnika emisyjności Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami, określającego emisję dwutlenku węgla generowaną podczas wytwarzania energii elektrycznej, oszacowano ślad węglowy laboratoryjnego procesu produkcji liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych, opartego o opracowaną technologię. Niniejszy współczynnik określał ślad węglowy – emisję dwutlenku węgla – generowany podczas produkcji energii elektrycznej w Polsce w 2022 roku i był równy 685 kg CO₂/MWh (KOBIZE, 2023).

3.2.3.2 Badanie składu chemicznego przekąsek – etap IIA (P3)

Zawartość wody badano metodą wagową, susząc rozdrobniony materiał w suszarce konwekcyjnej SUP 65 WG (WAMED) w temperaturze 70°C przez 24 godziny.

Zawartość tłuszczu oznaczono metodą Soxhleta w aparacie Soxtec Avanti 2050 Auto Fat Extraction System (FOSS Analytical). Tłuszcz ekstrahowano w temperaturze 130°C z użyciem eteru naftowego.

Zawartość białka wyznaczono metodą Kjeldahla, oznaczając zawartość azotu za pomocą urządzenia Kjeltex Auto 1035 nitrogen analyzer (Perstorpe Analytical Tecator). Następnie zawartość białka obliczono korzystając ze wskaźnika $N \times 6,25$, określającego średnią zawartość azotu w białkach tkanki roślinnej.

Zawartość cukrów – sacharozy, glukozy i fruktozy – oznaczono metodą wysokosprawnej chromatografii cieczowej (HPLC) w urządzeniu Waters 2695 Alliance (Waters), wyposażonym w kolumnę Sugar Pak I.

Zawartość błonnika pokarmowego ogółem zbadano zgodnie z metodyką AOAC 985.29 z wykorzystaniem zestawu analitycznego 200A Total Dietary Fiber Assay Kit (Megazyme) oraz modułu filtracyjnego Fibertec 1023 (FOSS Analytical).

Zawartość popiołu uzyskano poprzez mineralizację termiczną materiału w piecu muflowym w temperaturze 525°C.

Zawartość węglowodanów ogółem, innych niż błonnik pokarmowy, obliczono jako różnicę pomiędzy zawartością poszczególnych składników wymienionych powyżej, a całkowitą masą próbki.

Wartość energetyczną wyznaczono przy użyciu ciśnieniowego kalorymetru bombowego własnej konstrukcji.

3.2.3.3 Badanie zmian wybranych właściwości fizykochemicznych podczas przechowywania – **etap IIB (P4)**

Bezpośrednio po wyprodukowaniu liofilizowane przekąski były szczelnie pakowane w podwójnie zgrzewane wielowarstwowe torebki z laminatu PET/Al/PE (Pakmar), nieprzepuszczalne dla światła, powietrza i wody. Tak przygotowany materiał był przechowywany w temperaturze 4 ± 1 , 25 ± 3 i 40 ± 1 °C przez okres 1, 3, 6 i 12 miesięcy, przy założeniu, że 1 miesiąc to 30 dni. Próbkę kontrolną stanowiła porcja przekąsek, której właściwości fizykochemiczne zbadano w ciągu 48 godzin od wyprodukowania. Zakres badań obejmował oznaczenie zawartości i aktywności wody, właściwości mechanicznych, pomiar parametrów barwy oraz oznaczenie całkowitej zawartości polifenoli i aktywności przeciwutleniającej. Wszystkie analizy zostały przeprowadzone w ciągu 24 godzin po otwarciu opakowania.

Zawartość wody badano metodą wagową w temperaturze 70°C przez 24 godziny, a aktywność wody zmierzono w aparacie HygroLab C1 (Rotronic) zgodnie z instrukcją producenta.

Właściwości mechaniczne analizowano w aparacie TA.HD Texture Analyser (Stable Micro Systems) za pomocą testu ściskania do 50% odkształcenia przy użyciu sondy płytkowej o średnicy 20 mm, stosując prędkość testową 0,5 mm/s.

Barwa powierzchni przekąsek została zmierzona w systemie CIE $L^*a^*b^*$ z użyciem kolorymetru CR-5 (Konica Minolta) w trybie światła odbitego. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono bezwzględną różnicę barwy (ΔE) oraz nasycenie (C^*).

Całkowitą zawartość polifenoli oznaczono metodą spektrofotometryczną z odczynnikiem Folina-Ciocalteu przy długości fali 750 nm. Pomiaru były wykonywane w czytniku płytek Multiscan Sky (Thermo Electron Co.).

Aktywność przeciwutleniająca została zbadana metodą spektrofotometryczną wobec rodników ABTS^{•+} oraz DPPH[•] przy długości fali odpowiednio 734 oraz 515 nm. Pomiaru były wykonywane w czytniku płytek Multiscan Sky (Thermo Electron Co.).

3.2.4 Materiał badany – etap III (P5, P6, P7)

W trzecim etapie badań zmodyfikowano bazę przekąsek, poprzez zastąpienie soku pomarańczowego koncentratem pomarańczowym (Purena), co pozwoliło na zwiększenie ilości wody wykorzystywanej podczas obróbki hydrotermicznej dodatków. Wszystkie receptury zostały przedstawione w **tabeli 2**. Jako czynniki zmienne dodawano sproszkowane wytloki jabłkowe, z czarnych porzeczek, wytloki aroniowe, niskometylowaną pektynę jabłkową oraz mleczan wapnia w zmiennych proporcjach.

Tab. 2. Stosowane oznaczenia i skład surowcowy liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych

Kod próbki*	Marchew	Koncentrat pomarańczowy	Imbir	Woda	Proszek z wycieków AP/BP/CP*	Pektyna	Mleczan wapnia	
%								
Kontrola	60	10	0.4	29,60	-	-	-	
AP1	a			28,60			0	
	b	60	10	0,4	28,59	1	-	0,01
	c				28,55			0,05
AP3	a			26,60			0	
	b	60	10	0,4	26,59	3	-	0,01
	c				26,55			0,05
AP5	a			24,60			0	
	b	60	10	0,4	24,59	5	-	0,01
	c				24,55			0,05
LMP0.5	b	60	10	0,4	29,09	-	0,5	0,01
LMP1.5	b				28,09		1,5	0,01

* w zależności od rodzaju proszku z wycieków owocowych, kody analizowanych zaczynają się od symbolu odpowiadającego danemu surowcowi: AP – wycieki jabłkowe, BP – wycieki z czarnych porzeczek, CP – wycieki z aronii, LMP – niskometylowana pektyna jabłkowa; liczby w kodach próbek odpowiadają procentowemu udziałowi dodatku w recepturze liofilizowanych przekąsek, a małe litery a, b, c reprezentują dodatek mleczanu wapnia odpowiednio w ilości 0, 0,01 i 0,05%.

Wytłoki były dodawane w ilościach 1, 3 lub 5%, a mleczan wapnia w ilościach 0; 0,01 lub 0,05%. Materiał kontrolny stanowiły przekąski bez żadnego z wymienionych dodatków oraz przekąski z dodatkiem pektyny jabłkowej w ilości 0,5 lub 1,5% oraz mleczanu wapnia w ilości 0,01%. Niezależnie od wariantu, receptura była dopełniana wodą.

W etapie III przekąski były przygotowywane z wykorzystaniem procesu technologicznego (**Rys. 4**) opracowanego i omówionego w rozdziale 3.2.2.

3.2.5 Metody analityczne – **etap III (P5, P6, P7)**

Zawartość wody badano metodą wagową w temperaturze 70°C przez 24 godziny, a aktywność wody mierzono w aparacie HygroLab C1 (Rotronic) zgodnie z instrukcją.

Właściwości higroskopijne badano na podstawie zmian zawartości wody próbek przechowywanych nad nasyconym roztworem NaCl w temperaturze 25°C, do uzyskania stałej masy materiału (72 godziny).

Właściwości mechaniczne badano, korzystając z teksturometru TA.HD Texture Analyser (Stable Micro Systems), w którym przeprowadzono test ściskania z prędkością 0,5 mm/s do uzyskania 50% deformacji. Wyniki przedstawiono w postaci krzywych ściskania oraz twardości, wyznaczonej jako maksymalna siła zarejestrowana podczas ściskania próbek.

Zdjęcia mikrostruktury przekroju próbek wykonano metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (TM 3000, HITACHI) w powiększeniu 200×. Ponadto dokonano analizy mikrostruktury za pomocą mikrotomografu komputerowego SkyScan 1272 (Bruker). Materiał skanowano przy parametrach napięcia i natężenia wynoszących odpowiednio 40 kV i 193 μ A. Kąt obrotu wynosił 0,2°. Na podstawie zrekonstruowanego modelu 3D obliczono porowatość oraz wielkość porów obecnych w materiale.

Parametry barwy w systemie CIE L^*a^*b zmierzono na powierzchni materiału za pomocą kolorymetru CR-5 (Konica Minolta) w trybie światła odbitego. Wpływ zastosowanych dodatków na barwę przekąsek w odniesieniu do próbki bez dodatków określono poprzez obliczenie bezwzględnej różnicy barwy ΔE (wyniki dostępne w publikacjach **P5, P6, P7**).

Całkowitą zawartość polifenoli oznaczono metodą spektrofotometryczną z odczynnikami Folin-Ciocalteu przy długości fali 750 nm. Pomiaru absorbancji dokonano w czytniku płytek Multiscan Sky (Thermo Electron Co.).

Aktywność przeciwutleniającą mierzono wobec kationorodnika ABTS^{•+} oraz rodnika DPPH[•] przy długości fali odpowiednio 734 oraz 515 nm. Pomiaru absorbancji dokonano w czytniku płytek Multiscan Sky (Thermo Electron Co.).

Całkowitą zawartość antocyjanów (**wyłącznie P7**) zbadano różnicową metodą spektrofotometryczną w obecności buforów o pH 1 i pH 4,5, dla których absorbancję mierzono odpowiednio przy długościach fal 510 i 700 nm. Pomiaru absorbancji dokonano w czytniku płytek Multiscan Sky (Thermo Electron Co.).

3.2.6 Metody statystyczne

Wyniki przedstawiono w postaci średnich $\pm$ odchylenie standardowe. Wszystkie analizy przeprowadzono przynajmniej w trzech powtórzeniach. Otrzymane wyniki poddano jednoczynnikowej analizie wariancji ANOVA z wykorzystaniem testu Tukey'a dla $p \leq 0,05$. Dla wybranych wyników wykonano również test korelacji Pearsona. Analiza statystyczna została wykonana w programie Statistica 13.1.

4. OMÓWIENIE I DYSKUSJA WYNIKÓW

4.1 Określenie zużycia energii i śladu węglowego procesu technologicznego wytwarzania liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych

Hipoteza 1 weryfikowana w pracy zakładała, że zmiana rodzaju dodatku strukturotwórczego z pektyny jabłkowej jako dodatku hydrokoloidowego na proszek z wyłoków owocowych spowoduje zmniejszenie śladu węglowego liofilizowanych przekąsek oraz ich ogólnego wpływu na środowisko. Badania mające na celu potwierdzenie słuszności tego założenia zostały opublikowane w artykule **P2**. Dokonano analizy zużycia zasobów bezpośrednio wykorzystywanych do produkcji przekąsek oraz pomiaru zużycia energii elektrycznej w trakcie operacji jednostkowych włączonych w cały proces produkcyjny. Dodatkowo, w niniejszym opracowaniu obliczono ślad węglowy na podstawie zużycia energii elektrycznej oraz wskaźnika emisyjności udostępnionego przez Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE). Otrzymane wyniki przedstawiono w **tabeli 3**.

Tab. 3. Zużycie energii elektrycznej i ślad węglowy wytwarzania liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych w skali laboratoryjnej oraz procentowy udział poszczególnych operacji jednostkowych (dane dla 1 kg masy surowców)

Proces	Zużycie energii (kWh)	Ślad węglowy (kg CO ₂)	Udział procentowy (%)
Obróbka hydrotermiczna dodatków	0,154	0,105	0,44
Rozdrabnianie/Mieszanie	0,012	0,008	0,03
Zamrażanie	2,828	1,937	8,15
Liofilizacja	31,707	21,719	91,37
Suma	34,701	23,770	

Badanie koncentrowało się na określeniu zapotrzebowania surowcowego i energetycznego wytwarzania liofilizowanych przekąsek. W tym celu zmierzono bezpośrednie zużycie energii, wody i surowców. Ze względu na ograniczony dostęp do bazy danych o śladzie węglowym surowców wykorzystywanych w badaniach, finalnie skupiono się na ocenie wpływu środowiskowego etapów procesu technologicznego wykonywanego w skali laboratoryjnej.

Eksperyment był prowadzony podczas wytwarzania przekąsek marchwiowo-pomarańczowych z dodatkiem 2% proszku z wyłoków jabłkowych lub z czarnych porzeczek lub pektyny jabłkowej w ilości 1,5%. Pomiary prowadzono, przygotowując partię surowców o łącznej masie 1 kg. Proces technologiczny opracowany podczas badań

wstępnych nie różnił się niezależnie od składu przekąsek. Całkowite zużycie energii elektrycznej wynosiło 34,7 kWh, co odpowiadało emisji 23,8 kg CO₂ do atmosfery, przy czym za ponad 91% emisji odpowiadał proces liofilizacji, 8% zamrażanie, a mniej niż 0,5% łącznie procesy uwadniania dodatków oraz rozdrabnianie i mieszanie składników. Energochłonność poszczególnych etapów w dużym stopniu zależała od czasu trwania operacji jednostkowych. Ponieważ liofilizacja okazała się czynnikiem decydującym o śladzie węglowym produkcji przekąsek, jej optymalizacja wydaje się być najbardziej rozsądnym sposobem na obniżenie wpływu badanych produktów na środowisko. Pomimo dużego zużycia energii, które generuje zarówno zwiększony wpływ na środowisko, jak i koszty, niewątpliwym atutem liofilizacji jest możliwość otrzymania produktów o cechach niemożliwych do uzyskania przy zastosowaniu innych metod suszenia. Zatem, aby ukształtować pożądane cechy, jedną z możliwości modyfikacji technologii usuwania wody, która pozwoliłaby na redukcję zużycia energii, jest zastosowanie hybrydowych metod suszenia. Liofilizacja wspomagana promieniowaniem podczerwonym lub mikrofalami zużywa znacznie mniej energii niż tradycyjna liofilizacja i nie powoduje znaczących zmian jakości produktów, co w swoich badaniach udowodnili Hnin i wsp. (2019, 2020) oraz Pei i wsp. (2014). Jedną z możliwości jest także modyfikacja temperatury półki oraz ciśnienia w komorze liofilizatora, które mogą istotnie wpłynąć na czas procesu, a w konsekwencji na zużycie energii. Przy czym kombinacja wyższej temperatury (50°C) i niższego ciśnienia (5 Pa) daje najbardziej korzystne rezultaty, co w badaniach restrukturyzowanych przekąsek pomarańczowych zaobserwowali Silva-Espinoza i wsp. (2021). W czasie liofilizacji tylko około 15% energii jest zużywane przez system grzewczy, reszta jest wykorzystywana przez pompę próżniową i skraplacz (Wu i wsp. 2019). W związku z tym, z uwagi na możliwość istotnego skrócenia czasu suszenia, zwiększanie temperatury procesu prowadzi do zmniejszenia zużycia energii, pomimo jej większego poboru przez grzałki. Ponadto, skala produkcji ma znaczący wpływ na zużycie energii, a wyniki uzyskane w skali laboratoryjnej mogą nie mieć zastosowania po transformacji procesu do skali przemysłowej, która może wpłynąć na procentowy udział poszczególnych operacji jednostkowych w całkowitym zużyciu energii, a w konsekwencji także w śladzie węglowym z niego wynikającym (Almena i wsp. 2019).

Biorąc pod uwagę fakt, że pektyna jest pozyskiwana z produktów ubocznych przemysłu rolno-spożywczego, w tym wytlóków owocowych, a sam proces jej ekstrakcji i oczyszczania jest złożony, można wywnioskować, że ślad środowiskowy hydrokoloidu

jest większy niż suszonych wyłoków owocowych ze względu na proces produkcji (Sharma i wsp. 2014; Garcia-Garcia i wsp. 2019). Przetwarzanie w znacznym stopniu przyczynia się do wpływu produktów na środowisko, podobnie jak uprawa roślin oraz transport, dzięki czemu korzystanie z lokalnych surowców także ma wpływ na ślad węglowy żywności i jej komponentów (Knudsen i wsp. 2011; Khanali i wsp. 2020). Niemniej jednak, przez stosunkowo niewielki udział badanych dodatków w składzie przekąsek, zastąpienie pektyny jabłkowej wyłokami owocowymi potencjalnie może zredukować ślad węglowy produktów, jednak w stopniu mniejszym niż 10% śladu pochodzącego z liofilizacji (Garcia-Garcia i wsp. 2019).

Na tej podstawie można stwierdzić, że z uwagi na taki sam przebieg procesu produkcyjnego prowadzonego z wykorzystaniem technologii otrzymywania liofilizowanych przekąsek wg umieszczonego powyżej schematu (**Rys. 4**), otrzymane wyniki nie pozwalają na pozytywne zweryfikowanie postawionej hipotezy. Jednak dostępna literatura sugeruje, że analiza śladu węglowego surowców, która nie została wykonana z uwagi na brak dostępu do szczegółowych danych, mogłaby potwierdzić założenie, że zastosowanie proszków z suszonych wyłoków owocowych jako zamienników pektyny jabłkowej redukuje ślad węglowy i wpływ na środowisko liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych.

4.2 Wpływ dodatku proszków z wycieków owocowych na wartość odżywczą liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych

Hipoteza 2 zakładała, że zastąpienie pektyny jako dodatku strukturotwórczego proszkami z wycieków owocowych wpłynie korzystnie na wartość odżywczą liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych. W celu weryfikacji tej hipotezy zbadano skład chemiczny produktów, w tym zawartość wody, białka, tłuszczu, węglowodanów ogółem, sacharozy, glukozy, fruktozy, błonnika pokarmowego ogółem i popiołu, a także wyznaczono ich wartość energetyczną. Wyniki przeprowadzonych analiz zostały opublikowane w artykule **P3** i podsumowane w **tabeli 4**.

Tab. 4. Skład chemiczny liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wytworzonych z dodatkiem proszków z wycieków jabłkowych (COG-AP), z czarnych porzeczek (COG-BP) lub niskometylowanej pektyny jabłkowej (COG-LMP)

Skład	Przekąski z proszkiem z wycieków jabłkowych (COG-AP)	Przekąski z proszkiem z wycieków z czarnych porzeczek (COG-BP)	Przekąski z pektyną (COG-LMP)
Woda (%)	1,91±0,04 ^b	2,10±0,26 ^b	2,55±0,11 ^a
Tłuszcz (%)	1,22±0,04 ^b	2,04±0,15 ^a	0,64±0,01 ^c
Białko (%)	7,09±0,15 ^b	9,06±0,11 ^a	6,64±0,15 ^b
Węglowodany ogółem (%)	60,37±0,79 ^a	55,77±0,61 ^b	55,98±0,27 ^b
w tym sacharoza	20,28±0,09 ^c	22,78±0,08 ^a	21,79±0,32 ^b
glukoza	11,30±0,15 ^a	9,66±0,38 ^b	10,35±0,08 ^b
fruktoza	14,18±0,36 ^a	11,06±0,06 ^b	11,63±0,09 ^b
Błonnik (%)	24,60±0,33 ^b	23,90±0,44 ^b	29,51±0,56 ^a
Popiół (%)	4,81±0,28 ^c	7,14±0,21 ^a	5,99±0,13 ^b
Energia (kcal/100 g)	429,46±3,46 ^a	433,66±2,55 ^a	386,78±1,05 ^b

* w tabeli przedstawiono średnie wartości z odchyleniem standardowym. Różne litery **a-c** w wierszach oznaczają różnice statystyczne pomiędzy wynikami otrzymanymi w poszczególnych wariantach.

Przeprowadzona analiza składu chemicznego przekąsek wykazała istotne zmiany, wynikające z modyfikacji receptury produktów. Zaobserwowano, że zastąpienie pektyny jabłkowej proszkami z wycieków owocowych, niezależnie od ich rodzaju, spowodowało zmniejszenie średniej zawartości wody, błonnika pokarmowego oraz wartości energetycznej (**Tab. 4**). W przypadku pozostałych składników tendencje nie były tak jednoznaczne.

Biorąc pod uwagę wszystkie podstawowe związki, z których składa się żywność, tłuszcz ma znacznie wyższą wartość energetyczną i stosunkowo niską sytość (Rolls, 2000). Dlatego produkty o wysokiej zawartości tłuszczu są wysokoenergetyczne i często klasyfikowane jako „niezdrowe”, przez co ich spożycie powinno być ograniczone, zwłaszcza w przypadku przekąsek, czyli produktów jedzonych między posiłkami (Si

Hassen i wsp. 2018; Lumanlan i wsp. 2021). Zawartość tłuszczu w opracowanych liofilizowanych owocowo-warzywnych przekąskach mieściła się w zakresie 0,64-2,04% (**Tab. 4**). Najmniejszą zawartość zaobserwowano w próbce z pektyną, natomiast największą w materiale z dodatkiem proszku z wyłoków czarnych porzeczek. Zwiększenie zawartości tłuszczu w żywności po dodaniu proszków z wyłoków owocowych wynika z tego, że zawierają one tłuszcz, pochodzący z nasion występujących w masie wyłoków, który składa się głównie z wielo- i jednonienasyconych kwasów tłuszczowych, w tym kwasu linolowego i α -linolenowego (Helbig i wsp. 2008; Walia i wsp. 2014; Piasecka i wsp. 2021).

Zawartość białka w badanych materiałach również różniła się w zależności od składu przekąsek (**Tab. 4**). Zaobserwowano, że wraz z dodatkiem proszków z wyłoków owocowych zwiększała się ilość białka w badanych przekąskach, jednak była to istotna zmiana jedynie w próbkach z dodatkiem proszku z wyłoków z owoców czarnej porzeczki. Biorąc pod uwagę nośniki jako jedyne czynniki różnicujące receptury badanych przekąsek, takie wyniki wskazują, że proszek z wyłoków czarnych porzeczek był bogatszym źródłem białka niż pozostałe badane składniki. Podobnie jak w przypadku tłuszczu, może to wynikać z większej ilości pestek, które zawierają więcej białka niż miąższ i skórki owoców jagodowych, na co w swoich badaniach wskazali Blejan i wsp. (2023). Produkty pochodzenia roślinnego, w tym owoce, warzywa i ich przetwory, są uznawane za żywność niskobiałkową i z tego powodu wszelkie udane próby zwiększenia ich wartości mogą być doceniane z żywieniowego punktu widzenia (Mariotti i Gardner, 2019; Pinckaers i wsp. 2021). Jednak należy mieć także na uwadze niższą przyswajalność białka pochodzącego ze źródeł roślinnych w przeciwieństwie do białka zwierzęcego (Pinckaers i wsp. 2021).

Węglowodany obejmują wszystkie cukry, oligosacharydy i polisacharydy występujące w żywności (Voragen, 1998). W niniejszych badaniach całkowita zawartość węglowodanów obejmowała cukry i węglowodany strawne z wyjątkiem błonnika pokarmowego, którego zawartość została oznaczona oddzielnie. Zaobserwowano zmiany w profilu węglowodanów, wynikające z reformulacji składu produktów w formie przekąsek owocowo-warzywnych. Dodatek suszonych wyłoków jabłkowych w formie proszku spowodował, że całkowita zawartość węglowodanów w liofilizowanych przekąskach była o około 6,0-6,5% większa w porównaniu z pozostałymi badanymi wariantami przekąsek (**Tab. 4**). Zawierały one także więcej fruktozy i glukozy. Pod względem profilu węglowodanów, próbki z dodatkiem pektyny jabłkowej oraz proszku

z wyłoków z owoców czarnej porzeczki istotnie różniły się zawartością sacharozy, której więcej oznaczono w wariancie z dodatkiem proszku z wyłoków. Przedstawione wyniki są zgodne z literaturą, która potwierdza, że większość węglowodanów obecnych w wyłokach z czarnych porzeczek to związki należące do frakcji błonnika pokarmowego (Déniel i wsp. 2017; Reißner i wsp. 2019), co może uzasadniać podobieństwo profilu węglowodanów nienależących do błonnika pokarmowego w przekąskach z pektyną oraz proszkiem z wyłoków z czarnych porzeczek. Badania Waldbauer i wsp. (2017) oraz Skinner i wsp. (2018) potwierdziły dużą zawartość tych składników w suszonych wyłokach, co stanowi również podstawę do wyjaśnienia wyników uzyskanych w niniejszej pracy i potwierdza teorię na temat wpływu dodatku wyłoków owocowych na profil węglowodanów, w tym zawartość błonnika pokarmowego.

Błonnik pokarmowy to kolejny ważny składnik odżywczy obecny w produktach roślinnych. Stanowią go polisacharydy, oligosacharydy i ligniny, czyli wielko-cząsteczkowe węglowodany obecne w tkance roślinnej. Są one odporne na trawienie i wchłanianie w organizmie człowieka, dzięki czemu wywierają korzystny wpływ na funkcjonowanie układu pokarmowego i proces trawienia (Dhingra i wsp. 2012; Barber i wsp. 2020). Na podstawie wykonanych w niniejszych badaniach oznaczeń stwierdzono, że istotnie więcej błonnika znajdowało się w materiale strukturyzowanym pektyną (**Tab. 4**). Taki wynik był zgodny z przypuszczeniami, gdyż pektyny są jednym ze składników określanych jako rozpuszczalna frakcja błonnika pokarmowego (Dhingra i wsp. 2012). Z drugiej jednak strony, suszone wyłoki owocowe mogą zawierać nawet do 90% błonnika, ale bardziej prawdopodobne jest, że jego zawartość oscyluje na poziomie poniżej 60%, w zależności od rodzaju materiału (Quiles i wsp. 2018; Reißner i wsp. 2019).

Dodatkowo w przekąskach oznaczono zawartość popiołu, czyli wszystkich składników mineralnych, pozostałych po całkowitej degradacji związków organicznych na drodze spalania. Im więcej nieorganicznych mikro- i makroelementów zawiera żywność, tym wyższa jest w niej zawartość popiołu (Liu, 2019; Ikezu i wsp. 2020). W tym przypadku proszek z wyłoków jabłkowych zmniejszył, natomiast proszek z wyłoków z czarnych porzeczek zwiększył zawartość popiołu w przekąskach w odniesieniu do wariantu z pektyną (**Tab. 4**). Na tej podstawie można przypuszczać, że spośród wszystkich zastosowanych nośników, wyłoki jabłkowe zawierały najmniej składników mineralnych, podczas gdy wyłoki z owoców czarnej porzeczki miały ich najwięcej. Należy jednak podkreślić, że skład materiału roślinnego, takiego jak owoce

i warzywa, a tym samym ich produktów ubocznych, różni się i zmienia w zależności od odmiany, poziomu dojrzałości, a także czasu i warunków przechowywania. W związku z tym obserwowane tendencje zmian zawartości popiołu nie są spójne i istotnie zależą od surowca (Mahmood i wsp. 2013; Iordanescu i wsp. 2018; de Azeredo i wsp. 2022). Ponadto, wysoka zawartość popiołu w przypadku pektyny wskazuje na jej zanieczyszczenie i może zaburzać właściwości żelujące (Azad i wsp. 2014).

Niemniej jednak, należy mieć na uwadze, że skład chemiczny owoców i warzyw, który determinuje ich wartość odżywczą, zależy od wielu czynników zewnętrznych, wynikających między innymi z odmiany, warunków uprawy i sposobu przetwarzania, więc może się różnić pomiędzy partiami surowca w zależności od jego pochodzenia (Déniel i wsp. 2017; Waldbauer i wsp. 2017; Skinner i wsp. 2018; Reißner i wsp. 2019, 2022; Lyu i wsp. 2020; Usman i wsp. 2020). Konsekwentnie, w następstwie zmiennej jakości dostępnych surowców, charakterystyka wytworzonych z nich produktów także może ulegać zmianom pod względem zawartości niektórych składników odżywczych.

W badaniach wyznaczono także wartość energetyczną liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych (**Tab. 4**). Przekąski z dodatkiem wyłoków jabłkowych i z czarnych porzeczek charakteryzowały się większą o około 11,6% kalorycznością niż próbka z dodatkiem pektyny jabłkowej. Otrzymane wyniki były zgodne z omawianymi powyżej zawartościami tłuszczu, białka i cukrów, które zostały wprowadzone do składu materiału wraz z wyłokami owocowymi (Waldbauer i wsp. 2017; Reißner i wsp. 2019). Niemniej jednak, mimo że zawartość poszczególnych składników różniła się w zależności od rodzaju wyłoków, nie zaobserwowano istotnej różnicy między wartością energetyczną przekąsek z dodatkami proszków z wyłoków z jabłek oraz czarnych porzeczek.

Na polskim rynku nie ma zbyt wielu produktów podobnych do przedmiotu badań niniejszej rozprawy, jednak na sklepowych półkach można znaleźć liofilizowane przekąski owocowe w postaci batonów (Celiko, 2022). Na podstawie deklaracji producenta zebranych z etykiet czterech wariantów smakowych produktów można stwierdzić, że ich przeciętny skład zawiera owoce w ilości około 31%, zagęszczone soki owocowe, ekstrakt z chleba świętojańskiego, maltodekstrynę, trehalozę, inulinę i pektynę, a pojedyncza porcja proponowanej przez producenta przekąski to baton o masie 10 g. Dane o wartości odżywczej zamieszczone na opakowaniu informują, że 100 g produktu dostarcza 30–34 kcal, 0,7–3,2 g białka, 0,1–1 g tłuszczu, 53–69 g węglowodanów, w tym 39–51 g cukrów i 28–36 g błonnika pokarmowego. Sugeruje to,

że opracowane w badaniach przekąski są porównywalne z komercyjnymi, jednak produkty z wyłokami owocowymi w proszku charakteryzowały się o około 20-25% wyższą wartością kaloryczną niż produkty komercyjne. Nie ma jednak alternatyw wzbogaconych o wyłoki warzywne i owocowe, a wszystkie batony liofilizowane dostępne na polskim rynku zostały opracowane na bazie owoców i hydrokoloidów.

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że zastąpienie pektyny jabłkowej jako dodatku umożliwiającego strukturyzację liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych proszkami z wyłoków owocowych istotnie wpływa na wartość odżywczą produktów, powodując w nich zwiększenie zawartości białka, tłuszczów i składników mineralnych oraz większą wartość energetyczną. Biorąc pod uwagę dane literaturowe, z którymi dyskutowano wyniki, zmiany te wydają się być określone jako korzystne, co pozwala na pozytywną weryfikację **hipotezy 2**.

4.3 Wpływ zastosowanych dodatków i warunków przechowywania na stabilność przechowalniczą liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych

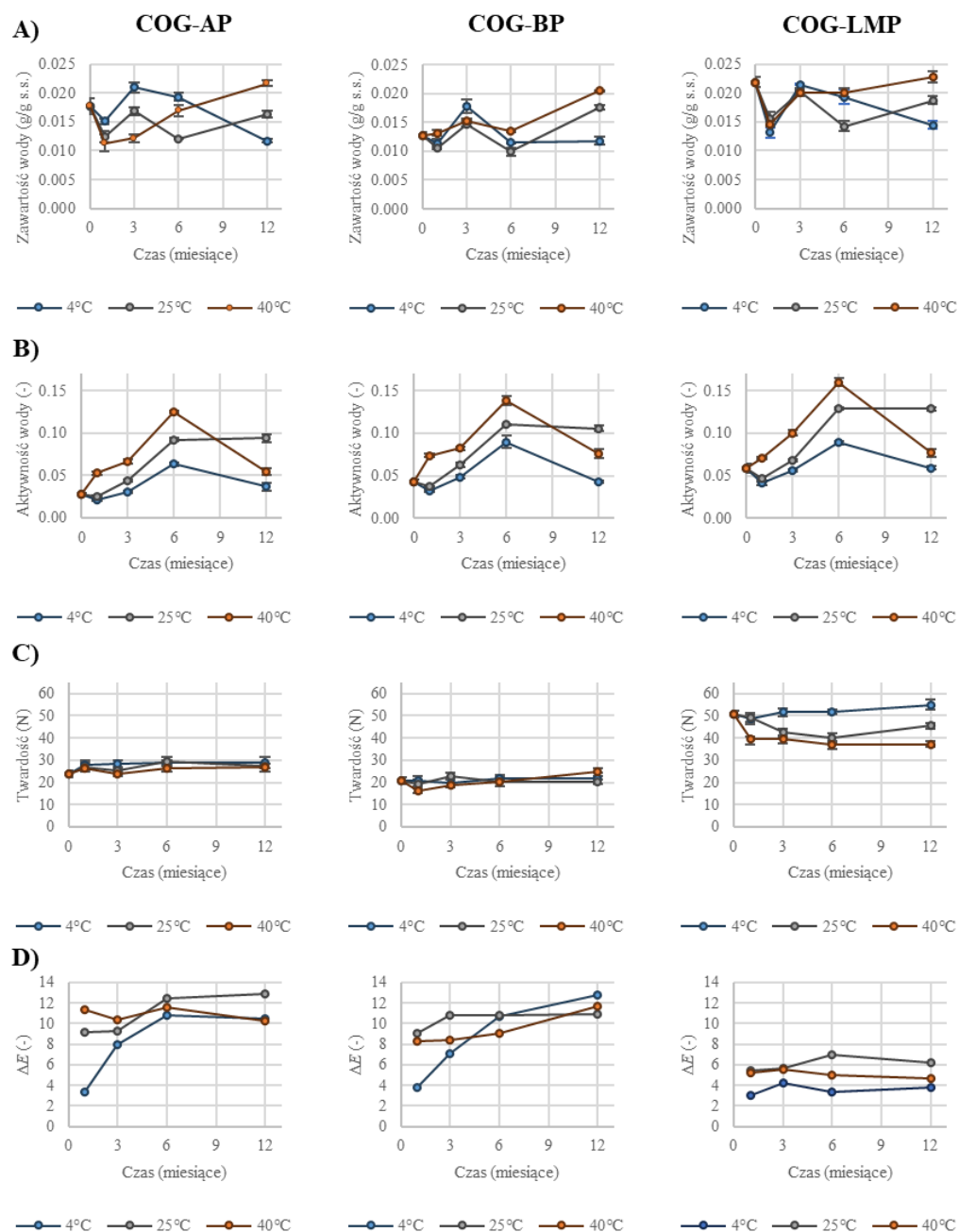
Jednym z ważniejszych wymogów, jakie musi spełnić produkt spożywczy przed wprowadzeniem go na rynek, jest jego bezpieczeństwo i stabilność. W celu uzyskania informacji o tym, jak zachowują się produkty spożywcze podczas przechowywania, zaleca się przetestowanie szerokiego zakresu warunków, na które mogą być one narażone, i przeanalizowanie krytycznych parametrów determinujących ich jakość (Calligaris i wsp. 2016). Dlatego też **hipoteza 3** niniejszej pracy zakładała, że liofilizowane przekąski owocowo-warzywne wytworzone z dodatkiem proszków z wyłoków owocowych lub pektyny jabłkowej będą stabilne podczas przechowywania przez okres przynajmniej 12 miesięcy. W celu zweryfikowania tej hipotezy przeprowadzono próby przechowalnicze, podczas których zbadano kinetykę zmian wybranych cech jakościowych produktów przechowywanych w temperaturze 4, 25 lub 40°C. Wszystkie wyniki zostały opublikowane w artykule **P4**, wchodzącym w skład rozprawy, a część z nich została przedstawiona poniżej na **rysunkach 5 i 6**.

Właściwości związane z migracją wody w materiale mają kluczowe znaczenie dla stabilności żywności. Zawartość wody w materiale jest ważna, ale bezpieczeństwo i stabilność żywności zależą głównie od jej aktywności, która została zidentyfikowana jako krytyczny parametr, wpływający na jakość produktów spożywczych podczas przechowywania (Ribeiro i wsp. 2023). Z uwagi na małą początkową zawartość i aktywność wody (**Rys. 5A i 5B**) założono, że dzięki temu przekąski z dodatkiem proszków z wyłoków owocowych będą stabilne w czasie przechowywania przez okres 12 miesięcy. Niezależnie od rodzaju zastosowanego dodatku, obserwowano podobne tendencje w zakresie zmian zawartości wody w przekąskach przechowywanych w badanych temperaturach. Po pierwszym miesiącu przechowywania wartości parametru uległy znacznej redukcji, a następnie zaczęły się stabilizować. W przypadku aktywności wody, wartości parametru zwiększały się do 6 miesiąca przechowywania, a po dwunastu miesiącach zaobserwowano znaczną redukcję w próbkach przechowywanych w podwyższonej temperaturze (40°C), ustabilizowanie w temperaturze pokojowej (25°C) oraz zmniejszenie do wartości początkowej w materiale przechowywanym w warunkach chłodniczych (4°C). Jednocześnie, najmniejsze zmiany aktywności wody zaobserwowano w przekąskach przechowywanych w temperaturze 4°C. Pomimo obserwowanych zmienności parametrów, związanych z dyfuzją wilgoci, a co za tym idzie

zawartością i aktywnością wody, nie zostały przekroczone żadne wartości krytyczne dla wzrostu drobnoustrojów lub reakcji enzymatycznych i nieenzymatycznych (Ribeiro i wsp. 2023). Wskazuje to, że barierowość zastosowanego opakowania gwarantuje odpowiednie warunki do zapewnienia trwałości przekąsek, tym bardziej, że badania liofilizowanych grzybów (Liuqing i wsp. 2018) wykazały, że podczas przechowywania próbek w jednowarstwowych torebkach polietylenowych w temperaturze 25 i 37°C oraz różnej wilgotności względnej zawartość wody w materiale zwiększała się z około 4% do 8–10% w ciągu 25 dni, co w konsekwencji doprowadziło do niekorzystnych zmian mikrostruktury i tekstury produktów. Ponadto, użyte w badaniach przechowalniczych liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych, opakowania były deklarowane jako nieprzepuszczalne dla pary wodnej i zamknięte za pomocą podwójnego zgrzewania, dlatego też zaobserwowane zmiany były najprawdopodobniej konsekwencją migracji wilgoci obecnej w samym materiale, a także między materiałem a atmosferą zamkniętą w opakowaniu, co potwierdza również obserwacje Sirpatrawan (2009). Aktywność wody na poziomie około 0,3 i mniejszym może sprzyjać utlenianiu lipidów, jednak, jak wspomniano wcześniej, badane w niniejszej rozprawie próbki nie zawierały znacznych ilości tłuszczu.

Kolejnym badanym parametrem były właściwości mechaniczne (**Rys. 5C**), które są powiązane z cechami struktury wewnętrznej, zawartością wilgoci i składem chemicznym materiału. Dodatkowo, zmiany tekstury są powszechnym zjawiskiem podczas przechowywania produktów spożywczych o niskiej wilgotności (Alam i wsp. 2015). Podczas analizy otrzymanych wyników badań wyznaczono twardość przekąsek, czyli najwyższą siłę zarejestrowaną podczas ściskania próbek, oraz wyznaczono krzywe ściskania, które przedstawiono w publikacji **P4**. Twardość przekąsek z dodatkiem wyłoków owocowych w proszku wykazała niewielkie zmiany podczas przechowywania (**Rys. 5C**), a jej wartość z reguły się zwiększała w porównaniu z próbką z dodatkiem pektyny jabłkowej, co można zaklasyfikować jako korzystne zjawisko. Dla przekąsek strukturyzowanych pektyną zaobserwowano odmienną tendencję. Ich twardość zmniejszała się, co zaobserwowano szczególnie podczas przechowywania w temperaturze pokojowej i podwyższonej, czyli odpowiednio 25 i 40°C. W warunkach chłodniczych zaś, wartość tego parametru nie uległa zmianie. Obserwując podobne trendy podczas przechowywania żeli i roztworów pektynowych, Morris i wsp. (2010) stwierdzili, że wyższa temperatura może sprzyjać depolimeryzacji pektyn w czasie przechowywania. Właściwości mechaniczne w dużym stopniu zależą od zawartości wody

w materiale, która wpływała również na porowatość i strukturę, przez co kontrolowanie wilgotności względnej środowiska otaczającego próbki podczas przechowywania i utrzymywanie jej na stałym i odpowiednio niskim poziomie, może znacząco zredukować powstawanie niekorzystnych zmian profilu tekstury liofilizowanych przekąsek (Silva-Espinoza i wsp. 2020a).



Rys. 5. Kinetyka zmian wybranych właściwości fizykochemicznych liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wytworzonych z dodatkiem proszków z wyłoków jabłkowych (COG-AP), z czarnych porzeczek (COG-BP) lub niskometylowanej pektyny jabłkowej (COG-LMP) w czasie przechowywania w różnej temperaturze. **A)** zawartość wody, **B)** aktywność wody, **C)** twardość, **D)** bezwzględna różnica barwy (ΔE).

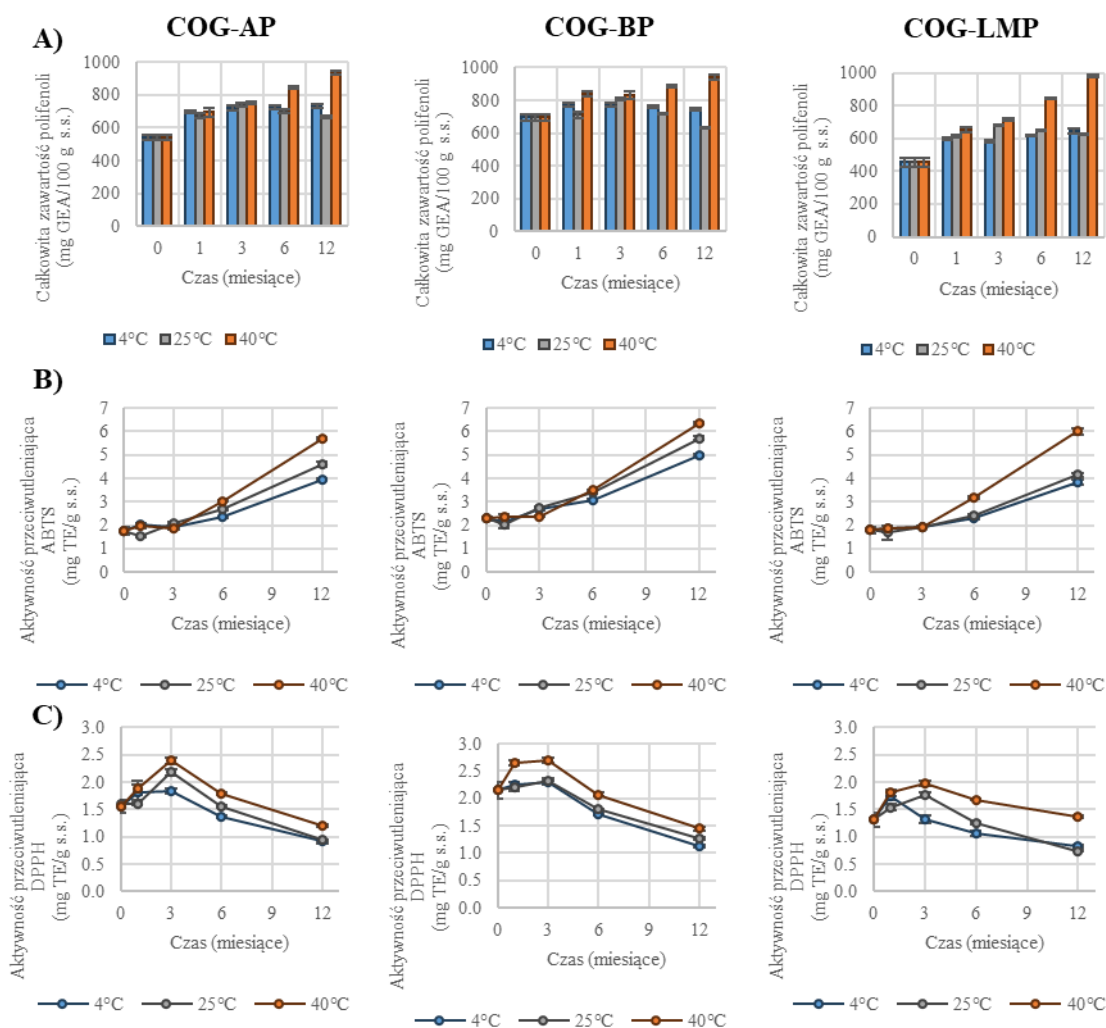
Jednym z czynników, przyciągających uwagę i decydujących o atrakcyjności produktów spożywczych, jest ich barwa. Pomimo że materiały stosowane do produkcji opakowań o wysokiej barierowości, wymagane dla liofilizowanych produktów np.: przekąsek, nie są z reguły transparentne i nie umożliwiają oceny wyglądu ich zawartości, konsumenci oczekują, że ich zakup będzie zgodny z oczekiwaniami lub zaproponowanym projektem graficznym opakowania, który zwykle przyciąga uwagę i eksponuje najlepsze cechy produktu (Puteri i wsp. 2020). W celu zbadania zmian barwy podczas przechowywania liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych dokonano pomiaru jasności, nasycenia (wyniki dostępne w publikacji **P4**) oraz obliczono bezwzględną różnicę barwy (ΔE) (**Rys. 5D**). Wyniki badań parametru jasności barwy przekąsek, pozwoliły na zaobserwowanie tendencji w kierunku zwiększania się jego wartości, natomiast analiza nasycenia barwy w tym samym czasie wskazała na redukcję jej intensywności. Z reguły, największe zmiany występowały po pierwszym miesiącu przechowywania, po czym wartości parametru jasności i nasycenia barwy pozostawały niezmiennie. Sugeruje to, że degradacja barwników obecnych w materiale najbardziej intensywnie zachodziła w początkowym etapie przechowywania, po czym nastąpił efekt plateau (wyniki dostępne w publikacji **P4**). Mogło to wynikać z szybkiego zużycia substratów reakcji rozkładu pigmentów z uwagi na ich dużą dostępność na powierzchni materiału, która miała bezpośredni kontakt z otaczającą atmosferą, a także porowatą strukturą, która z łatwością mogła być penetrowana przez powietrze zamknięte w opakowaniu.

W przypadku bezwzględnej różnicy barwy (ΔE) (**Rys. 5D**), która jest cechą określającą całościowo zmiany, zachodzące w obrębie wszystkich chromatycznych współrzędnych parametrów barwy, można zauważyć podobieństwo w przebiegu tych zmian w przekąskach z dodatkiem proszków z wytlóków oraz różnice pomiędzy nimi, jak i materiałem z dodatkiem pektyny jabłkowej. W przekąskach z proszkami z wytlóków zaobserwowano, że przechowywanie w temperaturze chłodniczej spowolniło zmiany barwy, jednak po trzech miesiącach wielkości ΔE większości próbek były większe niż 8 i zbliżone do wyników otrzymanych po przechowywaniu w temperaturze pokojowej (25°C) i podwyższonej (40°C), które przekroczyły tę granicę już po pierwszym miesiącu trwania prób przechowalniczych. Jednocześnie w przekąskach z dodatkiem pektyny jabłkowej także wystąpiła zmiana barwy, jednak wartości bezwzględnej różnicy barwy były w tym przypadku znacznie mniejsze i pozostały na tym samym poziomie od pierwszego miesiąca do końca okresu badań przechowalniczych (12 miesięcy). W tym

przypadku również zaobserwowano, że zastosowanie obniżonej temperatury przechowywania korzystnie wpłynęło na barwę przekąsek. Warto zaznaczyć, że niezależnie od rodzaju próbki i warunków przechowywania, wartości ΔE były większe niż 5, co świadczy o tym, że barwa zmieniała się na tyle w czasie przechowywania, że różnice były zauważalne dla potencjalnego obserwatora (Wriedt i wsp. 2007). Jak sugerują badania Wriedt i wsp. (2007), bezwzględna różnica barwy (ΔE) w zakresie wartości od 5 do 10 jest rozpoznawalna dla obserwatora, jednak takie zmiany wciąż są akceptowalne, natomiast w przypadku przekroczenia tych wartości, ogólna ocena barwy silnie zależy od preferencji jednostki. Obserwacje dokonane w niniejszej pracy mogą być wynikiem ochronnego działania dodatku czystego biopolimeru (niskometylowanej pektyny jabłkowej) na związki odpowiadające za barwę i jej intensywność w przypadku liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych. Niemniej jednak, uzyskane wyniki sugerują, że pod względem zachowania barwy stosowanie pektyny jako dodatku strukturotwórczego pozwala na uzyskanie produktów bardziej stabilnych niż przekąski z udziałem proszków z wyłóków owocowych. Przyczyną może być zdolność biopolimerów do kapsułkowania związków bioaktywnych i barwników, dzięki czemu uzyskiwany jest efekt ochronny podczas przetwarzania (Silva-Espinoza i wsp. 2021), więc jest wysoce prawdopodobne, że efekt ten mógł występować także podczas przechowywania. W barwie przekąsek dominował kolor pomarańczowy, za który odpowiadają barwniki zawarte w marchwi i pomarańczach – karotenoidy, które są podatne na degradację, wynikającą z utleniania lub ekspozycji na światło. W celu skutecznego wyeliminowania tego rodzaju zmian, należy odpowiednio dobrać opakowanie produktu, przy czym zastosowanie metalizowanych opakowań pozwala na uzyskanie bardzo dobrych wyników (Sahni, 2017).

Ponadto, aby dokładniej określić stabilność przechowalniczą liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych w niniejszych badaniach przeanalizowano również zmiany całkowitej zawartości polifenoli oraz aktywności przeciwutleniającej (**Rys. 6**). Zawartość polifenoli miała tendencję do zwiększania się podczas przechowywania (**Rys. 6A**). Zależność ta była najbardziej wyraźna podczas przechowywania w podwyższonej temperaturze, gdzie zaobserwowano tendencję wzrostową, utrzymującą się przez cały czas badania. Stwierdzono również, że w temperaturze pokojowej (25°C) i chłodniczej (4°C) zmiany wystąpiły, ale nie postępowały w czasie. Najmniejsze wahania zawartości polifenoli zaobserwowano w próbkach z dodatkiem proszków z wyłóków z owoców czarnej porzeczki. Generalnie, otrzymane wyniki są sprzeczne

z trendami, dotyczącymi zachowania się tych związków w czasie przechowywania, gdyż z reguły obserwowana jest redukcja ich zawartości (Zorić i wsp. 2016; Liuqing i wsp. 2018). Jednak w badaniach liofilizowanych przekąsek pomarańczowych, przechowywanych w temperaturze 4 i 20°C, przeprowadzonych przez Silva-Espinoza i wsp. (2020a), również wykazano zwiększenie zawartości polifenoli w ciągu 6 miesięcy przechowywania, które, dzięki szczegółowej analizie właściwości chemicznych,



Rys. 6. Kinetyka zmian wybranych właściwości fizykochemicznych liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wytworzonych z dodatkiem proszków z wytlóków jabłkowych (COG-AP), z czarnych porzeczek (COG-BP) lub pektyny (COG-LMP) w czasie przechowywania w różnej temperaturze. **A)** całkowita zawartość polifenoli, **B)** aktywność przeciwutleniająca względem rodnika ABTS^{•+} oraz **C)** aktywność przeciwutleniająca względem rodnika DPPH[•].

powiązano z transformacją kwasów organicznych obecnych w pomarańczach w związki o charakterze fenolowym (Silva-Espinoza i wsp. 2020a), co mogło mieć miejsce również w badanych w tej pracy produktach liofilizowanych. Natomiast analizy Zorić i wsp.

(2016) sugerują, że materiał opakowaniowy użyty w doświadczeniu był dobrym wyborem w aspekcie zawartości polifenoli oraz potwierdzają, że pod względem retencji polifenoli i innych związków bioaktywnych, warunki chłodnicze są najkorzystniejsze do utrzymania wysokiej, zadowalającej jakości produktów, w których występują.

Aktywność przeciwutleniająca oznaczona względem rodnika ABTS^{•+} również zwiększała się w czasie przechowywania (**Rys. 6B**), przez co korespondowała z wynikami otrzymanymi w przypadku polifenoli. Jednak aktywność przeciwutleniająca oznaczona względem rodnika DPPH[•] wykazała odmienne tendencje. Wartości tego parametru zwiększały się do trzech miesięcy przechowywania, po czym zaobserwowano dość gwałtowne zmniejszenie wartości. Z reguły, aktywność przeciwutleniająca maleje wraz z upływem czasu, co wynika ze zmniejszenia zawartości związków bioaktywnych, w tym polifenoli (Zorić i wsp. 2016). Jednak zjawisko zaobserwowane w tych badaniach można wyjaśnić większą selektywnością rodników DPPH[•] w porównaniu do ABTS^{•+}, który reaguje z szerszym spektrum związków chemicznych, podczas gdy DPPH[•] jest ukierunkowany głównie na polifenole (Mareček i wsp. 2017). W konsekwencji, otrzymane wyniki sugerują powstawanie związków reagujących z rodnikiem ABTS^{•+} i odczynnikiem Folina-Ciocalteu'a, ale nie z rodnikiem DPPH[•]. Ponadto, pomimo że w badaniach Silva-Espinoza i wsp. (2020a) zaobserwowali tendencję wzrostową zawartości polifenoli, analizy aktywności przeciwutleniającej metodami DPPH[•] oraz FRAP nie wykazały zmian w czasie, a wyniki obu metod przedstawiały podobne zależności. W tym przypadku, na przykładzie produktów z owoców cytrusowych, otrzymane wyniki wyjaśniono przemianami kwasów organicznych, które są substratami syntezy związków polifenolowych. Już wcześniej zaobserwowano, że zwiększenie aktywności przeciwutleniającej może również być następstwem powstawania produktów pochodnych degradacji związków bioaktywnych, które także wykazują potencjał antyrodnikowy, co potwierdzono na przykładzie soków z czarnych porzeczek poddawanych obróbce termicznej i z użyciem wysokiego ciśnienia hydrostatycznego (Kruszewski i wsp. 2021). Biorąc pod uwagę powyższe oraz to, że najwyższą aktywnością przeciwutleniającą charakteryzował się materiał przechowywany w temperaturze 40°C, co było widoczne szczególnie w przypadku analizy z DPPH[•], można wnioskować, że podwyższona temperatura przyspieszała degradację związków obecnych w materiale, a tym samym powstawanie związków o właściwościach przeciwutleniających, które mogły zakłócić przebieg reakcji prowadzonej w celu oznaczenia zawartości polifenoli.

Na podstawie przedstawionych wyników nie można stwierdzić, że liofilizowane przekąski owocowo-warzywne wytworzone z dodatkiem proszków z wycisków owocowych lub pektyny były w pełni stabilne podczas przechowywania, jednak nie zaobserwowano zmian, które mogłyby zagrażać ich bezpieczeństwu. Niezależnie od rodzaju zastosowanego dodatku obserwowano zmiany właściwości fizykochemicznych. Dynamika tych zmian zależała od temperatury przechowywania, przy czym jako sugerowaną można wskazać temperaturę chłodniczą (4°C). Stosunkowo nieduże różnice wybranych cech, które wystąpiły po przechowywaniu w podwyższonej temperaturze sugerują, że przekąski mogą być przechowywane przez okres 12 miesięcy, jednak wymagane są dokładniejsze badania w celu zoptymalizowania okresu przydatności do spożycia i warunków przechowywania, z uwzględnieniem oceny konsumentów. Zatem weryfikacja **hipotezy 3** postawionej w niniejszej pracy jest pozytywna, ale z podkreśleniem konieczności wykonania bardziej szczegółowych badań, co umożliwia wskazanie nowych kierunków badawczych, wykorzystujących potencjał strukturotwórczy w kształtowaniu cech funkcjonalnych i użytkowych produktów w formie przekąsek opracowanych z udziałem proszków z wycisków owocowych.

4.4 Wpływ dodatku proszków z wyłoków owocowych i pektyny na zawartość związków bioaktywnych, właściwości strukturalne i mechaniczne oraz właściwości związane z obecnością i powinowactwem do wody

Jednym z głównych celów stosowania produktów ubocznych w „nowej żywności” jest wykorzystanie ich wartości odżywczej, np. wprowadzenie związków bioaktywnych, błonnika i minerałów zawartych w tych składnikach. **Hipoteza 4** niniejszej pracy zakładała, że reformulacja składu liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych poprzez wprowadzenie i/lub zwiększenie w nich udziału proszków z wyłoków owocowych, poza zwiększeniem wartości żywieniowej, spowoduje wzmocnienie struktury oraz wpłynie na stabilność matrycy liofilizatów poprzez ograniczenie ich zdolności do pochłaniania wilgoci z otoczenia. W celu potwierdzenia założeń dotyczących wartości żywieniowej przeprowadzono badania całkowitej zawartości polifenoli (**Tab. 5**), aktywności przeciwutleniającej (**Tab. 6**) oraz zawartości antocyjanów (**Tab. 5**) w wybranych próbkach. W celu weryfikacji części **hipotezy 4**, odnoszącej się do struktury i właściwości mechanicznych, wykonano obrazowanie mikrostruktury liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (**Rys. 7B**), przeprowadzono również jej analizę w aspekcie oceny porowatości (**Rys. 7C, Rys. 8, Tab. 7**) wykonanej za pomocą mikrotomografu komputerowego, a także dokonano oceny właściwości mechanicznych, na podstawie analizy twardości i krzywych ściskania (**Tab. 8, Rys. 9**). Dodatkowo zbadano zawartość i aktywność wody (**Rys. 10**) oraz właściwości higroskopijne (**Tab. 9**), aby potwierdzić założenie dotyczące wpływu dodatku proszków z wyłoków owocowych na stabilność liofilizowanych przekąsek. Wyniki otrzymane dla poszczególnych receptur opracowanych liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych z zastosowaniem proszków z wyłoków jabłkowych, z czarnych porzeczek oraz wyłoków z aronii jako składników strukturotwórczych przedstawiono odpowiednio w publikacjach **P5, P6, P7** oraz podsumowano na rysunkach i w tabelach zawartych w niniejszym rozdziale.

Całkowita zawartość polifenoli i całkowita zawartość antocyjanów zostały przedstawione w **tabeli 5**. Zgodnie z początkowymi założeniami, wprowadzenie do receptury liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych proszków z wyłoków owocowych istotnie zwiększyło zawartość związków bioaktywnych we wszystkich badanych wariantach recepturowych. Zaobserwowano stopniowe zwiększanie zawartości polifenoli wraz ze zwiększaniem ilości dodanych proszków z wyłoków. Wyniki

otrzymane w przypadku próbek z dodatkiem proszków z wyłoków jabłkowych oraz z czarnych porzeczek były porównywalne, natomiast znacznie lepszy efekt uzyskano w przypadku przekąsek z proszkiem z wyłoków z aronii. Dostępne badania sugerują, że działanie związków bioaktywnych o charakterze przeciwutleniającym zależy od pH, a te zawarte w wyłokach z aronii okazały się działać najlepiej w środowisku ludzkiego ciała spośród różnych owoców, takich jak jabłka, jagody i inne (Gao i wsp. 2020), co dodatkowo stawia dodatek tych składników w korzystnym świetle z żywieniowego punktu widzenia. W przekąskach z dodatkiem pektyny zaobserwowano nieistotnie niższe wyniki w stosunku do próbki kontrolnej bez żadnych dodatków.

Tab. 5. Całkowita zawartość polifenoli oraz antocyjanin w liofilizowanych przekąskach owocowo-warzywnych wytworzonych z dodatkiem proszków z wyłoków jabłkowych (AP), z czarnych porzeczek (BP), z aronii (CP) lub niskometylowanej pektyny jabłkowej (LMP)

Material	Całkowita zawartość polifenoli (mg GAE/100 g s.s.)			Całkowita zawartość antocyjanin (mg Cy-3-glu/100 g s.s.)
	Przekąski z dodatkiem proszku z wyłoków jabłkowych (AP)	Przekąski z dodatkiem proszku z wyłoków z czarnych porzeczek (BP)	Przekąski z dodatkiem proszku z wyłoków z aronii (CP)	Przekąski z dodatkiem proszku z wyłoków z aronii (CP)
Kontrola	1163,87±13,14 ^d	1163,87±13,14 ^d	1163,87±13,14 ^h	-
1a	1231,76±18,81 ^c	1203,93±3,03 ^c	1344,62±2,10 ^g	287,25±13,29 ^h
1b	1232,97±7,12 ^c	1212,3±11,72 ^c	1412,73±6,73 ^{fg}	316,82±3,56 ^g
1c	1226,63±11,71 ^c	1219,20±3,49 ^c	1454,41±12,73 ^f	336,33±10,16 ^g
3a	1278,48±9,79 ^b	1265,26±7,60 ^b	2005,29±85,67 ^e	766,30±7,11 ^f
3b	1280,76±8,18 ^b	1257,28±9,29 ^b	2334,80±24,77 ^d	884,25±6,08 ^e
3c	1277,19±11,37 ^b	1264,89±2,95 ^b	2272,49±8,25 ^d	966,97±8,25 ^d
5a	1315,99±10,73 ^a	1324,98±14,75 ^a	2547,78±17,37 ^c	1170,48±13,00 ^c
5b	1314,15±8,63 ^a	1325,52±8,92 ^a	2866,54±15,56 ^a	1351,20±14,35 ^a
5c	1313,29±20,12 ^a	1332,14±13,28 ^a	2664,43±20,33 ^b	1270,59±10,69 ^b
LMP0,5b	1156,20±16,01 ^d	1156,20±16,01 ^d	1156,20±16,01 ^h	-
LMP1,5b	1154,65±14,71 ^d	1154,65±14,71 ^d	1154,65±14,71 ^h	-

* liczby w kodach próbek odpowiadają procentowemu udziałowi dodatku w recepturze liofilizowanych przekąsek, a małe litery a, b, c reprezentują dodatek mleczanu wapnia odpowiednio w ilości 0, 0,01 i 0,05%
 ** w tabeli przedstawiono średnie wartości z odchyleniem standardowym. Różne litery **a-h** w kolumnach oznaczają różnice statystyczne pomiędzy wynikami otrzymanymi w poszczególnych wariantach.

Wyniki dotyczące zawartości związków bioaktywnych korespondowały z aktywnością przeciwutleniającą liofilizowanych przekąsek, która jest przedstawiona w **tabeli 6**. Analizę tych właściwości przeprowadzono wobec dwóch różnych rodników, otrzymując zróżnicowane wyniki, które przedstawiały podobne tendencje. Próbk

z pektyną charakteryzowały się taką samą lub mniejszą aktywnością przeciwutleniającą niż próbka kontrolna (**Tab. 6**). Z kolei, w konsekwencji dodatku i zwiększania ilości proszku z wycieków owocowych zwiększała się także aktywność przeciwrodnikowa badanych produktów liofilizowanych. Najmniejszy i statystycznie nieistotny wzrost wystąpił w przypadku przekąsek z dodatkiem proszku z wycieków jabłkowych w ilościach 1 i 3%, natomiast reformulacja składu poprzez dodatki proszków z wycieków z czarnych porzeczek oraz aronii okazała się znacznie bardziej efektywna pod względem poprawy aktywności przeciwrodnikowej badanych produktów liofilizowanych. Ponadto, poza pozytywnym wpływem na jakość żywieniową gotowych przekąsek, ich zwiększony potencjał antyoksydacyjny może mieć także działanie przedłużające okres przydatności do spożycia tego typu produktów (Petković i wsp. 2021).

Tab. 6. Aktywność przeciwutleniająca liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wytworzonych z dodatkiem proszku z wycieków jabłkowych (AP), z czarnych porzeczek (BP), z aronii (CP) lub niskometylowanej pektyny jabłkowej (LMP)

Aktywność przeciwutleniająca (mg TE/g s.s.)						
Material	DPPH			ABTS		
	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków jabłkowych (AP)	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków z czarnych porzeczek (BP)	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków z aronii (CP)	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków jabłkowych (AP)	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków z czarnych porzeczek (BP)	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków z aronii (CP)
Kontrola	5,66±0,31 ^d	5,66±0,31 ^d	5,66±0,31 ^{ef}	2,68±0,07 ^{cd}	2,68±0,07 ^e	2,68±0,07 ^{cd}
1a	5,95±0,30 ^{bcd}	6,30±0,28 ^c	7,51±0,26 ^{cd}	2,75±0,07 ^{abcd}	2,91±0,04 ^d	2,94±0,03 ^{cd}
1b	5,93±0,17 ^{bcd}	6,48±0,17 ^c	6,83±0,21 ^{de}	2,75±0,09 ^{abcd}	2,93±0,11 ^d	2,91±0,09 ^c
1c	5,81±0,21 ^{bcd}	6,50±0,09 ^c	7,20±0,38 ^{cd}	2,73±0,11 ^{bcd}	2,98±0,08 ^d	2,97±0,05 ^{cd}
3a	5,90±0,36 ^{bcd}	6,94±0,08 ^b	7,57±0,53 ^{cd}	2,74±0,11 ^{bcd}	3,48±0,06 ^c	3,59±0,22 ^b
3b	5,78±0,18 ^{bcd}	6,99±0,09 ^b	8,47±0,47 ^{bc}	2,74±0,08 ^{abcd}	3,57±0,07 ^c	3,55±0,14 ^b
3c	5,97±0,13 ^{bcd}	6,98±0,06 ^b	7,83±0,54 ^{cd}	2,74±0,08 ^{bcd}	3,60±0,08 ^{bc}	3,50±0,17 ^b
5a	6,29±0,20 ^{abc}	7,70±0,12 ^a	10,12±0,40 ^a	2,90±0,01 ^{ab}	3,78±0,11 ^{ab}	4,15±0,21 ^a
5b	6,34±0,17 ^{ab}	7,74±0,14 ^a	9,31±1,30 ^{ab}	2,88±0,08 ^{abc}	3,79±0,06 ^{ab}	4,15±0,11 ^a
5c	6,58±0,28 ^a	7,81±0,13 ^a	9,86±0,37 ^a	2,95±0,08 ^a	3,92±0,04 ^a	4,09±0,10 ^a
LMP0,5b	5,53±0,10 ^d	5,53±0,10 ^d	5,53±0,10 ^f	2,55±0,07 ^{de}	2,55±0,07 ^{ef}	2,55±0,07 ^d
LMP1,5b	5,77±0,09 ^{cd}	5,77±0,09 ^d	5,77±0,09 ^f	2,42±0,12 ^e	2,42±0,12 ^f	2,42±0,12 ^d

* liczby w kodach próbek odpowiadają procentowemu udziałowi dodatku w recepturze liofilizowanych przekąsek, a małe litery a, b, c reprezentują dodatek mleczanu wapnia odpowiednio w ilości 0, 0,01 i 0,05%

** w tabeli przedstawiono średnie wartości z odchyleniem standardowym. Różne litery **a-f** w kolumnach oznaczają różnice statystyczne pomiędzy wynikami otrzymanymi dla poszczególnych wariantów.

Podczas badań zauważono, że aktywność przeciwutleniająca przekąsek z dodatkiem wycieków z owoców czarnej porzeczki zwiększyła się bardziej niż zawartość polifenoli. Na podstawie literatury stwierdzono, że wynika to z dużej zawartości

czerwonych barwników – antocyjanów – które wykazują silne właściwości przeciwutleniające (Michalska i wsp. 2017). Dlatego też w dalszym etapie badań nad zastosowaniem wyłoków z aronii w formie proszku, przeanalizowano również ogólną zawartość tych związków, która podobnie jak pozostałe właściwości chemiczne, wykazała tendencję rosnącą wraz ze zwiększaniem zawartości proszku z wyłoków w badanych liofilizowanych przekąskach owocowo-warzywnych (**Tab. 6**). Owoce aronii i produkty otrzymywane z tego surowca, w tym wyłoki aroniowe, są bogatym źródłem związków bioaktywnych, takich jak polifenole. Udowodniono też, że związki bioaktywne w wyłokach pozostają stabilne podczas ogrzewania i obróbki mechanicznej (Mayer-Miebach i wsp. 2012). Przeprowadzona analiza uzyskanych rezultatów badań wykazała także, że produkty zawierające dodatek mleczanu wapnia charakteryzowały się większą zawartością antocyjanów niż próbki zawierające taką samą ilość wyłoków, do których nie dodano mleczanu wapnia. Sugeruje to, że wprowadzenie jonów wapnia mogło mieć ochronny wpływ na te związki podczas przetwarzania. Nie znaleziono danych literaturowych, które jednoznacznie potwierdziłyby lub zaprzeczyły tej tezie. Niemniej jednak, badania nad naturalnymi barwnikami w napojach prowadzone przez Cortez i wsp. wykazały, że dodatek biopolimerów poprawia stabilność antocyjanów ze względu na ich zdolność do tworzenia kompleksów molekularnych, a jony wapnia są często stosowane jako środki wspomagające właściwości żelujące włókien (Cortez i wsp. 2017). Dodatkowo, warunki obróbki technologicznej zastosowane w badaniach w niniejszej pracy były stosunkowo łagodne, a zgodnie z badaniami Vagiri i Jensen (2017) oraz Andrade i wsp. (2021) antocyjany są stabilne podczas obróbki termicznej, enzymatycznej i łączonej, co może wyjaśniać i tłumaczyć uzyskane rezultaty (Vagiri i Jensen, 2017; Andrade i wsp. 2021). Innym przykładem mogą być badania Drożdż i wsp. (2019), którzy stwierdzili znaczne zwiększenie zawartości związków fenolowych, w tym antocyjanów, w ekstrudowanych przekąskach kukurydzianych z dodatkiem wyłoków z aronii. Ponadto porównanie wyłoków z aronii oraz czarnych porzeczek wykazało korzystniejszy wpływ wyłoków z aronii, nawet jeśli temperatura przetwarzania mieściła się w zakresie od 120 do 150°C. Wysokie zawartości składników bioaktywnych po wprowadzeniu proszków z wyłoków owocowych były również raportowane w produktach piekarskich, które także są poddawane obróbce w wysokich temperaturach (Cacak-Pietrzak i wsp. 2023; Krajewska i Dziki, 2023).

Niemniej jednak, biorąc pod uwagę dane dostępne w literaturze, spodziewano się, że procentowy przyrost zawartości składników bioaktywnych (polifenoli) i aktywności

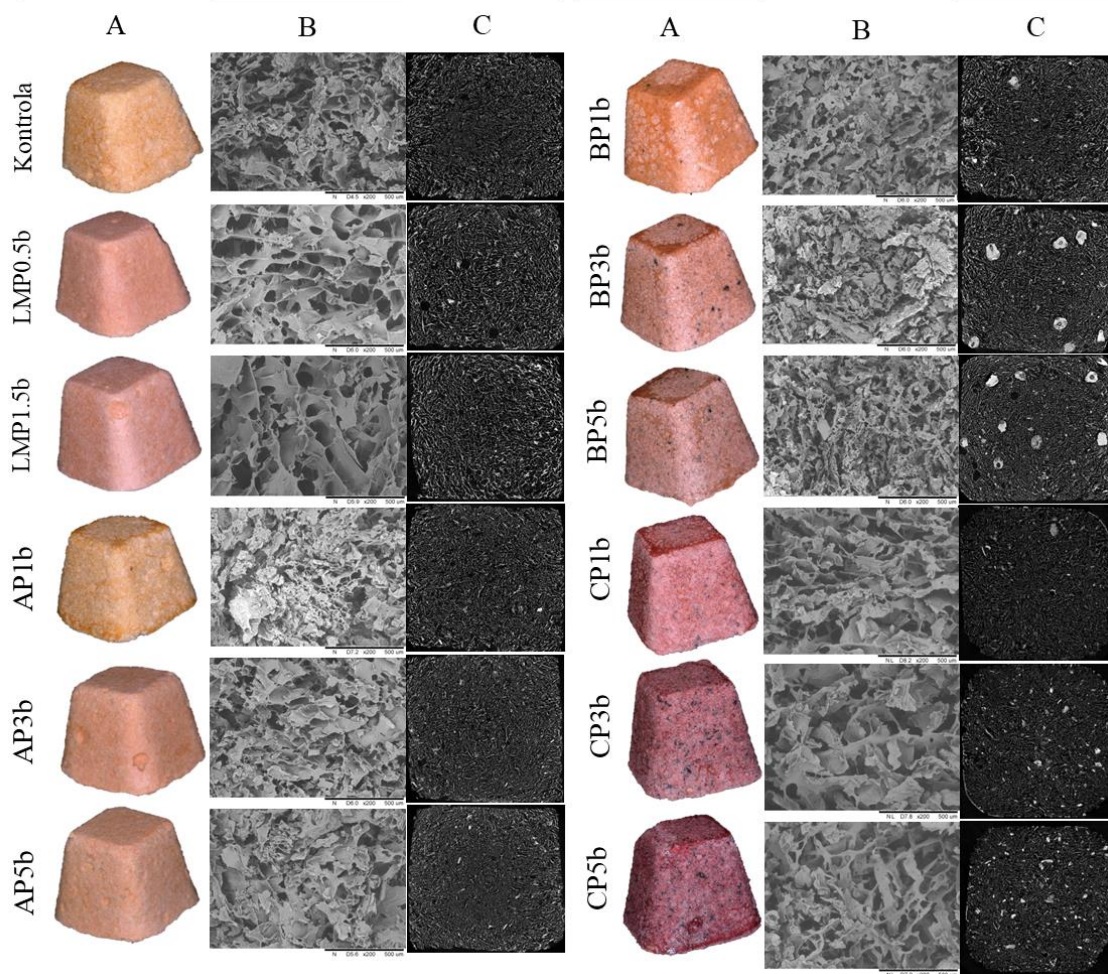
przeciwutleniającej po wprowadzeniu do receptury proszków z wyłoków owocowych będzie większy. Tymczasem otrzymane wyniki sugerują, że większość polifenoli oraz innych związków wykazujących działanie przeciwutleniające pochodziła z surowców podstawowych, z których wyprodukowano przekąski (Mazzeo i wsp. 2011; Bozkir i Tekgül, 2022). Jak podają Mazzeo i wsp. (2011), marchew jest bogata w karotenoidy i związki fenolowe, np. kwasy chlorogenowy, kawowy i ferulowy oraz ich pochodne, kwercetynę, luteolinę, kemferol i inne (Mazzeo i wsp. 2011; Bozkir i Tekgül, 2022). Ponadto w soku pomarańczowym można znaleźć również związki fenolowe, takie jak hesperydyna, narirutyna i eriocytryna (Mesquita i Monteiro, 2018), które jednak w zależności od metody koncentracji i parametrów procesu zagęszczania mogą ulegać degradacji w wyniku obróbki cieplnej (Darvishi i wsp. 2019). Wyniki dotyczące właściwości chemicznych otrzymane w niniejszej pracy były stosunkowo niskie, pomimo że otwarta i porowata struktura liofilizowanego materiału może zwiększać ekstrakcyjność bioskładników (Manzocco i wsp. 2021; Mengucci i wsp. 2022). Wskazuje to, że wyłoki przemysłowe wykorzystywane w doświadczeniu prawdopodobnie zawierały mało polifenoli, co mogło wynikać z niskiej jakości surowca lub agresywnej obróbki podczas wieloetapowego przetwarzania. Po tłoczeniu soku wyłoki zostały odwodnione metodą suszenia gorącym powietrzem, zmielone, co również spowodowało podgrzanie materiału, a następnie uwodnione w podwyższonej temperaturze i liofilizowane. Każdy etap obróbki może powodować znaczną utratę polifenoli w wyniku degradacji termicznej lub utleniania (Struck i wsp. 2016).

Na podstawie przedstawionych wyników, można stwierdzić, że wprowadzenie do receptury liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wyłoków owocowych w formie proszku spowodowało zwiększenie zawartości składników bioaktywnych, w tym polifenoli oraz antocyjanów, co w konsekwencji doprowadziło do zwiększenia aktywności przeciwutleniającej produktów, a zatem poprawy ich wartości żywieniowej.

Częścią przedstawionej do weryfikacji **hipotezy 4** było założenie, że wprowadzenie do składu liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych proszków z wyłoków owocowych oraz jonów wapnia spowoduje utworzenie wzmocnionej i trwałej struktury oraz wpłynie pozytywnie na właściwości mechaniczne materiału. Jak wspomniano powyżej, w celu zweryfikowania słuszności założenia wykonano obrazowanie mikrostruktury liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (**Rys. 7B**), przeprowadzono analizę mikrostruktury i porowatości (**Rys. 7C, Rys. 8, Tab. 7**), którą wykonano za pomocą

mikrotomografu komputerowego oraz przeprowadzono ocenę właściwości mechanicznych, opartą na analizie twardości i krzywych ściskania (**Tab. 8, Rys. 9**).

Zdjęcia mikrostruktury przekroju wybranych wariantów liofilizowanych przekąsek, zobrazowane metodą mikroskopii elektronowej (SEM) oraz tomografii komputerowej, przedstawiono na **rysunku 7**. Dodanie środków strukturotwórczych ma na celu odtworzenie struktury podobnej do szkieletu komórkowego z regularnymi i zamkniętymi porami, obecnymi w naturalnej tkance owoców i warzyw. Optymalizacja



Rys. 7. Zdjęcia wybranych wariantów liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wytworzonych z dodatkiem proszków z wycisków jabłkowych (AP), z czarnych porzeczek (BP), z aronii (CP) lub niskometylowanej pektyny jabłkowej (LMP) (**A**) oraz ich przekrojów wykonane metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (**B**) oraz tomografii komputerowej (**C**). Liczby w kodach próbek odpowiadają procentowemu udziałowi dodatku w recepturze liofilizowanych przekąsek, a małe litery a, b, c reprezentują dodatek mleczanu wapnia odpowiednio w ilości 0, 0,01 i 0,05%

takiej struktury skutkowałaby podobnym profilem tekstury i prawdopodobnym pozytywnym postrzeganiem przez potencjalnych konsumentów. Silny żel utworzony z czystych biopolimerów i poddany napowietrzaniu przypomina delikatną strukturę, składającą się z równomiernych porów otoczonych cienkimi ściankami materii stałej

(Ciurzyńska i wsp. 2018; Feng i wsp. 2024). Początkowo zakładano, że zastosowanie niskometylowanej pektyny jabłkowej jako składnika strukturotwórczego pozwoli na wytworzenie struktury przekąsek podobnej do struktury komórkowej tkanki owoców lub warzyw. Na podstawie fotografii (**Rys. 7B**) i danych dostępnych w literaturze, można stwierdzić, że ten cel nie został osiągnięty i szkielet odwodnionych żeli pektynowych charakteryzował się mniej regularnym układem ścian i porów niż liofilizowana tkanka roślinna, która nie została poddana procesowi rozdrabniania mechanicznego. Jednak struktura uzyskana z udziałem pektyny była bardziej regularna niż ta w próbkach z dodatkiem proszków z wyłoków owocowych, niezależnie od ich rodzaju. Zaobserwowano, że warianty przekąsek otrzymane z dodatkiem pektyny jabłkowej były zbudowane z cienkich ścian i większych porów, podczas gdy struktura liofilizatów zawierających w składzie proszki z wyłoków owocowych była niehomogeniczna oraz podatna na uszkodzenia mechaniczne. Szczególnie widoczne było to na zdjęciach SEM, których wykonanie wymagało przekrojenia próbki w celu uwidocznienia struktury wewnętrznej, efektem tego działania było kruszenie się wytworzonej matrycy liofilizowanych przekąsek. Ponadto na przekroju widoczne były fragmenty wyłoków lub pestek, które były rozmieszczone nieregularnie w zależności od rodzaju próbki. Obrazy przekroju poprzecznego uzyskane za pomocą tomografii komputerowej (**Rys. 7C**) pokazują także, że w centralnej części próbek szkielet strukturalny matrycy liofilizatów był bardziej zwarty, a wielkość porów mniejsza.

Analiza mikrostruktury wykazała również odmienne tendencje, występujące na skutek wprowadzenia do receptury przekąsek pektyny jabłkowej oraz proszków z wyłoków owocowych. Porowatość, czyli całkowita objętość porów, w próbce kontrolnej kształtowała się na poziomie około 60% (**Tab. 7**). Materiał strukturyzowany pektyną charakteryzował się porowatością większą o kilka punktów procentowych, natomiast dodanie proszków z wyłoków zmieniło zaobserwowaną tendencję. Wraz ze zwiększaniem udziału tych dodatków, stopniowo malała porowatość liofilizatów. Najmniej porowate okazały się przekąski z dodatkiem wyłoków z aronii, co świadczy o najsłabszym potencjale strukturotwórczym tego surowca. Wpływ dodatku jonów wapnia na porowatość przekąsek był niejednoznaczny i nieistotny statystycznie. Dodatkowo przeanalizowano wielkość pojedynczych porów, występujących w strukturze przekąsek, co zostało przedstawione na **rysunku 8**. Liofilizaty strukturyzowane pektyną wyraźnie odróżniały się od pozostałych pod względem średniej wielkości porów.

Tab. 7. Porowatość liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wytworzonych z dodatkiem proszków z wycieków jabłkowych (AP), z czarnych porzeczek (BP), z aronii (CP) lub niskometylowanej pektyny jabłkowej (LMP)

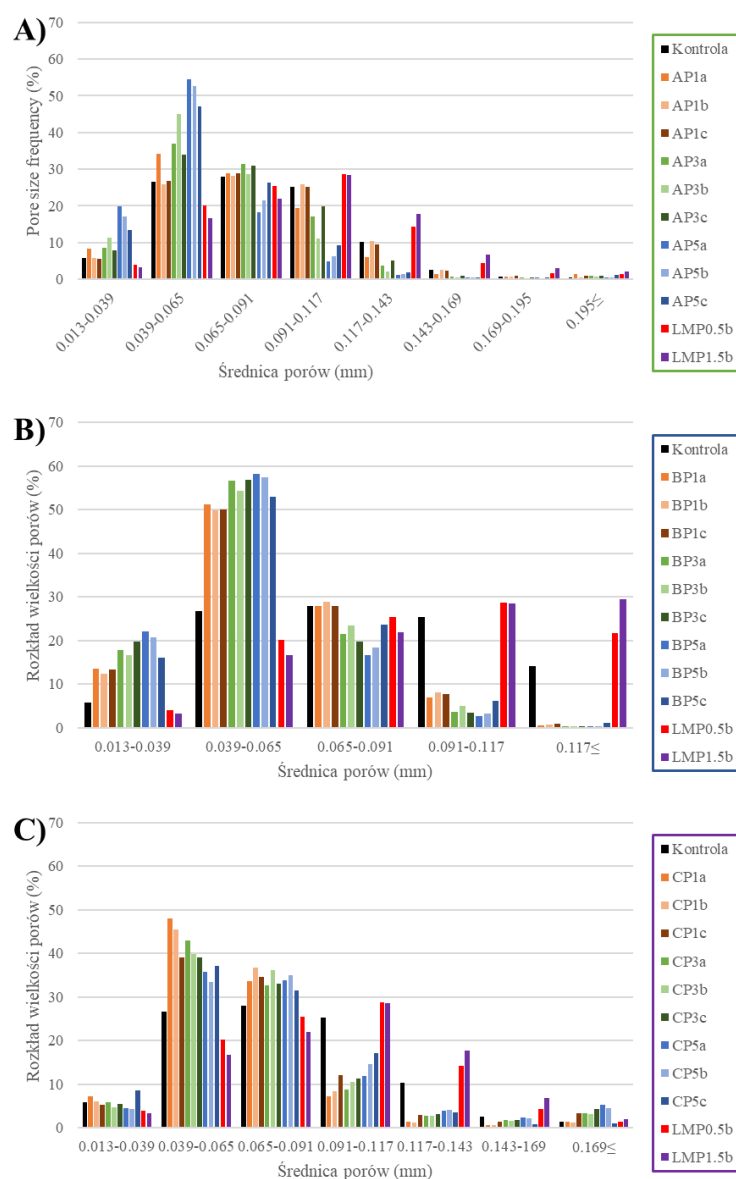
Porowatość (%)			
Material	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków jabłkowych (AP)	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków z czarnych porzeczek (BP)	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków z aronii (CP)
Kontrola	59,50±0,64 ^{abc}	59,50±0,64 ^{bc}	59,50±0,64 ^b
1a	57,21±0,77 ^{cd}	56,54±0,69 ^{cd}	52,18±0,64 ^c
1b	58,46±1,90 ^{bc}	57,35±0,44 ^d	53,59±0,41 ^c
1c	58,98±1,03 ^{abc}	56,11±1,31 ^d	53,22±1,25 ^c
3a	53,03±0,97 ^{ef}	52,76±0,43 ^e	45,25±0,37 ^e
3b	50,52±0,92 ^{fg}	52,64±1,07 ^e	48,44±0,99 ^d
3c	54,46±0,70 ^{de}	51,53±0,58 ^{ef}	45,32±0,51 ^e
5a	43,48±1,28 ⁱ	49,15±0,25 ^e	41,95±0,21 ^f
5b	45,84±1,56 ^{hi}	49,85±0,51 ^e	43,91±0,45 ^{ef}
5c	47,07±1,34 ^{gh}	50,76±0,27 ^{ef}	44,45±0,24 ^e
LMP0,5b	61,57±1,74 ^{ab}	61,57±1,74 ^{ab}	61,57±1,74 ^{ab}
LMP1,5b	62,10±0,35 ^a	62,10±0,35 ^a	62,10±0,35 ^a

* liczby w kodach próbek odpowiadają procentowemu udziałowi dodatku w recepturze liofilizowanych przekąsek, a małe litery a, b, c reprezentują dodatek mleczanu wapnia odpowiednio w ilości 0, 0,01 i 0,05%

*** w tabeli przedstawiono średnie wartości z odchyleniem standardowym. Różne litery **a-i** przy wartościach w kolumnach oznaczają różnice statystyczne pomiędzy wynikami otrzymanymi w poszczególnych wariantach.

Średnica ponad połowy z nich była większa niż 0,090 mm. W materiale kontrolnym mniej niż 40% porów posiadało takie wymiary, natomiast dodatek proszków z wycieków owocowych znacznie zmniejszył średnią wielkość porów. Hydrokoloidy, takie jak pektyny, z łatwością tworzą trójwymiarową sieć i strukturę, charakteryzującą się cienkimi ściankami i dużymi porami, którą można zachować dzięki liofilizacji, uzyskując dzięki temu produkt o porowatej i gąbczastej strukturze (Ciurzyńska i wsp. 2018; Jakubczyk i wsp. 2021; Manzocco i wsp. 2021). Ponadto, we wcześniejszych badaniach zaobserwowano, że pektyna może tworzyć liofilizowane matryce żelowe, charakteryzujące się większą porowatością i większymi porami w porównaniu z innymi hydrokoloidami, np. mieszaniną gumy ksantanowej i gumy guar (Ciurzyńska i wsp. 2017). Najmniejsze pory występowały w strukturze przekąsek z dodatkiem wycieków z owoców czarnej porzeczki, w których średnia średnica 91–97% porów była mniejsza niż 0,091 mm, przy czym im większy dodatek wycieków, tym mniejsze pory w materiale. Podobną tendencję zaobserwowano w przypadku oceny porowatości i wielkości porów liofilizowanych przekąsek z dodatkiem proszku z wycieków jabłkowych, natomiast w przekąskach z proszkiem z wycieków z aronii udział porów o tej wielkości utrzymywał

się w zakresie od 72 do 89%, jednak zaobserwowano tendencję malejącą wraz ze zwiększającą się ilością wprowadzonego dodatku w formie proszku z wytlóków.



Rys. 8. Rozkład wielkości porów w strukturze liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wytworzonych z dodatkiem proszków z wytlóków jabłkowych (AP), z czarnych porzeczek (BP), z aronii (CP) lub niskometylowanej pektyny jabłkowej (LMP). Liczby w kodach próbek odpowiadają procentowemu udziałowi dodatku w recepturze liofilizowanych przekąsek, a małe litery a, b, c reprezentują dodatek mleczanu wapnia odpowiednio w ilości 0, 0,01 i 0,05%.

Proces powstawania porów w produkcie liofilizowanym jest determinowany przez wzrost kryształów lodu, który zależy od składu materiału oraz parametrów procesu. Wprowadzenie dodatkowych cząstek stałych pochłaniających wodę mogło zredukować ilość i dostępność wody ulegającej zamrożeniu, a następnie sublimacji, co mogło przyczynić się do tworzenia mniejszych kryształków lodu przed liofilizacją (Arsiccio i wsp. 2019). Pektyna tworzy matrycę hydrożelową o wysokiej elastyczności, dlatego

formowanie kryształów w wyniku zamrażania nie powoduje znaczących uszkodzeń struktury sieci hydrokoloidowej, a zatem struktura komórkowa może zostać zachowana po suszeniu sublimacyjnym (Feng i wsp. 2022). Mniejsza porowatość przekąsek świadczy o tym, że składniki zawarte w wyłokach owocowych, które charakteryzują się właściwościami żelującymi (Uruakpa, 2012; Eblaghi i wsp. 2021; Schmid i wsp. 2021; Reißner i wsp. 2022), nie wykazały silnych zdolności do tworzenia trójwymiarowej sieci w warunkach procesowych stosowanych podczas technologicznego przygotowania materiału badawczego, co wyjaśnia nieregularną strukturę liofilizatów z dodatkiem proszków z wyłoków owocowych. Jeżeli zaś chodzi o poprawę właściwości strukturotwórczych proszków z wyłoków owocowych, słuszną drogą wydaje się być modyfikacja parametrów obróbki hydrotermicznej w celu intensyfikacji procesu żelowania obecnych w nich składników, w tym pektyny (Eblaghi i wsp. 2021). Ponadto, potencjał strukturotwórczy proszków z wyłoków owocowych mógł nie być w pełni wykorzystany z uwagi na ograniczoną dostępność włókien i pektyn zamkniętych w cząstkach proszku. Trudno jest wyjaśnić mechanizm między obserwowanymi zmianami a różnicami w mikrostrukturze próbek, gdyż dostępność danych o mechanizmach odpowiadających za właściwości żelujące wyłoków owocowych, zwłaszcza w liofilizowanych produktach spożywczych, jest bardzo ograniczona. Wskazuje to na niszę w tej dziedzinie i pokazuje potrzebę szczegółowego zbadania podstawowych właściwości strukturo- i teksturotwórczych suszonych wyłoków owocowych, co, podobnie jak już wskazano w przypadku podsumowania dotyczącego weryfikacji hipotezy 3, kierkuje i wzmacnia tezę o konieczności optymalizacji parametrów technologicznych, procesowych i strukturalnych składników surowców w aspekcie kreowania kierunków badań i rozwoju nowych produktów spożywczych w formie przekąsek.

Właściwości mechaniczne liofilizowanych przekąsek zbadano, wykonując test ściskania, którego wyniki zostały przedstawione jako twardość, czyli maksymalna siła zarejestrowana podczas deformacji próbek (**Tab. 8**), oraz krzywe ściskania, obrazujące przebieg deformacji w czasie (**Rys. 9**). Zgodnie z oczekiwaniami, najmniejszą twardością charakteryzowała się próbka kontrolna (**Tab. 8**). Zastosowanie niskometylowanej pektyny jabłkowej oraz proszków z wyłoków owocowych istotnie zmieniło właściwości tekstury przekąsek, zwiększając ich twardość oraz zachowanie materiału podczas deformacji na skutek przyłożonej siły (**Rys. 9**). Uzyskany efekt zależał od rodzaju zastosowanego dodatku oraz jego stężenia.

Pektyna jabłkowa jako dodatek do przekąsek wykazała znacznie większy potencjał teksturotwórczy niż badane rodzaje proszków z wycieków owocowych. Pomimo stosunkowo niewielkiej ilości pektyny (0,5 i 1,5%), wprowadzonej do składu liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych, jej obecność sprawiła, że twardość przekąsek zwiększyła się odpowiednio ponad trzy- i sześciokrotnie w stosunku do próbek kontrolnej (**Tab. 8**). Efekt podobny do tego uzyskanego po zastosowaniu mniejszego stężenia pektyny (0,5%) był możliwy do osiągnięcia po dodaniu 3% proszku z wycieków jabłkowych połączonych z jonami wapnia w ilości 0,01%. Zwiększenie udziału proszku z wycieków jabłkowych do 5% skutkowało istotnym zwiększeniem twardości przekąsek, jednak nawet po dodaniu takiej ilości, twardość próbek była znacznie mniejsza niż przekąsek z dodatkiem 1,5% pektyny. Analiza wyników produktów z dodatkiem proszków z wycieków owocowych z aronii oraz czarnych porzeczek potwierdziła, że pod względem twardości, zastosowanie nawet dziesięciokrotnie większej ilości proszku z wycieków nie wzmocniło właściwości mechanicznych matrycy liofilizowanych przekąsek w stopniu porównywalnym do tych właściwości uzyskanych dla produktów z dodatkiem niskometylowanej pektyny jabłkowej.

Tab. 8. Twardość liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wytworzonych z dodatkiem wycieków jabłkowych (AP), wycieków z czarnych porzeczek (BP), wycieków z aronii (CP) lub niskometylowanej pektyny jabłkowej (LMP)

Material	Twardość (N)		
	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków jabłkowych (AP)	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków z czarnych porzeczek (BP)	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków z aronii (CP)
Kontrola	21,98±0,95 ^h	21,98±0,95 ^h	21,98±0,95 ^g
1a	29,85±1,44 ^g	36,75±3,10 ^g	38,08±3,32 ^{cde}
1b	37,25±1,44 ^f	38,28±2,45 ^g	37,93±2,49 ^{de}
1c	33,70±1,66 ^{fg}	38,47±1,41 ^g	32,61±1,67 ^f
3a	65,71±3,82 ^e	44,75±2,68 ^f	37,42±3,29 ^{de}
3b	74,19±4,17 ^d	46,41±2,27 ^{ef}	36,06±1,50 ^{ef}
3c	67,90±2,29 ^e	46,26±2,27 ^{ef}	39,42±0,98 ^{cde}
5a	88,44±6,27 ^c	49,39±2,79 ^{de}	40,48±2,08 ^{cd}
5b	101,18±4,23 ^b	53,23±3,10 ^d	42,55±1,47 ^{cde}
5c	101,58±4,94 ^b	59,42±3,25 ^{cd}	39,87±1,47 ^{cde}
LMP0,5b	79,60±2,80 ^d	79,60±2,80 ^b	79,60±2,80 ^b
LMP1,5b	142,99±5,14 ^a	142,99±5,14 ^a	142,99±5,14 ^a

* liczby w kodach próbek odpowiadają procentowemu udziałowi dodatku w recepturze liofilizowanych przekąsek, a małe litery a, b, c reprezentują dodatek mleczanu wapnia odpowiednio w ilości 0, 0,01 i 0,05%

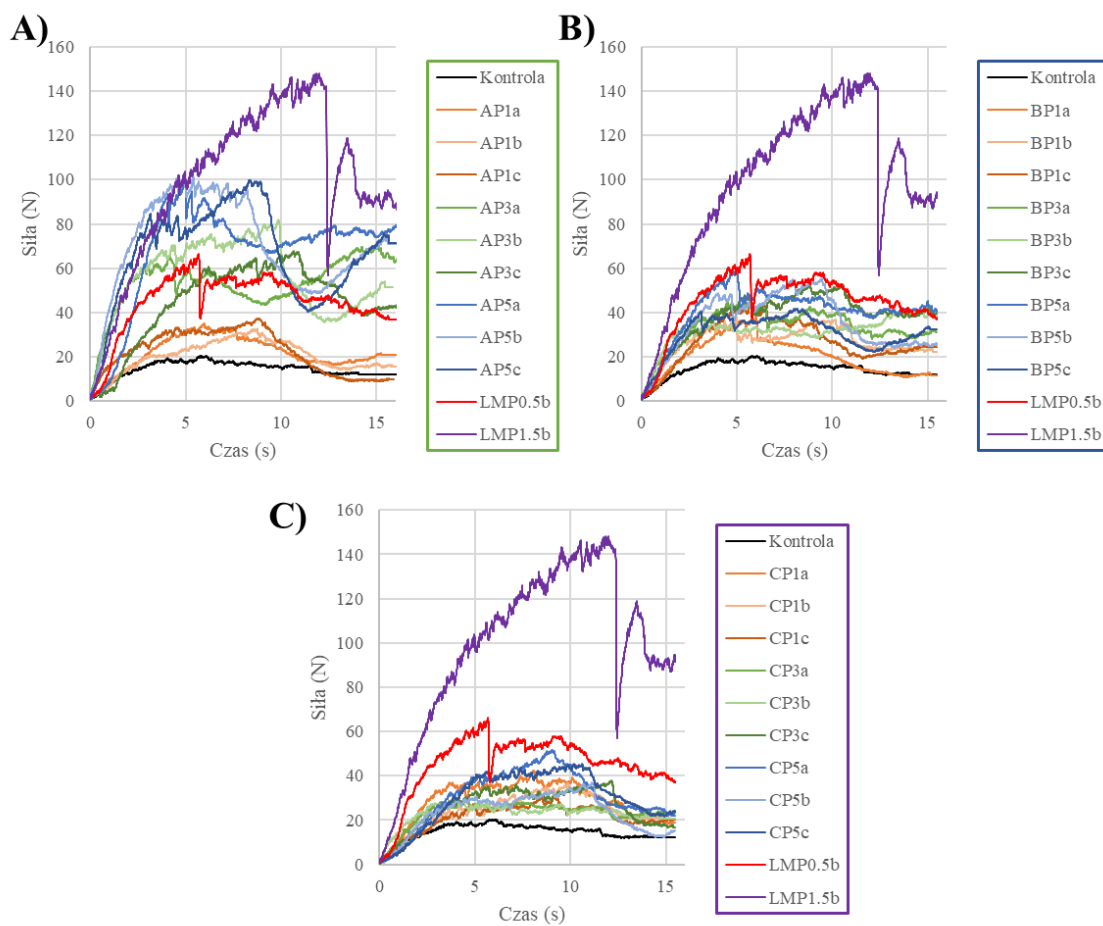
** w tabeli przedstawiono średnie wartości z odchyleniem standardowym. Różne litery **a-i** przy wartościach w kolumnach oznaczają różnice statystyczne pomiędzy wynikami otrzymanymi w poszczególnych wariantach.

Zaobserwowano, również że wprowadzenie do receptury proszków z wycieków owocowych spowodowało zwiększanie twardości przekasek, a zmiana była tym większa im większy był dodatek składnika. Wyjątek stanowiły przekaski z dodatkiem proszku z wycieków z aronii, które były twardsze niż próbka kontrolna, ale nie wykazano statystycznie istotnych różnic twardości pomiędzy wariantami zawierającymi 1, 3 lub 5% dodatku proszków z wycieków.

W badaniach sprawdzono również czy dodatek jonów wapnia w postaci mleczanu wapnia może poprawić właściwości teksturotwórcze proszków z wycieków owocowych. Słuszność założenia, że dodatek jonów wapnia poprawi zdolność tworzenia mocnej i twardej struktury weryfikowano na podstawie twardości materiału badanego. Biorąc pod uwagę wyniki otrzymane w przypadku przekasek z dodatkiem wycieków jabłkowych oraz wycieków z czarnych porzeczek, widoczne były tendencje, sugerujące, że obecność mleczanu wapnia spowodowała zwiększenie twardości otrzymanych produktów, a zatem korzystnie wpłynęła na zdolność proszków z wycieków do tworzenia mocniejszej struktury matrycy liofilizatów. W przypadku proszku z wycieków z aronii nie zaobserwowano żadnych tendencji, związanych z występowaniem interakcji pomiędzy wyciekami i dodanym mleczanem wapnia. Jednak, pomimo zaobserwowanych tendencji dla pozostałych dodatków z wycieków, w większości przypadków analiza statystyczna nie potwierdziła istotności różnic występujących pomiędzy wariantami, zawierającymi takie same ilości proszków z wycieków oraz różne stężenia mleczanu wapnia. Jony wapnia wspomagają żelowanie pektyn, ale proces ten zależy również od składu chemicznego matrycy, w tym obecności cukrów i kwasów, oraz pH układu (Capel i wsp. 2006; Kastner i wsp. 2012; Byun i wsp. 2020), które determinują właściwości reologiczne oraz przydatność technologiczną dodatków do żywności. Na podstawie zaobserwowanych tendencji można stwierdzić, że potencjalne interakcje pomiędzy proszkami z wycieków owocowych oraz jonami wapnia były korzystne w aspekcie cech tekstury liofilizowanych przekasek, jednak zwiększanie stężenia mleczanu wapnia nie wpływało na poprawę uzyskanych efektów, dlatego też stosowanie mniejszego z badanych stężeń (0,01%) wydaje się być wystarczające.

Poza twardością przeanalizowano także wpływ składu liofilizowanych przekasek na przebieg krzywych ściskania. Widoczne na krzywych piki, przedstawiające okresowe zmniejszanie siły w czasie ściskania, reprezentują pęknięcia struktury matrycy materiału pod wpływem przyłożonej siły. Analiza uzyskanych przebiegów krzywych ściskania wykazała zarówno różnice w zachowaniu materiału badawczego, wynikające z rodzaju

zastosowanego dodatku, który potencjalnie wpłynął na teksturę produktów liofilizowanych (**Rys. 9, Tab. 8**), jak i ilości tego dodatku w recepturze, co wykazano podczas omawiania parametru twardości ocenianych przekąsek (**Tab. 8**). Obecność małych i nieregularnie rozmieszczonych porów (**Rys. 7 i Rys. 8**) w słabej strukturze matrycy przekąsek z wyłokami owocowymi powodowała bardziej płaski i gładszy przebieg krzywych ściskania (**Rys. 9**), natomiast bardziej porowata i twardsza struktura wariantów z pektyną spowodowała, że kształt krzywych był bardzo nieregularny (**Rys. 9** - krzywe czerwona i fioletowa). Zaobserwowano na nich także obecność głębokich pików, odpowiadających pękaniu próbki, któremu towarzyszył głośny dźwięk słyszany podczas wykonywania testu. Podobne, lecz mniej gwałtowne zdarzenia występowały podczas ściskania niektórych próbek z dodatkiem proszku z wyłoków jabłkowych oraz z czarnych porzeczek w ilości 5%, jednak obserwacje te nie występowały w każdym wykonanym powtórzeniu, a różnice pomiędzy siłą zaobserwowaną na początku i końcu danego piku były znacznie mniejsze niż w wariantach z dodatkiem pektyny. W czasie badań zauważono również inny charakter odkształcania się próbek strukturyzowanych pektyną oraz tych wytworzonych z dodatkiem proszków z wyłoków owocowych. Jak wspomniano wcześniej, w strukturze otrzymanej z wykorzystaniem pektyny występowały gwałtowne pęknięcia, podczas gdy próbki z proszkami z wyłoków ulegały zgnieceniu, ale nie pękały. Krzywe ściskania dla przekąsek z dodatkiem proszków z wyłoków owocowych przebiegały w zakresach mniejszych wartości siły, co ponownie potwierdza mniejszą twardość materiału, były także mniej zróżnicowane w przebiegu, co świadczy o mniejszej chrupkości i kruchości próbek. Należy przypuszczać, że zaobserwowane różnice są wynikiem wpływu reformulacji składu surowcowego na właściwości mechaniczne otrzymanych i badanych liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych, a co za tym idzie potwierdzają potencjał strukturo- i teksturotwórczy wprowadzanych składników.



Rys. 9. Krzywe ściskania liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wytworzonych z dodatkiem proszków z **A)** wycieków jabłkowych (AP), **B)** z czarnych porzeczek (BP), **C)** z aronii (CP) lub niskometylowanej pektyny jabłkowej (LMP). Liczby w kodach próbek odpowiadają procentowemu udziałowi dodatku w recepturze liofilizowanych przekąsek, a małe litery a, b, c reprezentują dodatek mleczaanu wapnia odpowiednio w ilości 0, 0,01 i 0,05%.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że potencjał teksturotwórczy był determinowany rodzajem wprowadzanych do produktów wycieków owocowych w postaci proszków, przy czym najlepsze rezultaty pod względem analizowanych właściwości mechanicznych uzyskano w przypadku wprowadzenia do składu recepturowego przekąsek proszku z wycieków jabłkowych, a najgorsze – proszku z wycieków z aronii. Najprawdopodobniej wynika to z faktu, że wycieki jabłkowe oraz z czarnych porzeczek, a w konsekwencji uzyskane z nich proszki, mogą zawierać stosunkowo dużo pektyn (Kosmala i wsp. 2010; Antonic i wsp. 2020), podczas gdy owoce oraz wycieki z aronii, jak również proszki z wycieków, charakteryzują się niższym poziomem tych związków (Vagiri i Jensen, 2017). Z drugiej strony, inne badania przeprowadzone przez Schmid i wsp. (2021) wykazały, że wycieki z aronii poddane procesowi ekstruzji mogą tworzyć stabilną trójwymiarową strukturę, choć były mniej

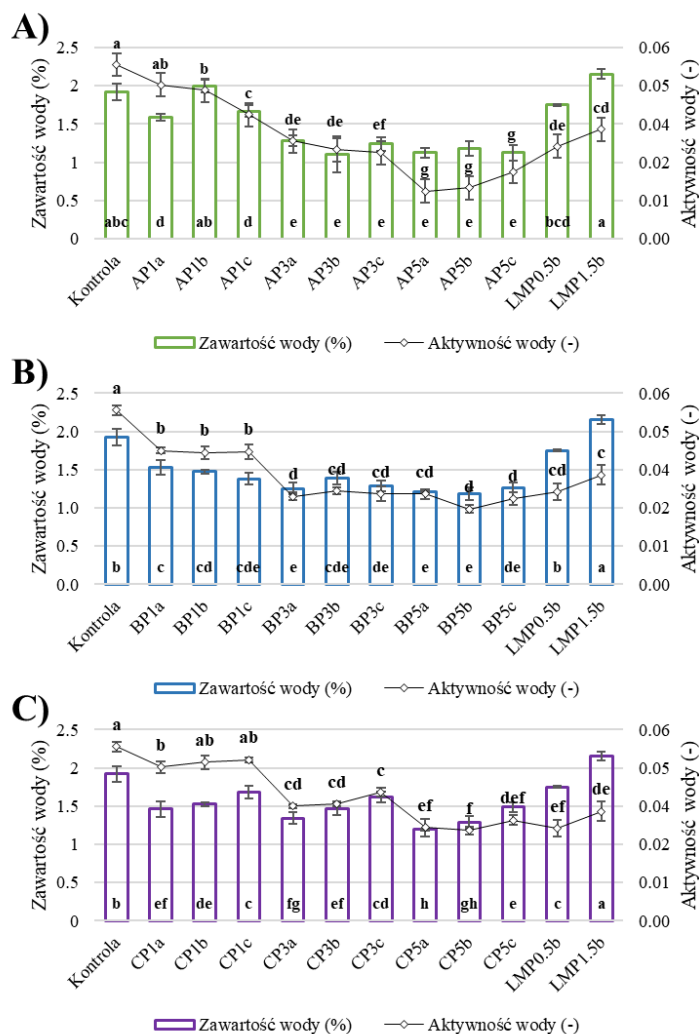
twarde niż materiał konwencjonalny wytworzony w tych badaniach na bazie skrobi. W związku z powyższym nie tylko obecność pektyny w proszkach z wyłoków owocowych, ale także innych składników o właściwościach żelujących i zdolności do tworzenia trójwymiarowej struktury, takich jak błonnik, skrobia, białka i cukry, mogły wpłynąć na charakterystykę właściwości mechanicznych liofilizowanych przekąsek. Badania liofilizowanych żeli owocowych wytworzonych przez połączenie alginianu sodu oraz wyłoków jabłkowych, przeprowadzone przez Ciurzyńską i wsp. (2022) wykazały, że zwiększenie zawartości wyłoków miało większy wpływ na teksturę produktów niż zwiększenie zawartości hydrokoloidu. W czasie wspomnianych badań zaobserwowano również, że twardsze liofilizaty były gorzej oceniane przez panelistów oceny sensorycznej, zatem nadmierna ilość wyłoków w składzie przekąsek może mieć negatywny wpływ na ogólną percepcję produktów (Ciurzyńska i wsp. 2022). Jak sugerują Feng i wsp. (2022), właściwości mechaniczne i charakterystyka tekstury materiału są ściśle połączone z cechami jego mikrostruktury. Im bardziej nieregularnie rozmieszczone są pory w strukturze, tym bardziej burzliwy charakter ma odkształcanie takiego materiału. Efekt uzyskiwany poprzez wprowadzenie do składu żywności wyłoków owocowych na zmiany właściwości teksturalnych jest determinowany także technologią wykorzystywaną do wytworzenia danego produktu spożywczego. Dla wskazania niejednoznaczności uzyskiwanych rezultatów badań należy wskazać na wyniki Jannati i wsp. (2018). Zaobserwowali oni, że rezultatem wprowadzenia i zwiększania ilości wyłoków w składzie produktów piekarskich, było zmniejszanie twardości produktów. Autorzy wskazali, że zjawisko to wynikało z intensywnej adsorpcji wody przez włókna zawarte w wyłokach (Jannati i wsp. 2018). Jeżeli to stwierdzenie ma zastosowanie również w przypadku liofilizowanych przekąsek, to nawet jeśli zwiększenie zawartości wyłoków powodowało redukcję higroskopijności, mogą one łatwiej mięknąć w wyniku kontaktu z wilgotnym środowiskiem zewnętrznym. Ponadto, tekstura ma kluczowe znaczenie w produktach z kategorii przekąsek. W przypadku materiałów o niskiej wilgotności właściwości tekstury silnie zależą od zawartości wody, dlatego utrzymanie jej na niskim poziomie zapewnia chrupkość i kruchość, które mogą zostać utracone w wyniku intensywnej adsorpcji wilgoci z otaczającego środowiska (Mazumder i wsp. 2007). Ponownie, podkreśla to znaczenie stosowania wysokobarierowych materiałów opakowaniowych do tego typu produktów w celu zmniejszenia wpływu czynników zewnętrznych obniżających jakość liofilizatów podczas przechowywania.

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że proszki z wyłoków owocowych wykazują potencjał strukturotwórczy i kształtują cechy tekstury liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych, opracowanych w ramach niniejszej pracy. Jednak ich potencjał w tym zakresie jest znacznie mniejszy niż konwencjonalnych dodatków hydrokoloidowych, jak niskometylowana pektyna jabłkowa. Dodatek proszków z wyłoków owocowych spowodował wzmocnienie struktury przy jednoczesnym zmniejszeniu jej porowatości, podczas gdy pektyna pozwoliła na znaczne zwiększenie twardości produktów oraz zwiększenie ich porowatości. Jeżeli zaś chodzi o efekt wzbogacenia receptury w jony wapnia, zaobserwowano jedynie tendencje, pozwalające potwierdzić ich skuteczność w roli substancji wspierającej mechanizmy tworzenia struktury przez wyłoki owocowe, jednak nie zostały one jednoznacznie potwierdzone przez analizę statystyczną. Na tej podstawie można jednak stwierdzić, że pierwsza część **hipotezy 4** niniejszej pracy została zweryfikowana pozytywnie.

Druga część **hipotezy 4** zakładała, że dodatek proszków z wyłoków owocowych, prowadzący do zmian w strukturze liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych, w konsekwencji spowoduje także zwiększenie stabilności tych produktów poprzez zmniejszenie zdolności pochłaniania pary wodnej z otoczenia. Założenie to weryfikowano na podstawie badania aktywności i zawartości wody (**Rys. 10**) oraz właściwości higroskopijnych (**Tab. 9**).

Na **rysunku 10** przedstawiono zależności pomiędzy zawartością i aktywnością wody liofilizowanych przekąsek z dodatkiem proszku z wyłoków owocowych oraz pektyny. Wykresy słupkowe prezentują zawartość wody, natomiast wykresy liniowe wyniki aktywności wody (**Rys. 10**). Próbką kontrolną (**Rys. 10**) charakteryzowała się wilgotnością na poziomie około 1,92%, co odpowiada zawartości wody na poziomie około 0,02 g wody/g s.s. Jednocześnie materiał cechował się aktywnością wody około 0,055. Zgodnie z oczekiwaniami, opracowane przekąski z dodatkiem wyłoków owocowych lub pektyny charakteryzowały się mniejszymi wartościami tych parametrów, a zatem reformulacja składu i wprowadzenie do receptury zarówno pektyny, jak i proszków z wyłoków owocowych pozwoliło na osiągnięcie oczekiwanych efektów. Zastosowanie niskometylowanej pektyny jabłkowej w ilości 0,5% spowodowało zmniejszenie średniej zawartości wody do 1,75%, natomiast próbka otrzymana z dodatkiem 1,5% hydrokoloidu zawierała 2,15% wody. Pomimo, że wilgotność pozostała na poziomie zbliżonym do próbki kontrolnej, zaobserwowano istotne

zmniejszenie aktywności wody do wartości 0,029 i 0,034 w przypadku przekąsek z dodatkiem odpowiednio 0,5 i 1,5% pektyny jabłkowej.



Rys. 10. Wyniki zawartości i aktywności wody w liofilizowanych przekąskach owocowo-warzywnych wytworzonych z dodatkiem proszków z: **A)** wyłoków jabłkowych (AP), **B)** wyłoków z czarnej porzeczki (BP), **C)** wyłoków z aronii (CP) lub niskometylowanej pektyny jabłkowej (LMP); małe litery a, b, c w kodach próbek reprezentują dodatek mleczanu wapnia odpowiednio w ilości 0, 0,01 i 0,05%. Wykresy przedstawiają średnie wartości z odchyleniem standardowym. Różne litery a-g dla punktów lub słupków oznaczają różnice statystyczne pomiędzy wynikami otrzymanymi w poszczególnych wariantach.

W efekcie reformulacji składu liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych i wprowadzenia do receptury proszków z suszonymi wyłokami owocowymi nastąpiło istotne zmniejszenie zawartości oraz aktywności wody w produktach. Zawartość wody w przekąskach z dodatkiem wyłoków jabłkowych zawierała się w przedziale 1,11–2,00% (**Rys. 10A**). Wartości tego parametru w przypadku próbek z proszkami z wyłoków z owoców czarnej porzeczki i aronii były zawarte odpowiednio w przedziałach 1,19–1,53 oraz 1,20–1,68%. Zakresy, w których znajdowały się wyniki aktywności wody przekąsek z dodatkiem proszków z wyłoków to: dla jabłkowych 0,015–0,048,

z czarnych porzeczek 0,024–0,042 oraz z aronii 0,051–0,028. Otrzymane wyniki mogły być skutkiem mniejszej ilości wody dodawanej do przekąsek, gdyż zwiększanie ilości dodatków odbywało się kosztem procentowego udziału wody. Zaobserwowano, że przekąski z dodatkiem proszku z wyłoków jabłkowych oraz porzeczkowych w ilości 3 i 5% nie różniły się istotnie pod względem zawartości wody, podczas gdy w przypadku dodatku proszku z wyłoków z aronii zawartość wody malała stopniowo wraz ze zwiększaniem jego udziału w recepturze przekąsek. Tendencje, które wystąpiły w przypadku badania zawartości wody nie korespondowały w pełni z tymi, które zauważono podczas analizy aktywności wody. Po dodaniu proszku z wyłoków jabłkowych (**Rys. 10A**) obserwowano stopniowe zmniejszanie aktywności wody wraz ze zwiększaniem ilości dodatku. W przypadku proszku z wyłoków porzeczkowych (**Rys. 10B**), analiza aktywności wody wykazała, że trend związany z poziomem tego parametru był tożsamy z obserwowanym wśród wyników zawartości wody, czyli dodatek proszku z wyłoków spowodował zmniejszenie wartości obydwu parametrów. Wyniki wartości parametrów zarejestrowane w przypadku próbek z dodatkiem proszku z wyłoków z aronii (**Rys. 10C**) uwiaryściły ich wzajemną zależność, co oznacza, że wraz ze zwiększaniem dodatku proszku z wyłoków stopniowo zmniejszały się zarówno zawartość, jak i aktywność wody. Jednak w tym przypadku zaobserwowano również nieistotną statystycznie, lecz wyraźną tendencję, że wartości te zwiększały się wraz ze zwiększaniem ilości dodanego mleczanu wapnia. Mogłoby to wskazywać na poprawę właściwości żelujących i silniejsze oddziaływanie między cząsteczkami wody i pektyny obecnymi w składzie przekąsek po wprowadzeniu jonów wapnia, a tym samym trudniejszą i ograniczoną dyfuzyjność wody podczas suszenia (Fraeye i wsp. 2010). Jednak podobnych tendencji nie zaobserwowano w przypadku badanych przekąsek z dodatkiem proszku z wyłoków jabłkowych oraz z owoców czarnej porzeczki.

Otrzymane wyniki oraz wskazane tendencje potwierdzają opublikowane wcześniej wyniki, dotyczące liofilizowanych przekąsek owocowych lub warzywnych strukturyzowanych dodatkiem hydrokoloidów i/lub suszonych wyłoków owocowych (Ciurzyńska i wsp. 2015, 2020, 2022; Karwacka i wsp. 2021, 2022). Zarówno Ciurzyńska i wsp. (2015, 2020, 2022), jak i Karwacka i wsp. (2021, 2022) w prezentowanych pracach stwierdziły, że większa zawartość wody przy jednoczesnej jej małej aktywności może wynikać z różnego mechanizmu wiązania wody w strukturach opartych na matrycy budowanej na bazie pektyny i jej zdolności do wiązania wody w porównaniu do matrycy tworzonej na bazie proszków z wyłoków owocowych. Jak podaje literatura, włókna

polisacharydowe, w tym pektyna, celuloza i ligniny zawarte w proszku z wyłoków jabłkowych potencjalnie mogą pochłoniąć nawet ponad 5 g wody/g proszku (Sharma i wsp. 2017), z kolei zdolność zatrzymywania wody przez proszek z wyłoków z czarnych porzeczek jest ponad 10 razy mniejsza niż pektyny (Reißner i wsp. 2019), podczas gdy nawet 1% niskometylowanej pektyny jabłkowej wystarcza do stworzenia stabilnego żelu, który jest w stanie utrzymać ponad 95% cieczy. Podczas tworzenia żelu łańcuchy pektyn tworzą wiązania jonowe, unieruchamiające cząsteczki wody w przestrzeniach między nimi, co sprawia, że woda jest trudniejsza do usunięcia (Sharma i wsp. 2017; Wan i wsp. 2021). Podobne zależności związane z dodatkiem wyłoków owocowych i hydrokoloidów do liofilizatów zostały zaobserwowane przez Ciurzyńska i wsp. (2022), którzy badali połączenie alginianu sodu i sproszkowanych wyłoków jabłkowych lub aroniowych w liofilizowanych przekąskach otrzymanych z przecieru jabłkowego. W pracy zaobserwowano, że zwiększenie ilości hydrokoloidu skutkowało większą zawartością i aktywnością wody w materiale, a zwiększenie dodatku proszku z wyłoków miało tendencję do redukcji wartości tych parametrów. Autorzy powiązali to z zaobserwowaną różnicą w strukturze przekąsek, która okazała się krucha i zbudowana z cienkich ścianek w próbkach z mniejszą ilością wspomnianych dodatków w składzie.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa żywności krytyczna aktywność wody, zapewniająca bezpieczeństwo żywności wynosi 0,6 (Ijabadeniyi i Pillay, 2017), co oznacza, że wyniki uzyskane w przypadku badanych przekąsek były około dziesięciokrotnie mniejsze. Jednak woda obecna w materiale odpowiada również za występowanie niekorzystnych zmian fizycznych, takich jak przemiana szklista, która znacznie zmniejsza jakość żywności liofilizowanej (Silva-Espinoza i wsp. 2020b). Odwodnione produkty są często w stanie amorficznym, który objawia się twardą i chrupiącą teksturą, chociaż suszone produkty pojawiające się na półkach sklepowych dowodzą, że wiele suszonych owoców i warzyw jest odwodnionych do punktu zawartości wody, w którym jej aktywność jest zmniejszona do poziomu zapewniającego bezpieczeństwo, ale nie stabilność fizyczną. Przekroczenie tej granicy zawartości wody powoduje obniżenie temperatury zeszklenia, w wyniku czego produkt spożywczy staje się gumowaty. W przypadku produktów liofilizowanych zjawisko to wpływa na ogólną jakość, ze szczególnym uwzględnieniem takich cech jak tekstura, mikrostruktura oraz atrybuty sensoryczne, przez co liofilizaty tracą właściwości, które odróżniają te produkty od innych o obniżonej zawartości wody (Blahovec, 2007; Moraga i wsp. 2011). Z tego powodu ważne jest również zbadanie zdolności do wchłaniania wilgoci z otoczenia, co

na przykład wskazuje na to, jak szybko należy spożyć produkt, aby uniknąć niekorzystnych zmian jego właściwości fizykochemicznych po otwarciu opakowania.

Do tego celu posłużyła analiza higroskopijności, czyli cechy pomagającej w określaniu stabilności suszonej żywności. Wskazuje ona zdolność materiału do pochłaniania wilgoci z otoczenia. Wyniki wyrażone jako ilość wody zaadsorbowanej podczas 72-godzinnej ekspozycji w środowisku o wilgotności względnej równej 75% przedstawiono w **tabeli 9**. Materiały charakteryzujące się dużą higroskopijnością są z reguły mniej stabilne i mniej trwałe. Dlatego też produkty spożywcze o takich cechach wymagają stosowania opakowań o dużej barierowości, które zapewniają optymalne warunki przechowywania, dzięki czemu okres przydatności do spożycia jest wydłużony. Badanie właściwości higroskopijnych było przeprowadzone, aby zweryfikować zachowanie opracowanych przekąsek „po otwarciu opakowania”.

Tab. 9. Higroskopijność liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wytworzonych z dodatkiem proszków z wycieków jabłkowych (AP), z czarnych porzeczek (BP), z aronii (CP) lub niskometylowanej pektyny jabłkowej (LMP)

Higroskopijność (g wody/100 g s.s.)			
Material	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków jabłkowych (AP)	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków z czarnych porzeczek (BP)	Przekąski z dodatkiem proszku z wycieków z aronii (CP)
Kontrola	29,15±0,12 ^a	29,15±0,12 ^a	29,15±0,12 ^a
1a	28,52±0,15 ^{ab}	27,31±0,12 ^b	26,26±1,21 ^{bc}
1b	28,74±0,72 ^{ab}	27,61±0,34 ^b	27,54±0,11 ^b
1c	28,36±0,17 ^{ab}	27,04±0,41 ^b	27,01±0,15 ^b
3a	27,10±0,21 ^{cd}	24,89±0,19 ^c	23,98±0,05 ^{def}
3b	26,27±0,25 ^{de}	24,81±0,16 ^c	24,64±0,25 ^{de}
3c	25,61±0,34 ^{ef}	25,45±0,37 ^c	24,96±0,14 ^{cd}
5a	24,58±0,16 ^f	22,90±0,40 ^d	22,23±0,17 ^g
5b	24,69±0,26 ^f	22,76±0,57 ^d	23,47±0,27 ^{efg}
5c	24,81±0,08 ^f	22,41±0,16 ^d	23,14±0,22 ^{fg}
LMP0,5b	27,66±1,10 ^{bc}	27,66±1,10 ^b	27,66±1,10 ^b
LMP1,5b	27,56±0,26 ^{bc}	27,56±0,26 ^b	27,56±0,26 ^b

* liczby w kodach próbek odpowiadają procentowemu udziałowi dodatku w recepturze liofilizowanych przekąsek, a małe litery a, b, c reprezentują dodatek mleczanu wapnia odpowiednio w ilości 0, 0,01 i 0,05%

** w tabeli przedstawiono średnie wartości z odchyleniem standardowym. Różne litery **a-f** przy wartościach w kolumnach oznaczają różnice statystyczne pomiędzy wynikami otrzymanymi w poszczególnych wariantach.

Zawartość wody w próbce kontrolnej, w której nie zastosowano żadnych dodatków, po inkubacji w środowisku o wysokiej wilgotności wynosiła ~29 g wody/100 g s.s. (**Tab. 9**). W wyniku zastosowania w przekąskach liofilizowanych pektyny jako substancji strukturotwórczej, higroskopijność została zredukowana średnio

o 5% bez istotnego wpływu ilości hydrokoloidu na wartość parametru. Zastąpienie pektyny proszkami z wycieków owocowych także powodowało zmniejszanie właściwości higroskopijnych, przy czym wraz ze stopniowym zwiększaniem dodatku proszku z wycieków, ilość zaadsorbowanej wody zmniejszała się. Najlepszy efekt, czyli zmniejszenie ilości pochłoniętej wilgoci średnio o 15, 22 oraz 21% w stosunku do próbki kontrolnej, uzyskano w wariantach z największym udziałem odpowiednio proszku z wycieków jabłkowych, z czarnych porzeczek oraz z aronii.

Wysoka zdolność adsorpcji pary wodnej, wyrażona ilością zaadsorbowanej wody w g wody/100 g suchej substancji, jest typowa dla żywności liofilizowanej, co jest przede wszystkim konsekwencją dużej różnicy pomiędzy zawartością wody w materiale i wilgotnością otaczającej go atmosfery, dzięki czemu wnikanie i migracja pary wodnej do wnętrza porowatej struktury tego typu produktów jest bardzo intensywna. Im bardziej porowata i otwarta struktura, tym intensywniejsza wymiana masy (Nowak i Jakubczyk, 2020), co może być cechą pozytywną, biorąc pod uwagę właściwości rekonstruktoryjne, ale negatywną z punktu widzenia stabilności żywności. Ponadto, higroskopijność jest determinowana także przez skład chemiczny materiału, a szczególnie dużą zawartość cukrów i małą zawartość lipidów (Roca i wsp. 2008; Jakubczyk i wsp. 2021). Zwiększanie udziału wody w żywności może wpływać zarówno na jej bezpieczeństwo mikrobiologiczne, jak i właściwości teksturalne, barwę oraz stabilność zawartych związków chemicznych (Silva-Espinoza i wsp. 2020b). Ponadto zauważono, że badane w niniejszej pracy przekąski z dodatkiem proszków z wycieków osiągały stałą masę po 72 godzinach doświadczenia, podczas gdy liofilizowane żele pektynowe po tym czasie wciąż pochłaniały wodę. Sugeruje to, że pomimo dużej zdolności pektyny do zmniejszania aktywności wody w materiale strukturyzowanym jej dodatkiem, powinowactwo pektyny do wody (Panchev i wsp. 2010) ogranicza możliwość poprawy stabilności produktów liofilizowanych. Ma to znaczenie szczególnie pod względem konieczności utrzymania stałego poziomu zawartości wody oraz ograniczania zmian, będących następstwem wzrostu wilgotności produktu. Podkreśla to konieczność odpowiedniego zabezpieczania takich produktów przed wpływem czynników zewnętrznych, takich jak wilgotność środowiska. Zgodnie z klasyfikacją materiałów pod względem ich higroskopijności (De Moraes i wsp. 2017), liofilizowane przekąski, niezależnie od zastosowanego dodatku, były wysoce higroskopijne. Właściwości higroskopijne są silnie uzależnione od struktury próbki. Bardziej zwarta i mniej porowata struktura może hamować adsorpcję wilgoci ze względu na większą ilość zamkniętych

porów, które są oddzielone od środowiska, a tym samym mniej dostępne dla pary wodnej (Feng i wsp. 2022). Z drugiej strony, zmniejszenie intensywności pochłaniania wilgoci, wynikające z dodatku pektyny, mogło być spowodowane pęcznieniem hydrokoloidu, co prowadziło do zamykania wewnętrznych porów (Kowalski i wsp. 2019). Wyjaśniałoby to również stały przyrost masy spowodowany ruchliwością wody i jej dyfuzją od powierzchni do wnętrza matrycy próbki.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że zastosowanie badanych dodatków strukturotwórczych, czyli proszków z suszonych wyłóków owocowych lub pektyny, zmniejszyło zawartość i aktywność wody w liofilizowanych przekąskach owocowo-warzywnych, co, biorąc pod uwagę wcześniej omawiane badania, może sugerować ich większą trwałość i stabilność pod względem właściwości fizykochemicznych. Ponadto, po wprowadzeniu dodatków oraz wraz ze zwiększaniem ich udziału w recepturze przekąsek zmniejszyła się ich zdolność do pochłaniania wilgoci z otoczenia, co również jest cechą w tym wypadku pozytywną. Jednak pomimo uzyskanych efektów, nawet próbki, w których redukcja była największa, charakteryzowały się dużą higroskopijnością, co może prowadzić do szybkiej utraty jakości podczas kontaktu z wilgotną atmosferą. Na tej podstawie można zatem wywnioskować konieczność stosowania wysokobarierowych opakowań dla tego typu produktów, niezależnie od ich składu, w celu zachowania jak najlepszych cech jakościowych. Niemniej jednak, wyniki przeprowadzonych badań pozwalają pozytywnie zweryfikować drugą część **hipotezy 4**, a zatem wszystkie założenia zawarte w tej hipotezie zostały potwierdzone.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedmiotem niniejszej rozprawy była analiza wpływu reformulacji składu surowcowego na wybrane właściwości fizykochemiczne i użytkowe liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych, wytworzonych z wykorzystaniem wyłoków owocowych oraz niskometylowanej pektyny jabłkowej. Badania zostały zaplanowane na podstawie założenia, że wyłoki owocowe w formie proszku, które są zagospodarowywane między innymi jako surowiec do produkcji pektyn, mogą stanowić zamiennik konwencjonalnych dodatków strukturotwórczych, jednocześnie dodając „nowym produktom” wartość jaką jest przyjazność dla środowiska i wzbogacenie ich wartości żywieniowej. W roli tradycyjnego dodatku strukturotwórczego wykorzystano niskometylowaną pektynę jabłkową, a uzyskane wyniki badań dla przygotowanych na tej bazie liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych stanowiły materiał porównawczy dla liofilizatów strukturyzowanych za pomocą dodatku proszków z wyłoków z jabłek, czarnych porzeczek oraz aronii. Plan badań został opracowany celem weryfikacji czterech hipotez badawczych, które dotyczyły oceny potencjału wyłoków owocowych w formie proszku, jako komponentów strukturo- i teksturotwórczych w produkcji żywności liofilizowanej oraz wpływu tych dodatków na wybrane właściwości fizykochemiczne gotowych produktów w postaci przekąsek w aspekcie ich wartości żywieniowej oraz oddziaływania na środowisko.

Na podstawie literatury przedmiotu oraz przeprowadzonych badań eksperymentalnych dokonano całkowitej lub częściowej weryfikacji postawionych hipotez, co pozwoliło na sformułowanie następujących stwierdzeń i wniosków:

1. Produkcja liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych z dodatkiem proszków z wyłoków owocowych jako zamienników hydrokoloidów, na przykładzie niskometylowanej pektyny jabłkowej, może być skutecznym rozwiązaniem wpisującym się w koncepcję zrównoważonego rozwoju i gospodarki w obiegu zamkniętym. Waloryzacja produktów ubocznych, w formie proszków z wyłoków owocowych, może wpłynąć na obniżenie śladu węglowego liofilizowanych przekąsek oraz zmniejszenie ilości odpadów przemysłu owocowo-warzywnego. Należy jednak zauważyć, że z uwagi na opracowany schemat przebiegu procesu technologicznego wytwarzania liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych (w skali laboratoryjnej), otrzymane rezultaty badań wykazały, że zastosowana

reformulacja składu, niezależnie od wykorzystanych komponentów, nie wpłynęła na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych wytwarzanych bezpośrednio w czasie produkcji przekąsek, którą wyrażono wartością obliczonego śladu węglowego.

2. Zastąpienie niskometylowanej pektyny jabłkowej jako dodatku umożliwiającego strukturyzację matrycy liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych proszkami z wyciągów owocowych korzystnie wpłynęło na wartość odżywczą produktów, powodując w nich zwiększenie zawartości białka, tłuszczów i składników mineralnych oraz wartości energetycznej, co odbyło się kosztem zmniejszenia zawartości błonnika pokarmowego. Pod względem żywieniowym, otrzymane produkty były porównywalne z przekąskami dostępnymi komercyjnie.
3. Proszki z wyciągów owocowych wykazały potencjał strukturotwórczy oraz wykazano, że kształtują cechy tekstury liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych. Jednak ich przydatność w tym zakresie jest znacznie mniejsza niż konwencjonalnych dodatków hydrokoloidowych. W porównaniu z pektyną, wyciąki owocowe wykazały mniejszy potencjał teksturotwórczy i strukturotwórczy, czego efektem była zwarta i nieregularna struktura oraz nieznaczne zwiększenie twardości przekąsek, nawet po zastosowaniu dużej ilości wyciągów. Największe zmiany właściwości mechanicznych zaobserwowano w przypadku liofilizatów z dodatkiem proszków z wyciągów jabłkowych, a najmniejsze z wyciągów z aronii.
4. Pomimo uzyskania niejednoznacznych wyników, wprowadzenie do układu jonów wapnia wykazuje tendencję do poprawy właściwości strukturotwórczych jakimi charakteryzują się komponenty w postaci proszków z wyciągów owocowych. Jednocześnie ograniczona dostępność danych literaturowych w tym zakresie sugeruje konieczność prowadzenia dalszych badań w celu pogłębienia wiedzy na temat mechanizmów oddziaływania i przebiegu interakcji zachodzących pomiędzy składnikami surowców w postaci wyciągów owocowych a tworzoną matrycą projektowanej żywności, tak aby w pełni poznać potencjał łączonych komponentów.
5. Zwarta i mniej porowata struktura matrycy liofilizowanych przekąsek, otrzymanych z dodatkiem proszków z wyciągów owocowych, spowodowała znaczne zmniejszenia higroskopijności materiału, a tym samym nie nastąpiła jego przewidywana poprawa stabilności. Przekąski z dodatkiem proszku z wyciągów charakteryzowały się również bardzo niską zawartością i aktywnością wody, co dodatkowo ogranicza możliwość zajścia reakcji biochemicznych oraz rozwoju drobnoustrojów. Jednocześnie badania higroskopijności liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych potwierdziły

konieczność odpowiedniego doboru materiałów opakowaniowych, które zapewnią w czasie przechowywania gotowych produktów ograniczony dostęp do światła, powietrza oraz wilgoci.

6. Badania przechowalnicze wykazały, że liofilizowane przekąski owocowo-warzywne, wytworzone z dodatkiem proszków z wycisków owocowych lub niskometylowanej pektyny jabłkowej, nie były w pełni stabilne podczas przechowywania. Niezależnie od rodzaju zastosowanego dodatku oraz temperatury otoczenia obserwowano zmiany właściwości fizykochemicznych. Biorąc pod uwagę stosunkowo nieduży zakres zmian obserwowanych cech po przechowywaniu w podwyższonej temperaturze, stwierdzono, że przekąski mogą być przechowywane przez okres 12 miesięcy. Jednocześnie jednak potwierdzono, że wymagane są dalsze i bardziej dokładne badania w celu zoptymalizowania okresu przydatności do spożycia i warunków przechowywania, z uwzględnieniem oceny konsumentów. Ponadto, biorąc pod uwagę wszystkie analizowane wyniki badań, sugeruje się przechowywanie liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych, strukturyzowanych pektyną i/lub proszkami z wycisków owocowych, w warunkach chłodniczych.
7. Wprowadzenie do receptury liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wycisków owocowych w proszku, powoduje nie tylko zwiększenie całkowitej zawartości składników bioaktywnych w produktach, ale prowadzi do zwiększenia aktywności przeciwutleniającej, a w rezultacie również do poprawy wartości żywieniowej przekąsek. Najbardziej korzystny efekt zaobserwowano szczególnie w przypadku wprowadzenia do liofilizatów proszku z wycisków z aronii, co powiązano z dużą zawartością antocyjanów.

6. SPIS LITERATURY

- Acan, B. G., Kilicli, M., Bursa, K., Toker, O. S., Palabiyik, I., Gulcu, M., Yaman, M., Gunes, R., & Konar, N. (2021). Effect of grape pomace usage in chocolate spread formulation on textural, rheological and digestibility properties. *LWT - Food Science and Technology*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110451>
- Adetunji, L. R., Adekunle, A., Orsat, V., & Raghavan, V. (2017). Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review. *Food Hydrocolloids*, 62, 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.015>
- Alam, S., Pathania, S., Kumar, S., & Sharma, A. (2015). Studies on storage stability of carrot pomace-chickpea incorporated rice based snacks. *Agricultural Research Journal*, 52(4), 73–79. <https://doi.org/10.5958/2395-146X.2015.00066.6>
- Almena, A., Lopez-Quiroga, E., Fryer, P. J., & Bakalis, S. (2019). Towards the decentralisation of food manufacture: effect of scale production on economics, carbon footprint and energy demand. *Energy Procedia*, 161, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.080>
- Alongi, M., Melchior, S., & Anese, M. (2019). Reducing the glycemic index of short dough biscuits by using apple pomace as a functional ingredient. *LWT*, 100, 300–305. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.068>
- Andrade, T. A., Hamerski, F., López Fetzer, D. E., Roda-Serrat, M. C., Corazza, M. L., Norddahl, B., & Errico, M. (2021). Ultrasound-assisted pressurized liquid extraction of anthocyanins from Aronia melanocarpa pomace. *Separation and Purification Technology*, 276, 119290. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119290>
- Antonic, B., Jancikova, S., Dordevic, D., & Tremlova, B. (2020). Apple pomace as food fortification ingredient: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Food Science*, 85(10), 2977–2985. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15449>
- Arsiccio, A., Sparavigna, A. C., Pisano, R., & Barresi, A. A. (2019). Measuring and predicting pore size distribution of freeze-dried solutions. *Drying Technology*, 37(4), 435–447. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1430042>
- Azad, A. K., Ali, M. A., Akter, S., & Rahman, J. (2014). Isolation and characterization of pectin extracted from lemon pomace during ripening. *Journal of Food and Nutrition Sciences*, 2(2), 30–35. <https://doi.org/10.11648/j.jfns.20140202.12>
- Barber, T. M., Kabisch, S., Pfeiffer, A. F. H., & Weickert, M. O. (2020). The health benefits of dietary fibre. *Nutrients*, 12(10), 1–17. <https://doi.org/10.3390/nu12103209>
- Bhatta, S., Janezic, T. S., & Ratti, C. (2020). Freeze-drying of plant-based foods. *Foods*, 9(1), 87. <https://doi.org/10.3390/foods9010087>
- Blahovec, J. (2007). Role of water content in food and product texture. *International Agrophysics*, 21(3), 209–215.
- Blejan, A. M., Nour, V., Păcularu-Burada, B., & Popescu, S. M. (2023). Wild bilberry, blackcurrant, and blackberry by-products as a source of nutritional and bioactive compounds. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 1579–1595. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2224530>
- Bozkir, H., & Tekgöl, Y. (2022). Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: Thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(6), e15902. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15902>
- Butler, I. P., Banta, R. A., Tyuftin, A. A., Holmes, J., Pathania, S., & Kerry, J. (2023). Pectin as a biopolymer source for packaging films using a circular economy approach: Origins, extraction, structure and films properties. *Food Packaging and Shelf Life*, 40, 101224. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101224>
- Byun, C., Zheng, Y., Pierce, A., Wagner, W. L., Scheller, H. V., Mohnen, D., Ackermann, M., & Mentzer, S. J. (2020). The effect of calcium on the cohesive strength and flexural properties of low-methoxyl pectin biopolymers. *Molecules*, 25, 75. <https://doi.org/10.3390/molecules25010075>
- Cacak-Pietrzak, G., Dziki, D., Gawlik-Dziki, U., Parol-Nadłonek, N., Kalisz, S., Krajewska, A., & Stępniewska, S. (2023). Wheat Bread Enriched with Black Chokeberry (Aronia melanocarpa L.)

- Pomace: Physicochemical Properties and Sensory Evaluation. *Applied Sciences*, 13(12), 6936. <https://doi.org/10.3390/app13126936>
- Calligaris, S., Manzocco, L., Anese, M., & Nicoli, M. C. (2016). Shelf-life Assessment of Food Undergoing Oxidation—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(11), 1903–1912. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.807222>
- Cantero, L., Salmerón, J., Miranda, J., Larretxi, I., Fernández-Gil, M. D. P., Bustamante, M. Á., Matias, S., Navarro, V., Simón, E., & Martínez, O. (2022). Performance of Apple Pomace for Gluten-Free Bread Manufacture: Effect on Physicochemical Characteristics and Nutritional Value. *Applied Sciences*, 12, 5934. <https://doi.org/10.3390/app12125934>
- Capel, F., Nicolai, T., Durand, D., Boulenguer, P., & Langendorff, V. (2006). Calcium and acid induced gelation of (amidated) low methoxyl pectin. *Food Hydrocolloids*, 20(6), 901–907. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.09.004>
- Cassanelli, M., Norton, I., & Mills, T. (2018). Role of gellan gum microstructure in freeze drying and rehydration mechanisms. *Food Hydrocolloids*, 75, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.09.013>
- Celiko. (2022). *SklepCeliko.pl*. <https://www.sklepceliko.pl/pl/c/Batony-liofilizowane/19>
- Celus, M., Kyomugasho, C., Van Loey, A. M., Grauwet, T., & Hendrickx, M. E. (2018). Influence of Pectin Structural Properties on Interactions with Divalent Cations and Its Associated Functionalities. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(6), 1576–1594. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12394>
- Chan, S. Y., Choo, W. S., Young, D. J., & Loh, X. J. (2017). Pectin as a rheology modifier: Origin, structure, commercial production and rheology. *Carbohydrate Polymers*, 161, 118–139. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.12.033>
- Chandel, V., Biswas, D., Roy, S., Vaidya, D., Verma, A., & Gupta, A. (2022). Current Advancements in Pectin: Extraction, Properties and Multifunctional Applications. *Foods*, 11(17), 2683. <https://doi.org/10.3390/foods11172683>
- Ciriminna, R., Fidalgo, A., Scurria, A., Ilharco, L. M., & Pagliaro, M. (2022). Pectin: New science and forthcoming applications of the most valued hydrocolloid. *Food Hydrocolloids*, 127, 107483. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107483>
- Ciurzyńska, A., Cieśluk, P., Barwińska, M., Marczak, W., Ordyniak, A., Lenart, A., & Janowicz, M. (2019). Eating habits and sustainable food production in the development of innovative “healthy” snacks (running title: Innovative and “healthy” snacks). In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, p. 2800). MDPI. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su11102800>
- Ciurzyńska, A., Lenart, A., & Karwosińska, J. (2015). Effect of Quantity of Low-Methoxyl Pectin on Physical Properties of Freeze-Dried Strawberry Jellies. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 65(4), 233–241. <https://doi.org/10.2478/pjfn-2013-0020>
- Ciurzyńska, A., Marczak, W., Lenart, A., & Janowicz, M. (2020). Production of innovative freeze-dried vegetable snack with hydrocolloids in terms of technological process and carbon footprint calculation. *Food Hydrocolloids*, 108, 105993. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105993>
- Ciurzyńska, A., Marzec, A., Mieszkowska, A., & Lenart, A. (2017). Structure influence on mechanical and acoustic properties of freeze-dried gels obtained with the use of hydrocolloids. *Journal of Texture Studies*, 48(2), 131–142. <https://doi.org/10.1111/JTXS.12224>
- Ciurzyńska, A., Pisarska, A., Olsinski, I., Panfiluk, A. M., Ostap, M. S., & Lenart, A. (2018). Effect of composition changes and aeration time on the structure and rehydration of innovative freeze-dried gels. *International Agrophysics*, 32(3), 429–435. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0017>
- Ciurzyńska, A., Popkowicz, P., Galus, S., & Janowicz, M. (2022). Innovative Freeze-Dried Snacks with Sodium Alginate and Fruit Pomace (Only Apple or Only Chokeberry) Obtained within the Framework of Sustainable Production. *Molecules*, 27(10), 3095. <https://doi.org/10.3390/molecules27103095>
- Constenla, D., Ponce, A. G., & Lozano, J. E. (2002). Effect of pomace drying on apple pectin. *LWT-Food Science and Technology*, 35(3), 216–221. <https://doi.org/10.1006/fstl.2001.0841>

- Cortez, R., & Gonzalez de Mejia, E. (2019). Blackcurrants (*Ribes nigrum*): A Review on Chemistry, Processing, and Health Benefits. In *Journal of Food Science* (Vol. 84, Issue 9, pp. 2387–2401). Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1750-3841.14781>
- Cortez, R., Luna-Vital, D. A., Margulis, D., & Gonzalez de Mejia, E. (2017). Natural Pigments: Stabilization Methods of Anthocyanins for Food Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(1), 180–198. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12244>
- Czubaszek, R., Wysocka-Czubaszek, A., & Tyborowski, R. (2022). Methane Production Potential from Apple Pomace, Cabbage Leaves, Pumpkin Residue and Walnut Husks. *Applied Sciences*, 12, 6128. <https://doi.org/10.3390/app12126128>
- Darvishi, H., Mohammadi, P., Fadavi, A., Koushesh Saba, M., & Behroozi-Khazaei, N. (2019). Quality preservation of orange concentrate by using hybrid ohmic – Vacuum heating. *Food Chemistry*, 289, 292–298. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.043>
- de Azeredo, A. B., da Silva, A. P. R., Matias, A. G. da S., da Silva, V. M., Correia, A. A. V., & Voltolini, T. V. (2022). Chemical composition of forage watermelon fruit at different maturity stage or storage length. *Acta Scientiarum - Animal Sciences*, 44. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v44i1.53624>
- De Moraes, F. P., Gonçalves, A. C., Veríssimo Miguel, T. B., Borges, K. C., & Correia, R. T. P. (2017). Freeze Dried Acerola (*Malpighia emarginata*) Pulp and Pomace: Physicochemical Attributes, Phytochemical Content and Stability during Storage. *Journal of Food Industry*, 1(1), 17. <https://doi.org/10.5296/jfi.v1i1.11795>
- Déniel, M., Haarlemmer, G., Roubaud, A., Weiss-Hortala, E., & Fages, J. (2017). Hydrothermal liquefaction of blackcurrant pomace and model molecules: understanding of reaction mechanisms. *Sustainable Energy & Fuels*, 1(3), 555–582. <https://doi.org/10.1039/C6SE00065G>
- Dhingra, D., Michael, M., Rajput, H., & Patil, R. T. (2012). Dietary fibre in foods: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 49(3), 255–266. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0365-5>
- Diez-Sánchez, E., Martínez, A., Rodrigo, D., Quiles, A., & Hernando, I. (2020). Optimizing High Pressure Processing Parameters to Produce Milkshakes Using Chokeberry Pomace. *Foods*, 9(4), 405. <https://doi.org/10.3390/foods9040405>
- Diez-Sánchez, E., Quiles, A., & Hernando, I. (2021). Use of Berry Pomace to Design Functional Foods. In *Food Reviews International*. Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2010217>
- Donno, D., Mellano, M. G., Riondato, I., De Biaggi, M., Andriamaniraka, H., Gamba, G., & Beccaro, G. L. (2019). Traditional and unconventional dried fruit snacks as a source of health-promoting compounds. *Antioxidants*, 8, 396. <https://doi.org/10.3390/antiox8090396>
- Drożdż, W., Boruczkowska, H., Boruczkowski, T., Tomaszewska-Ciosk, E., & Zdybel, E. (2019). Use of blackcurrant and chokeberry press residue in snack products. *Polish Journal of Chemical Technology*, 21(1), 13–19. <https://doi.org/10.2478/pjct-2019-0003>
- Eblaghi, M., Bronlund, J. E., Yedro, F. M., & Archer, R. H. (2021). Kinetics of Pectin Reactions in Apple Pomace During Hydrothermal Treatment. *Food and Bioprocess Technology*, 14, 739–750. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02603-4>
- Feng, S., Bi, J., Laaksonen, T., Laurén, P., & Yi, J. (2024). Texture of freeze-dried intact and restructured fruits: Formation mechanisms and control technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 143, 104267. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104267>
- Feng, S., Bi, J., Yi, J., Li, X., Li, J., & Ma, Y. (2022). Cell wall polysaccharides and mono-/disaccharides as chemical determinants for the texture and hygroscopicity of freeze-dried fruit and vegetable cubes. *Food Chemistry*, 395, 133574. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133574>
- Fraeye, I., Duvetter, T., Dounghla, E., Van Loey, A., & Hendrickx, M. (2010). Fine-tuning the properties of pectin–calcium gels by control of pectin fine structure, gel composition and environmental conditions. *Trends in Food Science & Technology*, 21(5), 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.02.001>
- Frederiksen, C., Victor Byrne, D., Chan, R. C. K., & Vad Andersen, B. (2025). The effect of anhedonic traits on snack food consumption and interoception of food-related pleasure and bodily sensations. *Food Quality and Preference*, 122, 105282. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2024.105282>

- Gao, N., Sun, X., Li, D., Gong, E., Tian, J., Si, X., Jiao, X., Xing, J., Wang, Y., Meng, X., & Li, B. (2020). Optimization of anthocyanidins conversion using chokeberry pomace rich in polymeric proanthocyanidins and cellular antioxidant activity analysis. *LWT*, 133, 109889. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109889>
- Garcia-Garcia, G., Rahimifard, S., Matharu, A. S., & Dugmore, T. I. J. (2019). Life-Cycle Assessment of Microwave-Assisted Pectin Extraction at Pilot Scale. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(5), 5167–5175. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06052>
- Groult, S., Buwalda, S., & Budtova, T. (2021). Pectin hydrogels, aerogels, cryogels and xerogels: Influence of drying on structural and release properties. *European Polymer Journal*, 149, 110386. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110386>
- GUS. (2024). *Produkcja upraw rolnych i ogrodnich w 2023 r.*
- Harguindeguy, M., & Fissore, D. (2020). On the effects of freeze-drying processes on the nutritional properties of foodstuff: A review. *Drying Technology*, 38(7), 846–868. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1599905>
- Helbig, D., Böhm, V., Wagner, A., Schubert, R., & Jahreis, G. (2008). Berry seed press residues and their valuable ingredients with special regard to black currant seed press residues. *Food Chemistry*, 111(4), 1043–1049. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.05.017>
- Hnin, K. K., Zhang, M., Devahastin, S., & Wang, B. (2019). Influence of Novel Infrared Freeze Drying of Rose Flavored Yogurt Melts on Their Physicochemical Properties, Bioactive Compounds and Energy Consumption. *Food and Bioprocess Technology*, 12(12), 2062–2073. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02368-x>
- Hnin, K. K., Zhang, M., Devahastin, S., & Wang, B. (2020). Combined Infrared Freeze Drying and Infrared Drying of Rose-Flavored Yogurt Melts—Effect on Product Quality. *Food and Bioprocess Technology*, 13(8), 1356–1367. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02486-x>
- Hu, J., Sun, X., Xiao, H., Yang, F., Liu, C., Wang, H., Zhang, H., & Zhang, W. (2022). Optimization of Conditions for a Freeze-Dried Restructured Strawberry Block by Adding Guar Gum, Pectin and Gelatin. *Plants*, 11, 2809. <https://doi.org/10.3390/plants11212809>
- Ijabadeniyi, O. A., & Pillay, Y. (2017). Microbial safety of low water activity foods: Study of simulated and durban household samples. *Journal of Food Quality*, 2017, 4931521. <https://doi.org/10.1155/2017/4931521>
- Ikezu, U., Ugariogu, S., Ikpa, C. B. C., Ibe, F. C., & Iwu, V. (2020). Comparative Analysis of Alkali, Ash and Moisture Content of Some Agricultural Wastes. *Open Access Journal of Waste Management & Xenobiotics*, 3(1), 1–6. <https://doi.org/10.23880/oajwx-16000137>
- Iordanescu, O. A., Alexa, E., Lalescu, D., Berbeca, A., Camen, D., Poiana, M. A., Moigradean, D., & Bala, M. (2018). Chemical composition and antioxidant activity of some apricot varieties at different ripening stages. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 78(2), 266–275. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392018000200266>
- Jakubczyk, E., Kamińska-Dwórznička, A., & Ostrowska-Ligeza, E. (2022). The Effect of Composition, Pre-Treatment on the Mechanical and Acoustic Properties of Apple Gels and Freeze-Dried Materials. *Gels*, 8(2), 110. <https://doi.org/10.3390/gels8020110>
- Jakubczyk, E., Kamińska-dwórznička, A., Ostrowska-ligęza, E., Górski, A., Wirkowska-wojdyła, M., Mańko-jurkowska, D., Górski, A., & Bryś, J. (2021). Application of different compositions of apple puree gels and drying methods to fabricate snacks of modified structure, storage stability and hygroscopicity. *Applied Sciences*, 11(21), 10286. <https://doi.org/10.3390/app112110286>
- Jannati, N., Hojjatoleslamy, M., Hosseini, E., Mozafari, H. R., & Siavoshi, M. (2018). Effect of apple pomace powder on rheological properties of dough and sangak bread texture. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 10(2), 77–84. http://chimie-biologie.ubm.ro/carpathian_journal/index.html
- Karwacka, M., Ciużyńska, A., Galus, S., & Janowicz, M. (2022). Freeze-dried snacks obtained from frozen vegetable by-products and apple pomace – Selected properties, energy consumption and carbon footprint. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 77, 102949. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102949>

- Karwacka, M., Gumkowska, M., Rybak, K., Ciużyńska, A., & Janowicz, M. (2021). Impact of Sodium Alginate and Dried Apple Pomace Powder as a Carrier Agent on the Properties of Freeze-Dried Vegetable Snacks. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 71(4), 451–461. <https://doi.org/10.31883/pjfn/143584>
- Kastner, H., Einhorn-Stoll, U., & Senge, B. (2012). Structure formation in sugar containing pectin gels - Influence of Ca²⁺ on the gelation of low-methoxylated pectin at acidic pH. *Food Hydrocolloids*, 27(1), 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.09.001>
- Khanali, M., Kokei, D., Aghbashlo, M., Nasab, F. K., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Tabatabaei, M. (2020). Energy flow modeling and life cycle assessment of apple juice production: Recommendations for renewable energies implementation and climate change mitigation. *Journal of Cleaner Production*, 246, 118997. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118997>
- Knudsen, M. T., Fonseca de Almeida, G., Langer, V., Santiago de Abreu, L., & Halberg, N. (2011). Environmental assessment of organic juice imported to Denmark: a case study on oranges (*Citrus sinensis*) from Brazil. *Organic Agriculture*, 1(3), 167–185. <https://doi.org/10.1007/s13165-011-0014-3>
- KOBIZE. (2023). *Wskaźniki emisyjności CO₂, SO₂, NO_x, CO i pyłu całkowitego dla energii elektrycznej na podstawie informacji zawartych w Krajowej bazie o emisjach gazów cieplarnianych i innych substancji za 2022 rok*.
- Kosmala, M., Kołodziejczyk, K., Markowski, J., Mieszczakowska, M., Ginies, C., & Renard, C. M. G. C. (2010). Co-products of black-currant and apple juice production: Hydration properties and polysaccharide composition. *LWT - Food Science and Technology*, 43(1), 173–180. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.06.016>
- Kowalski, G., Kijowska, K., Witczak, M., Kuterasiński, L., & Lukasiewicz, M. (2019). Synthesis and effect of structure on swelling properties of hydrogels based on high methylated pectin and acrylic polymers. *Polymers*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/polym11010114>
- Kraciński, P. (2014). Zbiory i rozdysponowanie produkcji truskawek, malin i porzeczek w Polsce w latach 2001-2012. *Roczniki Naukowe Ekonomii Rolnictwa i Rozwoju Obszarów Wiejskich*, 101(2), 132–140.
- Krajewska, A., & Dzik, D. (2023). Enrichment of Cookies with Fruits and Their By-Products: Chemical Composition, Antioxidant Properties, and Sensory Changes. *Molecules*, 28(10), 4005. <https://doi.org/10.3390/molecules28104005>
- Kruszewski, B., Zawada, K., & Karpiński, P. (2021). Impact of high-pressure homogenization parameters on physicochemical characteristics, bioactive compounds content, and antioxidant capacity of blackcurrant juice. *Molecules*, 26(6), 1802. <https://doi.org/10.3390/molecules26061802>
- Li, J. M., & Nie, S. P. (2016). The functional and nutritional aspects of hydrocolloids in foods. *Food Hydrocolloids*, 53, 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.01.035>
- Liang, X., Feng, L., Ran, J., Sun, J., Chen, X., Jiao, Z., Liu, B., & Jiao, L. (2020). Influence of adding steam-exploded apple pomace on wheat flour characteristics and biscuit quality. *Journal of Food Science and Technology*, 57(8), 3031–3039. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04336-2>
- Liu, K. (2019). Effects of sample size, dry ashing temperature and duration on determination of ash content in algae and other biomass. *Algal Research*, 40, 101486. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101486>
- Liuqing, W., Qiuhui, H., Fei, P., Alfred Mugambi, M., & Wenjian, Y. (2018). Influence of different storage conditions on physical and sensory properties of freeze-dried *Agaricus bisporus* slices. *LWT*, 97, 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.06.052>
- Lumanlan, J. C., Fernando, W. M. A. D. B., Karnpanit, W., & Jayasena, V. (2021). Effects of food gums and pre-drying on fat content of fabricated fried chips. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 1544–1550. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14763>
- Lyu, F., Luiz, S. F., Azeredo, D. R. P., Cruz, A. G., Ajlouni, S., & Ranadheera, C. S. (2020). Apple pomace as a functional and healthy ingredient in food products: A review. In *Processes* (Vol. 8, Issue 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/pr8030319>
- Mahmood, T., Anwar, F., Bhatti, A., & Iqbal, T. (2013). Effect of maturity on proximate composition, phenolics and antioxidant attributes of cherry fruit. *Pakistan Journal of Botany*, 45(3), 909–914.

- Majerska, J., Michalska, A., & Figiel, A. (2019). A review of new directions in managing fruit and vegetable processing by-products. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 207–219. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2019.03.021>
- Manzocco, L., Mikkonen, K. S., & García-González, C. A. (2021). Aerogels as porous structures for food applications: Smart ingredients and novel packaging materials. *Food Structure*, 28, 100188. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100188>
- Mareček, V., Mikyška, A., Hampel, D., Čejka, P., Neuwirthová, J., Malachová, A., & Cerkal, R. (2017). ABTS and DPPH methods as a tool for studying antioxidant capacity of spring barley and malt. *Journal of Cereal Science*, 73, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.11.004>
- Mariotti, F., & Gardner, C. D. (2019). Dietary protein and amino acids in vegetarian diets—A review. In *Nutrients* (Vol. 11, Issue 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/nu11112661>
- Mayer-Miebach, E., Adamiuk, M., & Behnlian, D. (2012). Stability of Chokeberry Bioactive Polyphenols during Juice Processing and Stabilization of a Polyphenol-Rich Material from the By-Product. *Agriculture*, 2(3), 244–258. <https://doi.org/10.3390/agriculture2030244>
- Mazumder, P., Roopa, B. S., & Bhattacharya, S. (2007). Textural attributes of a model snack food at different moisture contents. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 511–516. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.011>
- Mazzeo, T., N'Dri, D., Chiavaro, E., Visconti, A., Fogliano, V., & Pellegrini, N. (2011). Effect of two cooking procedures on phytochemical compounds, total antioxidant capacity and colour of selected frozen vegetables. *Food Chemistry*, 128(3), 627–633. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.070>
- Mengucci, C., Ferranti, P., Romano, A., Masi, P., Picone, G., & Capozzi, F. (2022). Food structure, function and artificial intelligence. *Trends in Food Science and Technology*, 123, 251–263. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.03.015>
- Mesquita, E., & Monteiro, M. (2018). Simultaneous HPLC determination of flavonoids and phenolic acids profile in Pêra-Rio orange juice. *Food Research International*, 106, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.025>
- Michalska, A., Wojdyło, A., Łysiak, G. P., Lech, K., & Figiel, A. (2017). Functional relationships between phytochemicals and drying conditions during the processing of blackcurrant pomace into powders. *Advanced Powder Technology*, 28(5), 1340–1348. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.03.002>
- Michalska-Ciechanowska, A., Hendrysiak, A., Brzezowska, J., Wojdyło, A., & Gajewicz-Skretna, A. (2021). How Do the Different Types of Carrier and Drying Techniques Affect the Changes in Physico-Chemical Properties of Powders from Chokeberry Pomace Extracts? *Foods*, 10(8), 1864. <https://doi.org/10.3390/foods10081864>
- Milani, J., & Maleki, G. (2012). Hydrocolloids in Food Industry. In B. Valdez (Ed.), *Food Industrial Processes: Methods and Equipment* (Vol. 2, pp. 15–39). InTech.
- Moraga, G., Talens, P., Moraga, M. J., & Martínez-Navarrete, N. (2011). Implication of water activity and glass transition on the mechanical and optical properties of freeze-dried apple and banana slices. *Journal of Food Engineering*, 106(3), 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.009>
- Morales-Contreras, B. E., Wicker, L., Rosas-Flores, W., Contreras-Esquivel, J. C., Gallegos-Infante, J. A., Reyes-Jaquez, D., & Morales-Castro, J. (2020). Apple pomace from variety “Blanca de Asturias” as sustainable source of pectin: Composition, rheological, and thermal properties. *LWT-Food Science and Technology*, 117, 108641. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108641>
- Morris, G. A., Castile, J., Smith, A., Adams, G. G., & Harding, S. E. (2010). The effect of different storage temperatures on the physical properties of pectin solutions and gels. *Polymer Degradation and Stability*, 95(12), 2670–2673. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.07.013>
- Muhidinov, Z. K., Ikromi, K. I., Jonmurodov, A. S., Nasriddinov, A. S., Usmanova, S. R., Bobokalonov, J. T., Strahan, G. D., & Liu, L. (2021). Structural characterization of pectin obtained by different purification methods. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 2227–2237. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.094>
- Muzaffar, K., & Kumar, P. (2017). Spray Drying of Tamarind Pulp: Effect of Process Parameters Using Protein as Carrier Agent. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(2). <https://doi.org/10.1111/jfpp.12781>

- Nayak, A., & Bhushan, B. (2019). An overview of the recent trends on the waste valorization techniques for food wastes. *Journal of Environmental Management*, 233, 352–370. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.041>
- Nowak, D., & Jakubczyk, E. (2020). The freeze-drying of foods⇔the characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials. *Foods*, 9(10), 1488. <https://doi.org/10.3390/foods9101488>
- Pancerz, M., Kruk, J., Witek, M., & Ptaszek, A. (2022). The effect of biopolymer-water interaction on relaxation phenomena in blackcurrant pectin solutions. *Food Chemistry*, 383, 123600. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.123600>
- Panchev, I. N., Slavov, A., Nikolova, Kr., & Kovacheva, D. (2010). On the water-sorption properties of pectin. *Food Hydrocolloids*, 24(8), 763–769. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.04.002>
- Parkash Scholar, J., Lajpat Rai, L., Parkash, J., Sharma, D., & Yadav, S. (2021). Role of dietary fibre (Corn bran and apple pomace) in processed meat products : A review. *The Pharma Innovation Journal*, 10(6), 13–17. <http://www.thepharmajournal.com>
- Pei, F., Yang, W., Shi, Y., Sun, Y., Mariga, A. M., Zhao, L., Fang, Y., Ma, N., An, X., & Hu, Q. (2014). Comparison of Freeze-Drying with Three Different Combinations of Drying Methods and Their Influence on Colour, Texture, Microstructure and Nutrient Retention of Button Mushroom (*Agaricus bisporus*) Slices. *Food and Bioprocess Technology*, 7(3), 702–710. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1058-z>
- Petković, M., Filipović, V., Filipović, J., Đurović, I., Miletić, N., & Radovanović, J. (2021). Chemical, antioxidative, and sensory characteristics of wheat bread partially substituted with black chokeberry (*Aronia melanocarpa* L.) powder. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(1), e15027. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15027>
- Piasecka, I., Górská, A., Ostrowska-Ligęza, E., & Kalisz, S. (2021). The study of thermal properties of blackberry, chokeberry and raspberry seeds and oils. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/app11167704>
- Pinckaers, P. J. M., Trommelen, J., Snijders, T., & van Loon, L. J. C. (2021). The Anabolic Response to Plant-Based Protein Ingestion. *Sports Medicine*, 51, 59–74. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01540-8>
- Pollini, L., Juan-García, A., Blasi, F., Mañes, J., Cossignani, L., & Juan, C. (2022). Assessing bioaccessibility and bioavailability in vitro of phenolic compounds from freeze-dried apple pomace by LC-Q-TOF-MS. *Food Bioscience*, 48, 101799. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101799>
- Popescu, L., Ceşco, T., Gurev, A., Ghendov-Mosanu, A., Sturza, R., & Tarna, R. (2022). Impact of Apple Pomace Powder on the Bioactivity, and the Sensory and Textural Characteristics of Yogurt. *Foods*, 11(22), 3565. <https://doi.org/10.3390/foods11223565>
- Puteri, N. A. A. R., Harun, R., & Rashidi Johari, N. (2020). The Effect Of Packaging Design Elements On Youth Purchase Intention Of Junk Food. *JBMP (Jurnal Bisnis, Manajemen Dan Perbankan)*, 6(1), 25–38. <https://doi.org/10.21070/jbmp.v6i1.442>
- Quiles, A., Campbell, G. M., Struck, S., Rohm, H., & Hernando, I. (2018). Fiber from fruit pomace: A review of applications in cereal-based products. *Food Reviews International*, 34(2), 162–181. <https://doi.org/10.1080/87559129.2016.1261299>
- Rackowska, E., Nowicka, P., Wojdyło, A., Styczyńska, M., & Lazar, Z. (2022). Chokeberry Pomace as a Component Shaping the Content of Bioactive Compounds and Nutritional, Health-Promoting (Anti-Diabetic and Antioxidant) and Sensory Properties of Shortcrust Pastries Sweetened with Sucrose and Erythritol. *Antioxidants*, 11(2), 190. <https://doi.org/10.3390/antiox11020190>
- Radzymińska, M., Semianowska, E., & Platta, A. (2017). Fruit pomace as a potential active food ingredient to the production ecological innovative confectionery products. *ZESZYTY NAUKOWE WSES w Ostrołęce*, 2(25), 383–398.
- Rather, S. A., Akhter, R., Masoodi, F. A., Gani, A., & Wani, S. M. (2015). Utilization of apple pomace powder as a fat replacer in goshtaba: a traditional meat product of Jammu and Kashmir, India. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 9(3), 389–399. <https://doi.org/10.1007/s11694-015-9247-2>

- Reißner, A. M., Al-Hamimi, S., Quiles, A., Schmidt, C., Struck, S., Hernando, I., Turner, C., & Rohm, H. (2019). Composition and physicochemical properties of dried berry pomace. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(3), 1284–1293. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9302>
- Reißner, A. M., Brunner, M., Struck, S., & Rohm, H. (2022). Thermo-mechanical processing of fibre-rich blackcurrant pomace to modify techno-functional properties. *European Food Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04052-5>
- Ribeiro, A. E. C., Oliveira, A. R., Silva, A. C. M. da, Garcia, M. C., Ribeiro, K. de O., Caliari, M., & Soares Júnior, M. S. (2023). High fiber content snack bars made with maize biomass flour, rice flakes and oat flakes: Physicochemical properties and sensory acceptance. *Food Science and Technology International*, 29(2), 181–191. <https://doi.org/10.1177/10820132221085154>
- Roca, E., Guillard, V., Broyart, B., Guilbert, S., & Gontard, N. (2008). Effective moisture diffusivity modelling versus food structure and hygroscopicity. *Food Chemistry*, 106(4), 1428–1437. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.03.078>
- Roda-Serrat, M. C., Razi Parjikolaei, B., Mohammadifakhr, M., Martin, J., Norddahl, B., & Errico, M. (2022). A Case Study for the Extraction, Purification, and Co-Pigmentation of Anthocyanins from Aronia melanocarpa Juice Pomace. *Foods*, 11(23), 3875. <https://doi.org/10.3390/foods11233875>
- Rolls, B. J. (2000). The Role of Energy Density in the Overconsumption of Fat. *The Journal of Nutrition*, 1, 268–271. <https://doi.org/10.1093/jn/130.2.267S>
- Sahni, P. (2017). Effect of Different Packaging Materials on Sensory Attributes of Fibre Rich Cookies during Storage. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, 5(6), 265–272. <https://doi.org/10.18782/2320-7051.4075>
- Santos, L. F. dos, Lopes, S. T., Nazari, M. T., Biduski, B., Pinto, V. Z., Santos, J. S. dos, Bertolin, T. E., & Santos, L. R. dos. (2023). Fruit pomace as a promising source to obtain biocompounds with antibacterial activity. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(33), 12597–12609. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2103510>
- Schmid, V., Steck, J., Mayer-Miebach, E., Behsnilian, D., Bunzel, M., Karbstein, H. P., & Emin, M. A. (2021). Extrusion Processing of Pure Chokeberry (Aronia melanocarpa) Pomace: Impact on Dietary Fiber Profile and Bioactive Compounds. *Foods*, 10(3), 518. <https://doi.org/10.3390/foods10030518>
- Schmid, V., Trabert, A., Schäfer, J., Bunzel, M., Karbstein, H. P., & Emin, M. A. (2020). Modification of Apple Pomace by Extrusion Processing: Studies on the Composition, Polymer Structures, and Functional Properties. *Foods*, 9(10), 1385. <https://doi.org/10.3390/foods9101385>
- Sharma, P., Gupta, A., & Issar, K. (2017). Effect of Packaging and Storage on Dried Apple Pomace and Fiber Extracted from Pomace. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), e12913. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12913>
- Sharma, P., Gupta, A., & Kaushal, P. (2014). Optimization of method for extraction of pectin from apple pomace. *Indian Journal of Natural Products and Resources*, 5(2), 184–189.
- Shlisky, J., Mandlik, R., Askari, S., Abrams, S., Belizan, J. M., Bourassa, M. W., Cormick, G., Driller-Colangelo, A., Gomes, F., Khadilkar, A., Owino, V., Pettifor, J. M., Rana, Z. H., Roth, D. E., & Weaver, C. (2022). Calcium deficiency worldwide: prevalence of inadequate intakes and associated health outcomes. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1512(1), 10–28. <https://doi.org/10.1111/nyas.14758>
- Si Hassen, W., Castetbon, K., Tichit, C., Péneau, S., Nechba, A., Ducrot, P., Lampuré, A., Bellisle, F., Hercberg, S., & Méjean, C. (2018). Energy, nutrient and food content of snacks in French adults. *Nutrition Journal*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s12937-018-0336-z>
- Siemianowska, E., Wesołowski, A., Barszcz, A., Radzyńska, M., Aljewicz, M., & Tyburski, J. (2016). Wytłoki owocowe jako dodatek do kruchych ciastek. *Przemysł Spożywczy*, 70(10), 41–45. <https://doi.org/10.15199/65.2016.10.7>
- Silva-Espinoza, M. A., Camacho, M. del M., & Martínez-Navarrete, N. (2020a). Effect of storage temperature on the crispness, colour and bioactive compounds of an orange snack obtained by freeze-drying. *British Food Journal*, 123(6), 2095–2106. <https://doi.org/10.1108/BFJ-11-2020-1061>
- Silva-Espinoza, M. A., Camacho, M. del M., & Martínez-Navarrete, N. (2020b). Use of different biopolymers as carriers for purposes of obtaining a freeze-dried orange snack. *LWT-Food Science and Technology*, 127, 109415. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109415>

- Silva-Espinoza, M. A., García-Martínez, E., & Martínez-Navarrete, N. (2021). Protective capacity of gum Arabic, maltodextrin, different starches, and fibers on the bioactive compounds and antioxidant activity of an orange puree (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) against freeze-drying and in vitro digestion. *Food Chemistry*, 357, 129724. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129724>
- Silva-Espinoza, M. A., Martínez-Navarrete, N., Camacho, M. D. M., & Martínez-Monzó, J. (2021). Impact of the freeze-drying conditions applied to obtain an orange snack on energy consumption. *Foods*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/foods10112756>
- Silva-Espinoza, M. A., Salvador, A., Camacho, M. del M., & Martínez-Navarrete, N. (2021). Impact of freeze-drying conditions on the sensory perception of a freeze-dried orange snack. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(11), 4585–4590. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11101>
- Sirpatrawan, U. (2009). Shelf-life simulation of packaged rice crackers. *Journal of Food Quality*, 32(2), 224–239. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2009.00247.x>
- Skinner, R. C., Gigliotti, J. C., Ku, K. M., & Tou, J. C. (2018). A comprehensive analysis of the composition, health benefits, and safety of apple pomace. *Nutrition Reviews*, 76(12), 893–909. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy033>
- Struck, S., Plaza, M., Turner, C., & Rohm, H. (2016). Berry pomace - A review of processing and chemical analysis of its polyphenols. In *International Journal of Food Science and Technology* (Vol. 51, Issue 6, pp. 1305–1318). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13112>
- Tańska, M., Roszkowska, B., Czaplicki, S., Borowska, E. J., Bojarska, J., & Dąbrowska, A. (2016). Effect of Fruit Pomace Addition on Shortbread Cookies to Improve Their Physical and Nutritional Values. *Plant Foods for Human Nutrition*, 71(3), 307–313. <https://doi.org/10.1007/s11130-016-0561-6>
- Thangavelu, K. P., Tiwari, B., Kerry, J. P., & Álvarez, C. (2022). A Comparative Study on the Effect of Ultrasound-Treated Apple Pomace and Coffee Silverskin Powders as Phosphate Replacers in Irish Breakfast Sausage Formulations. *Foods*, 11(18), 2763. <https://doi.org/10.3390/foods11182763>
- Uliano, A., Stanco, M., Marotta, G., & Nazzaro, C. (2024). Combining healthiness and sustainability: An analysis of consumers' preferences and willingness to pay for functional and sustainable snack bars. *Future Foods*, 9, 100355. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100355>
- Uruakpa, F. O. (2012). Gelling Behavior of Plant Proteins and Polysaccharides in Food Systems. *Journal of Food Science and Engineering*, 2(5), 247–256. <https://doi.org/10.17265/2159-5828/2012.05.001>
- Usman, M., Ahmed, S., Mehmood, A., Bilal, M., Patil, P. J., Akram, K., & Farooq, U. (2020). Effect of apple pomace on nutrition, rheology of dough and cookies quality. *Journal of Food Science and Technology*, 57(9), 3244–3251. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04355-z>
- Vagiri, M., & Jensen, M. (2017). Influence of juice processing factors on quality of black chokeberry pomace as a future resource for colour extraction. *Food Chemistry*, 217, 409–417. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.121>
- Van Gunst, A., Roodenburg, A. J. C., & Steenhuis, I. H. M. (2018). Reformulation as an integrated approach of four disciplines: A qualitative study with food companies. *Foods*, 7, 64. <https://doi.org/10.3390/foods7040064>
- Ventura, I., Jammal, J., & Bianco-Peled, H. (2013). Insights into the nanostructure of low-methoxyl pectin–calcium gels. *Carbohydrate Polymers*, 97(2), 650–658. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.05.055>
- Voragen, A. G. J. (1998). Technological aspects of functional food-related carbohydrates. *Trends in Food Science & Technology*, 9(8–9), 328–335. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(98\)00059-4](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(98)00059-4)
- Waldbauer, K., McKinnon, R., & Kopp, B. (2017). Apple Pomace as Potential Source of Natural Active Compounds. *Planta Medica*, 83(12–13), 994–1010. <https://doi.org/10.1055/s-0043-111898>
- Walia, M., Rawat, K., Bhushan, S., Padwad, Y. S., & Singh, B. (2014). Fatty acid composition, physicochemical properties, antioxidant and cytotoxic activity of apple seed oil obtained from apple pomace. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(5), 929–934. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6337>
- Wan, L., Yang, Z., Cai, R., Pan, S., Liu, F., & Pan, S. (2021). Calcium-induced-gel properties for low methoxyl pectin in the presence of different sugar alcohols. *Food Hydrocolloids*, 112, 106252. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106252>

- Wang, J., Aalaei, K., Skibsted, L. H., & Ahrné, L. M. (2020). Bioaccessibility of calcium in freeze-dried yogurt based snacks. *LWT - Food Science and Technology*, 129, 109527. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109527>
- Wang, X., Kristo, E., & LaPointe, G. (2019). The effect of apple pomace on the texture, rheology and microstructure of set type yogurt. *Food Hydrocolloids*, 91, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.01.004>
- Wang, X., Kristo, E., & LaPointe, G. (2020). Adding apple pomace as a functional ingredient in stirred-type yogurt and yogurt drinks. *Food Hydrocolloids*, 100, 105453. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105453>
- Wriedt, S., Schepke, U., & Wehrbein, H. (2007). The Discoloring Effects of Food on the Color Stability of Esthetic Brackets – an In-vitro Study. *Journal of Orofacial Orthopedics / Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 68(4), 308–320. <https://doi.org/10.1007/s00056-007-0640-2>
- Wu, X., Zhang, M., & Bhandari, B. (2019). A novel infrared freeze drying (IRFD) technology to lower the energy consumption and keep the quality of Cordyceps militaris. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 54, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.03.003>
- Xue, B., Hui, X., Chen, X., Luo, S., Dilrukshi, H. N. N., Wu, G., & Chen, C. (2022). Application, emerging health benefits, and dosage effects of blackcurrant food formats. *Journal of Functional Foods*, 95, 105147. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105147>
- Yadav, S., Malik, A., Pathera, A., Islam, R. U., & Sharma, D. (2016). Development of dietary fibre enriched chicken sausages by incorporating corn bran, dried apple pomace and dried tomato pomace. *Nutrition and Food Science*, 46(1), 16–29. <https://doi.org/10.1108/NFS-05-2015-0049>
- Younis, K., & Ahmad, S. (2015). Waste utilization of apple pomace as a source of functional ingredient in buffalo meat sausage. *Cogent Food and Agriculture*, 1(1), 1119397. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1119397>
- Zlatanović, S., Kalušević, A., Micić, D., Laličić-Petronijević, J., Tomić, N., Ostojić, S., & Gorjanović, S. (2019). Functionality and storability of cookies fortified at the industrial scale with up to 75% of apple pomace flour produced by dehydration. *Foods*, 8(11), 561. <https://doi.org/10.3390/foods8110561>
- Zorić, Z., Pedisić, S., Kovačević, D. B., Ježek, D., & Dragović-Uzelac, V. (2016). Impact of packaging material and storage conditions on polyphenol stability, colour and sensory characteristics of freeze-dried sour cherry (prunus cerasus var. Marasca). *Journal of Food Science and Technology*, 53(2), 1247–1258. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2097-4>

7. DOROBEK NAUKOWY

Publikacje naukowe stanowiące rozprawę doktorską:

1. **Karwacka M.**, Galus S., & Janowicz M. (2022). Effect of structure and texture forming additives on properties of freeze-dried snacks—review®. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 130-141.
2. **Karwacka M.**, Rybak K., Smetana S., Galus S., Janowicz M. (2022). Analysis of selected functional properties, resource demands, and energy consumption of freeze-dried vegetable snacks. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(7), e16721. DOI:10.1111/jfpp.16721
3. **Karwacka M.**, Rybak K., Świeca M., Galus S., Janowicz M. (2022). The Effect of the Addition of Selected Fruit Pomace Powders and Pectin as Carrier Agents on the Nutritional Value of Freeze-Dried Snacks. *Sustainability*, 14(20), 13012. DOI:10.3390/su142013012
4. **Karwacka M.**, Ciurzyńska A., Galus S., Janowicz M. (2024). The Effect of Storage Time and Temperature on Quality Changes in Freeze-Dried Snacks Obtained with Fruit Pomace and Pectin Powders as a Sustainable Approach for New Product Development. *Sustainability*, 16(11), 4736. DOI:10.3390/su16114736
5. **Karwacka M.**, Galus S., & Janowicz M. (2024). The effect of apple pomace powder and calcium ions on selected physicochemical properties of freeze-dried carrot-orange-ginger snacks. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(3), 1713-1722. DOI:10.1002/jsfa.13058
6. **Karwacka M.**, Galus S., & Janowicz M. (2024). Development and physicochemical characteristics of multicomponent freeze-dried snacks obtained with blackcurrant pomace powder and calcium ions as structuring agents. *Journal of Food Science and Technology*, 61(7), 1363-1373. DOI:10.1007/s13197-023-05906-w
7. **Karwacka M.**, Galus S., & Janowicz M. (2024). Application of chokeberry pomace as pectin substitute in nonconventional freeze-dried snacks: physicochemical characteristics of the products. *European Food Research and Technology*, 250(12), 2921-2933. DOI:10.1007/s00217-024-04590-0

Pozostałe publikacje naukowe (wg daty opublikowania od najnowszej)

1. **Karwacka M.**, Ciurzyńska A., Janowicz M., Galus S. (2024). Algi morskie – niekonwencjonalny składnik żywności. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 3(140), 38-54. DOI:10.15193/zntj/2024/140/508
2. Szymańska I., Matys A., Rybak K., **Karwacka M.**, Witrowa-Rajchert D., Nowacka M. (2024). Impact of Ultrasound Pre-Treatment on the Drying Kinetics and Quality of Chicken Breast—A Comparative Study of Convective and Freeze-Drying Methods. *Foods*, 13(17), 2850. DOI:10.3390/foods13172850
3. Nowacka M., Szymańska I., Rybak K., **Karwacka M.**, Matys A., Wiktor A., Słowiński M., Witrowa-Rajchert D. (2024). Effect of PEF Treatment on Chosen

- Properties of Raw and Hot Air-and Freeze-Dried Poultry Meat. *Applied Sciences*, 14(5), 1808. DOI:10.3390/app14051808
4. Nowacka M., Rybak K., Trusińska M., **Karwacka M.**, Matys A., Pobiega K., Witrowa-Rajchert D. (2024). Chosen Biochemical and Physical Properties of Beetroot Treated with Ultrasound and Dried with Infrared–Hot Air Method. *Applied Sciences-Basel*, 14(8), 3507. DOI:10.3390/app14083507
 5. Ciurzyńska A., Janowicz M., **Karwacka M.**, Nowacka M., Galus S. (2024). Development and Characteristics of Protein Edible Film Derived from Pork Gelatin and Beef Broth. *Polymers*, 16(7), 1009. DOI:10.3390/polym16071009
 6. Ciurzyńska A., Janowicz M., **Karwacka M.**, Galus S. (2024). Analysis of the Effect of Vegetable Broth Addition to a Gelatin Pork Edible Film and Coating Method on Select Physical Properties of Freeze-Dried Coated Vegetable Bars. *Applied Sciences*, 14(12), 5215. DOI:10.3390/app14125215
 7. Galus S., **Karwacka M.**, Ciurzyńska A., Janowicz M. (2024). Effect of Drying Conditions and Jojoba Oil Incorporation on the Selected Physical Properties of Hydrogel Whey Protein-Based Edible Films. *Gels*, 10(5), 340. DOI:10.3390/gels10050340
 8. Janowicz M., Kadzińska J., Bryś J., Ciurzyńska A., **Karwacka M.**, Galus S. (2023). Physical and Chemical Properties of Vegetable Films Based on Pumpkin Purée and Biopolymers of Plant and Animal Origin. *Molecules*, 28(12), 4626. DOI:10.3390/molecules28124626
 9. Janowicz M., Kadzińska J., Ciurzyńska A., Szulc K., Galus S., **Karwacka M.**, Nowacka M. (2023). The Structure-Forming Potential of Selected Polysaccharides and Protein Hydrocolloids in Shaping the Properties of Composite Films Using Pumpkin Purée. *Applied Sciences*, 13(12), 6959. DOI:10.3390/app13126959
 10. **Karwacka M.**, Ciurzyńska A., Galus S., Janowicz M. (2022). Freeze-dried snacks obtained from frozen vegetable by-products and apple pomace – Selected properties, energy consumption and carbon footprint. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102949. DOI:10.1016/j.ifset.2022.102949
 11. Ciurzyńska A., Galus S., **Karwacka M.**, Janowicz M. (2022). The sorption properties, structure and shrinkage of freeze-dried multi-vegetable snack bars in the aspect of the environmental water activity. *LWT-Food Science and Technology*, 171, 114090. DOI:10.1016/j.lwt.2022.114090
 12. Ciurzyńska A., Janowicz M., **Karwacka M.**, Galus S., Kowalska J., Gańko K. (2022). The Effect of Hybrid Drying Methods on the Quality of Dried Carrot. *Applied Sciences*, 12(20), 10588. DOI:10.3390/app122010588
 13. Janowicz M., Ciurzyńska A., **Karwacka M.**, Kowalska J., Galus S. (2022). Mathematical Estimation of the Energy, Nutritional and Health-Promoting Values of Multi-Layer Freeze-Dried Vegetable Snacks. *Applied Sciences*, 12(13), 6379. DOI:10.3390/app12136379
 14. Ciurzyńska A., Rybak K., **Karwacka M.**, Galus S., Janowicz M. (2022). Vegetable waste in freezing process as a high quality material for freeze-drying, *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 32/60(1), 91-104.

15. **Karwacka M.**, Gumkowska M., Rybak K., Ciurzyńska A., Janowicz M. (2021). Impact of Sodium Alginate and Dried Apple Pomace Powder as a Carrier Agent on the Properties of Freeze-Dried Vegetable Snacks. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 71(4), 451-461. DOI:10.31883/pjfn/143584
16. **Karwacka M.**, Ciurzyńska A., Lenart A., Janowicz M. (2020). Sustainable Development in the Agri-Food Sector in Terms of the Carbon Footprint: A Review. *Sustainability*, 12(16), 6463. DOI:10.3390/su12166463
17. **Karwacka M.**, Ciurzyńska A., Janowicz M. (2020). Rola oceny cyklu życia produktów w analizie wpływu sektora rolno-spożywczego na środowisko, *Przemysł Spożywczy*, 74(4), 22-26. DOI:10.15199/65.2020.4.4

Udział w projektach badawczych

1. Wykonawca w projekcie BIOSTRATEG 3 pt. „Opracowanie innowacyjnej metody obliczania śladu węglowego dla podstawowego koszyka produktów żywnościowych” (BIOSTRATEG3/343817/17/NCBR/2018) akronim CFOOD, finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju przy zadaniu „Opracowanie technologii produkcji zdrowej żywności z uwzględnieniem zagospodarowania pełnowartościowych odpadów spożywczych (wysortu warzywnego) i opracowanie metody obliczania śladu węglowego”, 10.2019-10.2021

Doniesienia konferencyjne

1. VIII Edycja Ogólnopolskiej Konferencji Młodych Naukowców „Nowe wyzwania dla polskiej nauki”, Warszawa, Polska, 5/12.12.2020 (Online). Prezentacja ustna pt. Wpływ składu surowcowego oraz technologii wytwarzania na wybrane właściwości fizyczne liofilizowanych batonów warzywnych (**Magdalena Karwacka**)
2. III Konferencja Doktorantów „Cztery Żywioty – Współczesne problemy w naukach o życiu”, Warszawa, Polska, 18.12.2020 (Online). Prezentacja ustna pt. Zrównoważone gospodarowanie odpadami w przemyśle spożywczym na przykładzie wytworów owocowych (**Magdalena Karwacka**, Monika Janowicz)
3. XXV Jubileuszowa Sesja Naukowa Sekcji Młodej Kadry Naukowej PTTŻ „Przyszłość w żywności - żywność w przyszłości”, Wrocław, Polska, 20-21.05.2021 (Online). Prezentacja ustna pt. Wpływ składu i technologii wytwarzania na wybrane właściwości i ślad węglowy liofilizowanych przekąsek warzywnych (**Magdalena Karwacka**, Monika Janowicz)
4. XLV Sesja Naukowej Komitetu Nauk o Żywności i Żywieniu „Żywność w strategii zielonego ładu”, Gdańsk, Polska, 1-2.07.2021. Prezentacja ustna pt. Wybrane właściwości liofilizowanych przekąsek warzywnych wytworzonych z wykorzystaniem pełnowartościowych odpadów (**Magdalena Karwacka**, Martyna Gumkowska, Monika Janowicz)
5. XIV Konferencja Naukowa z cyklu „Żywność XXI wieku - Żywność a oczekiwania współczesnego konsumenta”, Kraków, Polska, 16-17.09.2021. Prezentacja ustna pt. Wybrane właściwości fizyczne i ślad węglowy liofilizowanych przekąsek owocowo-

- warzywnych z dodatkiem hydrokoloidów i wyłoków owocowych (**Magdalena Karwacka**, Sabina Galus, Monika Janowicz)
6. 10th Edition of the International Euro-Aliment Symposium 2021 “Food connects people and shares science in a resilient world”, Galati, Rumunia, 7-8.10.2021 (Online). Prezentacja ustna pt. Carbon footprint and selected physicochemical properties of freeze-dried fruit and vegetable snacks obtained with fruit pomace and hydrocolloids (**Magdalena Karwacka**, Monika Janowicz)
 7. ELLS Scientific Student Conference 2021 „Green (r)evolution – from molecules to ecosystems”, Warszawa, Polska, 19-20.11.2021 (Online). E-poster pt. The influence of carriers on the composition and chemical properties of freeze-dried vegetable snacks (**Magdalena Karwacka**, Martyna Gumkowska, Monika Janowicz)
 8. IV Konferencja Doktorantów „Cztery Żywioty – Współczesne problemy w naukach o życiu”, Lublin, Polska, 14.12.2021 (Online). Prezentacja ustna pt. Zużycie energii i ślad węglowy liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych wytwarzanych w skali laboratoryjnej (**Magdalena Karwacka**, Aleksandra Matys, Sabina Galus, Monika Janowicz)
 9. IV Konferencja Doktorantów „Cztery Żywioty – Współczesne problemy w naukach o życiu”, Lublin, Polska, 14.12.2021 (Online). Prezentacja ustna pt. Wpływ pulsacyjnego pola elektrycznego i zmiennych parametrów powietrza na przebieg suszenia konwekcyjnego i wybrane cechy jakościowe tkanki jabłka (Aleksandra Matys, Artur Wiktor, **Magdalena Karwacka**, Dorota Witrowa-Rajchert)
 10. 8th International Conference on Innovative Scientific Research, Adana, Turcja, 15-17.04.2022 (Online). Prezentacja ustna pt. Physicochemical properties of freeze-dried snacks obtained with apple pomace powder as carrier agent (**Magdalena Karwacka**, Sabina Galus, Agnieszka Ciurzyńska, Monika Janowicz)
 11. 8th International Conference on Innovative Scientific Research, Adana, Turcja, 15-17.04.2022 (Online). Prezentacja ustna pt. The effect of storage conditions on the properties of innovative freeze-dried multilayer vegetable snacks obtained according to sustainable production, with the use of vegetable waste (Agnieszka Ciurzyńska, Dominika Obłąkowska, Monika Janowicz, **Magdalena Karwacka**, Sabina Galus)
 12. XXVI Sesja Naukowa Sekcji Młodej Kadry Naukowej PTTŻ „Żywność dzisiaj – lokalna czy globalna? Tradycyjna czy innowacyjna?”, Poznań, Polska, 19-20.05.2022. Prezentacja ustna pt. Wpływ zastosowania wyłoków owocowych i pektyny jako nośników na właściwości liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych (**Magdalena Karwacka**, Aleksandra Matys, Sabina Galus, Agnieszka Ciurzyńska, Monika Janowicz)
 13. VII Sympozjum Inżynierii Żywności, Warszawa, Polska, 29-30.06.2022. E-poster pt. Wpływ dodatku proszku z wyłoków jabłkowych na właściwości fizykochemiczne liofilizowanych przekąsek marchwiowo-pomarańczowych (**Magdalena Karwacka**, Aleksandra Matys, Sabina Galus, Agnieszka Ciurzyńska, Monika Janowicz)
 14. VII Sympozjum Inżynierii Żywności, Warszawa, Polska, 29-30.06.2022. E-poster pt. Wpływ pulsacyjnego pola elektrycznego na właściwości rekonstrykcyjne truskawek suszonych metodą mikrofalowo-konwekcyjną (Aleksandra Matys, **Magdalena Karwacka**, Dorota Witrowa-Rajchert, Artur Wiktor)

15. VII Sympozjum Inżynierii Żywności, Warszawa, Polska, 29-30.06.2022. E-poster pt. Wpływ odwadniania osmotycznego w niekonwencjonalnych roztworach na właściwości fizyko-chemiczne przekąsek owocowych (Agnieszka Ciurzyńska, Monika Janowicz, **Magdalena Karwacka**)
16. Food Symposium 3.0 - LSU AgCenter / MENDELU / SGGW, Baton Rouge, Louisiana, USA, 20-24.03.2023. E-poster pt. Microstructure and porosity of the multicomponent freeze-dried snacks obtained with apple pomace powder and pectin (**Magdalena Karwacka**, Aleksandra Matys, Sabina Galus, Monika Janowicz)
17. Food Symposium 3.0 - LSU AgCenter / MENDELU / SGGW, Baton Rouge, Louisiana, USA, 20-24.03.2023. E-poster pt. The impact of pulsed electric field on selected properties of strawberries dried by infrared-convective method (Aleksandra Matys, **Magdalena Karwacka**, Dorota Witrowa-Rajchert, Artur Wiktor)
18. XXVII Sesja Naukowa Sekcji Młodej Kadry Naukowej „Rozwój Nauk o Żywności. Zrównoważona przyszłość”, Warszawa, Polska, 11-12.05.2023. Prezentacja ustna pt. Wpływ wytlóków jabłkowych i jonów wapnia na charakterystykę liofilizowanych przekąsek (**Magdalena Karwacka**, Sabina Galus, Monika Janowicz)
19. 17th Baltic Conference on Food Science and Technology FOODBALT 2024 “Sustainable food production – a challenge for the whole production chain” Tartu, Estonia, 8-10.05.2024. Prezentacja ustna pt. Second life for food industry by-products – Valorization of blackcurrant pomace as a functional component in restructured freeze-dried snacks (**Magdalena Karwacka**, Małgorzata Nowacka, Sabina Galus, Monika Janowicz)
20. XXVIII Sesja Naukowa Sekcji Młodej Kadry Naukowej „Żywność wobec wyzwań współczesnego świata”, Gdańsk, Polska, 16-17.05.2024. E-poster pt. Wpływ temperatury i czasu przechowywania na jakość liofilizowanych przekąsek owocowo-warzywnych z dodatkiem wytlóków owocowych (**Magdalena Karwacka**, Małgorzata Nowacka, Sabina Galus, Monika Janowicz)
21. VIII Sympozjum Inżynierii Żywności, Warszawa, Polska, 1-3.07.2024. Prezentacja ustna pt. Analiza wybranych właściwości fizycznych liofilizowanych batonów warzywnych powlekanych powłoką na bazie żelatyny wieprzowej z dodatkiem bulionu warzywnego (Agnieszka Ciurzyńska, Monika Janowicz, **Magdalena Karwacka**, Sabina Galus)

Odbyte staże naukowe i szkoły letnie

1. Staż naukowy pt. „Effect of high-pressure impregnation on the properties of obtained fruit product” (Własny Fundusz Stypendialny SGGW w Warszawie) w Department of Agricultural and Food Sciences, University of Bologna, Cesena, Włochy, 1.06–31.08.2023
2. Szkoła letnia “Production and Consumption of Processed Vegetable Foods Summer School – Emilia Romagna Food Science Advanced Doctoral Training Programme”, Bertinoro, Włochy, 26-30.06.2023

Nagrody i wyróżnienia

1. Wyróżnienie za wygłoszony referat podczas VIII Edycji Ogólnopolskiej Konferencji Młodych Naukowców „Nowe wyzwania dla polskiej nauki”, Warszawa, 5/12.12.2020
2. Główna nagroda za wygłoszony referat pt. „Wybrane właściwości liofilizowanych przekąsek warzywnych wytworzonych z wykorzystaniem pełnowartościowych odpadów” podczas XLV Sesji Naukowej Komitetu Nauk o Żywności i Żywieniu „Żywność w strategii zielonego ładu”, Gdańsk, 1-2.07.2021
3. Wyróżnienie za wygłoszony referat podczas IV Konferencji Doktorantów „Cztery Żywioły – Współczesne problemy w naukach o życiu”, Lublin, 14.12.2021
4. Wyróżnienie za E-poster podczas VII Sympozjum Inżynierii Żywności, Warszawa 29-30.06.2022
5. Nagroda za wygłoszony referat podczas XXVII Sesji Naukowej Sekcji Młodej Kadry Naukowej „Rozwój Nauk o Żywności. Zrównoważona przyszłość”, Warszawa, 11-12.05.2023
6. Nagroda zespołowa II stopnia JM Rektora SGGW za osiągnięcia badawcze, 2022
7. Nagroda zespołowa II stopnia JM Rektora SGGW za osiągnięcia badawcze, 2023
8. Nagroda zespołowa II stopnia JM Rektora SGGW za osiągnięcia badawcze, 2024

8. PUBLIKACJE STANOWIĄCE ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ ORAZ
OŚWIADCZENIA WSPÓŁAUTORÓW

Mgr inż. Magdalena KARWACKA

Dr hab. inż. Sabina GALUS

Dr hab. inż. Monika JANOWICZ, prof. SGGW

Department of Food Engineering and Process Management, Institute of Food Sciences, Warsaw University of Life Science (SGGW-WULS), Warsaw, Poland

Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Instytut Nauk o Żywności
Szkola Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Polska

EFFECT OF STRUCTURE AND TEXTURE FORMING ADDITIVES ON PROPERTIES OF FREEZE-DRIED SNACKS – REVIEW®

Wpływ dodatku substancji kształtujących strukturę i teksturę na właściwości liofilizowanych przekąsek – przegląd®

Key words: freeze-dried snacks, hydrocolloids, fruit pomace, carrier agent, food properties.

The purpose of this paper was to review recent findings focused on the development of freeze-dried snacks with addition of hydrocolloids as carrier agents and evaluate the possibility of replacement of such additives with fruits pomace on the base of reports conducted on their application as additives modifying properties of various food products. The use of hydrocolloids allows to obtain freeze-dried gels characterised by porous and crispy structure that attracts consumers. These carrier agents increase glass transition temperature and reduce water adsorption ability of products, improving their stability and easing storage. On the other hand, fruit pomace managed as new foods ingredients affect functional properties of products too. There are findings proving that dried pomace powders affect quality of bread, confectionaries, yoghurt and meat products, principally enhancing their nutritional value and texture. Moreover, products fortified with fruit pomace are attractive and interesting for consumers, what improve their value even more. Dried fruit pomace powders has great potential for application in food industry, especially considering environmental point of view, therefore replacement of hydrocolloids in freeze-dried products seems to be promising subject for further research.

Słowa kluczowe: liofilizowane przekąski, hydrokoloidy, wytloki owocowe, nośniki, modyfikacja właściwości żywności.

Celem pracy był przegląd najnowszych doniesień naukowych dotyczących opracowywania liofilizowanych przekąsek z dodatkiem hydrokoloidów jako nośników oraz dokonanie oceny możliwości zastąpienia tych składników wytløkami owocowymi na podstawie wyników otrzymanych w czasie badań prowadzonych na różnych produktach spożywczych wzbogaconych dodatkiem wytløków. Dzięki zastosowaniu hydrokoloidów możliwe jest otrzymanie liofilizowanych żeli charakteryzujących się porowatą i chrupką strukturą, która jest atrakcyjna dla konsumentów. Te nośniki podwyższają także temperaturę przejścia szklanego produktów oraz obniżają zdolność pochłaniania wody z otoczenia, co poprawia stabilność i ułatwia przechowywanie. Zastosowanie wytløków owocowych wpływa także na właściwości funkcjonalne żywności. Wykazano, że dodatek proszku z wytløków kształtuje jakość produktów piekarsko-ciastkarskich, mlecznych oraz mięsnych, ze szczególnym uwzględnieniem wartości odżywczej i tekstury. Ponadto, produkty z dodatkiem wytløków są atrakcyjne dla konsumentów i wzbudzają ich zainteresowanie. Proszki z suszonych wytløków owocowych mają duży potencjał aplikacyjny w przemyśle spożywczym, szczególnie uwzględniając aspekt środowiskowy, dlatego też zastosowanie ich jako zamienników nośników hydrokoloidowych w produktach liofilizowanych jest obiecującym kierunkiem do dalszych badań.

INTRODUCTION

Fruits and vegetables are a natural source of nutrients and bioactive compounds a lot of which may be lost during processing. Because of high water content, extension of shelf life of fruits and vegetables is provided e.g. due to drying, which aims to reduce water content and activity, but also causes changes in products quality. Therefore, among many drying

methods, freeze-drying was found to be the one ensuring the best quality of obtained products in terms of raw material characteristics preservation [4]. Recent research, focused on the development of healthy and attractive for consumers snacks, shows that producing of fruit and vegetable snacks due to freeze-drying requires the use of carrier agents that support structure, texture and functional properties creation [22]. That

need results from low glass transition temperature of simple carbohydrates contained in aforementioned plant materials. Therefore, high molecular weight compounds (biopolymers), like hydrocolloids, maltodextrins, proteins and fibres, are applied to increase glass transition temperature that improves processing efficiency and, what is more important, products quality and stability [27,35]. Low glass transition temperature causes unwanted changes, such as stickiness, caking, structure collapse and phase transition, as a consequence of which products lose crispiness and became gummy, occurring even already at the time of freeze-drying or during storage [35]. The addition of carrier agents results in obtaining better quality and stability of products, but particular compounds used in this role affect characteristics of freeze-dried materials in the matter of mechanical, chemical and functional properties in their own way [13].

There were several research on the possibilities of using various biopolymers as additives modifying properties of freeze-dried snacks based on fruits, vegetables, pulps, juices and concentrates [8,9,14,35], but knowing freeze-drying is very time and energy consuming process, those products may not fit in the policy of food and agriculture industry sustainable development [20,39]. It is a fact that manufacturing of hydrocolloids, being compounds typically used as carrier agents, also is energy and resource demanding and such components usually are acquired using by-products as raw materials [17]. Combining that with recent findings about ability of such by-products, e.g. fruits pomace that are used as source for pectin extraction, to have positive influence on

properties of food products they are applied in [24], it seems to be promising direction for further research to substitute traditional additives with new, more sustainable ones.

Therefore, the purpose of this review was to summarize recent findings focused on the development of freeze-dried snacks with addition of hydrocolloids as carrier agents. The second part was to evaluate the possibility of replacement of such additives with fruits pomace on the base of reports conducted on juice production by-products used as additives modifying various food products properties.

HYDROCOLLOIDS AS CARRIER AGENTS IN FREEZE-DRIED PRODUCTS BRIEF CHARACTERISTIC OF HYDROCOLLOIDS

Hydrocolloids are long chain carbohydrates and proteins the properties of which, including water absorption capability, strongly depend on their molecular structure and configuration [5,10,26] in association with external condition, e.g. pH, sugar content and ionic strength of the solution [8,10,14]. The use of hydrocolloids allows to recreate porous matrixes comparable to cellular tissue, but characterised by a set of designed and controlled properties [8]. Optimisation of gels with specific attributes may also be provided by blending various hydrocolloids, mutually influencing their behaviour. Due to synergism, quality of products obtained with biopolymers mixtures -are improved in comparison to features following the stand-alone application of particular

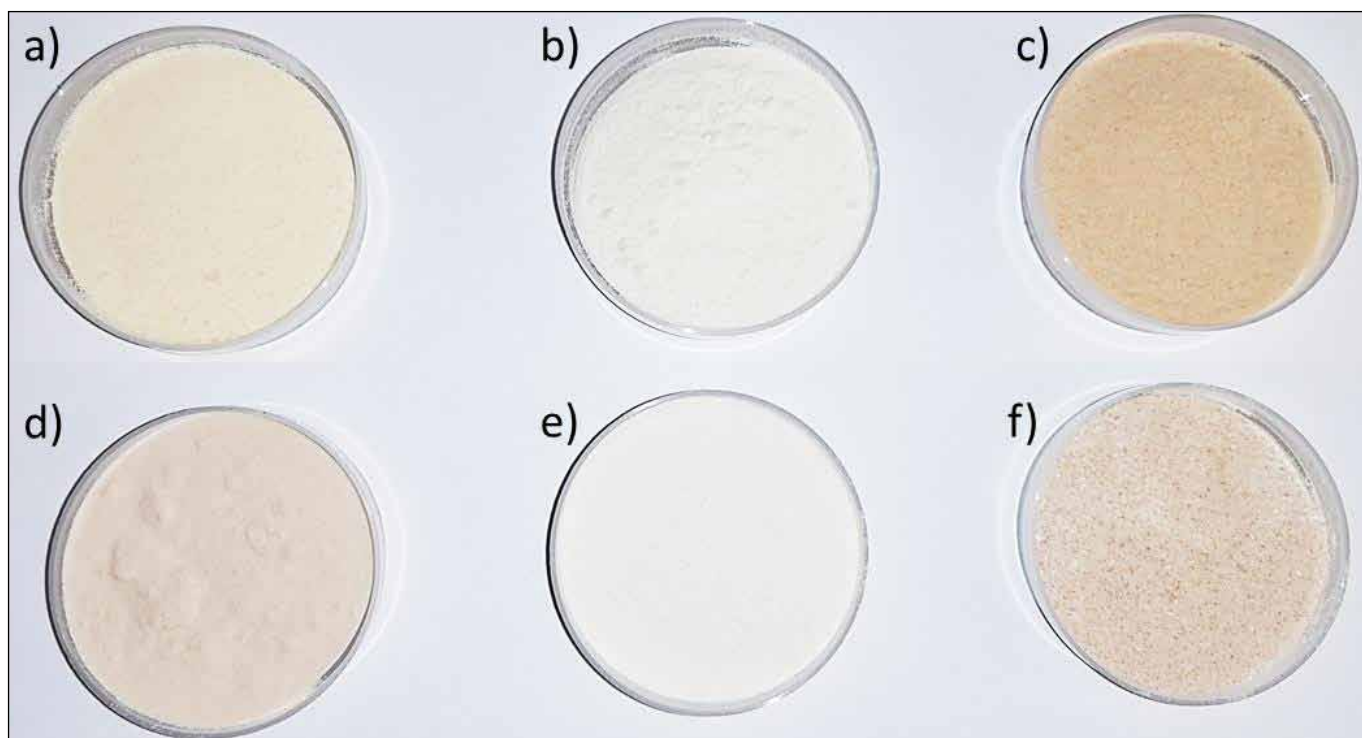


Fig. 1. Exemplary photos of hydrocolloids: guar gum (a), locust bean gum (b), low-methoxyl pectin (c), Arabic gum (d), sodium alginate (e) and high-methoxyl pectin (f).

Rys. 1. Fotografie przykładowych hydrokoloidów: guma guar (a), mączka chleba świętojańskiego (b), pektyna niskometylowana (c), guma arabska (d), alginian sodu (e) oraz pektyna wysokometylowana (f).

Source: Own study

Źródło: Opracowanie własne

compound [10]. Hydrocolloids dissolve or swell, when mixed with water, creating three-dimensional network that can exist at the presence of moisture, causing material to be plastic and viscous, or can be solidified due dehydration at specific conditions [14,18]. The best way to procure solidified gel products, maintaining the internal structure formed by hydrocolloids within processing, is freeze-drying that enables water removal without destroying sensitive bonds [10]. Because of their characteristics, hydrocolloids are used in food industry for various purposes, containing gelling, emulsifying, thickening, coating, structure- and texture-formation [26]. Various hydrocolloids, typically used in scientific research and food technology, are presented in Figure 1.

EFFECT ON WATER-RELATED PROPERTIES

Water acts as plasticiser in freeze-dried products, therefore, apart from microbiological safety, it is the factor determining textural and functional properties. When exposed to water, the freeze-dried material loses its crunchiness and becomes ductile and sticky. Consequently, optimisation of specifically low water content and activity in freeze-dried products is very important in terms of products quality and attractiveness [11,35]. Ciurzyńska et al. [9] investigated the effect of freeze-dried strawberry powder (7, 10%), calcium lactate (0.01, 0.05%), glucose (0, 5.2%) and chokeberry concentrate (0, 5.2%) concentration on the properties of freeze-dried gels obtained with 1.5% sodium alginate addition. Reduced amount of strawberry powder affected water content and activity, causing decrease (from 3.8 to 1.8%) and double increase to 0.39 of such properties, respectively. The investigation of the effect of the contribution of glucose and chokeberry concentrate in the composition of freeze-dried alginate gels revealed that supplementation of sugar source in the form of glucose, concentrate and both reduced water activity (0.39) by more than 50%, but only the addition of simple sugar caused significant increase of water content in the products to 4.9%. It also was found that freeze-dried sodium alginate gels rehydrated better when contained more sugar from fruit concentrates than pure glucose addition. Recently, Jakubczyk et al. [18] found that increasing amount of apple concentrate from 0 to 20% in agar gels had limited water activity reduction due freeze-drying, but maltodextrin used as supportive carrier agent contributed to significant decrease of such property. It was also investigated that freeze-dried gels obtained with strawberry pulp were characterised by lower water activity in comparison to model samples prepared by mixing hydrocolloids, water, sugars and citric acid. However, the use of fruit pulp significantly reduced water absorption capacity of the material, but regardless of composition rehydrated samples contained over 90% of water, which was more than initial water content in fresh mixtures before freeze-drying [12].

Martínez-Navarrete et al. [25] examined the influence of gellan gum and whey protein isolate blends applied in freeze-dried snacks obtained from mandarin juice. It was found that the addition of biopolymers multiplied water content in the products compared to simple freeze-dried juice, what was related to increased amount of non-freezable water that do not sublime within freeze-drying. However, temperature of

processing also affects water removal from the material and, when its increased, dehydration is intensified and final water content lessens, despite shorter drying time. In comparison, Ciurzyńska et al. [14] investigated multilayer freeze-dried snacks based on frozen vegetables, sodium alginate (1.5%) and mixture of locust bean and xantan gum, 1% each, were used to manufacture. Unlike aforementioned products based on fruits or hydrocolloids only, the snacks were characterised by much lower water activity (<0.045) and water content in range of 1.5–3.3%. It was presumed that such results were a consequence of strong water bonding capacity of hydrocolloidal systems used, since preparation of the material for freeze-drying required addition of about 58% of water, but it may be related to lower sugar content in vegetables compared to fruits what indicate more effective water removal as well.

Other research was carried out to examine the effect of hydrocolloid concentration, low-methoxyl pectin at 2, 2.5 and 3.5% specifically, on properties of freeze-dried gels obtained with freeze-dried strawberry powder. It was found that changes in properties are not linear with increasing concentration of hydrocolloid. Material with 2.5% of low-methoxyl pectin featured significantly lower water content and water activity. Even water gain due rehydration did not increase with the rise of carrier agent concentration and samples with 2.5% of pectin absorbed more water than others, but final water content after 30 mint of rehydration at 20°C decreased with the growth of hydrocolloid content [8]. Cassanelli et al. [5] examined impact of amount of hydrocolloid on properties of freeze-dried gels too. They used low and high acyl gellan gums at 1.5, 2, 2.5 and 3% proving that not only concentration but molecular structure of hydrocolloids determine processing and properties of final products. Gels obtained with high acyl gellan gum were characterised by significantly higher water activity and reached its values low enough to ensure microbiological safety after at least 30 h of dehydration, while samples with low acyl gum achieved that level at a time shorter than 24 h, attaining final water activity in range of 0.1–0.2 compared to 0.2–0.4 achieved by material with high acyl gellan gum after 48 h of freeze-drying. That experiment also confirmed that water activity values are not linearly connected with hydrocolloid concentration. A type of gellan gum turned out to be factor settling rehydration properties. Products with high acyl gum gained significantly low water compared to materials structured with low acyl hydrocolloid water content of which were found to depend on gellan gum concentration, thus the addition of 2.5 and 3% notably decreased water absorption capability. Blending of both types of gellan gum (1:1) allowed obtaining of material characterised by water activity reduction and rehydration properties closer to low acyl and high acyl gellan gum, respectively, and not at the halfway.

The use of various biopolymers, such as gums, maltodextrin, starches and fibres, as carrier agents reduces hygroscopicity that is high and crucial for porous freeze-dried materials. An increase of glass transition temperature by 5–15°C resulting from the addition of such compounds blends to orange snacks was estimated too, especially at low water activity [35]. Accordingly, an infusion of carrier agents is followed by an improvement of stability and, as a further consequence, perseverance of products quality during storage.

EFFECT ON COLOUR

Colour of the freeze-dried products is determined by natural colour of compounds used, principally the ones featured the greatest concentration of colourants. The addition of biopolymers induces lightness increase and colour intensity fading, what is related to their natural creamy or close to white colour, which can be observed in Figure 1. On the other hand, freeze-dried materials colour also depends on moisture content and the higher it is, the more intense the colour become, but water could activate biochemical reactions causing colourants degradation and dilution as well [35]. Colour of freeze-dried sodium alginate gels with freeze-dried strawberry powder depended on the addition of the powder and greater quantity intensified colour parameters, such as redness and hue angle, making products more attractive. Glucose and chokeberry concentrate addition to sodium alginate gels with strawberry powder also changed colour of such products in comparison to material without any of those, causing lightness and hue angle decrease and redness growth [9].

Concentration of low-methoxyl pectin in freeze-dried gels with strawberry powder also affected colour parameters, causing lightness and redness of them vary. But among other samples (2 and 3.5%), colour of the material with 2.5% of hydrocolloid was found closer to strawberry powder that was used as reference material, however, the differences of L^* and a^* were still about 10 and 7 units, respectively [8]. Carrier agents affect colour parameters of the material they are in, but they also act like protectors saving colourants from degradation caused by oxidation or thermal treatment [25].

EFFECT ON STRUCTURE AND TEXTURE PROPERTIES

Carrier agents support strengthening of the internal structure of freeze-dried products tending to collapse and lose crispiness to gumminess. Materials featuring high sugar content, such as fruit juices, are difficult to freeze-dry because of its low phase transition temperature that makes them less stable during storage. However, despite the addition of carrier agents, freeze-dried snacks exposed to relatively humid environment lose crunchiness and their mechanical properties change within time [25]. According to Silva-Espinoza et al. [35], biopolymers infusion into the formulation of freeze-dried fruit snacks extends the range of water activity in which the samples retain their properties, making them easier to store.

Structure and texture of the freeze-dried products may be modified not only by containing of certain additives, but also by using specific processes and parameters supporting formation of desired features. Both temperature and pressure, the freeze-drying is conducted at, are parameters influencing specific texture and sensory perception of freeze-dried snacks obtained with biopolymers as carrier agents [32, 33]. Optimisation of freeze-drying conditions also determines energy consumption of the processing, which is high for this dehydration method, so selection of processing parameters that work best lead to improvement of both quality and environmental impact of products [34]. Ciurzyńska and Lenart [7] analysed the effect of a type of hydrocolloid and aeration time, used as a process supporting porous structure formation, on the selected properties of freeze-dried gels. Examination of

low-methoxyl pectin (3%) and mixtures of xantan gum with locust bean (1:0.5%) or guar (0.5:1.5%) gums aerated for 3 or 7 minutes implicated that both, type of carrier and time of aeration, determined properties of materials prepared under the same conditions. It was estimated that porosity of every sample was over 98%. Moreover, mean pores size was specific for each structure-forming additive used and increased with the prolongation of aerating. Structure of the freeze-dried gels obtained with low-methoxyl pectin was more organised and characterised by significantly greater pores, that grew with aeration, what induced higher water gain during rehydration. Combination of hydrocolloids may have an synergistic effect on the gelling properties, but considering presented findings, structure of materials obtained using mixes was more delicate and fragile comparing to samples with low-methoxyl pectin only. However, the authors observed that products structure softness after freeze-drying may be a consequence of gels stability before freezing and dehydration that indicates differences in gelling strength of particular hydrocolloids. The freeze-dried gels obtained with low-methoxyl pectin and the mixtures of gums performing aeration at various time showed that a type of hydrocolloid has strong impact on mechanical and acoustic properties. Samples with pectin were even double harder than gels with xantan and locust bean gums and more cracking of the internal structure were observed within compression of such sample, while curves determined for material formed with other carriers were smoother. Harder texture indicated also stronger acoustic emission that also can attract consumers [11]. In other work, significant impact of a type of hydrocolloid and aeration time on structure and texture of the freeze-dried gels was also proven [10]. The authors found that such factors affect porosity and pores size, internal structure and hardness of products, but it may be modified by addition of sugars, citric acid and calcium lactate mixture that interacts with hydrocolloids and works as strengthening factor, causing material to be compact and less porous at the same time. A comparison of low-methoxyl pectin and various hydrocolloids (xantan, locust bean and guar gums) working in synergistic mixtures structuring model system of strawberry containing 6.8% glucose, 1% sucrose and 0.64% citric acid and gel obtained with strawberry pulp induced that freeze-dried products obtained with pectin featured better and more regular structure, whether it was model or regular sample. It was assumed that using pectin is more beneficial for systems characterised by increased sugar content, therefore that is an additive recommended for optimisation freeze-dried products based on fruits and fruits derivatives [12]. Porosity and pore size distribution can be determined by molecular structure of hydrocolloids. In case of gellan gum at 2%, application of low acyl gellan gum leads structure of the freeze-dried gel to be designated by more numerous smaller pores that are evenly distributed in all volume of the material, while samples with high acyl gum were characterised by disarranged structure with smaller number of large pores in irregular shape. Moreover, combination of both types of gellan gum effected creation of structure with bigger pores in comparison to the material with low acyl gum, but not as large and definitely more organised as those observed in samples with high acyl gellan gum [5]. Carrier agent concentration in freeze-dried products has the greatest impact on structure and texture. An increase of low-methoxyl pectin amount had a great impact on texture of the

freeze-dried gels, causing them to become harder and less fragile. In terms of functional properties and similarity to conventional products (freeze-dried strawberries and freeze-dried strawberry powder) the results were compared to, the best quality was identified in freeze-dried gels with low-methoxyl pectin addition at 2.5%. Since all samples (2 and 3.5%) were prepared using the same processing conditions, the authors explained variation of results to be dependent on different water binding and gelation ability of pectin at various concentration. As a consequence of that, highly porous and fragile structure was developed [8]. Compression test performed on freeze-dried sodium alginate gels shows that both amount of strawberry powder and calcium lactate significantly influenced textural properties of the freeze-dried gels strengthening their structure by increasing quantity of the compounds. Increasing sugar content also induced strengthening of the freeze-dried gels texture [9]. But it should be concerned that enhancement of sugar content by addition of fruit concentrate may cause structure collapse followed by crispiness loss. So in order to obtain possibly the best freeze-dried gels quality, optimal level of sugar should not be over heightened [18]. Moreover, hardness of freeze-dried vegetable gels structured with sodium alginate (13.2–13.3 N) was two times higher than products with the mixture of locust bean and xantan gums. Such results were found much lower in comparison to similar products obtained on the base of fruits, but closer to plain vegetable tissue subjected to freeze-drying. Considering, porosity of the examined materials also was lower and that usually indicates harder texture, referred results confirm the importance of sugar content and its strengthening effect on dehydrated structure [14]. And, according to Martínez-Navarrete et al. [25], consumers prefer snacks that are not particularly harder, but crispier, what is portrayed as turbulent compression curve characterised by a great number of force peaks and drops.

EFFECT ON NUTRITIONAL VALUE AND SENSORY PROPERTIES

Freeze-drying is the process carried out at low temperature and with very oxygen-reduced atmosphere, so bioactive compounds contained in materials processed with this method are safe from degradation in general. There were some mentions that an increase of shelf temperature during freeze-drying may even improve vitamin C extraction from the products, but the addition of high molecular weight biopolymers, like hydrocolloids, as carrier agents may limit accessibility of bioactive compounds as well [25]. On the other hand, Silva-Espinoza et al. [33] found that bioaccessibility of vitamin C and phenolic compounds had grown after freeze-drying of orange snacks, what lead to conclusion on protective effect of infusing biopolymers into the formulation on bioactive compounds retention due dehydration.

A huge part of hydrocolloids is accounted to dietary fibre, which improves natural functioning of human body and shows preventive effect on some of serious diseases, e.g. cardiovascular disease or diabetes [26]. According to Ciurzyńska et al. [8], highly porous structure of freeze-dried products obtained by addition of hydrocolloids seems promising as factor influencing satiety and energy intake through slowing down digestion. Therefore, consumption

of such products seems promising in terms of body weight control. However, consumers should be cautious, because hydrocolloids decrease sensory perception, therefore to improve attractiveness of freeze-dried gels by intensifying their flavour compounds such as sugar and citric acid may be applied [11]. Those enhance textural properties, but increase sugar content and energy intake of products, causing them to be inappropriate for specific groups of consumers, such as diabetics and people working on weight loss. Freeze-dried gels obtained with hydrocolloids, flavour and aroma shaping additives and water only do not represent high nutritional value, but using fruit pulp instead allows to create similar characteristics and obtaining products of quality improved [12].

FRUIT POMACE AS ADDITIVES IN FOOD PRODUCTS BRIEF CHARACTERISTIC OF FRUIT POMACE

Pomace is a by-product, containing solid matter, peels and seeds, remained after fruits processing, e.g. juice or wine production [1]. Due to its relatively high moisture content, one of the most common method of pomace preservation is drying that eases storing and allow to obtain high quality product for further processing [15]. Figure 2 shows powders obtained by grinding dried fruits pomace. As reported by Diez-Sánchez et al. [15], dried pomace obtained from various berry fruits usually contain over 90% of dry matter that consists compounds as protein (2–17%), fat (0.6–22%), carbohydrates (up to 90%), ash (0.7–7%) and total dietary fiber in the range of 16 to even 96%. Berry pomace also contains great amounts of polyphenols that are responsible for high antioxidant capacity. In comparison, approximate composition of dried apple pomace includes protein (1.2–6.9%), fat (0.3–8.5%), simple sugars (14–72.5%), ash (0.5–4.3%) and total dietary fiber up to 82%. Additionally, it supplies polyphenols and micro- and macro- nutrients as well [3]. Pomace usually is disposed for animal feed, but because of low economical value and high bioactive compounds content, pomace infusion into a formulation of new food products became a significant subject of scientific research [1]. It was often exposed that addition of fruit pomace affects stability, nutritional and functional values of food products, including increase of antioxidant capacity and fiber content and prevention of microbiological spoilage and lipid oxidation, but it induces significant sensory and texture changes, which are not always recognise as attractive or even positive [3,15]. Fruit pomace is a rich source of pectin, therefore after subjection to hydrothermal treatment at certain conditions [16], it has a huge potential to create texture and structure of food products.



Fig. 2. Exemplary photos of dried apple (a), raspberry (b), blackcurrant (c) and chokeberry (d) pomace powders.

Rys. 2. Fotografie proszków z suszonych wyłoków jabłkowych (a), malinowych (b), z czarnej porzeczki (c) oraz aronii (d).

Source: Own study

Źródło: Opracowanie własne

FRUITS POMACE AS ADDITIVES CREATING FOOD PRODUCTS PROPERTIES

The effect of the addition of strawberry, raspberry, chokeberry, apple and blackcurrant pomace at 10, 20 and 30% on the characteristics of shortcrust pastries was studied in the bakery and pastry industry. Sensory analysis showed that the addition of fruit pomace increased the attractiveness of the products, improving their taste and aroma. Fruit pomace also significantly enriched the composition of the biscuits, so that they were defined as pro-health products [29]. Similar studies conducted by Siemianowska et al. [31] have also shown that fruit pomace increases the antioxidant activity of shortcakes, and its addition does not negatively affect mechanical, storage and sensory properties. Tańska et al. [37] showed that shortbread cookies with the addition of 20% berry fruit pomace (elderberry, rosehip, rowan, blackcurrant) had similar size and shape compared to the control sample, but had higher hardness, fibre content and antioxidant activity. The additives used also caused a significant change in the colour of the products. During the sensory evaluation, all cookies were evaluated by the panellists to be acceptable in terms of taste, sweetness, aroma, hardness, crispness, shape and colour. Due to their high fibre content, fruit pomace significantly lowers the glycaemic index of biscuit products, making this type of product, in which part of the wheat flour is replaced by pomace, suitable for consumption by diabetics [2].

In the case of bread, the addition of grape pomace also affected the product properties, but in contrast to the previously

discussed cakes, Šporin et al. [36] described the observed changes as unfavourable. Changes in physical properties, such as colour, volume after baking, firmness and elasticity, as well as the sour aftertaste remaining after consumption of bread with added pomace were the reason for the lower product quality assessment. However, the addition of grape pomace significantly increased the polyphenol content and antioxidant activity of the baked goods, thus having a positive effect on their nutritional value and health-promoting properties. The results of studies in which apple pomace [38] and citrus pomace [6,28] were added to bread dough also indicate that the products obtained in this way are characterised by a higher content of fibre, polyphenols and antioxidants, as well as a higher hardness and a markedly different sensory profile compared to baked goods without the addition of pomace.

Jannati et al. [19] tested the influence of apple pomace infusion to traditional Iranian bread at the level of 1, 3, 5, 7%. There was found that extensibility of the dough was significantly reduced regardless the amount of pomace, but adhesive force was increasing with an increase of pomace addition. After baking, the breads with apple pomace were less hard comparing to control sample, which was bread without any addition of pomace, and hardness was growing slower due storage for 72 hours. The amount of pomace decreased also bread cohesiveness factor measured 24 h after baking, but within elongation of the storage time cohesiveness lowered, but the contribution of pomace was no longer significant. The changes in the texture of dough and bread was explained by interaction between gluten and fiber from apple pomace, what led to weakening the gluten network. Apple juice production waste also caused reduction of lightness (L^*) and an increase of a^* (redness) and b^* (yellowness) colour parameters. Moreover, the results of sensory analysis indicate that the addition of apple pomace to the level not higher than 3% improves bread quality and attracts consumers. In this research, the addition of apple pomace was not to extended, but other researchers investigated 25, 50 and 75% replacement of wheat flour to apple pomace flour in cookies in order to obtain reduced gluten confectionery [45]. They reported dietary fiber content enhanced to over 10, 20 and 30 g/100 g while control sample contained only 1.7 g/100 g. Apple pomace addition significantly multiplied total polyphenols and flavonoid contents, what was followed by boost in antioxidant activity. Sensory analysis showed the use of apple pomace flour may enhance structure, chewiness, odour, taste and overall perception, but only if it is coarse, not fine, ground and the amount do not exceed 50%. However, the best notes were received by attributes of cookies with 25% flour substitution, yet considering nutritional value and the lowest changes in bioactive compound content and sensory properties observed after 12 months storage, it was concluded that replacement of wheat flour with coarse apple pomace powder up to 50% may be successfully apply in pastry products. On the other hand, basing on their own research, Liang et al. [23] stated that dough properties and the quality of biscuits were acceptable only with addition of apple pomace powder at the level of 10%, and exceeding such amount, dough and product value dropped rapidly.

Fruit pomace has also found applications as ingredients infused to meat products. Yadav et al. [42] studied the effect of the addition of dried apple pomace on the quality of poultry sausages. The addition resulted in reduced protein and water content, which was reflected during sensory evaluation as reduced juiciness, and increased fibre content. Changes in colour and textural properties were observed, increasing hardness, gumminess and springiness, but despite this, the pomace-enriched products were also rated very well by the sensory evaluation panellists, although they received lower scores than the control sample. Studies carried out on beef sausages showed that apple pomace performs well as an emulsifying agent, has the ability to retain water and oil, has antimicrobial properties and lowers the glycaemic index of products enriched with it. In the case of beef sausage, it was unequivocally found that the addition of pomace improved both the sensory profile, the physicochemical properties and nutritional value of the products [43]. Younis and Ahmad [44] came to similar conclusions when analysing the properties of beef patties enriched with apple pomace powder, which also shaped both the physicochemical, sensory and structural characteristics of the products. In the meat industry, pomace can be used not only as a source of fibre, but also as a fat substitute in calorie-reduced products [30].

In the dairy sector, the possibility of using fruit pomace was studied on the example of yoghurt. In the case of apple pomace, an increase in the total acidity of yoghurts, changes in the rheological properties, including a particularly significant reduction in the hardness of yoghurts, and a reduction in the process of syneresis were observed. In addition, the products were characterised by a significantly darker colour, but despite this they were very well evaluated in terms of taste, which was dominated by distinct fruit notes [46]. Wang et al. [40] found that the addition of freeze-dried apple pomace powder shortens time of yoghurt fermentation and increases gelation pH. Storage stability of yogurts with pomace powder at the level of 0.5% was improved in comparison to control sample and products with the addition of 0.1 and 1% of dried pomace. When investigating stirred yoghurt fortified with

apple pomace, water holding capacity of pomace powder also reduced syneresis, influencing textural properties and storage stability as well. Supplementation was followed by significant increase of polyphenols and dietary fiber in the products, what enhanced their nutritional value [41].

The addition of dried red grape pomace powder as sugar and milk powder substitute in chocolate spreads affected firmness and spreadability, which are crucial parameters for texture of this type of products. It heightened total phenols content, but limited digestibility. Moreover, increasing amount of grape pomace (up to 15%) induced unfavourable changes in sensory perception, so optimal content was recommended to not exceed 10%. It was also emphasized that factors as particle size of pomace powder and processing parameters (conching time, ball-mill rotation) should be modified to adjust product quality [1].

Lately, there were also a few attempts of applying fruit pomace in the form of dried powder as carrier agents in freeze-dried vegetable products [21,22]. The authors pointed out an increasing importance of environmental problems facing food industry and the future of human population in general, which, from food producing point of view, may be reduced by reusing of food waste and by-products as material for new products development. And considering current global changes, such as climate warming and population growth, even the slightest action aimed to sustainability is worth considering. Moreover, a type of carrier agent used in the formulation of freeze-dried snacks determines products appearance and attractiveness for consumers, what is presented in Figure 3. Freeze-dried snacks obtained by Karwacka et al. [21] were characterised by properties similar to aforementioned products obtained with hydrocolloids as carrier agents. Water activity of the products was very low and did not exceed 0.02 and such level was not achieved by any of freeze-dried snacks reported before. Structure of the materials also was highly porous (86-90%), but defined as more fragile and brittle but their hardness was significantly greater than those obtained for other freeze-dried products. Interestingly, such snacks were manufactured only with vegetables (string beans, carrot, potato) and 2% addition

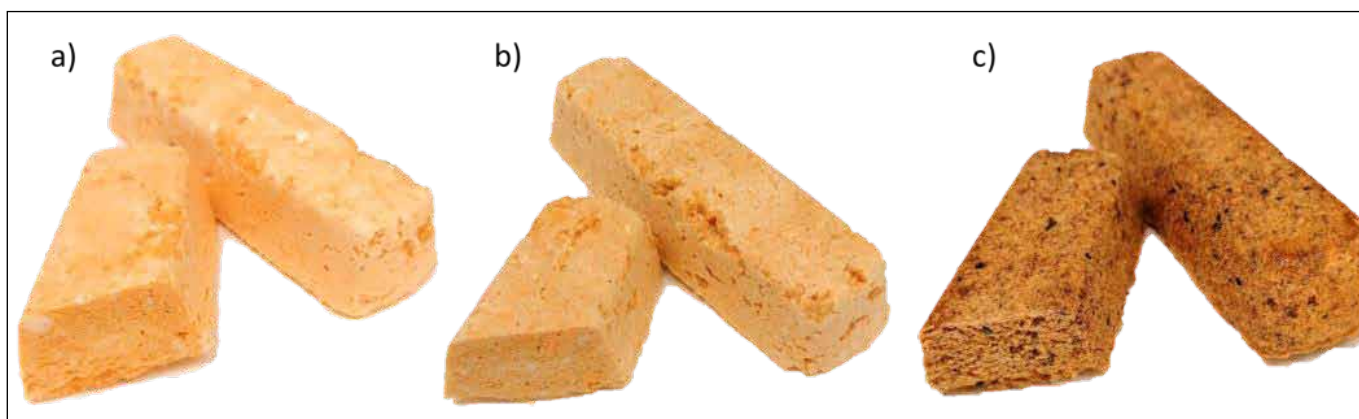


Fig. 3. Freeze-dried carrot snacks obtained with 1.5% of low-methoxyl pectin (a), 2% of dried apple pomace powder (b) and 2% of dried blackcurrant pomace powder (c).

Rys. 3. Liofilizowane przekąski marchewkowe z dodatkiem 1.5% pektyny niskometylowanej (a), 2% proszku z suszonych wyłoków jabłkowych (b) oraz 2% proszku z suszonych wyłoków z czarnej porzeczki (c).

Source: Own study

Źródło: Opracowanie własne

of dried apple pomace powder, without any liquid or additives that could had support formation of proper structure and texture of products. The addition of traditional hydrocolloid carrier, which was sodium alginate at level of 1.5% combined with 0.01% of calcium lactate, required halving the amount of vegetable compound and water substitution [22]. As an effect, despite lower initial water content, freeze-drying process had been lasting as long as it was recorded for samples with sodium alginate, meaning close to 48 h. The use of apple pomace powder as carrier agent resulted in more fragile texture that did not crack under pressure, but slowly compressed, what indicates lower crunchiness and could be related to smaller pores appearance in the structure of the snacks. Regardless weaker structure- and texture-forming ability of apple pomace, attempts to apply them as additives in food products is still promising and worth further research because of health benefits following those compounds. Compared to sodium alginate, dried apple pomace powder multiplied total phenols content and antioxidant capacity of the vegetable snacks, enhancing their pro-health value.

SUMMARY

Recently, development of new freeze-dried products that would do both attract consumers and reduce environmental impact of this type of products is intensively investigated. One of the key role in such process is optimisation of proper formulation that will result in the products characterised by desired quality, which can be modified by infusion of functional additives. A conscious choice of carrier agent applied in the formulation of foods is very important, principally considering its impact on crucial parameters of products, such as physicochemical, textural and structural properties along with sensory perception and nutritional value. Hydrocolloids are typically used as such compounds, however, in the light of recent reports and trends in scientific research motivated by the problem of food waste management, a new branch has emerged regarding the use of fruit pomace

as a functional food ingredient. Numerous investigations provided on various food products fortified with fruit pomace show that they significantly affect food properties, especially enhancing nutritional value by increasing dietary fiber and bioactive compounds content that also results in higher antioxidant capacity. On the base of all of the referred findings and discovered properties, fruit pomace has a potential to be apply as substitutes for hydrocolloid carrier agents in freeze-dried snacks.

PODSUMOWANIE

W ostatnim czasie bardzo intensywnie prowadzone są badania nad opracowaniem liofilizowanych produktów, które będą jednocześnie atrakcyjne dla konsumentów i przyjazne dla środowiska. Jednym z kluczowych rozwiązań jest optymalizacja składu w taki sposób, aby otrzymać produkty charakteryzujące się pożądaną jakością, którą można modyfikować poprzez stosowanie dodatków funkcyjnych. Świadomy wybór nośników dodawanych do żywności jest bardzo ważny, szczególnie po uwzględnieniu ich wpływu na fundamentalne cechy produktów, takie jak właściwości fizyko-chemiczne, tekstura i struktura, a także atrybuty sensoryczne i wartość odżywcza. Zwykle w tym celu stosuje się hydrokoloidy, natomiast w świetle najnowszych doniesień i trendów obserwowanych w nauce, napędzanych problemem zagospodarowania odpadów, pojawiła się nowa gałąź, badająca możliwości wykorzystania wyłoków owocowych jako funkcjonalnych składników żywności. Przeprowadzono liczne badania, wzbogacając różnorodne produkty spożywcze dodatkiem wyłoków owocowych, które istotnie wpłynęły na ich właściwości, szczególnie wartość odżywczą i prozdrowotną, co nastąpiło w konsekwencji zwiększenia zawartości błonnika i związków bioaktywnych, a co za tym idzie większej aktywności przeciwutleniającej. Na bazie wszystkich przytoczonych prac oraz wykazanych właściwości wyłoków owocowych, można stwierdzić, że wykazują one duży potencjał jako zamienniki nośników hydrokoloidowych w liofilizowanych przekąskach.

REFERENCES

- [1] ACAN B. G., M. KILICLI, K. BURSA, O. S. TOKER, I. PALABIYIK, M. GULCU, M. YAMAN, R. GUNES, N. KONAR. 2021. "Effect of grape pomace usage in chocolate spread formulation on textural, rheological and digestibility properties". *LWT-Food Science and Technology* 138: 110451.
- [2] ALONGI M., S. MELCHIOR, M. ANESE. 2019. "Reducing the glycemic index of short dough biscuits by using apple pomace as a functional ingredient". *LWT-Food Science and Technology* 100: 300–305.
- [3] ANTONIC B., S. JANCIKOVA, D. DORDEVIC, B. TREMLOVA. 2020. "Apple pomace as food fortification ingredient: A systematic review and meta-analysis". *Journal of Food Science* 85(10): 2977–2985.
- [4] BHATTA S., T. STEVANOVIC JANEZIC, C. RATTI. 2020. "Freeze-drying of plant-based foods". *Foods* 9(1): 87.

REFERENCES

- [1] ACAN B. G., M. KILICLI, K. BURSA, O. S. TOKER, I. PALABIYIK, M. GULCU, M. YAMAN, R. GUNES, N. KONAR. 2021. "Effect of grape pomace usage in chocolate spread formulation on textural, rheological and digestibility properties". *LWT-Food Science and Technology* 138: 110451.
- [2] ALONGI M., S. MELCHIOR, M. ANESE. 2019. "Reducing the glycemic index of short dough biscuits by using apple pomace as a functional ingredient". *LWT-Food Science and Technology* 100: 300–305.
- [3] ANTONIC B., S. JANCIKOVA, D. DORDEVIC, B. TREMLOVA. 2020. "Apple pomace as food fortification ingredient: A systematic review and meta-analysis". *Journal of Food Science* 85(10): 2977–2985.
- [4] BHATTA S., T. STEVANOVIC JANEZIC, C. RATTI. 2020. "Freeze-drying of plant-based foods". *Foods* 9(1): 87.

- [5] CASSANELLI M., I. NORTON, T. MILLS. 2018. "Role of gellan gum microstructure in freeze drying and rehydration mechanisms". *Food Hydrocolloids* 75: 51–61.
- [6] CHANG R. C., C. Y. LI, S. Y. SHIAU. 2015. "Physico-chemical and sensory properties of bread enriched with lemon pomace fiber". *Czech Journal of Food Sciences* 33(2): 180–185.
- [7] CIURZYŃSKA A., A. LENART. 2016. "Effect of the aerated structure on selected properties of freeze-dried hydrocolloid gels". *International Agrophysics* 30(1): 9–17.
- [8] CIURZYŃSKA A., A. LENART, J. KARWOSIŃSKA. 2015. "Effect of quantity of low-methoxyl pectin on physical properties of freeze-dried strawberry jellies". *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences* 65(4): 233–241.
- [9] CIURZYŃSKA A., A. LENART, W. TRACZYK. 2013. "Influence of chemical composition and structure of strawberry gels on the chosen physical properties of freeze-dried final product". *Italian Journal of Food Science* 25(2): 149–159.
- [10] CIURZYŃSKA A., A. MARZEC, A. MIESZKOWSKA, A. LENART. 2017. "Structure influence on mechanical and acoustic properties of freeze-dried gels obtained with the use of hydrocolloids". *Journal of Texture Studies* 48(2): 131–142.
- [11] CIURZYŃSKA A., A. MIESZKOWSKA, I. OLSIŃSKI, A. LENART. 2017. "The effect of composition and aeration on selected physical and sensory properties of freeze-dried hydrocolloid gels". *Food Hydrocolloids* 67: 94–103.
- [12] CIURZYŃSKA A., A. PISARSKA, I. OLSIŃSKI, A. M. PANFILUK, M. S. OSTAP, A. LENART. 2018. "Effect of composition changes and aeration time on the structure and rehydration of innovative freeze-dried gels". *International Agrophysics* 32(3): 429–435.
- [13] CIURZYŃSKA A., P. CIEŚLUK, M. BARWIŃSKA, W. MARCZAK, A. ORDYNIAK, A. LENART, M. JANOWICZ. 2019. "Eating habits and sustainable food production in the development of innovative "healthy" snacks". *Sustainability* 11(10): 2800.
- [14] CIURZYŃSKA A., W. MARCZAK, A. LENART, M. JANOWICZ. 2020. "Production of innovative freeze-dried vegetable snack with hydrocolloids in terms of technological process and carbon footprint calculation". *Food Hydrocolloids* 108: 105993.
- [15] DIEZ-SÁNCHEZ E., A. QUILES, I. HERNÁNDO. 2021. "Use of Berry Pomace to Design Functional Foods". *Food Reviews International*: 1–21.
- [16] EBLAGHI M., J. E. BRONLUND, F. M. YEDRO, R. H. ARCHER. 2021. "Kinetics of Pectin Reactions in Apple Pomace During Hydrothermal Treatment". *Food and Bioprocess Technology* 14(4): 739–750.
- [5] CASSANELLI M., I. NORTON, T. MILLS. 2018. "Role of gellan gum microstructure in freeze drying and rehydration mechanisms". *Food Hydrocolloids* 75: 51–61.
- [6] CHANG R. C., C. Y. LI, S. Y. SHIAU. 2015. "Physico-chemical and sensory properties of bread enriched with lemon pomace fiber". *Czech Journal of Food Sciences* 33(2): 180–185.
- [7] CIURZYŃSKA A., A. LENART. 2016. "Effect of the aerated structure on selected properties of freeze-dried hydrocolloid gels". *International Agrophysics* 30(1): 9–17.
- [8] CIURZYŃSKA A., A. LENART, J. KARWOSIŃSKA. 2015. "Effect of quantity of low-methoxyl pectin on physical properties of freeze-dried strawberry jellies". *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences* 65(4): 233–241.
- [9] CIURZYŃSKA A., A. LENART, W. TRACZYK. 2013. "Influence of chemical composition and structure of strawberry gels on the chosen physical properties of freeze-dried final product". *Italian Journal of Food Science* 25(2): 149–159.
- [10] CIURZYŃSKA A., A. MARZEC, A. MIESZKOWSKA, A. LENART. 2017. "Structure influence on mechanical and acoustic properties of freeze-dried gels obtained with the use of hydrocolloids". *Journal of Texture Studies* 48(2): 131–142.
- [11] CIURZYŃSKA A., A. MIESZKOWSKA, I. OLSIŃSKI, A. LENART. 2017. "The effect of composition and aeration on selected physical and sensory properties of freeze-dried hydrocolloid gels". *Food Hydrocolloids* 67: 94–103.
- [12] CIURZYŃSKA A., A. PISARSKA, I. OLSIŃSKI, A. M. PANFILUK, M. S. OSTAP, A. LENART. 2018. "Effect of composition changes and aeration time on the structure and rehydration of innovative freeze-dried gels". *International Agrophysics* 32(3): 429–435.
- [13] CIURZYŃSKA A., P. CIEŚLUK, M. BARWIŃSKA, W. MARCZAK, A. ORDYNIAK, A. LENART, M. JANOWICZ. 2019. "Eating habits and sustainable food production in the development of innovative „healthy” snacks". *Sustainability*, 11(10): 2800.
- [14] CIURZYŃSKA A., W. MARCZAK, A. LENART, M. JANOWICZ. 2020. "Production of innovative freeze-dried vegetable snack with hydrocolloids in terms of technological process and carbon footprint calculation". *Food Hydrocolloids* 108: 105993.
- [15] DIEZ-SÁNCHEZ E., A. QUILES, I. HERNÁNDO. 2021. "Use of Berry Pomace to Design Functional Foods". *Food Reviews International*: 1–21.
- [16] EBLAGHI M., J. E. BRONLUND, F. M. YEDRO, R. H. ARCHER. 2021. "Kinetics of Pectin Reactions in Apple Pomace During Hydrothermal Treatment". *Food and Bioprocess Technology* 14(4): 739–750.

- [17] GLICKSMAN M. 2020. "Food hydrocolloids" (Vol. 3). Crc Press.
- [18] JAKUBCZYK E., A. KAMIŃSKA-DWÓRZNI-CKA, E. OSTROWSKA-LIGEZA. 2022. "The effect of composition, pre-treatment on the mechanical and acoustic properties of apple gels and freeze-dried materials". *Gels* 8(2): 110.
- [19] JANNATI N., M. HOJJATOLESLAMY, E. HOSSEINI, H. R. MOZAFARI, M. SIAVOSHI. 2018. "Effect of apple pomace powder on rheological properties of dough and Sangak bread texture". *Carpathian Journal of Food Science & Technology* 10(2): 77–84.
- [20] KARWACKA M., A. CIURZYŃSKA, A. LE-NART, M. JANOWICZ. 2020. "Sustainable development in the agri-food sector in terms of the carbon footprint: A Review". *Sustainability* 12(16): 6463.
- [21] KARWACKA M., A. CIURZYŃSKA, S. GALUS, M. JANOWICZ. 2022. "Freeze-dried snacks obtained from frozen vegetable by-products and apple pomace—Selected properties, energy consumption and carbon footprint". *Innovative Food Science & Emerging Technologies*: 102949.
- [22] KARWACKA, M., M. GUMKOWSKA, K. RYBAK, A. CIURZYŃSKA, M. JANOWICZ. 2021. "Impact of sodium alginate and dried apple pomace powder as a carrier agent on the properties of freeze-dried vegetable snacks". *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences* 71(4): 451–461.
- [23] LIANG X., L. FENG, J. RAN, J. SUN, X. CHEN, Z. JIAO, B. LIU, L. JIAO. 2020. "Influence of adding steam-exploded apple pomace on wheat flour characteristics and biscuit quality". *Journal of Food Science and Technology* 57(8): 3031–3039.
- [24] MAJERSKA J., A. MICHALSKA, A. FIGIEL. 2019. "A review of new directions in managing fruit and vegetable processing by-products." *Trends in Food Science & Technology* 88: 207–219.
- [25] MARTÍNEZ-NAVARRETE N., A. SALVADOR, C. OLIVA, M. M. CAMACHO. 2019. "Influence of biopolymers and freeze-drying shelf temperature on the quality of a mandarin snack". *LWT-Food Science and Technology* 99: 57–61.
- [26] MILANI J., G. MALEKI. 2012. "Hydrocolloids in food industry". In: *Food industrial processes—Methods and equipment* 2: 2–37.
- [27] MUZAFFAR K., P. KUMAR. 2017. "Spray drying of tamarind pulp: effect of process parameters using protein as carrier agent". *Journal of food processing and preservation* 41(2): e12781.
- [28] O'SHEA N., C. RÖBLE, E. ARENDT, E. GALLAGHER. 2015. "Modelling the effects of orange pomace using response surface design for gluten-free bread baking". *Food Chemistry* 166: 223–230.
- [17] GLICKSMAN M. 2020. "Food hydrocolloids" (Vol. 3). Crc Press.
- [18] JAKUBCZYK E., A. KAMINSKA-DWORZNI-CKA, E. OSTROWSKA-LIGEZA. 2022. "The effect of composition, pre-treatment on the mechanical and acoustic properties of apple gels and freeze-dried materials". *Gels* 8(2): 110.
- [19] JANNATI N., M. HOJJATOLESLAMY, E. HOSSEINI, H. R. MOZAFARI, M. SIAVOSHI. 2018. "Effect of apple pomace powder on rheological properties of dough and Sangak bread texture". *Carpathian Journal of Food Science & Technology* 10(2): 77–84.
- [20] KARWACKA M., A. CIURZYŃSKA, A. LE-NART, M. JANOWICZ. 2020. "Sustainable development in the agri-food sector in terms of the carbon footprint: A Review". *Sustainability* 12(16): 6463.
- [21] KARWACKA M., A. CIURZYŃSKA, S. GALUS, M. JANOWICZ. 2022. "Freeze-dried snacks obtained from frozen vegetable by-products and apple pomace—Selected properties, energy consumption and carbon footprint". *Innovative Food Science & Emerging Technologies*: 102949.
- [22] KARWACKA, M., M. GUMKOWSKA, K. RYBAK, A. CIURZYŃSKA, M. JANOWICZ. 2021. "Impact of sodium alginate and dried apple pomace powder as a carrier agent on the properties of freeze-dried vegetable snacks". *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences* 71(4): 451–461.
- [23] LIANG X., L. FENG, J. RAN, J. SUN, X. CHEN, Z. JIAO, B. LIU, L. JIAO. 2020. "Influence of adding steam-exploded apple pomace on wheat flour characteristics and biscuit quality". *Journal of Food Science and Technology* 57(8): 3031–3039.
- [24] MAJERSKA J., A. MICHALSKA, A. FIGIEL. 2019. "A review of new directions in managing fruit and vegetable processing by-products." *Trends in Food Science & Technology* 88: 207–219.
- [25] MARTINEZ-NAVARRETE N., A. SALVADOR, C. OLIVA, M. M. CAMACHO. 2019. "Influence of biopolymers and freeze-drying shelf temperature on the quality of a mandarin snack". *LWT-Food Science and Technology* 99: 57–61.
- [26] MILANI J., G. MALEKI. 2012. "Hydrocolloids in food industry". In: *Food industrial processes—Methods and equipment* 2: 2–37.
- [27] MUZAFFAR K., P. KUMAR. 2017. "Spray drying of tamarind pulp: effect of process parameters using protein as carrier agent". *Journal of food processing and preservation* 41(2): e12781.
- [28] O'SHEA N., C. ROBLE, E. ARENDT, E. GALLAGHER. 2015. "Modelling the effects of orange pomace using response surface design for gluten-free bread baking". *Food Chemistry* 166: 223–230.

- [29] RADZYMIŃSKA M., E. SIEMIANOWSKA, A. PLATTA. 2017. "Fruit pomace as a potential active food ingredient to the production ecological innovative confectionery products". *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Ekonomiczno-Społecznej w Ostrołęce* 25: 383–398.
- [30] RATHER S. A., R. AKHTER, F. A. MASOODI, A. GANI, S. M. WANI. 2015. "Utilization of apple pomace powder as a fat replacer in goshtaba: a traditional meat product of Jammu and Kashmir, India". *Journal of Food Measurement and Characterization* 9(3): 389–399.
- [31] SIEMIANOWSKA E., A. WESOŁOWSKI, A. BARSZCZ, M. RADZYMIŃSKA, M. ALJEWICZ, J. TYBURSKI. 2016. „Wytłoki owocowe jako dodatek do kruchych ciastek”. *Przemysł Spożywczy* 70(10): 41–45.
- [32] SILVA-ESPINOZA M. A., A. SALVADOR, M. D. M. CAMACHO, N. MARTÍNEZ-NAVARRETE. 2021. "Impact of freeze-drying conditions on the sensory perception of a freeze-dried orange snack". *Journal of the Science of Food and Agriculture* 101(11): 4585–4590.
- [33] SILVA-ESPINOZA M. A., E. GARCÍA-MARTÍNEZ, N. MARTÍNEZ-NAVARRETE. 2021. "Protective capacity of gum Arabic, maltodextrin, different starches, and fibers on the bioactive compounds and antioxidant activity of an orange puree (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) against freeze-drying and in vitro digestion". *Food Chemistry* 357: 129724.
- [34] SILVA-ESPINOZA M. A., M. D. M. CAMACHO, J. MARTÍNEZ-MONZÓ, N. MARTÍNEZ-NAVARRETE. 2021. "Impact of the Freeze-Drying Conditions Applied to Obtain an Orange Snack on Energy Consumption". *Foods* 10(11): 2756.
- [35] SILVA-ESPINOZA M. A., M. DEL MAR CAMACHO, N. MARTÍNEZ-NAVARRETE. 2020. "Use of different biopolymers as carriers for purposes of obtaining a freeze-dried orange snack". *LWT – Food Science and Technology* 127: 109415.
- [36] ŠPORIN M., M. AVBELJ, B. KOVAČ, S. S. MOŽINA. 2018. "Quality characteristics of wheat flour dough and bread containing grape pomace flour". *Food Science and Technology International* 24(3): 251–263.
- [37] TAŃSKA M., B. ROSZKOWSKA, S. CZAPLIŃSKI, E. J. BOROWSKA, J. BOJARSKA, A. DĄBROWSKA. 2016. "Effect of fruit pomace addition on shortbread cookies to improve their physical and nutritional values". *Plant Foods for Human Nutrition* 71(3): 307–313.
- [38] TORBICA A., D. ŠKROBOT, E. J. HAJNAL, M. BELOVIĆ, N. ZHANG. 2019. "Sensory and physico-chemical properties of wholegrain wheat bread prepared with selected food by-products". *LWT-Food Science and Technology* 114: 108414.
- [29] RADZYMIŃSKA M., E. SIEMIANOWSKA, A. PLATTA. 2017. "Fruit pomace as a potential active food ingredient to the production ecological innovative confectionery products". *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Ekonomiczno-Społecznej w Ostrołęce* 25: 383–398.
- [30] RATHER S. A., R. AKHTER, F. A. MASOODI, A. GANI, S. M. WANI. 2015. "Utilization of apple pomace powder as a fat replacer in goshtaba: a traditional meat product of Jammu and Kashmir, India". *Journal of Food Measurement and Characterization* 9(3): 389–399.
- [31] SIEMIANOWSKA E., A. WESOŁOWSKI, A. BARSZCZ, M. RADZYMIŃSKA, M. ALJEWICZ, J. TYBURSKI. 2016. „Wytłoki owocowe jako dodatek do kruchych ciastek”. *Przemysł Spożywczy* 70(10): 41–45.
- [32] SILVA-ESPINOZA M. A., A. SALVADOR, M. D. M. CAMACHO, N. MARTÍNEZ-NAVARRETE. 2021. "Impact of freeze-drying conditions on the sensory perception of a freeze-dried orange snack". *Journal of the Science of Food and Agriculture* 101(11): 4585–4590.
- [33] SILVA-ESPINOZA M. A., E. GARCÍA-MARTÍNEZ, N. MARTÍNEZ-NAVARRETE. 2021. "Protective capacity of gum Arabic, maltodextrin, different starches, and fibers on the bioactive compounds and antioxidant activity of an orange puree (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) against freeze-drying and in vitro digestion". *Food Chemistry* 357: 129724.
- [34] SILVA-ESPINOZA M. A., M. D. M. CAMACHO, J. MARTÍNEZ-MONZÓ, N. MARTÍNEZ-NAVARRETE. 2021. "Impact of the Freeze-Drying Conditions Applied to Obtain an Orange Snack on Energy Consumption". *Foods* 10(11): 2756.
- [35] SILVA-ESPINOZA M. A., M. DEL MAR CAMACHO, N. MARTÍNEZ-NAVARRETE. 2020. "Use of different biopolymers as carriers for purposes of obtaining a freeze-dried orange snack". *LWT - Food Science and Technology* 127: 109415.
- [36] SPORIN M., M. AVBELJ, B. KOVAC, S. S. MOZINA. 2018. "Quality characteristics of wheat flour dough and bread containing grape pomace flour". *Food Science and Technology International* 24(3): 251–263.
- [37] TANSKA M., B. ROSZKOWSKA, S. CZAPLIŃSKI, E. J. BOROWSKA, J. BOJARSKA, A. DĄBROWSKA. 2016. "Effect of fruit pomace addition on shortbread cookies to improve their physical and nutritional values". *Plant Foods for Human Nutrition* 71(3): 307–313.
- [38] TORBICA A., D. SKROBOT, E. J. HAJNAL, M. BELOVIC, N. ZHANG. 2019. "Sensory and physico-chemical properties of wholegrain wheat bread prepared with selected food by-products". *LWT-Food Science and Technology* 114: 108414.

- [39] **WAGHMARE R. B., P. CHOUDHARY, J. A. MOSES, C. ANANDHARAMAKRISHNAN, A. G. STAPLEY. 2021.** "Trends in approaches to assist freeze-drying of food: A cohort study on innovations". *Food Reviews International*: 1–22.
- [40] **WANG X., E. KRISTO, G. LAPOINTE. 2019.** "The effect of apple pomace on the texture, rheology and microstructure of set type yogurt". *Food Hydrocolloids* 91: 83–91.
- [41] **WANG X., E. KRISTO, G. LAPOINTE. 2020.** "Adding apple pomace as a functional ingredient in stirred-type yogurt and yogurt drinks". *Food Hydrocolloids* 100: 105453.
- [42] **YADAV S., A. MALIK, A. PATHERA, R. U. ISLAM, D. SHARMA. 2016.** "Development of dietary fibre enriched chicken sausages by incorporating corn bran, dried apple pomace and dried tomato pomace". *Nutrition & Food Science* 46: 16–29.
- [43] **YOUNIS K., S. AHMAD. 2015.** "Waste utilization of apple pomace as a source of functional ingredient in buffalo meat sausage". *Cogent Food & Agriculture* 1(1): 1119397.
- [44] **YOUNIS K., S. AHMAD. 2018.** "Quality evaluation of buffalo meat patties incorporated with apple pomace powder". *Buffalo Bulletin* 37(3): 389–401.
- [45] **ZLATANOVIĆ S., A. KALUŠEVIĆ, D. MICIĆ, J. LALIČIĆ-PETRONIJEVIĆ, N. TOMIĆ, S. OSTOJIĆ, S. GORJANOVIĆ. 2019.** "Functionality and storability of cookies fortified at the industrial scale with up to 75% of apple pomace flour produced by dehydration". *Foods* 8(11): 561.
- [46] **ZNAMIROWSKA A., D. KALICKA, M. BUNIEWSKA, P. ROZEK. 2018.** "Wpływ dodatku suszu z wycieków jabłkowych na właściwości fizykochemiczne i sensoryczne jogurtów". *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*. 25(2): 71–80.
- [39] **WAGHMARE R. B., P. CHOUDHARY, J. A. MOSES, C. ANANDHARAMAKRISHNAN, A. G. STAPLEY. 2021.** "Trends in approaches to assist freeze-drying of food: A cohort study on innovations". *Food Reviews International*: 1–22.
- [40] **WANG X., E. KRISTO, G. LAPOINTE. 2019.** "The effect of apple pomace on the texture, rheology and microstructure of set type yogurt". *Food Hydrocolloids* 91: 83–91.
- [41] **WANG X., E. KRISTO, G. LAPOINTE. 2020.** "Adding apple pomace as a functional ingredient in stirred-type yogurt and yogurt drinks". *Food Hydrocolloids* 100: 105453.
- [42] **YADAV S., A. MALIK, A. PATHERA, R. U. ISLAM, D. SHARMA. 2016.** "Development of dietary fibre enriched chicken sausages by incorporating corn bran, dried apple pomace and dried tomato pomace". *Nutrition & Food Science* 46: 16–29.
- [43] **YOUNIS K., S. AHMAD. 2015.** "Waste utilization of apple pomace as a source of functional ingredient in buffalo meat sausage". *Cogent Food & Agriculture* 1(1): 1119397.
- [44] **YOUNIS K., S. AHMAD. 2018.** "Quality evaluation of buffalo meat patties incorporated with apple pomace powder". *Buffalo Bulletin* 37(3): 389–401.
- [45] **ZLATANOVIC S., A. KALUSEVIC, D. MICIC, J. LALICIC-PETRONIJEVIC, N. TOMIC, S. OSTOJIC, S. GORJANOVIC. 2019.** "Functionality and storability of cookies fortified at the industrial scale with up to 75% of apple pomace flour produced by dehydration". *Foods* 8(11): 561.
- [46] **ZNAMIROWSKA A., D. KALICKA, M. BUNIEWSKA, P. ROZEK. 2018.** "Wpływ dodatku suszu z wycieków jabłkowych na właściwości fizykochemiczne i sensoryczne jogurtów". *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*. 25(2): 71–80.

ORIGINAL ARTICLE

Analysis of selected functional properties, resource demands, and energy consumption of freeze-dried vegetable snacks

Magdalena Karwacka¹  | Katarzyna Rybak¹  | Sergiy Smetana²  | Sabina Galus¹  |
Monika Janowicz¹ 

¹Department of Food Engineering and Process Management, Warsaw University of Life Sciences, SGGW, Warsaw, Poland

²German Institute of Food Technologies (DIL e.V.), Quakenbrück, Germany

Correspondence

Magdalena Karwacka, Department of Food Engineering and Process Management, Warsaw University of Life Sciences, SGGW, 159c Nowoursynowska St., Warsaw 02-787, Poland.
Email: magdalena_karwacka@sggw.edu.pl

Funding information

This work was founded by the National Center for Research and Development, as part of the III BIOSTRATEG. "The development of an innovative carbon footprint calculation method for the basic basket of food products"—task in the project "Development of healthy food production technologies taking into consideration nutritious food waste management and carbon footprint calculation methodology" [BIOSTRATEG3/343817/17/NCBR/2018]. Research equipment was purchased as part of the "Food and Nutrition Centre—modernisation of the WULS campus to create a Food and Nutrition Research and Development Centre (CZiŻ)" co-financed by the European Union from the European Regional Development Fund under the Regional Operational Programme of the Mazowieckie Voivodeship for 2014–2020 [Project No. RPMA.01.01.00-14-8276/17]

Abstract

The study aimed to investigate a possibility of using fruits (apple and blackcurrant) pomace as carrier agents in freeze-dried snacks and analyze selected properties of obtained products in comparison to snacks with addition of pectin as traditional carrier in terms of physical and functional characteristics modification. The addition of fruits pomace powders caused significant porosity and hygroscopicity reduction. The type of carrier also affected color and structure of the freeze-dried snacks. Moreover, applied additives influenced textural properties inducing products with fruits pomace powders brittle and more fragile in comparison to material with pectin. Reformulation did not affect energy consumption that was determined mostly by freeze drying (90%), but replacement of hydrocolloid with fruit pomace powders may reduce environmental impact of freeze-dried products. Considering obtained findings and possibilities resulting from application of pomace in new food products, further research is needed, especially in terms of influencing nutritional value and storage properties by such additives.

Novelty impact statement: The manuscript is focused on the newest approach in food technology related to management of food waste and by-products as additives modifying properties of freeze-dried materials. Our study included examination of the impact of fruits pomace powders as carrier agents in freeze-dried fruit and vegetable snacks in relation to traditional hydrocolloid carrier on selected properties that are important in terms of stability and attractiveness of food products. Second part of the study was assessment of resource demand of manufacturing such products aimed on the possibilities of environmental impact reduction.

1 | INTRODUCTION

Development of freeze-dried snacks has recently been one of the popular topics in food science (Ciurzyńska et al., 2020; Silva-Espinoza et al., 2020). Drying for food processing purposes extends shelf life of products, which is due to the decrease in content and activity of water that works as a plasticizer and determines microbiological and biochemical stability of dried matter (de Santana et al., 2015). Freeze drying is one of the most beneficial food drying

methods. Thanks to its mechanism that is based on sublimation and processing parameters, especially low pressure, allowing for water removal at relatively low temperature and without oxygen; freeze-dried products feature attractive physical properties, such as porosity and texture, including high retention of bioactive compounds and hygroscopicity (Ciurzyńska et al., 2013; Hnin et al., 2019; Jiang et al., 2013). Freeze-dried matter, especially the one characterized by high sugar content such as fruit, is in amorphous state determining the properties. Due to the said characteristics, it is very important

to lower water adsorption capacity that could be attained by adding biopolymers as carrier agents (Silva-Espinoza et al., 2020). Within the last decade, optimization of freeze-dried fruit and vegetable product properties by means of hydrocolloids, such as fiber, gum, pectin, and sodium alginate, in varied combinations has been successfully researched (Ciużyńska et al., 2015, 2020; Silva-Espinoza et al., 2020; Uscanga et al., 2020). Nevertheless, pure biopolymers are often obtained from industrial by-products but the process itself is very complex and time-, energy, and chemical consuming (Glicksman, 2020). The attempt has been recently made to use apple pomace powder as a sustainable alternative to obtain multivegetable snacks (Karwacka et al., 2021), but there is a great need to provide further research to this end.

Pomace is a by-product that is solid residue from juice industry. Previous estimations show that food waste, including organic waste and packaging, contributes almost 7% of global carbon footprint that is an environmental impact indicator. Therefore, recycling of food waste or zero-waste approach may be a good method to mitigate environmental impact and energy loss in food processing (Eriksson & Spångberg, 2017; Oldfield et al., 2016; Slorach et al., 2019). Pomace is a great example of biodegradable and valued food industry waste. In the case of apple processing, it typically represents about 30–40% of raw material input. The fruit waste management focuses on landfilling, composting, incineration, livestock feeding, and reusing it for production of innovative products in accordance with the sustainable development policy (Gassara et al., 2011). Fruit pomace is a source of easily available bioactive compounds, able to improve the human body functions (Yu & Ahmedna, 2013). Because of water-holding capacity and relatively high content of pectin and fiber, several successful attempts have been made to use fruit and vegetable pomace as functional additives in dairy (Znamirowska et al., 2018), meat (Yadav et al., 2016; Younis & Ahmad, 2018), as well as bakery and pastry products (Tańska et al., 2016). All these studies have proven a significant positive impact of the added pomace on texture and structure, including physicochemical and sensory properties.

Food industry is constantly seeking for more sustainable solutions, blending social, environmental, and economic aspects to provide healthy and environment-friendly food to human population (Karwacka et al., 2020). In order to achieve the goals, the inefficient food system has to be redesigned taking into account current trends in consumption, production, health, environment, and future

developments (Lang & Barling, 2012). In the nearest future, population will increase demanding for further intensification of already unsustainable agriculture and food production (Crist et al., 2017). The impact of industry and human activities on the environment is portrayed as environmental footprint containing carbon, water, energy, and nitrogen footprints. Estimation of such indicators requires the application of the life cycle assessment (LCA) that includes detailed estimation of natural resources consumption and emission of waste, pollution, and greenhouse gasses at every subsequent stage of supply chains (Karwacka et al., 2020; Notarnicola et al., 2017; Roy et al., 2009): agriculture, production, storage, transport, consumption, and utilization (Dijkman et al., 2018). Food waste, including organic waste and packaging, has been estimated to contribute to almost 7% of global carbon footprint. Several research studies have proven successful prevention and recycle of food waste as a good method of reducing greenhouse gas emission and energy losses in the food industry (Eriksson & Spångberg, 2017; Oldfield et al., 2016; Slorach et al., 2019).

Therefore, the purpose of the study has been to research into the possibility of using fruit pomace as carrier agents in freeze-dried snacks and analyze selected properties of obtained products in comparison with snacks obtained through adding traditional carriers, hydrocolloids, in terms of modification of physical and functional characteristics.

2 | MATERIALS AND METHODS

2.1 | Material

Frozen carrots were supplied by Unifreeze sp. z o.o (Poland) in the form of cubes (1×1×1 cm). Orange juice (Tymbark, Poland) and ginger were purchased in the local market in Warsaw (Poland). Low-methoxyl pectin (Hortimex, Poland) was used as a hydrocolloid carrier and dried apple and blackcurrant pomace (Greenherb, Poland) as alternative carriers. Calcium lactate (Agnex, Poland) was used as a gelation activator.

2.2 | Sample preparation

For the purpose of preparing freeze-dried snacks, first all compounds were weighed according to the recipes presented in Table 1.

Sample	Composition	
COG-AP	60% carrot	2% dried apple pomace powder
	30% orange juice	
COG-BP	7.5%–8% water ^a	2% dried blackcurrant pomace powder
	0.4% ginger	
COG-LMP	0.1% calcium lactate	1.5% low-methoxyl pectin

^aThe amount of water was determined as the rest remaining after adding all other components, therefore in AP and BP compositions, the portions are 0.5% smaller than in LMP mixtures.

TABLE 1 Composition of freeze-dried carrot–orange–ginger (COG) snacks obtained with the addition of powdered apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace and low-methoxyl pectin (LMP) as carrier agents

A relevant portion of carrot was thawed at an ambient temperature (approx. 25°C) for about 45 min. Carrier agents were hydrated in the calcium lactate solution at the temperature of 80–85°C for 1 min. Those ingredients were placed in a laboratory knife mill GRINDOMIX GM 200 (Retsch, Germany) and cut for 1 min by means of the knife speed of 4500rpm in a continuous mode. Then, the mixture was poured into silicone molds and froze at –40°C in Shock Freezer HCM 51.20 (Irinnox, Italy) for 4–5 h. After freezing, samples were removed from the molds and freeze-dried in Alpha 1–2 LDplus freeze-dryer (Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen GmbH, Germany) at the shelf temperature of 30°C and the pressure of 0.063 kPa for about 48 h.

Freeze-dried snacks were tightly packed in high barrier packaging and stored in a dry place at an ambient temperature. In order to receive reliable results, all the analyses were performed 24–48 h after the end of the production process.

3 | ANALYTICAL METHODS

3.1 | Water content

Dry matter content in freeze-dried snacks was obtained according to the AOAC (2002) by means of drying 0.5–1 g of the input in a laboratory dryer SUP 65 W/G (WAMED, Poland) at the temperature of 70°C for 24 h. Each sample was measured three times.

3.2 | Water activity

Water activity of freeze-dried snacks was determined utilizing HygroLab C1 (Rotronic, Switzerland) at the temperature of 25 ± 1°C in triplicate for each sample.

3.3 | Hygroscopic properties

Hygroscopicity was determined based on the samples exposed to the relative humidity of 75% in a desiccator filled with saturated sodium chloride (NaCl) solution at the temperature of 25 ± 1°C in triplicate (Rybak et al., 2020). Samples were weighed at 0, 0.5, 1, 3, 6, 9, 24, 48, and 72 h. Obtained results were expressed in terms of moisture gain kinetics and equilibrium moisture content acquired after the exposure to the humid environment.

3.4 | Apparent density

Apparent density was obtained through displacement of sea sand. The preweighed sample was put into the glass cylinder and filled with sea sand up to 25 cm³ to determine its volume (Ciurzyńska & Lenart, 2016). The apparent density of the freeze-dried snacks was

calculated as a ratio of sample weight and geometric volume. Each sample was measured five times.

3.5 | Microstructure analysis

The microstructure of freeze-dried snacks was analyzed using X-ray micro-CT SkyScan 1272 system (Bruker, Belgium). Samples were placed on the rotation stage by means of a double-sided sticky tape. Determination was performed at a pixel size of 13.4 μm, 40 kV accelerating voltage, and 193 μA current. To acquire a radiographic image of 2016 by 2016 pixels, the samples were rotated 0.2° during the total rotation of 360°. Obtained images were loaded into NRecon1.6.3.2 computer program (Bruker, Belgium) and converted into 3D reconstruction of the sample. The greyscale images were binarized by means of assigning pixels with lower intensity as background (air, pores) and pixels with higher intensity as freeze-dried snack matter. Porosity was calculated based on the 3D data using CTAn v.1.10.1.0 (Bruker, Belgium).

3.6 | Texture properties

The textural properties of the freeze-dried snacks were determined using TA.HD plus Texture Analyser (Stable Micro Systems, UK) with a platen probe of 20 mm in diameter and local overload of 5 kg. The compression test with the test speed of 0.5 mm/s and 50% deformation was carried out in 20 replicates for each sample.

3.7 | Color

Color was determined by means of Konica-Minolta CM-5 colorimeter (Osaka, Japan) in the CIE L*a*b* system at a reflectance mode. The lightness (L*), redness (a*), and yellowness (b*) were measured within 20 repetitions. Evaluation of color change resulting from freeze drying, the total color difference (ΔE), was estimated according to the following equation:

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

where ΔL*, Δa*, and Δb* are the differences in lightness (L*), redness (a*), and yellowness (b*) between vegetable snacks before and after freeze drying.

3.8 | Resource demand measurements

In order to estimate the resource demand of freeze-dried snacks production, energy consumption of every electrical device used for processing was determined using an Energy Logger 4000F meter (Votcraft, Germany). The volume of input, water, and wastewater

was obtained using a laboratory balance WTC 2000 (RADWAG, Poland).

3.9 | Statistical analysis

To identify significant differences between the average values of the tested parameters of the samples, ANOVA and Tukey tests were performed (at $p = .05$) using STATISTICA 13 software (TIBCO Software, USA).

4 | RESULTS AND DISCUSSION

4.1 | The impact of the carrier type on water content, water activity, and hygroscopic properties

Water determines a lot of properties of food products, such as stability and microbiological safety, which is ensured by water activity below 0.6 (Syamaladevi et al., 2016). Water content obtained for freeze-dried snacks ranged from 1.91% to 2.55% and also conducted low values of water activity (0.030–0.044), which is one of the most important parameters determining quality and stability of food (Table 2). Unexpectedly, the water content in the COG-LMP sample was higher than in samples with the addition of apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace, but the water activity of it was significantly lower in comparison to snacks with pomace powder. Regardless of a carrier agent, obtained snacks were found safe and stable. The low water content and activity usually feature freeze-dried food products, and results obtained in this research are similar to those reported previously in the literature (Ciurzyńska et al., 2020; Jakubczyk & Jaskulska, 2021). As it was described by Silva-Espinoza et al. (2020), low water content is necessary to obtain proper texture of freeze-dried snacks, and using carrier agents allows to achieve such purpose, however, despite the addition of carriers, freeze-dried products need to be protected during storage to avoid unfavorable changes caused by the increase in moisture content.

Figure 1 presents the moisture gain curve in the freeze-dried snacks versus the time of water vapor adsorption, whereas the equilibrium moisture content expressed in terms of moisture content in the matter after the exposure to the humidity of 75% for 72 h is shown in Table 2. Irrespective of an additive type used in the composition of the sample, the increase in moisture content was the most

intense in the first hour of experiment. The ability to adsorb moisture was decreasing with the time of exposure to the humid environment. For the first 6 h, moisture gain was very alike in all the samples, but further research showed that AP and BP samples reached significantly lower equilibrium moisture content, so the pomace powder addition reduced hygroscopic properties of the freeze-dried snacks. Nevertheless, even the reduced moisture gain was found high, which is characteristic for freeze-dried products that had been previously reported (González et al., 2020) along with the reducing effect of carrier agents on the hygroscopic properties of freeze-dried products (Canuto et al., 2014; de Santana et al., 2015; Fongin et al., 2017; Silva-Espinoza et al., 2020). The high moisture gain in freeze-dried matter results from high porosity and easy access to open structure for water to penetrate (Cassanelli et al., 2019; Roca et al., 2008), so lower hygroscopicity of the snacks with the addition of fruit pomace powder may be related to their lower porosity (Table 2). Moreover, water works in dried food products as a plasticizer, therefore the increase in moisture content in freeze-dried products may lead to phase transition, structure collapse, and unwanted changes in the product textural properties and stability caused by a drop of glass transition temperature (Silva-Espinoza et al., 2020). All the tested samples have turned out to be very prone to adsorb water vapor from the environment, which involves the usage of moisture high barrier packaging.

4.2 | The impact of the carrier type on structure and texture properties

Apparent density of the freeze-dried fruit and vegetable snacks is presented in Table 2. The results obtained for carrot-orange-ginger (COG) snacks ranged from 0.077 g/cm³ to 0.115 g/cm³. The lowest values were observed for the samples structured with low-methoxyl pectin (LMP) addition, and the highest apparent density was featured by the samples with blackcurrant pomace powder (BP). Apparent density portrays a mass of solid matter concentrated in a certain volume of a sample and it is linked to the porosity. In consequence, the lower the apparent density, the higher the porosity because the empty space constitutes a larger part of the structure. Porosity of the freeze-dried snacks determined in terms of μ CT is shown in Table 2. The COG-LMP snack has been found to be significantly more porous than the samples with fruit pomace powder. It may be indicated by stronger structure-forming

TABLE 2 Water content, water activity, hygroscopicity, apparent density, porosity, and hardness of freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) obtained with the addition of powdered apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace and low-methoxyl pectin (LMP) as carrier agents

Sample	Water content (%)	Water activity	Hygroscopicity ($g_{H_2O}/g_{d.m.}$)	Apparent density (g/cm^3)	Porosity (%)	Hardness (N)
COG-AP	1.91 ± 0.04 ^b	0.044 ± 0.003 ^a	0.281 ± 0.003 ^b	0.106 ± 0.002 ^b	58.30 ± 0.54 ^b	10.56 ± 1.08 ^b
COG-BP	2.10 ± 0.26 ^b	0.042 ± 0.001 ^a	0.276 ± 0.005 ^b	0.115 ± 0.003 ^a	56.80 ± 2.16 ^b	7.90 ± 0.55 ^c
COG-LMP	2.55 ± 0.11 ^a	0.030 ± 0.003 ^b	0.305 ± 0.008 ^a	0.077 ± 0.001 ^c	64.99 ± 1.09 ^a	21.08 ± 1.20 ^a

Note: Averages ± standard deviation. Different letters in columns indicate significant differences at $p = .05$.

FIGURE 1 Increase in moisture content of freeze-dried snacks obtained with the addition of low-methoxyl pectin (LMP) and powdered dried apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace as carrier agents in time of exposition to the environment with a humidity of 75% at temperature $25 \pm 1^\circ\text{C}$

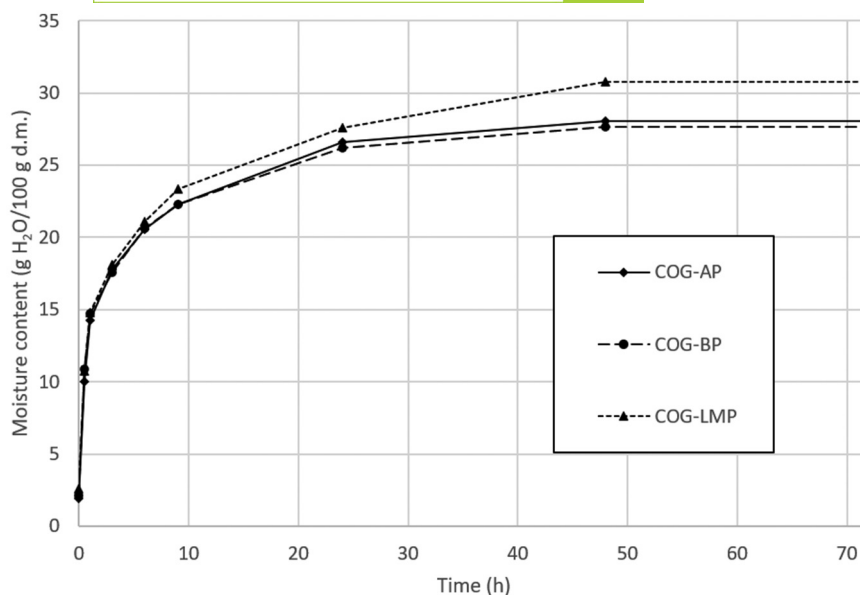
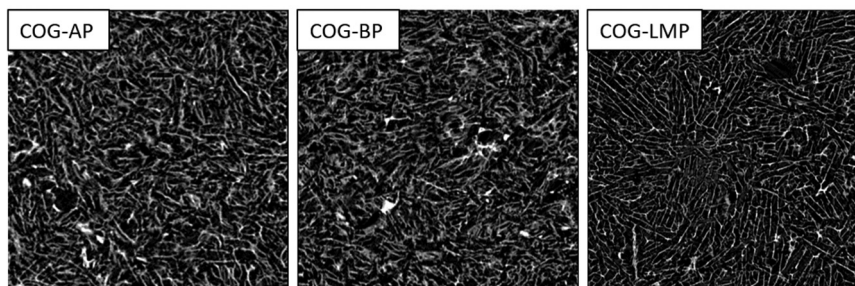


FIGURE 2 Cross-section microstructure of freeze-dried snacks obtained with the addition of low-methoxyl pectin (LMP) and powdered dried apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace as carrier agents



properties of pure pectin in comparison to dried pomace that has not been able to carry the mass of the structure. The obtained results have contradicted the previously made assumption that the use of fruit pomace powder allows to create the structure of similar porosity as the one created by pectin. The highly porous structure of freeze-dried food products is usually described as spongy or cellular and was previously reported (Ciurzyńska et al., 2015, 2020; Khalloufi & Ratti, 2003). The high porosity in freeze-dried products is a consequence of internal ice crystal sublimation that needs plenty of channels to let out water vapor (Jiang et al., 2013). Such phenomenon may be found as positive because of the increased bioaccessibility of active compounds contained in food. However, the high porosity also accounts for a high water adsorption ability, therefore the stability may be weaker (Ngamwonglumlert & Devahastin, 2018), and high hygroscopicity was also proven by this research.

The internal structure of the freeze-dried snacks is shown in Figure 2. The additive type affects the structure and, as it has already been mentioned, fruit pomace powder is not as strongly structuring as pectin but it still shows some advantage. It has been assumed that because of the inherency of pectin and water-bonding capacity (Eblaghi et al., 2021; Garcia-Amezquita et al., 2018; Garna et al., 2007; Kosmala et al., 2010; Reißner et al., 2019), fruit pomace would be an effective structure-forming additive. However, as it has

already been stated by the aforementioned authors, the content and quality of pectin vary depending on the origin, method of processing, and even the cultivator of pomace. Consequently, both apple and blackcurrant pomace purchased from various sources may behave dissimilarly inducing the variation in product characteristics. Even so, given the structure and texture of the freeze-dried snacks, the apple pomace used in this study is very likely to have contained more pectin than the blackcurrant pomace. Gelation of hydrocolloids, such as low-methoxyl pectin, is induced by calcium ions (Capel et al., 2006), therefore they were also used to support the structure-forming properties of fruit pomace powder. Regardless of the carrier agent used, the skeleton of the snacks resembled a maze and was characterized by more oblong than round pores. A similar structure of the freeze-dried gel was reported by Cassanelli et al. (2019). The sample with pectin was characterized by a more regular structure, however, some similarities were also visible in the pictures portraying samples with the addition of dried apple pomace powder (AP) and blackcurrant pomace (BP), the structure of which was less homogenous because of pomace powder particle appearance. The diagram picturing the pore size distribution is presented in Figure 3. In general, pores with mean diameter 0.05–0.11 mm were the most frequent in each sample. Blackcurrant pomace powder induced formation of a larger number of smaller pores, while the addition of apple pomace powder increased the frequency of larger pores in comparison to other

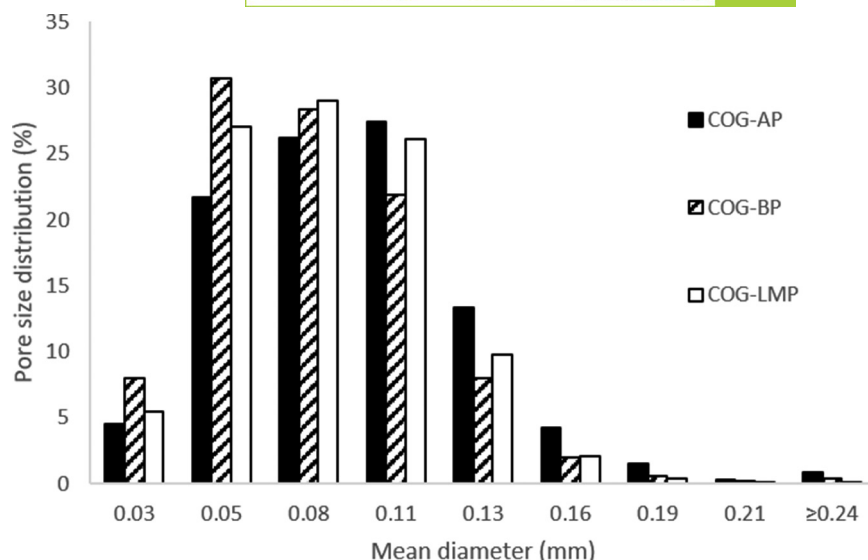


FIGURE 3 Percentage pore size distribution in freeze-dried snacks obtained with the addition of low-methoxyl pectin (LMP) and powdered dried apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace as carrier agents

carrier agents. Since saccharides content may affect the texture of the freeze-dried products (Ciurzyńska et al., 2013) and texture is connected directly with structure, differences in chemical composition of the additives may be the main cause of such results. However, Karwacka et al. (2021) observed strong connection between the pore size distribution in freeze-dried vegetable snacks and carrier agents used to obtain them. In the aforementioned research, sodium alginate addition induced creation of the structure characterized by greater pores, while in the structure of snacks with apple pomace powder smaller pores appeared more frequently. The differences between the results presented in this study and those reported before may also arise from the addition of calcium ions and thermal treatment of fruit pomace powder, which were not applied in the aforementioned research, therefore gelation of pectin contained in fruit residue could not have been activated then but could be activated now, which may have been the reason for a lack of any difference between pomace powder and hydrocolloids. Moreover, according to Eblaghi et al. (2021), texturizing properties of pectin in apple pomace may require extended time and higher temperature of hydrothermal treatment before being added to food products.

Hardness of the freeze-dried snacks, expressed in terms of a maximum force recorded during the compression test, is shown in Table 2. In the aspect of texture, which is one of the most important features of food products, the carrier type used in the composition of the snacks had a clear impact on the sample properties. Each additive allowed to create products significantly distinguished by hardness. Samples obtained with blackcurrant pomace powder (BP) were characterized by the lowest hardness, the next ones were those with dried apple pomace powder (AP). The addition of low-methoxyl pectin (LMP) double strengthened the texture of the snack in comparison to the COG-AP and triple strengthened as compared to BP samples. Based on this, the replacement of pectin carrier in freeze-dried snacks with dried fruit pomace powder does not lead to creation of products marked by very much alike texture and it may require to increase the quantity of pomace carriers. The samples with the addition of fruit pomace powder, especially blackcurrant,

were very fragile and evinced a tendency to crumble, which could cause the shape destruction of the product and be an essential obstacle in packaging and storage. It turned out that any of alternative additive used could not be a perfect substitute for pure hydrocolloid. However, Kuo et al. (2021) reported hardness of freeze-dried gelatin-alginate hydrogels without the addition of any other ingredients more similar to the results obtained for samples with dried fruits pomace powder than to properties of hydrocolloid samples but that could be related to a different measurement method. Karwacka et al. (2021) also reported that dried fruit pomace was characterized by multiply weaker texture-forming strength in comparison to hydrocolloids exemplified by apple pomace powder and sodium alginate. In general, higher hardness values indicate greater durability of freeze-dried snacks. The differences in textural properties of the snacks were also visible in the course of the compression curves shown in Figure 4. The harder the material, the more peaks and drops appeared on the compression curve. Smoothness of the curves obtained for samples with the addition of powdered dried fruit pomace indicated that no cracks of the internal structure occurred, whereas for harder samples structured with the addition of pectin, a lot of drops of compression force were observed. Textural properties, portrayed in the form of compression curves, depended on the composition of products and the quantity of structure-forming additive (Ciurzyńska et al., 2013, 2015). It was also proven that the addition of compounds featured by high sugar content intensified strengthening of the structure (Ciurzyńska et al., 2013).

4.3 | The impact of the carrier type on the color of the freeze-dried snacks

Color parameters of freeze-dried snacks before and after the freeze-drying are shown in Table 3. The higher the values of the parameter L^* , the brighter the tested sample is. Lightness of carrot-orange-ginger (COG) snacks before freeze drying ranged from 36.81 to 54.55 and rose to 57.47 to 74.42 after that process. In general,

FIGURE 4 Exemplary compression curves of freeze-dried snacks obtained with the addition of low-methoxyl pectin (LMP) and powdered dried apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace as carrier agents

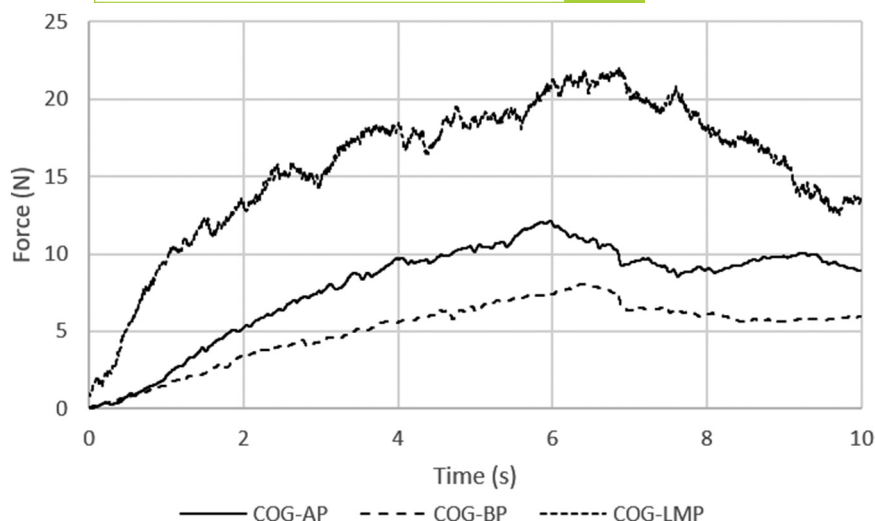


TABLE 3 Color parameters of the freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks obtained with the addition of powdered apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace and low-methoxyl pectin (LMP) as carrier agents

Material	Fresh			Freeze dried			ΔE
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*	
COG-AP	50.12 ± 0.12^b	27.76 ± 0.19^a	49.35 ± 0.18^b	70.26 ± 0.53^b	19.13 ± 0.50^a	46.58 ± 0.77^a	22.09 ± 0.64^b
COG-BP	36.81 ± 0.15^c	16.39 ± 0.08^b	31.07 ± 0.14^c	57.46 ± 1.12^c	16.35 ± 0.79^b	32.88 ± 0.72^c	20.76 ± 1.15^c
COG-LMP	54.55 ± 0.19^a	31.43 ± 0.11^a	53.89 ± 0.27^a	74.42 ± 1.03^a	18.79 ± 1.14^a	42.29 ± 1.99^b	26.29 ± 2.13^a

Note: Averages $\pm$ standard deviation. Different letters in columns indicate significant differences at $p = .05$.

snacks obtained with pectin were brighter than the ones with powdered fruit pomace, however, each used additive caused a significant difference in lightness of the snacks and even after freeze drying the same trend was observed. Positive a^* and b^* values indicate redness and yellowness of the sample, respectively. Color parameters of the freeze-dried snacks correspond to the literature data reported for freeze-dried carrot and orange products (Barbosa et al., 2015; Lyu et al., 2021; Wiktor et al., 2016), so color of the researched sample was determined principally by the main components, but despite a small quantity, the impact of carrier agents was also observed. The lowest values of color parameters were observed for samples with the addition of dried blackcurrant pomace powder (BP), which resulted from its dark color and high anthocyanins content (Michalska et al., 2017). Due to drying, apple pomace contained products of enzymatic and non-enzymatic browning that determined the color of pomace powder, the addition of which also affected the color of the freeze-dried snacks (Birtic et al., 2019).

The total color difference (ΔE) resulting from freeze-drying of the snacks confirms that the color of samples structured with pectin changed more in comparison to the samples with pomace powder, the addition of which did not totally eliminate the color change but reduced it significantly. Since the values of ΔE ranged from 20.76 to 26.29, the total color difference was huge and could be described as visible for a human eye (Nowak & Nienautowska, 2017). The change in color is a phenomenon typically occurring because of water removal and pigments degradation due to plant product dehydration

by means of various methods, including freeze drying (Ammelt et al., 2021; Sette et al., 2017; Wiktor et al., 2016).

4.4 | Resources demand and energy consumption of the freeze-dried snacks production in a laboratory scale

The study has focused on determining the differences in resources demand of freeze-dried snacks production, partially to cover the gap of such information in literature and to identify any differences between the compared scenarios. For this purpose, energy, water, and raw material consumption were measured during processing of the freeze-dried snacks. The limited access to the database of inputs and outputs required to produce raw materials allowed only for assessment of processing in respect of every technological stage performed in the laboratory. Experiments were performed on the scale of 1 kg batches produced for experimental trials. All collected data are presented in Table 4.

Since the purpose of this research has been to assess the impact of the carrier agents used in the snacks and the basis of products was the same for each variant that differed solely in terms of the addition of a particular carrier, the influence of respective ingredients was disregarded. However, focusing on such additives, pectin is obtained from apple pomace, so the environmental impact of hydrocolloid is increased in comparison to dried fruit pomace powder due to

TABLE 4 Raw material, energy, and water consumption of freeze-dried snacks production in laboratory scale calculated per 1 kg of batch prepared for freeze-drying process

	COG-AP	COG-BP	COG-LMP
<i>Raw materials</i>			
Frozen carrot (kg)	0.6	0.6	0.6
Orange juice (kg)	0.3	0.3	0.3
Ginger (kg)	0.004 + 0.0005 peels	0.004 + 0.0005 peels	0.004 + 0.0005 peels
Calcium lactate (kg)	0.001	0.001	0.001
Apple pomace (kg)	0.02	0.02	–
Blackcurrant pomace (kg)	–	–	–
Low-methoxyl pectin (kg)	–	0.075	0.015
Water	0.075	–	0.08
<i>Carrier agents preparation</i>			
Energy (kWh)	0.154	0.154	0.154
<i>Grinding/Mixing</i>			
Energy (kWh)	0.012	0.012	0.012
<i>Freezing</i>			
Energy (kWh)	2.828	2.828	2.828
<i>Freeze drying</i>			
Energy (kWh)	31.707	31.707	31.707
Wastewater (kg)	0.895	0.895	0.895
<i>Total</i>			
Energy (kWh)	34.701	34.701	34.701
Water (kg)	0.075	0.075	0.08
Wastewater (kg)	0.895	0.895	0.895

complex processing (Garcia-Garcia et al., 2019; Sharma et al., 2014). Processing substantially contributes to the environmental impact of products but the importance of this stage is neither less nor greater than cultivation or transport, depending on individual characteristics of researched products (Khanali et al., 2020; Knudsen et al., 2011), therefore, if the amount of a carrier agent used in this research is taken into consideration, it may influence the impact of a main product to the extent lower than 10% of the impact caused by freeze drying (Garcia-Garcia et al., 2019).

Residues generated during freeze-dried snacks production was related to raw materials pretreatment and freeze drying. For the COG samples, it was ginger peels and water removed from the sample by freeze drying. Generation of organic waste, such as excess raw materials, was eliminated during preliminary studies that allowed to prepare proper portions of vegetables before processing. It was affected also by applying ready-to-use components that had been washed, sorted, processed, and calibrated before the delivery in the form of frozen cubes.

Water consumption, including water added to the mixtures to hydrate carrier agents and residue after freeze drying, was measured but determination of water used for washing and hygienic purposes was not performed. Processing of freeze-dried snacks required the use of 0.075–0.08 kg of water to hydrate carriers. The amount of water depended on a type and quantity of a carrier agent. Wastewater was the water removed from the sample during the freeze-drying

process. It accounted for about 90% of the initial weight of the input matter. Taking into consideration the fact that freeze drying is a periodical process and most of the water is collected on the condenser (Adams, 1991), it may be subsequently melted and reused for further processing. However, freeze drying causes water to vapourize along with other volatile compounds that may be contained in the ice collected via condensation (Antal et al., 2014; Krokida & Philippopoulos, 2006), therefore water should be subjected to water treatment enabling efficient recovery. Such operation would cause significant reduction in water consumption and the amount of wastewater resulting from freeze-drying-based production.

In terms of energy, freeze-drying accounted for 91.4% of the total consumption, while shock freezing approximately 8.1%. Preparation of raw materials (heating water) along with the grinding and mixing process in a knife mill was found the least energy consuming and accounted for 0.5% of the total energy consumption, no matter which type of material had been prepared. Energy consumption following the lab-scale production of researched snacks estimates to 34.7 kWh/1 kg of the batch and since freeze drying turned out to be the most affecting factor, optimizing it seems to be the most reasonable way to decrease this indicator. One of the possibilities is the use of combined drying method. Pei et al. (2014), Hnin et al. (2019), and Hnin et al. (2020) found that freeze drying combined with infrared radiation, air drying, or microwave drying consumed significantly less energy than

traditional freeze drying and did not cause significant changes in products quality. They reported that setting a higher temperature of drying even intensified that effect because of shortening time of the process. Through the time of freeze drying, only about 15% of the energy is consumed by heating system, the rest is used by a vacuum pump and condenser, therefore the increase in drying temperature does not have any adverse impact on the energy consumption, which results from the drying time reduction (Wu et al., 2019). Although, as reported by Almena et al. (2019), a scale of production has a notable impact on the environmental impact of food production and the results obtained in the laboratory scale may not be applicable in the extended scale, however, the relative resource demand may still be applicable. Moreover, taking into consideration the efficiency of industrial facilities, obtaining freeze-dried snacks may also improve their efficiency in terms of environmental impact.

5 | CONCLUSIONS

Combination of trends related to consumers' needs and sustainable development contributes to new strategic objectives set for the food industry development, including searching for possibilities of reusing by-products to create novel products. One of the many ways to accomplish such purpose is fruit and vegetable pomace management. This study has aimed to research fruit pomace powder as a more sustainable substitute for hydrocolloid carrier agents in freeze-dried products. The addition of dried apple and blackcurrant pomace powder in freeze-dried snacks has caused water content, porosity, and hygroscopicity to decrease in comparison to the sample obtained with low-methoxyl pectin. Snacks with fruit pomace have featured lower porosity that has induced reduction in water adsorption capability. Used additives have changed the color of the freeze-dried snacks but fruit pomace has lowered the total color difference caused by freeze drying in comparison to the one determined for the sample with pectin. A carrier type has also affected structure and texture of the snacks. The capability of fruit pomace to create structure and texture of the products has been found significantly weaker, especially in the case of blackcurrant pomace as compared to low-methoxyl pectin. The measurement of resources demand conducted during the lab-scale production implies that energy consumption is the most problematic aspect of freeze-dried snacks processing and the freeze drying has the greatest importance, so optimization of it should significantly reduce the final energy demand. However, from the energy efficiency point of view, the transformation from the laboratory to the industrial scale is transferable in a linear manner, thus the obtained results could only point to the relative environmental spots to pay attention to at the large production scale. In conclusion, the use of fruit pomace as a carrier agent in freeze-dried products is a new and promising subject matter for the further research, especially in terms of the impact on nutrition and storage properties, which may induce the research into the practicable application of pomace for industrial purposes.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was founded by the National Center for Research and Development, as part of the III BIOSTRATEG. "The development of an innovative carbon footprint calculation method for the basic basket of food products" – task in the project "Development of healthy food production technologies taking into consideration nutritious food waste management and carbon footprint calculation methodology" [BIOSTRATEG3/343817/17/NCBR/2018]. Research equipment was purchased as part of the "Food and Nutrition Centre - modernisation of the WULS campus to create a Food and Nutrition Research and Development Centre (CŻiŻ)" co-financed by the European Union from the European Regional Development Fund under the Regional Operational Programme of the Mazowieckie Voivodeship for 2014–2020 [Project No. RPMA.01.01.00-14-8276/17].

CONFLICT OF INTEREST

The authors have declared no conflicts of interest for this article.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Magdalena Karwacka: Conceptualization, Investigation, Visualization, and Writing – original draft. **Katarzyna Rybak:** Methodology and Investigation. **Sergiy Smetana:** Formal analysis and Writing – original draft & editing. **Sabina Galus:** Formal analysis and Supervision. **Monika Janowicz:** Conceptualization, Formal analysis, Project administration, Funding acquisition, Supervision, and Writing – original draft & editing.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

ORCID

Magdalena Karwacka  <https://orcid.org/0000-0002-5511-3251>

Katarzyna Rybak  <https://orcid.org/0000-0003-3595-0818>

Sergiy Smetana  <https://orcid.org/0000-0002-5471-0521>

Sabina Galus  <https://orcid.org/0000-0002-2352-5307>

Monika Janowicz  <https://orcid.org/0000-0002-3790-3479>

REFERENCES

- Adams, G. D. J. (1991). Freeze-drying of biological materials. *Drying Technology*, 9(4), 891–925. <https://doi.org/10.1080/07373939108916727>
- Almena, A., Lopez-Quiroga, E., Fryer, P. J., & Bakalis, S. (2019). Towards the decentralisation of food manufacture: Effect of scale production on economics, carbon footprint and energy demand. *Energy Procedia*, 161, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.080>
- Ammelt, D., Lammerskitten, A., Wiktor, A., Barba, F. J., Toepfl, S., & Parnikov, O. (2021). The impact of pulsed electric fields on quality parameters of freeze-dried red beets and pineapples. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(4), 1777–1787. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14803>
- Antal, T., Chong, C. H., Law, C. L., & Sikolya, L. (2014). Effects of freeze drying on retention of essential oils, changes in glandular trichomes of lemon balm leaves. *International Food Research Journal*, 21(1), 387–394.
- AOAC International. (2002). *Official methods of analysis of AOAC international* (17th ed.). AOAC International.

- Barbosa, J., Borges, S., Amorim, M., Pereira, M. J., Oliveira, A., Pintado, M. E., & Teixeira, P. (2015). Comparison of spray drying, freeze drying and convective hot air drying for the production of a probiotic orange powder. *Journal of Functional Foods*, 17, 340–351. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.06.001>
- Birtic, S., Régis, S., Le Bourvellec, C., & Renard, C. M. (2019). Impact of air-drying on polyphenol extractability from apple pomace. *Food Chemistry*, 296, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.131>
- Canuto, H. M. P., Afonso, M. R. A., & da Costa, J. M. C. (2014). Hygroscopic behavior of freeze-dried papaya pulp powder with maltodextrin. *Acta Scientiarum. Technology*, 36(1), 179–185. <https://doi.org/10.4025/actascitech.v36i1.17499>
- Capel, F., Nicolai, T., Durand, D., Boulenguer, P., & Langendorff, V. (2006). Calcium and acid induced gelation of (amidated) low methoxyl pectin. *Food Hydrocolloids*, 20(6), 901–907. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.09.004>
- Cassanelli, M., Prosapio, V., Norton, I., & Mills, T. (2019). Role of the drying technique on the low-acyl gellan gum gel structure: Molecular and macroscopic investigations. *Food and Bioprocess Technology*, 12(2), 313–324. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2210-6>
- Ciurzyńska, A., & Lenart, A. (2016). Effect of the aerated structure on selected properties of freeze-dried hydrocolloid gels. *International Agrophysics*, 30(1), 9–17. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0067>
- Ciurzyńska, A., Lenart, A., & Karwosinska, J. (2015). Effect of quantity of low-methoxyl pectin on physical properties of freeze-dried strawberry jellies. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 65(4), 233–241. <https://doi.org/10.2478/pjfn-2013-0020>
- Ciurzyńska, A., Lenart, A., & Traczyk, W. (2013). Influence of chemical composition and structure of strawberry gels on the chosen physical properties of freeze-dried final product. *Italian Journal of Food Science*, 25(2), 149–159.
- Ciurzyńska, A., Marczak, W., Lenart, A., & Janowicz, M. (2020). Production of innovative freeze-dried vegetable snack with hydrocolloids in terms of technological process and carbon footprint calculation. *Food Hydrocolloids*, 108, 105993. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105993>
- Crist, E., Mora, C., & Engelman, R. (2017). The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. *Science*, 356(6335), 260–264. <https://doi.org/10.1126/science.aal2011>
- de Santana, R. F., de Oliveira Neto, E. R., Santos, A. V., Soares, C. M. F., Lima, A. S., & Cardoso, J. C. (2015). Water sorption isotherm and glass transition temperature of freeze-dried Syzygium cumini fruit (jambolan). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 120(1), 519–524. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-4014-x>
- Dijkman, T. J., Basset-Mens, C., Antón, A., & Núñez, M. (2018). LCA of food and agriculture. In M. Hauschild, R. Rosenbaum, & S. Olsen (Eds.), *Life Cycle Assessment* (pp. 723–754). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_29
- Eblaghi, M., Bronlund, J. E., Yedro, F. M., & Archer, R. H. (2021). Kinetics of pectin reactions in apple pomace during hydrothermal treatment. *Food and Bioprocess Technology*, 14(4), 739–750. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02603-4>
- Eriksson, M., & Spångberg, J. (2017). Carbon footprint and energy use of food waste management options for fresh fruit and vegetables from supermarkets. *Waste Management*, 60, 786–799. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.008>
- Fongin, S., Kawai, K., Harnkarnsujarit, N., & Hagura, Y. (2017). Effects of water and maltodextrin on the glass transition temperature of freeze-dried mango pulp and an empirical model to predict plasticizing effect of water on dried fruits. *Journal of Food Engineering*, 210, 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.025>
- Garcia-Amezquita, L. E., Tejada-Ortigoza, V., Serna-Saldivar, S. O., & Welti-Chanes, J. (2018). Dietary fiber concentrates from fruit and vegetable by-products: Processing, modification, and application as functional ingredients. *Food and Bioprocess Technology*, 11(8), 1439–1463. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2117-2>
- García-García, G., Rahimifard, S., Matharu, A. S., & Dugmore, T. I. (2019). Life-cycle assessment of microwave-assisted pectin extraction at pilot scale. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(5), 5167–5175. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06052>
- Garna, H., Mabon, N., Robert, C., Cornet, C., Nott, K., Legros, H., ... Paquot, M. (2007). Effect of extraction conditions on the yield and purity of apple pomace pectin precipitated but not washed by alcohol. *Journal of Food Science*, 72(1), 1–9. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00227.x>
- Gassara, F., Brar, S. K., Pelletier, F., Verma, M., Godbout, S., & Tyagi, R. D. (2011). Pomace waste management scenarios in Québec—Impact on greenhouse gas emissions. *Journal of Hazardous Materials*, 192(3), 1178–1185. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.06.026>
- Glicksman, M. (2020). *Food hydrocolloids* (Vol. 3). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429290459>
- González, C. M., Llorca, E., Quiles, A., Hernando, I., & Moraga, G. (2020). Water sorption and glass transition in freeze-dried persimmon slices. effect on physical properties and bioactive compounds. *LWT - Food Science and Technology*, 130, 109633. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109633>
- Hnin, K. K., Zhang, M., Devahastin, S., & Wang, B. (2019). Influence of novel infrared freeze drying of rose flavored yogurt melts on their physicochemical properties, bioactive compounds and energy consumption. *Food and Bioprocess Technology*, 12(12), 2062–2073. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02368-x>
- Hnin, K. K., Zhang, M., Devahastin, S., & Wang, B. (2020). Combined infrared freeze drying and infrared drying of rose-flavored yogurt melts—Effect on product quality. *Food and Bioprocess Technology*, 13(8), 1356–1367. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02486-x>
- Jakubczyk, E., & Jaskulska, A. (2021). The effect of freeze-drying on the properties of polish vegetable soups. *Applied Sciences*, 11(2), 654. <https://doi.org/10.3390/app11020654>
- Jiang, H., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Lim, R. X. (2013). Analysis of temperature distribution and SEM images of microwave freeze drying banana chips. *Food and Bioprocess Technology*, 6(5), 1144–1152. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0801-1>
- Karwacka, M., Ciurzyńska, A., Lenart, A., & Janowicz, M. (2020). Sustainable development in the Agri-food sector in terms of the carbon footprint: A review. *Sustainability*, 12(16), 6463. <https://doi.org/10.3390/su12166463>
- Karwacka, M., Gumkowska, M., Rybak, K., Ciurzyńska, A., & Janowicz, M. (2021). Impact of sodium alginate and dried apple pomace powder as a carrier agent on the properties of freeze-dried vegetable snacks. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 71(4), 451–461. <https://doi.org/10.31883/pjfn/143584>
- Khaliloufi, S., & Ratti, C. (2003). Quality deterioration of freeze-dried foods as explained by their glass transition temperature and internal structure. *Journal of Food Science*, 68(3), 892–903. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb08262.x>
- Khanali, M., Kokei, D., Aghbashlo, M., Nasab, F. K., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Tabatabaei, M. (2020). Energy flow modeling and life cycle assessment of apple juice production: Recommendations for renewable energies implementation and climate change mitigation. *Journal of Cleaner Production*, 246, 118997. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118997>
- Knudsen, M. T., de Almeida, G. F., Langer, V., de Abreu, L. S., & Halberg, N. (2011). Environmental assessment of organic juice imported to Denmark: A case study on oranges (*Citrus sinensis*) from Brazil. *Organic Agriculture*, 1(3), 167–185. <https://doi.org/10.1007/s13165-011-0014-3>
- Kosmala, M., Kołodziejczyk, K., Markowski, J., Mieszczakowska, M., Ginies, C., & Renard, C. M. (2010). Co-products of black-currant and apple juice production: Hydration properties and polysaccharide

- composition. *LWT - Food Science and Technology*, 43(1), 173–180. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.06.016>
- Krokida, M. K., & Philippopoulos, C. (2006). Volatility of apples during air and freeze drying. *Journal of Food Engineering*, 73(2), 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.012>
- Kuo, C. C., Qin, H., Cheng, Y., Jiang, X., & Shi, X. (2021). An integrated manufacturing strategy to fabricate delivery system using gelatin/alginate hybrid hydrogels: 3D printing and freeze-drying. *Food Hydrocolloids*, 111, 106262. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106262>
- Lang, T., & Barling, D. (2012). Food security and food sustainability: Reformulating the debate. *The Geographical Journal*, 178(4), 313–326. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2012.00480.x>
- Lyu, Y., Bi, J., Chen, Q., Li, X., Wu, X., Hou, H., & Zhang, X. (2021). Discoloration investigations of freeze-dried carrot cylinders from physical structure and color-related chemical compositions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101, 5172–5181. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11163>
- Michalska, A., Wojdyło, A., Łysiak, G. P., Lech, K., & Figiel, A. (2017). Functional relationships between phytochemicals and drying conditions during the processing of blackcurrant pomace into powders. *Advanced Powder Technology*, 28(5), 1340–1348. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.03.002>
- Ngamwonglumlert, L., & Devahastin, S. (2018). Microstructure and its relationship with quality and storage stability of dried foods. In S. Devahastin (Ed.), *Food microstructure and its relationship with quality and stability* (pp. 139–159). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100764-8.00008-3>
- Notarnicola, B., Sala, S., Anton, A., McLaren, S. J., Saouter, E., & Sonesson, U. (2017). The role of life cycle assessment in supporting sustainable Agri-food systems: A review of the challenges. *Journal of Cleaner Production*, 140, 399–409. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.071>
- Nowak, D., & Nienautowska, A. (2017). Wpływ warunków w liofilizacji na właściwości suszonego przecieru z owoców w dzikiej róży®. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 60–65.
- Oldfield, T. L., White, E., & Holden, N. M. (2016). An environmental analysis of options for utilising wasted food and food residue. *Journal of Environmental Management*, 183, 826–835. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.035>
- Pei, F., Yang, W. J., Shi, Y., Sun, Y., Mariga, A. M., Zhao, L. Y., ... Hu, Q. H. (2014). Comparison of freeze-drying with three different combinations of drying methods and their influence on colour, texture, microstructure and nutrient retention of button mushroom (*Agaricus bisporus*) slices. *Food and Bioprocess Technology*, 7(3), 702–710. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1058-z>
- Reihsner, A. M., Al-Hamimi, S., Quiles, A., Schmidt, C., Struck, S., Hernando, I., Turner, C., & Rohm, H. (2019). Composition and physicochemical properties of dried berry pomace. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(3), 1284–1293. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9302>
- Roca, E., Guillard, V., Broyart, B., Guilbert, S., & Gontard, N. (2008). Effective moisture diffusivity modelling versus food structure and hygroscopicity. *Food Chemistry*, 106(4), 1428–1437. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.03.078>
- Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., & Shiina, T. (2009). A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*, 90(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016>
- Rybak, K., Samborska, K., Jedlińska, A., Parniak, O., Nowacka, M., Witrowa-Rajchert, D., & Wiktor, A. (2020). The impact of pulsed electric field pretreatment of bell pepper on the selected properties of spray dried juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 65, 102446. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102446>
- Sette, P., Franceschinis, L., Schebor, C., & Salvatori, D. (2017). Fruit snacks from raspberries: Influence of drying parameters on colour degradation and bioactive potential. *International Journal of Food Science & Technology*, 52(2), 313–328. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13283>
- Sharma, P. C., Gupta, A., & Kaushal, P. (2014). Optimization of method for extraction of pectin from apple pomace. *Indian Journal of Natural Products and Resources*, 5(2), 184–189.
- Silva-Espinoza, M. A., del Mar Camacho, M., & Martínez-Navarrete, N. (2020). Use of different biopolymers as carriers for purposes of obtaining a freeze-dried orange snack. *LWT-food. Science and Technology*, 127, 109415. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109415>
- Slorach, P. C., Jeswani, H. K., Cuéllar-Franca, R., & Azapagic, A. (2019). Energy demand and carbon footprint of treating household food waste compared to its prevention. *Energy Procedia*, 161, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.053>
- Syamaladevi, R. M., Tang, J., Villa-Rojas, R., Sablani, S., Carter, B., & Campbell, G. (2016). Influence of water activity on thermal resistance of microorganisms in low-moisture foods: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(2), 353–370. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12190>
- Tańska, M., Roszkowska, B., Czaplicki, S., Borowska, E. J., Bojarska, J., & Dąbrowska, A. (2016). Effect of fruit pomace addition on short-bread cookies to improve their physical and nutritional values. *Plant Foods for Human Nutrition*, 71(3), 307–313. <https://doi.org/10.1007/s11130-016-0561-6>
- Uscanga, M. A., del Mar Camacho, M., Salgado, M. A., & Martínez-Navarrete, N. (2020). Influence of an orange product composition on the characteristics of the obtained freeze-dried cake and powder as related to their consumption pattern. *Food and Bioprocess Technology*, 13(8), 1368–1379. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02485-y>
- Wiktor, A., Nowacka, M., Dadan, M., Rybak, K., Lojkowski, W., Chudoba, T., & Witrowa-Rajchert, D. (2016). The effect of pulsed electric field on drying kinetics, color, and microstructure of carrot. *Drying Technology*, 34(11), 1286–1296. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1105813>
- Wu, X. F., Zhang, M., & Bhandari, B. (2019). A novel infrared freeze drying (IRFD) technology to lower the energy consumption and keep the quality of *Cordyceps militaris*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 54, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.03.003>
- Yadav, S., Malik, A., Pathera, A., Islam, R. U., & Sharma, D. (2016). Development of dietary fibre enriched chicken sausages by incorporating corn bran, dried apple pomace and dried tomato pomace. *Nutrition & Food Science*, 46, 16–29. <https://doi.org/10.1108/NFS-05-2015-0049>
- Younis, K., & Ahmad, S. (2018). Quality evaluation of buffalo meat patties incorporated with apple pomace powder. *Buffalo Bulletin*, 37(3), 389–401. <https://158.108.80.26/kuojs/index.php/BuFBu/article/view/592>
- Yu, J., & Ahmedna, M. (2013). Functional components of grape pomace: Their composition, biological properties and potential applications. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(2), 221–237. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03197.x>
- Znamirska, A., Kalicka, D., Buniowska, M., & Rożek, P. (2018). Wpływ dodatku suszu z wyłoków jabłkowych na właściwości fizykochemiczne i sensoryczne jogurtów. *Żywność Nauka Technologia Jakość*, 25(2), 71–80.

How to cite this article: Karwacka, M., Rybak, K., Smetana, S., Galus, S. & Janowicz, M. (2022). Analysis of selected functional properties, resource demands, and energy consumption of freeze-dried vegetable snacks. *Journal of Food Processing and Preservation*, 00, e16721. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16721>

Article

The Effect of the Addition of Selected Fruit Pomace Powders and Pectin as Carrier Agents on the Nutritional Value of Freeze-Dried Snacks

Magdalena Karwacka ^{1,*} , Katarzyna Rybak ¹ , Michał Świeca ² , Sabina Galus ^{1,*}  and Monika Janowicz ¹

¹ Department of Food Engineering and Process Management, Institute of Food Science, Warsaw University of Life Sciences (SGGW-WULS), Nowoursynowska St. 159c, 02-776 Warsaw, Poland

² Department of Biochemistry and Food Chemistry, University of Life Sciences in Lublin, Skromna St. 8, 20-704 Lublin, Poland

* Correspondence: magdalena_karwacka@sggw.edu.pl (M.K.); sabina_galus@sggw.edu.pl (S.G.)

Abstract: This study was conducted to analyze the effect of the addition of powdered apple and blackcurrant pomace on the nutritional value, bioaccessibility of polyphenols, and antioxidant activity of freeze-dried fruit and vegetable snacks in comparison to low-methoxyl pectin as a traditional carrier agent. We evaluated sugars, protein, fat, ash, and total dietary fiber contents, as well as content and potential bioaccessibility of polyphenols and antiradical properties. In comparison to snacks with pectin, those with apple pomace powder were richer in carbohydrates and sugars, while snacks with blackcurrant pomace featured significantly higher ($p \leq 0.05$) protein, ash, and fat contents. The material with pectin had the highest content of total dietary fiber. The addition of blackcurrant pomace powder increased the content of potentially bioaccessible polyphenols and enhanced the antiradical properties of the products. The blackcurrant pomace exhibited a more beneficial effect on the nutritional value of the freeze-dried snacks than other carrier agents applied. Nonetheless, further research is needed to determine the effect of the addition of various amounts of pomace powders on some crucial properties, such as dietary fiber and bioactive compounds contents, as well as physicochemical characteristics.

Keywords: freeze-dried snacks; apple pomace; blackcurrant pomace; pectin; protein; sugar content; total dietary fiber; in vitro digestion



Citation: Karwacka, M.; Rybak, K.; Świeca, M.; Galus, S.; Janowicz, M. The Effect of the Addition of Selected Fruit Pomace Powders and Pectin as Carrier Agents on the Nutritional Value of Freeze-Dried Snacks. *Sustainability* **2022**, *14*, 13012. <https://doi.org/10.3390/su142013012>

Academic Editor: Alessandra Durazzo

Received: 1 September 2022

Accepted: 10 October 2022

Published: 11 October 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 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

Consumption of snacks has increased over decades, and this phenomenon is being constantly observed among people of various ages all around the world. The term “snacks” itself has not yet been clearly defined [1], but as was developed by Potter et al. [2], four out of five official definitions established individually by several countries characterized snacks as foods and drinks consumed between main meals, and only one included information that the total calorific value of these meals should not exceed 150 kcal. The meaning of “snacks” also refers to energy-dense and nutrient-poor foods that are packed in small individual portions and can be easily consumed between regular meals [3,4]. Moreover, despite the lack of a universal definition, consumers’ perception of such a term is influenced by the potential nutritional value and health disadvantages and features related to time, location, and circumstances of snacking, as well as types of food commonly chosen as snacks [3,4]. Regarding snacking products that are most often seen as unhealthy, there is a global trend connected to consumers seeking more sustainable and conscious food choices, motivated by the spread of a self-care lifestyle and public approval, as opposed to unhealthy snacks. As a consequence, there is a growing branch of the food sector that focuses on the development of more beneficial alternatives for easy and accessible traditional snacks [5]. Reflecting on the scale of snacking popularity, there are surprisingly

few recommendations for in-between meals eating associated with quality and quantity of taken comestibles. Moreover, most of them imply restricting the amount of sweet and salty, high-energy products in favor of less-processed and fresh foods such as fruits, vegetables, or nuts, which help to maintain a nutritious and balanced diet and are suggested to be consumed three to five times a day, depending on the source [2].

Fruits and vegetables are natural sources of valuable nutrients such as dietary fiber and vitamins, along with micro and macro elements, which are crucial components of a healthy and balanced diet. The most recent WHO (World Health Organization) recommendations for both adults and children include consuming at least 400 g of non-starchy fruit and vegetables, preferably allocated into five portions [6]. Unfortunately, the consumption of these products is still insufficient. It is especially noticeable in the case of vegetables, which are less sweet in comparison to fruits, and are therefore perceived as less attractive and consumed not as willingly, particularly by children [7]. Because of their short shelf-life, easy spoilage, and quick overall quality decrease, combined with consumers' constant demands, various aspects of fruit and vegetable processing have been studied comprehensively, including techniques, quality, and development [8]. Moreover, it is also recognized that fresh or processed products have the potential to be considered as sources of some essential nutrients and health-promoting compounds, but a lot of these remain in by-products and residues [9]. Currently, given the pandemic and an increasingly tense geopolitical situation combined with population growth and climate crises occurring around the world, it has been shown that the food industry must search for extraordinary solutions providing access to highly nutritious foods obtained from local goods in case of potential limitations in the supply chain resulting from rising prices, unstable trade, reduced resources, and transport difficulties [10–13]. Thus, fruit and vegetable by-products, such as pomace, have become important parts of scientific research and the novel food development sector [9,14]. Furthermore, there have been only a few attempts at applying fruit pomace as a carrier agent in freeze-dried fruit and vegetable snacks, as reported by Karwacka et al. [15–17] and Ciurzyńska et al. [18]. However, these papers pertain to physical rather than chemical and nutritional properties of the products. Therefore, the novelty of the present study is that we captivated three significant aspects of current food science and technology. The first one relates to food waste management and sustainable product development due to the infusion of fruit pomace as food additives, the second is the choice of freeze-dried fruit and vegetable snacks as a base of the research, and the third and final aspect is the analysis of the impact of pomace addition on chemical composition and nutritional value.

Fruit pomace is a solid residue remaining after juice and cider manufacturing. Generally, it contains up to 85% water, and so there is a risk of microbiological contamination and spoilage; thus, pomace is usually dried and then subjected to further processing [19]. A possible hazard of toxic residues, such as mycotoxins or pesticides, in the pomace has been considered, but the studies conducted on that topic proved that consumption of pomace in small amounts does not put human health in danger. The quality of pomace must be tested before using it as a food ingredient, but in general, a food-grade pomace has been established [20,21]. Most of the bioactive compounds do not migrate to manufactured products and they stay in the solid matter of pomace; therefore, it is rich in polyphenols, organic acids, and minerals, and accordingly has notable antioxidant capacity [19,20,22,23]. These by-products are also characterized by a relatively high content of soluble and insoluble fibers, cellulose, hemicellulose, lignin, and pectin, which induces its water binding and swelling capacity [19,24] and helps extend the feeling of satiety after consumption [25,26]. The chemical character of these compounds requires calcium ions to activate their gelling properties [19,27]; therefore, pomace-enriched products may have a beneficial effect on the overall functioning of the digestive system and mineralization. This makes the infusion of pomace and pure pectin, along with calcium salts, as it demands, into the composition of new products favorable not only in technological aspects but in nutritional aspects as well. Poland has been a leading producer of apples and blackcurrant for many years and many harvests are allocated for processing, which generates a great amount of residues

to manage [28–30]. The physicochemical and nutritional properties of both apple and blackcurrant pomace have already been analyzed several times. It has been recognized that the quality and composition of pomace differ and depend on the quality of raw material, which also varies and is contingent on origin, season, and cultivation method. However, irrespective of the particular characteristics, fruit pomace has a prominent potential of being utilized as a food-enriching component [19,21,29,31,32].

Therefore, we aimed to develop new plant-based snacks and analyze the effect of the addition of powdered fruit pomace (apple and blackcurrant) on the nutritional value, bioaccessibility of polyphenols, and antioxidant activity of freeze-dried fruit and vegetable snacks in comparison to low-methoxyl pectin as a traditional carrier agent stabilizing physicochemical properties of the freeze-dried products. This study will be used to select the features most influenced by various compositions to focus on in future research to evaluate the effect of the addition of pomace as a carrier agent in freeze-dried products.

2. Materials and Methods

2.1. Material

The material examined in this research was freeze-dried carrot–orange–ginger (COG) snacks (Figure 1). Formulations of the material consisted of 60% frozen carrot cubes (Unifreeze Sp. z o.o., Miesiączkowo, Poland), 30% orange juice (Tymbark, Poland), 7.5–8% water, 0.4% fresh ginger purchased at a local market in Warsaw (Poland), and 0.1% calcium lactate (Agnex, Poland). Moreover, three different carrier agents differentiating the material were used. Industrial dried apple pomace powder (AP) (Greenherb, Poland) and dried blackcurrant pomace powder (BP) (Greenherb, Poland) were added in the amount of 2%, whereas the quantity of low-methoxyl pectin (LMP) (Hortimex, Poland) equaled 1.5%. Each carrier agent was used separately. The mixed batches were freeze-dried utilizing an Alpha 1–2 LDplus freeze-dryer (Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen GmbH, Osterode am Harz, Germany) at a shelf temperature of 30 °C, chamber pressure of 63 Pa, and condenser temperature of −53 °C for about 48 h. The processing of the snacks was described in detail by Karwacka et al. [17]. An effect of applying such additives on the physical properties of the freeze-dried snacks has already been reported, and, as was described previously, the water content in the freeze-dried snacks in the sequence COG-AP, COG-BP, and COG-LMP was $1.91 \pm 0.04\%$, $2.10 \pm 0.26\%$, and $2.55 \pm 0.11\%$ [17].

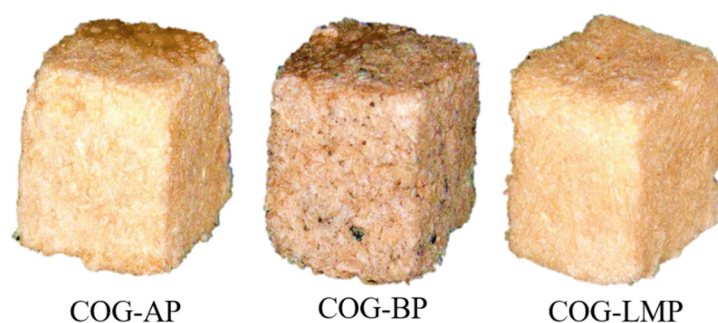


Figure 1. Freeze-dried carrot–orange–ginger snacks obtained with the addition of powdered apple (COG-AP) and blackcurrant (COG-BP) pomace and low-methoxyl pectin (COG-LMP) as carrier agents.

2.2. Analytical Methods

2.2.1. Free Sugar Content Determination

Determination of sugar content was carried out using a high-pressure liquid chromatography method with refractive index detection [33]. HPLC, Waters 2695 Alliance (Waters, Milford, MA, USA) was equipped with a quaternary pump, autosampler, column thermostat, and RI detector. The compounds were separated with a 300×6.5 mm Waters Sugar Pak I column with a Sugar-Pak guard column. Before the procedure, freeze-dried

snacks were ground using a basic analytical mill A11 (IKA Laboratory Equipment, Warsaw, Poland), and 0.3 g of the powdered sample was extracted with distilled water at 80 °C for 12 h. Obtained aqueous extracts were filtered using a 0.22 µm PTFE syringe filter, and a volume of 10 µL was injected into the chromatographic system. The glucose, fructose, and sucrose content were calculated based on calibration curves acquired for these compounds' standards (Sigma-Aldrich, Steinheim, Germany).

2.2.2. Protein Content Determination

Protein content in the freeze-dried snacks was determined using the Kjeldahl method. The preparation of the sample consisted of material mineralization. A ground sample of known weight was placed into a mineralization vessel with two tablets of KjelTabs catalyzer and 12 mL of saturated sulfuric acid. Mineralization was carried out utilizing the Tecator 2020 Digestor (FOSS Analytical, Hillerød, Denmark) at 420 °C. The procedure was performed using the Kjeltac Auto 1035 nitrogen analyzer (Perstorp Analytical Tecator, Malmö, Sweden) equipped with an autosampler, automatic sample dilution system with redistilled water, automatic neutralization system with 33% NaOH solution (VWR International, Gdańsk, Poland), and colorimetric titration system. Nitrogen content was measured by titrating the neutralized sample with 0.1 HCl solution (VWR International, Gdańsk, Poland). Protein content in the freeze-dried snacks was calculated using the $N \times 6.25$ indicator, which portrays an average content of nitrogen in proteins from plant tissue at the level of 16% [34].

2.2.3. Fat Content Determination

Fat content was determined using the Soxhlet method. Fat extraction was conducted using the Soxtec Avanti 2050 Auto Fat Extraction System (FOSS Analytical, Hillerød, Denmark) at 130 °C using petroleum ether (VWR International, Gdańsk, Poland). The first step of the procedure was the extraction of fat in boiling solvent for 30 min. After that, the sample was washed with petroleum ether vapor for 45 min, and then the solvent recovery was carried out. Obtained fat was dried for about 1 h, cooled in a desiccator, and weighed. Fat content was calculated as the ratio of the extracted fat to the initial weight of the sample.

2.2.4. Total Dietary Fiber Content Determination

Determination of total dietary fiber was conducted according to AOAC 985.29 methodology [35] and the 200A Total Dietary Fiber Assay Kit (Megazyme, Wicklow, Ireland). Prior to the test, the following reagents were prepared: phosphate buffer and pH 6, 0.275 M NaOH, 0.325 M HCl, and 78% ethanol, all supplied by VWR International (Gdańsk, Poland). Previously, porcelain crucibles were roasted at 525 °C for 3 h. After cooling, 0.5 g of celite was added to each, wetted with distilled water, and dried at 130 °C to constant weight. After cooling, the crucibles were weighed and stored in a desiccator until use. The procedure started with weighing approximately 1 g of ground material onto the base of the incubation flask in two repetitions, and 50 mL of phosphate buffer pH 6 was added. It was mixed on a magnetic stirrer until a homogeneous suspension was obtained, and then 50 µL of α -amylase (3000 U·mL⁻¹) was added, mixed, covered tightly with aluminum foil, and incubated in a water bath at 90–100 °C for 30 min. After removal from the water bath, the flasks were cooled and the mixtures were increased to pH 7.5 with 0.275 M NaOH solution. When pH was corrected, 100 µL of protease (350 U·mL⁻¹) was added, mixed, and incubated in a shaking water bath at 60 °C for 30 min. After that time, the mixture was cooled and the pH lowered to 4.5 with a 0.325 M HCl solution. With constant stirring, 200 µL of amyloglucosidase (3300 U·mL⁻¹) was added, and then the flasks were covered with foil and incubated again at 60 °C for 30 min. After incubation, 280 mL of 96% ethanol at 60 °C was added to each flask and allowed to precipitate soluble fiber for one hour at an average temperature of 25 °C. The roasted crucibles and flasks with the mixture were placed in the filter module Fibertec 1023 (FOSS Analytical, Hillerød, Denmark). Filtration was then carried out by washing the vessels with ethanol. The crucibles were transferred to

the top of the module, after which the contents were washed three times with 20 mL 78% ethanol, twice with 10 mL 96% ethanol, and twice with 10 mL acetone. The crucibles were dried at 105 °C for approximately 16 h. After cooling in a desiccator, they were weighed. Subsequently, one sample was subjected to protein content determination using the Kjeldahl method, and the other was burnt in a muffle furnace at 525 °C for 5 h. After cooling in the oven, the sample was cooled in a desiccator and weighed. The total fiber content was calculated as the difference between the weight of the dry residue after filtration and the weights of the protein and ash contained in it.

2.2.5. Ash Content Determination

Determination of ash content in the freeze-dried snacks was performed by mineralization of about 1 g of sample in a muffle furnace at a temperature of 525 °C.

2.2.6. Carbohydrate Content Determination

Content of carbohydrates including sugars, specifically non-dietary fiber (non-DF) carbohydrates, was estimated as a difference remaining to 100% after subtraction of water, protein, fat, ash, and total dietary fiber contents [24].

2.2.7. Calorific Value Determination

The calorific value of the freeze-dried snacks was determined utilizing a pressure bomb calorimeter (own construction). Tested material in the form of 1 g pellets, prepared by grinding freeze-dried snacks into a powder and compressing it, was burned in a calorimeter chamber in the atmosphere of pure oxygen. The heat of combustion (gross calorific value) was calculated based on the change in water surrounding the chamber temperature and sample weight by dedicated software.

2.2.8. Polyphenol Content and Antioxidant Properties

Extraction Systems

In vitro digestion procedure

In vitro digestion was performed as described previously [36] with slight modifications. All enzymes and chemical reagents used for the procedure were supplied by Sigma-Aldrich (Poznań, Poland). First, 1 g homogenized samples were subjected to the digestion process after previous hydration in distilled water at 1:1. The first step of the enzymatic digestion was an oral phase that included adding 1.4 mL of simulated saliva stock solution (SSFESS), 0.39 mL of distilled water, 0.01 mL of 0.3 M sodium chloride, and 0.2 mL of α -amylase ($1500 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$). Incubation of the samples was conducted in the dark, continuously shaking at 37 °C for 2 min. For the gastric phase, the obtained bolus was blended with 3 mL of simulated gastric stock solution (SGFESS), 0.278 mL distilled water, 0.002 mL of 0.3 M sodium chloride, 0.08 mL of 1 M hydrochloric acid, and 0.64 mL of porcine pepsin ($25,000 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$). Then, the matrix was incubated at 37 °C for 120 min, as before with continuous shaking and in a dark place. The last phase, intestinal digestion, consisted of mixing gastric chyme with 4.4 mL of simulated intestinal stock solution (SIFESS), 0.524 mL distilled water, 0.06 mL of 1 M sodium hydroxide, 0.03 M of 0.3 M sodium chloride, 1 mL of aqueous bile extract (160 mM), and 2 mL of pancreatin ($800 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$). Further incubation was performed as per the previous step, at the temperature of 37 °C for another 120 min, with continuous shaking and in the dark. During digestion, pH is a crucial factor for a proper course of the procedure, and it should be 7 for the oral and intestinal phases and 3 for the gastric digestion phase. Therefore, pH was controlled and corrected using 1 M sodium hydroxide and 1 M hydrochloric acid. After digestion, the samples were centrifuged (15 min, $6900 \times g$) and the supernatants were mixed with an equal volume of methanol to stop enzyme activity.

Chemical extraction

The samples (500 mg) were extracted three times using a mixture of methanol:acetone:water (4:4:2, *v/v/v*), pH 5 (adjusted with 1 M HCl), ensuring high stability of low-molecular-weight antioxidants [37,38]. The sample was extracted with 5 mL of solvent for 30 min at room temperature using a multi-rotator (RS-60, Biosan, Riga, Latvia) (300 rpm) and centrifuged (15 min, $6000 \times g$), and the pellets were re-extracted. The supernatants from all steps were combined and stored for further analysis. The extraction was performed in duplicate for all freeze-dried samples, and obtained extracts were used for the determination of total polyphenol content and antioxidant activity of material before digestion.

Total Polyphenol Content Analysis

The content of total polyphenols was determined using Folin–Ciocalteu reagent [39] and expressed as gallic acid equivalents (GAE) in mg per g. First, 10 μ L of extract and distilled water were dispensed into 96-well plates. For the blank test, the sample extract was substituted with 10 μ L of extraction reagent. To the prepared mixtures, 40 μ L of 5-fold diluted Folin–Ciocalteu reagent (Sigma-Aldrich, Poznań, Poland) was added. Samples were mixed, and after 3 min, 250 μ L of 10% sodium carbonate aqueous solution was added. Mixed samples were incubated for 30 min in a dark place. After that, the absorbance was measured using a plate reader (Multiskan Sky, Thermo Electron Co., Waltham, MA, USA) at a wavelength of 725 nm.

2.2.9. Antioxidant Activity against ABTS and DPPH Radicals

Abilities to quench ABTS and DPPH radicals were determined as described previously [33,40,41]. Free radical solutions were prepared 24 h before the analysis by dissolving 25 mg of 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) with 99% methanol up to 100 mL and 38.4 mg of (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) in 10 mL of distilled water with the addition of 6.6 mg of potassium persulfate. Directly before the analysis, the prepared stock solutions were diluted with 80% ethanol to obtain absorbance in the range of 0.68–0.72. All chemical reagents were supplied by Sigma-Aldrich (Poznań, Poland).

In order to determine antioxidant activity, 10 μ L of the extracts were mixed in a 96-well plate with 250 μ L of the free radical solution. The plate was shaken and incubated in a dark place for 2 h, and subsequently, absorbances of the samples were measured using a plate reader (Multiskan Sky, Thermo Electron Co., Waltham, MA, USA) at a wavelength of 734 nm and 515 nm for the ABTS and DPPH test, respectively. The antioxidant activity was expressed as Trolox equivalents in mg Trolox/g.

2.2.10. The Relative Bioaccessibility Index (REF)

The relative bioaccessibility index was determined to present the relationships between biologically active compounds and antioxidant activities in terms of their bioaccessibility [42]. It was calculated for polyphenols and antioxidant activities as follows:

$$\text{REF} = \text{PD (AD)} / \text{PC(AC)} \quad (1)$$

where PD is the concentration of the polyphenols in the digests, PC is the concentration of polyphenols in the extract obtained with organic solvents, AD is the selected antioxidant activity (ABTS, DPPH) in the digests, and AC is the selected antioxidant activity (ABTS, DPPH) in the extract obtained with organic solvents.

2.3. Statistical Analysis

Obtained results ($n = 9$, mean $\pm$ SD) were statistically analyzed using Statistica 13.3 software (TIBCO Software, Palo Alto, CA, USA). One-way analysis of variance ANOVA and Tukey's test at $p \leq 0.05$ were performed.

3. Results

3.1. Carbohydrates and Sugar Content

Carbohydrates incorporate all sugars, oligosaccharides, and polysaccharides found in food [43], and in the case of this study, total non-dietary fiber carbohydrate content includes sugars and digestible carbohydrates, except dietary fiber. Based on a statistical analysis of the obtained results shown in Table 1, the addition of dried apple pomace powder made the total non-DF carbohydrate content of the freeze-dried snacks higher in comparison to other variants of the snacks, which were characterized by about 6–6.5% lower and statistically the same content. Accordingly, a similar tendency was observed in the case of glucose and fructose content, which were a few percent and significantly greater ($p \leq 0.05$) in the COG-AP sample than in COG-BP and COG-LMP, which also were similar. On the other hand, each snack's sucrose content significantly differed ($p \leq 0.05$), and both extreme results were determined: the lowest for the freeze-dried snacks with apple pomace powder and the highest for that with blackcurrant pomace powder. As a consequence, total sugar content, including all of the investigated sugars (glucose, fructose, and sucrose), was also significantly higher ($p \leq 0.05$) in the COG-AP sample (45.76%), while for COG-BP and COG-LMP samples, it was estimated up to 43.50% and 43.77%. The presented findings correspond to the literature that confirms only a slight part of carbohydrates not belonging to a dietary fiber in blackcurrant pomace [24,44], which may justify the resemblance of the COG-BP and COG-LMP non-DF carbohydrates profile. On the contrary, previous papers reported relatively high content of such constituents in dried apple pomace [19,21], which also is in an agreement with the outcomes of this study.

Table 1. Sucrose, glucose, fructose, and total non-dietary fiber (non-DF) carbohydrate content in the freeze-dried carrot–orange–ginger (COG) snacks obtained with the addition of powdered apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace and low-methoxyl pectin (LMP) as carrier agents.

Sample	Total Non-DF Carbohydrates (%)	Sucrose (%)	Glucose (%)	Fructose (%)
COG-AP	60.37 ± 0.79a	20.28 ± 0.09c	11.30 ± 0.15a	14.18 ± 0.36a
COG-BP	55.77 ± 0.61b	22.78 ± 0.08a	9.66 ± 0.38b	11.06 ± 0.06b
COG-LMP	55.98 ± 0.27b	21.79 ± 0.32b	10.35 ± 0.08b	11.63 ± 0.09b

Means (±SD; $n = 9$) for analysis followed by different small letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

3.2. Protein Content

Figure 2 presents protein content determined in the freeze-dried carrot–orange–ginger snacks. The snacks with the addition of apple pomace powder contained 7.09% protein. Those with blackcurrant pomace powder contained 9.06% protein, and those with pectin, 6.64%. Statistical analysis of the obtained results indicated that the composition of samples with the addition of blackcurrant pomace (COG-BP) as a carrier agent was greater in protein content compared to the other two variants. The percentage of the protein in snacks with apple pomace powder (COG-AP) was also slightly higher than in products with low-methoxyl pectin (COG-LMP), but there was no significant difference ($p \leq 0.05$) between the two of them. Given the carrier agents as the only factors differentiating formulations of the examined snacks, such results indicate that blackcurrant pomace powder used as an additive in this research was a richer source of protein than both apple pomace powder and low-methoxyl pectin. Plant-based products, including fruits, vegetables, and their preserves, are recognized as low-protein foods, and for this reason, any attempt to enhance their value could be appreciated from a nutrition point of view [45,46]. Its importance is emphasized especially acknowledging concerns related to plant-based diets and nutrient deficiencies that may result from significantly lower ($p \leq 0.05$) absorbability of protein originating from plant sources in contrast to animal protein [46].

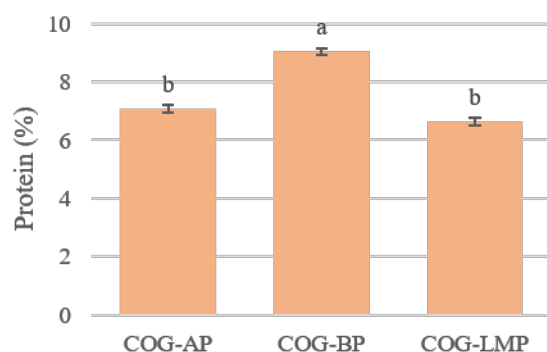


Figure 2. Protein content in the freeze-dried carrot–orange–ginger (COG) snacks obtained with the addition of powdered apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace and low-methoxyl pectin (LMP) as carrier agents. Means ($\pm$ SD; $n = 9$) for analysis followed by different small letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

3.3. Fat Content

Of all the basic compounds in food, fat accounts for notably higher energetic value and relatively low satiety fulfillment [47], and so high-fatty products are energy-dense and often classified as unhealthy products, the consumption of which should be limited, especially for snacks [48,49]. As can be seen from Figure 3, each type of carrier agent used in the study affected fat content in the freeze-dried fruit and vegetable snacks; its quantity was in the range of 0.64–2.04%. The lowest value was observed for the COG-LMP sample with the addition of pure hydrocolloid, and the highest was for that with blackcurrant pomace. We observed that the infusion of fruit pomace increased fat content in the obtained products, which complies with the literature, according to which fruit pomace contains fat originating from seeds appearing in the mass of a pomace. Advantageously, oils obtained from fruit seeds consist mostly of poly- and mono-unsaturated fatty acids, including those essential for humans, e.g., linoleic and α -linolenic acids [50–52]; therefore, fortifying food products with fruit pomace may have an even more beneficial effect on human health due to the composition of fat.

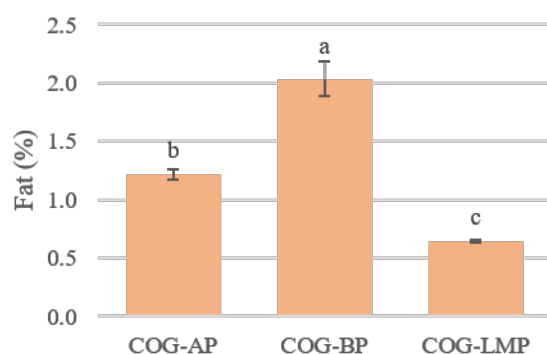


Figure 3. Fat content in the freeze-dried carrot–orange–ginger (COG) snacks obtained with the addition of powdered apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace and low-methoxyl pectin (LMP) as carrier agents. Means ($\pm$ SD; $n = 9$) for analysis followed by different small letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

3.4. Ash Content

The term ash in food products demonstrates all of the mineral residue remaining after the total disintegration of organic compounds, which usually is executed through thermal combustion. The more inorganic micro- and macro-elements accommodate a food, the higher its ash content [53,54]. Results of ash content determination are shown in Figure 4. Applied carrier agents significantly affected ($p \leq 0.05$) this parameter. In this case, freeze-dried snacks with the addition of apple pomace powder (COG-AP) and

blackcurrant pomace powder (COG-BP) were characterized by the lowest (4.81%) and the highest (7.14%) amounts of ash, respectively, and low-methoxyl pectin infusion placed the result obtained for the COG-LMP sample right in the middle (5.99%). Thus, it may be assumed that of all the carrier agents used, apple pomace contained the lowest amount of inorganic compounds, while blackcurrant pomace had the greatest. However, it must be emphasized that the composition of plant material, such as fruits and vegetables and thus their by-products, differs and fluctuates depending on variety, maturity level, as well as storage time and conditions. Moreover, the tendencies observed for ash content changes are not consistent and strongly dependent on the material [55–57]. On the other hand, the high content of ash in pectin indicates its pollution and may disturb gelling properties [58].

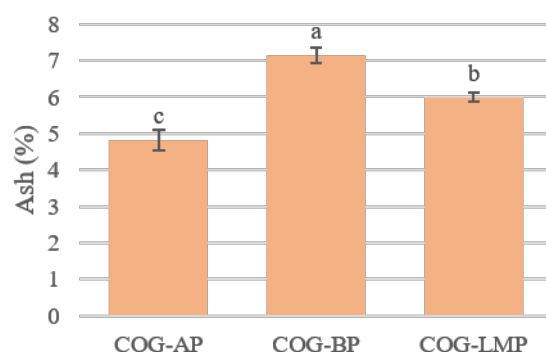


Figure 4. Ash content in the freeze-dried carrot–orange–ginger (COG) snacks obtained with the addition of powdered apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace and low-methoxyl pectin (LMP) as carrier agents. Means ($\pm$ SD; $n = 9$) for analysis followed by different small letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

3.5. Total Dietary Fiber Content

Dietary fiber consists of polysaccharides, oligosaccharides, and lignin—that is, high-molecular-weight components of edible plant structure which resist digestion and absorption in the human organism, simultaneously having a beneficial effect on the overall functioning of the digestive system and digestion process itself, as well as in the prevention of several chronic diseases [59,60]. Figure 5 portrays the total dietary fiber (TDF) content in the freeze-dried snacks, which ranged from 23.90% to 24.60% and up to 29.51%. As can be seen in the figure, the sample with the addition of the pure hydrocolloid carrier agent (COG-LMP) featured significantly higher ($p \leq 0.05$) content of the TDF, and so snacks with both types of pomace powder were characterized by about 5–6% lower values of that parameter. This is consistent with previous literature data that claim pectin as one of the components defined as soluble dietary fiber [59]. According to the literature, dried fruit pomace may contain even up to 90% of TDF, but it more likely oscillates at a level below 60%, depending on the material [24,61]. There were also no statistically significant differences ($p \leq 0.05$) between TDF content in COG-AP and COG-BP snacks, which implies that either AP or BP powder used in this study incorporated total dietary fiber at a similar level. Despite expected degradation of high-molecular-weight dietary fiber carbohydrates to lower forms and sugars, Reißner et al. [62] found that the application of hydrothermal and mechanical processing causes favorable changes in the functionality of the blackcurrant pomace, but no significant ($p \leq 0.05$) transformation of the chemical composition (dietary fiber and sugar contents) of the material was observed, which is beneficial in terms of repetitive quality of fortified foods. Therefore, it can be assumed that processing does not affect the composition of a pomace, at least in terms of the carbohydrate profile.

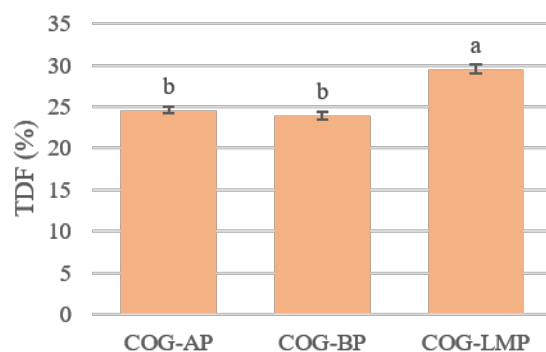


Figure 5. Total dietary fiber (TDF) content in the freeze-dried carrot–orange–ginger (COG) snacks obtained with the addition of powdered apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace and low-methoxyl pectin (LMP) as carrier agents. Means ($\pm$ SD; $n = 9$) for analysis followed by different small letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

3.6. Calorific Value

The calorific value of the freeze-dried snacks is shown in Figure 6. It is expressed as energy of the material combustion estimated for 100 g of the product in order to match the usual form placed in food product packaging. However, the freeze-dried snacks were prepared in the shape of bars using $2 \times 3 \times 10.5$ cm rectangular silicone molds, so one serving of the snacks was considered one bar of 10 g; thus, the approximate amount of energy delivered with the consumption of the products equals 10% of demonstrated values. According to this, the energetic values of the snacks in the sequence COG-AP, COG-BP, and COG-LMP were equal to 429.46, 433.66, and 386.78 kcal/100 g of the product, and consequently, 42.95, 43.37, and 38.68 kcal per serving, respectively. The infusion of fruit pomace significantly increased ($p \leq 0.05$) the calorific value of the products by approximately 11.6% in comparison to snacks with low-methoxyl pectin (COG-LMP). Such an effect may have been a consequence of higher sugar and fat content, which fruit pomace typically comprises [19,24], and so they were introduced into the composition of the snacks with the pomace powder. Nevertheless, even though the content of particular compounds differed contingent on the type of additive used, there was no significant difference ($p \leq 0.05$) between snacks with apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace.

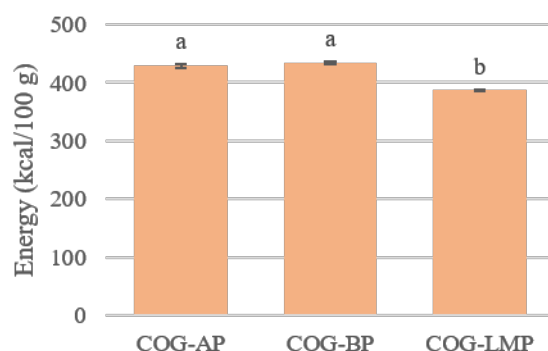


Figure 6. Calorific value of the freeze-dried carrot–orange–ginger (COG) snacks obtained with the addition of powdered apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace and low-methoxyl pectin (LMP) as carrier agents. Means ($\pm$ SD; $n = 9$) for analysis followed by different small letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

The approximate composition of apple, blackcurrant, and any type of fruit or vegetable pomace is hard to assess, considering their diversity and dependence on internal and external factors. Recently, Wladbauer et al. [19] collected data from various scientific reports on apple pomace composition and compiled a diagram portraying an average composition of dried apple pomace. According to the data, dried apple pomace contains

36.89% total dietary fiber, 7.51% glucose, 15.96% fructose, 8.36% sucrose, 3.37% protein, 1.88% ash, and 0.38% polyphenols, vitamin C, and vitamin E combined. Usman et al. [63] also determined the content of some nutrients in dried apple pomace powder. They obtained 1.95% protein, 3.01% fat, 10.85% fiber, 1.50% ash, and 9.75 mg/g of polyphenols. Skinner et al. [21], on the other hand, provided an approximate composition of fresh apple pomace as 1.1–3.6% fat, 2.7–5.3% protein, 4.4–47.3% total dietary fiber, and 44.5–57.4% carbohydrates, including 44.7% fructose and 18.1–18.3% glucose. The authors emphasized the inadequacy of such data and the limitations resulting from the diversity of the material and the lack of comprehensive research. Lyu et al. [64] also pointed out the differences between the composition of apple pomace in various reports, and added processing techniques to the list of factors affecting the quality of the by-products. Nevertheless, the estimation of blackcurrant pomace composition faces similar issues. The dry matter of blackcurrant pomace examined by Reißner et al. [62] consisted of 71.31% dietary fiber, 10.42% protein, 4.22% of fat, 7.28% fructose, and 3.96% glucose. Another paper by Reißner et al. [24] reported that the contents of fat, protein, ash, total dietary fiber, and carbohydrates in blackcurrant pomace powder were 20.21%, 15.71%, 2.66%, 59.13%, and 2.20%, respectively. Additionally, Déniel et al. [44] established that dried blackcurrant pomace comprised 61.7% fiber, 4.5% fat, 16.9% proteins, and 14.8% lipids. Considering all referred data, it may be concluded that in general, blackcurrant pomace powder contains more protein and fat than apple pomace powder, which is consistent with the results obtained in this study. Moreover, differences in the composition of the freeze-dried snacks were determined by the composition of the additives used, but given the diversity of the material, the results may not be repetitive or representative of different batches of the raw material.

There are not many similar products in the Polish market, but one type of commercially available freeze-dried snacks in the form of bars can be found [65]. An average formulation of these bars contains fruits (about 31%), concentrated fruit juices, carob tree extract, maltodextrin, inulin, and pectin, and a singular serving of the snack proposed by the producer is a 10 g bar. The nutritional facts presented on the package state that 100 g of the product delivers 30–34 kcal, 0.7–3.2 g of protein, 0.1–1 g of fat, 53–69 g of carbohydrates (including 39–51 g of sugars), and 28–36 g of dietary fiber. The data were collected based on nutritional fact tables for four flavor variants of the freeze-dried snacks and suggest that the research material of this study is comparable to the commercial products. Nonetheless, given the resemblance of the composition of both commercial products and the snacks examined in this study, conducted research revealed that snacks with fruit pomace powders have about 20–25% higher calorific values than an average commercial snack. However, there are neither vegetable nor fruit pomace-enriched alternatives to be found, and all the freeze-dried bars available on the Polish market were developed on a base of fruits and hydrocolloids.

Recently, Janowicz et al. [66] reported a mathematical assessment of the energy and nutritional value of multi-layer freeze-dried vegetable snacks structured with various hydrocolloids (sodium alginate and a blend of carob and xanthan gums). Given products featured remarkably lower calorific values (14.5–16.5 kcal/10 g), contrary to the snacks investigated in this research. The difference may have resulted from methods used in both studies, because the outcomes of the mentioned one were strictly theoretical and based on nutritional tables that do not include all of the components of the formulations. Considering the size of said differences, they indicate that fruit components are responsible for higher energy delivery. Furthermore, as was reported by Janowicz et al. [66], freeze-dried vegetable snacks also consisted of 7.1–8.3% protein, 1.2–1.5% fat, 26–30% carbohydrates (including sugars), and 8–10% total dietary fiber deriving from infused vegetables and herbs, but the study did not consider hydrocolloids, so the presented TDF content seems to be underestimated.

3.7. Polyphenol Content and Antiradical Properties

Total polyphenol content and antiradical activity of the freeze-dried snacks before and after subjection to *in vitro* digestion are presented in Table 2. There were no statistically significant differences ($p \leq 0.05$) in the total polyphenol content in the extract obtained with organic solvents (CHE); however, the replacement of low-methoxyl pectin (COG-LMP) with blackcurrant pomace powder (COG-BP) caused an increase of about 10%. The highest content of polyphenols in the potentially bioaccessible fraction (BE) was recorded in COG-BP (an increase of 44% compared to COG-LMP). Polyphenols from snacks were relatively bioaccessible—REF values ranged from 1.47 to 1.90 for COG-LMP and COG-BP, respectively. In this case, the potentially bioaccessible fractions were characterized by significantly higher ($p \leq 0.05$) activity when compared to the extracts from “chemical” extraction. The highest activity was recorded for COG-BP, while COG-AP and COG-LMP exhibited lower activity by approximately 50%. The opposite was previously reported by Karwacka et al. [16], who obtained almost triplicate content of polyphenols in freeze-dried vegetable snacks with apple pomace powder compared with the material with sodium alginate as a hydrocolloidal carrier agent, which induced a similar tendency when it comes to antioxidant activity against DPPH radicals, while in this study, the content of TPC was reflected in the ability to quench ABTS radicals. Moreover, the ability to scavenge DPPH radicals was higher in the extract obtained with organic solvents than in counterparts from digestion *in vitro*. Compounds able to reduce DPPH radicals were poorly bioaccessible *in vitro* (REF < 1). Similar behavior was previously reported for the highly pigmented and hydrophilic antioxidants, where antiradical properties were better reflected by ABTS assay than DPPH assay [67]. Thus far, a realization of polyphenols from AP was confirmed by Nayak et al. [68], who recorded c.a. 3-fold higher content in potentially bioaccessible fraction, but similarly to our studies, those extracts were characterized by a lower ability to quench DPPH radicals. Blackcurrant pomace is an excellent source of polyphenols, especially anthocyanins [32], supporting increased polyphenol content and the ability to quench ABTS radicals observed after the replacement of LPM with this material. Although anthocyanins from BP are characterized by low stability during digestion [69], it seems that the matrix of the snacks protected them. As reported by Diez-Sánchez et al. [70], when it comes to the bioaccessibility of polyphenols, the addition of blackcurrant pomace into a model food matrix increases their bioaccessibility in comparison to phenolic extracts, which is also connected to the creation of greater complexes with other constituents of the food models, such as proteins, showing a protective effect on polyphenols during *in vitro* digestion. Therefore, direct quantification of final effects observed in the extracts from digestion *in vitro* is difficult because they resulted from many factors, including the release of the compounds from the matrix, degradation thereof, and interactions.

Table 2. Polyphenols and antiradical properties of the freeze-dried carrot–orange–ginger (COG) snacks obtained with the addition of powdered apple (AP) and blackcurrant (BP) pomace and low-methoxyl pectin (LMP) as carrier agents.

Sample	TPC (mg GAE/g)			ABTS (mg TE/g)			DPPH (mg TE/g)		
	CHE	BE	REF	CHE	BE	REF	CHE	BE	REF
COG-AP	3.36 ± 0.37c	5.51 ± 0.14b	1.64	3.23 ± 0.25cd	6.21 ± 0.40b	1.92	1.19 ± 0.02b	0.47 ± 0.11d	0.40
COG-BP	3.73 ± 0.29c	7.08 ± 0.05a	1.90	3.58 ± 0.29c	9.33 ± 0.28a	2.60	1.66 ± 0.09a	0.63 ± 0.09c	0.38
COG-LMP	3.41 ± 0.28c	5.01 ± 0.41b	1.47	3.03 ± 0.14d	6.00 ± 0.46b	1.98	1.50 ± 0.10a	0.65 ± 0.13c	0.43

CHE—the extract obtained with organic solvents; BE—the extract obtained after digestion *in vitro*; REF—the relative bioaccessibility index; GEA—gallic acid equivalents, TE—Trolox equivalents. Means (±SD; $n = 18$) for analysis followed by different small letters are significantly different ($p \leq 0.05$). CHE and BE results were analyzed together.

4. Conclusions

The composition of the freeze-dried carrot–orange–ginger snacks obtained with the addition of apple and blackcurrant pomace and low-methoxyl pectin as carrier agents was successfully evaluated. The replacement of pectin with apple pomace powder increased carbohydrate and sugar content, while blackcurrant pomace increased protein, ash, and fat content. None of the used pomace powders enhanced the total dietary fiber content in the snacks to exceed or even equal the level of the snacks obtained with pectin. Moreover, the addition of blackcurrant pomace powder caused an increase in the bioaccessible fraction of polyphenols, and as a consequence, enhanced the antiradical properties of the products, thanks to the thermal stability of the anthocyanins. On the basis of the presented results, blackcurrant pomace powder may be established as having a more beneficial effect on the composition and nutritional value of the freeze-dried snacks than apple pomace powder, or even the most beneficial effect among all the applied carrier agents. However, it must also be considered that because of the diversity of the raw material quality, the results obtained in this research may not be repetitive when using different products, but the trends may be maintained. The use of pomace powders as food additives may facilitate more sustainable and economically viable food processing. Nonetheless, further research is needed to evaluate the impact of various types of fruit pomace on the sensory profile of the snacks and to determine the effect of the addition of various amounts of pomace powders on some of the crucial properties, such as dietary fiber and bioactive compound content. Conducting industrial or semi-industrial experiments would also be interesting, providing more useful data and allowing the verification of the possibility of pomace use in practice, and a comparison of the quality of products manufactured in various ways.

Author Contributions: Conceptualization, M.K. and M.J.; methodology, M.K., K.R. and M.Ś.; software, M.K.; validation, M.K., K.R. and M.Ś.; formal analysis, S.G. and M.J.; investigation, M.K., K.R. and M.Ś.; resources, M.K.; data curation, M.K.; writing—original draft preparation, M.K. and M.Ś.; writing—review and editing, M.K., M.Ś., S.G. and M.J.; visualization, M.K.; supervision, S.G. and M.J.; project administration, M.J.; funding acquisition, M.J. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was founded by the National Center for Research and Development as part of III BIOSTRATEG, “The development of an innovative carbon footprint calculation method for the basic basket of food products” task in the project “Development of healthy food production technologies taking into consideration nutritious food waste management and carbon footprint calculation methodology” (BIOSTRATEG3/343817/17/NCBR/2018). Research equipment was purchased as part of the “Food and Nutrition Centre—modernization of the WULS campus to create a Food and Nutrition Research and Development Centre (CŻiŻ)”, co-financed by the European Union from the European Regional Development Fund under the Regional Operational Programme of the Mazowieckie Voivodeship for 2014–2020 (Project No. RPMA.01.01.00-14-8276/17).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data can be made available upon reasonable request.

Acknowledgments: Not applicable.

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

References

1. Ciurzyńska, A.; Cieśluk, P.; Barwińska, M.; Marczak, W.; Ordyniak, A.; Lenart, A.; Janowicz, M. Eating Habits and Sustainable Food Production in the Development of Innovative “Healthy” Snacks. *Sustainability* **2019**, *11*, 2800. [\[CrossRef\]](#)
2. Potter, M.; Vlassopoulos, A.; Lehmann, U. Snacking Recommendations Worldwide: A Scoping Review. *Adv. Nutr.* **2018**, *9*, 86–98. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
3. Hess, J.M.; Jonnalagadda, S.S.; Slavin, J.L. What Is a Snack, Why Do We Snack, and How Can We Choose Better Snacks? A Review of the Definitions of Snacking, Motivations to Snack, Contributions to Dietary Intake, and Recommendations for Improvement. *Adv. Nutr.* **2016**, *7*, 466–475. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

4. Hess, J.M.; Slavin, J.L. The Benefits of Defining “Snacks”. *Physiol. Behav.* **2018**, *193*, 284–287. [CrossRef] [PubMed]
5. Chen, A.; Eriksson, G. The Making of Healthy and Moral Snacks: A Multimodal Critical Discourse Analysis of Corporate Storytelling. *Discourse Context Media* **2019**, *32*, 100347. [CrossRef]
6. World Health Organization Healthy Diet. Available online: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet> (accessed on 20 July 2022).
7. Ismail, M.R.; Seabrook, J.A.; Gilliland, J.A. Outcome Evaluation of Fruits and Vegetables Distribution Interventions in Schools: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Public Health Nutr.* **2021**, *24*, 4693–4705. [CrossRef]
8. Liu, X.; le Bourvellec, C.; Yu, J.; Zhao, L.; Wang, K.; Tao, Y.; Renard, C.M.G.C.; Hu, Z. Trends and Challenges on Fruit and Vegetable Processing: Insights into Sustainable, Traceable, Precise, Healthy, Intelligent, Personalized and Local Innovative Food Products. *Trends Food Sci. Technol.* **2022**, *125*, 12–25. [CrossRef]
9. Majerska, J.; Michalska, A.; Figiel, A. A Review of New Directions in Managing Fruit and Vegetable Processing By-Products. *Trends Food Sci. Technol.* **2019**, *88*, 207–219. [CrossRef]
10. Djurle, A.; Young, B.; Berlin, A.; Vågsholm, I.; Blomström, A.-L.; Nygren, J.; Kvarnheden, A. Addressing Biohazards to Food Security in Primary Production. *Food Secur.* **2022**. [CrossRef]
11. Rizou, M.; Galanakis, I.M.; Aldawoud, T.M.S.; Galanakis, C.M. Safety of Foods, Food Supply Chain and Environment within the COVID-19 Pandemic. *Trends Food Sci. Technol.* **2020**, *102*, 293–299. [CrossRef]
12. Galanakis, C.M.; Rizou, M.; Aldawoud, T.M.S.; Ucak, I.; Rowan, N.J. Innovations and Technology Disruptions in the Food Sector within the COVID-19 Pandemic and Post-Lockdown Era. *Trends Food Sci. Technol.* **2021**, *110*, 193–200. [CrossRef]
13. Sama-Berrocal, C.; Martínez-Azúa, B.C. How Has the COVID-19 Pandemic Affected the Different Branches of the Agri-Food Industry in Extremadura (Spain)? *Land* **2022**, *11*, 938. [CrossRef]
14. Karwacka, M.; Galus, S.; Janowicz, M. Effect of Structure and Texture Forming Additives on Properties of Freeze-Dried Snacks. *Technol. Prog. Food Process.* **2022**, *1*, 130–141.
15. Karwacka, M.; Ciurzyńska, A.; Galus, S.; Janowicz, M. Freeze-Dried Snacks Obtained from Frozen Vegetable by-Products and Apple Pomace—Selected Properties, Energy Consumption and Carbon Footprint. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2022**, *77*, 102949. [CrossRef]
16. Karwacka, M.; Gumkowska, M.; Rybak, K.; Ciurzyńska, A.; Janowicz, M. Impact of Sodium Alginate and Dried Apple Pomace Powder as a Carrier Agent on the Properties of Freeze-Dried Vegetable Snacks. *Pol. J. Food Nutr. Sci.* **2021**, *71*, 451–461. [CrossRef]
17. Karwacka, M.; Rybak, K.; Smetana, S.; Galus, S.; Janowicz, M. Analysis of Selected Functional Properties, Resource Demands, and Energy Consumption of Freeze-Dried Vegetable Snacks. *J. Food Process Preserv.* **2022**, *46*, e16721. [CrossRef]
18. Ciurzyńska, A.; Popkowicz, P.; Galus, S.; Janowicz, M. Innovative Freeze-Dried Snacks with Sodium Alginate and Fruit Pomace (Only Apple or Only Chokeberry) Obtained within the Framework of Sustainable Production. *Molecules* **2022**, *27*, 3095. [CrossRef] [PubMed]
19. Waldbauer, K.; McKinnon, R.; Kopp, B. Apple Pomace as Potential Source of Natural Active Compounds. *Planta Med.* **2017**, *83*, 994–1010. [CrossRef] [PubMed]
20. Antonic, B.; Jancikova, S.; Dordevic, D.; Tremlova, B. Apple Pomace as Food Fortification Ingredient: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J. Food Sci.* **2020**, *85*, 2977–2985. [CrossRef]
21. Skinner, R.C.; Gigliotti, J.C.; Ku, K.M.; Tou, J.C. A Comprehensive Analysis of the Composition, Health Benefits, and Safety of Apple Pomace. *Nutr. Rev.* **2018**, *76*, 893–909. [CrossRef]
22. Nagarajaiah, S.B.; Prakash, J. Chemical Composition and Bioactivity of Pomace from Selected Fruits. *Int. J. Fruit Sci.* **2016**, *16*, 423–443. [CrossRef]
23. Gouw, V.P.; Jung, J.; Zhao, Y. Functional Properties, Bioactive Compounds, and in Vitro Gastrointestinal Digestion Study of Dried Fruit Pomace Powders as Functional Food Ingredients. *LWT Food Sci. Technol.* **2017**, *80*, 136–144. [CrossRef]
24. Reißner, A.M.; Al-Hamimi, S.; Quiles, A.; Schmidt, C.; Struck, S.; Hernando, I.; Turner, C.; Rohm, H. Composition and Physicochemical Properties of Dried Berry Pomace. *J. Sci. Food Agric.* **2019**, *99*, 1284–1293. [CrossRef] [PubMed]
25. Hervik, A.K.; Svihus, B. The Role of Fiber in Energy Balance. *J. Nutr. Metab.* **2019**, *2019*, 983657. [CrossRef] [PubMed]
26. Warrilow, A.; Mellor, D.; McKune, A.; Pumpa, K. Dietary Fat, Fibre, Satiation, and Satiety—A Systematic Review of Acute Studies. *Eur. J. Clin. Nutr.* **2019**, *73*, 333–344. [CrossRef] [PubMed]
27. Ciurzyńska, A.; Lenart, A.; Karwosińska, J. Effect of Quantity of Low-Methoxyl Pectin on Physical Properties of Freeze-Dried Strawberry Jellies. *Pol. J. Food Nutr. Sci.* **2015**, *65*, 233–241. [CrossRef]
28. Piotrowski, W.; Łabanowska, B.H.; Kozak, M. Assessment of Infestation of Selected Blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) Genotypes by the Blackcurrant Leaf Midge (*Dasineura tetensi* Rübs.) in Poland. *Insects* **2021**, *12*, 492. [CrossRef]
29. Rachtan-Janicka, J.; Ponder, A.; Hallmann, E. The Effect of Organic and Conventional Cultivations on Antioxidants Content in Blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) Species. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 5113. [CrossRef]
30. Pokrzywa, P.; Surma, M. Assessment of the Patulin Contamination Level in Selected Applebased Products Available in Retail in Poland. *Agric. Food Sci.* **2022**, *31*, 37–43. [CrossRef]
31. Malinowska, M.; Śliwa, K.; Sikora, E.; Ogonowski, J.; Oszmiański, J.; Koloniak-Ostek, J. Ultrasound-assisted and Micelle-mediated Extraction as a method to Isolate Valuable Active Compounds from Apple. *J. Food Process. Preserv.* **2018**, *42*, e13720. [CrossRef]
32. Sójka, M.; Król, B. Composition of Industrial Seedless Black Currant Pomace. *Eur. Food Res. Technol.* **2009**, *228*, 597–605. [CrossRef]

33. Wiktor, A.; Chadzynska, M.; Rybak, K.; Dadan, M.; Witrowa-Rajchert, D.; Nowacka, M. The Influence of Polyols on the Process Kinetics and Bioactive Substance Content in Osmotic Dehydrated Organic Strawberries. *Molecules* **2022**, *27*, 1376. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Khanizadeh, S.; Buszard, D.; Zarkadas, C.G. Misuse of the Kjeldahl Method for Estimating Protein Content in Plant Tissue. *HortScience* **1995**, *30*, 1341–1342. [[CrossRef](#)]
35. Stephen, A.M.; Champ, M.M.J.; Cloran, S.J.; Fleith, M.; van Lieshout, L.; Mejbourn, H.; Burley, V.J. Dietary Fibre in Europe: Current State of Knowledge on Definitions, Sources, Recommendations, Intakes and Relationships to Health. *Nutr. Res. Rev.* **2017**, *30*, 149–190. [[CrossRef](#)]
36. Brodkorb, A.; Egger, L.; Alminger, M.; Alvito, P.; Assunção, R.; Ballance, S.; Bohn, T.; Bourlieu-Lacanal, C.; Boutrou, R.; Carrière, F.; et al. INFOGEST Static in Vitro Simulation of Gastrointestinal Food Digestion. *Nat. Protoc.* **2019**, *14*, 991–1014. [[CrossRef](#)]
37. Lazăr, S.; Constantin, O.E.; Stănciuc, N.; Aprodu, I.; Croitoru, C.; Răpeanu, G. Optimization of Betalain Pigments Extraction Using Beetroot By-Products as a Valuable Source. *Inventions* **2021**, *6*, 50. [[CrossRef](#)]
38. Fossen, T.; Cabrita, L.; Andersen, M. Colour and Stability of Pure Anthocyanins Influenced by pH Including the Alkaline Region. *Food Chem.* **1998**, *63*, 435–440. [[CrossRef](#)]
39. Singleton, V.L.; Orthofer, R.; Lamuela-Raventós, R.M. Analysis of Total Phenols and Other Oxidation Substrates and Antioxidants by Means of Folin-Ciocalteu Reagent. In *Methods in Enzymology*; Abelson, J.N., Simon, M.I., Eds.; Academic Press: New York, NY, USA, 1999; Volume 299, pp. 152–178.
40. Brand-Williams, W.; Cuvelier, M.E.; Berset, C. Use of a Free Radical Method to Evaluate Antioxidant Activity. *LWT Food Sci. Technol.* **1995**, *28*, 25–30. [[CrossRef](#)]
41. 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](#)]
42. Gawlik-Dziki, U.; Dziki, D.; Świeca, M.; Sęczyk, Ł.; Różyło, R.; Szymanowska, U. Bread Enriched with Chenopodium Quinoa Leaves Powder—The Procedures for Assessing the Fortification Efficiency. *LWT Food Sci. Technol.* **2015**, *62*, 1226–1234. [[CrossRef](#)]
43. Voragen, A.G.J. Technological Aspects of Functional Food-Related Carbohydrates. *Trends Food Sci. Technol.* **1998**, *9*, 328–335. [[CrossRef](#)]
44. Dénél, M.; Haarlemmer, G.; Roubaud, A.; Weiss-Hortala, E.; Fages, J. Hydrothermal Liquefaction of Blackcurrant Pomace and Model Molecules: Understanding of Reaction Mechanisms. *Sustain. Energy Fuels* **2017**, *1*, 555–582. [[CrossRef](#)]
45. Mariotti, F.; Gardner, C.D. Dietary Protein and Amino Acids in Vegetarian Diets—A Review. *Nutrients* **2019**, *11*, 2661. [[CrossRef](#)]
46. Pinckaers, P.J.M.; Trommelen, J.; Snijders, T.; van Loon, L.J.C. The Anabolic Response to Plant-Based Protein Ingestion. *Sports Med.* **2021**, *51*, 59–74. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
47. Rolls, B.J. The Role of Energy Density in the Overconsumption of Fat. *J. Nutr.* **2000**, *130*, 268–271. [[CrossRef](#)]
48. Si Hassen, W.; Castetbon, K.; Tichit, C.; Pénéau, S.; Nechba, A.; Ducrot, P.; Lampuré, A.; Bellisle, F.; Hercberg, S.; Méjean, C. Energy, Nutrient and Food Content of Snacks in French Adults. *Nutr. J.* **2018**, *17*, 33. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
49. Lumanlan, J.C.; Fernando, W.M.A.D.B.; Karnpanit, W.; Jayasena, V. Effects of Food Gums and Pre-Drying on Fat Content of Fabricated Fried Chips. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2021**, *56*, 1544–1550. [[CrossRef](#)]
50. Walia, M.; Rawat, K.; Bhushan, S.; Padwad, Y.S.; Singh, B. Fatty Acid Composition, Physicochemical Properties, Antioxidant and Cytotoxic Activity of Apple Seed Oil Obtained from Apple Pomace. *J. Sci. Food Agric.* **2014**, *94*, 929–934. [[CrossRef](#)]
51. Piasecka, I.; Górska, A.; Ostrowska-Ligeza, E.; Kalisz, S. The Study of Thermal Properties of Blackberry, Chokeberry and Raspberry Seeds and Oils. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 7704. [[CrossRef](#)]
52. Helbig, D.; Böhm, V.; Wagner, A.; Schubert, R.; Jahreis, G. Berry Seed Press Residues and Their Valuable Ingredients with Special Regard to Black Currant Seed Press Residues. *Food Chem.* **2008**, *111*, 1043–1049. [[CrossRef](#)]
53. Ikezu, U.; Ugariogu, S.; Ikpa, C.B.C.; Ibe, F.C.; Iwu, V. Comparative Analysis of Alkali, Ash and Moisture Content of Some Agricultural Wastes. *J. Waste Manag. Xenobiotics* **2020**, *3*, 1–6. [[CrossRef](#)]
54. Liu, K. Effects of Sample Size, Dry Ashing Temperature and Duration on Determination of Ash Content in Algae and Other Biomass. *Algal Res.* **2019**, *40*, 1014862. [[CrossRef](#)]
55. de Azeredo, A.B.; da Silva, A.P.R.; da Silva Matias, A.G.; da Silva, V.M.; Correia, A.A.V.; Voltolini, T.V. Chemical Composition of Forage Watermelon Fruit at Different Maturity Stage or Storage Length. *Acta Sci.* **2022**, *44*, e53624. [[CrossRef](#)]
56. Iordanescu, O.A.; Alexa, E.; Lalescu, D.; Berbecea, A.; Camen, D.; Poiana, M.A.; Moigradean, D.; Bala, M. Chemical Composition and Antioxidant Activity of Some Apricot Varieties at Different Ripening Stages. *Chil. J. Agric. Res.* **2018**, *78*, 266–275. [[CrossRef](#)]
57. Mahmood, T.; Anwar, F.; Bhatti, A.; Iqbal, T. Effect of Maturity on Proximate Composition, Phenolics and Antioxidant Attributes of Cherry Fruit. *Pak. J. Bot.* **2013**, *45*, 909–914.
58. Azad, A.K.; Ali, M.A.; Akter, S.; Rahman, J. Isolation and Characterization of Pectin Extracted from Lemon Pomace during Ripening. *J. Food Nutr. Sci.* **2014**, *2*, 30–35. [[CrossRef](#)]
59. Dhingra, D.; Michael, M.; Rajput, H.; Patil, R.T. Dietary Fibre in Foods: A Review. *J. Food Sci. Technol.* **2012**, *49*, 255–266. [[CrossRef](#)]
60. Barber, T.M.; Kabisch, S.; Pfeiffer, A.F.H.; Weickert, M.O. The Health Benefits of Dietary Fibre. *Nutrients* **2020**, *12*, 3209. [[CrossRef](#)]
61. Quiles, A.; Campbell, G.M.; Struck, S.; Rohm, H.; Hernando, I. Fiber from Fruit Pomace: A Review of Applications in Cereal-Based Products. *Food Rev. Int.* **2018**, *34*, 162–181. [[CrossRef](#)]
62. Reißner, A.-M.; Brunner, M.; Struck, S.; Rohm, H. Thermo-Mechanical Processing of Fibre-Rich Blackcurrant Pomace to Modify Techno-Functional Properties. *Eur. Food Res. Technol.* **2022**, *248*, 2359–2368. [[CrossRef](#)]

-
63. Usman, M.; Ahmed, S.; Mehmood, A.; Bilal, M.; Patil, P.J.; Akram, K.; Farooq, U. Effect of Apple Pomace on Nutrition, Rheology of Dough and Cookies Quality. *J. Food Sci. Technol.* **2020**, *57*, 3244–3251. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
 64. Lyu, F.; Luiz, S.F.; Azeredo, D.R.P.; Cruz, A.G.; Ajlouni, S.; Ranadheera, C.S. Apple Pomace as a Functional and Healthy Ingredient in Food Products: A Review. *Processes* **2020**, *8*, 319. [[CrossRef](#)]
 65. Celiko. Freeze-Dried Bar-Snacks. Available online: <https://www.sklepceliko.pl/pl/c/Batony-liofilizowane/19> (accessed on 2 August 2022).
 66. Janowicz, M.; Ciurzyńska, A.; Karwacka, M.; Kowalska, J.; Galus, S. Mathematical Estimation of the Energy, Nutritional and Health-Promoting Values of Multi-Layer Freeze-Dried Vegetable Snacks. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 6379. [[CrossRef](#)]
 67. Floegel, A.; Kim, D.O.; Chung, S.J.; Koo, S.I.; Chun, O.K. Comparison of ABTS/DPPH Assays to Measure Antioxidant Capacity in Popular Antioxidant-Rich US Foods. *J. Food Compos. Anal.* **2011**, *24*, 1043–1048. [[CrossRef](#)]
 68. Nayak, P.K.; Chandrasekar, C.M.; Sundarsingh, A.; Kesavan, R.K. Effect of In-Vitro Digestion on the Bio Active Compounds and Biological Activities of Fruit Pomaces. *J. Food Sci. Technol.* **2020**, *57*, 4707–4715. [[CrossRef](#)]
 69. Trych, U.; Buniowska, M.; Skapska, S.; Starzonek, S.; Marszałek, K. The Bioaccessibility of Antioxidants in Black Currant Puree after High Hydrostatic Pressure Treatment. *Molecules* **2020**, *25*, 3544. [[CrossRef](#)]
 70. Diez-Sánchez, E.; Quiles, A.; Hernando, I. Interactions between Blackcurrant Polyphenols and Food Macronutrients in Model Systems: In Vitro Digestion Studies. *Foods* **2021**, *10*, 847. [[CrossRef](#)]

Article

The Effect of Storage Time and Temperature on Quality Changes in Freeze-Dried Snacks Obtained with Fruit Pomace and Pectin Powders as a Sustainable Approach for New Product Development

Magdalena Karwacka ^{*}, Agnieszka Ciurzyńska , Sabina Galus ^{*} and Monika Janowicz 

Department of Food Engineering and Process Management, Institute of Food Sciences, Warsaw University of Life Sciences, Nowoursynowska Str. 159c, 02-776 Warsaw, Poland; agnieszka_ciurzynska@sggw.edu.pl (A.C.); monika_janowicz@sggw.edu.pl (M.J.)

^{*} Correspondence: magdalena_karwacka@sggw.edu.pl (M.K.); sabina_galus@sggw.edu.pl (S.G.)

Abstract: The study aimed to evaluate the effect of storage temperature on quality changes in freeze-dried carrot–orange–ginger (COG) snacks obtained with 2% of apple (AP) or blackcurrant (BP) pomace powder or 1.5% of pectin (LMP). The material was stored at 4, 25 and 40 °C for 1, 3, 6 and 12 months in pouches impermeable to vapour, oxygen and light. Water content and activity, texture, colour, total polyphenol content and antioxidant activity were examined to evaluate the products' quality. During storage, water content and activity fluctuations were noted, but no critical values were exceeded. Texture properties remained stable in snacks with pomace powders compared to those with pectin, the hardness of which significantly decreased when stored at ambient and elevated temperatures. However, the product with pectin was found to change colour the least over time. The results obtained for chemical properties were not clear, but they strongly indicated the occurrence of the transformation of some chemical compounds. Overall, a lowered temperature helped to maintain the quality of the freeze-dried snacks for the longest time. The presented research contributes to the general knowledge of the behaviour of innovative products with the addition of nonconventional but sustainable compounds, revealing the potential for quality and stability improvements.

Keywords: apple pomace powder; blackcurrant pomace powder; low-methoxyl pectin; freeze-dried snacks; storage; physicochemical properties



Citation: Karwacka, M.; Ciurzyńska, A.; Galus, S.; Janowicz, M. The Effect of Storage Time and Temperature on Quality Changes in Freeze-Dried Snacks Obtained with Fruit Pomace and Pectin Powders as a Sustainable Approach for New Product Development. *Sustainability* **2024**, *16*, 4736. <https://doi.org/10.3390/su16114736>

Academic Editor: Rajeev Bhat

Received: 12 May 2024

Revised: 29 May 2024

Accepted: 31 May 2024

Published: 2 June 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

Dehydration is one of the most common methods being applied to prolong the shelf-life of easily spoiled foods. Its effectiveness results from lowering the moisture content, and thus the water activity of the material, below the level critical for biochemical reactions and microbial growth [1]. This rule suits traditional dried goods, e.g., fruits and vegetables, and innovative multicomponent products have been designed using drying methods not only as a tool to remove significant amounts of water but also to shape the product's characteristics [2]. The freeze-dried snacks investigated in this research are a great example of those new products. They feature a porous structure that improves texture and elevates hygroscopicity [3] and, like most plant-based freeze-dried materials, they can lose their colour and sensory attributes faster than products obtained with different drying methods [4]. Although the shelf-life of freeze-dried snacks should be long due to the very low water activity, maintaining these products' high quality over time requires the selection of packaging that provides a strong barrier against vapour, oxygen and light, specifically [5].

Some of the most important requirements a food product has to meet before its introduction to the market are safety and stability. To learn about the behaviour of food items

during storage, it is suggested that their response to a wide range of conditions to which they may be subjected is tested, and the critical parameters that may be affected are analysed [6]. Prior to their presence on a store shelf, consumables are usually kept at lowered temperatures in order to reduce the possibility of any unfavourable changes occurring. Once on the store shelf and after being purchased by consumers, goods that do not require refrigerating are stored in ambient temperature surroundings. Moreover, the conditions that products face in a household can vary depending on time, climate, etc. Fluctuations in the environment can cause products to deteriorate more quickly [7]. Shelf-life testing takes a lot of time, so to predict changes that could occur over a prolonged storage time or due to exposure to critical conditions, such as elevated temperature, accelerated shelf-life tests are being conducted.

The objective of this study was to evaluate the effect of storage time and temperature on selected quality parameters of multicomponent freeze-dried snacks with fruit pomace powders or pectin.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

The research was carried out on freeze-dried carrot–orange–ginger (COG) snacks derived from frozen carrot (Unifreeze sp. z o.o., Miesiączkowo, Poland), orange juice (Tymbark, Kraków, Poland), ginger (local market, Warsaw, Poland), dried apple pomace (AP) and blackcurrant pomace (BP) (Greenherb, Łańcut, Poland), low-methoxyl pectin (LMP) (Hortimex, Konin, Poland) and calcium lactate (Agnex, Białystok, Poland).

2.2. Sample Preparation and Storage Conditions

Prior to production, the ingredients were weighed according to the formulation presented in Table 1 and carrot cubes were thawed at room temperature for about 30 min. Water was heated to 85 °C, and then the calcium lactate salt and the additive (AP, BP or LMP) were added and mixed for 1 min. Prepared components were blended for 1 min using GRINDOMIX GM 200 (Retsch, Haan, Germany) at 4500 rpm. The mixture was poured into 1.5 × 1.5 × 1.5 cm silicone moulds, frozen at −40 °C for 4–5 h and freeze-dried using an Alpha 1–2 LD plus lyophilizer (Martin Christ GmbH, Osterode am Harz, Germany) at 30 °C and 63 Pa for 48 h. Directly after freeze-drying, the samples (30 cubes) were packed in double-sealed laminate (PET/AI/PE) packaging pouches impermeable to light, gas and vapour.

Table 1. Formulation of the freeze-dried snacks.

Sample	COG-AP	COG-BP	COG-LMP
Compound	Formulation (%)		
Carrot (C)		60	
Orange juice (O)		30	
Ginger (G)		0.4	
Calcium lactate		0.1	
Water	7.5	7.5	8
Apple pomace powder (AP)	2		
Blackcurrant pomace powder (BP)		2	
Low-methoxyl pectin (LMP)			1.5

The prepared snacks were stored at three different temperatures: 4 ± 1 °C to test their behaviour under conditions commonly used for storing foods before exposure on a store shelf, 25 ± 3 °C to determine changes that could potentially occur during storage in a store or a household, and 40 ± 1 °C to perform accelerated shelf-life testing in order to evaluate the effect of a higher temperature and possible quality loss after an extended storage time. The material was stored for 1, 3, 6 and 12 months, assuming that 1 month was 30 days. One

portion of the material was tested within 48 h after processing as a control. All the analyses were performed within 24 h after the package was opened.

2.3. Analytical Methods

Water content was determined using the oven method. The ground sample (1 g) was dried in an oven SUP 65W/G (WAMED, Warszawa, Poland) at 70 °C for 24 h. The water content was calculated as weight loss measured after drying over the initial weight of the sample. A water activity analysis was conducted utilizing HygroLab C1 meter (Rotronic, Bassersdorf, Switzerland) at 25 ± 1 °C. Both tests were conducted in triplicate.

The texture properties of the material were tested using TA.HD plus texture analyser (Stable Micro Systems, Godalming, UK). A compression test was performed using a 20 mm diameter platen probe, applying a test speed of 0.5 mm/s. The measurement was performed on 10 samples of the material ($1.5 \times 1.5 \times 1.5$ cm) until 50% deformation occurred. The results were expressed as hardness and compression curves.

Colour parameters L^* , a^* , b^* were measured using reflectance mode on CR-5 Colorimeter (Konica Minolta, Tokyo, Japan). The diameter of the measuring hole was 8 mm. The measurements were performed on 10 different spots on the surface of the material. Total colour difference (ΔE) and chroma parameter (C) were calculated according to the following formulas:

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

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2)$$

where ΔL^* , Δa^* and Δb^* are the differences in lightness (L^*), redness (a^*) and yellowness (b^*) between the stored and control material.

The extracts used for total polyphenols content and antioxidant activity determinations were prepared by extracting 0.3 g of the powdered material in 10 mL of 80% (*v/v*) aqueous ethanol solution overnight (around 18–20 h) at room temperature, continuously stirring using a laboratory shaker (Heidolph Instruments, Schwabach, Germany). After extraction, the extracts were centrifuged (2 min, 3000 rpm) utilizing a laboratory centrifuge (MegaStar 600, VWR, Leuven, Belgium), transferred into 0.2 mL PRC tubes and subjected to further analytical procedures, slightly modifying the methodology of Wiktor et al. [8]. Extraction was performed in duplicate for each sample.

The total polyphenol content (TPC) determination was conducted with Folin–Ciocalteu's reagent using the spectrophotometric method. The extracts prepared as stated above were mixed (1:1 *v/v*) with 10 μ L of distilled water in 96-well plates. Subsequently, 40 μ L of 5-fold diluted Folin–Ciocalteu's reagent was added, shaken and incubated in a dark place at room temperature for 3 min. Then, 250 μ L of 7% sodium carbonate solution was added and the mixtures were incubated once more in a dark place for 60 min. For a blank test, an extract was replaced with the 80% aqueous ethanol solution. The absorbance was measured at a wavelength of 750 nm using Multiskan Sky plate reader (Thermo Electron Co., Waltham, MA, USA). The analysis was performed in triplicate for each extract.

Prior to the analysis, the stock DPPH $\bullet$ solution was diluted with 80% (*v/v*) ethanol to obtain a working solution, the absorbance of which was in the range of 0.68–0.72, at a wavelength of 515 nm. A total of 10 μ L of the analyte solution and 250 μ L of the free radical solution were dispensed into a 96-well plate, shook and incubated at room temperature in a dark place for 6 min. A blank test was prepared using the extracting solution instead of the extract. The measurement of absorbance was performed at a wavelength of 515 nm using Multiskan Sky plate reader. The antioxidant activity was expressed as mg Trolox/g dry matter. The determination was conducted in triplicate for each extract.

The measurement of the antioxidant activity against ABTS $\bullet^+$ was conducted following the procedure described for the DPPH $\bullet$ assay, modifying the incubation time, which lasted for 30 min, and the absorbance was measured at a 734 nm wavelength.

The results are expressed on graphs as means with standard deviations. The effect of storage time and storage temperature was evaluated using the two-factorial ANOVA and a post-hoc Tukey's test at $p > 0.05$. Each type of sample (COG-AP, COG-BP, COG-LMP) was analysed separately. The statistical analysis was carried out using STATISTICA 13.1 software (TIBCO, StatSoft Polska, Kraków, Poland).

3. Results and Discussion

Water-related properties are crucial for the stability of food. They determine the microbial growth, biochemical reactions and physical changes that are responsible for the quality and safety of a product. As is shown in Figure 1A, the water content in COG-AP samples fluctuated in the range from 0.011 to 0.022 g/g d.m.; in COG-BP, it fluctuated in the range 0.010–0.020 g/g d.m. and in COG-LMP, it fluctuated in the range 0.013–0.023 g/g d.m. Regardless of the type of additive used, the temperature tended to affect snacks in a congruous way. After the first month, the storage values of the parameter significantly dropped, and then they started to stabilize over time. When refrigerating, water content rapidly increased after 3 months and then continuously decreased until the end of the testing period. The accelerated shelf-life test showed that the first descent was followed by a progressive elevation of the water content. The most notable variation was observed during storage at an ambient temperature, which might be caused by the inconsistency of the surrounding temperature. By the end of the trials, the highest water content was recorded in samples stored at 40 °C and the lowest in the snacks that were refrigerated. The performed tests showed fluctuations in the water content of the snacks; however, the results indicate that the packaging used was sufficient to keep the products stable and separated from the humid environment. A previous investigation of freeze-dried mushrooms showed that when using “normal PE bags” and keeping samples at 25 and 37 °C and various RHs, the moisture content could increase from slightly over 4% to 8–10% within 25 days, which resulted in a microstructure transition and a drastic reduction in texture properties [9]. Other studies on extruded rice snacks proved that, due to the hygroscopicity of the products, moisture content significantly increases during storage regardless of the type of packaging [10].

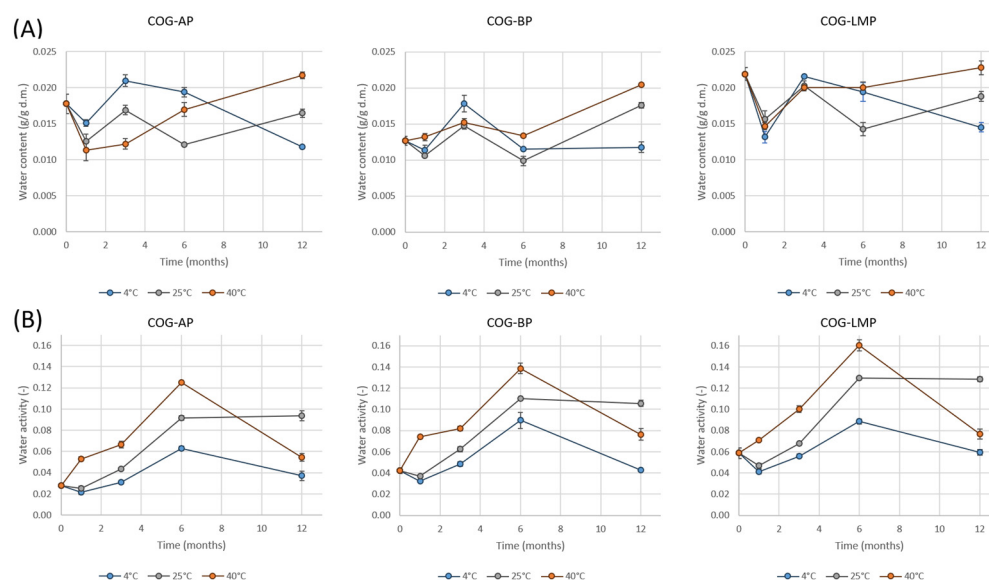


Figure 1. Water content (A) and water activity (B) in freeze-dried snacks stored at various temperatures.

Since the packaging used in the research was impermeable by vapour and double-sealed, the changes observed during storage are most likely a consequence of the migration of moisture present in the material, as well as interactions between the material and the atmosphere enclosed in the packet [11]. As was established before, the water content in the

material is important, but food safety and stability rely mostly on water activity, which has been identified as the critical parameter affecting products' quality during storage [12].

Figure 1B presents water activity fluctuations during 12 months of storage. Constant tendencies regarding the storage temperature can be seen. In the beginning, the water activity of samples stored at 4 and 25 °C slightly lowered and then progressively increased until it peaked after 6 months. After that, the values for the refrigerated material dropped to the initial grade, while maintaining snacks at an ambient temperature induced the water activity to remain constant. Different trends appeared while storing the samples at an elevated temperature. For the first six months, the water activity constantly increased, then it rapidly dropped. In this case, the samples obtained with fruit pomace powders behaved differently than those with LMP. The kinetic curves show that in the first month of storage, the increase in the water activity of COG-AP and COG-BP samples was more intense and then it slowed down during the next two months. Nevertheless, samples stored at the highest tested temperature reached the highest values of water activity, but it seems that they remained at this level only periodically, while storage at an ambient temperature caused the water activity to increase and stay that way for a longer time, which could potentially cause more damage to the sample. However, it is necessary to mention that even though the values of the parameter increased, they did not exceed any critical level for microbial growth or enzymatic and nonenzymatic reactions [12]. A low level of water activity may support lipids' oxidation; however, as was established before, the tested samples do not contain a significant amount of fat [13]. This suggests that freeze-dried snacks remained stable and safe for consumption after 12 months of storage under various conditions.

The texture analysis resulted in hardness (Figure 2A) being obtained as the highest force recorded during compression of the samples, and compression curves (Figure 2B) show the variety of samples that break upon impact. As can be seen in Figure 2A, snacks obtained with fruit pomace powder showed only a slight deviation throughout storage. The hardness of COG-AP significantly rose after the first month by about 15%, regardless of the temperature. The lowest, not significant changes occurred during the low-temperature storage. The mechanical properties of snacks with blackcurrant pomace powders slightly differed at the beginning of storage, but overall hardness remained at the same level. The highest variation in and influence of the storing conditions was observed when analysing COG-LMP snacks. Refrigeration helped the material to remain unchanged for twelve months, but keeping it at ambient and elevated temperatures caused a significant reduction in hardness. A similar trend was established before, where the textural and rheological parameters of pectin gels and solutions were constant at 4 °C and decreased when they were kept at 25 and 40 °C. The authors indicated that the reason for this was the depolymerization of pectin over time [14]. The mentioned observations were also noticeable in the compression curves, examples of which are presented in Figure 2B. They depict the behaviour of a material reacting to an external force that causes deformation of the sample. When the material shows resilience to the impact, the compression force increases and the curve goes upwards, but when the material breaks, the compression force drops abruptly and a downward peak appears on the curve. As is observable in the graph, the curves of COG-AP and COG-BP samples were flatter and the visible disturbances in them were smaller compared to those recorded for COG-LMP. They were also determined within the range of 10 to 15 N, while the difference in the compression curves of samples with pectin varied in the scope of 30 N. This confirms the variation in the tendencies of mechanical properties observed during freeze-dried snacks' storage and their dependence on the products' formulation. Changes in texture are a common phenomenon in low-moisture food products. Mechanical attributes are connected to the internal structure, moisture content and chemical composition of the material [10]. The storage of freeze-dried orange snacks with various biopolymers caused a significant reduction in force peaks that indicated a loss of crispiness. The authors associated this with the water content in the examined products, which also affected their porosity and structure, and strongly recommended controlling

the RH of the environment during storage, identifying this as a main factor responsible for unfavourable quality changes [15].

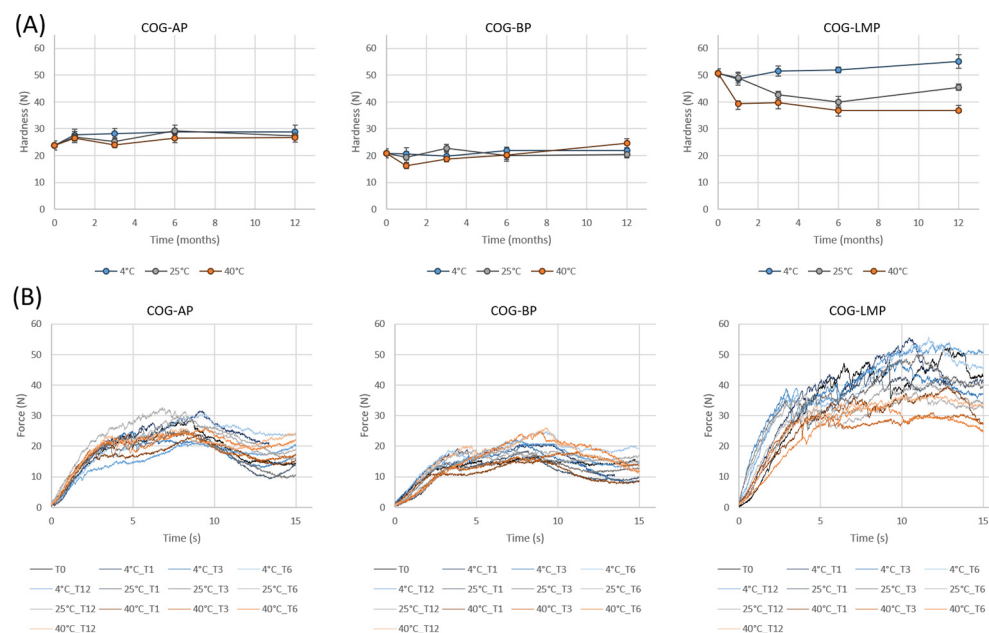


Figure 2. Hardness (A) and compression curves (B) obtained for freeze-dried snacks stored at various temperatures.

Colour is one of the first and most important factors in food products, attracting attention and determining consumers' choice of food products. Although the materials used in the high-barrier packaging required for freeze-dried snacks are unlikely to be transparent and display the product, especially considering its sensitivity to light, consumers expect their purchase to meet their assumptions and for the graphic design of the packaging to be vivid and colourful [16]. In order to analyse colour transformation, lightness, colour saturation and total colour difference were determined. Lightness is presented in Figure 3A. As was expected, the L^* parameter tended to significantly increase in all cases and the lowest shifts were observed in the lightness of samples stored in a refrigerator. However, despite the storage conditions, the variations noted for COG-AP, COG-BP and COG-LMP samples were within the range of 5, 4 and 3 unit points compared to the control sample. However, in the case of freeze-dried orange snacks stored at 20 °C, a decrease in L^* parameter values was observed after only 6 months, while keeping samples in a refrigerator prevented significant lightness changes [15].

Figure 3A also presents the C^* parameter, chroma. This represents the saturation and vividness of colour, which can also be affected during the storage of the material and can influence the overall perception of a product. The greatest and most significant drop in the saturation of the samples' colour was noticed after the first month of storage; later on, the dynamics of the change were reduced and differences were not easy to distinguish regardless of the decreasing tendency. That suggests that the colourants contained in the material reacted with the atmosphere only at the beginning of their storage, and then the reaction was inhibited. This phenomenon may have resulted from the high availability and porous structure of the material; thus, the rapid usage of the reagents caused a degradation in their colour.

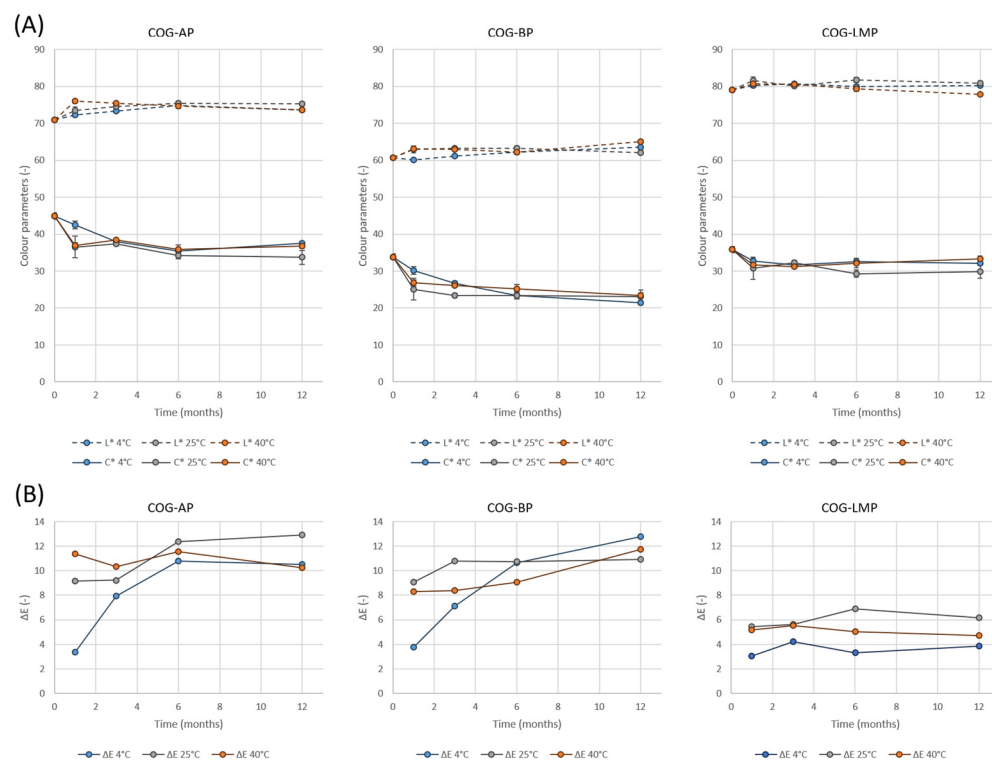


Figure 3. Colour parameters (A) and total colour changes (B) obtained for freeze-dried snacks stored at various temperatures.

The general change in the colour of the samples was estimated as the total colour difference (Figure 3B). A clear difference can be seen in the course of changes that occurred in samples with the addition of pomace powders and low-methoxyl pectin. For the first three months of storage at 4 °C, the snacks' colour transformed progressively compared to products kept at the ambient and elevated temperatures in which the ΔE values did not clearly differ over time. After that time, the changes evened out regardless of the storage conditions. In the case of COG-LMP samples, the time factor was not significant and the total colour change was constant from the first month of storage. The lowest difference was observed in refrigerated material, while the greatest was observed in samples kept at room temperature. The values of the ΔE parameter assessed for snacks with pectin were around 50% lower than those determined for snacks with the addition of pomace powders. However, it is worth mentioning that, regardless of the type of sample and storage conditions, in each examined case, the colour changed to the point at which even an inexperienced person would recognize the difference compared to the first period of storage, and in samples with fruit pomace powders it kept progressing. The obtained results suggest that, in terms of colour maintenance, using LMP allows the production of more stable products in comparison to fruit pomace powders, irrespective of their origin. This may result from the protective effect of the pure biopolymer addition. Previous findings suggested that natural biopolymers have the ability to encapsulate bioactive compounds and colourants and protect them during processing [17], so it is highly possible that this effect also works during storage. However, the susceptibility of the natural colourants contained in carrot and orange juice, such as carotenoids, to degradation resulting from oxidation or exposure to light has been established before. The metalized pouches were also found to be effective in terms of pigment retention and colour preservation during storage [18]. It was also found that, at ambient temperature and above a certain level of moisture content, colour changes may occur due to non-enzymatic browning [15].

Figure 4 shows the total polyphenols content in freeze-dried snacks stored at various conditions. As can be seen, the amount of polyphenols tended to increase over the storage period. The tendency was the most explicit during the accelerated shelf-life testing, while

every time the examination was performed, the results were elevated compared to the previous values of up to 72, 35 and 116% for COG-AP, COG-BP and COG-LMP. A significant increase was also noticed in refrigerated samples. The lowered temperature did not prevent changes, but the ones that occurred were constant over time and stabilized at around 32, 10 and 35%, respectively, in the materials with AP, BP and LMP. An ambient temperature also caused a transformation in TPC results. They were rising for three months of storage, then dropped to the level observed after the first month of storage, or lower in the case of COG-BP. Considering the type of additive used in the snacks, the lowest changes were assessed in samples with the blackcurrant pomace addition. The obtained results were found to be opposite to the previous findings, in which the TPC content tended to significantly decrease over time [5,9]. However, a study on freeze-dried orange snacks stored at 4 and 20 °C also revealed increased TPC during 6 months of storage. The obtained results were associated with the transition of organic acids introduced via the orange puree into compounds of a phenolic nature [15]; therefore, in this research, the changes may be related to the concentrated orange juice in the formulation. On the other hand, an investigation of bioactive compounds in freeze-dried cherries showed that the packaging material used in this research allowed for a higher TPC to be retained during storage compared to other polyethylene materials. The importance of temperature and its effect on polyphenols and the loss of other compounds were also revealed, suggesting that refrigeration is the most beneficial condition [5].

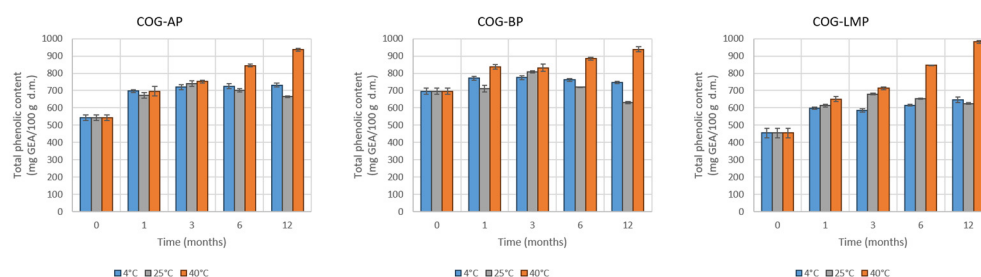


Figure 4. Total polyphenols content in freeze-dried snacks stored at various temperatures.

The antioxidant activity against ABTS and DPPH is presented in Figure 5A,B. Evaluating these results, the most conspicuous was the opposite behaviour of the extracts reacting with different radicals. Regardless of the type of material that was examined, antioxidant activity against ABTS progressively increased over time, while activity against DPPH rose at the beginning of the storage, then significantly decreased. This, combined with the different tendencies observed in TPC results, suggests that, over time, the compounds contained in the material transformed into compounds reacting with ABTS and Folin–Ciocalteu’s reagent, but not compounds reacting with DPPH. However, in previous studies, antioxidant activity assessed with DPPH and FRAP assays remained constant while TPC increased, so the tendency observed with the two methods was the same [15]. This may be explained by the higher selectivity of DPPH radicals in comparison to ABTS; ABTS reacts with a wider range of chemical compounds, while DPPH is directed mostly to polyphenols [19]. During the storage of freeze-dried cherries, antioxidant activity decreased over time and the results correlated with a decrease in the contents of bioactive compounds, including TPC [5]. The course of the observed changes reveals that the highest antioxidant activity occurred in material stored at 40 °C, which may indicate that the elevated temperature accelerated the degradation of compounds present in the material, leading to the formation of compounds with antioxidant properties that did not necessarily have to be polyphenols. Therefore, an analysis and identification of the chemical composition would be highly recommended for future research to understand the exact character of the occurring changes.

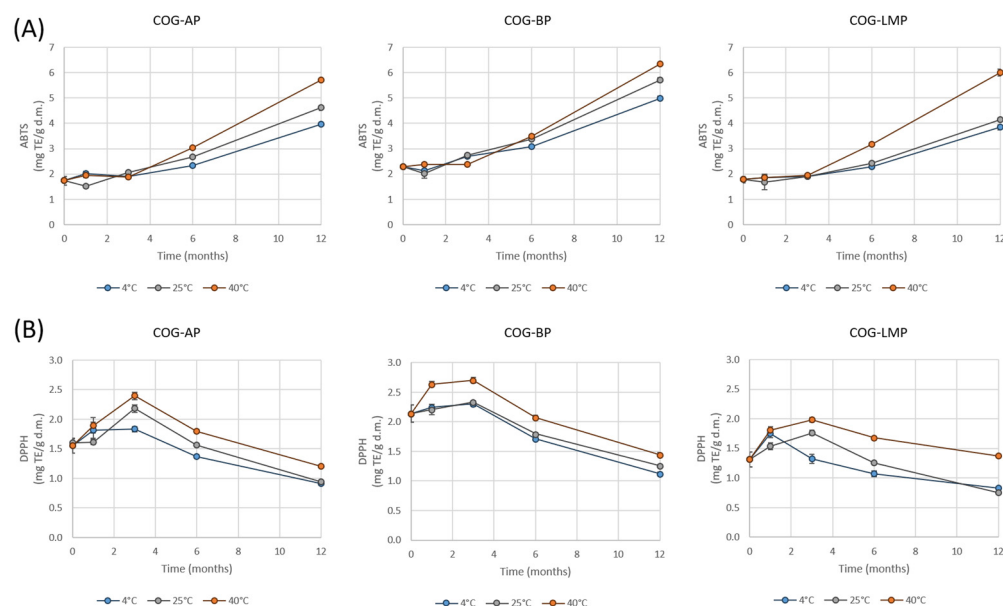


Figure 5. Antioxidant activity against ABTS (A) and DPPH (B) obtained for freeze-dried snacks stored at various temperatures.

4. Conclusions

Fluctuations in water content and water activity were observed, with the highest being recorded in samples stored at 40 °C, while refrigerated samples remained relatively stable. The packaging effectively preserved product stability, indicating its suitability for preventing moisture-related changes. The mechanical properties were influenced by the storage conditions. Snacks obtained with low-methoxyl pectin experienced the highest reduction in hardness, while samples with fruit pomace powder did not notably change within the storage time. Variations in the colour parameters indicated the significant effect of the storage condition on the general appearance of the snacks due to the degradation of pigments contained in the material. Total polyphenols content and antioxidant activity tended to increase over time, with fluctuations observed based on storage conditions and radical type. Antioxidant activity against ABTS increased steadily over time, while activity against DPPH initially rose before declining, with the highest activity levels being observed at 40 °C. An elevated temperature had the most influential effect on the quality of the snacks. Based on the obtained results, it can be stated that freeze-dried snacks containing both pectin and fruit pomace powders can be safely stored for 12 months if refrigerated. However, the observed quality changes should be compared to consumers' perception of the said products to evaluate the optimal shelf-life. Moreover, a more detailed chemical analysis could be performed to obtain a better understanding of the origin and nature of the transformation of the bioactive compounds present during storage.

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

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data will be provided upon request.

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

References

1. Guiné, R.P.F. The Drying of Foods and Its Effect on the Physical-Chemical, Sensorial and Nutritional Properties. *ETP Int. J. Food Eng.* **2018**, *4*, 93–100. [[CrossRef](#)]
2. Duan, X.; Yang, X.; Ren, G.; Pang, Y.; Liu, L.; Liu, Y. Technical Aspects in Freeze-Drying of Foods. *Dry. Technol.* **2016**, *34*, 1271–1285. [[CrossRef](#)]
3. Karwacka, M.; Rybak, K.; Smetana, S.; Galus, S.; Janowicz, M. Analysis of Selected Functional Properties, Resource Demands, and Energy Consumption of Freeze-Dried Vegetable Snacks. *J. Food Process Preserv.* **2022**, *46*, e16721. [[CrossRef](#)]
4. Ong, S.P.; Law, C.L.; Hii, C.L. Effect of Pre-Treatment and Drying Method on Colour Degradation Kinetics of Dried Salak Fruit During Storage. *Food Bioprocess Technol.* **2012**, *5*, 2331–2341. [[CrossRef](#)]
5. Zorić, Z.; Pedisić, S.; Kovačević, D.B.; Ježek, D.; Dragović-Uzelac, V. Impact of Packaging Material and Storage Conditions on Polyphenol Stability, Colour and Sensory Characteristics of Freeze-Dried Sour Cherry (*Prunus Cerasus* Var. Marasca). *J. Food Sci. Technol.* **2016**, *53*, 1247–1258. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Calligaris, S.; Manzocco, L.; Anese, M.; Nicoli, M.C. Shelf-Life Assessment of Food Undergoing Oxidation—A Review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2016**, *56*, 1903–1912. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
7. Baeza, R.; Mielnicki, D.; Zamora, M.C.; Chirife, J. Effect of Environmental Daily Temperature Fluctuations over One Year Storage on the Prediction of Non-Enzymatic Browning in Reduced-Moisture Foods Stored at “Ambient” Temperature. *Food Control* **2007**, *18*, 1532–1537. [[CrossRef](#)]
8. Wiktoria, A.; Chądzyńska, M.; Rybak, K.; Dadan, M.; Witrowa-Rajchert, D.; Nowacka, M. The Influence of Polyols on the Process Kinetics and Bioactive Substance Content in Osmotic Dehydrated Organic Strawberries. *Molecules* **2022**, *27*, 1376. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
9. Liuqing, W.; Qiu, H.; Fei, P.; Alfred Mugambi, M.; Wenjian, Y. Influence of Different Storage Conditions on Physical and Sensory Properties of Freeze-Dried Agaricus Bisporus Slices. *LWT* **2018**, *97*, 164–171. [[CrossRef](#)]
10. Alam, S.; Pathania, S.; Kumar, S.; Sharma, A. Studies on Storage Stability of Carrot Pomace-Chickpea Incorporated Rice Based Snacks. *Agric. Res. J.* **2015**, *52*, 73–79. [[CrossRef](#)]
11. Sirpatrawan, U. Shelf-Life Simulation of Packaged Rice Crackers. *J. Food Qual.* **2009**, *32*, 224–239. [[CrossRef](#)]
12. Ribeiro, A.E.C.; Oliveira, A.R.; da Silva, A.C.M.; Garcia, M.C.; Ribeiro, K.d.O.; Caliani, M.; Soares Júnior, M.S. High Fiber Content Snack Bars Made with Maize Biomass Flour, Rice Flakes and Oat Flakes: Physicochemical Properties and Sensory Acceptance. *Food Sci. Technol. Int.* **2023**, *29*, 181–191. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Karwacka, M.; Rybak, K.; Świeca, M.; Galus, S.; Janowicz, M. The Effect of the Addition of Selected Fruit Pomace Powders and Pectin as Carrier Agents on the Nutritional Value of Freeze-Dried Snacks. *Sustainability* **2022**, *14*, 13012. [[CrossRef](#)]
14. Morris, G.A.; Castile, J.; Smith, A.; Adams, G.G.; Harding, S.E. The Effect of Different Storage Temperatures on the Physical Properties of Pectin Solutions and Gels. *Polym. Degrad. Stab.* **2010**, *95*, 2670–2673. [[CrossRef](#)]
15. Silva-Espinoza, M.A.; del Mar Camacho, M.; Martínez-Navarrete, N. Effect of Storage Temperature on the Crispness, Colour and Bioactive Compounds of an Orange Snack Obtained by Freeze-Drying. *Br. Food J.* **2020**, *123*, 2095–2106. [[CrossRef](#)]
16. Puteri, N.A.A.R.; Harun, R.; Rashidi Johari, N. The Effect of Packaging Design Elements on Youth Purchase Intention of Junk Food. *J. Bisnis Manaj. Perbank.* **2020**, *6*, 25–38. [[CrossRef](#)]
17. Silva-Espinoza, M.A.; García-Martínez, E.; Martínez-Navarrete, N. Protective Capacity of Gum Arabic, Maltodextrin, Different Starches, and Fibers on the Bioactive Compounds and Antioxidant Activity of an Orange Puree (*Citrus Sinensis* (L.) Osbeck) against Freeze-Drying and in Vitro Digestion. *Food Chem.* **2021**, *357*, 129724. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
18. Sahni, P. Effect of Different Packaging Materials on Sensory Attributes of Fibre Rich Cookies during Storage. *Int. J. Pure Appl. Biosci.* **2017**, *5*, 265–272. [[CrossRef](#)]
19. Mareček, V.; Mikyška, A.; Hampel, D.; Čejka, P.; Neuwirthová, J.; Malachová, A.; Cerkal, R. ABTS and DPPH Methods as a Tool for Studying Antioxidant Capacity of Spring Barley and Malt. *J. Cereal Sci.* **2017**, *73*, 40–45. [[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.

The effect of apple pomace powder and calcium ions on selected physicochemical properties of freeze-dried carrot-orange-ginger snacks

Magdalena Karwacka,^{*}  Sabina Galus and Monika Janowicz

Abstract

BACKGROUND: This study aimed to determine the effect of various amounts of dried apple pomace (AP) powder and calcium ions on selected physicochemical properties of restructured freeze-dried snacks in comparison with products obtained with low-methoxyl pectin (LMP). The material was prepared using frozen carrot, orange concentrate, ginger, water, and various concentrations of AP (1, 3, 5%) and calcium lactate (0, 0.01, 0.05%). The reference samples were without additives, and with 0.5 or 1.5% of LMP combined with 0.01% of calcium lactate.

RESULTS: The material was studied in terms of water content and activity, hygroscopic properties, structure, texture, color, and polyphenol content (TPC), and antioxidant activity. The addition of AP resulted in reducing water activity and porosity. As a consequence of the increasing density of the structure, the reduction of hygroscopic properties by up to 16% followed the increasing amount of AP. Apple pomace and calcium ions strengthened the structure. The addition of 3% and 5% of AP gave a hardening effect close to or better than 0.5% LMP. Because of the pigment dilution, LMP caused significantly greater total color change than AP. The incorporation of AP also increased TPC and enhanced antioxidant activity in comparison with the reference materials by up to 18%.

CONCLUSION: The results showed that dried AP powder can be applied successfully as an additive enhancing stability, texture and bioactive compound content, thus fortifying the physicochemical properties of restructured freeze-dried fruit and vegetable snacks.

© 2023 Society of Chemical Industry.

Keywords: apple pomace; calcium ions; low-methoxyl pectin; freeze-dried snacks; physicochemical properties

INTRODUCTION

Food processing can extend the shelf-life of products but it also affects their quality. In the case of fruits and vegetables, one of the most commonly used preservation techniques is dehydration, using various drying methods, which enables products with different characteristics to be obtained and, consequently, enlarges the healthy snacks market.¹ Processing of plant tissue may cause major changes in products' color, texture, and chemical composition in comparison with the fresh material. The primary goal of food technology is to minimize unwanted changes occurring due to processing, and this can be achieved by modifying the parameters and techniques of product treatment. In terms of product quality, meaning overall attractiveness, physicochemical properties, and bioactive compound retention, freeze drying has been recognized as the most beneficial fruit and vegetable preservation method.² Nevertheless, the processing of foods is not the only factor influencing their values. Food products are complex and dynamic matrixes. Their compounds interact during processing, freeze-drying included, causing beneficial or unfavorable quality changes.³ In this way, the attractiveness of edible products, with regard to both physical and chemical properties, can

be enhanced by adjusting their formulations until the desired characteristics are obtained.⁴ The ability to lower the water activity by reducing the amount of water remaining after freeze-drying of fruit or vegetable snacks, which are usually rich in sugars and thus prone to spoilage and quality loss, is one of the fundamental reasons for the application of various biopolymers as food additives.^{5,6} There have been several attempts to apply carrier agents, usually high molecular weight biopolymers, to modify texture and increase the glass transition temperature of freeze-dried materials that are rich in sugars, thus creating innovative, restructured products.⁵⁻⁹ But apart from the technological, structure- and texture-forming properties, a protective effect of infused additives on

^{*} Correspondence to: M Karwacka, Department of Food Engineering and Process Management, Warsaw University of Life Sciences, SGGW, 159c Nowoursynowska St., 02-787 Warsaw, Poland. E-mail: magdalena_karwacka@sggw.edu.pl

Department of Food Engineering and Process Management, Warsaw University of Life Sciences, SGGW, Warsaw, Poland

bioactive compounds contained in the material and improvement of nutritional value was also indicated.^{10–13}

One of the hydrocolloids that has commonly been applied as a gelling agent in the food industry for centuries is pectin. It is a complex, long-chain polysaccharide present in the cell walls of higher plants. The molecular structure of pectin varies strongly depending on its origin, but it is typically characterized by galacturonic acid repeating units linked by α -1,4-glycosidic bonds, and is usually branched with side chains built from neutral sugars.^{14,15} One of the major factors differentiating pectin's structure and determining its functional properties is its degree of esterification, according to which pectin can be divided into high- and low-methoxyl forms. Gelation of high-methoxyl pectin requires strict conditions, such as acidic pH (<3.5) and high sugar content, whereas low-methoxyl pectin is activated by interactions with cations, so it can occur in matrixes characterized by a wide pH range and low sugar concentration.¹⁶ Calcium ions have been investigated thoroughly, and they have been recommended most for supporting the formation of gel networks.^{16–19} Pectin benefits human health^{19,20} and because of its beneficial properties, low-methoxyl pectin (LMP) has already been investigated as a structuring agent in freeze drying.^{21,22} Consumers can already find fruit-flavored freeze-dried bars manufactured with pectin as a structuring agent.²³ Industrial by-products such as peels and pomace are main source of commercially optimized pectin²⁴, so its production can be included as part of an agricultural waste valorization policy. However, the process of pectin derivation includes three main steps – raw material pretreatment, enzymatic or non-enzymatic extraction, and purification – and each of them is high in energy consumption.²⁵ The cost of pectin production from fruit waste is also high and not easy to reduce due to the energy and chemicals required along with processing conditions and duration, and this affects also the price of the hydrocolloid.^{26,27} There have been a few successful attempts, corresponding with the sustainable development policy, to substitute hydrocolloids with AP powders as structure-forming additives in freeze-dried snacks.^{28–30}

Apple pomace is the main by-product remaining after the industrial processing of apples. Poland is one of the world's leading producers of apples (4 Mtons in 2021) and over half of the harvest is destined for juice production. Pomace accounts for about 30% of this and the Polish food industry generates more than 600 000 tons of pomace each year.³¹ The composition of the by-product varies depending, for example, on variety, cultivation, and processing, so several sources reported divergent results regarding the use of pectin in dried AP. The literature indicates that the pectin content has varied in a wide range from 3% to over 30%.^{32,33} Moreover, it is a rich source of easily available phenolic compounds that can be used to enrich the nutritional value of food products.³⁴ Apple pomace has already been used as a fortifying agent in bakery,^{35–39} meat,^{40–44} dairy,^{45–47} and other products.³² Generally, the literature has reported that the addition of AP powder affected the quality of the products that were investigated, including rheology and mechanical properties, color, chemical composition, stability, and sensory attractiveness. In most cases, evaluation established that it improved the products' quality. However, the extent to which pomace supplementation was beneficial varied in each study. Some food characteristics, especially texture and sensory attributes, became too intense to accept. For example, an increasing amount of pomace powder in bakery and pastry products caused them to become flat, hard and less porous. Meat products also were found to be harder and less juicy. Sensory evaluation revealed the progressive intensity of an unfavorable aftertaste.

However, tolerable pomace concentrations were established in a very wide range, strongly depending on the type of product.

The purpose of the study was to obtain restructured freeze-dried fruit and vegetable snacks and to determine the effect of varying dried AP powder content and calcium ion concentration on the products' physicochemical quality in comparison with snacks structured by pectin.

MATERIAL AND METHODS

Materials

The research material was freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks with the addition of dried AP powder and LMP as carrier agents. Raw materials used for sample preparation were: 1 cm frozen carrot cubes supplied by Unifreeze Sp. z o.o. (Miesiączkowo, Poland), concentrated orange juice (Purena, Złoty Potok, Poland), ginger (local market, Warsaw, Poland), dried apple pomace (Greenherb, Łańcut, Poland), low-methoxyl pectin (Hortimex, Konin, Poland) and calcium lactate (Agnex, Białystok, Poland). Chemicals and reagents used for total phenolic content and antioxidant activity determination were purchased from POCH (Gliwice, Poland), and stored in a refrigerator at 4 °C with limited access to light.

Methods

Sample preparation

Freeze-dried snacks were prepared on a laboratory scale using equipment from the Department of Food Engineering and Process Management (SGGW-WULS). The basic formulation of each variant consisted of 60% carrot, 10% orange juice concentrate, and 0.4% fresh ginger. There were also two variable factors in the experiment: apple pomace powder and calcium lactate concentration. The amounts of additives (apple pomace powder, pectin, and calcium lactate) are presented in Table 1 alongside the variants' codes.

The principles of the technological process were described by Karwacka *et al.*³⁰ Half an hour before processing, the frozen carrot was thawed at 25 °C. The water had been heated with calcium lactate to 85 °C using a heating plate, then a carrier agent (apple pomace powder or pectin powder) was added to the solution, mixed and incubated for 1 min. All the ingredients were placed in the laboratory knife mill, a Grindomix GM 200 (Retsch, Haan, Germany), and blended at 4500 rpm for 1 min. Such prepared batches were placed into silicone molds, frozen at –40 °C for about 4 h, and freeze-dried in an Alpha 1–2 LD plus freeze dryer (Martin Christ GmbH, Osterode am Harz, Germany) at 30 °C and the pressure of 0.063 kPa for about 48 h. Dried snacks were packed in high-barrier packaging and stored for about 24–48 h at an ambient temperature, then the tests were conducted.

Analytical methods

Water content and activity

Water content (WC) was obtained by drying 1 g of samples in a convective dryer SUP 65 W/G (Wamed, Płock, Poland) at 70 °C for 24 h. The water activity (a_w) of freeze-dried vegetable snacks was measured using a HygroLab C1 meter (Rotronic, Bassersdorf, Switzerland) at 25 ± 1 °C following the manufacturer's manual.

Hygroscopicity determination

Hygroscopic properties were determined as a moisture gain of a cubic sample (1 × 1 × 1 cm) incubated at 25 °C in a desiccator filled with saturated NaCl solution (RH = 75%) for 72 h. Results were expressed as the amount of water absorbed per 100 g of the material solids.

Table 1. Formulation of the carrot-orange-ginger snacks

Sample	%						
	Carrot	Orange juice concentrate	Ginger	Water	Apple pomace powder	Pectin	Calcium lactate
COG	60	10	0.40	29.60	-	-	-
COG-AP1a	60	10	0.40	28.60	1	-	0
COG-AP1b	60	10	0.40	28.59	1	-	0.01
COG-AP1c	60	10	0.40	28.55	1	-	0.05
COG-AP3a	60	10	0.40	26.60	3	-	0
COG-AP3b	60	10	0.40	26.59	3	-	0.01
COG-AP3c	60	10	0.40	26.55	3	-	0.05
COG-AP5a	60	10	0.40	24.60	5	-	0
COG-AP5b	60	10	0.40	24.59	5	-	0.01
COG-AP5c	60	10	0.40	24.55	5	-	0.05
COG-LMP0.5b	60	10	0.40	29.09	-	0.5	0.01
COG-LMP1.5b	60	10	0.40	28.09	-	1.5	0.01

Determination of texture qualities

The texture qualities of the material were tested using a TA.HD plus texture analyzer (Stable Micro Systems, Godalming, UK). A compression test was performed using a 20 mm diameter platen probe, applying a test speed of 0.5 mm s^{-1} . The measurement was performed on 10 samples of the material ($1.5 \times 1.5 \times 1.5 \text{ cm}$) until 50% deformation. The results were expressed as hardness and compression curves.

Microstructure and porosity analysis

The porosity and microstructure were analyzed using the X-ray micro-CT SkyScan 1272 system (Bruker microCT, Kontich, Belgium) according to the method described previously.²⁹ Measurements were based on the following parameters: pixel size of $13.4 \mu\text{m}$, accelerating voltage of 40 kV, and $193 \mu\text{A}$ of supply current. To obtain a radiographic image, the samples were rotated every 0.2° step until the full rotation of 360° . The output images were analyzed using a dedicated NRecon1.6.3.2 computer program. The porosity and pore-size distribution were calculated based on the 3D data using CTAn v.1.10.1.0 software. The internal structure was also examined using a scanning electron microscope (SEM) TM3000 (Hitachi, Tokyo, Japan) at a magnification of $200\times$. Prior to the analysis, samples were cut with a razor blade, glued to the specimen stub using adhesive carbon discs, and coated with gold using automatic coater Cressington 108auto (EO Elektronen-Optik-Service GmbH, Dortmund, Germany).

Color determination

Color parameters $L^*a^*b^*$ were determined utilizing a CR-5 colorimeter (Konica Minolta, Osaka, Japan) with an 8 mm measuring hole and reflectance mode. The measurements were made on the surface of the material in 15 different spots. The effect of the additive applications were estimated as total color difference (ΔE) according to the following equation:

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

where ΔL^* , Δa^* , Δb^* are the differences in lightness (L^*), redness (a^*), and yellowness (b^*) between snacks with and without any additives.

Chemical properties analysis

Extraction procedure. Prior to the determination of total phenolic content and antioxidant activity, the extracts were prepared by extracting 0.3 g of the ground material in 10 mL of 80% (v/v) aqueous ethanol solution for 24 h at ambient temperature with continuous stirring on a shaker (Heidolph Instruments, Schwabach, Germany). Then, the extracts were centrifuged (2000 g) in a laboratory centrifuge (MegaStar 600, VWR, Leuven, Belgium), placed into 0.2 mL PRC tubes, and subjected to the analysis. Extraction was performed in duplicate for each sample. Preparation of the reagents and determination of the chemical properties of the freeze-dried snacks was carried out according to the methodology described by Wiktor *et al.*⁴⁸ with slight modifications.

Total phenolic content determination. The total phenolic content (TPC) determination was carried out by spectrophotometric method using Folin–Ciocalteu's reagent. The extracts were diluted (1:1 v/v) with 10 μL of distilled water in 96-well plates. Then, 40 μL of fivefold diluted Folin–Ciocalteu's reagent was added, mixed, and incubated at ambient temperature for 3 min to react. After that, 250 μL of 7% sodium carbonate solution was infused, and then the mixtures were incubated again in a dark place for 60 min. A blank test was prepared the same way, replacing an extract with the extraction reagent. The absorbance was measured using a Multiskan Sky plate reader (Thermo Electron Co., Waltham, MA, USA) at a wavelength of 750 nm. The analysis was performed in triplicate for each extract.

Antioxidant activity against $\text{ABTS}^{\bullet+}$. Before the analysis, the stock $\text{ABTS}^{\bullet+}$ solution was diluted with 80% (v/v) ethanol to obtain a working solution with absorbance in the range of 0.68–0.72 at a wavelength of 734 nm. The analysis proceeded by dispensing 10 μL of the analyte solution and 250 μL of the free radical solution into a 96-well plate, shaking and incubating in a dark place for 6 min. A blank probe was prepared with 80% (v/v) ethanol instead of the extract. The absorbance was measured at a wavelength of 734 nm utilizing a Multiskan Sky plate reader. The anti-radical activity was calculated as a decrease in the absorbance of the $\text{ABTS}^{\bullet+}$ radical solution in the presence of an analyte

extract and expressed as mg Trolox/g dried material. The determination was carried out in triplicate for each extract.

Antioxidant activity against DPPH[•]. The determination was preceded by diluting the stock DPPH[•] solution with 80% (v/v) ethanol to obtain a working solution with absorbance in the range of 0.68–0.72 at a wavelength of 515 nm. The determination of the antioxidant activity against DPPH[•] was carried out in a similar way to the procedure described for ABTS^{•+} but the incubation lasted for 30 min and a 515 nm wavelength was used.

Statistical analysis

Significant differences between the results obtained for the samples were evaluated by performing a one-way ANOVA and a post-hoc Tukey's test at $P > 0.05$. Moreover, to recognize the relationship between selected results, Pearson's correlation was determined. The statistical analysis was carried out using Statistica 13 software (TIBCO Software, USA).

RESULTS AND DISCUSSION

The effect of apple pomace powder and calcium ions concentration on water content, water activity, and hygroscopic properties

Table 2 shows the average water content in the freeze-dried snacks, which varied from 1.11% to 2.15%. Low-methoxyl pectin used as a carrier agent did not affect the water content of the material in comparison with the COG sample but the amount of the hydrocolloid did, and the snack with 0.5% of LMP demonstrated lower water content than the one with 1.5% of the additive. Generally, the addition of AP significantly reduced the water content. An exception was noted only for the snack COG-AP1b, which contained 1% AP and 0.01% of calcium lactate, and showed that the water content increased when compared with the COG sample, but was similar to the results obtained for the material with LMP. To reduce water content significantly more than in the reference materials, 3 and 5% of pomace powder had to be added. The snacks' water content was not affected by either AP at those levels or calcium lactate concentration.

The values of a_w , the results of which are also presented in Table 2, were in the range of 0.015–0.055, and could be claimed

to be remarkably low. Both carrier agents reduced this parameter. The lowest effect was observed in samples with 1% of AP powder, which means that COG-AP1a-c samples were characterized with slightly lower water activity than the COG sample but higher than samples with LMP. Increasing the dried pomace powder content caused a decrease in a_w , and so the lowest values were observed for samples containing 5% of AP. The reducing effect on the a_w parameter that followed the infusion of the traditional hydrocolloid carrier was established at a similar level after the addition of 3% AP. Likewise, it was observed in WC, in the case of water activity, explicit trends resulting from various calcium ions concentration also did not appear. The WC and a_w results were similar to those previously reported for freeze-dried snacks with various pomace powders and hydrocolloids.^{8,9,21,28–30} The reduction of these parameters most likely resulted from the water-holding capacity of both fibers inherent in AP powder⁴⁹ and LMP.¹⁶ It was established previously that fiber contained in AP can bind and hold over 5 g of water per 1 g of powder.⁴⁹ On the other hand, even 1% of LMP is sufficient to create stable gel that is able to sustain more than 95% of the liquid. During gel formation chains of pectin create ionic bonds immobilizing water molecules in spaces between them, which makes water more resistant to removal.⁴⁹ In that case, the water remained in the material after dehydration was closed in its structure and biochemical stability was thus obtained. However, our study revealed that apple pomace tended to reduce water content and activity. Previous studies on replacing wheat flour with pomace powder in cookies up to 5% established the opposite trend.³⁵ The difference was probably related to the type of processing. Freeze-drying was applied to remove almost all of the water present in the snack, while baking aimed to cook raw ingredients. The additional water that had been held by the added pomace therefore stayed in the material during processing due to immobilization in a fiber net.

Another crucial feature determining the stability of dried food products is hygroscopicity. It indicates the ability of the material to absorb water from the environment. Outcomes of the freeze-dried snacks' hygroscopic properties (H_{72h}) determination are presented in Table 2 and expressed as the amount of water 100 g of the material had gained due to the 72 h exposition to a humid environment (RH = 75%). The more hygroscopic the material is, the less stable it is during storage, thus higher barrier packaging

Table 2. Physicochemical properties of the freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks obtained with dried apple pomace powder (AP) or low-methoxyl pectin (LMP): Water content (WC), water activity (a_w), hygroscopicity (H_{72h}), hardness, porosity, and total color difference (ΔE)

Sample	WC (%)	a_w	H_{72h} (g H ₂ O/100 g)	Hardness (N)	Porosity (%)	ΔE
COG	1.92 ± 0.10abc	0.055 ± 0.002a	29.15 ± 0.12a	21.98 ± 0.95 h	59.50 ± 0.64abc	-
COG-AP1a	1.59 ± 0.05d	0.048 ± 0.002ab	28.52 ± 0.15ab	29.85 ± 1.44 g	57.21 ± 0.77 cd	9.35 ± 3.09e
COG-AP1b	2.00 ± 0.09ab	0.047 ± 0.004b	28.74 ± 0.72ab	37.25 ± 1.44f	58.46 ± 1.90bc	6.12 ± 1.94f
COG-AP1c	1.67 ± 0.08d	0.039 ± 0.002c	28.36 ± 0.17ab	33.70 ± 1.66 fg	58.98 ± 1.03abc	9.47 ± 2.64e
COG-AP3a	1.28 ± 0.07e	0.031 ± 0.003de	27.10 ± 0.21 cd	65.71 ± 3.82e	53.03 ± 0.97ef	12.342.16d
COG-AP3b	1.11 ± 0.23e	0.028 ± 0.002de	26.27 ± 0.25de	74.19 ± 4.17d	50.52 ± 0.92 fg	12.56 ± 1.57d
COG-AP3c	1.24 ± 0.09e	0.027 ± 0.002ef	25.61 ± 0.34ef	67.90 ± 2.29e	54.46 ± 0.70de	12.83 ± 1.76 cd
COG-AP5a	1.12 ± 0.06e	0.015 ± 0.002 g	24.58 ± 0.16f	88.44 ± 6.27c	43.48 ± 1.28i	15.55 ± 2.79b
COG-AP5b	1.18 ± 0.09e	0.016 ± 0.003 g	24.69 ± 0.26f	101.18 ± 4.23b	45.84 ± 1.56hi	15.60 ± 2.24b
COG-AP5c	1.13 ± 0.10e	0.021 ± 0.001 fg	24.81 ± 0.08f	101.58 ± 4.94b	47.07 ± 1.34gh	15.53 ± 1.92bc
COG-LMP0.5b	1.75 ± 0.01bcd	0.029 ± 0.003de	27.6 ± 1.10bc	79.60 ± 2.80d	61.57 ± 1.74ab	17.47 ± 2.34ab
COG-LMP1.5b	2.15 ± 0.06a	0.034 ± 0.003 cd	27.56 ± 0.26bc	142.99 ± 5.14a	62.10 ± 0.35a	19.28 ± 2.36a

Different letters within columns indicate different homogenous groups determined by Tukey's test at $P < 0.05$.

is required to maintain its quality and extend shelf-life. The freeze-dried snacks featured a high level of hygroscopicity, which varied from 24.58 to 29.15 g of water per 100 g of the material. Extending the pomace powder addition resulted in a significant reduction in the water gain. The LMP significantly lowered the snacks' ability to absorb water; however, a superior effect was observed for samples containing 5% AP, or even those with AP at the level of 3% supported by calcium ions. Supplementation of the cations slightly reinforced the reduction in the hygroscopicity of the snacks at the 3% AP level; however, statistical analysis did not confirm its impact on the other samples. High water absorption capacity is usual for freeze-dried foods. In this study, it was primarily a consequence of a major difference in environmental humidity and water content in the material combined with porous structure, which could be easily penetrated by the surrounding atmosphere. However, a chemical composition that was rich in sugar and low in lipids might also have had an effect.^{7,50} Besides the crucial effect of water content on the microbiological safety of food products, it is also responsible for the material's textural properties, color, and the stability of its chemical compounds.⁵ Moreover, an extension of a moisture level usually has unfavorable consequences regarding product quality; therefore, in the case of freeze drying, the importance of maintaining a non-humid environment should be emphasized even more.

The effect of apple pomace powder and calcium ions concentration on structure and texture properties

The texture properties of the freeze-dried snacks were determined using a compression test and the results are presented in Table 2 and Fig. 1. These results are shown as hardness, expressed as maximum force recorded within the compression, and compression curves, which depict changes in the force occurring at the time of compression. As expected, the lowest hardness was observed for the COG snack. The effect of strengthening the texture depended on the additive type applied and its concentration. Just 1% of AP powder increased the hardness of the material by about 50%, but adding 3% and 5% AP induced the hardening of the snacks' by three and five times. The LMP showed a considerably greater ability to affect the texture properties. The lowest amount of the hydrocolloid (0.5%) was effective enough to almost quadruple the hardness of the samples. Comparable outcome could be achieved by using more than 3% of pomace powder.

Consequently, the hardest was the COG-LMP1.5, which was over 40% harder than snacks with a 5% AP addition. Considering the average pectin content in apple pomace is around 10%,³² COG-AP5 and COG-LMP0.5 samples were supplied with a similar amount of pectin in different form, and yet snacks fortified with AP were harder. This suggests that other components of the pomace, e.g., fiber, starch and protein, which are known from their gelling properties and ability to create three-dimensional structure, can also influence the strengthening effect.⁵¹ Texture analysis showed that the addition of calcium ions tended to enhance the texture-forming properties of AP. However, two out of three cases confirmed a sufficiency of 0.01% concentration, on this base it can be concluded that from the technological perspective, there is no need for overloading and using calcium lactate in greater amount. Calcium ions support LMP gelation but the process is also influenced by the presence of sugar and lowering pH,^{17,18} thus reduced infusion of Ca^{2+} turned out to be sufficient for obtaining optimum gelling conditions. Moreover, sugar, minerals and acids modify the food matrix properties; thus, components naturally contained in AP can create conditions supporting gelation of pectin and thus the texture-forming properties of the pomace powder.

As mentioned above, the hardness is also reflected in the compression curves presented in Fig. 1. The lower the amount of an additive used, the smoother the curves, which indicates that the snacks were less crispy and more inclined to mechanical breakage. Each force drop visible on the curves represents the fracturing of the snack's structure as a result of applied force. As can be seen in Fig. 1, some large drops of force distinguishable on curves obtained for samples with LMP portray breaking of an internal structure of the material, which were usually accompanied by a loud cracking sound. The compression curves for snacks with AP were smoother than for those with LMP addition, but they looked rougher with an increasing amount of the carrier. This also proves the ability of AP to strengthen the structure and texture of freeze-dried food products. The fact that the texturizing ability of AP is lower than this feature of biopolymers (pectin, sodium alginate) was observed previously.^{29,30} On the other hand, Ciużyńska *et al.*⁸ investigated freeze-dried gels obtained by combining sodium alginate with apple pomace powder and established that increasing the pomace content had a greater influence on texture than increasing the content of hydrocolloid. The hardening of the

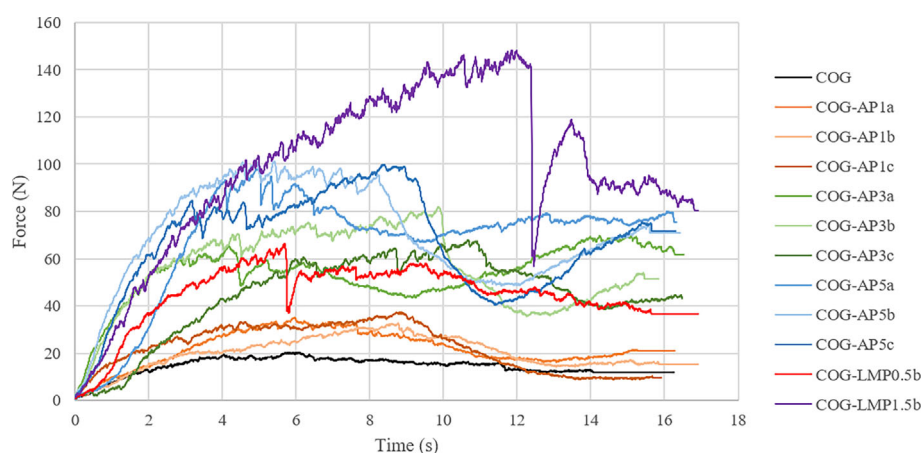


Figure 1. Examples of compression curves of freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks obtained with dried apple pomace powder (AP) or low-methoxyl pectin (LMP).

material was also affected by dehydration and phase transition occurred due to freeze drying.⁵ Jannati *et al.* reported the opposite trend in bakery products, the texture of which was less hard with the increasing addition of dried AP.³⁸ The authors indicated that the phenomenon resulted from intense water absorption of fibers contained in the pomace. If the theory is relevant to the freeze-dried material, even though increasing the content of pomace reduced the hygroscopicity of the snacks, they might soften easier after exposition to a humid environment. This emphasizes the importance of high-barrier packaging of freeze-dried foods to reduce the impact of factors lowering the quality of the product during storage.

Texture often depends on features of internal and external structures of the material, one of which is porosity, defined as a ratio of a volume of inherent void space to the total volume of the material. The porosity of the freeze-dried snacks is presented in Table 2. The reference sample (COG) was characterized by 59.50% porosity. The use of LMP as a structure-forming ingredient resulted in the creation of an increased amount of free space in the structure of the products. As can be seen in Figs 2 and 3, samples structured with pectin had larger pores with thin walls, which were distributed regularly throughout the volume of the sample. However, no significant differences were observed between the porosity level of COG and COG-LMP samples. On the other hand, the infusion of apple pomace powder tended to lower the porosity. Significant changes were distinguished after the addition of 3% and 5% of AP, the structure of which was more dense and compressed (Fig. 2). As can be concluded from Fig. 3, an increasing level of AP was followed by a lowering of the mean size of pores appearing in the sample. There was also a tendency for porosity to increase with an increasing amount of calcium ions in the composition. Such a phenomenon was probably related to the fact that pectin bonds calcium ions during gelation, and

that supports the process of forming a three-dimensional network and protects the created structure from collapsing.¹⁷ Ciużyńska *et al.*⁵² also observed that LMP had created freeze-dried gels characterized by higher porosity and larger pores in comparison with other hydrocolloids (mixtures of xanthan and guar gums). Lowering of porosity and compact structure after the addition of AP to freeze-dried snacks have already been established.^{8,29,30} The authors also noticed unevenness in products' skeletons and irregular pores' shapes and sizes. They indicated that it had resulted from a low structuring potential of apple pomace or limited accessibility of fibers and pectin contained in powder particles. However, considering other findings,⁵³ the applied parameters of hydrothermal treatment should be modified to intensify the gelation process. On the other hand, hydrocolloids are able to form easily a three-dimensional network and structure characterized by thin walls and great cells, which can be preserved due to freeze-drying providing a porous sponge-like structure.^{7,54,55}

The effect of apple pomace powder and calcium ions concentration on color

Color is one of the first features of food products that attract consumers and encourages them to choose a particular good, or discourages them from choosing it, so it is quite important when developing new products. The addition of carrier agents, whether they are hydrocolloids or apple pomace powder, caused the color parameters of the freeze-dried snacks to change (Fig. 4; Table 2). The L^* parameter, which portrays lightness when its values are close to 100, was in the range of 64.94–71.65 for the freeze-dried snacks. The addition of AP at levels 3 and 5% significantly reduced the lightness of the samples, whereas the use of LMP either increased (COG-LMP0.5b) or did not affect the L^* parameter, in a similar way to 1% of AP. Results obtained for snacks with the pomace powder at the levels of 3 and 5% indicate that the infusion of calcium ions may

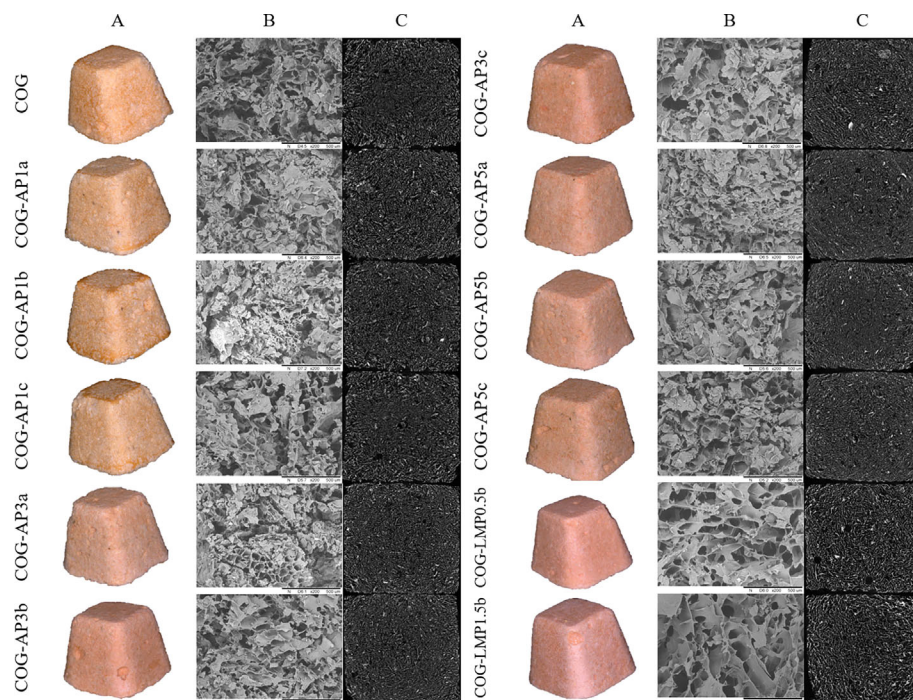


Figure 2. Photos of the overall appearance (column A), scanning electron microscope imaging of the internal structure (column B), and μ CT reconstruction of the internal structure (column C) of freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks obtained with dried apple pomace powder (AP) or low-methoxyl pectin (LMP).

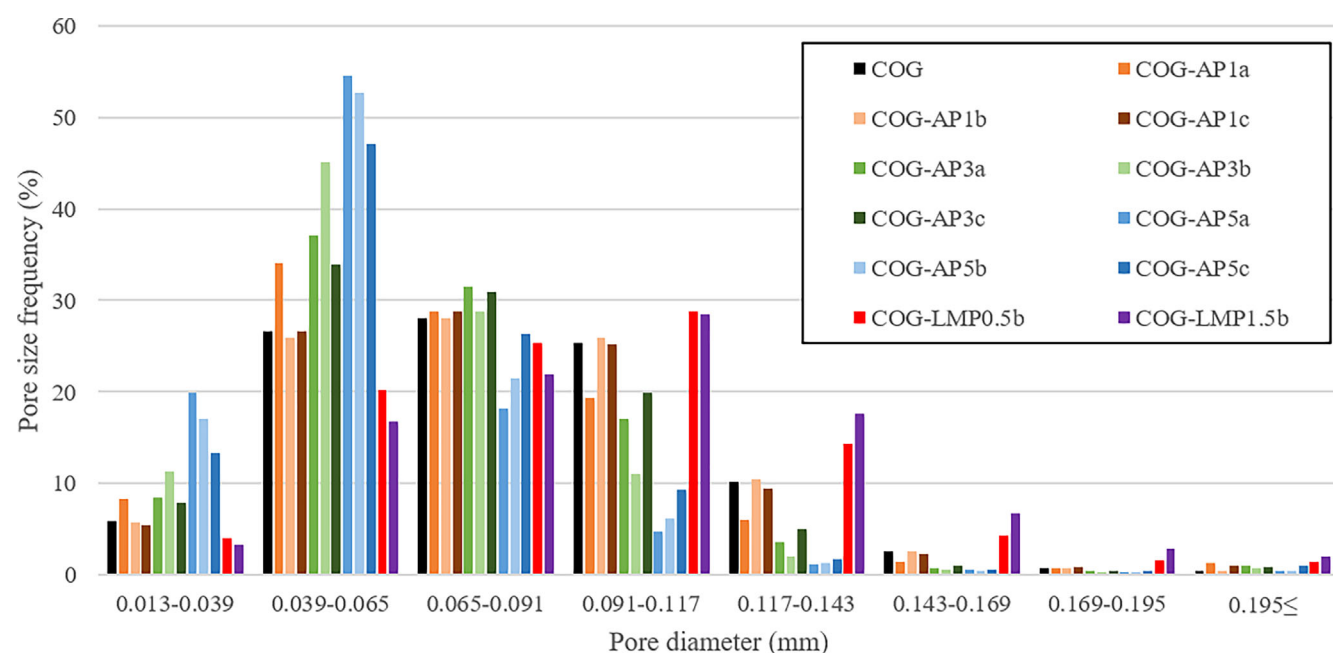


Figure 3. Pore-size distribution of freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks obtained with dried apple pomace powder (AP) or low-methoxyl pectin (LMP).

have affected the darkening of the material; however, this trend was not observed for COG-AP1a-c samples, in the case of which only the COG-AP1b with 0.01% of calcium lactate was darker than the two others. The effect of calcium ions on color parameters most likely resulted from their influence on the structure and texture of the samples, thus changing perception of the color.⁵⁶

Redness, expressed as positive values of the a^* parameter, varied from 21.71 to 29.14. The LMP used as a carrier agent did not significantly affect this parameter when compared with the COG sample. The application of pomace powder did, which is notable for snacks with 1% and 5% of the additive, but not for those with the AP at 3% combined with calcium ions. On the other hand, the b^* parameter expressing yellowness fluctuated from 32.91 to 52.02. It was affected significantly by both hydrocolloidal and alternative carrier agents and linked with the amount used. The more additive, the lower the yellowness of the sample. The use of LMP influenced the b^* parameter to a greater extent than the pomace powder.

There was no connection between the concentration of calcium ions and the yellowness of the material. Color parameters L^* , a^* , and b^* of the pomace powder and pectin were 59.01, 9.88, and 26.57 and 59.01, 9.88, and 26.57, respectively. Considering the additives displayed color distinguished from the main ingredients of the snacks, it was expected that their addition will influence the color of the products compared to the control sample.

The total color difference (ΔE) resulting from the reformulation of the freeze-dried snacks composition is shown in Table 2. The greater the ΔE value, the more the color change progressed. The application of both types of carrier agents significantly affected the color of the snacks. Differences can also be seen in Fig. 2. Although pectin was added in smaller amounts than apple pomace, the color of the snacks with it was considerably more distinct from the sample without any additives. The addition of AP also caused a significant change in the material color, which increased with the increasing amount of the powder. Overall,

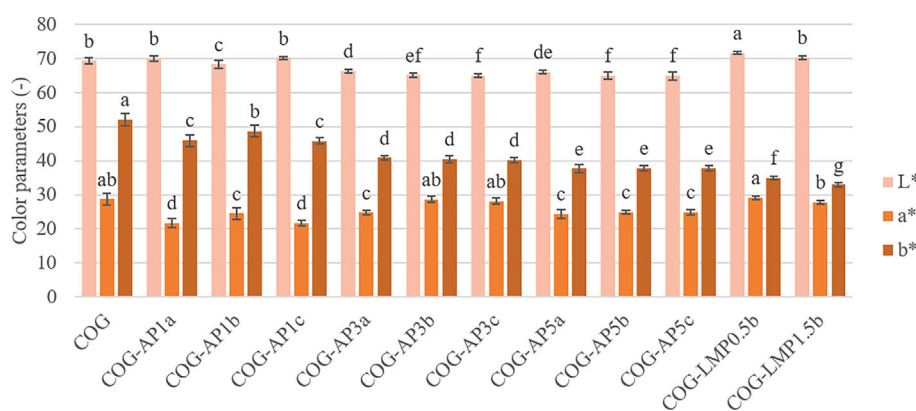


Figure 4. Color parameters L^* (lightness), a^* (redness) and b^* (yellowness) of freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks obtained with dried apple pomace powder (AP) or low-methoxyl pectin (LMP). Results are presented as means with standard deviations. Different letters above bars in the same color indicate different homogenous groups determined by Tukey's test at $P < 0.05$.

the concentration of calcium ions had no remarkable impact on the products' color. The scale of observed color changes was mainly related to the type of additive, and then the level of the infusion. The whitish to creamy color of biopolymers, including hydrocolloids, leads to the dilution of natural pigments inherent in the composition.⁵ On the other hand, convective-dried apple pomace powder was light brown because of the enzymatic and nonenzymatic browning occurring due to the drying process accompanied by the caramelization of sugars.⁵⁷ In contrast with pectin, pomace powder brought in some colorants, which induced milder color change following the gradual increase of pomace addition. However, pectin among other hydrocolloids has been used as a wall material for encapsulation of natural plant-based dyes due to some protective effect it showed on the stability of various colorants,⁵⁸ so it may play a fundamental role in color preservation during long-term storage.

The effect of apple pomace powder and calcium ions concentration on chemical properties

The total polyphenols content (TPC) in the freeze-dried snacks is presented in Fig. 5(a). Low-methoxyl pectin slightly lowered the TPC in comparison with the COG sample but this change was not statistically significant and the values varied from 1163.87 to 1154.65 mg GAE/100 g d.m. On the other hand, the addition of AP increased the polyphenol content up to 1226.63–1232.97 mg GAE/100 g d.m. for 1% of AP contribution, 1277.19–1280.76 mg GAE/100 g d.m. for 3%, and 1313.29–1315.99 mg GAE/100 g d.m. for snacks with 5% AP. The TPC tended to rise with the extension of AP addition and its significance was confirmed by statistical analysis. No effect of calcium ions concentration was observed.

The TPC results correlated with antioxidant activity, as presented in Fig. 5(b). The results varied from 5.53 to 6.58 mg TE/g d.m. for the determination against DPPH[•] free radicals, and from 2.42 to 2.95 mg TE/g d.m. for the test conducted using ABTS^{•+}. Regardless of the test run (ABTS or DPPH), the snacks with pectin were characterized by similar or slightly lower antioxidant properties compared with those without additives. The results revealed a tendency of AP to enhance the antiradical activity of the products to some degree; however, the increase was statistically significant only for the greatest infusion of pomace. Given that the greatest increases of the TPC and antioxidant activity were 13% and about 18%, it seems that other components of the snacks supplied the major part of the polyphenols contained in the freeze-dried snacks – e.g., carrot and orange concentrate.^{59,60} As was established by Mazzeo *et al.*, carrot is rich in various bioactive compounds including carotenoids and phenols, e.g., chlorogenic, caffeic and ferulic acids and derivatives, quercetin, luteolin, kaempferol, and more.^{59,60} Various phenolic compounds, such as hesperidin, narirutin, and eriocitrin, can be found in orange juice as well.⁶¹ However, depending on the concentration method and parameters, some of them may degrade due to heat treatment.⁶² Finally, apple pomace addition may introduce to the product's composition chlorogenic acid, quercetin and its derivatives, phloridzin, and others.⁶³ The increase in TPC after the employment of AP as a fortifying agent was reported previously in various products.^{32,35} Moreover, in most of the studies mentioned in this paper, levels of addition were similar to those applied in this research but the effects were multiplied, possibly due to the fact that the open and porous structure of the freeze-dried COG snacks enhanced bioavailability, thus easing extraction

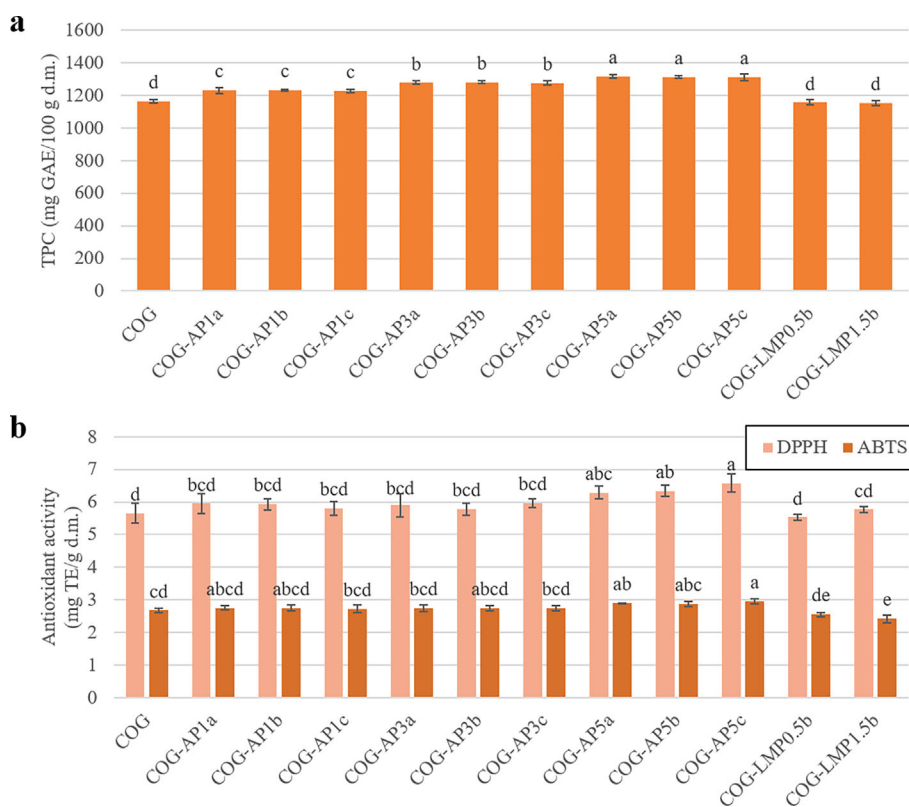


Figure 5. Total phenolic content (TPC) (a) and antioxidant activity against DPPH and ABTS (b) of freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks obtained with dried apple pomace powder (AP) or low-methoxyl pectin (LMP). Results are presented as means with standard deviations. Different letters above bars in the same color indicates different homogenous groups determined by Tukey's test at $P < 0.05$.

of the biocompounds.^{55,64} This indicates that the pomace used in this study probably contained a low level of polyphenols, which may have resulted from poor quality raw apples or aggressive treatment during processing.

CONCLUSIONS

The results in this study showed that AP can be applied successfully as an additive, fortifying the physicochemical properties of restructured freeze-dried fruit and vegetable snacks. In comparison with LMP, due to the constraint of the availability of fiber in powder particles, apple pomace demonstrated lower texture- and structure-forming ability, which resulted in a compact and irregular structure. However, increasing additive content exposed the potential for improvement. A compact and less-porous structure led to a significant reduction in hygroscopicity and thus the foreseen prolongation of the material's stability. The infusion of AP also increased the polyphenol content and as a consequence enhanced antiradical properties. It seems that the products with 3% and 5% of AP revealed optimum features. Differentiating calcium ions concentration showed a slight impact on the structure and texture of the snack but other properties were affected by their presence; the use of the lowest tested level was therefore sufficient and is thus recommended for further research. This study demonstrated the opportunities for the practical application of apple pomace in freeze-drying. Nevertheless, further research is needed to investigate the behavior of the powder in different matrixes, to optimize hydrothermal treatment parameters in terms of the use of freeze-drying, and to comprehend consumers' perception of the application of such by-products in food formulation and their effect on products' quality.

FUNDING

This work was funded by the National Center for Research and Development, as part of the III BIOSTRATEG entitled 'The development of an innovative carbon footprint calculation method for the basic basket of food products', task in the project 'Development of healthy food production technologies taking into consideration nutritious food waste management and carbon footprint calculation methodology' (BIOSTRATEG3/343817/17/NCBR/2018). Research equipment was purchased as part of the food and nutrition center modernization of the WULS campus to create a food and nutrition research and development center (CŻIŻ) co-financed by the European Union from the European Regional Development Fund under the Regional Operational Program of the Mazowieckie Voivodeship for 2014–2020 (project no. RPMA.01.01.00-14-8276/17).

DECLARATION OF INTERESTS

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

Data will be available on reasonable request.

REFERENCES

- Huang L and Zhang M, Trends in development of dried vegetable products as snacks. *Drying Technol* **30**:448–461 (2012).
- Bhatta S, Janezic TS and Ratti C, Freeze-drying of plant-based foods. *Foods* **9**:87 (2020).
- Harguindeguy M and Fissore D, On the effects of freeze-drying processes on the nutritional properties of foodstuff: a review. *Drying Technol* **38**:846–868 (2020).
- Van Gunst A, Roodenburg AJC and Steenhuis IHM, Reformulation as an integrated approach of four disciplines: a qualitative study with food companies. *Foods* **7**:64 (2018).
- Silva-Espinoza MA, del Mar Camacho M and Martínez-Navarrete N, Use of different biopolymers as carriers for purposes of obtaining a freeze-dried orange snack. *LWT* **127**:109415 (2020).
- Jakubczyk E, Kamińska-Dwórznińska A and Ostrowska-Ligeza E, The effect of composition, pre-treatment on the mechanical and acoustic properties of apple gels and freeze-dried materials. *Gels* **8**:110 (2022).
- Jakubczyk E, Kamińska-Dwórznińska A, Ostrowska-Ligeza E, Górka A, Wirkowska-wojdyła M, Mańko-jurkowska D *et al.*, Application of different compositions of apple puree gels and drying methods to fabricate snacks of modified structure, storage stability and hygroscopicity. *Appl Sci* **11**:10286 (2021).
- Ciurzyńska A, Popkowicz P, Galus S and Janowicz M, Innovative freeze-dried snacks with sodium alginate and fruit pomace (only apple or only chokeberry) obtained within the framework of sustainable production. *Molecules* **27**:3095 (2022).
- Ciurzyńska A, Marczak W, Lenart A and Janowicz M, Production of innovative freeze-dried vegetable snack with hydrocolloids in terms of technological process and carbon footprint calculation. *Food Hydrocolloids* **108**:105993 (2020).
- Wang J, Aalaei K, Skibsted LH and Ahrné LM, Bioaccessibility of calcium in freeze-dried yogurt based snacks. *LWT* **129**:109527 (2020).
- Donno D, Mellano MG, Riondato I, De Biaggi M, Andriamaniraka H, Gamba G *et al.*, Traditional and unconventional dried fruit snacks as a source of health-promoting compounds. *Antioxidants* **8**:396 (2019).
- Silva-Espinoza MA, García-Martínez E and Martínez-Navarrete N, Protective capacity of gum Arabic, maltodextrin, different starches, and fibers on the bioactive compounds and antioxidant activity of an orange puree (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) against freeze-drying and in vitro digestion. *Food Chem* **357**:129724 (2021).
- Li JM and Nie SP, The functional and nutritional aspects of hydrocolloids in foods. *Food Hydrocolloids* **53**:46–61 (2018).
- Constenla D, Ponce AG and Lozano JE, Effect of pomace drying on apple pectin. *LWT* **35**:216–221 (2002).
- Pancerz M, Kruk J, Witek M and Ptasek A, The effect of biopolymer-water interaction on relaxation phenomena in blackcurrant pectin solutions. *Food Chem* **383**:123600 (2022).
- Wan L, Yang Z, Cai R, Pan S, Liu F and Pan S, Calcium-induced-gel properties for low methoxyl pectin in the presence of different sugar alcohols. *Food Hydrocolloids* **112**:106252 (2021).
- Capel F, Nicolai T, Durand D, Boulenger P and Langendorff V, Calcium and acid induced gelation of (amidated) low methoxyl pectin. *Food Hydrocolloids* **20**:901–907 (2006).
- Kastner H, Einhorn-Stoll U and Senge B, Structure formation in sugar containing pectin gels-influence of Ca²⁺ on the gelation of low-methoxylated pectin at acidic pH. *Food Hydrocolloids* **27**:42–49 (2012).
- Celus M, Kyomugasho C, van Loey AM, Grauwet T and Hendrickx ME, Influence of pectin structural properties on interactions with divalent cations and its associated functionalities. *Compr Rev Food Sci Food Saf* **17**:1576–1594 (2018).
- Lara-Espinoza C, Carvajal-Millán E, Balandrán-Quintana R, López-Franco Y and Rascón-Chu A, Pectin and pectin-based composite materials: beyond food texture. *Molecules* **23**:942 (2018).
- Ciurzyńska A, Lenart A and Karwosińska J, Effect of quantity of low-methoxyl pectin on physical properties of freeze-dried strawberry jellies. *Pol J Food Nutr Sci* **65**:233–241 (2015).
- Ciurzyńska A, Mieszkowska A, Olsinski I and Lenart A, The effect of composition and aeration on selected physical and sensory properties of freeze-dried hydrocolloid gels. *Food Hydrocolloids* **67**:94–103 (2017).
- Celiko, Freeze-dried bars (2023). Available: <https://www.sklepceliko.pl/c/Batony-liofilizowane/19> [20 September 2023].
- Pagliaro M and Ciriminna R, Pectin production and global market. *Agro Food Ind Hi Tech* **27**:17–20 (2016).
- Adetunji LR, Adekunle A, Orsat V and Raghavan V, Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: a review. *Food Hydrocolloids* **62**:239–250 (2017).

- 26 Ciriminna R, Fidalgo A, Scurria A, Ilharco LM and Pagliaro M, Pectin: new science and forthcoming applications of the most valued hydrocolloid. *Food Hydrocolloids* **127**:107483 (2022).
- 27 Muhidinov ZK, Ikromi KI, Jonmurodov AS, Nasriddinov AS, Usmanova SR, Bobokalonov JT *et al.*, Structural characterization of pectin obtained by different purification methods. *Int J Biol Macromol* **183**:2227–2237 (2021).
- 28 Karwacka M, Ciurzyńska A, Galus S and Janowicz M, Freeze-dried snacks obtained from frozen vegetable by-products and apple pomace – selected properties, energy consumption and carbon footprint. *Innovative Food Sci Emerging Technol* **77**:102949 (2022).
- 29 Karwacka M, Gumkowska M, Rybak K, Ciurzyńska A and Janowicz M, Impact of sodium alginate and dried apple pomace powder as a carrier agent on the properties of freeze-dried vegetable snacks. *Pol J Food Nutr Sci* **71**:451–461 (2021).
- 30 Karwacka M, Rybak K, Smetana S, Galus S and Janowicz M, Analysis of selected functional properties, resource demands, and energy consumption of freeze-dried vegetable snacks. *J Food Process Preserv* **46**:e16721 (2022).
- 31 Czubaszek R, Wysocka-Czubaszek A and Tyborowski R, Methane production potential from apple pomace, cabbage leaves, pumpkin residue and walnut husks. *Appl Sci* **12**:6128 (2022).
- 32 Antonic B, Jancikova S, Dordevic D and Tremlova B, Apple pomace as food fortification ingredient: a systematic review and meta-analysis. *J Food Sci* **85**:2977–2985 (2020).
- 33 Morales-Contreras BE, Wicker L, Rosas-Flores W, Contreras-Esquivel JC, Gallegos-Infante JA, Reyes-Jaquez D *et al.*, Apple pomace from variety “Blanca de Asturias” as sustainable source of pectin: composition, rheological, and thermal properties. *LWT* **117**:108641 (2020).
- 34 Pollini L, Juan-García A, Blasi F, Mañes J, Cossignani L and Juan C, Assessing bioaccessibility and bioavailability in vitro of phenolic compounds from freeze-dried apple pomace by LC-Q-TOF-MS. *Food Biosci* **48**:101799 (2022).
- 35 Usman M, Ahmed S, Mehmood A, Bilal M, Patil PJ, Akram K *et al.*, Effect of apple pomace on nutrition, rheology of dough and cookies quality. *J Food Sci Technol* **57**:3244–3251 (2020).
- 36 Zlatanović S, Kalušević A, Micić D, Laličić-Petronijević J, Tomić N, Ostojić S *et al.*, Functionality and storability of cookies fortified at the industrial scale with up to 75% of apple pomace flour produced by dehydration. *Foods* **8**:561 (2019).
- 37 Liang X, Feng L, Ran J, Sun J, Chen X, Jiao Z *et al.*, Influence of adding steam-exploded apple pomace on wheat flour characteristics and biscuit quality. *J Food Sci Technol* **57**:3031–3039 (2020).
- 38 Jannati N, Hojjatoleslami M, Hosseini E, Mozafari HR and Siavoshi M, Effect of apple pomace powder on rheological properties of dough and sangak bread texture. *Carpathian J Food Sci Technol* **10**:77–84 (2018).
- 39 Cantero L, Salmerón J, Miranda J, Larretxi I, Fernández-Gil MDP, Bustamante MÁ *et al.*, Performance of apple pomace for gluten-free bread manufacture: effect on physicochemical characteristics and nutritional value. *Appl Sci* **12**:5934 (2022).
- 40 Younis K and Ahmad S, Waste utilization of apple pomace as a source of functional ingredient in buffalo meat sausage. *Cogent Food Agric* **1**:119397 (2015).
- 41 Yadav S, Malik A, Pathera A, Islam RU and Sharma D, Development of dietary fibre enriched chicken sausages by incorporating corn bran, dried apple pomace and dried tomato pomace. *Nutr Food Sci* **46**:16–29 (2016).
- 42 Rather SA, Akhter R, Masoodi FA, Gani A and Wani SM, Utilization of apple pomace powder as a fat replacer in goshtaba: a traditional meat product of Jammu and Kashmir, India. *J Food Meas Charact* **9**:389–399 (2015).
- 43 Thangavelu KP, Tiwari B, Kerry JP and Álvarez C, A comparative study on the effect of ultrasound-treated apple pomace and coffee Silver-skin powders as phosphate replacers in Irish breakfast sausage formulations. *Foods* **11**:2763 (2022).
- 44 Parkash Scholar J, Lajpat Rai L, Parkash J, Sharma D and Yadav S, Role of dietary fibre (corn bran and apple pomace) in processed meat products : a review. *Pharma Innovation J* **10**:13–17 (2021).
- 45 Popescu L, Ceşco T, Gurev A, Ghendov-Mosanu A, Sturza R and Tarna R, Impact of apple pomace powder on the bioactivity, and the sensory and textural characteristics of yogurt. *Foods* **11**:3565 (2022).
- 46 Wang X, Kristo E and LaPointe G, Adding apple pomace as a functional ingredient in stirred-type yogurt and yogurt drinks. *Food Hydrocolloids* **100**:105453 (2020).
- 47 Wang X, Kristo E and LaPointe G, The effect of apple pomace on the texture, rheology and microstructure of set type yogurt. *Food Hydrocolloids* **91**:83–91 (2019).
- 48 Wiktor A, Chądzyńska M, Rybak K, Dadan M, Witrowa-Rajchert D and Nowacka M, The influence of polyols on the process kinetics and bioactive substance content in osmotic dehydrated organic strawberries. *Molecules* **27**:1376 (2022).
- 49 Sharma PC, Gupta A and Issar K, Effect of packaging and storage on dried apple pomace and fiber extracted from pomace. *J Food Process Preserv* **41**:e12913 (2017).
- 50 Roca E, Guillard V, Broyart B, Guilbert S and Gontard N, Effective moisture diffusivity modelling versus food structure and hygroscopicity. *Food Chem* **106**:1428–1437 (2008).
- 51 Schmid V, Trabert A, Schäfer J, Bunzel M, Karbstein HP and Emin MA, Modification of apple pomace by extrusion processing: studies on the composition, polymer structures, and functional properties. *Foods* **9**:1385 (2020).
- 52 Ciurzyńska A, Marzec A, Mieszkowska A and Lenart A, Structure influence on mechanical and acoustic properties of freeze-dried gels obtained with the use of hydrocolloids. *J Texture Stud* **48**:131–142 (2017).
- 53 Eblaghi M, Bronlund JE, Yedro FM and Archer RH, Kinetics of pectin reactions in apple pomace during hydrothermal treatment. *Food Bioprocess Technol* **14**:739–750 (2021).
- 54 Ciurzyńska A, Pisarska A, Olskiński I, Panfiluk AM, Ostap MS and Lenart A, Effect of composition changes and aeration time on the structure and rehydration of innovative freeze-dried gels. *Int Agrophys* **32**:429–435 (2018).
- 55 Manzocco L, Mikkonen KS and García-González CA, Aerogels as porous structures for food applications: smart ingredients and novel packaging materials. *Food Struct* **28**:100188 (2021).
- 56 Macdougall DB, 13-Colour Measurement of Food: Principles and Practice, in *Colour Measurement*, ed. by Gulrajani ML. Woodhead Publishing, Cambridge pp. 312–342 (2010).
- 57 Heras-Ramírez ME, Quintero-Ramos A, Camacho-Dávila AA, Barnard J, Talamás-Abbud R, Torres-Muñoz JV *et al.*, Effect of blanching and drying temperature on polyphenolic compound stability and antioxidant capacity of apple pomace. *Food Bioproc Technol* **5**:2201–2210 (2012).
- 58 Ribeiro JS and Veloso CM, Microencapsulation of natural dyes with biopolymers for application in food: a review. *Food Hydrocolloids* **112**:106374 (2021).
- 59 Mazzeo T, N'Dri D, Chiavaro E, Visconti A, Fogliano V and Pellegrini N, Effect of two cooking procedures on phytochemical compounds, total antioxidant capacity and colour of selected frozen vegetables. *Food Chem* **128**:627–633 (2011).
- 60 Bozkir H and Tekgül Y, Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. *J Food Process Preserv* **46**:e15902 (2022).
- 61 Mesquita E and Monteiro M, Simultaneous HPLC determination of flavonoids and phenolic acids profile in Pêra-Rio orange juice. *Food Res Int* **106**:54–63 (2018).
- 62 Darvishi H, Mohammadi P, Fadavi A, Koushesh Saba M and Behrooz-Khazaei N, Quality preservation of orange concentrate by using hybrid ohmic – vacuum heating. *Food Chem* **289**:292–298 (2019).
- 63 Cossignani L, Ianni F, Blasi F, Pollini L, Di Michele A, Pagano C *et al.*, Effect of different drying treatments and sieving on royal gala apple pomace, a thickening agent with antioxidant properties. *Plants* **12**:906 (2023).
- 64 Mengucci C, Ferranti P, Romano A, Masi P, Picone G and Capozzi F, Food structure, function and artificial intelligence. *Trends Food Sci Technol* **123**:251–263 (2022).

Development and physicochemical characteristics of multicomponent freeze-dried snacks obtained with blackcurrant pomace powder and calcium ions as structuring agents

Magdalena Karwacka¹  · Sabina Galus¹  ·
Monika Janowicz¹ 

Revised: 1 September 2023 / Accepted: 27 November 2023 / Published online: 22 January 2024
© The Author(s) 2024

Abstract Consumers seek healthy and sustainable products, whereas the food industry faces the challenge of processing by-products management. The application of fruit pomace as an additive could be a solution addressing the needs of both consumers and producers. The research objective has been to assess the effect of dried blackcurrant pomace powder (BP) and calcium ions in varied concentration on the physicochemical properties of multicomponent freeze-dried snacks as compared to the influence of low-methoxyl pectin (LMP). The snacks were prepared using varied content of BP (1, 3, 5%) and calcium lactate (0, 0.01, 0.05%). Water content and activity, hygroscopic properties, structure, texture, colour, polyphenols content (TPC), and antioxidant activity were analysed. The addition of BP resulted in lowering water activity and porosity. The microstructure of the snacks consisted of a large number of small and unevenly distributed pores. Consequently, the reduction of hygroscopic properties with the growing amount of BP was observed. Applied additives strengthened the structure and caused changes in compression curves indicating enhanced hardness and crispiness. The effect given by 5% of BP was comparable to that obtained with 0.5% of LMP. Additionally, blackcurrant pomace infusion increased TPC and enhanced antioxidant activity but it also caused significant changes in the colour of the snacks. Overall, obtained results have shown that dried blackcurrant pomace powder (BP) can be successfully applied as a food additive supporting stability, texture, and bioactive compounds content, thus fortifying

the physicochemical properties of freeze-dried fruit and vegetable snacks.

Keywords Blackcurrant pomace · Calcium ions · Low-methoxyl pectin · Freeze-dried snacks · Physicochemical properties · Microstructure

Introduction

Snacks are products that attract consumers through their textural and sensory attributes (Silva-Espinoza et al. 2021b). They are designed to be consumed between the main meals or as potential replacements for them. Nowadays, when consumers' consciousness has notably improved in respect of nutrition and environmental concerns, producers are obliged to face their expectations by introducing high-quality, healthy, and sustainable products alternating sweets and high-fat snacks available in the food market (Ciurzyńska et al. 2019).

Food waste management is a global issue usually dealt with in consideration of food products that either spoil before being consumed or are discarded because of expiration (Tomaszewska et al. 2022). However, industrial waste and by-products are not even accounted for as food waste, and they are not included in the definition of consumable products consciously discarded at any phase of a life cycle. Organic matter may be recycled and used for other purposes, such as animal feed or a source of precious compounds that the industry is capable of separating (Garcia-Garcia et al. 2019).

The objective of this research has been set out developed in relation to the feasibility of manufacturing healthy snacks that align with the zero waste and environmentally friendly trends. To address the nutritional aspect, freeze-drying has

✉ Magdalena Karwacka
magdalena_karwacka@sggw.edu.pl

¹ Department of Food Engineering and Process Management, Institute of Food Sciences, Warsaw University of Life Sciences, SGGW, 159c Nowoursynowska St, 02-787 Warsaw, Poland

been selected as the preservation method. It is significant to ensure high retention of bioactive compounds, achievable through reduced pressure that is effective at much lower temperature as compared to other dehydration methods, e.g. convective drying. Due to the limited exposure to air and increased temperature, adverse impact, such as antioxidant degradation, is reduced to the minimum (Nowak and Jakubczyk 2020). Moreover, freeze-drying provides products that maintain the original shape and are characterised by attractive texture and high porosity, which leads to improvement in active components' bioavailability (Ciurzyńska et al. 2015; Pollini et al. 2022).

Due to the quality of given products, freeze-drying had been previously applied in the course of the production of multicomponent snacks based on hydrocolloid gels (pectin, sodium alginate, gums, starches, and fibers) with the addition of fruit and vegetables, purees, concentrates, juices, etc. (Ciurzyńska et al. 2015, 2020; Silva-Espinoza et al. 2020a; Jakubczyk et al. 2022). Although a lot of research has been carried out on this topic in the last decade, it had been mostly focused on the physical characteristics of the products. The access to the information on the nutritional value or consumer acceptance of snacks made of freeze-dried gels is very limited to this day, and only a few papers are available. Existing studies show that this type of snack is evaluated on the basis of personal preferences, attributes related to flavour, texture and colour, emphasized by consumers (Silva-Espinoza et al. 2021b). However, the high porosity and hygroscopic nature of freeze-dried gels necessitate the selection of proper packaging to prevent the quality loss, especially texture changes occurring due to moisture absorption (Silva-Espinoza et al. 2020b). Moreover, the use of biopolymers enhances not only structural and textural parameters but also increases fibre content (Karwacka et al. 2022c) and assures protection of the bioactive compounds, such as vitamin C and polyphenols, during digestion (Silva-Espinoza et al. 2021a).

Based on available research, pectin that a plant-derived high molecular weight polysaccharide is one of the structuring agents used for developing freeze-dried gel-based snacks (Ciurzyńska et al. 2015; Hu et al. 2022). Functional properties of pectin vary depending on the origin and chemical structure, thus it is usually applied in products characterised by relatively high water content as gelling, thickening, stabilising, or emulsifying additive (Lara-Espinoza et al. 2018). However, as the previously mentioned authors have already established, after dehydration, freeze-dried pectin gels feature a highly porous structure that accounts for a high rehydration rate, low shrinkage during processing as well as attractive texture, acoustic, and sensory properties. Pectin is commonly extracted from fruit pomace that is a solid residue left after juice processing. Addressing the environmental aspect of consumers' expectations, this research

has been designed to examine the possibility of substituting a traditional structuring agent with the material of its origin.

Given that Poland is one of the major blackcurrant producers, and the berries are cultivated mostly for the purpose of producing juice (60%) and jam, the amount of generated residue is significant, therefore it is necessary to explore new ways to manage it in the plausibly most effective way (Kraciński 2014; Cortez and Mejia 2019). According to the estimates put forward by Poland's Central Statistical Office, the cultivation area of currant has been constantly growing, and so have the blackcurrant crops. In 2021 the production output was estimated to equal 114 800 tons and the preliminary assessment indicates that in 2022 the overall production output arising from fruit bushes and berry plantations may have posted a year-on-year increase of about 9.3% (Statistics Poland 2022). Blackcurrant pomace demonstrates high nutritional and health-promoting value thanks to high bioactive compounds and fibre content (Xue et al. 2022). Blackcurrant is also rich in pectin, and has been comprehensively characterised in the recent report by (Pancerz et al. 2022). It is usually disposed of as nutritious animal feed, a raw material for bioactive compounds and colorants extraction. But pomace has been recently studied in terms of an ingredient fortifying the functional properties of several food products, mostly bakery and confectionery (Majerska et al. 2019). As a consequence of all of the above, blackcurrant pomace powder has been chosen as the research input for the purpose of this study.

The gelation of pectin is determined by its physicochemical characteristics as well as environmental conditions, such as pH, the presence of sugars and proteins, and ions inducing the formation of a three-dimensional network of pectin gels (Chan et al. 2017). Combining these determinants, the latest reports on the risk of calcium deficiency in the population (Shlisky et al. 2022), and the fact that using pomace powder pectin is captured in the particles that could limit its gelling ability, Ca^{2+} ions have been incorporated to potentially support the gelation process and improve the nutritional value of the obtained products.

The purpose of the study has been to analyse the effect of blackcurrant pomace powder and calcium ions addition in varied concentration on the physicochemical quality of multicomponent freeze-dried snacks as compared to snacks structured with pectin.

Materials and methods

Materials

The research material was freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks obtained by means of dried blackcurrant pomace powder (BP) and low-methoxyl pectin (LMP)

used separately as structuring agents. Samples were prepared using frozen carrot cubes supplied by Unifreeze sp. z o.o. (Poland), orange juice concentrate (Puren, Poland), ginger (local market, Warsaw, Poland), dried blackcurrant pomace (Greenherb, Poland), low-methoxyl pectin (Hortimex, Poland), and calcium lactate (Agnex, Poland). Chemicals and reagents were purchased from POCH (Poland) and stored in a dark refrigerator at 4 °C.

Methods

Sample preparation

The samples were prepared according to the methodology developed by Karwacka et al. (2022) and formulations presented in Table 1. The basic formulation of snacks consisted of frozen carrots, orange juice concentrate, and ginger in the same proportion for all samples. The varied additives, blackcurrant pomace powder, pectin and calcium lactate, were added as shown in Table 1.

Carrot had thawed at 25 °C for up to an hour before it was processed. The LMP and BP were hydrated in calcium lactate solution at 85 °C for 1 min. Then all components were blended in the laboratory knife mill GRINDOMIX GM 200 (Retsch, Germany) at 4500 rpm for 1 min. The prepared mixture was poured into silicone molds, frozen at −40 °C for about 4 h, and freeze-dried in Alpha 1–2 LD plus freeze-dryer (Martin Christ GmbH, Germany) at 30 °C and the pressure of 0.063 kPa for about 48 h. Prior to testing, snacks were packed in the high-barrier laminate (PET/Al/PE) packaging impermeable to light, gas, and vapour and stored for 48 h at room temperature (25 ± 1 °C).

Analytical methods

Water content and activity

Water content (WC) was obtained by means of the oven method at 70 °C for 24 h (Wiktor et al. 2022). Water activity (a_w) was measured using HygroLab C1 (Rotronic, Switzerland) at 25 ± 1 °C. Both analyses were made in triplicate.

Hygroscopicity determination

Hygroscopic properties were determined by exposing the sample to a humid environment (RH = 75%) in a desiccator filled with saturated NaCl solution for 72 h at 25 ± 1 °C. The samples had been periodically weighted after 0.5, 1, 3, 6, 9, 12, 24, 48, and 72 h until their weight was constant (Karwacka et al. 2022b). The test was performed in triplicate for each respective sample.

Mechanical properties

The sample mechanical properties were measured using TA.HD plus texture analyser (Stable Micro Systems, UK). The samples were compressed using a 20 mm diameter platen probe moving at a speed of 0.5 mm/s. The test had been performed in 10 repetitions until 50% deformation of the initial height of the material (1.5 × 1.5 × 1.5 cm) was obtained (Karwacka et al. 2021). Hardness and compression curves were determined.

Microstructure and porosity analysis

The porosity and microstructure were analysed using the X-ray micro-CT SkyScan 1272 system (Bruker microCT, Belgium) with dedicated software (NRecon1.6.3.2, Bruker

Table 1 Formulation of the multicomponent, carrot-orange-ginger snacks obtained with blackcurrant pomace powder (BP) and low-methoxyl pectin (LMP).

Sample	Carrot	Orange juice concentrate	Ginger	Water	Blackcurrant pomace powder	Pectin	Calcium lactate
	g/100 g						
COG	60	10	0.40	29.60	–	–	–
COG-BP1a	60	10	0.40	28.60	1	–	0
COG-BP1b	60	10	0.40	28.59	1	–	0.01
COG-BP1c	60	10	0.40	28.55	1	–	0.05
COG-BP3a	60	10	0.40	26.60	3	–	0
COG-BP3b	60	10	0.40	26.59	3	–	0.01
COG-BP3c	60	10	0.40	26.55	3	–	0.05
COG-BP5a	60	10	0.40	24.60	5	–	0
COG-BP5b	60	10	0.40	24.59	5	–	0.01
COG-BP5c	60	10	0.40	24.55	5	–	0.05
COG-LMP0.5b	60	10	0.40	29.09	–	0.5	0.01
COG-LMP1.5b	60	10	0.40	28.09	–	1.5	0.01

microCT), directly following the method described previously (Karwacka et al. 2021).

Colour determination

Colour parameters $L^*a^*b^*$ were determined by means of CR-5 Colorimeter (Konica Minolta, Japan) with an 8 mm measuring hole and reflectance mode. The measurements were performed in 15 repetitions. The total colour difference (ΔE) was calculated according to the equation formula (Hu et al. 2022):

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

where ΔL^* , Δa^* , Δb^* are the differences in lightness (L^*), redness (a^*) and yellowness (b^*) between the COG snack and samples with additives.

Chemical properties analysis

Extraction procedure The chemical analysis of the snacks, including the sample preparation, total phenolic content and antioxidant activity determinations, was carried out according to the methodology presented by Wiktor et al. (2022) with slight modifications. The extracts subjected to the further analysis were prepared by means of extracting 0.3 g of the ground material in 10 mL of 80% (v/v) aqueous ethanol solution for 24 h at ambient temperature and concurrent continuous stirring on a shaker (Heidolph Instruments, Germany) at 1700 rpm. After that, the extracts were centrifuged for 2 min at 3000 rpm in a laboratory centrifuge (MegaStar 600, VWR, Belgium). Each sample was extracted twice.

Total phenolic content (TPC) determination The TPC determination was conducted by means of the spectrophotometric method with Folin-Ciocalteu's reagent. The extracts were prepared for the analysis purposes by diluting 10 μ L in 96-well plates with distilled water (1:1 v/v). Next, 40 μ L of 5-fold diluted Folin-Ciocalteu's reagent was added, mixed, and incubated at ambient temperature for 3 min. To stop the reaction, 250 μ L of 7% sodium carbonate solution was infused, and then the mixtures were incubated again in a dark place for 60 min. A blank test was performed by replacing an extract with the extraction reagent. The absorbance was measured using a plate reader (Multiskan Sky, Thermo Electron Co., USA) at a wavelength of 750 nm. The results were expressed in terms of milligrams of gallic acid equivalent per 1 g of dry matter of the sample (mg GAE/g d.m.). The analysis was performed in triplicate for each extract.

Antioxidant activity The ABTS^{•+} assay proceeded by dispensing 10 μ L of the analyte and 250 μ L of the free radical solution with absorbance at a wavelength of 734 nm

0.7 ± 0.02 onto a 96-well plate, shaking and incubating in a dark place for 6 min. A blank probe was prepared using 80% (v/v) ethanol instead of the extract. The absorbance was measured at a wavelength of 734 nm by means of a Multiskan Sky plate reader. The DPPH[•] assay was performed similarly to the procedure described for ABTS^{•+} but the incubation lasted for 30 min and the absorbance was measured at 515 nm. The antiradical activity was calculated as the decrease in the absorbance of the radical solution in the presence of an analyte extract and expressed in terms of mg Trolox/g of dried material. This procedure was carried out in triplicate for each extract.

Statistical analysis

Significant differences between obtained results were evaluated by means of the one-way ANOVA and a post-hoc Tukey's test at $P < 0.05$. The statistical analysis was carried out using STATISTICA 13 software (TIBCO Software, USA).

Results and discussion

Water content, water activity, and hygroscopicity

Apart from the effect hydrocolloids have on structure and texture, these additives were used for reducing water activity thus prolonging the stability of the products (Silva-Espinoza et al. 2020a). The freeze-dried snacks were characterised in terms of water content and water activity, the results of which are shown in Table 2. As expected, the addition of low-methoxyl pectin significantly decreased the water activity of the samples and such an outcome was obtained without diminution in water content. The infusion of blackcurrant pomace instead of LMP also induced a_w lowering but it was linked to the water content decrease. What can be clearly seen in water content and activity results is the pattern related to the increasing amount of BP in the formulation. Such observations indicate that LMP might have interacted with the water molecules in a way that reduced their availability for chemical reactions or microbial growth, even though the total water content remained higher as compared to other samples. The lowering effect of BP on water activity was connected to the decrease in the actual amount of water content. This suggests that the effect of blackcurrant pomace on reducing water activity might be related to its ability to absorb or hold water, leading to the decrease in the overall water content in the samples. Both parameters were remarkably lower for snacks with pomace at 1%, and then 3%, but the statistical analysis did not find any difference between samples with 3 and 5% of BP powder. However, higher blackcurrant pomace content caused the reduction of water activity at a similar level to pectin. This implies that

Table 2 Physicochemical properties of the freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks obtained with dried blackcurrant pomace powder (BP) or low-methoxyl pectin (LMP): water content (WC),water activity (a_w), hygroscopicity (H_{72h}), hardness, porosity, and total color difference (ΔE)

Sample	WC (%)	a_w	H_{72h} (g H ₂ O/100 g)	Hardness (N)	Porosity (%)	ΔE
COG	1.92 ± 0.10 ^b	0.055 ± 0.002 ^a	29.15 ± 0.12 ^a	21.98 ± 0.95 ^h	59.50 ± 0.64 ^{bc}	—
COG-BP1a	1.53 ± 0.10 ^c	0.042 ± 0.001 ^b	27.31 ± 0.12 ^b	36.75 ± 3.10 ^g	56.54 ± 0.69 ^{cd}	19.52 ± 1.24 ^c
COG-BP1b	1.48 ± 0.02 ^{cd}	0.041 ± 0.002 ^b	27.61 ± 0.34 ^b	38.28 ± 2.45 ^g	57.35 ± 0.44 ^d	18.96 ± 0.98 ^{cd}
COG-BP1c	1.38 ± 0.08 ^{cde}	0.042 ± 0.002 ^b	27.04 ± 0.41 ^b	38.47 ± 1.41 ^g	56.11 ± 1.31 ^d	19.99 ± 1.27 ^c
COG-BP3a	1.25 ± 0.08 ^e	0.028 ± 0.001 ^d	24.89 ± 0.19 ^c	44.75 ± 2.68 ^f	52.76 ± 0.43 ^e	30.25 ± 1.14 ^b
COG-BP3b	1.39 ± 0.08 ^{cde}	0.029 ± 0.001 ^{cd}	24.81 ± 0.16 ^c	46.41 ± 2.27 ^{ef}	52.64 ± 1.07 ^e	30.94 ± 1.40 ^b
COG-BP3c	1.28 ± 0.07 ^{de}	0.028 ± 0.002 ^{cd}	25.45 ± 0.37 ^c	46.26 ± 2.27 ^{ef}	51.53 ± 0.58 ^{ef}	30.12 ± 1.34 ^b
COG-BP5a	1.21 ± 0.01 ^e	0.028 ± 0.002 ^{cd}	22.90 ± 0.40 ^d	49.39 ± 2.79 ^{de}	49.15 ± 0.25 ^e	35.73 ± 1.61 ^a
COG-BP5b	1.19 ± 0.08 ^e	0.024 ± 0.001 ^d	22.76 ± 0.57 ^d	53.23 ± 3.10 ^d	49.85 ± 0.51 ^e	35.34 ± 1.53 ^a
COG-BP5c	1.27 ± 0.06 ^{de}	0.027 ± 0.002 ^d	22.41 ± 0.16 ^d	59.42 ± 3.25 ^{cd}	50.76 ± 0.27 ^{ef}	35.41 ± 1.48 ^a
COG-LMP0.5b	1.75 ± 0.01 ^b	0.029 ± 0.003 ^{cd}	27.60 ± 1.10 ^b	79.60 ± 2.80 ^b	61.57 ± 1.74 ^{ab}	17.47 ± 2.34 ^d
COG-LMP1.5b	2.15 ± 0.06 ^a	0.034 ± 0.003 ^c	27.56 ± 0.26 ^b	142.99 ± 5.14 ^a	62.10 ± 0.35 ^a	19.28 ± 2.36 ^{cd}

Different letters within columns indicate different homogenous groups determined by Tukey's test at $P < 0.05$

infusing blackcurrant pomace at a certain level, due to its composition and interaction with water, may have a water activity-lowering effect as compared to that of pectin. Considering the association between water content and activity in the snacks and the amount of an additive, the LMP demonstrated extensive water-holding capacity compared to blackcurrant pomace powder making the water harder to remove, but not able to react. According to the related literature, the water holding capacity of dried blackcurrant pomace powder is over 10 times lower than pectin's (Reißner et al. 2019), which confirms the obtained results.

Maintaining low water activity in food products is important in the aspect of microbial safety. Therefore, dehydration has become one of the most common food preservation methods. It has been established that the critical value of a_w , ensuring the food safety, equals 0.6 (Ijabadeniyi and Pillay 2017), which means that the results obtained for the snacks have been about ten times lower than the crucial parameter. However, water is also responsible for the glass transition (Silva-Espinoza et al. 2020a). Dehydrated products are often in an amorphous state that is manifested by hard and crispy texture, although, various dried products appearing on markets' shelves prove that a lot of dried fruit and vegetables are dehydrated to the point in which water activity is reduced to the extent that ensures safety but not physical stability. Exceeded water content causes glass transition temperature decrease and, as a result, the food product becomes rubbery. In the case of freeze-dried products, the transition affects overall quality, such as texture, microstructure, and sensorial perception, taking away properties that differentiate these products from others (Moraga et al. 2011). For that reason, it is also important to examine the ability to absorb water from the environment, which for example indicates

when the product should be consumed to avoid unfavorable changes in its physicochemical characteristics after the package opening.

The hygroscopicity was determined to check how prone the freeze-dried snacks are to absorb water, thus how high the risk of quality loss is. The main impellent of the mass change is the difference between the sample's moisture content and environmental humidity, therefore, the samples characterised by low water content combined with open and porous structure usually reveal elevated hygroscopic properties. This may be considered a favourable feature in terms of rehydration but disadvantageous in the aspect of stability. The results obtained for the freeze-dried snacks exposed to the humid environment for 72 h are presented in Table 2. Initial moisture content in the samples varied from 1.12 to 2.00 g H₂O/100 g d m., relative to the water content. As it can be seen, the additives significantly reduce water adsorption. The greater content of BP, the lower amount of water adsorbed by a snack. Pectin also limited sorption capacity, however, its effect was comparable to that observed for the lowest level of pomace powder (1%). Additionally, during the test, samples with the addition of the blackcurrant pomace obtained constant weight, thus the equilibrium moisture content, while snacks with LMP were still gaining water after 72 h. There was no difference in water gain for various amounts of added LMP, either, contrary to pomace powder, the increasing content of which was followed by decreasing hygroscopic properties. As a consequence, it is plausible to state that despite greater influence on water activity, pectin's affinity for water (Panchev et al. 2010) limits its stability during storage, and so creates a demand for high-barrier packaging. Notwithstanding the reducing effect of BP addition, snacks obtained with it were also highly hygroscopic

and hence should be isolated from humid environment as well. Hygroscopic properties strongly depend on the sample's structure. Feng et al. (2022) suggested that a more dense and compact structure could inhibit water adsorption due to the superior amount of closed pores that are separated from the environment and thus harder to penetrate by humid air. On the other hand, the reduction of hygroscopicity resulting from pectin addition may have been caused by swelling of the hydrocolloid, and so closing accessibility of the internal pores (Kowalski et al. 2019). However, it also explains constantly growing moisture gain because of the water mobility and its transfer from the surface to inner parts of the sample.

Microstructure and porosity

Images of the internal structure of the produced snacks are presented in Fig. 1. Column A displays pictures obtained using scanning electron microscopy and column B shows a vertical cross-section developed by means of the computer-aided microtomography. As it can be seen, the type

of used additive strongly determines the snacks' structure. Samples with LMP additive featured relatively homogenous structures consisting of thin walls and large pores. On the other hand, a structure formed with BP was not as consistent and well-shaped as that with pectin. The pomace particles were explicit within the body of samples and pores were arranged unevenly. Moreover, the further towards the material's centre, the more dense and compact structure occurred, which was also reflected in the higher frequency of small pores (Fig. 2a). Pores formation is determined by ice crystal growth, which depends on composition of the solid tissue. Pectin creates a hydrogel matrix featuring high flexibility, therefore crystals formulation due to freezing does not cause notable damage to the structure of the hydrocolloid network, and so the cellular structure can be maintained after freeze-drying (Feng et al. 2022). To enhance structure homogeneity in a hydrocolloid-stabilized matrix, ice crystal-controlling additives may be suggested for further investigation. Compared to pectin, even pomace powder subjected to hydrothermal treatment does not have the ability to create a three-dimensional network with thin walls and included air

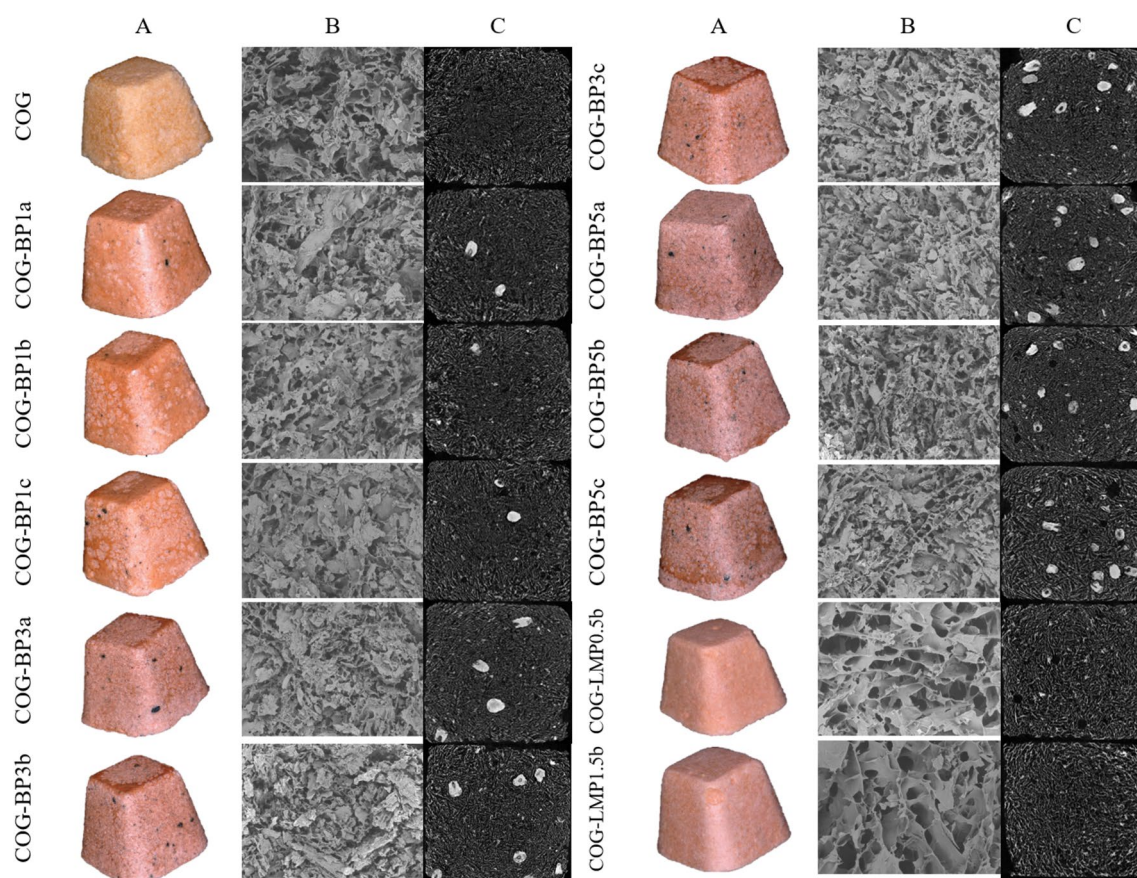


Fig. 1 Photos of the overall appearance (section A), SEM imaging of the internal structure at magnification 200× (section B), and μ CT reconstruction of the internal structure (section C) of freeze-dried

carrot-orange-ginger (COG) snacks obtained with dried blackcurrant pomace powder (BP) or low-methoxyl pectin (LMP)

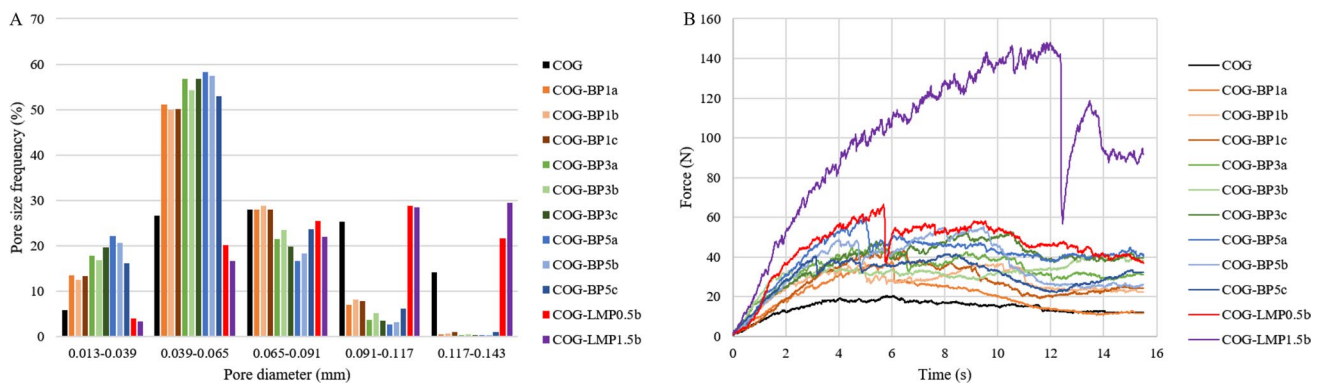


Fig. 2 a Pore size distribution of freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks obtained with dried blackcurrant pomace powder (BP) or low-methoxyl pectin (LMP); b Exemplary compression curves of

freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks obtained with dried blackcurrant pomace powder (BP) or low-methoxyl pectin (LMP)

bubbles (Reißner et al. 2022), which explains the irregular structure of the snacks with BP.

The term porosity indicates the ratio of pore volume, free spaces in the sample structure, to the total volume of the sample. It determines product quality and its features related to e.g. mass diffusivity. In the case of dried products, pores formation relies on the mechanism of water removal, hence the dehydration method. The porosity of the freeze-dried snacks is presented in Table 2. Hydrocolloids are known for their structure-forming properties that allow for the production of highly porous materials, which, after subjecting to freeze-drying, simulate a cellular structure of, for example, fruit tissue. Therefore incorporation of pectin enlarges the total porosity of the sample, especially at the level of 1.5%, and supports the development of larger pores (Fig. 2a). The opposed effect was observed after BP addition. The pomace powder at 1% significantly reduced the porosity of the snacks and the extension of its amount led to a further decrease. Although the increasing amount of BP tended to be followed by the porosity reduction, the statistical analysis did not prove any significant difference between snacks with 3 and 5% of the pomace. However, as it can be seen in Fig. 2a, samples with a growing amount of BP in the formulation were characterised by a prevailing frequency of small-sized pores. In the beginning, fortifying the gelation process using calcium ions was expected to dictate porosity and microstructure characteristics but no significant impact was assessed in the aspect of porosity. It is not clear whether calcium infusion affected the size of the developed pores or not. The results obtained for porosity were consistent with the previous findings regarding freeze-dried multi-compound snacks but a much wider range of pores size was noted (Karwacka et al. 2022b). Porosity affects the sample's hygroscopic properties, especially for the products containing high sugar content. However, in the case of freeze-dried guava pulp with pectin and sucrose,

rising sugar content leads to water adsorption decrease due to the lowering porosity of the products, and so enhances stability during storage (Conceição et al. 2016).

Mechanical properties

One of the main objectives of applying blackcurrant pomace to the formulation of freeze-dried snacks was to improve products' features resilient to destroying factors affecting the sample, thus mechanical properties. The texture analysis helps better understand the product changes during processing, packaging, and consumption. The results of the mechanical properties study in terms of hardness that is the maximum force recorded during compression of the samples and exemplary compression curves are shown in Table 2; Fig. 2b, respectively. The lowest hardness characterised the initial COG sample, while the highest was recorded for the sample with pectin at 1.5% and then 0.5%. The gradual increase in the BP content resulted in the improved hardness of the snacks. As it was supposed, not only pomace powder was applied to strengthen the sample structure but also calcium ions should have supported the formation and consolidation of the structure (Byun et al. 2020). However, a meager upward tendency can be observed, especially between samples with 0.01% fortification and without any additive, the statistical analysis of the obtained results showing that changing concentration of calcium ions does not significantly influence hardness of the snacks.

When it comes to the course of material destruction, visible differences can be seen in the obtained curves (Fig. 2b). Peaks and drops on the curves portray the fracturing of the walls creating internal structure. Moreover, the more turbulent the curve, the more crispy the material. First of all, characteristic drops occurred on curves for snacks structured with pectin, which indicated some great cracks in the material structure that appeared resulting from the growing strain

during compression. The course of COG-LMP1.5b compression was crucially distinguished from others in terms of the force range but its shape was similar to that obtained for COG-LMP0.5b regardless of the time in which the main cracks happened. On the other hand, samples without any additives were compressed accounting for the flattest and smooth curves, hence increasing BP content was followed by obtaining rougher curves, which proved rising crispiness. Although the course of the compression curves was changing for the samples with increasing amounts of structuring components, large drops that could be compared to those noted for the samples with pectin started occurring only for the snacks with the highest addition of BP (5%). However, there was no such an observation for each sample and the recorded differences in the force at the beginning and at the end of the drop were smaller. As it can be seen in Fig. 2b, existing drops and peaks were less rapid and less sharp as compared to the curves for the snacks with LMP. As suggested by Feng et al. (Feng et al. 2022), the oscillation of the compression force directly corresponds to microstructure characteristics. The more irregular collocation of pores, the rougher the curves. Moreover, the texture of the snacks is crucial and in the case of low-moisture products, it strongly depends on the water content, therefore, maintaining it at a low level provides crispy and brittle texture, which may be lost as a consequence of extensive water adsorption (Mazumder et al. 2007).

Colour

The results gathered due to the instrumental analysis of the colour properties are presented in Fig. 3, and the total colour difference (ΔE) is shown in Table 2. Lightness (L^*) increased after LMP incorporation but the addition of BP caused significant darkening of the snacks that was reflected in the lower values of the L^* parameter. Chroma parameter a^* indicating redness did not change in the samples with pectin as compared to the COG. However, the influence

of pomace powder was inconsistent, and the 1% addition slightly heightened redness, while a further increase in the amount of BP notably lowered the a^* parameter. The b^* parameter portrayed yellowness when positive or blueness when negative. It can be seen that both of the used carriers caused a significant reduction in the yellowness. The effect of the lowest tested BP concentration was comparable to the one obtained by adding LMP, and having concurrently increased the concentration gradually kept decreasing b^* values. The differences in the colour parameters measured for the snacks were also reflected in the total colour difference, which was evaluated in relation to the COG snack. The results were remarkably higher than 5, which was the value representing the changes that are hardly visually notable and as such imperceptible for a human eye. In order to show how the BP addition could influence consumers' perception of the produced snacks, the images of all the collected samples have been included in Fig. 1. Similarly to the parameters mentioned above, ΔE caused by BP at 1% was corresponding to the one observed after pectin addition, however the increasing amount of pomace powder concurrently caused the colour difference to escalate. Similar results were expected due to the natural colour of the blackcurrant berries as well as blackcurrant pomace (Michalska et al. 2017a; Karwacka et al. 2022a), the pomace particles of which were occurring in the whole sample volume and on its surface. The colour results from all the ingredients infused into the products, and so the effect of the additives tested in this research is simply a consequence of using materials characterised by completely diverse features. The low-methoxyl pectin powder is light, whitish and creamy, while the blackcurrant pomace powder can be described as dark and deep burgundy (Karwacka et al. 2022a).

Total polyphenols content

The total polyphenols content (TPC) in the freeze-dried snacks is presented in Fig. 4a. Its initial content in COG

Fig. 3 Color parameters L^* (lightness), a^* (redness) and b^* (yellowness) of freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks obtained with dried blackcurrant pomace powder (BP) or low-methoxyl pectin (LMP). Results are presented as means with standard deviations. Different letters above bars in the same color indicate different homogenous groups determined by Tukey's test at $P < 0.05$

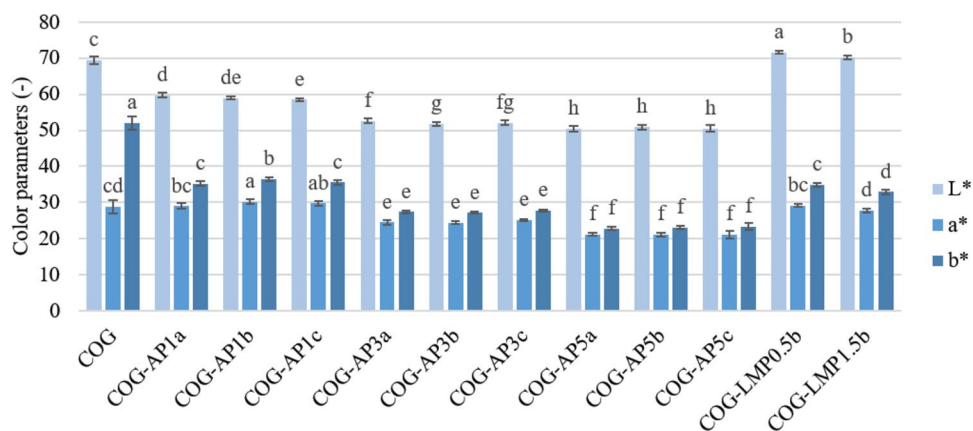
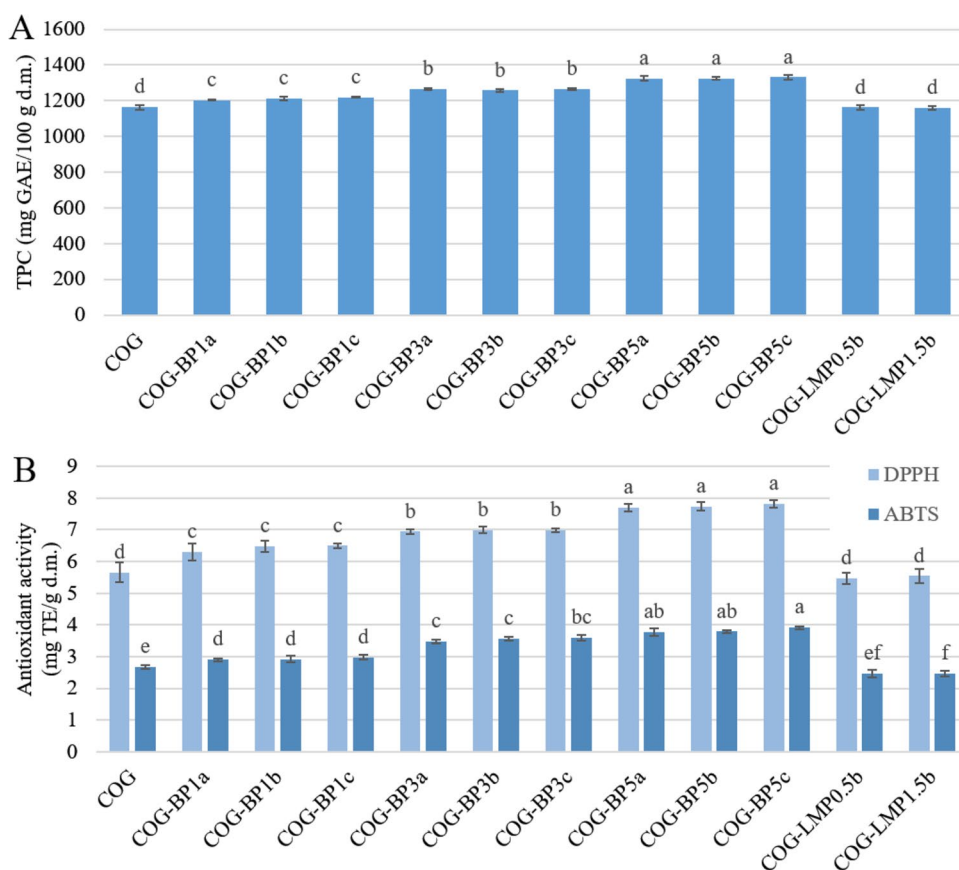


Fig. 4 Total phenolic content (TPC) **a** and antioxidant activity against DPPH and ABTS **b** of freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks obtained with dried blackcurrant pomace powder (BP) or low-methoxyl pectin (LMP). Results are presented as means with standard deviations. Different letters above bars in the same color indicate different homogenous groups determined by Tukey's test at $P < 0.05$



snacks was 1163.87 mg GAE/100 g d.m. The addition of LMP did not affect the TPC results but a notable trend related to an increasing amount of blackcurrant pomace was observed. The average growth of polyphenols content caused by the BP infusion at 1, 3, and 5% was estimated to equal 2.77, 3.68, and 4.90%, respectively. The relatively low effects probably resulted from the multi-step processing of the by-products. After juice production, pomace was dehydrated by means of the hot-air drying method, ground, which also induced heating of the material, then hydrated at elevated temperature and freeze-dried. Each stage of treatment could cause a significant loss of polyphenols due to thermal degradation or oxidation (Struck et al. 2016). Blackcurrant berries as well as blackcurrant pomace usually demonstrate high content of bioactive compounds, especially anthocyanins that also perform as antioxidants (Michalska et al. 2017b). Accordingly, a greater effect was expected to be achieved on the antiradical activity of the snacks.

Antioxidant activity

Antioxidant activity was assessed as scavenging activity against two standard free radicals, and the obtained results expressed in terms of the Trolox equivalent are shown in

Fig. 4b. Antioxidant activity of the initial sample without any additives equalled 5.66 ± 0.31 and 2.68 ± 0.07 mg TE/g d.m., respectively for DPPH and ABTS assays. Correspondingly to the total polyphenols content, the snacks with LMP were not distinguished from COG samples in terms of antioxidant activity against DPPH but a slight reducing trend was observed in ABTS assay results. More importantly, the significant growth followed the addition of BP powder. When it comes to DPPH, the increasing amount of the added pomace powder induced the rise of antioxidant activity by 13.60, 23.26, 36.98% in the sequence following the level of addition, while ABTS results showed the tendency to enhance antiradical properties of the snacks by 9.78, 32.65, 44.65%. As mentioned above, blackcurrant pomace contains various bioactive compounds demonstrating antioxidant properties (Michalska et al. 2017a), therefore the antioxidant activity in result of the BP infusion was enhanced to the extent greater than could have been anticipated based on the TPC results. This outcome may also be supported by the previous findings that imply the enhancement of the antioxidant activity in result of the antiradical potential of derivative products arising from bioactive compounds degradation (Kruszewski et al. 2021).

Conclusion

The findings of this study demonstrate that the incorporation of dried blackcurrant pomace powder (BP) has a beneficial impact on the physicochemical properties of the multicomponent freeze-dried snacks. As compared to low-methoxyl pectin, blackcurrant pomace has demonstrated lower texture and structure-forming ability, which has resulted in a more compact and irregular structure featuring a large number of small pores. The use of the additives has led to a significant reduction of hygroscopicity, which probably is the consequence of microstructure characteristics. The infusion of blackcurrant pomace powder significantly increases polyphenols content and extends the antiradical capacity of the products. However, the chemical properties become enhanced, and the anthocyanins added with the pomace cause significant colour changes including darkening of the snacks, which may not be evaluated as favourable. Taking into account the results obtained for the snack properties, it seems that the samples with 5% BP additive revealed the features corresponding to those demonstrated by the samples with 0.05% LMP additive to a greatest extent. The tendency regarding calcium ions concentration has been noted in terms of texture and structure but the effect has been insignificant. Accordingly, the lowest tested level can be recommended for further research, just to improve nutritional value and maintain established trends. But extensive research on the influence of calcium ions on the structure and texture-forming properties of blackcurrant pomace is also suggested. Although further research is needed, this study has shown another possibility for blackcurrant by-products management that had not been considered previously.

Authors' contributions Conceptualization: MK, MJ; Methodology: MK; Formal analysis and investigation: MK, SG, MJ; Writing - original draft preparation: MK; Writing - review and editing: MK, SG, MJ; Funding acquisition: MJ; Resources: MK, MJ; Supervision: SG, MJ.

Funding Research equipment utilized during this experiment was purchased as part of the “Food and Nutrition Centre—modernization of the WULS campus to create a Food and Nutrition Research and Development Centre (CŻiŻ)” co-financed by the European Union from the European Regional Development Fund under the Regional Operational Programme of the Mazowieckie Voivodeship for 2014–2020 [Project No. RPMA.01.01.00-14-8276/17].

Data availability Data will be available upon a reasonable request.

Declarations

Conflict of interest The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Byun C, Zheng Y, Pierce A et al (2020) The effect of calcium on the cohesive strength and flexural properties of low-methoxyl pectin biopolymers. *Molecules* 25:75. <https://doi.org/10.3390/molecules25010075>
- Chan SY, Choo WS, Young DJ, Loh XJ (2017) Pectin as a rheology modifier: origin, structure, commercial production and rheology. *Carbohydr Polym* 161:118–139. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.12.033>
- Ciurzyńska A, Lenart A, Karwosińska J (2015) Effect of quantity of low-methoxyl pectin on physical properties of freeze-dried strawberry jellies. *Pol J Food Nutr Sci* 65:233–241. <https://doi.org/10.2478/pjfn-2013-0020>
- Ciurzyńska A, Cieśluk P, Barwińska M et al (2019) Eating habits and sustainable food production in the development of innovative healthy snacks (running title: innovative and healthy snacks). *Sustain (Switzerland)* 11:2800
- Ciurzyńska A, Marczak W, Lenart A, Janowicz M (2020) Production of innovative freeze-dried vegetable snack with hydrocolloids in terms of technological process and carbon footprint calculation. *Food Hydrocoll* 108:105993. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105993>
- Conceição MC, Fernandes TN, de Resende JV (2016) Stability and microstructure of freeze-dried guava pulp (*Psidium guajava* L.) with added sucrose and pectin. *J Food Sci Technol* 53:2654–2663. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2237-5>
- Cortez RE, Gonzalez de Mejia E (2019) Blackcurrants (*Ribes nigrum*): a review on chemistry, processing, and health benefits. *J Food Sci* 84:2387–2401
- Feng S, Bi J, Yi J et al (2022) Cell wall polysaccharides and mono-/disaccharides as chemical determinants for the texture and hygroscopicity of freeze-dried fruit and vegetable cubes. *Food Chem* 395:133574. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133574>
- Garcia-Garcia G, Stone J, Rahimifard S (2019) Opportunities for waste valorisation in the food industry—a case study with four UK food manufacturers. *J Clean Prod* 211:1339–1356. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.269>
- Hu J, Sun X, Xiao H et al (2022) Optimization of conditions for a freeze-dried restructured Strawberry Block by adding guar gum, pectin and gelatin. *Plants* 11:2809. <https://doi.org/10.3390/plants11212809>
- Ijabadeniyi OA, Pillay Y (2017) Microbial safety of low water activity foods: study of simulated and durban household samples. *J Food Qual* 2017:4931521. <https://doi.org/10.1155/2017/4931521>

- Jakubczyk E, Kamińska-Dwórznińska A, Ostrowska-Ligeża E (2022) The effect of composition, pre-treatment on the mechanical and acoustic properties of apple gels and freeze-dried materials. *Gels* 8:110. <https://doi.org/10.3390/gels8020110>
- Karwacka M, Gumkowska M, Rybak K et al (2021) Impact of sodium alginate and dried apple pomace powder as a carrier agent on the properties of freeze-dried vegetable snacks. *Pol J Food Nutr Sci* 71:451–461. <https://doi.org/10.31883/pjfn/143584>
- Karwacka M, Galus S, Janowicz M (2022a) Effect of structure and texture forming additives on properties of freeze-dried snacks—review. *Technol Prog Food Process* 1:130–141
- Karwacka M, Rybak K, Smetana S et al (2022b) Analysis of selected functional properties, resource demands, and energy consumption of freeze-dried vegetable snacks. *J Food Process Preserv* 16721. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16721>
- Karwacka M, Rybak K, Świeca M et al (2022c) The effect of the addition of selected fruit pomace powders and pectin as carrier agents on the nutritional value of freeze-dried snacks. *Sustainability* 14:13012. <https://doi.org/10.3390/su142013012>
- Kowalski G, Kijowska K, Witczak M et al (2019) Synthesis and effect of structure on swelling properties of hydrogels based on high methylated pectin and acrylic polymers. *Polymers (Basel)*. <https://doi.org/10.3390/polym11010114>
- Kraciński P (2014) Zbiory i rozdysponowanie produkcji truskawek, malin i porzeczek w Polsce w Latach 2001–2012. *Roczniki Naukowe Ekonomii Rolnictwa i Rozwoju Obszarów Wiejskich* 101:132–140
- Kruszewski B, Zawada K, Karpiński P (2021) Impact of high-pressure homogenization parameters on physicochemical characteristics, bioactive compounds content, and antioxidant capacity of blackcurrant juice. *Molecules* 26:1802. <https://doi.org/10.3390/molecules26061802>
- Lara-Espinoza C, Carvajal-Millán E, Balandrán-Quintana R et al (2018) Pectin and pectin-based composite materials: beyond food texture. *Molecules* 23:942. <https://doi.org/10.3390/molecules23040942>
- Majerska J, Michalska A, Figiel A (2019) A review of new directions in managing fruit and vegetable processing by-products. *Trends Food Sci Technol* 88:207–219. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.021>
- Mazumder P, Roopa BS, Bhattacharya S (2007) Textural attributes of a model snack food at different moisture contents. *J Food Eng* 79:511–516. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.011>
- Michalska A, Wojdyło A, Lech K et al (2017a) Effect of different drying techniques on physical properties, total polyphenols and antioxidant capacity of blackcurrant pomace powders. *LWT* 78:114–121. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.008>
- Michalska A, Wojdyło A, Łysiak GP et al (2017b) Functional relationships between phytochemicals and drying conditions during the processing of blackcurrant pomace into powders. *Adv Powder Technol* 28:1340–1348. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.03.002>
- Moraga G, Talens P, Moraga MJ, Martínez-Navarrete N (2011) Implication of water activity and glass transition on the mechanical and optical properties of freeze-dried apple and banana slices. *J Food Eng* 106:212–219. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.009>
- Nowak D, Jakubczyk E (2020) The freeze-drying of foods—the characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials. *Foods* 9:1488. <https://doi.org/10.3390/foods9101488>
- Pancerz M, Kruk J, Witek M, Ptasek A (2022) The effect of biopolymer-water interaction on relaxation phenomena in blackcurrant pectin solutions. *Food Chem* 383:123600. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132600>
- Panchev IN, Slavov A, Nikolova Kr, Kovacheva D (2010) On the water-sorption properties of pectin. *Food Hydrocoll* 24:763–769. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.04.002>
- Pollini L, Juan-García A, Blasi F et al (2022) Assessing bioaccessibility and bioavailability in vitro of phenolic compounds from freeze-dried apple pomace by LC-Q-TOF-MS. *Food Biosci* 48:101799. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101799>
- Reißner AM, Al-Hamimi S, Quiles A et al (2019) Composition and physicochemical properties of dried berry pomace. *J Sci Food Agric* 99:1284–1293. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9302>
- Reißner A-M, Brunner M, Struck S, Rohm H (2022) Thermo-mechanical processing of fibre-rich blackcurrant pomace to modify techno-functional properties. *Eur Food Res Technol*. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04052-5>
- Shlisky J, Mandlik R, Askari S et al (2022) Calcium deficiency worldwide: prevalence of inadequate intakes and associated health outcomes. *Ann N Y Acad Sci* 1512:10–28. <https://doi.org/10.1111/nyas.14758>
- Silva-Espinoza MA, Camacho M, del Martínez-Navarrete M N (2020a) Use of different biopolymers as carriers for purposes of obtaining a freeze-dried orange snack. *LWT-Food Sci Technol* 127:109415. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109415>
- Silva-Espinoza MA, Camacho M, del Martínez-Navarrete M N (2020b) Effect of storage temperature on the crispness, colour and bioactive compounds of an orange snack obtained by freeze-drying. *Br Food J* 123:2095–2106. <https://doi.org/10.1108/BFJ-11-2020-1061>
- Silva-Espinoza MA, García-Martínez E, Martínez-Navarrete N (2021a) Protective capacity of gum Arabic, maltodextrin, different starches, and fibers on the bioactive compounds and antioxidant activity of an orange puree (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) against freeze-drying and in vitro digestion. *Food Chem* 357:129724. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129724>
- Silva-Espinoza MA, Salvador A, Camacho M, del Martínez-Navarrete M N (2021b) Impact of freeze-drying conditions on the sensory perception of a freeze-dried orange snack. *J Sci Food Agric* 101:4585–4590. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11101>
- Statistics Poland (2022) Production of agricultural and horticultural crops in 2021
- Struck S, Plaza M, Turner C, Rohm H (2016) Berry pomace—a review of processing and chemical analysis of its polyphenols. *Int J Food Sci Technol* 51:1305–1318
- Tomaszewska M, Bilska B, Kołożyn-Krajewska D (2022) The influence of selected food safety practices of consumers on food waste due to its spoilage. *Int J Environ Res Public Health* 19:8144. <https://doi.org/10.3390/ijerph19138144>
- Wiktor A, Chądzyńska M, Rybak K et al (2022) The influence of polyols on the process kinetics and bioactive substance content in osmotic dehydrated organic strawberries. *Molecules* 27:1376. <https://doi.org/10.3390/molecules27041376>
- Xue B, Hui X, Chen X et al (2022) Application, emerging health benefits, and dosage effects of blackcurrant food formats. *J Funct Foods* 95:105147. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105147>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Application of chokeberry pomace as pectin substitute in nonconventional freeze-dried snacks: physicochemical characteristics of the products

Magdalena Karwacka¹ · Sabina Galus¹ · Monika Janowicz¹

Received: 18 March 2024 / Revised: 29 May 2024 / Accepted: 2 June 2024
© The Author(s) 2024

Abstract

The objective of the study was the development of nonconventional restructured freeze-dried multicomponent snacks obtained with the addition of chokeberry pomace powder (CP) supported by calcium ions (0, 0.01 and 0.05%). The study consisted of the evaluation of the impact of various quantities (1, 3 and 5%) of dried chokeberry pomace powder on selected physicochemical characteristics compared to snacks structured by pectin (0.5 and 1.5%). The results showed that the application of CP caused a significant reduction in the snacks' water content and activity, which could contribute to enhanced stability. Hygroscopic properties and porosity also decreased with increasing quantity of CP, which was a consequence of structural changes in the material. The CP addition elevated the hardness of the snacks, however the effect was notably lower than after pectin incorporation. The use of the CP promoted the bioactive compound content and antioxidant activity of the freeze-dried snack. Total phenolic and anthocyanin contents elevated with the increasing quantity of CP, also followed by antioxidant activity improvement. The introduction of anthocyanins, which are red colorants, also caused notable changes in the color of the products. Overall, the application of chokeberry pomace resulted in obtaining an innovative snack option characterized by fortified bioactive compounds content and antioxidant activity. However, more research is needed to optimize also nutritional characteristics of the products.

Keywords Dried chokeberry pomace powder · Low-methoxyl pectin · Freeze-dried snacks · Physicochemical properties · Microstructure · Bioactive compounds

Introduction

Drying is one of the most popular techniques used in the food industry including convenient food production, therefore searching for innovations in the dried snacks sector has been an important topic of research, with a focus on developing healthy and appealing options that could easily interest consumers and face their expectations. Previous studies explored the use of unconventional ingredients and technologies to produce dried snacks featuring improved nutritional value and consumer appeal [1]. Recent findings in the employment of freeze-drying in the development of freeze-dried

snacks with the use of hydrocolloids, e.g. sodium alginate, gums, pectin, or fibres, have demonstrated the potential for creating products with designed quality features, showcasing the importance of selecting components that provide an outstanding outcome. Thanks to the structuring properties of hydrocolloids, their incorporation into the formulation allows manufacturing products based on blended or powdered fruit and vegetable ingredients [2–4]. Such snacks are characterized by elevated texture profiles regarding hardness and crispiness as well as increased glass transition temperature, which indicates storage stability [3, 5]. Thanks to their thickening properties, employment of hydrocolloids as structuring agents affects rheological properties and improves forming and shape maintenance. Therefore formulations with biopolymers are also used in food 3D printing [6]. Snacks obtained with high molecular weight polymers present not only improved technological features but also attractive sensory attributes. Crispy texture, porosity and melting when in contact with saliva were noted in orange snacks with gum

✉ Magdalena Karwacka
magdalena_karwacka@sggw.edu.pl

¹ Department of Food Engineering and Process Management,
Warsaw University of Life Sciences, SGGW, 159C
Nowoursynowska St, 02-787 Warsaw, Poland

arabic and bamboo fiber [7]. However, an unpublished study on multilayer vegetable snacks with sodium alginate or gums showed that adding hydrocolloids causes stickiness, giving an unpleasant impression of the product that sticks to teeth and is hard to remove. Among technological functionality and sensory properties, such goods are characterized by high nutritional value due to the presence of plant ingredients, elevated fiber content resulting from the addition of biopolymers, and freeze-drying applied as a preservation method that minimizes bioactive compounds degradation and changes in overall physicochemical characteristics giving high-quality products [5].

One of the most common and widely used hydrocolloids in the food industry is pectin. It is a long-chain polysaccharide derived from plant cell walls, and often from agricultural and food industry residues, including fruit pomace. Processing of pectin consists of extraction and purification that are resource and energy-demanding, however, they can be optimized by modifying various parameters, such as temperature, time, pH, etc. [8]. Due to the relatively low cost and well-recognized structuring and texturing properties, pectin is used in a wide range of food products starting with fruit preservatives and ending with new contact materials. To support gelling properties of pectin and enhance the stability of the obtained gels, calcium ions are being added to the hydrocolloid solution [9]. Considering current needs related to the chase for sustainability, various ways to reduce the environmental impact of novel foods were investigated, such as modification of the technological processes or formulations within the frame of a circular bioeconomy [10]. Moreover, recent studies presented new options in the development of innovative multicomponent products that could alternate traditional solutions. One of the trending approaches is food by-product valorization through their application as a functional food additive that has the potential to create a value-added product. For example, in the scope of freeze-dried multicomponent snacks, it was a combining or total replacement of the traditional hydrocolloids with fruit pomace, which could act in a similar manner giving products with characteristics comparable to freeze-dried gels [11–13].

Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) is one of the berry fruits extensively cultivated in Poland. According to the data published by Statistics Poland, the production of chokeberry in 2022 reached 53.9 thousand tons [14]. A significant part of the harvested fruits is utilized in juice production, after which approximately 12.8–22.6% of the processed biomass remains as pomace [15]. Due to the remarkable content of bioactive compounds, phenolics, anthocyanins, and other antioxidants, the high potential of chokeberry by-products as a valuable resource in innovative food production and development has been recognized [16]. Additionally, the physicochemical properties of chokeberry pomace have been investigated to better recognize its potential for utilization in food products [17].

Rich chemical composition and techno-functional properties motivated several approaches of utilizing chokeberry pomace in food products such as shortcrust pastries, milkshakes, and meat products, and more [16, 18]. For example, the impact of extrusion under various conditions on the dietary fiber and bioactive compounds profiles in chokeberry pomace were studied, indicating valuable structuring properties and high quality of obtained texturates [19]. Furthermore, cookies and bakery products fortified with fruit by-products, including chokeberry pomace, demonstrated enhanced nutritional value of the products [20]. Researchers focused mostly on the extraction, purification, and co-pigmentation of anthocyanins from chokeberry pomace, as well as the influence of different carriers and processing techniques on the physicochemical characteristics of chokeberry pomace extracts and powders that could be applied as food-fortifying additives [21, 22]. Overall, all the above indicates that chokeberry pomace demonstrates great potential for incorporation into innovative and healthy freeze-dried snacks as an additive providing structuring properties and improving nutritional value. Considering the given introduction, the idea of this study was to employ chokeberry pomace powder as a more sustainable fortifying agent providing improvement in textural properties and bioactive compounds. Application of the pomace was supposed to reduce environmental impact by shortening the processing chain due to skipping of the pectin extraction process and reducing agrifood waste. The thickening properties of fibers and pectin contained in the fruit by-product could be supported by the introduction of calcium ions that could influence the structure and mechanical properties of the developed products.

The objective of the research was to develop unconventional restructured freeze-dried multicomponent snacks and evaluate the impact of various quantities of dried chokeberry pomace powder supported by calcium ions on selected physicochemical characteristics compared to snacks structured by pectin.

Materials and methods

Materials

The research material in this study was freeze-dried snacks comprising carrot, orange, and ginger, with the incorporation of dried chokeberry pomace powder (CP) or low-methoxyl pectin (LMP) as carrier agents supported by various concentrations of calcium lactate. The base formulation was chosen based on the sensory evaluation in preliminary study. The raw materials employed in sample preparation included 1 cm frozen carrot cubes (Unifreeze sp. z o.o., Poland), orange juice concentrate (Purena, Poland), ginger (local

market, Warsaw, Poland), industrial hot-air dried chokeberry pomace (water content 5.77%) (Greenherb, Poland) which was ground using food processor, low-methoxyl pectin (Hortimex, Poland), and calcium lactate (Agnex, Poland).

Chemicals and reagents utilized for the determination of total phenolic and anthocyanins content and antioxidant activity were procured from POCH (Poland) and were stored in a refrigerator at 4 °C with restricted exposure to light.

Methods

Sample preparation

The fundamental composition of freeze-dried snacks included 60% carrot (C), 10% orange juice concentrate (O), and 0.4% fresh ginger (G). Furthermore, two experimental variables were introduced: chokeberry pomace powder (CP) and calcium lactate (a-c referring to the concentration). The chosen concentration of the variables was evaluated based on the preliminary studies and analysis of commercially available restructured snack formulations. In each variant, the formulation was fulfilled with water. The quantities of additives (chokeberry pomace powder, pectin, and calcium lactate) are detailed in Table 1, corresponding to the variant codes.

The procedural guidelines for technological processing were previously outlined by Karwacka et al. [13]. Thirty minutes before processing, the frozen carrot was thawed at 25 °C. The water with calcium lactate was heated to 85 °C using a heating plate. Subsequently, a carrier agent was introduced into the solution, followed by thorough mixing for 1 min. All components were then introduced into the

laboratory knife mill GRINDOMIX GM 200 (Retsch, Germany) and blended at 4500 rpm for 1 min.

The resulting mixtures were dispensed into silicone molds, subjected to freezing at −40 °C for approximately 4 h, and subsequently underwent freeze-drying in an Alpha 1–2 LD plus freeze-dryer (Martin Christ GmbH, Germany) at 30 °C and a pressure of 0.063 kPa for about 48 h. After processing, the freeze-dried snacks were sealed in high-barrier packaging and stored at ambient temperature for approximately 24–48 h before conducting the tests.

Water content and activity

The water content was determined in a convective dryer SUP 65W/G (WAMED, Poland) at 70 °C for 24 h. The water activity was assessed using a HygroLab C1 meter (Rotronic, Switzerland) at 25 ± 1 °C, following the guidelines provided by the manufacturer. Both measurements were performed in triplicate.

Hygroscopicity determination

Hygroscopic properties were assessed by measuring the moisture uptake of a cubic sample ($1 \times 1 \times 1$ cm) incubated at 25 °C within a desiccator containing saturated NaCl solution (RH = 75%) for 72 h. Measurements were done in triplicate after 0, 0.5, 1, 3, 6, 9, 12, 24, 48 and 72 h. The outcomes were quantified as the quantity of water absorbed per 100 g of the solid material.

Table 1 Formulation and coding of the freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks with chokeberry pomace powder (CP)

Sample		Carrot	Orange juice concentrate	Ginger	Water	Chokeberry pomace	Low-methoxyl pectin	Calcium lactate
		%						
COG		60	10	0.4	29.60	–	–	–
COG-CP1	a	60	10	0.4	28.60	1	–	0
	b				28.59			0.01
	c				28.55			0.05
COG-CP3	a	60	10	0.4	26.60	3	–	0
	b				26.59			0.01
	c				26.55			0.05
COG-CP5	a	60	10	0.4	24.60	5	–	0
	b				24.59			0.01
	c				24.55			0.05
COG-LMP0.5	b	60	10	0.4	29.09	–	0.5	0.01
COG-LMP1.5	b				28.09		1.5	0.01

Texture properties determination

The textural characteristics of the snacks were examined employing the TA.HD plus texture analyzer (Stable Micro Systems, UK). A compression test was executed utilizing a 20 mm diameter platen probe, with a test speed set at 0.5 mm/s. The assessment was conducted on 10 samples of the material (1.5 × 1.5 × 1.5 cm) reaching 50% deformation. Hardness was assessed as the maximum force recorded during sample compression and compression curves showing changes of the deformation force in time were prepared.

Scanning electron microscopy (SEM) imaging

Visualization of the internal structure was conducted using a scanning electron microscope (SEM) TM3000 (HITACHI, Japan) at a magnification of 200×. Before the analysis, samples were sectioned with a razor blade, affixed to the specimen stub using adhesive carbon discs, and subsequently coated with gold using the automatic coater Cressington 108auto (EO Elektronen-Optik-Service GmbH, Germany). Additionally, macroscopic photos were taken using a digital microscope VHX-970F (Keyence, Belgium).

Computed tomography and porosity analysis

The microstructure of the freeze-dried samples was analyzed utilizing the X-ray micro-CT SkyScan 1272 system (Bruker microCT, Belgium) with an accelerating voltage of 40 kV, 193 µA of supply current, and a rotation step of 0.2°. The radiographic images were processed in NRecon1.6.3.2 and CTAn v.1.10.1.0 software to calculate porosity and pore size distribution based on the reconstructed 3D model. The measurements were performed on three samples of each material.

Color determination

Color parameters Lab^* were assessed using the CR-5 Colorimeter (Konica Minolta, Japan) equipped with an 8 mm measuring hole in reflectance mode. The measurements were conducted on the material's surface at 15 distinct locations. The impact of additive application was quantified as the total color difference (ΔE) based on the following formula:

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

where ΔL^* , Δa^* , Δb^* represent the differences of lightness (L^*), redness (a^*) and yellowness (b^*) between snacks with the tested additives versus control (COG).

Extraction procedure for chemical properties analysis

To assess the total phenolic and anthocyanins contents and antioxidant activity, the extracts were formulated by extracting 0.3 g of the finely ground (IKA A11 basic, IKA-Werke GmbH, Germany) material in 10 mL of an 80% ethanol aqueous solution with 0.1 M hydrochloric acid (85:15 v/v) for 24 h at room temperature with continuous agitation on a Multi Reax shaker (Heidolph Instruments, Germany). Subsequently, the extracts were subjected to centrifugation (2 min, 3000 rpm) using a laboratory centrifuge MegaStar 600 (VWR, Belgium), transferred into 0.2 mL PCR tubes, and prepared for analysis. The extraction procedure was conducted in duplicate for each sample. The reagents were prepared, and all of the chemical properties of the freeze-dried snacks were determined according to the methodology outlined by Wiktor et al. [23] with minor adjustments.

Total phenolic content (TPC) determination

The determination of total phenolic content was conducted through the spectrophotometric method employing Folin–Ciocalteu's reagent. In 96-well plates, 10 µL of extracts were diluted with distilled water in the ratio of 1:1 v/v. Subsequently, 40 µL of a fivefold diluted Folin–Ciocalteu's reagent was added, mixed, and allowed to react at room temperature with no access to light for 3 min. Following this, 250 µL of a 7% saturated sodium carbonate solution was introduced, and the mixtures were incubated in darkness for 60 min. A blank test was prepared substituting the extract with the extraction reagent. The absorbance of the mixtures was measured utilizing a Multiskan Sky plate reader (Thermo Electron Co., USA) at a wavelength of 750 nm. The results were expressed in mg of gallic acid per 100 g of dry matter, using a calibration curve prepared for the mentioned standard. The determination was conducted in triplicate for each extract.

Total anthocyanins content (TAC)

The quantitative determination of monomeric anthocyanin content was conducted using the differential pH method. The analysis involved buffers with pH 1 (1.86 g KCl in 1 L of distilled water) and pH 4.5 (54.43 g $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ in 1 L of distilled water). Both buffers were adjusted to the specific pH using concentrated HCl. Reactions were executed on a 96-well plate, where 30 µL of the extract solution and 135 µL of buffer were dispensed into the well and mixed. After a 20-min incubation at 25 °C in a dark place, the absorbance of the solutions was measured at 510 and 700 nm, respectively for mixtures with pH 1 and 4.5 buffers, using

the previously mentioned plate reader. A control sample with no pomace addition (COG) was used as a blank sample. The results were reported as milligrams of cyanide-3-glucoside per gram of dry matter. The analysis was conducted in triplicate for each extract.

The total anthocyanin content (TAC) was computed using the following equation:

$$TAC = \frac{A \times MW \times DF \times 1000}{\epsilon \times L},$$

where TAC—total anthocyanin content (mg Cyd-3-glu/kg); $A = (A_{510} - A_{700})_{pH1} - (A_{510} - A_{700})_{pH4.5}$; MW—molecular weight of cyanide 3-glucoside (449.2 g/mol); DF—sample dilution factor; ϵ —molar absorption coefficient of cyanidin-3-glucoside (26 900 L/mol × cm); L—optical path length for the solution in the well (0.173 cm).

Antioxidant activity determination

Assay against ABTS^{•+}: Before the examination, the ABTS^{•+} stock solution underwent dilution with 80% (v/v) ethanol to yield a functional solution exhibiting absorbance within the 0.68–0.72 range at a 734 nm wavelength. The analytical procedure involved dispensing 10 µL of the analyte solution and 250 µL of the free radical solution into a 96-well plate, followed by shaking and incubation in darkness for 6 min. A blank probe was prepared substituting the extract with the extraction reagent. Absorbance readings were taken at 734 nm using a Multiskan Sky plate reader. The antiradical activity was determined by calculating the reduction in absorbance of the ABTS^{•+} radical solution in the presence of the analyte extract, expressed as mg Trolox/g dry matter, which was employed as standard. The entire process was performed in triplicate for each extract.

Assay against DPPH[•]: The assessment began with the dilution of the DPPH[•] stock solution using 80% (v/v) ethanol, resulting in a working solution characterized by absorbance falling within the 0.68–0.72 range at a wavelength of 515 nm. The determination of antioxidant activity against DPPH[•] followed a methodology similar to that outlined for ABTS^{•+}, involving the dispensing of 10 µL of the analyte solution and 250 µL of the DPPH[•] radical solution into a 96-well plate. The incubation period was extended to 30 min, and absorbance measurements were taken at a 515 nm wavelength using a Multiskan Sky plate reader. This protocol ensured consistency with the ABTS^{•+} procedure while accounting for variations specific to the DPPH[•] assay.

Statistical analysis

The obtained results were analyzed using STATISTICA 13 software (TIBCO Software, USA). The significance between the characteristics of the investigated materials was evaluated by conducting the one-way ANOVA with a post-hoc multiple comparisons Tukey's test ($P > 0.05$). Additionally, the relationship and dependence between selected results were evaluated by Pearson's correlation performance.

Results

Water content and water activity

The water content and water activity of the freeze-dried snacks were investigated and the results are presented in Table 2. Both parameters varied showing particular tendencies. Water content in the freeze-dried snacks was in range from 1.20 to 2.15%. The enlargement of the pomace powder addition was followed by the gradual decrease in the parameter's value, starting from the COG sample with no additives. The decrease of water content related to the pomace quantity may have also resulted from the lower amount of water added to the snacks and lower water content led to reduced water activity. The amount of calcium lactate addition also influenced the amount of water that remained in the sample after freeze-drying. Increasing the concentration of calcium ions resulted in increasing water content in the snacks. However, the change was significant only after the incorporation of the greatest amount of salt. Water acts as

Table 2 Water content, water activity and hygroscopicity of freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks with chokeberry pomace powder (CP)

Sample	Water content (%)	Water activity (–)	Hygroscopicity (g H ₂ O/100 g d.m.)
COG	1.92 ± 0.10 ^b	0.055 ± 0.000 ^a	29.15 ± 0.12 ^a
COG-CP1a	1.46 ± 0.01 ^{ef}	0.048 ± 0.003 ^b	26.26 ± 1.21 ^{bc}
COG-CP1b	1.53 ± 0.03 ^{de}	0.050 ± 0.003 ^{ab}	27.54 ± 0.11 ^b
COG-CP1c	1.68 ± 0.03 ^c	0.051 ± 0.001 ^{ab}	27.01 ± 0.15 ^b
COG-CP3a	1.34 ± 0.03 ^{fg}	0.036 ± 0.001 ^{cd}	23.98 ± 0.05 ^{def}
COG-CP3b	1.47 ± 0.02 ^{ef}	0.037 ± 0.002 ^{cd}	24.64 ± 0.25 ^{de}
COG-CP3c	1.62 ± 0.02 ^{cd}	0.040 ± 0.002 ^c	24.96 ± 0.14 ^{cd}
COG-CP5a	1.20 ± 0.06 ^h	0.029 ± 0.004 ^{ef}	22.23 ± 0.17 ^g
COG-CP5b	1.29 ± 0.04 ^{gh}	0.028 ± 0.002 ^f	23.47 ± 0.27 ^{efg}
COG-CP5c	1.49 ± 0.02 ^{de}	0.032 ± 0.002 ^{def}	23.14 ± 0.22 ^{fg}
COG-LMP0.5b	1.75 ± 0.01 ^c	0.029 ± 0.003 ^{ef}	27.66 ± 1.10 ^b
COG-LMP1.5b	2.15 ± 0.06 ^a	0.034 ± 0.003 ^{de}	27.56 ± 0.26 ^b

Results are shown as mean ± SD; letters in columns indicate differences determined by Tukey's test at $P < 0.05$

a plasticizer in food products and can easily affect textural properties of the freeze-dried materials by lowering their glass transition temperature and causing softening or even collapsing of the internal structure of the material [3, 24]. Moreover, increased water content in samples with higher calcium ions concentration may indicate the improvement of gelling properties and stronger links between water particles and fibers present in the composition of the snacks, thus more difficult and limited water migration during drying [25]. In the case of water activity, 1% CP addition caused a significant increase in the obtained results although water content in those samples was lower. Rising the pomace powder quantity contributed to lowering water activity. The snacks differing by the calcium ions concentration showed water activity tendencies correlating to those observed for water content. Nevertheless, the tendency was visible, but the slight growth was not significant. Apart from the material with 5% pomace addition, snacks with CP featured lower water content but higher water activity compared to products obtained with LMP, which proves the difference in the water bonding capacity of the used additives. Ciurzyńska et al. [11] examined a combination of sodium alginate and powdered apple or chokeberry pomace in freeze-dried snacks derived from apple puree. They observed that expansion of the hydrocolloid quantity resulted in higher water content and activity in the material, and increasing pomace powders addition tended to lower these parameters. The authors connected it to the difference observed in snacks structure, which was found to be fragile and built out of thin walls in samples with lower additives levels. Another study on apple pomace powder application as a carrier agent in freeze-dried snacks also noticed a reduction in water content and water activity and similar tendencies between samples with pomace powder and pectin, explaining the dependencies with different water-holding capacities of the used components [12].

Hygroscopicity

Table 2 presents also the hygroscopicity of the tested material, expressed as the quantity of moisture present per 100 g of a sample after 72 h of exposition to a humid environment. As can be seen, the incorporation of both CP and LMP resulted in a lowered ability to absorb water from the environment, which was the desired effect to obtain. The expansion of the pomace powder in the formulation reduced hygroscopicity by approximately 7.6, 15.9 and 21.3%. Using 1% CP gave comparable results as the addition of pectin that lessened the quantity of absorbed water by 6.3%. Calcium lactate did not affect hygroscopic properties significantly, however, the material with no addition tended to gain less moisture. The kinetics that are not included in the paper showed that the moisture gain was the most intensive for the

first 12 h and then slowed down. Assessment of hygroscopic properties is important and gives the insight into stability of foods. According to materials qualification in terms of their hygroscopicity presented by Moraes et al. [26], freeze-dried snacks examined in this research were highly hygroscopic, which indicates the importance of separating them from the humid environment by using appropriate packaging in order to maintain their quality. The hygroscopicity of the material, as with all of the mass transfer phenomena, is mainly determined by the internal structure and moisture gradient between the surroundings and the product. The more porous and open the structure is, the more intense the mass exchange between the sample and the environment [27]. As a consequence of the extension of the pomace powder amount in the formulation, the materials' structure becomes denser and less porous, therefore the hygroscopicity is reduced due to the limited availability for vapor penetration [12].

Microstructure and porosity

The microstructure of the freeze-dried snacks was evaluated based on images obtained by scanning electron microscopy (SEM) and computed tomography which are shown in Fig. 1. The images show that the internal structure of the samples with the addition of CP was irregular and prone to crumbling, which was also apparent while cutting the material to expose the cross-section. It was built out of thin walls surrounding small and unevenly distributed pores which in some places merged and created large air spaces in the structure. On the contrary, snacks obtained with the traditional hydrocolloidal agent featured greater and more homogeneously located pores. Preparation of the snacks for SEM imaging also revealed different behaviour during cutting which affected the obtained photos. Samples with pectin were fragile, but the structure was resilient enough to avoid excessive damage. Cutting the CP samples featured crumbling and destruction of the structure upon impact. There was also movement of the great parts of the skeleton observed. Ideally, the addition of structure-forming agents aims to recreate a structure similar to the cellular skeleton with regular and closed pores present in natural fruit and vegetable tissue. Optimization of such structure would result in a similar texture profile and suspected positive consumer perception. The strong gel that is formed by pure biopolymers and subjected to aeration resemble the delicate structure consisted of even pores surrounded by thin walls of solid matter [28, 29]. Moreover, CT imaging exposed that the structure of the snacks differed within the volume of one sample. Material structured with CP was characterized by a more compact structure compared to the structure formed closer to the surface. Nevertheless, all samples obtained with the pomace powder featured comparable structural pattern. A similar effect on freeze-dried snack structure was observed

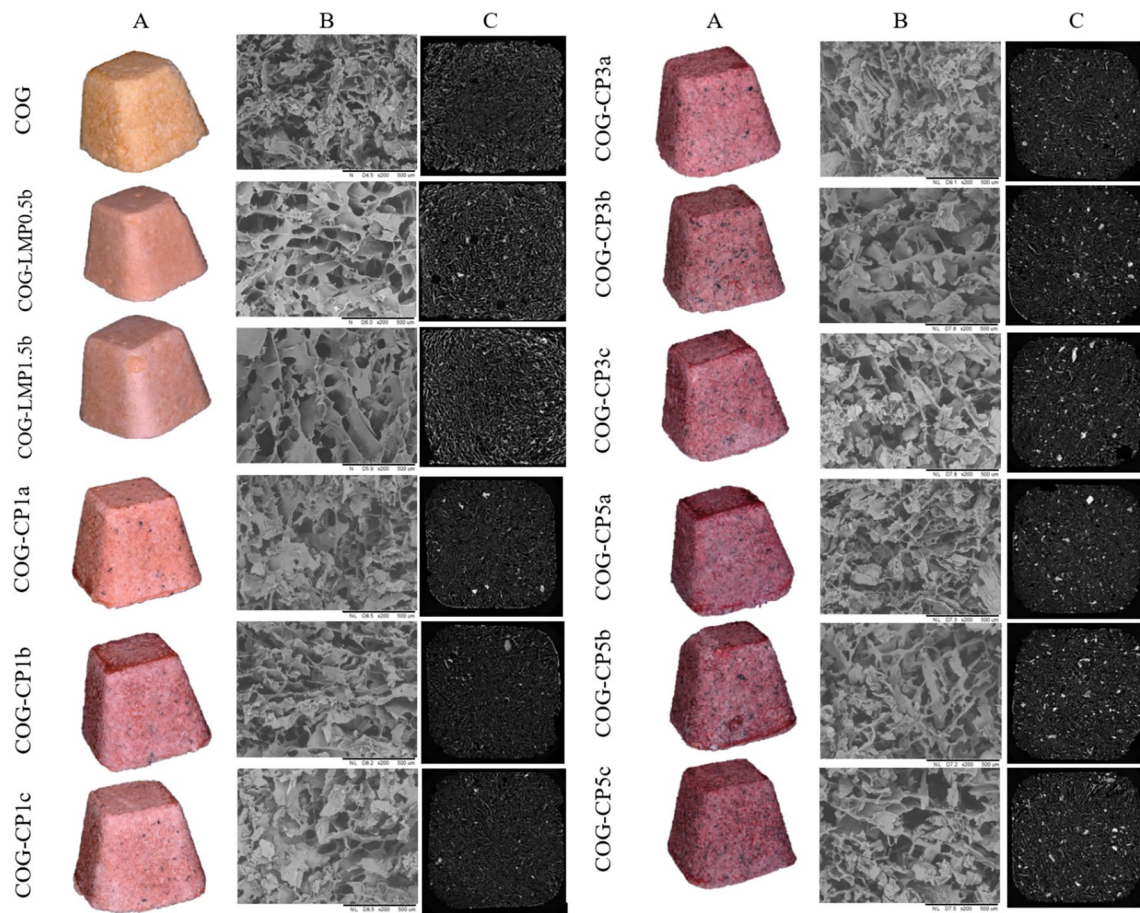


Fig. 1 Photos and microstructure of freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks with chokeberry pomace powder (CP)

before while evaluating the impact of apple pomace addition utilizing SEM imaging and computed tomography [12]. The microstructure affects the mechanical properties of the material. The uneven distribution of pores and discontinuity of the internal skeleton may result in an unstable and fragile texture that could be easily destroyed upon impact [30]. That could contribute to the destruction of the material during transport, packaging and storage, and consequently lead to significant quality and attractiveness loss. It may also cause unwanted crumbling during consumption. Moreover, structure formation in restructured food products goes differently compared to intact fruit or vegetable tissue, therefore internal structure may appear disordered compared to preserved skeleton constructed with cell walls [29]. Nevertheless, restructuration with the employment of various structuring agents gives more opportunities to develop materials with designed characteristics.

The porosity of the freeze-dried snacks measured by microcomputed tomography analysis is presented in Table 3. The application of LMP as a structuring agent tended to support the structure which was less dense and more porous compared to the control sample. On the contrary, the

Table 3 Porosity, hardness and total color difference of freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks with chokeberry pomace powder (CP)

Sample	Porosity (%)	Hardness (N)	ΔE (–)
COG	59.50 ± 0.64^b	21.98 ± 0.95^g	–
COG-CP1a	52.18 ± 0.64^c	38.08 ± 3.32^{cde}	24.20 ± 0.49^g
COG-CP1b	53.59 ± 0.41^c	37.93 ± 2.49^{de}	35.12 ± 0.35^e
COG-CP1c	53.22 ± 1.25^c	32.61 ± 1.67^f	30.93 ± 0.56^f
COG-CP3a	45.25 ± 0.37^e	37.42 ± 3.29^{de}	42.39 ± 0.72^d
COG-CP3b	48.44 ± 0.99^d	36.06 ± 1.50^{ef}	42.57 ± 1.04^d
COG-CP3c	45.32 ± 0.51^e	39.42 ± 0.98^{cde}	44.45 ± 0.69^c
COG-CP5a	41.95 ± 0.21^f	40.48 ± 2.08^{cd}	47.88 ± 0.55^{ab}
COG-CP5b	43.91 ± 0.45^{ef}	42.55 ± 1.47^{cde}	47.64 ± 0.41^b
COG-CP5c	44.45 ± 0.24^e	39.87 ± 1.47^{cde}	48.74 ± 0.67^{ab}
COG-LMP0.5b	61.57 ± 1.74^{ab}	79.60 ± 2.80^b	17.47 ± 2.34^i
COG-LMP1.5b	62.10 ± 0.35^a	142.99 ± 5.14^a	19.28 ± 2.36^h

Results are shown as mean $\pm$ SD; letters in columns indicate differences determined by Tukey's test at $P < 0.05$

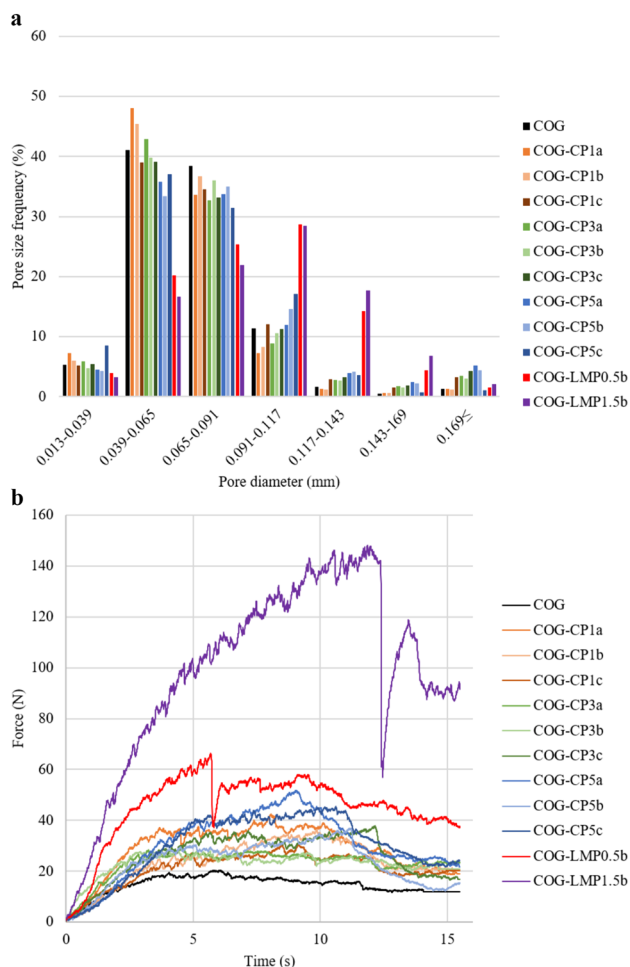


Fig. 2 **a** Pore size distribution in freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks with chokeberry pomace powder (CP); **b** Compression curves of the freeze-dried snacks

incorporation of CP powder caused a gradual decrease in porosity values, the average of which was estimated as 11, 22, and 27% respectively for snacks with 1, 3 and 5% of CP. There was also a slightly noticeable trend, not clearly recognized by the statistical analysis, regarding the addition of calcium ions that gave samples with porosity higher than values established for the material without the salt. Moreover, the formulation of the snacks determined size of the created pores. As can be seen in Fig. 2a, the mean diameter of the majority (69–82%) of the pores present in the material with chokeberry pomace powder was in the range of 0.039–0.091 mm, while in LMP-structured snacks they did not exceed 45%. With an increasing quantity of the additive, a rise in the mean pore size was noticed. The total porosity of the examined materials consisted of 11–25% larger pores, above the mentioned range, in the case of CP addition and 49–55% in COG-LMP snacks. Outcomes of the microstructure evaluation and main findings in this research were consistent with previous findings regarding the application of

apple [12] and blackcurrant [31] pomace powders in freeze-dried snacks, in which the pomace powders also caused a significant reduction in total porosity of the samples that progressed with the quantity enlargement. However, the level of the porosity decrease was higher in this research. It is hard to explain the mechanism between the observed changes and differences in the properties of samples' microstructure, since there is no research regarding the mechanism behind the gelling properties of fruit pomace, especially in freeze-dried food products. However, this indicated a niche in the field and shows the need for a detailed exploration of dried fruit pomace's basic texture- and structure-forming properties. The lowered porosity of the samples suggests the limited structuring capacity of fibres, protein, and other compounds revealing gelling properties contained in the pomace [19, 32, 33]. That, together with the introduction of additional solid particles absorbing moisture from the prepared blend, changed the amount of frozen and sublimated water, and thus may have influenced the formation of smaller ice crystals prior to freeze-drying. As a result, smaller pores were determined in the structure of the samples [34]. Such effect may have appeared also due to insufficient hydrothermal treatment conditions of pomace [33], which, again, leads to the conclusion that further research on the structure-forming potential of the plain pomace is required. On the other hand, there is more research on the microstructure of freeze-dried hydrocolloidal gels. For example, previous findings on freeze-dried LMP gels supported with calcium lactate showed that this hydrocolloid has the ability to form a stable structure with large pores (mean diameter equals 274 or 495 μm when aerated for 3 or 7 min) and thin walls [35]. Groult et al. emphasized the importance of calcium ions addition and their influence on structure-forming properties of pectin [36]. They catalyse formation of cross-linking ionic bonds between carboxyl groups present in pectin particles, and that ionic gelation prevents collapsing of the material's structure during dehydration. As mentioned above, there is no reports regarding the effect of the presence of calcium ions on the gelling and thickening properties of fruit pomace, so this field is to be explored in the future research.

Mechanical properties

Mechanical properties measured in this research are shown as hardness (Table 3) determined as the maximum force reached during compression of the sample and compression curves recorded during tests (Fig. 2b). The results turned out to be different than expected, especially in the case of hardness. As is shown in Fig. 2b, the compression of the samples went in a very similar pattern for all samples obtained with CP. The curves are flat and feature many small peaks resembling the one recorded for the control sample. The contrast

between the texture of the material structured with LMP and CP is clear according to both hardness results and presented compression curves. Courses of the curves correspond to the shape of the internal structure of the snacks that were described above. Small and irregular pores resulted in shallow peaks on the curves determined for samples with CP, while larger and evenly distributed pores present in LMP samples could promote strength of the material thus more turbulent deformation. The correlation between the structure characteristics and compression curves' course was observed before [12, 13].

Further analysis of the data recorded during compression allowed determining the hardness of the tested samples (Table 3). Statistical evaluation revealed that the addition of CP elevated the hardness of the snacks by 64–93%, with an exception noted for COG-CP1b in which hardness gain was approximately 48%. However, neither the quantity of the pomace powder nor calcium lactate affected significantly this feature. When it comes to the quantity of pomace, the increased hardness might have been related to the reduced water content in samples with more additive. Regardless of the formulation, even the greatest growth of the hardness resulting from CP addition was almost three times lower compared to the effect of LMP used at 0.5%. Previously, apple pomace powder had a greater impact on freeze-dried snacks' texture and developed products with a hardness similar to the ones obtained with 0.5% of LMP [12]. Analysis of chokeberry pomace powder subjected to extrusion established that fibers contained in the powder created a stable three-dimensional structure, however the extrudates were characterized by lower hardness than conventional products made out of starches [19]. The addition of both chokeberry pomace and sodium alginate had a synergistic effect and elevated the hardness of the products, however, sensory evaluation showed that with the extension of the amounts used, general perception and acceptability tended to decrease [11].

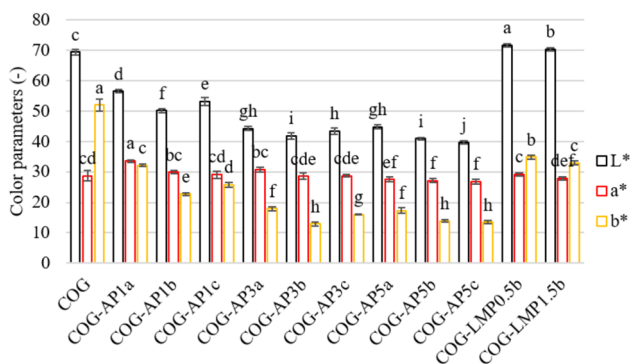


Fig. 3 Color parameters of the freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks with chokeberry pomace powder (CP). Letters above bars in the same color indicate differences determined by Tukey's test at $P < 0.05$

Therefore, not only physicochemical properties evaluation is required for new product development, but also further sensory analysis, which can help with understanding consumers' needs and perceptions, thus products' optimization.

Color

Color parameters of the freeze-dried snacks are presented in Fig. 3. The L^* parameter indicates lightness with the dependency that the higher the value (up to 100), the lighter the material. Positive values of the a^* parameter represent redness and greenness when they are negative. Similarly, the b^* parameter when positive indicates yellowness, and when negative blueness. According to the obtained results, the greater the addition of CP, the lower the values of the L^* parameter, which means that the application of the pomace powder caused significant darkening of the snacks. The values dropped from 69.41 for COG down to 69.35. In the case of lightness, the CP worked in the opposite direction to LMP, the addition of which elevated this parameter by 3.2 and 1.3% in order of the increasing amount of pectin. Additionally, all of the tested samples were characterized by positive values of a^* and b^* . Nevertheless, while the redness was in the range of 27–34, values of the b^* were decreasing with the increasing quantity of CP. The initial b^* equaled 52.02 and the results determined after the addition of the pomace powder dropped by approximately 25, 35, and 39 units, while LMP induced the drop only by 17 and 19 units.

To evaluate general changes in the color of the developed products, the total color difference (ΔE) between the control sample (COG) and samples with additives was calculated based on the measured color parameters. The results are presented in Table 3. As expected, the introduction of the chokeberry pomace to the formulation of the snacks caused a significant change in the color of the snacks due to its high concentration of red colorants (anthocyanins) [15]. Regardless of the type or quantity of additive used, ΔE values were high and the difference in the color of the samples could be easily noted by the untrained human eye. For better visualization of the occurred effect, photos of the snacks are included in Fig. 1. As appears in both photos and ΔE results, the contrast of the coloring effect of CP addition was high after the addition of 1 and 3% of CP, but the color variation between COG-CP3 and COG-CP5 is much harder to distinguish. The light and creamy color of LMP powder explains the lowest difference demonstrated by COG-LMP samples. Similar results were established in bread and wafers enriched with chokeberry powder [37, 38]. Consumers' perception of such color change strongly depends on the type of product. For example, the appearance of wafers with higher incorporation of chokeberry powder (3, 4 and

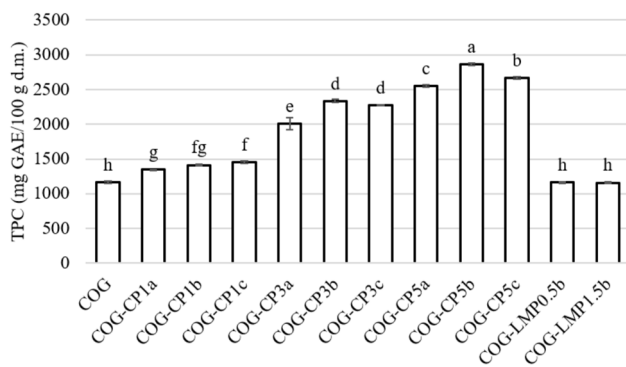


Fig. 4 Total phenolic content (TPC) in freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks with chokeberry pomace powder (CP). Letters above bars indicate differences determined by Tukey's test at $P < 0.05$

5%) got higher notes than samples with 1 and 2% [37]. On the contrary, bread color evaluation decreased with an increasing color change resulting from chokeberry powder [38]. Previous studies have shown that the incorporation of 1, 3 and 5% apple pomace powder in freeze-dried snacks resulted in ΔE values of 9, 12.5 and 15.5 [12], while the application of blackcurrant pomace led to the extension of the product color change to approximately 19.5, 30.5 and 35.5 units due to the presence of dark colorants [31].

Total phenolic content (TPC)

Figure 4 presents the results of the TPC assessment. One of the main purposes of by-products application in novel foods is to take advantage of their nutritional value, e.g. introducing bioactive compounds, fibers and minerals contained in those ingredients. The freeze-dried snacks benefited from the CP powder incorporation through raised phenolic content. The TPC gradually increased with the enlargement of the pomace powder in the formulation, the values started from 1163.87 mg GAE/100 g d.m. and increased by an average of 21, 89 and 131% respectively to the rising level of CP. There is also a noticeable tendency related to the addition of calcium lactate followed by slightly higher TPC than noted for snacks without the salt addition. The LMP did not significantly affect the TPC content. Chokeberry fruits and products derived from this material, including chokeberry pomace, are a rich source of bioactive compounds such as polyphenols. Moreover, bioactive compounds in the pomace were found to remain stable during heating and mechanical processing [39]. Fortification of whey bread with 1% chokeberry pomace resulted in doubled TPC, while after the addition of 5% the results were almost quadrupled [38]. As Krajewska and Dziki summarized, using chokeberry pomace in baked products always

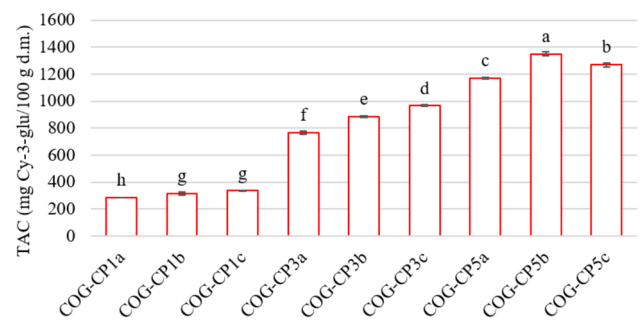


Fig. 5 Total anthocyanin content (TAC) in freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks with chokeberry pomace powder (CP). Letters above bars in the same color indicate differences determined by Tukey's test at $P < 0.05$

results in notably elevated bioactive compound content and antioxidant capacity of the obtained products [20]. In the case of freeze-dried snacks fortified with fruit pomace, apple pomace powder increased polyphenols content to a much lower extent than the chokeberry pomace effect observed in this study [12], which indicates better stability or higher initial TPC, thus nutritional value, of dried chokeberry pomace powder over apple pomace powder.

Total anthocyanins content (TAC)

Results of the total monomeric anthocyanin content determination are presented in Fig. 5. To begin with, the control sample (COG) and snacks with the addition of LMP did not contain anthocyanin, therefore the COG was used as a blank to reduce background interference caused by orange colorants introduced with carrot and orange concentrate. Using CP as an additive in the freeze-dried snacks resulted in the presence of a significant quantity of anthocyanins in the material. The contents of the compounds in COG-CP1 samples were in the range of 287.25–336.83, in COG-CP3 766.30–966.97 and in COG-CP5 it was 1170.48–1351.47 mg Cy-3-glu/100 g d.m. As was expected, the gradual increase of TAC followed the enlargement of the CP amount in the formulation. Additionally, it was observed that snacks with calcium lactate featured elevated anthocyanin content, which suggests that the salt could have had a protective effect on the anthocyanins during processing. Studies on natural colorants in beverage products have shown that the addition of biopolymers improves the stability of anthocyanins due to their ability to form molecular complexes and calcium ions are often used as agents supporting the gelling properties of the fibers [40]. Although, the treatment conditions applied in this research were relatively soft – the temperature of hydrothermal treatment reached 85 °C its duration was only 1 min and the freeze-drying was carried out at 30 °C,

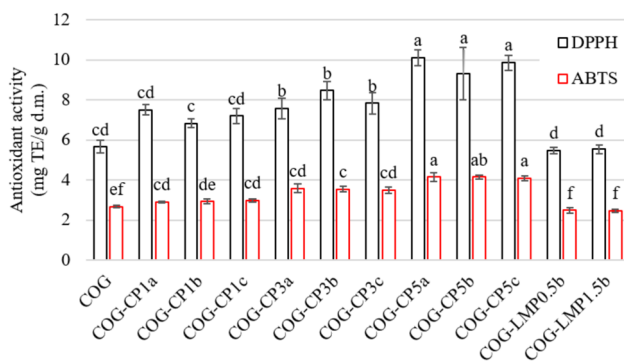


Fig. 6 Antioxidant activity against DPPH and ABTS of freeze-dried carrot-orange-ginger (COG) snacks with chokeberry pomace powder (CP). Letters above bars in the same color indicate differences determined by Tukey's test at $P < 0.05$

so it should not promote anthocyanin degradation. Anthocyanins have been established as stable during thermal and enzymatic processing and both treatments combined [15, 41], which makes the pomace a valuable food fortifying agent. For example, Drożdż et al. found great improvement in phenolic compounds, including anthocyanins, content in extruded corn snacks developed with chokeberry pomace addition. The comparison of chokeberry and blackcurrant pomace revealed a more beneficial effect of the chokeberry pomace, even though the processing temperature was in the range from 120 to 150 °C [42].

Antioxidant activity

The antioxidant activity results are shown in Fig. 6. Following the tendencies observed in the contents of tested bioactive compounds, the antiradical activity of the freeze-dried snacks has also gradually increased with the expansion of the pomace powder addition. The DPPH assay suggested that 1 and 3% addition of CP led the materials to reach antioxidant activity at a similar level, elevated by 21–50%, while samples with the highest CP level demonstrated a 73% increase. At the same time measurement performed against ABTS radicals also proved improvement in the obtained results that were approximately 10, 32 and 55% higher, respectively in the amount of powder added. However, this analysis showed that 1% CP addition did not affect antioxidant activity significantly and COG-CP1 samples were placed in the same group as control and snacks with LMP. Regardless of the assays method used, no impact of calcium ions was found. The relatively high antioxidant activity of chokeberry pomace has been established before, therefore it is considered precious material that could be used as a source of bioactive compounds and colorants and as a fortifying agent supporting the health-promoting value of supplied food products [16]. Researchers connect this antiradical potential with

the outstanding composition of bioactive compounds featuring antioxidant nature, e.g. polyphenols, anthocyanins, and flavonoids, suggesting that it may also contribute to the extended shelf life of selected consumables [43]. The antioxidant activity elevation induced by chokeberry incorporation evaluated in this research was greater compared to the effect of apple pomace addition [12], which indicates better health-promoting ability of chokeberry pomace due to the presence of high anthocyanin content. Moreover, the antioxidant activity of chokeberry pomace depends on pH and has been established as the best working in the human body environment out of various fruits such as apples, blueberries and more [44].

Conclusions

The presented study showed the potential application of chokeberry pomace powder as an additive in multicomponent freeze-dried snacks. Determination of the physicochemical characteristics of the snacks enriched with chokeberry pomace (CP) and calcium lactate gave insights into their physicochemical properties and potential health benefits. The incorporation of CP and calcium lactate influenced water content and water activity, the values of which decreased with an increasing quantity of the additives. Hygroscopicity of the products was also reduced by the pomace powder incorporation more than it was observed for pectin (LMP), which was most likely related to the internal structure of the material and the water bonding capacity of the additives. Microstructure analysis revealed that CP affected the internal structure, making it less porous and disordered, while LMP produced snacks with greater and more evenly distributed pores. The structure influenced also the mechanical properties of the snacks. The CP induced hardening of the material, however, the observed changes were not dependent on the additives quantity and turned out to be remarkably lower than the effect of LMP addition. Moreover, the addition of the CP powder remarkably affected the color of the freeze-dried snacks due to the high content of anthocyanins. It can be also concluded that chokeberry pomace has the potential for use as a fortifying agent, because of the enriched bioactive compounds composition that contributed to improved antioxidant properties of the snacks. To summarize, based on the conducted research, chokeberry pomace supported with calcium ions beneficially affected both the physical and chemical characteristics of freeze-dried snacks, exposing its great potential for application as a functional food additive.

Author contributions Magdalena Karwacka: Conceptualization, Investigation, Formal analysis, Methodology, Resources, Data curation, Validation, Visualization, Writing—original draft, Writing—review & editing; Sabina Galus: Supervision, Writing—review & editing; Monika Janowicz: Supervision, Writing—review & editing.

Funding This research was completed utilizing equipment purchased as part of the "Food and Nutrition Centre—modernization of the WULS campus to create a Food and Nutrition Research and Development Centre (CŻiŻ)" co-financed by the European Union from the European Regional Development Fund under the Regional Operational Programme of the Mazowieckie Voivodeship for 2014–2020 [Project No. RPMA.01.01.00-14-8276/17].

Data availability Data will be available upon a reasonable request.

Declarations

Conflict of interest The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Compliance with ethics requirements Research presented in this article did not involve any human or animal subjects.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Rodrigues S, Silva LCA, Mulet A et al (2018) Development of dried probiotic apple cubes incorporated with *Lactobacillus casei* NRRL B-442. *J Funct Foods* 41:48–54. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.12.042>
- Ciurzyńska A, Lenart A, Karwosińska J (2015) Effect of quantity of low-methoxyl pectin on physical properties of freeze-dried strawberry jellies. *Pol J Food Nutr Sci* 65:233–241. <https://doi.org/10.2478/pjfn-2013-0020>
- Silva-Espinoza MA, del Mar Camacho M, Martínez-Navarrete N (2020) Use of different biopolymers as carriers for purposes of obtaining a freeze-dried orange snack. *LWT-Food Sci Technol* 127:109415. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109415>
- Ciurzyńska A, Marczak W, Lenart A, Janowicz M (2020) Production of innovative freeze-dried vegetable snack with hydrocolloids in terms of technological process and carbon footprint calculation. *Food Hydrocoll* 108:105993. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105993>
- Silva-Espinoza MA, del Mar Camacho M, Martínez-Navarrete N (2020) Effect of storage temperature on the crispness, colour and bioactive compounds of an orange snack obtained by freeze-drying. *Br Food J* 123:2095–2106. <https://doi.org/10.1108/BFJ-11-2020-1061>
- Molina-Montero C, Vicente-Jurado D, Igual M et al (2023) Fiber enrichment of 3D printed apricot gel snacks with orange by-products. *Gels* 9:569. <https://doi.org/10.3390/gels9070569>
- Silva-Espinoza MA, Salvador A, del Mar Camacho M, Martínez-Navarrete N (2021) Impact of freeze-drying conditions on the sensory perception of a freeze-dried orange snack. *J Sci Food Agric* 101:4585–4590. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11101>
- Chandel V, Biswas D, Roy S et al (2022) Current advancements in pectin: extraction, properties and multifunctional applications. *Foods* 11:2683. <https://doi.org/10.3390/foods11172683>
- Ventura I, Jammal J, Bianco-Peled H (2013) Insights into the nanostructure of low-methoxyl pectin–calcium gels. *Carbohydr Polym* 97:650–658. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.05.055>
- Nayak A, Bhushan B (2019) An overview of the recent trends on the waste valorization techniques for food wastes. *J Environ Manage* 233:352–370. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.041>
- Ciurzyńska A, Popkowicz P, Galus S, Janowicz M (2022) Innovative freeze-dried snacks with sodium alginate and fruit pomace (only apple or only chokeberry) obtained within the framework of sustainable production. *Molecules* 27:3095. <https://doi.org/10.3390/molecules27103095>
- Karwacka M, Galus S, Janowicz M (2024) The effect of apple pomace powder and calcium ions on selected physicochemical properties of freeze-dried carrot-orange-ginger snacks. *J Sci Food Agric* 104:1713–1722. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13058>
- Karwacka M, Rybak K, Smetana S et al (2022) Analysis of selected functional properties, resource demands, and energy consumption of freeze-dried vegetable snacks. *J Food Process Preserv* 46:e16721. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16721>
- Statistics Poland (2023) Production of Agricultural and Horticultural Crops in 2022
- Vagiri M, Jensen M (2017) Influence of juice processing factors on quality of black chokeberry pomace as a future resource for colour extraction. *Food Chem* 217:409–417. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.121>
- Raczkowska E, Nowicka P, Wojdyło A et al (2022) Chokeberry pomace as a component shaping the content of bioactive compounds and nutritional, health-promoting (anti-diabetic and antioxidant) and sensory properties of shortcrust pastries sweetened with sucrose and erythritol. *Antioxidants* 11:190. <https://doi.org/10.3390/antiox11020190>
- Reißner AM, Al-Hamimi S, Quiles A et al (2019) Composition and physicochemical properties of dried berry pomace. *J Sci Food Agric* 99:1284–1293. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9302>
- Diez-Sánchez E, Martínez A, Rodrigo D et al (2020) Optimizing high pressure processing parameters to produce milkshakes using chokeberry pomace. *Foods* 9:405. <https://doi.org/10.3390/foods9040405>
- Schmid V, Steck J, Mayer-Miebach E et al (2021) Extrusion processing of pure chokeberry (*Aronia melanocarpa*) pomace: impact on dietary fiber profile and bioactive compounds. *Foods* 10:518. <https://doi.org/10.3390/foods10030518>
- Krajewska A, Dziki D (2023) Enrichment of cookies with fruits and their by-products: chemical composition, antioxidant properties, and sensory changes. *Molecules* 28:4005. <https://doi.org/10.3390/molecules28104005>
- Michalska-Ciechanowska A, Hendrysiak A, Brzezowska J et al (2021) How do the different types of carrier and drying techniques affect the changes in physico-chemical properties of powders from chokeberry pomace extracts? *Foods* 10:1864. <https://doi.org/10.3390/foods10081864>
- Roda-Serrat MC, Razi Parjizolaie B, Mohammadifakhr M et al (2022) A case study for the extraction, purification, and co-pigmentation of anthocyanins from *Aronia melanocarpa* juice pomace. *Foods* 11:3875. <https://doi.org/10.3390/foods11233875>
- Wiktor A, Chądzyńska M, Rybak K et al (2022) The influence of polyols on the process kinetics and bioactive substance content

- in osmotic dehydrated organic strawberries. *Molecules* 27:1376. <https://doi.org/10.3390/molecules27041376>
24. Blahovec J (2007) Role of water content in food and product texture. *Int Agrophys* 21:209–215
 25. Fraeye I, Duvetter T, Dounghla E et al (2010) Fine-tuning the properties of pectin–calcium gels by control of pectin fine structure, gel composition and environmental conditions. *Trends Food Sci Technol* 21:219–228. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.02.001>
 26. De Moraes FP, Gonçalves AC, Veríssimo Miguel TB et al (2017) Freeze dried acerola (*Malpighia emarginata*) pulp and pomace: physicochemical attributes, phytochemical content and stability during storage. *J Food Ind* 1:17. <https://doi.org/10.5296/jfi.v1i1.11795>
 27. Nowak D, Jakubczyk E (2020) The freeze-drying of foods⇒the characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials. *Foods* 9:1488. <https://doi.org/10.3390/foods9101488>
 28. Ciurzyńska A, Pisarska A, Olsiniński I et al (2018) Effect of composition changes and aeration time on the structure and rehydration of innovative freeze-dried gels. *Int Agrophys* 32:429–435. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0017>
 29. Feng S, Bi J, Laaksonen T et al (2024) Texture of freeze-dried intact and restructured fruits: formation mechanisms and control technologies. *Trends Food Sci Technol* 143:104267. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104267>
 30. Cassanelli M, Norton I, Mills T (2018) Interaction of mannitol and sucrose with gellan gum in freeze-dried gel systems. *Food Biophys* 13:304–315. <https://doi.org/10.1007/s11483-018-9536-5>
 31. Karwacka M, Galus S, Janowicz M (2024) Development and physicochemical characteristics of multicomponent freeze-dried snacks obtained with blackcurrant pomace powder and calcium ions as structuring agents. *J Food Sci Technol*. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05906-w>
 32. Uruakpa FO (2012) Gelling behavior of plant proteins and polysaccharides in food systems. *J Food Sci Eng* 2:247–256. <https://doi.org/10.17265/2159-5828/2012.05.001>
 33. Eblaghi M, Bronlund JE, Yedro FM, Archer RH (2021) Kinetics of pectin reactions in apple pomace during hydrothermal treatment. *Food Bioprocess Technol* 14:739–750. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02603-4>
 34. Arsiccio A, Sparavigna AC, Pisano R, Barresi AA (2019) Measuring and predicting pore size distribution of freeze-dried solutions. *Drying Technol* 37:435–447. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1430042>
 35. Ciurzyńska A, Lenart A (2016) Effect of the aerated structure on selected properties of freeze-dried hydrocolloid gels. *Int Agrophys* 30:9–17. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0067>
 36. Groult S, Buwalda S, Budtova T (2021) Pectin hydrogels, aerogels, cryogels and xerogels: influence of drying on structural and release properties. *Eur Polym J* 149:110386. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110386>
 37. Różyło R, Wójcik M, Dziki D et al (2019) Freeze-dried elderberry and chokeberry as natural colorants for gluten-free wafer sheets. *Int Agrophys* 33:217–225. <https://doi.org/10.31545/intagr/109422>
 38. Cacak-Pietrzak G, Dziki D, Gawlik-Dziki U et al (2023) Wheat Bread Enriched with Black Chokeberry (*Aronia melanocarpa* L.) Pomace: Physicochemical Properties and Sensory Evaluation. *Applied Sciences* 13:6936. <https://doi.org/10.3390/app13126936>
 39. Mayer-Miebach E, Adamuk M, Behnsilian D (2012) Stability of chokeberry bioactive polyphenols during Juice Processing and stabilization of a polyphenol-rich material from the by-product. *Agriculture* 2:244–258. <https://doi.org/10.3390/agriculture2030244>
 40. Cortez R, Luna-Vital DA, Margulis D, Gonzalez de Mejia E (2017) Natural pigments: stabilization methods of anthocyanins for food applications. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 16:180–198. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12244>
 41. Andrade TA, Hamerski F, López Fetzter DE et al (2021) Ultrasound-assisted pressurized liquid extraction of anthocyanins from *Aronia melanocarpa* pomace. *Sep Purif Technol* 276:119290. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119290>
 42. Drożdż W, Boruckowska H, Boruckowski T et al (2019) Use of blackcurrant and chokeberry press residue in snack products. *Pol J Chem Technol* 21:13–19. <https://doi.org/10.2478/pjct-2019-0003>
 43. Petković M, Filipović V, Filipović J et al (2021) Chemical, anti-oxidative, and sensory characteristics of wheat bread partially substituted with black chokeberry (*Aronia melanocarpa* L.) powder. *J Food Process Preserv* 45:e15027. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15027>
 44. Gao N, Sun X, Li D et al (2020) Optimization of anthocyanidins conversion using chokeberry pomace rich in polymeric proanthocyanidins and cellular antioxidant activity analysis. *LWT* 133:109889. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109889>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Warszawa, 29 sierpnia 2024 r.

Magdalena Karwacka
magdalena_karwacka@sggw.edu.pl

**Rada Dyscypliny Technologia
Żywności i Żywienia**

**Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2022). Effect of structure and texture forming additives on properties of freeze-dried snacks—review®. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, 1*, 130-141. mój indywidualny udział w jej powstaniu był znaczący i polegał na współudziale podczas opracowywania koncepcji, wykonaniu przeglądu literatury, analizie zebranych danych, przygotowaniu i edycji manuskryptu oraz odpowiedzi na recenzje. Ponadto pełniłam rolę autora korespondencyjnego.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Rybak K., Smetana S., Galus S., Janowicz M. (2022). Analysis of selected functional properties, resource demands, and energy consumption of freeze-dried vegetable snacks. *Journal of Food Processing and Preservation, 46*(7), e16721. mój indywidualny udział w jej powstaniu był znaczący i polegał na współudziale podczas opracowywania koncepcji, planowaniu i wykonaniu części doświadczalnej, analizie zebranych danych, przygotowaniu i edycji manuskryptu oraz odpowiedzi na recenzje. Ponadto pełniłam rolę autora korespondencyjnego.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Rybak K., Świeca M., Galus S., Janowicz M. (2022). The Effect of the Addition of Selected Fruit Pomace Powders and Pectin as Carrier Agents on the Nutritional Value of Freeze-Dried Snacks. *Sustainability, 14*(20), 13012. mój indywidualny udział w jej powstaniu był znaczący i polegał na współudziale podczas opracowywania koncepcji, planowaniu i wykonaniu części doświadczalnej, analizie zebranych danych, przygotowaniu i edycji manuskryptu oraz odpowiedzi na recenzje. Ponadto pełniłam rolę autora korespondencyjnego.

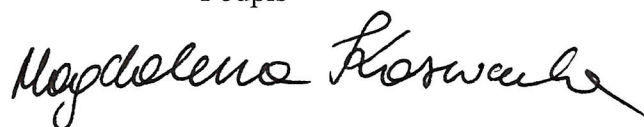
Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Ciurzyńska A., Galus S., Janowicz M. (2024). The Effect of Storage Time and Temperature on Quality Changes in Freeze-Dried Snacks Obtained with Fruit Pomace and Pectin Powders as a Sustainable Approach for New Product Development. *Sustainability, 16*(11), 4736. mój indywidualny udział w jej powstaniu był znaczący i polegał na współudziale podczas opracowywania koncepcji, planowaniu i wykonaniu części doświadczalnej, analizie zebranych danych, przygotowaniu i edycji manuskryptu oraz odpowiedzi na recenzje. Ponadto pełniłam rolę autora korespondencyjnego.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2024). The effect of apple pomace powder and calcium ions on selected physicochemical properties of freeze-dried carrot-orange-ginger snacks. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(3), 1713-1722. mój indywidualny udział w jej powstaniu był znaczący i polegał na współudziale podczas opracowywania koncepcji, planowaniu i wykonaniu części doświadczalnej, analizie zebranych danych, przygotowaniu i edycji manuskryptu oraz odpowiedzi na recenzje. Ponadto pełniłam rolę autora korespondencyjnego.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2024). Development and physicochemical characteristics of multicomponent freeze-dried snacks obtained with blackcurrant pomace powder and calcium ions as structuring agents. *Journal of Food Science and Technology*, 61(7), 1363-1373. mój indywidualny udział w jej powstaniu był znaczący i polegał na współudziale podczas opracowywania koncepcji, planowaniu i wykonaniu części doświadczalnej, analizie zebranych danych, przygotowaniu i edycji manuskryptu oraz odpowiedzi na recenzje. Ponadto pełniłam rolę autora korespondencyjnego.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2024). Application of chokeberry pomace as pectin substitute in nonconventional freeze-dried snacks: physicochemical characteristics of the products. *European Food Research and Technology*, 1-13. mój indywidualny udział w jej powstaniu był znaczący i polegał na współudziale podczas opracowywania koncepcji, planowaniu i wykonaniu części doświadczalnej, analizie zebranych danych, przygotowaniu i edycji manuskryptu oraz odpowiedzi na recenzje. Ponadto pełniłam rolę autora korespondencyjnego.

Podpis

A handwritten signature in black ink, reading "Magdalena Karwacka". The signature is written in a cursive, flowing style with a long horizontal stroke at the end.

Warszawa, 29 sierpnia 2024 r.

Monika Janowicz
monika_janowicz@sggw.edu.pl

**Rada Dyscypliny Technologia
Żywności i Żywienia**

**Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2022). Effect of structure and texture forming additives on properties of freeze-dried snacks–review®. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 130-141. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współudziale podczas opracowywania koncepcji oraz edycji i analizie merytorycznej manuskryptu.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Rybak K., Smetana S., Galus S., Janowicz M. (2022). Analysis of selected functional properties, resource demands, and energy consumption of freeze-dried vegetable snacks. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(7), e16721. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współudziale podczas opracowywania koncepcji, interpretacji wyników oraz edycji i analizie merytorycznej manuskryptu.

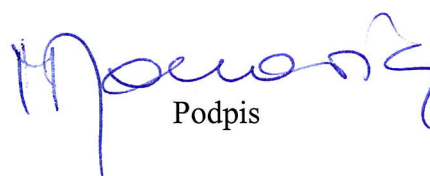
Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Rybak K., Świeca M., Galus S., Janowicz M. (2022). The Effect of the Addition of Selected Fruit Pomace Powders and Pectin as Carrier Agents on the Nutritional Value of Freeze-Dried Snacks. *Sustainability*, 14(20), 13012. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współudziale podczas opracowywania koncepcji, interpretacji wyników oraz edycji i analizie merytorycznej manuskryptu.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Ciurzyńska A., Galus S., Janowicz M. (2024). The Effect of Storage Time and Temperature on Quality Changes in Freeze-Dried Snacks Obtained with Fruit Pomace and Pectin Powders as a Sustainable Approach for New Product Development. *Sustainability*, 16(11), 4736. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współudziale podczas opracowywania koncepcji, interpretacji wyników oraz edycji i analizie merytorycznej manuskryptu.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2024). The effect of apple pomace powder and calcium ions on selected physicochemical properties of freeze-dried carrot-orange-ginger snacks. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(3), 1713-1722. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współudziale w przygotowaniu koncepcji, interpretacji wyników oraz edycji i analizie merytorycznej manuskryptu.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2024). Development and physicochemical characteristics of multicomponent freeze-dried snacks obtained with blackcurrant pomace powder and calcium ions as structuring agents. *Journal of Food Science and Technology*, 61(7), 1363-1373. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współudziale podczas opracowywania koncepcji, interpretacji wyników oraz edycji i analizie merytorycznej manuskryptu.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2024). Application of chokeberry pomace as pectin substitute in nonconventional freeze-dried snacks: physicochemical characteristics of the products. *European Food Research and Technology*, 1-13. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współudziale podczas opracowywania koncepcji, interpretacji wyników oraz edycji i analizie merytorycznej manuskryptu.



Podpis

Warszawa, 29 sierpnia 2024 r.

Sabina Galus
sabina_galus@sggw.edu.pl

**Rada Dyscypliny Technologia
Żywności i Żywienia**

**Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2022). Effect of structure and texture forming additives on properties of freeze-dried snacks–review®. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 130-141. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współudziale podczas opracowywania koncepcji oraz edycji i analizie merytorycznej manuskryptu.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Rybak K., Smetana S., Galus S., Janowicz M. (2022). Analysis of selected functional properties, resource demands, and energy consumption of freeze-dried vegetable snacks. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(7), e16721. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na pomocy przy interpretacji wyników oraz edycji i analizie merytorycznej manuskryptu.

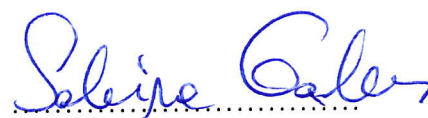
Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Rybak K., Świeca M., Galus S., Janowicz M. (2022). The Effect of the Addition of Selected Fruit Pomace Powders and Pectin as Carrier Agents on the Nutritional Value of Freeze-Dried Snacks. *Sustainability*, 14(20), 13012. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na pomocy przy interpretacji wyników oraz edycji i analizie merytorycznej manuskryptu.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Ciurzyńska A., Galus S., Janowicz M. (2024). The Effect of Storage Time and Temperature on Quality Changes in Freeze-Dried Snacks Obtained with Fruit Pomace and Pectin Powders as a Sustainable Approach for New Product Development. *Sustainability*, 16(11), 4736. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na pomocy przy interpretacji wyników oraz edycji i analizie merytorycznej manuskryptu.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2024). The effect of apple pomace powder and calcium ions on selected physicochemical properties of freeze-dried carrot-orange-ginger snacks. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(3), 1713-1722. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na pomocy przy interpretacji wyników oraz edycji i analizie merytorycznej manuskryptu.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2024). Development and physicochemical characteristics of multicomponent freeze-dried snacks obtained with blackcurrant pomace powder and calcium ions as structuring agents. *Journal of Food Science and Technology*, 61(7), 1363-1373. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na pomocy przy interpretacji wyników oraz edycji i analizie merytorycznej manuskryptu.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Galus S., & Janowicz M. (2024). Application of chokeberry pomace as pectin substitute in nonconventional freeze-dried snacks: physicochemical characteristics of the products. *European Food Research and Technology*, 1-13. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na pomocy przy interpretacji wyników oraz edycji i analizie merytorycznej manuskryptu.



Warszawa, 29 sierpnia 2024 r.

Katarzyna Rybak
katarzyna_rybak@sggw.edu.pl

**Rada Dyscypliny Technologia
Żywności i Żywienia**

**Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Rybak K., Smetana S., Galus S., Janowicz M. (2022). Analysis of selected functional properties, resource demands, and energy consumption of freeze-dried vegetable snacks. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(7), e16721 mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na wykonaniu analizy mikrostruktury metodą tomografii komputerowej.

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Rybak K., Świeca M., Galus S., Janowicz M. (2022). The Effect of the Addition of Selected Fruit Pomace Powders and Pectin as Carrier Agents on the Nutritional Value of Freeze-Dried Snacks. *Sustainability*, 14(20), 13012 mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na wykonaniu analizy zawartości cukrów metodą wysokosprawnej chromatografii cieczowej oraz oznaczeniu zawartości błonnika pokarmowego.

Podpis

Katarzyna Rybak

August 30th, 2024

Sergiy Smetana
DIL e.V., German Institute of Food Technologies
Prof-von-Klitzing Str. 7
Quakenbrück
Germany
s.smetana@dil-ev.de

**The Discipline Council
of the Food and Nutrition Technology
SGGW - Warsaw University of
Life Sciences**

Declaration of Co-authorship

I hereby declare that my individual contribution in the preparation of the dissertation Karwacka M., Rybak K., Smetana S., Galus S., Janowicz M. (2022). Analysis of selected functional properties, resource demands, and energy consumption of freeze-dried vegetable snacks. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(7), e16721 included consulting of the interpretation of energy consumption and resource demands results.

A handwritten signature in black ink, enclosed within a large, loopy oval shape. The signature appears to be 'S. Smetana'.

Prof. Dr. Sergiy Smetana

Warszawa, 29 sierpnia 2024 r.

Michał Świeca
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
michal.swieca@up.lublin.pl

**Rada Dyscypliny Technologia
Żywności i Żywienia**

**Szkoły Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Rybak K., Świeca M., Galus S., Janowicz M. (2022). The Effect of the Addition of Selected Fruit Pomace Powders and Pectin as Carrier Agents on the Nutritional Value of Freeze-Dried Snacks. *Sustainability*, 14(20), 13012 mój indywidualny udział polegał na oznaczeniu zawartości polifenoli i związków bioaktywnych, ich biodostępności *in vitro*, opisanie i interpretacji otrzymanych wyników oraz edycji finalnej wersji manuskryptu.



Signed by /
Podpisano przez:

Michał Świeca
Uniwersytet
Przyrodniczy w
Lublinie

Date / Data: 2024-
08-29 11:14

Prof. dr hab. Michał Świeca

Warszawa, 29 sierpnia 2024 r.

Agnieszka Ciurzyńska
agnieszka_ciurzynska@sggw.edu.pl

**Rada Dyscypliny Technologia
Żywności i Żywienia
Szkoly Głównej Gospodarstwa
Wiejskiego w Warszawie**

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Karwacka M., Ciurzyńska A., Galus S., Janowicz M. (2024). The Effect of Storage Time and Temperature on Quality Changes in Freeze-Dried Snacks Obtained with Fruit Pomace and Pectin Powders as a Sustainable Approach for New Product Development. *Sustainability*, 16(11), 4736. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na pomocy przy interpretacji otrzymanych wyników oraz przygotowywaniu ostatecznej wersji manuskryptu.


Podpis