



Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu

mgr Agata Daria Jankowska

**Ocena możliwości wykorzystania wybranych warzyw
jako matrycy dla soli jodu.**

Assessment of the possibility of using selected vegetables
as a matrix for iodine salts.

Rozprawa doktorska w dziedzinie nauk rolniczych
w dyscyplinie Technologia żywności i żywienia
Doctoral dissertation in the field of Agricultural sciences
in the discipline of Nutrition and food technology

Promotor:

prof. UPP dr hab. Krystyna
Szymandera-Buszka

Katedra Technologii Gastronomicznej i
Żywności Funkcjonalnej

Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Poznań, 2024

Podziękowania

Szczególne podziękowania pragnę złożyć Pani promotor mojej pracy doktorskiej

Pani prof. UPP dr hab. Krystynie Szynderze-Buszka

nie tylko za nieocenioną pomoc merytoryczną, ale przede wszystkim za ogromne wsparcie oraz postawę pełną życzliwości i zrozumienia przez cały okres realizacji pracy doktorskiej.

Dziękuję również

pracownikom Katedry Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej

za okazaną życzliwość i wszelką pomoc.

Spis treści

Wykaz artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej.....	7
Wykaz skrótów stosowanych w autoreferacie	9
Streszczenie w języku polskim	11
Streszczenie w języku angielskim.....	12
Autoreferat	14
1. Wstęp.....	14
1.1. Uzasadnienie i charakterystyka problemu badawczego.....	14
1.1.1. Funkcje jodu w organizmie – skutki nadmiernego i niedostatecznego spożycia.....	14
1.1.2. Charakterystyka pierwiastka i jego źródła	16
1.1.3. Profilaktyka jodowa	18
1.1.4. Oryginalność pracy i możliwe zastosowania praktyczne.....	22
1.2. Cel badań.....	24
1.3. Hipotezy badawcze	25
2. Materiał i metody badawcze	26
2.1. Materiał badawczy	26
2.2. Model badań.....	27
2.3. Metody badawcze.....	28
3. Wyniki badań i ich interpretacja	30
3.1. Wpływ diety wegańskiej na pokrycie zalecanego dziennego spożycia (RDA) jodu wśród Polaków – wybór grupy docelowych konsumentów. (A1).....	30
3.2. Wybór warzyw mogących stanowić matryce dla soli jodu w profilaktyce jodowej – preferencje grupy docelowej (opracowanie własne).....	37
3.3. Wybór optymalnych warunków impregnacji roślinnych matryc solami jodu. (A2).....	42
3.4. Właściwości przeciwutleniające wybranych warzyw fortifikowanych jodem w postaci jodku potasu lub jodanu potasu. (A3 – A6)	50
3.5. Ocena wybranych wskaźników wartości odżywczej wegańskich produktów zbożowych z dodatkiem fortifikowanych w jod suszy warzywnych. (A7 i dane niepublikowane)	61
4. Podsumowanie	91
Spis literatury cytowanej w autoreferacie	94
Opublikowane prace wchodzące w skład rozprawy doktorskiej.....	109
Oświadczenia doktoranta oraz współautorów dotyczące ich wkładu w przygotowanie opublikowanych artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej	11199

Wykaz artykułów naukowych wchodzących w skład rozprawy doktorskiej

A1. Zaremba A., Gramza-Michałowska, A., Pal, K., Szymandera-Buszk, K. (2023): The Effect of a Vegan Diet on the Coverage of the Recommended Dietary Allowance (RDA) for Iodine among People from Poland. *Nutrients* 15, 1163.

<https://doi.org/10.3390/nu15051163>

IF (2023): 4,8

Punkty MNiSW:140

A2. Zaremba A., Waszkowiak K., Kmiecik D., Jędrusek-Golińska A., Jarzębski M., Szymandera-Buszk K. (2022): Selection of Optimal Impregnation Conditions of Vegetable Matrices With Iodine. *Molecules* 27, 3351.

<https://doi.org/10.3390/molecules27103351>

IF (2022): 4,6

Punkty MNiSW:140

A3. Zaremba A., Hęś M., Jędrusek-Golińska A., Przeor M., Szymandera-Buszk K. (2023): The antioxidant properties of selected varieties of pumpkin fortified with iodine in the form of potassium iodide and potassium iodate. *Foods* 12 (14): 2792

<https://doi.org/10.3390/foods12142792>

IF (2023): 4,7

Punkty MNiSW: 140

A4. Jankowska A., Kobus-Cisowska J., Szymandera-Buszk K. (2023): Antioxidant properties of beetroot fortified with iodine. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 68 (2): 10-15

<https://doi.org/10.53502/TXIY9852>

Punkty MNiSW: 70

A5. Szymandera-Buszk K., Jankowska A., Hęś M., Jędrusek- Golińska A. (2023): Właściwości przeciwutleniające brokułów fortyfikowanych jodem w postaci jodku potasu lub jodanu (V) potasu. *Żywność jako wyzwanie dla współczesnej nauki i przemysłu*: 317-329, Kraków

A6. Jankowska A., Szymandera-Buszk K. (2024): The effect of iodine fortification on – the antioxidant activity of carrots and cauliflower. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 23(3), 371–378.

<http://doi.org/10.17306/J.AFS.001254>

IF (2024): 1,3

Punkty MNiSW: 40

A7. Zaremba A., Cichoń N., Szymandera-Buszk K. (2023): Projekt produktu pochodzenia roślinnego wzbogaconego burakiem fortyfikowanym jodem. Monografia pokonferencyjna XXVI Sesji Naukowej Sekcji Młodej Kadry Naukowej 22-36.

<https://doi.org/10.17306/m.978-83-67112-29-1>

Punkty MNiSW: 20

Suma IF*: 15,4

Suma punktów MNiSW*: 550

*Punktacja zgodna z rankingami obowiązującymi w roku wydania publikacji.

Wykaz skrótów stosowanych w autoreferacie

AI	Wystarczające spożycie (eng. Adequate Intake)
IDD	Zespół Objawów z Niedoboru Jodu (eng. Iodine Deficiency Disorder)
KI	Jodek potasu
KIO ₃	Jodan potasu
NIS	Symporter sodowo-jodowy
PMTDI	Tymczasowego Maksymalnego Tolerowanego Dziennego Pobrania
RDA	Zalecane Dzienne Spożycie (eng. Recommended Daily Allowance)
TG	Tyreoglobulina
TPO	Ludzka peroksydaza tarczycowa
UIC	Stężenie jodu w moczu (eng. Urinary Iodine Concentration).
WHO	Światowa Organizacja Zdrowia (eng. World Health Organization)

Streszczenie w języku polskim

Celem pracy była ocena możliwości zastosowania wybranych warzyw jako matrycy dla soli jodu oraz ustalenie schematów metod fortyfikacji w celu maksymalizacji skuteczności nanoszenia jodu.

W wyniku badań ankietowych stwierdzono, że weganie stanowią grupę szczególnie narażoną na niedobór jodu, ze względu na niskie spożycie soli jodowanej i restrykcje żywieniowe eliminujące z diety najważniejsze, odzwierzęce źródła jodu. Ustalono, że dieta wegan wymaga wzbogacenia w jod, w celu zapewnienia pokrycia zalecanego dziennego spożycia tego pierwiastka.

Do dalszych badań wytypowano najczęściej spożywane przez wegan warzywa: dynia, brokuł, kalafior, burak oraz marchew. Warzywa impregnowano jodem przy wykorzystaniu jodku (KI) oraz jodanu potasu (KIO_3), które są standardowo stosowane do wzbogacania soli kuchennej. Stwierdzono, że forma nanoszonego jodu (KI/ KIO_3) wpływała na jego stabilność podczas procesu impregnacji, jak i późniejszego przechowywania uzyskanych suszy warzywnych. Jodan potasu (KIO_3) charakteryzował się wyższą stabilnością względem jodku potasu (KI). Zmienne warunki impregnacji jodem (stopień uwodnienia, temperatura i czas procesu) badanych warzyw wpływały na odtwarzalność naniesionego na nie jodu. Wyznaczono najbardziej korzystne warunki impregnacji jodem badanych preparatów tj. temp. impregnacji -76°C , stopień uwodnienia 1:1 (m/v), a także najmniej korzystne warunki: temp. 4°C , czas namaczania 6h przy uwodnieniu 1:4 (m/v). Ponadto potwierdzono, że aktywność antyoksydacyjna oparta na $\text{ABTS}^{+\bullet}$ i $\text{DPPH}^\bullet$ była związana z wysokością stężenia jodu (0,023 – 2,3 mg/100 g) w układzie. Potwierdzono statystycznie istotnie niższe wskaźniki zdolności do wychwytywania wolnych rodników ($\text{ABTS}^{+\bullet}$ i $\text{DPPH}^\bullet$) w układach zawierających jod w formie KIO_3 na poziomie 2,3 mg/100 g produktu.

Zaprojektowano bułki typu Ciabatta i kluski typu Gnocchi z dodatkiem suszy warzywnych fortyfikowanych jodem (KI i KIO_3), a w wyniku analiz stwierdzono, że stabilność jodu, tiaminy oraz wskaźników przeciwutleniających ($\text{ABTS}^{+\bullet}$ i $\text{DPPH}^\bullet$) była wyższa w porównaniu do wzbogaconych w jod przy zastosowaniu soli jodowanej. Analiza pokrycia zalecanego dziennego spożycia (RDA) jodu wykazała, że zaprojektowane produkty zbożowe mogą stanowić dobre źródło jodu w diecie i mogą być stosowane jako element profilaktyki IDD.

Słowa kluczowe: jod, warzywa, wzbogacanie żywności, profilaktyka jodowa, produkty zbożowe

Streszczenie w języku angielskim

The study aimed to assess the possibility of using selected vegetables as matrices for iodine salts and establish schemes of fortification methods to maximize the efficiency of iodine application.

As a result of the survey, it was found that vegans are a group particularly vulnerable to iodine deficiency, due to the low consumption of iodized salt and dietary restrictions eliminating the most important, animal sources of iodine from the diet. It was determined that the vegan diet requires enrichment with iodine to ensure coverage of the recommended daily intake of this element.

Vegans' most commonly consumed vegetables were selected for further studies: pumpkin, broccoli, cauliflower, beetroot and carrot. The vegetables were impregnated with iodine using iodide (KI) and potassium iodate (KIO₃), which are standardly used to enrich table salt. It was found that the form of iodine applied (KI/KIO₃) affected its stability during the impregnation process and subsequent storage of the obtained dried vegetables. Potassium iodate (KIO₃) was more stable than potassium iodide (KI). Variable conditions of iodine impregnation (degree of hydration, temperature and process time) of the tested vegetables affected the reproducibility of iodine applied to them. The most favourable conditions of iodine impregnation of the tested preparations were determined, i.e. impregnation temperature –76°C, hydration degree 1:1 (m/v), as well as the least favourable conditions: temperature 4°C, soaking time 6 h at hydration 1:4 (m/v). Moreover, it was confirmed that the antioxidant activity based on ABTS⁺ and DPPH was related to the level of iodine concentration (0.023 – 2.3 mg/100 g) in the system. Statistically significantly lower indices of the ability to capture free radicals (ABTS⁺⁺ and DPPH^{*}) were confirmed in the systems containing iodine in the form of KIO₃ at the level of 2.3 mg/100 g of the product.

Ciabatta rolls and Gnocchi dumplings were designed with the addition of dried vegetables fortified with iodine (KI and KIO₃). The analyses showed that the stability of iodine, thiamine and antioxidant indices (ABTS⁺⁺ and DPPH^{*}) was higher compared to those enriched with iodine using iodized salt. The analysis of the coverage of the recommended daily allowance (RDA) of iodine showed that the designed cereal products can be a good source of iodine in the diet and can be used as an element of IDD prevention.

Key words: iodine, vegetables, food fortification, iodine prophylaxis, cereal products

Autoreferat

1. Wstęp

1.1. Uzasadnienie i charakterystyka problemu badawczego

1.1.1. Funkcje jodu w organizmie – skutki nadmiernego i niedostatecznego spożycia

Jod jest pierwiastkiem niezbędnym do prawidłowego funkcjonowania organizmu człowieka. Bierze udział w produkcji hormonów tarczycy – tyroksyny (T4) i trójjodotyroniny (T3), które są kluczowe dla prawidłowego wzrostu i rozwoju organizmu, w tym oddziałują na wzrost i różnicowanie komórek, a także rozwój mózgu w okresie płodowym i wczesnego dzieciństwa. Ponad to, wpływają na metabolizm białek, tłuszczów i węglowodanów, metabolizm energetyczny, podstawową przemianę materii oraz funkcjonowanie wielu narządów tj. mózgu, nerki, wątroba czy mięśnie (Bertinato, 2021; Hatch-McChesney, Lieberman, 2022). Jod powinien być dostarczany codziennie, ponieważ organizm nie kumuluje go w dużych ilościach, a dodatkowo tylko 10% tego pierwiastka jest wychwytywane przez tarczycę z przewodu pokarmowego (Sorrenti i in., 2021). Tabela 1 przedstawia wartości zalecanego dziennego spożycia (RDA) jodu dla poszczególnych grup wiekowych.

Tabela 1. Zalecane dzienne spożycie (RDA) jodu według grup wiekowych. (Jarosz i in., 2020)

Grupa wiekowa	Jod (µg/dobę)
Niemowlęta 0-6 miesięcy	110 (AI)
Niemowlęta 7-11 miesięcy	130 (AI)
Dzieci 1-6 lat	90
Dzieci 7-9 lat	100
Dzieci 10-12 lat	120
Dzieci 13-18 lat	150
Dorośli	150
Kobiety w ciąży	220
Kobiety karmiące piersią	290

Biorąc pod uwagę istotność i zakres wpływu hormonów tarczycy na organizm ludzki, zarówno niedobór jak i nadmiar jodu mają poważne konsekwencje zdrowotne.

Nadmierne spożycie jodu zdarza się rzadko i zazwyczaj jest wynikiem nieumiejętnie prowadzonej suplementacji. Znane są także przypadki nadmiernej konsumpcji ze źródeł

naturalnych, głównie dużych ilości alg morskich, które charakteryzują się bardzo zróżnicowaną zawartością jodu (Blikra i in., 2022). Nadmierne spożycie jodu u zdrowych dorosłych, w populacjach azjatyckich, zostało powiązane z wysokim spożyciem alg brunatnych (*Ascophyllum nodosum*). Potwierdzono jednocześnie silną dysfunkcję tarczycy w tej grupie (Konno i in., 1994; Miyai i in., 2008). Nadmierna ekspozycja na jod przez dłuższy czas może prowadzić do nadczynności tarczycy, autoimmunologicznej choroby tarczycy lub raka brodawkowatego – rodzaju raka tarczycy (Bertinato, 2021; Hatch-McChesney, Lieberman, 2022; Krela-Kaźmierczak i in., 2021).

Nadmierne spożycie jodu może doprowadzić również do niedoczynności tarczycy (Markou i in., 2001). Zjawisko to jest związane z tzw. efektem Wolfa-Chaikoffa, które jest mechanizmem obronnym organizmu. Polega ono na tymczasowym zmniejszeniu tempa produkcji hormonów tarczycy w odpowiedzi na wysokie dawki jodu, zapobiegając nadczynności tarczycy. Mechanizm ten ustępuje samoistnie po kilku dniach do kilku tygodni, co nazywane jest ucieczką od efektu Wolfa-Chaikoffa, a prawidłowa czynność tarczycy zostaje przywrócona. W niektórych przypadkach, np. przy wysokim narażeniu na jod przez długi czas, wysokim stresie lub chorobach tarczycy, ucieczka od efektu Wolfa-Chaikoffa jest niemożliwa, tarczyca nie wraca do prawidłowego funkcjonowania, co skutkuje rozwinięciem się klinicznej lub subklinicznej niedoczynności tego organu (Campos i in., 2023; Markou i in., 2001). Jod przyjmowany w bardzo dużych dawkach (kilka gramów) może być toksyczny i powodować objawy zatrucia, takie jak pieczenie gardła, jamy ustnej i żołądka, nudności, biegunka, gorączka, nieregularne bicie serca, a nawet śpiączka (Bertinato, 2021).

Znacznie częściej spotykany jest niedobór jodu w diecie, którego konsekwencje dotyczą każdej grupy wiekowej i zostały zdefiniowane jako Zespół Objawów z Niedoboru Jodu (eng. Iodine Deficiency Disorder – IDD). Wśród skutków tego niedoboru spotykanych u osób dorosłych wymienia się niedoczynność tarczycy, wole tarczycowe, opóźnienie funkcji poznawczych, zmniejszoną wydajność pracy czy niepłodność. U osób starszych, oprócz wymienionych wcześniej skutków, potwierdza się zwiększone ryzyko zachorowań na wole wieloguzkowe, autonomicznie funkcjonujący guzek tarczycy i nadczynność tarczycy (Hatch-McChesney, Lieberman, 2022; Krela-Kaźmierczak i in., 2021; Lisco i in., 2023). Ponadto, łagodny i umiarkowany niedobór jodu jest powiązany z zaburzeniami funkcji układu odpornościowego (Mathiapparanam i in., 2022). Wykazano, że leukocyty oraz transportery jodu (NIS - symporter sodowo-jodowy, PENDRIN) i białka powiązane z funkcjami tarczycy (TG - tyreoglobulina, TPO - ludzka peroksydaza tarczycowa) mogą wzajemnie na siebie oddziaływać (Bilal i in., 2017). Niedobór jodu jest szczególnie niebezpieczny w przypadku kobiet w ciąży,

gdyż oddziałuje nie tylko na matkę, ale również na rozwijający się płód. U kobiet ciężarnych, oprócz objawów typowych dla osób dorosłych, niedobór jodu może skutkować poronieniami oraz martwymi urodzeniami. Z kolei u płodu istnieje zwiększone ryzyko wrodzonych wad rozwojowych i kretynizmu, a także odnotowuje się większą śmiertelność okołoporodową. U noworodków ze stwierdzonym niedoborem jodu obserwuje się niedoczynność tarczycy, wole i upośledzenie funkcji intelektualnych, a u starszych dzieci dodatkowo zwiększa się ryzyko upośledzenia funkcji poznawczych i opóźnienia rozwoju fizycznego (Granfors i in., 2015; Lisco i in., 2023; Mayunga i in., 2022; Niwattisaiwong i in., 2017; Wang i in., 2022; Xing i in., 2021). W kontekście zdrowia publicznego, jednym z poważniejszych długoterminowych skutków niedoboru jodu jest obniżenie poziomu intelektualnego. Badanie przeprowadzone za pomocą kwestionariusza pomiaru inteligencji Wechsler Intelligence Scale for Children na grupie dzieci w wieku szkolnym (7-11 lat) wykazało, że dzieci u których stwierdzono umiarkowany niedobór jodu (UIC 20–49 $\mu\text{g/l}$) uzyskiwały gorsze wyniki o średnio 15 punktów IQ w porównaniu z grupą o odpowiednim spożyciu jodu (UIC 100–199 $\mu\text{g/l}$). Różnice wykazano nie tylko w teście ogólnym, ale także w testach werbalnego i wykonawczego IQ, gdzie dzieci z grupy o umiarkowanym niedoborze jodu wypadały gorzej niż dzieci o odpowiedniej podaży tego pierwiastka (Bailote i in., 2022). W związku z powyższym, kobiety w wieku rozrodczym, w ciąży i karmiące oraz dzieci w wieku szkolnym uważa się za grupy ryzyka niedoboru jodu (Krela-Kaźmierczak i in., 2021; Mathiapparanam i in., 2022).

Do określania stanu odżywienia populacji jodem najczęściej stosuje się pomiar stężenia jodu w moczu (UIC). Jest to powszechnie przyjęty, opłacalny i prosty wskaźnik, rekomendowany przez WHO (Hays i in., 2018; World Health Organization, 2014).

1.1.2. Charakterystyka pierwiastka i jego źródła

Jod (I) jest pierwiastkiem chemicznym z grupy halogenów o masie atomowej 53, występującym w naturze jako jodek (Winder i in., 2022). Występuje w postaci wolnej (nieorganicznej) oraz w postaci związków organicznych. Jod jest dobrze rozpuszczalny w wodzie, dlatego jego głównym rezerwuarem są zbiorniki wodne oraz opady atmosferyczne (Jones i in., 2023). W efekcie rozmieszczenie tego pierwiastka w środowisku jest nierównomierne. Jego ilość w ekosystemie zależy głównie od zawartości w glebie oraz od bliskości oceanów i mórz. Stąd największe ilości jodu odnotowuje się na terenach nadmorskich, natomiast najmniejsze na obszarach górskich i polodowcowych (M. Zimmermann, Trumbo, 2013).

Głównymi źródłami jodu w diecie są produkty pochodzenia zwierzęcego, przy czym największą zawartością tego pierwiastka charakteryzują się ryby morskie i owoce morza (Nicol i in., 2024). Ze względu na wysokie spożycie, dobrym źródłem jodu są jaja, mleko i produkty mleczne (Brzóska i in., 2009; Nedić, 2023; Roseland i in., 2020; van der Reijden i in., 2017; Witard i in., 2022). Należy jednak pamiętać, że zawartość jodu w mleku jest zmienna. Zależy ona od regionu karmienia zwierząt, stosowanych praktyk rolniczych związanych z metodami sanitarnymi czy suplementacją (Brzóska i in., 2015; Miklaš i in., 2021; Roseland i in., 2020; Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) NR 1169/2011 w Sprawie Przekazywania Konsumentom Informacji Na Temat Żywności, 2011; Schöne i in., 2017; Śliwiński i in., 2015; Tattersall i in., 2024). Zawartość jodu w mleku związana jest także z porą roku. W miesiącach letnich stężenie jodu w mleku jest znacznie niższe niż zimą. Niższą zawartością jodu charakteryzuje się mięso zwierząt rzeźnych (Gostas i in., 2020; Haldimann i in., 2005; Herzig i in., 2007; Nicol i in., 2024).

Produkty roślinne stanowią zdecydowanie mniej znaczące źródło jodu w diecie większości populacji (Alzahrani i in., 2023; Nicol i in., 2024). Podstawowym roślinnym źródłem jodu mogą być algi, ponieważ zawartość tego pierwiastka jest w nich wysoka (Hatch-McChesney, Lieberman, 2022). Liczne badania potwierdzają, że najwyższe spożycie jodu związane jest z regularnym spożywaniem wodorostów (Blikra i in., 2022; Yeliosof, Silverman, 2018). Należy jednak zwrócić uwagę, że wodorosty nie są zwyczajowo spożywane w diecie zachodniej, chociaż ich popularność rośnie, zwłaszcza wśród młodych osób (Wendin, Undeland, 2020; Young i in., 2022). Ponadto możliwości wzbogacania żywności w algi są ograniczone ze względu na restrykcje prawne (Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries, n.d.; Lähteenmäki-Uutela i in., 2021; Leandro i in., 2020). Zawartość jodu w warzywach i owocach jest niewielka i ściśle związana z jego zawartością w glebie. Z tego powodu koncentracja jodu w tych samych produktach z różnych regionów może się znacząco różnić (Krela-Kaźmierczak i in., 2021; Pehrsson i in., 2022). Dlatego analogi produktów mlecznych i mięsnych, które cieszą się coraz większą popularnością (Zaremba i in., 2023), są naturalnie ubogie w jod. Nie można zatem uznać ich za równoważne odżywczo pod względem zawartości jodu (Nicol i in., 2024).

Mając na uwadze jakie produkty są uznawane za źródła jodu w diecie, osoby ograniczające spożycie produktów odzwierzęcych mogą być narażone na zbyt niskie pokrycie zapotrzebowania na jod z diety (Eveleigh i in., 2023).

1.1.3. Profilaktyka jodowa

Ze względu na wyżej wymienioną nierównomierność rozmieszczenia w środowisku i zmienną zawartość jodu w produktach spożywczych, niedostateczne spożycie tego pierwiastka jest bardzo powszechne. Szacuje się, że problem ten dotyczy około 2 miliardów ludzi w 118 krajach na świecie, w tym w Polsce (Lisco i in., 2023; M. B. Zimmermann, 2023). Biorąc pod uwagę globalny zasięg problemu, a także poważne konsekwencje zdrowotne niedoboru jodu, Światowa Organizacja Zdrowia, na podstawie konsultacji z ekspertami m.in. z Międzynarodowej Rady ds. Kontroli Zaburzeń Niedoboru Jodu, opublikowała przewodnik, w którym zaproponowała programy profilaktyki jodowej. Przewodnik miał pomóc władzom krajowym w planowaniu profilaktyki jodowej i monitorowaniu jej skutków. Najbardziej promowaną metodą zawartą w tej publikacji było jodowanie soli kuchennej jodkiem lub jodanem potasu (Santos i in., 2019; World Health Organization, 2004; M. B. Zimmermann, 2023; M. B. Zimmermann, Andersson, 2021). Związki te zostały uznane w 1991 r. przez Wspólny Komitet Ekspertów FAO/WHO ds. Dodatków do Żywności za bezpieczne poniżej poziomu Tymczasowego Maksymalnego Tolerowanego Dziennego Pobrania (PMTDI) (limit ustalono na 1 mg jodu ze wszystkich źródeł) i nadające się do jodowania soli (Bürgi i in., 2001). W ramach profilaktyki jodowej w Polsce przyjęto jako źródło jodu jodek lub jodan potasu w stężeniach (30 ± 10) mg/kg jodku potasu (KI) lub (39 ± 13) mg/kg jodanu potasu (KIO_3). WHO rekomenduje tę metodę, ponieważ spełnia ona wszystkie założenia skutecznej profilaktyki, tj. sól jest jednym z niewielu produktów spożywanych przez wszystkie grupy ludzi, a jej spożycie nie zmienia się sezonowo, wzbogacanie jest proste do wdrożenia, tanie i łatwe do kontrolowania na każdym etapie (World Health Organization, 2004). Do 2020 r. w 124 krajach obowiązywały przepisy dotyczące obligatoryjnego jodowania soli, a w 21 przepisy zezwalające na jodowanie dobrowolne (Zimmermann, 2023). Dzięki włączeniu obligatoryjnego jodowania soli przeznaczonej do bezpośredniego spożycia przez ludzi do modelu profilaktyki jodowej, w 2002 roku Polska została sklasyfikowana przez WHO jako kraj o wystarczającym zaopatrzeniu populacji w jod (Szybiński, 2009). Chociaż ta metoda okazała się skuteczna, a jej niewątpliwą zaletą jest to, że jest odpowiednia również dla grup szczególnie narażonych na niedobór jodu, tj. kobiet w ciąży (zwiększone zapotrzebowanie) i wegan (eliminacja głównych źródeł z diety), zalecenie wydane przez WHO dotyczące ograniczenia spożycia soli kuchennej zwiększyło wysiłki na rzecz poszukiwania nowych, zdrowszych nośników jodu w profilaktyce IDD (Szybiński i in., 2010; World Health Organization, 2006, 2007). Zalecenie to wynika z udowodnionych negatywnych skutków nadmiernego spożycia soli, takich jak nadciśnienie tętnicze, udar, choroby układu sercowo-naczyniowego i choroby nerek (Cappuccio, 2016;

Hunter i in., 2022). Biorąc pod uwagę obecne znacznie zwiększone spożycie soli w porównaniu z zaleceniami WHO (do 5 g/d), jego ograniczenie budzi obawy co do skuteczności obecnie stosowanego modelu profilaktyki jodowej opartego na jodowaniu soli kuchennej (Szybiński i in., 2010; World Health Organization, 2022). Stąd zwiększone zainteresowanie nowymi nośnikami jodu.

Jedną z rozwijających się metod wzbogacania żywności w jod jest biofortyfikacja, która w znacznej mierze dotyczy roślin. Szczególnie biofortyfikację agronomiczną można uznać za skuteczne narzędzie stosowane w programach zapobiegającym niedoborom żywieniowym, także w profilaktyce jodowej (Karthika i in., 2023; Olson i in., 2021). Metoda ta zakłada wzbogacenie w ramach zastosowania upraw glebowych, bezglebowych i hydroponicznych przy zastosowaniu nawadniania dolistnego lub doglebowego (Izydorczyk i in., 2021; Zhang i in., 2023). Niewątpliwymi zaletami biofortyfikacji agronomicznej są jej wysoka akceptowalność społeczna oraz możliwość wzbogacenia rośliny w wiele związków w trakcie jednej uprawy (Consentino i in., 2023; Duborska i in., 2020; Marques i in., 2021). Liczne badania potwierdzają korelację pomiędzy koncentracją wprowadzonego jodu a jego ostateczną akumulacją w roślinach (Blasco i in., 2008; Dobosy i in., 2024). Wskazuje się na biofortyfikację jodem jako opłacalną metodę w strategii zwiększania poziomu jodu w żywności pochodzenia roślinnego.

Biorąc pod uwagę potrzebę modyfikacji profilaktyki jodowej należy zwrócić uwagę na prowadzone badania w zakresie możliwości biofortyfikacji warzyw także w Polsce. Liczne badania dotyczą oceny możliwości biofortyfikacji z udziałem związków jodu m.in. marchwi (Rakoczy-Lelek i in., 2021), sałaty (Sularz i in., 2020), ziemniaków (Ledwożyw-Smołeń i in., 2020), pomidorów (Wierzbńska i in., 2011), rzodkiewki (Krzepiło i in., 2021). Podejmowane są także próby biofortyfikacji agronomicznej zbóż, w których potwierdzono skuteczność wzbogacenia żyta przeznaczonego na paszę dla krów (Krzepiło i in., 2023). Jednak liczne badania wskazują na mniejszą skuteczność wzbogacania jodem tej grupy produktów ze względu na obniżoną kumulację jodu w nasionach (Mackowiak, Grossl, 1999). Wyniki doświadczeń związanych z biofortyfikacją marchwi wykazały, że spożycie 100g świeżego korzenia marchwi pokrywałoby 4,16% RDA jodu. Przy tym nie zaobserwowano negatywnego wpływu nawożenia jodem na wartość biologiczną ich plonu (Rakoczy-Lelek i in., 2021; Smoleń i in., 2016). Potwierdzono, że najbardziej efektywną akumulację jodu obserwuje się, gdy jod jest transportowany przez ksylem. Dlatego wzbogacanie jodem jest najbardziej efektywne w warzywach liściastych (Rakoczy-Lelek i in., 2021). Potwierdzają to wyniki badań związane z biofortyfikacją owoców pomidora przy użyciu KI i KIO₃, w których potwierdzono, że nie

stwierdzono statystycznie istotnych różnic w zawartości jodu w owocach, jedynie w liściach i ogonkach liściowych potwierdzono jego wyższą zawartość. Autorzy tłumaczą to zjawisko akumulacją jodu w pierwszej kolejności w liściach starszych, następnie liściach młodszych, a w najmniejszej ilości w owocach i nasionach (Wierzbńska i in., 2011). Potwierdzeniem tej tezy są badania nad biofortyfikacją sałaty. Uzyskane wyniki potwierdzają, że spożycie 50g sałaty niefortyfikowanej dostarcza 4,72% RDA jodu, a biofortyfikowanej od 26,65% RDA do nawet 242%. Uzyskane wyniki potwierdzają potrzebę szerszych badań pilotażowych związanych z ustaleniem mniejszej rozbieżności pomiędzy zawartością jodu w produkcie. W przypadku zastosowania biofortyfikacji mogą wystąpić inne trudności, związane z faktem, że jod nie jest pierwiastkiem niezbędnym dla roślin (Duborska i in., 2020; Krzepiło i in., 2021). Wprowadzony jod może wykazywać działanie toksyczne na rośliny, niemniej siła tego oddziaływania jest zależna od wielu czynników m.in. formy jodu, metody aplikacji, osobniczej wrażliwości rośliny czy mechanizmu pobierania i transportu jodu przez roślinę. Do obserwowanych, niepożądanych skutków nawożenia jodem zalicza się zaburzenia we wzroście i rozwoju roślin, chlorozę i martwicze plamy na liściach, epinastię, a także obniżenie wartości biologicznej plonu (Duborska i in., 2020; Krzepiło i in., 2015, 2019, 2021; Skoczylas i in., 2018). Inne zaobserwowane aspekty to redukcja masy główek sałaty, zmniejszenie stężenia azotanów, a także zmiany w zawartości makro i mikroskładników (Sularz i in., 2020). Biofortyfikacja kiełków rzodkiewki roztworami KI wykazała zmienność zawartości jodu w obrębie stężeń KI i gatunku rzodkiewki. Ogólnie kiełki rzodkiewki charakteryzowały się wysoką zdolnością do akumulacji jodu, bez wyraźnych negatywnych skutków dla jakości plonu (Krzepiło i in., 2021). Wyniki dotyczące biofortyfikacji kiełków pomidora potwierdziły wysoką akumulację w liściach jodu wprowadzonego w postaci KI a w korzeniach w postaci jodobenzoesanów (Halka i in., 2020). Uzyskane wyniki dotyczące możliwości fortyfikacji upraw ziemniaka potwierdziły, że zarówno doglebowe, jak i dolistne stosowanie jodu pozwoliło na uzyskanie bulw ziemniaka o zwiększonej zawartości tego pierwiastka bez spadku zawartości skrobi lub cukru, przy wyższej skuteczności dla KIO_3 (Ledwożyw-Smoleń i in., 2020). Ważnym aspektem badań nad biofortyfikacją żywności jest wykorzystanie biofortyfikowanych roślin w przemyśle spożywczym. Skoczylas i in. (2020) wykorzystali biofortyfikowaną w jod i selen marchew czterech odmian do produkcji soku, w celu zbadania jej przydatności technologicznej i wartości odżywczej. Uzyskane wyniki badań potwierdziły, że sok z biofortyfikowanej marchwi charakteryzował się niższą zawartością suchej masy, całkowitą zawartością rozpuszczalnych substancji stałych, białka, cukrów i β -karotenu oraz niższą aktywnością antyoksydacyjną w porównaniu do marchwi tych samych odmian z grupy

niefortyfikowanych. Skonkludowano, że mimo różnic w zawartości wymienionych składników, soki z biofortyfikowanej marchwi nadal pozostają ich dobrym źródłem. Wobec innych wyróżników zauważono jedynie niewielkie różnice w parametrach barwy i pH. Pomimo powstałych strat podczas procesu technologicznego potwierdzono, że zawartość jodu, w soku była znacząco wyższa przy zastosowaniu marchwi biofortyfikowanej jako surowca. Potwierdzono, że pokrycie RDA wynosiło 1,45–2,42% przy spożyciu 100g soku z marchwi grupy kontrolnej, natomiast w przypadku soku z marchwi biofortyfikowanej było to już 3,77–8,15% RDA w zależności od odmiany. Z kolei zespół Kiferle i in. (2013) w swoich badaniach potwierdził, że przechowywanie biofortyfikowanych pomidorów przez 2 tygodnie w temperaturze pokojowej przy dostępie światła nie wpłynęło na zawartość jodu w owocach. Czynnikiem znacznie zmniejszającym zawartość jodu było za to obieranie ze skórki, w której to nastąpiła akumulacja tego pierwiastka. Powyższe doświadczenia pokazują, że biofortyfikacja roślin w jod jest stosunkowo czasochłonną metodą, wymagającą kontroli jakości plonów o szerokim spektrum na wielu etapach wzrostu roślin. Dodatkowo znaczne ilości wprowadzonego do rośliny jodu mogą zostać utracone z uwagi na ich akumulację w częściach niejadalnych (Duborska i in., 2020; Skoczylas i in., 2018).

Biorąc pod uwagę fakt, że jednym z głównych problemów biofortyfikacji roślin jodem jest zmniejszona możliwość kontrolowania zawartości jodu i standaryzacji końcowego produktu (Dobosy i in., 2020), alternatywnym sposobem walki z deficytami żywieniowymi jest fortyfikacja żywności, czyli dodawanie do produktów spożywczych jednego lub większej liczby składników niezbędnych dla organizmu człowieka. Metodę tę uważa się za najskuteczniejszy i najbardziej opłacalny sposób zapobiegania niedoborom składników mineralnych i witamin, a przy tym bezpieczniejszy niż suplementacja (Gawęcki, 2012; Olson i in., 2021). Metoda ta jest od wielu lat szeroko stosowana na całym świecie, nie tylko w kontekście fortyfikacji żywności w jod, ale także w inne składniki np. kwas foliowy, witaminę A. Wspomniana wyżej, zalecona przez WHO, metoda jodowania soli kuchennej jest jednym z przykładów praktycznego zastosowania fortyfikacji żywności, w celu zwalczania niedoborów żywieniowych na skalę populacyjną (Olson i in., 2021; Osendarp i in., 2018). Mając na uwadze, że WHO wciąż wskazuje na potrzebę zastąpienia chlorku sodu innym, przynajmniej tak samo stabilnym, nośnikiem dla soli jodu w programach profilaktyki IDD (World Health Organization, 2014), przeprowadzane są doświadczenia mające sprostać tym postulatam.

Nowe nośniki jodu powinny odpowiadać zarówno założeniom skutecznej profilaktyki, jaki i problemom technologicznym związanym z wykorzystaniem jodku i jodanu potasu do wzbogacania żywności. Planując wprowadzenie tych związków do żywności, a także

przewidując ich wpływ na wartość technologiczną i przydatność do spożycia wzbogacanych produktów, należy pamiętać, że jodek jest silnym środkiem redukującym, a jodan silnym środkiem utleniającym. Właściwości te mogą wpływać na barwę produktu, skracać okres przydatności do spożycia i zmniejszać biodostępność jodu i innych składników wzbogacanego produktu (Bürgi i in., 2001; Winger i in., 2008). Dodatkowym ograniczeniem w stosowaniu jest wrażliwość tych substancji na warunki środowiskowe. Sole jodu wykazują wysoką wrażliwość na światło, podwyższoną temperaturę i jej zmiany oraz wysoką wilgotność (powyżej 75%), przy czym jodan potasu jest bardziej stabilny niż jodek (Szymandera-Buszka, i in., 2021). Jodek, jako substancja higroskopijna, jest mniej stabilny w podwyższonych temperaturach i wilgotności ze względu na hydrolizę par jodu (Kelly, 1953; Pahuja i in., 1993). Inną kwestią są właściwości samego nośnika soli jodowej, które mogą wpływać na stabilność zastosowanego jodu. Wcześniejsze badania potwierdziły możliwość stosowania KI oraz KIO₃ do wzbogacania preparatów białkowych oraz błonnikowych. Udowodniono, że preparaty kolagenowe, a także błonnik pszenny i białko sojowe mogą być co najmniej tak samo skuteczne jak chlorek sodu jako nośnik jodu, a w niektórych przypadkach nawet zwiększać stabilność jodu podczas przechowywania. W przypadku preparatów kolagenowych i błonnika pszennego wyższą zawartość jodu w porównaniu do soli kuchennej tłumaczono zdolnością tych substancji do pochłaniania wilgoci, co chroniło jod przed jego działaniem, a w przypadku białka sojowego oprócz mechanizmu wiązania wody brano pod uwagę również możliwość tworzenia kompleksu białkowo-jodowego. (Szymandera-Buszka i in., 2021; Waszkowiak Szymandera-Buszka, 2007).

1.1.4. Oryginalność pracy i możliwe zastosowania praktyczne

Opisane powyżej skutki zdrowotne niedoboru jodu, globalny zasięg problemu oraz konieczność uaktualnienia modeli profilaktyki jodowej, świadczą o istotności podjętego w pracy problemu badawczego, jakim jest poszukiwanie korzystniejszych zdrowotnie, a przy tym równie stabilnych jak chlorek sodu nośników soli jodu, możliwych do zastosowania w programach profilaktyki IDD.

Oryginalność pracy należy wiązać z wykorzystaniem wybranych warzyw, zamiast chlorku sodu, jako matrycy dla soli jodu (KI, KIO₃). Wybrane susze warzywne nie zostały jeszcze szczegółowo zbadane i opisane w tym kontekście. Dodatkowo zastosowanie warzyw pozwoliłoby na zwiększenie ich spożycia, co jest zalecane we wszystkich grupach wiekowych ze względu na wysoką zawartość bioaktywnych składników w tej grupie produktów. Według zaleceń żywieniowych dla populacji Polski, warzywa i owoce powinny stanowić połowę tzw.

Talerza Zdrowego Żywienia, z kolei Światowa Organizacja Zdrowia zaleca, aby dorośli spożywali co najmniej 2 porcje owoców i 3 porcje warzyw dziennie (Jarosz i in., 2020; Wallace i in., 2020). Odpowiedni poziom spożycia warzyw i owoców jest związany z wieloma korzyściami zdrowotnymi tj. zmniejszenie przewlekłego stanu zapalnego, redukcja ryzyka zachorowania na otyłość, cukrzycę typu II, choroby układu krążenia, osteoporozę, demencję, depresję, niektóre nowotwory, czy wspieranie pracy układu pokarmowego i odpornościowego. Tymczasem spożycie tych produktów w wielu krajach, zwłaszcza w tych gdzie popularny jest zachodni model żywienia, jest wciąż alarmująco niskie. W związku z tym liczne zespoły badawcze wskazują potrzebę prowadzenia programów profilaktycznych, nie tylko zwiększających świadomość konsumentów, ale także wprowadzających te grupy produktów do ich diety (Appleton i in., 2016; Donato i in., 2019; Fulton i in., 2016; Ramya, Patel, 2019; Wallace i in., 2020; Wu i in., 2015; Zhan i in., 2017).

Przedstawiony w rozprawie pełny schemat metod przygotowywania matrycy fortyfikowanej jodem - od etapu wyboru typu matrycy, poprzez metodę nanoszenia, suszenie aż po możliwości dodatku do żywności - wyróżnia się oryginalnością na tle innych badań.

Oryginalność pracy polega także na wytypowaniu wśród mieszkańców Polski grupy szczególnie narażonej na niedobór tego składnika. Dotąd grupa tak liczna (2200 osób) i różnorodna (wegan i osoby deklarujące dietę zwyczajową, w wieku 18–80 lat) nie została przedstawiona.

Inną mocną stroną jest ocena spożycia jodu pochodzącego z soli jodowanej z uwzględnieniem rodzajów stosowanych procesów kulinarnych. Oryginalność pracy polega także na wytypowaniu warzyw jako matrycy dla jodu dzięki zastosowaniu badań ankietowych z udziałem grupy szczególnie narażonej na niedobór jodu (weganie) i wytypowaniu najczęściej spożywanych warzyw przy jednoczesnym wyrażeniu deklaracji zgody na ich fortyfikowanie jodem.

Wyniki zawarte w niniejszej pracy mogą posłużyć producentom żywności jako schemat metod do produkcji warzywnych matryc dla jodu. W pracy zostały wskazane wytyczne związane z rodzajem nośnika jodu (KI, KIO₃), jak i rodzaju warzyw mogących stanowić dla niego matrycę. Potwierdzenie zastosowania wskazanych warzyw jako matrycy wynika z udowodnienia stabilności naniesionego na nie jodu. Zastosowanie wielu zmiennych związanych z warunkami impregnacji jodem pozwoliło na wskazanie metody nanoszenia jodu, która charakteryzuje się wysoką powtarzalnością, równomiernym rozkładem jodu w suszu i wysoką stabilnością podczas przechowywania. Wskazanie stopnia odtwarzalności naniesionego jodu przy zmiennych warunkach impregnacji pozwoli na przewidzenie powstałych strat jodu przy

wyborze danej metody impregnacji. Umożliwi to kontrolę zawartości jodu w produkcie po suszeniu jak i przechowywaniu, a to z kolei pozwoli producentowi na spisanie oświadczeń żywieniowych. Oryginalność pracy polega także na przeprowadzeniu badań wykorzystujących zmienność stężeń naniesionego jodu i wskazaniu optymalnej zawartości jodu w obu formach (KI/KIO₃) w celu zachowania jego wysokiej stabilności podczas przechowywania i jednocześnie niezmienionej, charakterystycznej dla rodzaju warzywa, aktywności przeciwutleniającej (DPPH[•] i ABTS^{•+}).

W pracy przedstawiono również zastosowanie praktyczne badanych suszy, poprzez zaprojektowanie wegańskich produktów zbożowych z dodatkiem jodowanych suszy warzywnych. Ten element pracy może stanowić wskazówkę dla producentów żywności, jak wprowadzić fortyfikowane jodem susze warzywne do produktów i stworzyć żywność funkcjonalną.

1.2. Cel badań

Głównym celem badawczym była ocena możliwości zastosowania wybranych warzyw jako matryc dla soli jodu oraz ustalenie schematów metod fortyfikacji w celu maksymalizacji skuteczności nanoszenia jodu.

Zrealizowane zostały następujące cele szczegółowe:

1. Identyfikacja grupy konsumentów szczególnie narażonej na niedobór jodu ze względu na ograniczenia dietetyczne oraz wybór matryc dla jodu, akceptowalnych przez grupę docelową.
2. Ocena wpływu wybranych zmiennych technologicznych procesu impregnacji na skuteczność nanoszenia jodu na analizowane rodzaje warzyw.
3. Opracowanie schematów metod fortyfikowania analizowanych rodzajów warzyw jodem dla ustalenia powtarzalnych wzorców oraz jednolitej zawartości jodu w preparacie po suszeniu i przechowywaniu.
4. Ocena wpływu zastosowania zmiennych rodzajów warzyw i ich odmian jako matryc dla jodu naniesionego w formie jodku potasu (KI) i jodanu potasu (KIO₃) na skuteczność fortyfikowania.
5. Ocena wpływu stężenia jodu użytego do fortyfikacji warzyw na ich aktywność przeciwutleniającą.
6. Ocena wartości odżywczej produktów zbożowych typu bułki Ciabatta i kluski Gnocchi wzbogaconych suszem warzyw fortyfikowanych jodem.

1.3. Hipotezy badawcze

Główna hipoteza badawcza zakładała, że wybrane warzywa mogą stanowić matrycę dla soli jodu stosowaną w technologii żywności, jako czynnik wspomagający w profilaktyce IDD.

Hipotezy szczegółowe:

H1. Osoby na diecie wegańskiej są zagrożone niedoborem jodu, ze względu na niższy stopień pokrycia zapotrzebowania na jod z diety, w stosunku do osób na diecie zwyczajowej.

H2. Istnieje zależność pomiędzy dietą, płcią i wiekiem ankietowanych oraz częstością spożycia warzyw a nastawieniem do fortyfikowania ich jodem.

H3. Typ nośnika jodu (KI, KIO₃) oraz matryca (rodzaj warzywa) dla jodu wpływają na stabilność jodu naniesionego podczas poszczególnych etapów impregnacji matrycy oraz w trakcie jej dalszego przechowywania.

H4. Zmienne warunki impregnacji (stopień uwodnienia, temperatura i czas procesu) warzyw jodem wpływają na odtwarzalność naniesionego jodu oraz na jego stabilność podczas późniejszego przechowywania impregnowanych suszy warzywnych.

H5. Stężenie i rodzaj wprowadzonego nośnika jodu (KI, KIO₃) wpływa na aktywność przeciwutleniającą fortyfikowanej matrycy (marchew, dynia, brokuł, kalafior, burak).

H6. Typ nośnika jodu (KI, KIO₃) oraz matryca (rodzaj warzywa) dla jodu, wprowadzonych do produktów zbożowych typu bułki Ciabatta i kluski Gnocchi, wpływają na zawartość wybranych wskaźników wartości odżywczej, takich jak zawartość jodu i tiaminy oraz właściwości przeciwutleniające produktu.

H7. Zaprojektowane produkty zbożowe (bułki typu Ciabatta oraz kluski typu Gnocchi) z dodatkiem fortyfikowanych w jod suszy warzyw stanowią dobre źródło jodu w diecie i mogą być stosowane jako element profilaktyki IDD.

2. Materiał i metody badawcze

2.1. Materiał badawczy

Warzywa tj. dynia (*Cucurbita pepo* L.), kalafior (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.), brokuły (*Brassica oleracea* L.), marchew (*Daucus carota* L.) i burak (*Beta vulgaris* L.) wykorzystano jako matrycę dla jodu. W przypadku wybranych analiz zbadano także zmienność wynikającą z odmiany warzywa, wykorzystując następujące odmiany:

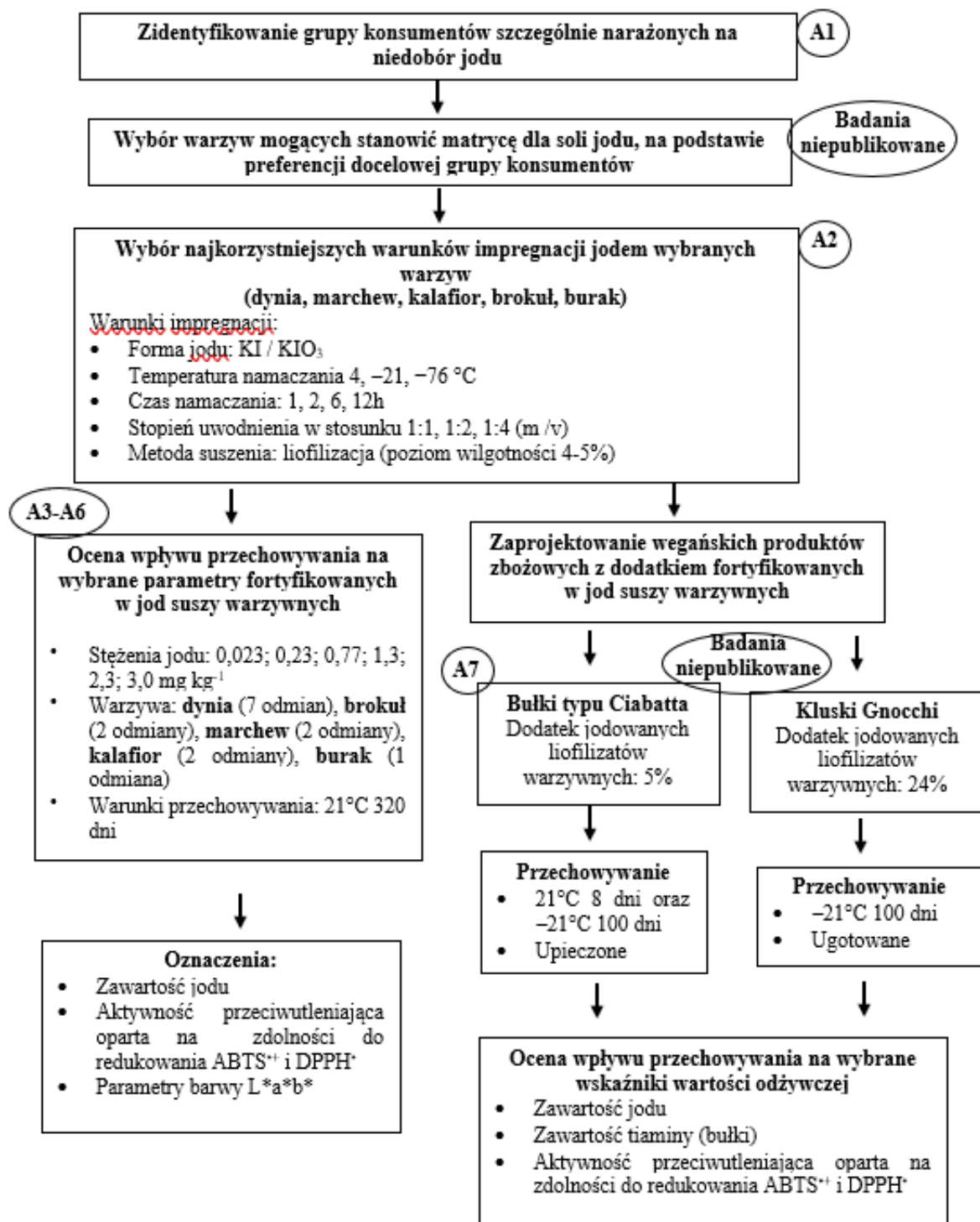
- Dynia odmiany (*Cucurbita pepo* var. Spaghetti i Delicata oraz *Cucurbita moschata* var. Butternut Squash, Butterkin, Shishigatani, Butternut Orange i Muscat Provence)
- Marchew odmiany Nantaise (*Daucus carota* L. var. *Nantaise*) i Rore Riesen (*Daucus carota* L. var. *Rore Riesen*)
- Kalafior odmiany David (*Brassica oleracea* var. *Botrytis* L., var. *David*) i Bora (*Brassica oleracea* var. *Botrytis* L., var. *Bora*)
- Brokuł odmiany Cezar (*Brassica oleracea* var. *Botrytis italica*) i Sebastian (*Brassica oleracea* convar. *Botrytis* var. *cymosa*)

Surowe warzywa zostały zakupione w handlu detalicznym. Jako źródło jodu wykorzystano preparaty jodku potasu (KI) oraz jodanu potasu (KIO₃) (Merck, Darmstadt, Niemcy). Preparaty zostały wykorzystane do przeprowadzenia badań opublikowanych w pracach A2-A7. Szczegółowy opis pozyskania, przygotowania i zastosowania surowców do badań znajduje się w publikacjach:

- dynia (A2, A3),
- kalafior (A2, A6),
- brokuły (A2, A5),
- marchew (A2, A6),
- burak (A4, A7).

2.2. Model badań

Badania, zaprezentowane w rozprawie doktorskiej, zostały przeprowadzone według następującego modelu:



Rysunek 1. Schemat badań stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej. (Opracowanie własne)

2.3. Metody badawcze

W pierwszym etapie pracy zidentyfikowano grupy konsumentów szczególnie narażonych na niedobory jodu, ze względu na wyjątkowe potrzeby żywieniowe. Wyboru grupy docelowych konsumentów dokonano na podstawie badań ankietowych z wykorzystaniem autorskiego kwestionariusza bazującego na kwestionariuszu KomPAN (**publikacja A1**).

W kolejnym etapie dokonano wyboru kilku rodzajów produktów roślinnych mogących stanowić matrycę dla soli jodu. Wśród zaproponowanych warzyw znalazły się: dynia, marchew, kalafior, brokuł, burak i ziemniak. Wybór spośród wymienionych produktów odbył się na podstawie wyników badań ankietowych z wykorzystaniem autorskiego kwestionariusza. Badania przeprowadzono z uwzględnieniem grupy docelowych odbiorców, a wśród pytań znalazły się m.in. częstość spożywania poszczególnych warzyw oraz chęć spożywania tych produktów po fortyfikacji jodem (**dane niepublikowane**).

Następnie przeprowadzono proces impregnacji jodkiem oraz jodanem potasu warzyw, wybranych w poprzednim etapie badań. Po analizie danych literaturowych, przyjęto metodę impregnacji solami jodu zbliżoną do metodyki jodowania soli kuchennej. W celu osiągnięcia stabilnych preparatów, zbadano czynniki wpływające na efektywność procesu impregnacji. Zmienność przyjętego procesu impregnacji uwzględniała przyjęty sposób uwodnienia preparatu przy nanoszeniu jodu (1:1, 1:2; 1:4 (m/v)), a także zmienność temperatury (4, -21, -76°C) oraz czasu namaczania (1, 2, 6, 12 h). Zastosowano liofilizację jako metodę suszenia (**publikacja A2**). Metoda liofilizacji badanych warzyw została wybrana do realizacji pracy doktorskiej z uwagi na jej udowodniony wysoki stopień zachowania wartości odżywczej oraz sensorycznej surowca (Nowak, Jakubczyk, 2020; Prosapio, Lopez-Quiroga, 2020).

Wiele badań potwierdziło właściwości przeciwutleniające analizowanych warzyw (Boadi i in., 2021; Chen i in., 2021; Drabińska i in., 2021; Kulczyński i in., 2020; Zhao i in., 2024). Dlatego biorąc pod uwagę, że żywność wzbogacona powinna poprawiać, a nie obniżać właściwości prozdrowotne żywności wzbogaconej przy jednocześnie wysokich dawkach jodu (do 3 mg/100 g) jakie są często stosowane w przygotowaniu koncentratów wzbogaconych jodem, zidentyfikowano potrzebę ustalenia optymalnej dawki jodu (dla obu form) pozwalającej na zachowanie jak najwyższej stabilności jodu i maksymalnej aktywności przeciwutleniającej zaprojektowanych suszów.

W tym celu przygotowano fortyfikowane jodem susze warzywne, według ustalonej we wcześniejszym etapie badań najbardziej korzystnej metodyki impregnacji. Susze wzbogacono w dodatek jodu o stężeniu: do 0,023mg kg⁻¹ (niska zawartość jodu w żywności), 0,23mg kg⁻¹

(naturalna zawartość jodu w żywności, pochodząca z soli jodowanej) $2,3\text{mg kg}^{-1}$ (zawartość jodu w fortyfikowanych matrycach). Ponadto dla suszy brokułu, marchwi i kalafiora zbadano dodatkowe stężenia jodu: $0,77$; $1,3$ oraz $3,0\text{mg kg}^{-1}$. Następnie fortyfikowane w jod susze były przechowywane w temp. $21 \pm 1^\circ\text{C}$. W celu uzyskania kontrolowanych warunków przechowywania, jodowane susze warzywne były przechowywane w komorach środowiskowych. Komory zapewnią również homogenność próbek dzięki ich mieszaniu. Po przygotowaniu suszy oraz okresowo w kilku punktach pomiarowych przechowywania, badano zawartość jodu oraz aktywność przeciwutleniającą (**publikacje A3-A6**).

W kolejnym etapie wykonano prototypy wegańskich produktów zbożowych z dodatkiem badanych wzbogaconych w jod suszy warzywnych. Produkty te przygotowano bez dodatku surowców odzwierzęcych, tak aby były odpowiednie dla grupy docelowych odbiorców (wegan). Zaprojektowano kluski typu Gnocchi oraz bułki typu Ciabatta w których oznaczano zawartość jodu i aktywność przeciwutleniającą. Bułki zbadano również pod kątem zawartości tiaminy. Wymienione analizy wykonano w surowym cieście, po uzdatnieniu do spożycia (odpowiednio gotowanie lub pieczenie) oraz po okresie przechowywania. Jod oznaczano dodatkowo w kilku punktach pomiarowych przechowywania. Dla produktu bezpośrednio po obróbce cieplnej wykonano analizę sensoryczną (**publikacja A7 oraz dane niepublikowane**).

Wymienione badania przeprowadzono wykorzystując następujące metodologie:

- Badania ankietowe (Jeżewska-Zychowicz i in., 2017),
- Zawartość jodu (Kühne i in., 1993; Moxon, Dixon, 1980),
- Sucha masa (International Organization for Standardization, 2018),
- Właściwości barwy $L^*a^*b^*$ (Siejak i in., 2021),
- Zdolność do redukowania rodnika DPPH (Chu i in., 2000; Nuutila i in., 2003),
- Zdolność do redukowania kationorodnika ABTS (Re i in., 1999),
- Zawartość tiaminy (Szymandera-Buszk, Waszkowiak, 2014; Waszkowiak, Szymandera-Buszk, 2007)
- Analiza sensoryczna konsumencka przy udziale osób deklarujących dietę wegańską i tradycyjną

Szczegółowy opis poszczególnych metodyk został uwzględniony w publikacjach włączonych do niniejszej rozprawy. Wszystkie oznaczenia wykonano w dwóch niezależnych seriach.

3. Wyniki badań i ich interpretacja

W pracach A.1.–A.7. wchodzących w skład wyodrębnionego osiągnięcia naukowego, zbadano skuteczność zastosowania wybranych warzyw jako nośników jodu w celu zwiększenia skuteczności profilaktyki jodowej.

3.1. Wpływ diety wegańskiej na pokrycie zalecanego dziennego spożycia (RDA) jodu wśród Polaków – wybór grupy docelowych konsumentów. (A1)

Celem tej części badań była weryfikacja hipotezy szczegółowej **H1**: Osoby na diecie wegańskiej są zagrożone niedoborem jodu, ze względu na niższy stopień pokrycia zapotrzebowania na jod z diety, w stosunku do osób na diecie zwyczajowej.

Po analizie danych literaturowych, w pracy założono, że osoby na diecie wegańskiej są zagrożone niedoborem jodu, ze względu na eliminację z diety naturalnych źródeł tego składnika mineralnego tj. ryby, jaja, mleko i jego przetwory, a także ograniczanie spożycia soli kuchennej, która stanowi główne źródło jodu w diecie.

METODYKA

Kwestionariusz ankietowy

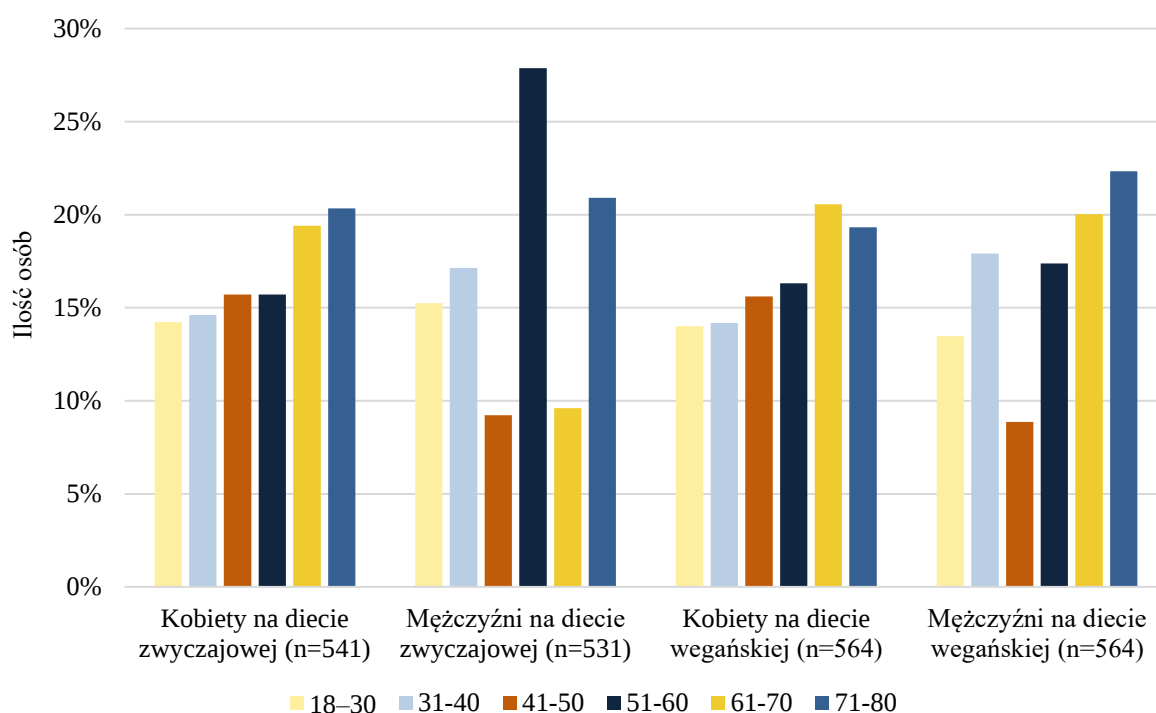
W celu weryfikacji wcześniej przyjętych założeń przeprowadzono badania ankietowe z wykorzystaniem autorskiego kwestionariusza ankietowego bazującego na kwestionariuszu KomPAN. Autorski kwestionariusz został wcześniej poddany walidacji. W kwestionariuszu zostały zamieszczone pytania o rodzaj diety, częstotliwość i ilość spożywanych produktów oraz rodzaje procesów kulinarnych stosowanych podczas przygotowywania potraw z dodatkiem soli jodowanej (umożliwiających dokładniejsze określenie zawartości jodu pochodzącego z soli w diecie respondentów). Informacje na temat metody przygotowywania żywności (rodzaje stosowanych procesów kulinarnych) obejmowały moment dodawania soli do żywności (lub czy w ogóle dodawano sól) tj. pod koniec podgrzewania, w połowie podgrzewania i na początku podgrzewania wody.

Ankiety zostały udostępnione w formie elektronicznej, w postaci Formularzy Google, na forach internetowych oraz w gabinetach lekarzy rodzinnych. Udział w badaniu był dobrowolny i anonimowy, a w jego trakcie nie zbierano danych wrażliwych. Szczegółowy opis rozpowszechniania ankiet oraz znajdujących się w nich pytań, zamieszczony został w publikacji A1 włączonej w cykl (Zaremba i in., 2023).

Tygodniowe spożycie jodu i procentowe pokrycie zapotrzebowania na ten pierwiastek oszacowano na podstawie częstotliwości spożycia i wielkości porcji poszczególnych produktów deklarowanych przez respondentów, a także zawartości jodu w produktach, którą określono na podstawie tabel składu i wartości odżywczej. Przy obliczaniu pokrycia zapotrzebowania na jod przyjęto dzienną dawkę tego pierwiastka wynoszącą 150 µg, tj. 1050 µg na tydzień.

Grupa badana

Dobór grupy badanej był celowy, nieprobabilistyczny, ze wskazaniem osób deklarujących stosowanie diety uwzględniającej spożycie produktów pochodzenia zwierzęcego i roślinnego „dieta zwyczajowa” oraz diety uwzględniającej spożycie wyłącznie żywności pochodzenia roślinnego „dieta wegańska”. Czynnikiem wykluczającym udział w badaniu były wiek (poniżej 18 lat), ciąża oraz laktacja. Grupa badana składała się z 2200 osób obojga płci (tj. 49% mężczyzn i 51% kobiet) w wieku 18–80 lat zamieszkujących różne obszary Polski. Badani deklarowali dietę „zwyczajową” (49%) i wegańską (51%). Badanych podzielono na grupy wiekowe w zakresie: 18–30; 31–40; 41–50; 51–60; 61–70; i 71–80 lat (Wykres 1).



Wykres 1. Podział [%] respondentów według grup wiekowych (n = 2200). (Zaremba i in., 2023)

Analiza statystyczna

Dane analizowano za pomocą oprogramowania STATISTICA™ PL 13.3 (StatSoft, Kraków, Polska). Obliczenia wykonano przy poziomie ufności 0,95, a maksymalny

współczynnik błędu ustalono na 0,05. Przeprowadzono jednokierunkową analizę wariancji (ANOVA), aby porównać średnie pokrycie dziennego zapotrzebowania na jod w obrębie grup przy poziomie istotności $p < 0,05$. Następnie zastosowano test Tukeya post hoc. Współzależności między zmiennymi jakościowymi (dieta, wiek, płeć, poziom wykształcenia) określono za pomocą testu niezależności chi-kwadrat przy $\alpha = 0,05$, który wykazał różnice między dietą a płcią. Analiza regresji logistycznej (iloraz szans — OR) została zastosowana w celu przewidzenia pokrycia dziennego zapotrzebowania na jod wśród osób stosujących dietę wegańską. Przyjęto następujące zakresy RDA dla jodu: wysoki (powyżej 100% RDA); umiarkowanie wysoki (81–100% RDA); średni (60–80% RDA); niski (41–60% RDA); bardzo niski (21–40% RDA) lub niepokojąco niski (poniżej 20% RDA) biorąc pod uwagę osoby stosujące dietę wegańską i kobiety.

OMÓWIENIE WYNIKÓW

Analiza uzyskanych wyników badań, pozwoliła stwierdzić, że deklarowane spożycie jodu wśród badanej populacji wynosiło 8 – 160 $\mu\text{g}/\text{dzień}$, średnio 70% RDA. Jednocześnie około 50% respondentów zadeklarowało spożycie produktów będących źródłem jodu w diecie, w ilości znacznie poniżej dziennego zapotrzebowania na ten pierwiastek. Jedynie 12% ankietowanych osób zadeklarowało spożycie jodu w ilości przekraczającej RDA, na poziomie nie wyższym niż 160 μg jodu/dzień.

Wyniki analizy statystycznej wykazały istnienie związku pomiędzy rodzajem deklarowanej diety a poziomem pokrycia RDA jodu (Tabela 2). Biorąc pod uwagę istotną statystycznie siłę wpływu, potwierdzono, że analizowane predyktory (dieta, wiek, płeć) można uszeregować według siły malejącej w następującej kolejności: rodzaj diety > płeć > wiek.

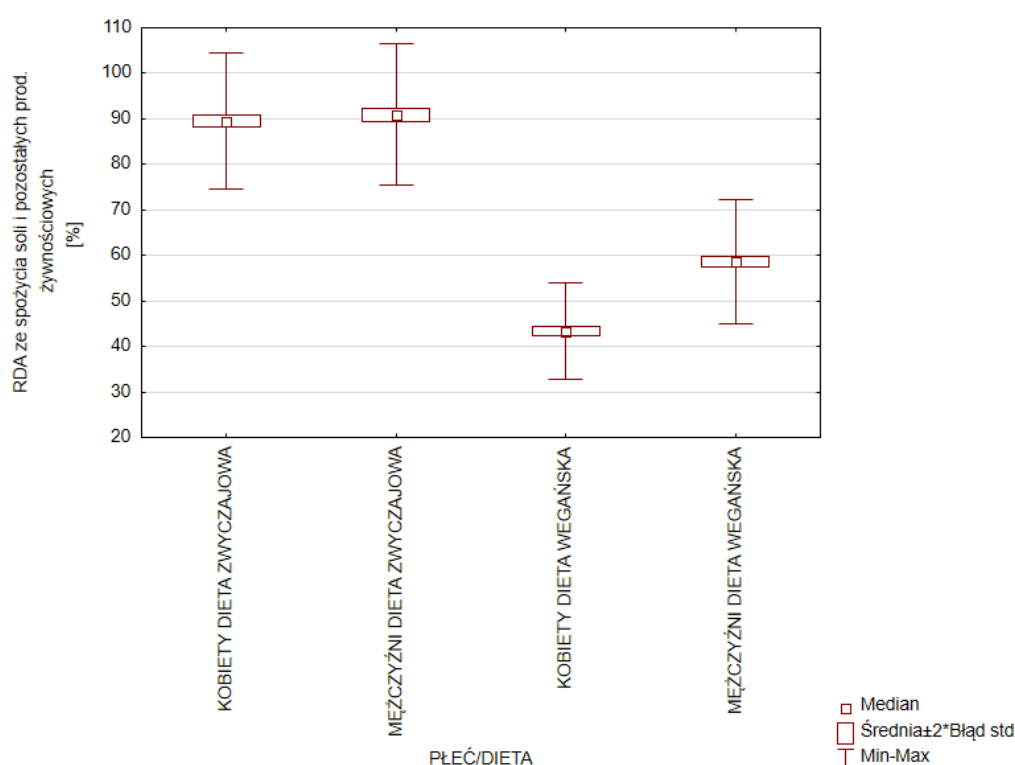
Tabela 2. Istotność statystyczna predyktorów modeli kowariancji dla zmian w średnim tygodniowym pokryciu zapotrzebowania na jod. (Zaremba i in., 2023)

Wariant	SS*	df	MSE	F	p
Dieta	$8,448 \times 10^5$	1	$8,448 \times 10^5$	$3,550 \times 10^3$	<0,05
Płeć	$3,832 \times 10^4$	1	$3,832 \times 10^4$	$6,335 \times 10^1$	<0,05
Wiek	$2,635 \times 10^4$	5	$5,269 \times 10^3$	$8,618 \times 10^0$	<0,05

Objaśnienia: SS – sumy kwadratów; df – liczba stopni swobody; MSE – średnia suma kwadratów; F – wartość testu F; p – poziom prawdopodobieństwa

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań potwierdzono statystycznie istotnie niższe spożycie jodu z pożywienia u osób deklarujących dietę wegańską. Szacowane dzienne spożycie jodu u osób na diecie wegańskiej wahało się średnio na poziomie 51% RDA dla jodu. Natomiast wśród osób na diecie zwyczajowej średnie RDA dla jodu wynosiło 90%. Potwierdzono, że 24% osób na diecie zwyczajowej spożywało jod w ilości powyżej 150

µg/dzień, ale w ilościach nie wyższych niż 150 µg/dzień a w przypadku wegan był to jedynie 1% respondentów. Potwierdzono, że osoby na diecie wegańskiej spożywały znacząco mniej produktów będących źródłem jodu w diecie w porównaniu do osób na diecie zwyczajowej. Analiza regresji logistycznej wskazała na silny związek między pokryciem RDA na jod na poziomie 21–40% a nawet poniżej 20% a dietą wegańską. Dodatkowo potwierdzono (Wykres 2) zależność pomiędzy płcią a poziomem pokrycia zapotrzebowania na jod. Wśród kobiet deklarujących dietę wegańską aż 43% deklarowało spożycie żywności, które pozwala szacunkowo na pokrycie RDA na jod zaledwie na poziomie 41%.

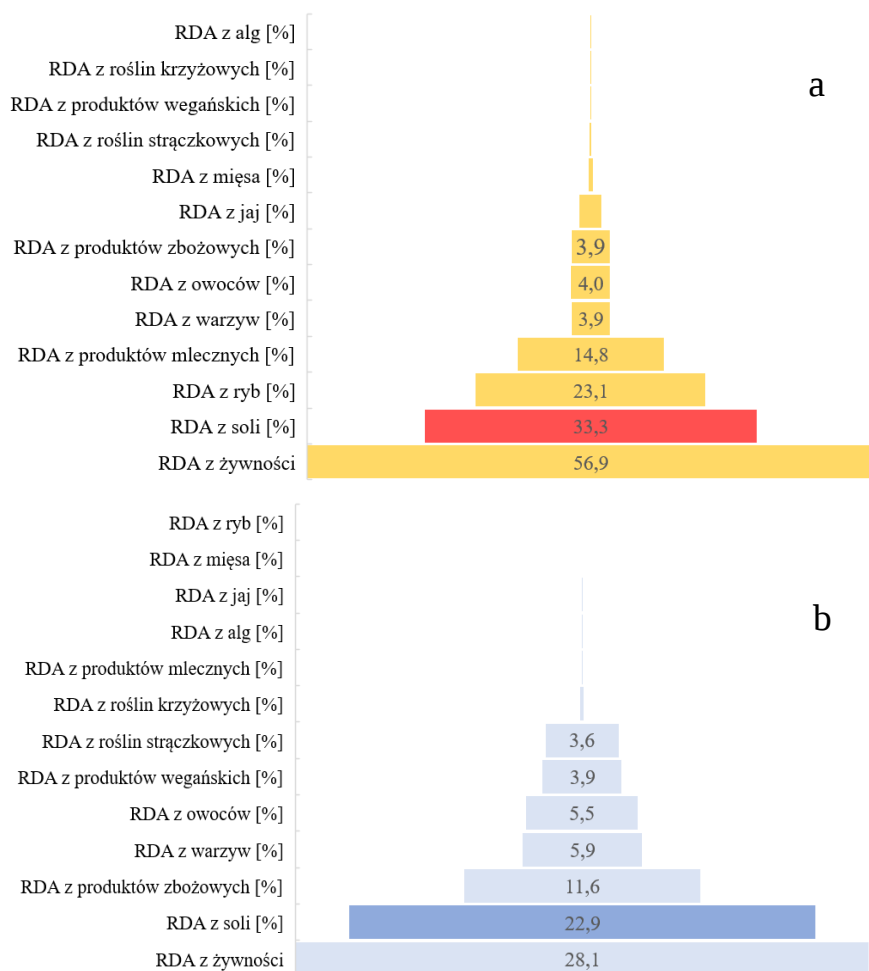


Wykres 2. Pokrycie całkowitego dziennego zapotrzebowania na jod [%] w grupie kobiet i mężczyzn w wieku 18–80 lat o różnym sposobie odżywiania. (Zaremba i in., 2023)

Na podstawie analizy statystycznej wykazano, że produktami, które dostarczały jodu w diecie wegan były głównie produkty zbożowe, warzywa i owoce, produkty wegańskie oraz nasiona roślin strączkowych (Wykres 3). Jednak pomimo wysokiej częstości spożycia tej grupy produktów stanowiły one szacunkowe pokrycie RDA na jod na poziomie 30%. Natomiast w grupie osób na diecie zwyczajowej były to ryby, produkty mleczne, warzywa i owoce, produkty zbożowe, jaja oraz mięso. Deklarowane spożycie produktów– mleczarskich pozwala na oszacowanie pokrycia RDA na jod na poziomie 14%. Oszacowano, że produkty spożywcze (z wyłączeniem soli jodowanej) dostarczały jodu na poziomie 31% RDA w przypadku osób na

diecie wegańskiej i 53% RDA u osób na diecie zwyczajowej. Ponadto wykazano wysokie deklarowane spożycie wegańskich zamienników produktów mlecznych oraz mięsa w grupie osób na diecie wegańskiej. Wegańskie analogi produktów mlecznych spożywało codziennie 40% kobiet i 10% mężczyzn, natomiast wegańskie zamienniki mięsa (tj. wege-szynka, wege-kielbasa, wege-burger) były częściej spożywane przez mężczyzn. Niestety produkty wegańskie, podobnie jak nasiona roślin strączkowych i produkty powstałe w wyniku ich fermentacji, nie były wzbogacone w jod w wyniku czego można było przyjąć, że ich spożycie pokrywało zaledwie 2-4% RDA jodu.

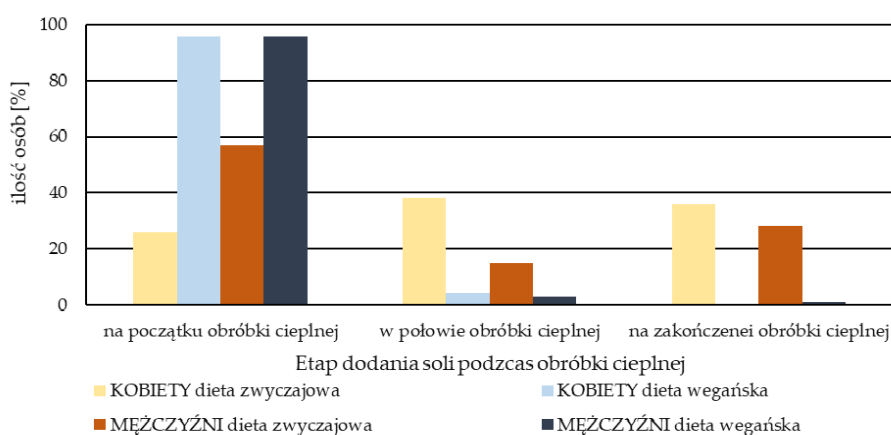
Ponadto stwierdzono, że głównym źródłem jodu w diecie wszystkich badanych grup była sól jodowana, przy czym weganie spożywali jej znacząco mniej niż osoby na diecie zwyczajowej.



Wykres 3. Procent pokrycia dziennego zapotrzebowania na jod z produktów wśród kobiet i mężczyzn stosujących dietę zwyczajową (a) i dietę wegańską (b) w wieku 18–80 lat z Polski. (Zaremba i in., 2023)

Jak dowiedziono w części teoretycznej niniejszej pracy, jod jest pierwiastkiem rozpuszczalnym w wodzie i wrażliwym na podwyższoną temperaturę, a jego straty w trakcie

gotowania są znaczące i mogą wynosić 20-50% zawartości przed zastosowanie obróbki termicznej. W związku z tym, w celu dokładniejszego oszacowania poziomu pokrycia RDA jodu z soli kuchennej jodowanej, respondenci zostali zapytani o etap obróbki kulinarnej, w którym dodają sól do wody (Wykres 4) np. na makron lub ziemniaki. Do wyboru zaproponowano określenia: „pod koniec podgrzewania”, „w połowie podgrzewania”, „na początku podgrzewania wody” lub „nie dodają soli do gotowania”. Potwierdzono, że ponad 90% kobiet jak i mężczyzn deklarujących stosowanie diety wegańskiej dodaje sól jodowaną na początku obróbki cieplnej, co powoduje największe straty wprowadzonego jodu. Wśród kobiet deklarujących dietę zwyczajową dodawanie soli na początku ogrzewania potraw deklarowało 26% a wśród mężczyzn 56%.



Wykres 4. Etap dodawania soli do potraw podczas gotowania wśród kobiet i mężczyzn stosujących dietę wegańską i dietę zwyczajową w wieku 18–80 lat z Polski. (Zaremba i in., 2023)

PODSUMOWANIE

Badanie wykazało, że jedynie 50% wszystkich respondentów deklarowało spożycie produktów będących źródłem jodu na poziomie pozwalającym pokryć zalecane dzienne spożycie (RDA). Ponadto dotyczyło to osób deklarujących dietę „zwyczajową”.

Potwierdzono, że pokrycie RDA dla jodu wśród osób deklarujących dietę wegańską było niższe niż wśród osób na diecie zwyczajowej. Wykazano zależność pomiędzy rodzajem diety a poziomem pokrycia RDA dla jodu. Około 80% ankietowanych kobiet na diecie wegańskiej deklarowało spożycie produktów żywnościowych i soli jodowanej na poziomie pozwalającym na pokrycie RDA dla jodu na poziomie poniżej 41%. W najniższym stopniu potwierdzono zależność pomiędzy wiekiem ankietowanych.

Stwierdzono, że sól jodowana była głównym źródłem jodu w diecie niezależnie od badanej grupy. Jednak podaż jodu z tego źródła była niższa wśród wegan, zwłaszcza wśród kobiet. Wynikało to z niższego spożycia soli jodowanej oraz niekorzystnych nawyków

kulinarnych związanych ze stosowaniem soli w gospodarstwie domowym (np. dodawanie soli na początku obróbki kulinarnej) i spożywania mniejszych porcji posiłków.

Wykazano, że roślinne alternatywy produktów mlecznych oraz mięsa dostępne na polskim rynku nie stanowiły dobrego źródła jodu dla badanej grupy osób na diecie wegańskiej mimo wysokiego poziomu ich spożycia. Wynikało to z faktu, że wspomniane produkty wegańskie nie były wzbogacane w jod. Uzyskane wyniki badań potwierdziły także niskie spożycie glonów i ich przetworów. Badania innych autorów również donoszą, że na ten moment większość produktów wegańskich nie jest wzbogacana w jod, a konsumenci nie są świadomi zagrożenia i nie podejmują działań w celu uzupełnienia niedoborów jodu, jak to się dzieje np. z witaminą B₁₂ (Dineva i in., 2021; E. Eveleigh i in., 2022; Fallon, Dillon, 2020). Mając na uwadze powyższe obserwacje należy rozważyć możliwości wprowadzenia do jadłospisu, zwłaszcza osób na diecie wegańskiej produktów mogących stanowić stabilne i chętnie spożywane źródło jodu.

Podsumowując hipoteza szczegółowa **H1**: Osoby na diecie wegańskiej są zagrożone niedoborem jodu, ze względu na niższy stopień pokrycia zapotrzebowania na jod z diety, w stosunku do osób na diecie zwyczajowej, została potwierdzona dla badanej populacji.

*Powyższy rozdział został opracowany na podstawie publikacji: Zaremba A., Gramza-Michałowska, A., Pal, K., Szymandera-Buszk, K. (2023): The Effect of a Vegan Diet on the Coverage of the Recommended Dietary Allowance (RDA) for Iodine among People from Poland. *Nutrients* 15, 1163. <https://doi.org/10.3390/nu15051163>*

3.2. Wybór warzyw mogących stanowić matryce dla soli jodu w profilaktyce jodowej – preferencje grupy docelowej (opracowanie własne)

Po zidentyfikowaniu grupy docelowych odbiorców, zagrożonych niedoborem jodu ze względu na niskie spożycie tego pierwiastka, celem kolejnego etapu badań było wybranie odpowiedniej matrycy dla soli jodu.

Zdecydowano się na warzywa ze względu na ich wysoką wartość odżywczą i bioaktywną, niską kaloryczność oraz wciąż zbyt niskie ich spożycie (Wallace i in., 2020). Warzywa, które miałyby stanowić matrycę dla jodu, powinny charakteryzować się nie tylko odpowiednią wartością odżywczą, ale także wysokim poziomem spożycia wśród grupy docelowej. Ponadto ich wzbogacanie w jod nie powinno rodzić obaw wśród odbiorców, gdyż mogłoby to zniechęcić ich do zakupu produktu z dodatkiem warzywnych matryc jodu.

W związku z powyższym postawiono hipotezę szczegółową **H2**. Istnieje zależność pomiędzy dietą, płcią i wiekiem ankietowanych oraz częstością spożycia warzyw a nastawieniem do fortyfikowania ich jodem.

METODYKA

Kwestionariusz ankietowy

Weryfikację hipotezy H2 przeprowadzono za pomocą badań ankietowych. Do badań wykorzystano zwalidowany autorski kwestionariusz przedstawiony w publikacji A1. W tej części badań analizie poddano pytania o częstość spożycia poszczególnych rodzajów warzyw oraz odpowiedź respondentów na pytanie „Czy spożywałby Pan/spożywałaby Pani wymienione produkty, gdyby były wzbogacane w jod?”.

Grupa badana

Dobór grupy badanej był celowy, nieprobabilistyczny, ze wskazaniem osób deklarujących stosowanie diety uwzględniającej spożycie produktów pochodzenia zwierzęcego i roślinnego „dieta zwyczajowa” oraz diety uwzględniającej spożycie wyłącznie żywności pochodzenia roślinnego „dieta wegańska”. Sposób doboru grupy został szczegółowo opisany w publikacji A1 oraz w punkcie 3.1 niniejszej pracy.

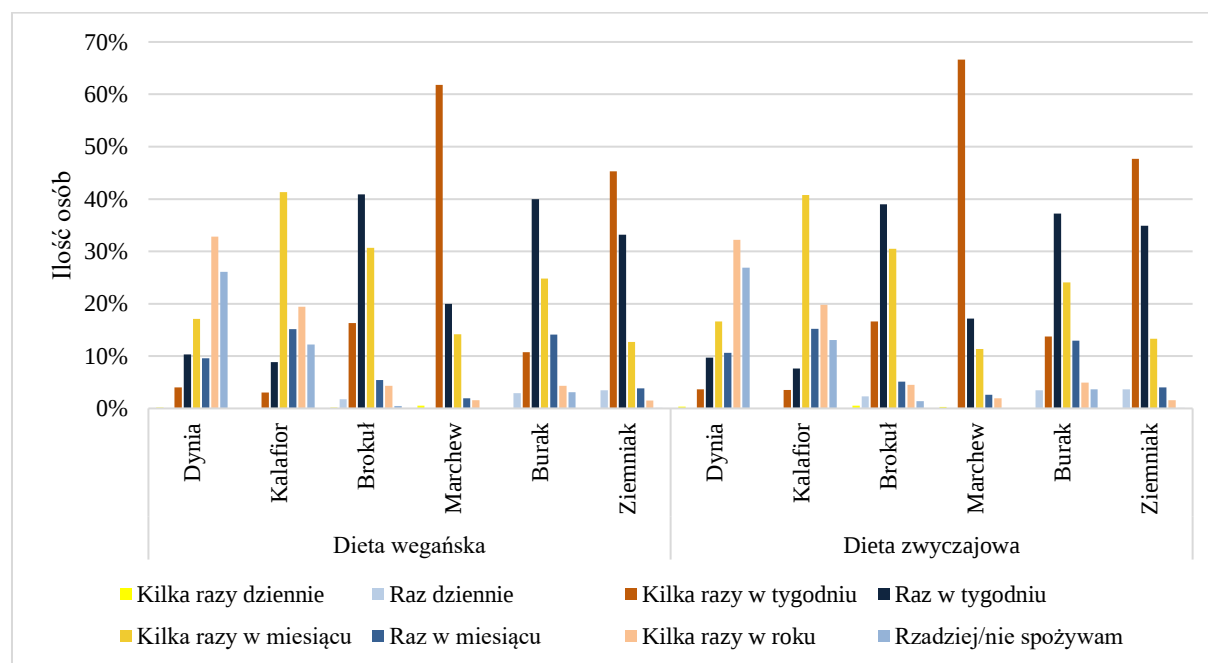
Analiza statystyczna

Analiza statystyczna została przeprowadzona za pomocą oprogramowania STATISTICA™ PL 13.3 (StatSoft, Kraków, Polska). Przeprowadzono analizę, aby porównać średnie dzienne spożycie warzyw w obrębie grup przy poziomie istotności $p < 0,05$. Wykonano

również analizę siły związku predyktorów (wiek, płeć i rodzaj diety) na poziom przyzwolenia na wzbogacanie w jod warzyw najczęściej spożywanych przez grupę badaną.

OMÓWIENIE WYNIKÓW

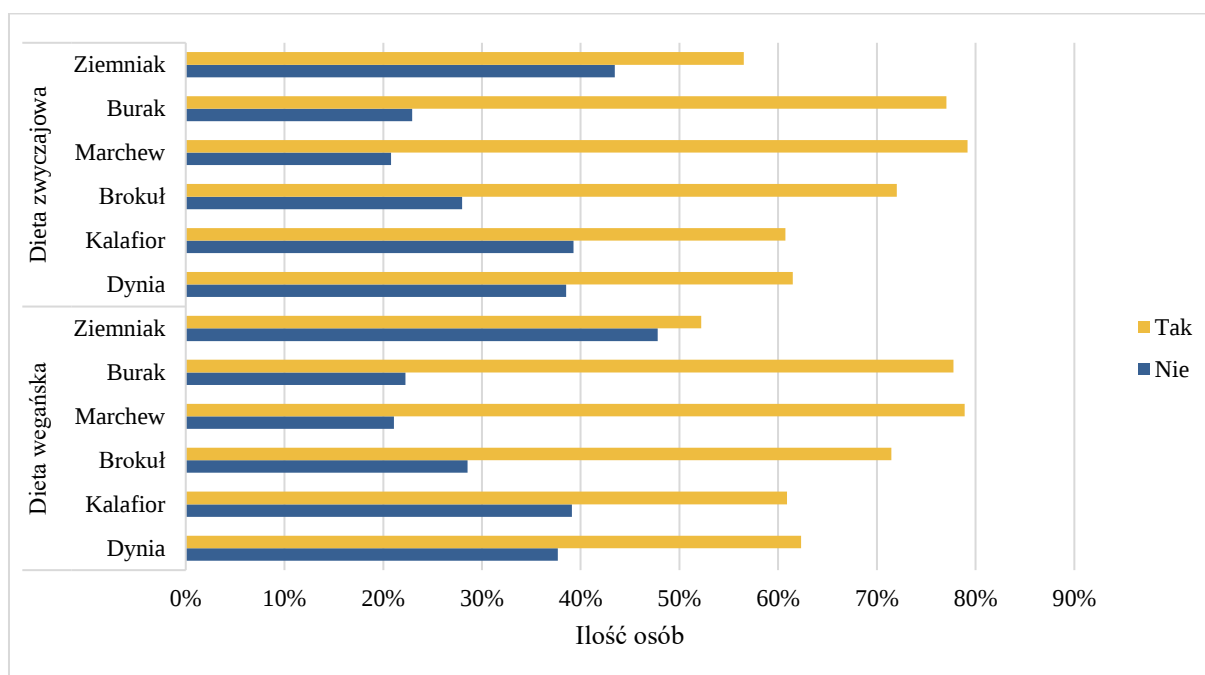
Charakterystykę deklarowanej częstości spożycia analizowanych warzyw przedstawiono na Wykres 5. Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że najczęściej spożywanymi w grupie osób ankietowanych warzywami były marchew, ziemniak, dynia, brokuł, kalafior i burak. Warzywami spożywanymi najczęściej, zarówno przez osoby na diecie wegańskiej jak i na diecie zwyczajowej, były marchew i ziemniak. Osoby badane deklarowały ich spożycie raz w tygodniu lub częściej odpowiednio 82% i 84% dla marchwi oraz 82% i 86% dla ziemniaków. Z kolei najrzadziej spożywanym warzywem, zarówno przez osoby na diecie wegańskiej jak i na diecie zwyczajowej, była dynia. Respondenci zazwyczaj deklarowali jej spożycie kilka razy w roku (33% i 32%) lub rzadziej (26% i 27%).



Wykres 5. Częstość [%] spożycia wybranych warzyw wśród kobiet i mężczyzn stosujących dietę wegańską i dietę zwyczajową w wieku 18–80 lat z Polski. (Opracowanie własne)

Wykres 6 przedstawia dane dotyczące rozkładu [%] odpowiedzi respondentów na pytanie „Czy spożywałby Pan/spożywałaby Pani wymienione produkty, gdyby były wzbogacane w jod?”. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że respondenci obu grup deklarowali pozytywne nastawienie do wzbogacenia wskazanych warzyw w jod. Jedynie wobec wzbogacania w jod ziemniaków mniej liczna grupa deklarowała swoje przyzwolenie. W ich przypadku aż 48% osób na diecie wegańskiej i 43% osób na diecie zwyczajowej zadeklarowało, że nie chciałyby spożywać ziemniaków wzbogaconych w jod. Najwięcej osób wskazało swoją

pozytywną deklarację wobec wzbogacania marchwi (79% w grupie osób na diecie wegańskiej i zwyczajowej), buraka (odpowiednio 78% i 79%) i brokułu (71% i 72%).



Wykres 6. Udział [%] osób deklarujących chęć spożywania warzyw wzbogaconych w jod, według produktów, wśród kobiet i mężczyzn stosujących dietę wegańską i dietę zwyczajową w wieku 18–80 lat z Polski. (Opracowanie własne)

Przeprowadzono ponad to analizę wariancji (siła wpływu) dla istotności predyktorów (wiek, płeć, wykształcenie) wpływających na chęć badanych osób do spożywania wzbogaconych w jod warzyw (Tabela 3). Analiza statystyczna wykazała, że wiek nie był czynnikiem istotnie statystycznie wpływającym na deklarowaną chęć spożywania wszystkich badanych warzyw wzbogaconych w jod ($p > 0,05$). Podobnie dieta nie była statystycznie istotnym czynnikiem ($p > 0,05$). Wobec fortyfikacji jodem marchwi pozytywne nastawienie wykazało 79% zarówno osób deklarujących dietę wegańską jak i zwyczajową (Wykres 6). Pozytywne nastawienie do fortyfikowania jodem kalafiora wskazało 61% osób deklarujących dietę wegańską i 79% dietę zwyczajową. Podobnie wobec fortyfikacji jodem brokułu i buraka ponad 70% osób deklarujących dietę wegańską jak i zwyczajową wykazało pozytywne nastawienie. Wyjątkiem było wskazanie pozytywnej deklaracji spożycia ziemniaków fortyfikowanych jodem, gdzie chęć spożywania takich produktów wskazało 52% osób deklarujących dietę wegańską i 57% dietę zwyczajową, a przy tym siła związku z dietą była istotna statystycznie ($F=4,126$, $p=0,042$).

W wyniku analizy wariancji stwierdzono, że płeć była czynnikiem najmocniej wpływającym na chęć spożywania wzbogaconych w jod brokułów ($F=17,813$, $p < 0,000$), dyni

($F=16,353$, $p=0,000$), kalafiora ($F=24,133$, $p<0,000$) i ziemniaków ($F=236,505$, $p<0,000$). Analiza siły związku pomiędzy płcią ankietowanych osób a pozytywną deklaracją wobec spożywania fortyfikowanego jodem buraka wykazała podobnie statystycznie istotną zależność, ale niższą w porównaniu do innych analizowanych warzyw ($F=6,707$, $p=0,010$), a dla marchwi zależność ta była nieistotna statystycznie ($p=0,561$). Pozytywne nastawienie do fortyfikowania jodem warzyw zdecydowanie częściej deklarowały kobiety (dynia 66% kobiet i 58% mężczyzn, kalafior 67% kobiet, 56% mężczyzn, brokuł 76% kobiet, 68% mężczyzn). Szczególnie znaczącą różnicę wykazała analiza danych dla ziemniaka, gdzie pozytywne nastawienie do fortyfikowania go jodem wskazało 67% kobiet i 39% mężczyzn. Podobny poziom pozytywnego nastawienia między przedstawicielami obu płci wykazała analiza deklaracji chęci spożywania fortyfikowanej w jod marchwi (80% kobiet i 79% mężczyzn). Wyjątkiem był burak wobec którego fortyfikację jodem pozytywne odbierało 80% mężczyzn i 75% kobiet.

Tabela 3. Istotność statystyczna predyktorów analiza wariancji dla deklarowanej chęci spożywania warzyw wzbogaconych w jod wśród respondentów z Polski. (Opracowanie własne)

Wariant	SS*	df	MSE	F	p
Burak					
Dieta	0,04	1	0,04	0,15	0,69
Płeć	1,67	1	1,67	6,71	0,01
Wiek	0,17	1	0,17	0,06	0,81
Brokuł					
Dieta	0,02	1	0,02	0,08	0,77
Płeć	4,42	1	4,42	17,81	0,00
Wiek	5,31	1	5,31	1,77	0,18
Dynia					
Dieta	0,04	1	0,04	0,17	0,68
Płeć	4,06	1	4,06	16,35	0,00
Wiek	0,63	1	0,63	0,21	0,65
Marchew					
Dieta	0,00	1	0,01	0,03	0,86
Płeć	0,08	1	0,08	0,34	0,56
Wiek	0,55	1	0,55	0,18	0,67
Kalafior					
Dieta	0,00	1	0,00	0,01	0,93
Płeć	5,97	1	5,97	24,13	0,00
Wiek	1,27	1	1,27	0,42	0,51
Ziemniak					
Dieta	1,03	1	1,030	4,13	0,04
Płeć	53,43	1	53,43	236,50	0,00
Wiek	0,59	1	0,59	0,20	0,66

Objaśnienia: SS – sumy kwadratów; df – liczba stopni swobody; MSE – średnia suma kwadratów; F – wartość testu F; p – poziom prawdopodobieństwa

PODSUMOWANIE

Dzięki analizie statystycznej uzyskanych wyników stwierdzono, że w grupie badanej najczęściej spożywanymi warzywami były brokuł, burak, dynia, kalafior, ziemniak oraz marchew.

Mimo bardzo wysokiego poziomu deklarowanego spożycia ziemniaka nie powinien on być wykorzystany jako matryca dla jodu, ponieważ analiza statystyczna uzyskanych wyników wykazała wysoki poziom niechęci badanych osób do spożywania tego warzywa po wzbogaceniu w jod. Uzyskane wyniki potwierdziły wysoką akceptację ankietowanych osób (u ponad 60%) wobec spożywania pozostałych warzyw (marchew, dynia, kalafior, brokuł, burak) fortyfikowanych w jod. Dotyczyło to zarówno osób deklarujących dietę wegańską jak i zwyczajową.

Analiza siły związku wykazała, że deklarowana dieta oraz wiek nie miały statystycznie istotnego wpływu na deklarowaną chęć spożywania warzyw wzbogaconych w jod. Jedynym istotnym predykatorem była płeć, zwłaszcza w wyrażeniu pozytywnej opinii wobec fortyfikacji jodem ziemniaków ($F=236,505$, $p < 0,000$).

Na podstawie analizy statystycznej uzyskanych wyników częstości spożycia oraz deklarowanej chęci spożywania warzyw wzbogaconych w jod, do dalszej części badań włączono dynię, buraka, brokuł, kalafiora oraz marchew. Wykluczono natomiast ziemniaka.

Podsumowując, hipoteza szczegółowa H2 Istnieje zależność pomiędzy dietą, płcią i wiekiem ankietowanych oraz częstością spożycia warzyw a nastawieniem do fortyfikowania ich jodem nie została potwierdzona w pełni. Uzyskane wyniki potwierdziły zależność pomiędzy płcią ankietowanych a nastawieniem wobec fortyfikacji takich warzyw jak; ziemniaki, dynia, marchew, kalafior i brokuły. Nie potwierdzono zależności wobec nastawienia do fortyfikacji jodem buraka. Nie wykazano także zależności pomiędzy dietą i wiekiem ankietowanych osób a nastawieniem wobec fortyfikacji badanych warzyw. Wyjątkiem było nastawienie względem fortyfikacji ziemniaka, gdzie wykazano istotną statystycznie siłę związku z dietą ($F=4,126$, $p= 0,042$). Potwierdzono także brak zależności pomiędzy wskazywaną częstością spożycia badanych warzyw a wyrażeniem pozytywnej opinii wobec ich fortyfikacji.

Powyższy rozdział został opracowany na podstawie niepublikowanych wyników badań własnych.

3.3. Wybór optymalnych warunków impregnacji roślinnych matryc solami jodu. (A2)

Na podstawie uzyskanych wyników dotyczących wyboru grupy docelowych odbiorców oraz ich preferencji jako matryce dla jodu wybrano dynię, buraka, brokuły, marchew i kalafiora.

Związki jodu wprowadzane do żywności mogą być mało stabilne z powodu wrażliwości tego pierwiastka na dostęp światła, temperaturę i wilgotność. Czynniki te mogą być z kolei związane ze zmianami stabilności i okresu przydatności do spożycia produktu wzbogaconego w jod. W związku z powyższym, przy planowaniu procesu wzbogacania żywności w jod kluczowe jest określenie optymalnego czasu i stopnia uwodnienia matrycy. Dzięki temu możliwe będzie równomierne rozprowadzanie jodu, przy jednoczesnym zachowaniu jego wysokiej stabilności podczas procesów związanych z przechowywaniem lub produkcją żywności. Metoda powinna być prosta, tania i bezpieczna, a przy tym pozwalać na osiągnięcie wysokiej stabilności jodu w trakcie produkcji oraz przechowywania warzywnych matryc dla jodu.

Dlatego celem dalszych badań była weryfikacja dwóch hipotez:

- **H3.** Typ nośnika jodu (KI, KIO₃) oraz matryca (rodzaj warzywa) dla jodu wpływają na stabilność jodu naniesionego podczas poszczególnych etapów impregnacji matrycy oraz w trakcie jej dalszego przechowywania.
- **H4.** Zmienne warunki impregnacji (stopień uwodnienia, temperatura i czas procesu) warzyw jodem wpływają na odtwarzalność naniesionego jodu oraz na jego stabilność podczas późniejszego przechowywania impregnowanych suszy warzywnych.

Jako formę jodu przyjęto jodek potasu (KI) oraz jodan potasu (KIO₃), które są stosowane jako nośnik jodu w soli jodowanej (Rozporządzenie Ministra Zdrowia z Dnia 16.09.2010 r. w Sprawie Substancji Wzbogacających Dodawanych Do Żywności., 2010). Doświadczalnie należało ustalić szczegółowe warunki impregnacji odpowiednie dla badanych matryc.

METODYKA

Materiał do badań stanowiły surowe warzywa: dynia (*Cucurbita pepo* L.), kalafior (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.), brokuł (*Brassica oleracea* L.) i marchew (*Daucus carota* L.), zakupione w handlu detalicznym w okresie 09-10.2021r. Jako źródło jodu wykorzystano jodek (KI) i jodan potasu (KIO₃) (Merck, Darmstadt, Niemcy).

Ugotowane warzywa zostały poddane procesowi impregnacji jodem. Przeprowadzenie procesu impregnacji polegało na przygotowaniu roztworów wodnych KI oraz KIO₃ i dodaniu

ich do badanych warzyw w następujących stopniach uwodnienia (m/v): 1:1, 1:2, 1:4. Następnie powstałe preparaty poddano procesowi kondycjonowania, który polegał na umieszczeniu ich w stałych warunkach przechowywania ($^{\circ}\text{C}$) przez określony czas (h). Przyjęto następujące zmienne procesu kondycjonowania:

- Temperatura: 4, -21, -76 $^{\circ}\text{C}$
- Czas: 1, 2, 6, 12 h

Po wyznaczonym czasie kondycjonowania, wszystkie warianty badanych preparatów zostały umieszczone w -76 $^{\circ}\text{C}$ na 10h. Po tym czasie zostały poddane liofilizacji.

Ocenę zawartości jodu wykonano w próbkach bezpośrednio po wymieszaniu, przed suszeniem oraz po suszeniu. Dodatkowo uwzględniono wariant skuteczności badanych zmiennych fortyfikacji w próbkach wysuszonych podczas ich przechowywania. Próbkę suszy przechowywano w temperaturze $21 \pm 1^{\circ}\text{C}$ przez 230 dni. Zawartość jodu była oznaczana w 1, 30, 60, 90, 120, 150, 180 i 230 dniu przechowywania (Szymandera-Buszką i in., 2021; Szymandera-Buszką, Waszkowiak, i in., 2021).

Do przeprowadzenia doświadczeń wykorzystano następujące metody badawcze:

- Ocena stabilności jodu – oznaczenie jodu ogólnego i nieorganicznego metodą makrochemiczną z tiocyjanianem potasu (Kühne i in., 1993; Moxon, Dixon, 1980),
- Oznaczanie suchej masy (International Organization for Standardization, 2018),
- Parametry barwy $L^*a^*b^*$ (Siejak i in., 2021)

Szczegółowy opis obróbki wstępnej warzyw, przeprowadzenia procesu impregnacji oraz zastosowanych metodyk badawczych został zamieszczony w publikacji A2.

Analiza statystyczna

Do przeprowadzenia analiz statystycznych wykorzystano oprogramowanie STATISTICATM PL 13.3 (StatSoft, Kraków, Polska) i oprogramowanie R (wersja 4.1 z pakietami FactoMineR v.2.4 i factoextra v.1.0.7). Za ich pomocą wykonano analizę głównych składowych (PCA) i obliczenia istotnych różnic między średnimi ($p < 0,05$, analiza wariancji ANOVA), testem Tukey'a o wielu zakresach. Zawartość jodu w badanych wariantach preparatów analizowano w 6 próbkach (2 niezależne próbki i 3 pomiary dla każdej próbki). Hipotezy testowano przy $\alpha = 0,01$. Aby przewidzieć dynamikę zmian zawartości jodu w nośnikach podczas przechowywania użyto wartości okresu półtrwania ($T_{1/2}$). Jest to termin opisujący czas, w którym początkowa zawartość jodu zmniejsza się o połowę. Okres półtrwania obliczono z wykładniczego trybu zaniku (Szymandera-Buszką, Waszkowiak, i in., 2021).

Dokładność modeli oszacowano przy użyciu współczynnika determinacji (R^2) i średniego błędu kwadratowego (RMSE). Poziom istotności dla wszystkich analiz ustalono na 0,05.

OMÓWIENIE WYNIKÓW

Wykonane analizy pozwoliły na dokonanie obserwacji w trzech obszarach: parametry barwy $L^*a^*b^*$, zawartość jodu po fortyfikacji oraz po przechowywaniu.

Parametry barwy $L^*a^*b^*$

Na podstawie uzyskanych wyników wykazano, że dodatek jodu na poziomie do 0,23 mg kg^{-1} , niezależnie od wybranej formy (KI/ KIO_3) nie wpłynął na parametry barwy ($L^*a^*b^*$) fortyfikowanych warzyw. Niezależnie od zastosowanych warunków impregnacji, różnice w parametrach barwy w obrębie tych samych warzyw były statystycznie nieistotne.

Zawartość jodu po procesie fortyfikacji

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że analizowane warzywa mogą stanowić stabilną matrycę dla soli jodu, niezależnie od zastosowanej formy jodu (KI, KIO_3) oraz warunków impregnacji. Wykazano jednak zmienność odtwarzalności jodu po procesie impregnacji zależną od warunków impregnacji. Zmienność zawartości jodu po fortyfikacji w zmiennych warunkach (temperatura, stopień uwodnienia i czas) wynosiła od 78% do 97%. Najniższy poziom odtwarzalności jodu zaobserwowano w próbkach marchwi wzbogaconej KI, po uwodnieniu w stosunku 1:4 (m/v) w temperaturze 4°C przez 12 h. Natomiast najwyższą odtwarzalność jodu stwierdzono w próbkach dyni, które zostały wzbogacone przy użyciu KIO_3 w temperaturze -76 °C i warunkach uwodnienia 1:1 (m/v).

Analiza kowariancji (Tabela 4) wykazała, że biorąc po uwagę wszystkie czynniki predykcyjne wpływające na końcową odtwarzalność jodu w suszu, można przyjąć następującą kolejność wpływu: temperatura impregnacji > stopień uwodnienia > forma chemiczna jodu.

Najniższą odtwarzalność jodu wykazano dla próbek impregnowanych w temperaturze 4°C. Ponadto wykazano, że im dłużej próbki były impregnowane w tej temperaturze (6 i 12h), tym większe starty jodu odnotowywano. Można zatem uznać, że proces kondycjonowania w temp. 4°C nie jest korzystny dla zachowania wysokiej odtwarzalności jodu w suszu. Stwierdzono wyższą odtwarzalność jodu dla prób, które po procesie impregnacji od razu zostały poddane mrożeniu (temp. -21°C lub -76 °C).

Biorąc pod uwagę wpływ stopnia uwodnienia podczas nanoszenia jodu, analiza uzyskanych wyników pozwoliła stwierdzić, że najniższą odtwarzalność jodu uzyskano w próbkach o stopniu uwodnienia 1:4 (m/v). Niezależnie od temperatury impregnacji

odtworzalność jodu w próbce była niższa o 11% w porównaniu do próbek impregnowanych przy uwodnieniu 1:1 (m/v).

Czas impregnacji również był czynnikiem wpływającym na odtwarzalność jodu w suszu po impregnacji, jednak siła jego wpływu była uzależniona od temperatury i stopnia uwodnienia. Do czynników wpływających w największym stopniu na obniżenie odtwarzalności naniesionego jodu należy zaliczyć warunki temperatury 4°C i uwodnienia 1:4 (m/v), gdzie odtwarzalność jodu zmniejszała się wraz z wydłużaniem się czasu namaczania, niezależnie od zastosowanego nośnika jodu oraz matrycy. Z drugiej strony, dla próbek impregnowanych w temp. -76°C wpływ czasu namaczania na odtwarzalność jodu był statystycznie nieistotny, niezależnie od stopnia uwodnienia, nośnika i matrycy jodu.

Po przeprowadzeniu analizy wpływu formy jodu na jego odtwarzalność po impregnacji, wykazano, że KI charakteryzuje się większą wrażliwością na warunki impregnacji. Najniższą odtwarzalność jodu w tej formie chemicznej zaobserwowano w przypadku uwodnienia 1:4 (m/v) i temperatury fortyfikacji 4°C, gdzie różnice sięgały nawet 12% w porównaniu do próbek impregnowanych w tych samych warunkach, ale z zastosowaniem KIO₃.

Analiza uzyskanych wyników nie potwierdziła statystycznie istotnego wpływu rodzaju zastosowanego warzywa jako matrycy dla jodu na jego odtwarzalność po procesie fortyfikacji (Tabela 4). Jedynie dla warunków impregnacji związanych z uwodnieniem 1:4, temperaturą fortyfikacji 4 °C i czasem impregnacji dłuższym niż 6 h, stwierdzono istotny wpływ rodzaju wzbogaconego warzywa ($r > 0,985$). Największe straty potwierdzono dla próbek marchwi, a najniższe dla dyni.

Tabela 4. Istotność statystyczna predyktorów modeli kowariancji dla zmian zawartości jodu w wybranych warzywach podczas impregnacji. (Zaremba i in., 2022)

Wariant	SS*	df	MSE	F	p
Temperatura	0,676	2	0,338	80	0,000
Rodzaj nośnika	0,253	1	0,253	44,60	0,000
Czas	0,269	3	0,090	15,80	0,000
Uwodnienie	0,125	2	0,063	10,20	0,000
Rodzaj warzywa	0,017	3	0,006	0,80	0,473

Objaśnienia: SS – sumy kwadratów; df – liczba stopni swobody; MSE – średnia suma kwadratów; F – wartość testu F; p – poziom prawdopodobieństwa

Zawartość jodu w trakcie przechowywania fortyfikowanych matryc

Skuteczność fortyfikacji oceniana jest nie tylko na podstawie odtwarzalności wprowadzonego składnika po procesie, ale także na podstawie trwałości tego składnika w trakcie przechowywania. Dzięki temu możliwe jest zwiększenie efektywności wykorzystania

badanego składnika. Analiza stabilności składnika, naniesionego w zmiennych warunkach impregnacji, podczas przechowywania pozwoli na wybranie dedykowanego okresu przechowywania suszy przygotowanych zmiennymi metodami. Może mieć to szczególne znaczenie w efektywności profilaktyki jodowej. W związku z tym kolejnym etapem była ocena zawartości jodu w trakcie przechowywania jodowanych suszy warzywnych. Przyjęto stałe warunki przechowywania (21°C) dla wszystkich badanych próbek, przez cały okres trwania doświadczenia.

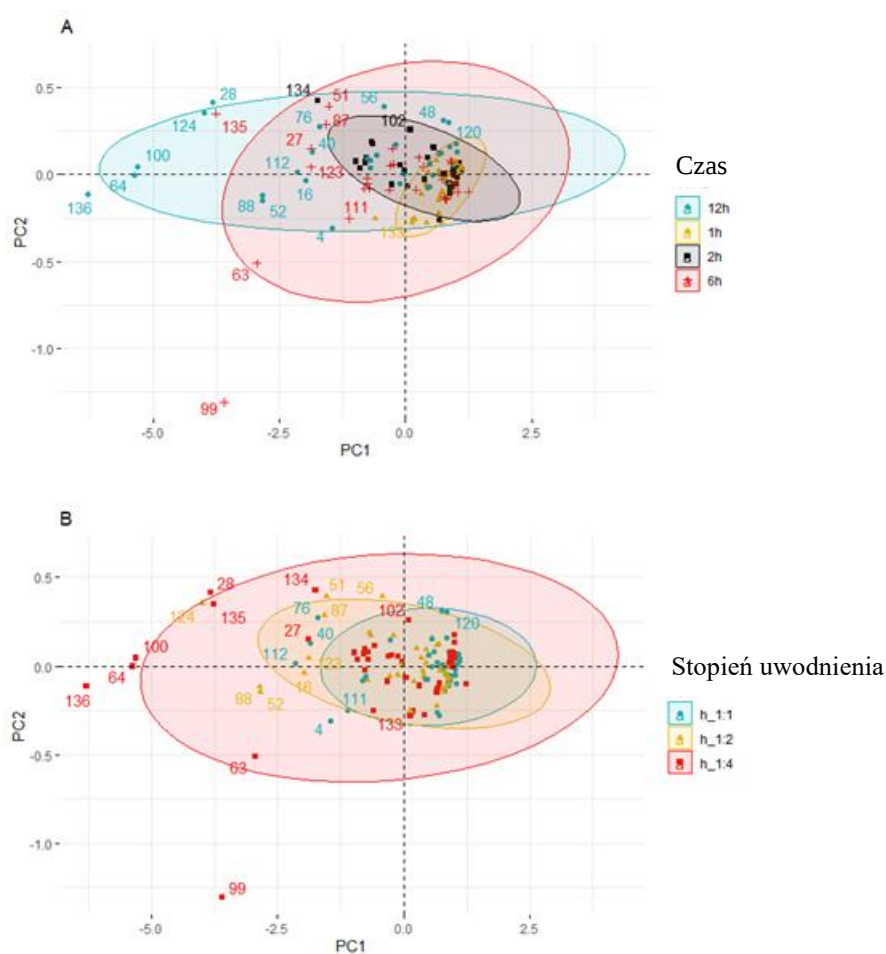
W celu określenia dynamiki zmian zawartości jodu w trakcie przechowywania, obliczono okres półtrwania ($T_{1/2}$). Analiza ta wykazała, że wszystkie zmienne warunki impregnacji, tj. temperatura, stopień uwodnienia i czas, znacząco wpływały na stabilność jodu naniesionego na warzywne matryce. Zawartość jodu (% w stosunku do ilości po wysuszeniu) we wzbogaconych warzywach po 230 dniach przechowywania różniła się statystycznie istotnie i wynosiła od 83 do 67%. Taka stabilność w trakcie przechowywania może zostać uznana za wysoką, gdyż jest wyższa niż stabilność jodu naniesionego na chlorek sodu (Szymandera-Buszk, Waszkowiak, i in., 2021).

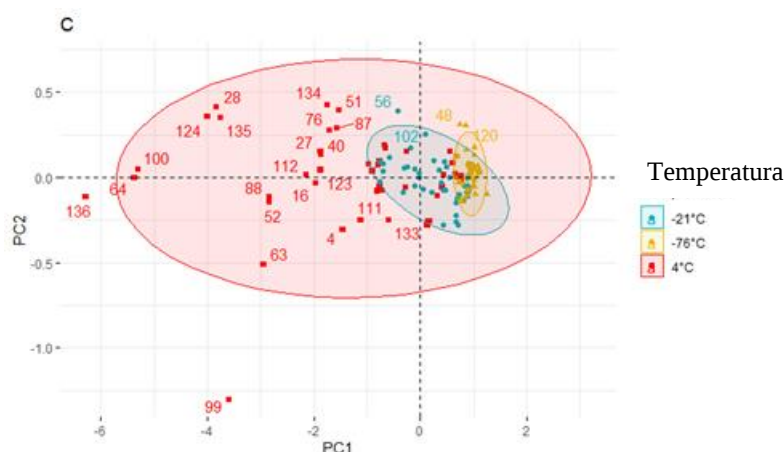
Na podstawie analizy statystycznej potwierdzono, że im niższa temperatura impregnacji (−76 °C, −21 °C, 4 °C) i stopień uwodnienia (1;1, 1:2, 1:4 (m/v)) fortyfikowanych warzyw, tym wolniejsza dynamika utraty jodu podczas przechowywania suszy. Potwierdzono tym samym, że najbardziej niekorzystne warunki impregnacji (temp. 4°C, stopień uwodnienia 1:4 (m/v)) najsilniej wpływają na straty jodu w trakcie przechowywania, szczególnie przy zastosowaniu KI jako źródła jodu. Na podstawie analizy statystycznej uzyskanych wyników zawartości jodu w przechowywanych próbkach wcześniej fortyfikowanych w zmiennych warunkach temperaturowych przyjęto, że można warunki te uszeregować pod względem stopnia zachowania jodu w trakcie przechowywania, według kolejności (od najmniejszych strat): −76°C > −21°C > 4°C.

Ponadto, można stwierdzić, że dynamika przemian jodu była najwyższa dla próbek impregnowanych przy uwodnieniu 1:4 (m/v) i 4°C, niezależnie od formy zastosowanego jodu lub matrycy. Dodatkowym istotnym czynnikiem wpływającym na zawartość jodu w tym wariancie próbek był czas inkubacji. Wydłużenie czasu inkubacji do 12 h spowodowało zmniejszenie $T_{1/2}$ jodu do 20% (1:4 (m/v)) i 9% (1:2 (m/v)) podczas przechowywania. Podobnie jak w przypadku zawartości jodu po impregnacji, w próbkach poddanych temperaturze −76°C nie stwierdzono istotnego statystycznie wpływu czasu namaczania na stabilność jodu w trakcie przechowywania.

Czynnikiem najmniej wpływającym na zawartość jodu w badanych suszach w trakcie przechowywania, a jednocześnie wymagającym dalszych badań, był rodzaj matrycy. Rodzaj warzywa miał wpływ na stabilność jodu w trakcie przechowywania wyłącznie w wariancie próbek impregnowanych w temp. 4°C i uwodnieniu 1:4 (m/v). W tym przypadku zależność pomiędzy rodzajem analizowanego warzywa jako matrycy a zmieniającymi się warunkami można przedstawić w następujący sposób: dynia > kalafior = brokuł > marchew. Okresy półtrwania jodu ($T_{1/2}$) znacząco się różniły, szczególnie przy porównaniu dyni i marchwi, gdzie zmiany wynosiły nawet 20% w zależności od parametrów fortyfikacji.

Opisane zależności ilustruje Wykres 7 przedstawiający wynik rozkładu próbek w zależności od parametru impregnacji (czas, stopień uwodnienia i temperatura).





Wykres 7. Analiza głównych składowych (PCA) wykresu punktacji danych z zawartości KIO_3 i KI wprowadzonych na susze dyni, brokołu, kalafiora i marchwi fortyfikowanych z uwzględnieniem zmiennego czasu (A), stopnia uwodnienia (B) i temperatury (C) namaczania. (Zaremba, Waszkowiak, i in., 2022)

PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych doświadczeń ustalono, że badane warzywa (dynia, brokuły, kalafior i marchew) mogą być stosowane jako matryce dla soli jodu i stanowią dobrą alternatywę dla chlorku sodu, gdyż charakteryzują się wysoką odtwarzalnością jodu po suszeniu do 98%.

Całkowita odtwarzalność jodu po liofilizacji próbek była najsilniej skorelowana ze stopniem uwodnienia ($r = 0,903$) i temperaturą procesu impregnacji ($r = 0,99$). Ustalono najlepsze i najbardziej niekorzystne warunki impregnacji jodkiem i jodanem potasu – najwyższą odtwarzalnością jodu charakteryzowały się próbki impregnowane w temperaturze -76°C i uwodnieniu w stosunku 1:1 (m/v), a najniższą próbki impregnowane w temperaturze 4°C przez 6 h przy uwodnieniu 1:4 (m/v). Jednocześnie nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic w odtwarzalności jodu w próbkach w zależności od rodzaju warzywa. Jedynym wyjątkiem były warunki impregnacji: uwodnienie 1:4 (m/v), temperatura fortyfikacji 4°C oraz czas impregnacji 6h i dłuższy, gdzie stwierdzono istotny wpływ rodzaju wzbogaconego warzywa ($r > 0,985$). W tym wypadku największe straty potwierdzono dla próbek marchwi, a najniższe dla dyni.

Potwierdzono również zależność pomiędzy badanymi warunkami fortyfikacji a późniejszą stabilnością jodu naniesionego na badane matryce.

Stwierdzono, że wyższą stabilnością jodu naniesionego na badane matryce charakteryzowały się susze wzbogacone w KIO_3 niż KI. Ponad to ustalono, że naniesienie jodu

na badane susze nie wpłynęło na parametry barwy warzyw, niezależnie od użytego nośnika jodu (KI, KIO₃) oraz parametrów fortyfikacji.

Podsumowując, hipoteza szczegółowa H3 Typ nośnika jodu (KI, KIO₃) oraz matryca (rodzaj warzywa) dla jodu wpływają na stabilność jodu naniesionego podczas poszczególnych etapów impregnacji matrycy oraz w trakcie jej dalszego przechowywania została częściowo potwierdzona, gdyż potwierdzono wpływ typu nośnika jodu (KI, KIO₃) na jego stabilność podczas impregnacji oraz przechowywania badanych fortyfikowanych warzyw. Nie potwierdzono jednak wpływu rodzaju matrycy (dynia, brokuł, kalafior, marchew) na stabilność jodu podczas impregnacji oraz przechowywania badanych fortyfikowanych warzyw. Natomiast hipoteza H4 Zmienne warunki impregnacji (stopień uwodnienia, temperatura i czas procesu) warzyw jodem wpływają na odtwarzalność naniesionego jodu oraz na jego stabilność podczas późniejszego przechowywania impregnowanych suszy warzywnych, została całkowicie potwierdzona.

*Powyższy rozdział został opracowany na podstawie publikacji: Zaremba A., Waszkowiak K., Kmiecik D., Jędrusek-Golińska A., Jarzębski M., Szymandera-Buszk K. (2022): Selection of Optimal Impregnation Conditions of Vegetable Matrices With Iodine. *Molecules* 27, 3351. <https://doi.org/10.3390/molecules27103351>*

3.4. Właściwości przeciwutleniające wybranych warzyw fortyfikowanych jodem w postaci jodku potasu lub jodanu potasu. (A3 – A6)

Jodan potasu jako utleniacz oraz jodek potasu jako reduktor mogą oddziaływać na inne składniki żywności np. białka lub związki fenolowe. Może to spowodować nie tylko zmianę zawartości składników odżywczych, ale także innych cech produktu jak np. barwa czy właściwości antyoksydacyjne (Winger i in., 2008). Dodatki wprowadzane do żywności nie powinny wpływać negatywnie na cechy produktu. Dlatego biorąc pod uwagę fakt, że wiele badań potwierdziło właściwości przeciwutleniające analizowanych warzyw, kolejnym zadaniem badawczym było ustalenie optymalnej dawki w jakiej jod może zostać wprowadzony na warzywną matrycę, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej stabilności naniesionego jodu i aktywności przeciwutleniającej fortyfikowanego suszu w trakcie jego przechowywania. Na tym etapie badań należało wziąć pod uwagę właściwości substancji jakie służą do wzbogacania żywności w jod – jodek jest silnym środkiem redukującym, a jodan silnym środkiem utleniającym (Iwan i in., 2021).

W związku z powyższym, przeprowadzono doświadczenia mające na celu weryfikację hipotezy szczegółowej **H5**. Stężenie i rodzaj wprowadzonego nośnika jodu (KI, KIO₃) wpływa na aktywność przeciwutleniającą fortyfikowanej matrycy (marchew, dynia, brokuł, kalafior, burak).

METODYKA

Material

Materiał do badań stanowiły surowe warzywa zakupione w handlu detalicznym: dynia (publikacja A3), burak (A4), kalafior (A6), brokuły (A5) i marchew (A6). Wybrane warzywa analizowano również z uwzględnieniem rodzaju odmiany:

- Dynia odmiany (*Cucurbita pepo* var. *Spaghetti* i *Delicata* oraz *Cucurbita moschata* var. *Butternut Squash*, *Butterkin*, *Shishigatani*, *Butternut Orange* i *Muscat Provence*)
- Marchew odmiany Nantaise (*Daucus carota* L. var. *Nantaise*) i Rore Riesen (*Daucus carota* L. var. *Rore Riesen*)
- Kalafior odmiany David (*Brassica oleracea* var. *Botrytis* L., var. *David*) i Bora (*Brassica oleracea* var. *Botrytis* L., var. *Bora*)
- Brokuł odmiany Cezar (*Brassica oleracea* var. *Botrytis italica*) i Sebastian (*Brassica oleracea* convar. *Botrytis* var. *cymosa*)

Jako źródło jodu wykorzystano jodek (KI) i jodan potasu (KIO₃) (Merck, Darmstadt, Niemcy).

Do zbadania aktywności przeciwutleniającej wykorzystano rodnik DPPH (2,2-difenylo-1-pikrylhydrazyl) (Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA), kationorodnik ABTS (2,20 -azino-bis(3-etylobenzotiazolino-6-sulfonowego) diamonium) (98%), (Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA) oraz Trolox (6-hydroksy2,5,7,8-tetrametylochromano-2-karboksylowy kwas) (97%) (Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA).

Metodyka

Warzywa zostały poddane wstępnej obróbce technologicznej wg. opisu zawartego w punkcie 3.3 niniejszej pracy. W kolejnym etapie dokonano ich homogenizacji i namaczania roztworami KI lub KIO₃ o temp. 18±2°C. Roztwory soli jodu dodawano w trzech podstawowych stężeniach jodu tj. 0,023mg kg⁻¹ (niska zawartość jodu w żywności), 0,23mg kg⁻¹ (naturalna zawartość jodu w żywności, pochodząca z soli jodowanej), 2,3mg kg⁻¹ (zawartość jodu w fortyfikowanych matrycach). Ponadto zdecydowano się na zbadanie dodatkowych stężeń jodu (0,77; 1,3; 3,0 mg kg⁻¹) w przypadku brokuła (A5) oraz kalafiora i marchwi (A6). Wykorzystane do badania warzywa różnych odmian z uwzględnieniem zastosowanych do ich impregnacji stężeń roztworów jodu przedstawia Tabela 5. Następnie próbki były impregnowane zgodnie z wcześniej ustaloną metodyką (publikacja A2), w warunkach: temp. namaczania –76°C, czas namaczania: 12h, stopień uwodnienia (m/v) 1:1. W przypadku dyni zdecydowano się dodatkowo zbadać próbki w uwodnieniu 1:2 (m/v). Następnie warzywa zostały poddane suszeniu metodą liofilizacji (do zawartości wody wynoszącej 4-5%) oraz homogenizacji.

Tabela 5. Odmiany warzyw wykorzystane w doświadczeniu z uwzględnieniem zastosowanych do impregnacji stężeń jodu (mg kg⁻¹). (Opracowanie własne)

Zastosowane stężenia jodu (mg kg ⁻¹)	Rodzaj i odmiana warzywa
0,023	dynia (odmiany Spaghetti i Delicata, Butternut Squash, Butterkin, Shishigatani, Butternut Orange i Muscat Provence), brokuł (odmiany Cezar i Sebastian), kalafior (odmiany David i Bora), marchew (odmiany Nantaise i Rore Riesen), burak (odmiany Czerwona Kula)
0,23	dynia (odmiany Spaghetti i Delicata, Butternut Squash, Butterkin, Shishigatani, Butternut Orange i Muscat Provence), brokuł (odmiany Cezar i Sebastian), kalafior (odmiany David i Bora), marchew (odmiany Nantaise i Rore Riesen), burak (odmiany Czerwona Kula)

0,77	brokuł (odmiany Cezar i Sebastian), kalafior (odmiany David i Bora), marchew (odmiany Nantaise i Rore Riesen)
1,3	brokuł (odmiany Cezar i Sebastian), kalafior (odmiany David i Bora), marchew (odmiany Nantaise i Rore Riesen)
2,3	dynia (odmiany Spaghetti i Delicata, Butternut Squash, Butterkin, Shishigatani, Butternut Orange i Muscat Provence), brokuł (odmiany Cezar i Sebastian), kalafior (odmiany David i Bora), marchew (odmiany Nantaise i Rore Riesen), burak (odmiany Czerwona Kula)
3,0	brokuł (odmiany Cezar i Sebastian), kalafior (odmiany David i Bora), marchew (odmiany Nantaise i Rore Riesen)

W celu określenia stabilności jodu naniesionego na badane preparaty w zmiennych stężeniach, próbki poddano przechowywaniu w szklanych słojach, bez dostępu światła (czarne szkło), w temperaturze $21 \pm 1^{\circ}\text{C}$ przez 320 dni. W badanych próbkach, bezpośrednio po suszeniu oraz podczas przechowywania, oznaczono zawartość jodu oraz wskaźniki aktywności przeciwutleniającej (DPPH[•] i ABTS^{•+}). Zawartość jodu w trakcie przechowywania była oznaczana w następujących dniach: 1, 60, 120, 180, 240 i 320 dzień przechowywania. Natomiast badanie aktywności przeciwutleniającej przeprowadzono bezpośrednio po suszeniu oraz po przechowywaniu przez 320 dni.

Do oznaczenia zawartości jodu wykorzystano fortyfikowane jodem susze badanych warzyw, natomiast do badania aktywności przeciwutleniającej ekstrakty przygotowane z tych suszy. Ekstrakty uzyskano w wyniku dwugodzinnej maceracji 80% etanolem (1:10 m/v). Szczegółowy opis przygotowania prób do badań znajduje się w publikacjach A3-A6.

Do przeprowadzenia doświadczeń wykorzystano następujące metodyki:

- Oznaczanie zawartości jodu ogólnego przeprowadzono metodą makrochemiczną z tiocyjanianem potasu (Kühne i in., 1993) oraz metodą kolorymetryczną (Moxon, Dixon, 1980)
- Aktywność przeciwutleniającą ekstraktów badano metodami neutralizowania kationorodnika ABTS (Re i in., 1999) oraz rodnika DPPH (Chu i in., 2000).

Szczegółowy opis przygotowania materiału oraz zastosowanych metodyk znajduje się w publikacjach A3-A6.

Analiza statystyczna

Do przeprowadzenia analiz statystycznych wykorzystano oprogramowanie STATISTICATM PL 13.3 (StatSoft, Kraków, Polska). Przeprowadzono analizę ANOVA ($p < 0,05$) oraz test Tukey'a. Dokładność modeli dynamiki zmian zawartości jodu w próbkach

podczas przechowywania oszacowano za pomocą współczynnika determinacji (R^2) i błędu średniokwadratowego (RMSE).

Szczegółowy opis przeprowadzonych analiz statystycznych i przyjęte poziomy istotności zostały opisane w publikacjach A3-A6.

OMÓWIENIE WYNIKÓW

Zawartość jodu

Analiza zawartości jodu naniesionego na badane warzywa wykazała wysoki odzysk jodu bezpośrednio po suszeniu zaimpregnowanych preparatów oraz po 320 dniach przechowywania, niezależnie od rodzaju warzywa i jego odmiany. Procentowa zawartość jodu w stosunku do próbek przed suszeniem wynosiła odpowiednio dla dyni 85–95% (po suszeniu) oraz 70%-83% (po 320 dniach przechowywania), buraka 83%-92% i 61%-76%, brokułu 87%-93% i 74%-79%, marchwi 68%-75% i 61%, kalafiora 70%-75% i 76%-80%. Po procesie impregnacji warzywa można by uszeregować według stopnia odzysku jodu w następujący sposób dynia > brokuł = burak > kalafior > marchew. Z kolei analiza tego samego parametru po przechowywaniu pozwoliłaby skonstruować następujący szereg: dynia > brokuł > burak > kalafior > marchew. Przy czym należy zauważyć, że zawartość jodu w marchwi była znacząco niższa w obu punktach pomiarowych w stosunku do pozostałych warzyw, gdzie różnice wynosiły kilka procent.

Analiza wariancji (jednokierunkowy test ANOVA) (Tabela 6) wykazała najsilniejszy, wśród badanych predyktorów, statystycznie istotny ($p < 0,05$) wpływ formy jodu na jego zawartość po suszeniu i po 320 dniach przechowywania. Obie formy jodu (KI, KIO_3) wykazały zdolność do gromadzenia jodu w dużych ilościach, przy czym wyższe stężenia jodu w badanych suszach odnotowano przy zastosowaniu KIO_3 niż KI. Analiza ta wykazała również statystycznie istotny ($p < 0,05$) wpływ odmiany warzywa na zawartość jodu po suszeniu i po przechowywaniu, przy czym najsilniejszy związek wykazano dla prób dyni, zarówno przed ($F=48,36$) jak i po przechowywaniu ($F=180,00$). Potwierdzono, że akumulacja jodu w fortyfikowanych warzywach zależała od ilości zastosowanego jodu. Jednak ilość zastosowanego jodu nie miała wpływu na procent odzysku analizowanego składnika, jak i jego stabilność podczas przechowywania. Biorąc pod uwagę wszystkie czynniki predykcyjne (Tabela 6) potwierdzono, że forma jodu ma silniejszy wpływ na końcową zawartość jodu niż rodzaj warzywa i stężenie naniesionego jodu ($p > 0,05$).

Tabela 6. Istotność statystyczna predyktorów modeli wariancji dla zmian zawartości jodu w wybranych warzywach wzbogaconych jodem po suszeniu i po 320 dniach przechowywania w temperaturze 21°C (jednoczynnikowa analiza wariancji ANOVA). (Publikacje A3-A6)

Wariant	SS*	df	MSE	F	p
Po suszeniu					
Stężenie jodu					
Dynia	0,07	2	0,04	0,09	0,91
Brokuł	2,30	5	0,50	0,09	0,99
Burak	2,42	2	1,21	0,06	0,94
Marchew	1,50	5	0,30	0,10	0,99
Kalafior	1,50	5	0,30	0,10	0,99
Forma chemiczna jodu					
Dynia	1075,73	1	1075,73	2794,51	0,00
Brokuł	77,60	1	77,60	107,40	0,00
Burak	303,81	1	303,81	1546,41	0,00
Marchew	85,30	1	85,30	81,70	0,00
Kalafior	85,30	1	85,30	81,70	0,00
Odmiana warzywa					
Dynia	111,70	6	18,62	48,36	0,00
Brokuł	2,30	1	2,30	0,54	0,47
Burak	Nie wykonywano doświadczeń na różnych odmianach				
Marchew	35,80	3	11,90	5,40	0,00
Kalafior	35,80	3	11,90	5,40	0,00
Po 320 dniach przechowywania w temp. 21°C					
Stężenie jodu					
Dynia	1,50	2	0,80	2,00	0,15
Brokuł	2,30	5	0,50	0,19	0,96
Burak	13,39	2	6,7	0,09	0,92
Marchew	1,10	5	0,20	0,02	1,00
Kalafior	1,10	5	0,20	0,02	1,00
Forma chemiczna jodu					
Dynia	1667,10	1	1667,10	4239,00	0,00
Brokuł	41,30	1	41,30	160,20	0,00
Burak	4081,20	1	4081,41	110,94	0,00
Marchew	177,40	1	177,40	26,45	0,00
Kalafior	177,40	1	177,40	26,45	0,00
Odmiana warzywa					
Dynia	423,70	6	70,60	180,00	0,00
Brokuł	2,20	1	2,20	1,07	0,31
Burak	Nie wykonywano doświadczeń na różnych odmianach				
Marchew	301,10	3	100,40	23,89	0,00
Kalafior	301,10	3	100,40	23,89	0,00

Objaśnienia: SS – sumy kwadratów; df – liczba stopni swobody; MSE – średnia suma kwadratów; F – wartość testu F; p – poziom prawdopodobieństwa

Aktywność przeciwutleniająca

W wyniku przeprowadzonych analiz potwierdzono przeciwrodnikowe działanie wszystkich badanych warzyw, zarówno wobec rodnika DPPH, jak i kationorodnika ABTS.

Stwierdzono także zmniejszenie zdolności do wychwytywania DPPH[•] i ABTS^{•+} w próbkach przechowywanych w temperaturze 21°C przez 320 dni, w stosunku do ich odpowiedników badanych po suszeniu. Ponadto stwierdzono różnice w aktywności przeciwutleniającej zarówno między odmianami, jak i rodzajami brokułu, dyni, marchwi i kalafiora. Związek między odmianą buraka a aktywnością przeciwutleniającą nie był badany (jedna odmiana buraka).

Analiza statystyczna (test jednokierunkowej analizy wariancji) uzyskanych wyników potwierdziła związek pomiędzy formami jodu (KI/KIO₃) a wynikami testów ABTS^{•+} i DPPH[•]. Stwierdzenie to potwierdzono zarówno dla próbek badanych bezpośrednio po suszeniu, jak i po przechowywaniu. Potwierdzono statystycznie istotną zależność pomiędzy stężeniem naniesionego jodu w formie KIO₃ a aktywnością przeciwutleniającą fortyfikowanych suszy warzyw (Tabela 7 i Tabela 8). Najsilniejszą zależność (test jednokierunkowej analizy wariancji) potwierdzono między stężeniem jodu w formie KIO₃ naniesionego na dynię a wynikami testu ABTS^{•+} ($F=510,00$ $p<0,00$) oraz między stężeniem jodu w formie KIO₃ naniesionego na buraka a wynikami testu DPPH[•] ($F=6102,21$, $p<0,00$) po suszeniu. Silną zależność między stężeniem jodu w formie KIO₃ po suszeniu preparatów a wskaźnikami aktywności przeciwutleniającej wykazano także dla pozostałych warzyw. Najslabszą, choć wciąż silną, zależność wykazano między stężeniem jodu w formie KIO₃ naniesionego na brokuł a wynikami testu ABTS^{•+} ($F=85,20$ $p<0,00$) oraz między stężeniem jodu w formie KIO₃ naniesionego na marchew i kalafior a wynikami testu DPPH[•] ($F=42,98$, $p<0,00$) po suszeniu.

Ta sama analiza dla próbek po 320 dniach przechowywania wykazała najsilniejszą zależność między stężeniem jodu w formie KIO₃ naniesionego na buraka a wynikami obu testów (ABTS^{•+} ($F=10248,00$, $p<0,00$), DPPH[•] ($F=95024,34$, $p<0,00$)). Dla pozostałych warzyw siłę zależności między zawartością jodu w formie KIO₃ a wskaźnikami aktywności przeciwutleniającej dla obu testów ($p<0,00$) można uszeregować następująco: dynia (ABTS^{•+} po przechowywaniu $F=3836,00$, DPPH[•] po suszeniu $F=97,10$, po przechowywaniu $F=42,98$), brokuł (ABTS^{•+} po przechowywaniu $F=104,20$, DPPH[•] po suszeniu $F=447,50$, po przechowywaniu $F=104,50$), marchew i kalafior (ABTS^{•+} po przechowywaniu $F=25,64$, DPPH[•] po suszeniu $F=42,98$, po przechowywaniu $F=51,15$). Jedynie dla wyników testu ABTS^{•+} po suszeniu kolejność będzie inna: dynia ($F=510,00$), marchew i kalafior ($F=433,00$), burak ($F=421,72$), brokuł ($F=85,20$). Analiza statystyczna (test jednokierunkowej analizy wariancji) uzyskanych wyników nie potwierdziła istotnej zależności pomiędzy stężeniem naniesionego jodu w formie KI a aktywnością przeciwdrobnikową fortyfikowanych suszy warzyw (Tabela 7 i Tabela 8). Wykazano jedynie zależność między stężeniem jodu w formie KI naniesionego na buraka

a właściwościami przeciwutleniającymi badanymi w obu testach, zarówno po suszeniu (ABTS^{•+} (F=264,12, $p<0,00$), DPPH[•] (F=212,32, $p<0,00$)), jak i dla ABTS^{•+} po 320 dniach przechowywania (F=1298,60, $p<0,00$). Były to jednak wskaźniki niższe w porównaniu do wyników dla suszu fortyfikowanego KIO₃.

Potwierdzono, że zależność między stężeniem jodu w formie KI a właściwościami przeciwutleniającymi badanymi po suszeniu w obu testach była nieistotna statystycznie dla marchwi i kalafiora (ABTS^{•+} $p=0,58$, DPPH[•] $p=0,29$). W przypadku tej samej zależności badanej dla prób po 320 dniach przechowywania zależność była nieistotna statystycznie dla brokułu ($p=0,97$), marchwi ($p=0,83$) i kalafiora ($p=0,83$) w teście ABTS^{•+}, a w teście DPPH[•] dla brokułu ($p=0,97$), buraka ($p=0,99$), marchwi ($p=0,81$) i kalafiora ($p=0,81$). Dla dyni fortyfikowanej jodem w formie KI zależność między stężeniem jodu a wynikami testu ABTS^{•+} badanymi po 320 dniach przechowywania były silne (F=65,71, $p<0,00$), w pozostałych wariantach obu testów były słabe (F=16,42, $p<0,00$). Szczegółowe wyniki istotności statystycznej predyktorów przedstawiają Tabela 7 (ABTS^{•+}) oraz Tabela 8 (DPPH[•]).

Badania wykazały brak istotnych statystycznie różnic w wielkości parametrów aktywności przeciwutleniającej (zarówno wobec rodnika DPPH, jak i kationorodnika ABTS) próbek z dodatkiem KI, niezależnie od stężenia roztworu i odmiany brokułu, marchwi oraz kalafiora. Dotyczyło to zarówno próbek badanych bezpośrednio po suszeniu jak i po przechowywaniu przez 320 dni. Nie stwierdzono również istotnych statystycznie różnic parametrów aktywności przeciwutleniającej próbek buraka wzbogaconych KI we wszystkich badanych dla niego stężeniach (0,023; 0,23; 2,3 mg kg⁻¹). Dotyczyło to próbek zarówno po przechowywaniu (21°C/320 dni), jak i badanych bezpośrednio po suszeniu. Analiza wpływu zmiennych stężeń użytego jodu do fortyfikacji dyni w różnych odmianach potwierdziła uzyskane tendencje. Nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic w badanych parametrach aktywności przeciwutleniającej suszy warzywnych fortyfikowanych jodem w formie KI. Dotyczyło to wszystkich analizowanych stężeń jodu (0,023; 0,23; 0,77; 1,3 oraz 2,3 mg kg⁻¹). Jedynie w przypadku dyni odmian Delicata i Butterkin wzbogaconych roztworem KI o stężeniu 2,3 mg kg⁻¹ potwierdzono obniżenie aktywności przeciwrodnikowej. Potwierdzono obniżenie tej aktywności w odniesieniu do próbek niejodowanych, zarówno dla suszy bezpośrednio po suszeniu (3%) jak i po przechowywaniu w temp. 21°C/320 dni (5%). Natomiast dla próbek z dodatkiem roztworów KIO₃ potwierdzono statystycznie istotny wpływ wysokości zastosowanego stężenia jodu na badane wskaźniki aktywności przeciwutleniającej (Tabela 7 i Tabela 8). W układach zawierających wprowadzony na poziomie 0,023; 0,23; 0,77 oraz 1,3 mg kg⁻¹ nie wykazano statystycznie istotnych różnic w wielkości parametrów aktywności

przeciwutleniającej (DPPH[•], ABTS^{•+}). Dotyczyło to zarówno próbek bezpośrednio po suszeniu jak i przechowywaniu przez okres 320 dni. Natomiast obniżenie aktywności przeciwrodnikowej, zarówno wobec rodnika DPPH, jak i kationorodnika ABTS, potwierdzono dla próbek fortyfikowanych jodem w formie KIO₃ o stężeniu 2,3 mg jodu kg⁻¹ i większym.

Podobną tendencję potwierdzono także dla pozostałych warzyw. Stwierdzono wyraźny spadek stopnia neutralizacji wolnych rodników badanego obiema metodami (DPPH[•], ABTS^{•+}) w próbkach fortyfikowanych jodem w formie KIO₃ w stężeniu 2,3 mg jodu kg⁻¹. W próbkach buraka wzbogaconego KIO₃ w stężeniu 2,3 mg kg⁻¹ zmiany w zdolności do redukcji DPPH[•] wynosiły 7% po suszeniu i 29% po 320 dniach przechowywania w porównaniu do próbek niefortyfikowanych jodem, a dla ABTS^{•+} wynosiły 7% po suszeniu i 21% po przechowywaniu. W przypadku próbek brokułu wzbogaconego KIO₃ o tym samym stężeniu, zmiany w zdolności do redukcji zarówno DPPH[•] jak i ABTS^{•+} wynosiły 6% po suszeniu i 12% po 320 dniach przechowywania, w porównaniu do próbek niefortyfikowanych jodem. W próbkach brokułu wzbogaconego KIO₃ w stężeniu 3,0 mg kg⁻¹ zmiany wynosiły odpowiednio 14% i 16% po suszeniu oraz 18% i 15% po przechowywaniu. W próbkach dyni wzbogaconej KIO₃ w stężeniu 2,3 mg kg⁻¹ zmiany w zdolności do redukcji DPPH[•] wynosiły 6-8% po suszeniu i 8-11% po 320 dniach przechowywania, w porównaniu do próbek niefortyfikowanych jodem, a dla ABTS^{•+} wynosiły 7-11% po suszeniu i 7-9% po przechowywaniu. Dla prób kalafiora i marchwi wzbogaconych KIO₃ w stężeniu 2,3 mg kg⁻¹ zaobserwowane zmiany w zdolności do redukcji DPPH[•] wynosiły 9% po suszeniu i 8-9% po 320 dniach przechowywania, w porównaniu do próbek niefortyfikowanych jodem, a dla ABTS^{•+} wynosiły 6-9% po suszeniu i 8-9% po przechowywaniu. Najsilniejszy spadek zdolności do redukowania rodników DPPH i ABTS^{•+} po 320 dniach przechowywania zaobserwowano dla prób buraka wzbogaconego KIO₃.

Tabela 7. Istotność statystyczna predyktorów (stężenie jodu) modeli kowariancji dla zmian zdolności wychwytywania kationorodnika ABTS w warzywach wzbogaconych jodem bezpośrednio po suszeniu i po 320 dniach przechowywania w temp. 21°C (jednoczynnikowa analiza wariancji ANOVA). (Publikacje A3-A6).

Wariant		SS*	df	MSE	F	p
Po suszeniu						
Dydia	KIO ₃	1352,30	3	450,8	510,00	0,00
	KI	68,50	3	22,80	15,30	0,00
Brokuł	KIO ₃	133,60	6	22,30	85,20	0,00
	KI	13,50	6	2,20	4,90	0,03
Burak	KIO ₃	108,95	3	36,32	421,72	0,00
	KI	0,15	3	0,05	264,12	0,00
Marchew	KIO ₃	263,93	6	43,99	433,00	0,00

Kalafior	KI	0,03	3	0,02	0,57	0,58
	KIO ₃	263,93	6	43,99	433,00	0,00
	KI	0,03	3	0,02	0,57	0,58
Po 320 dniach przechowywania w temp. 21°C						
Dyńia	KIO ₃	1277,70	3	425,90	3836,00	0,00
	KI	186,10	3	62,00	65,71	0,00
Brokuł	KIO ₃	158,04	6	26,34	104,20	0,00
	KI	0,92	6	0,15	0,18	0,97
Burak	KIO ₃	204,96	3	68,32	10248,00	0,00
	KI	2,43	3	0,81	1298,60	0,00
Marchew	KIO ₃	271,96	6	45,33	25,64	0,00
	KI	0,39	6	0,06	0,45	0,83
Kalafior	KIO ₃	271,96	6	45,33	25,64	0,00
	KI	0,39	6	0,06	0,45	0,83

Objaśnienia: SS – sumy kwadratów; df – liczba stopni swobody; MSE – średnia suma kwadratów; F – wartość testu F; *p* – poziom prawdopodobieństwa

Tabela 8. Istotność statystyczna predyktorów (stężenie jodu) modeli kowariancji dla zmian zdolności wychwytywania rodnika DPPH w warzywach wzbogaconych jodem bezpośrednio po suszeniu i po 320 dniach przechowywania w temp. 21°C (jednoczynnikowa analiza wariancji ANOVA). (Publikacje A3-A6).

Predyktory		SS	df	MSE	F	<i>p</i>
Po suszeniu						
Dyńia	KIO ₃	149,90	3	50,10	97,10	0,00
	KI	93,20	3	31,10	5,90	0,00
Brokuł	KIO ₃	507,60	6	84,60	447,50	0,00
	KI	13,50	6	2,20	4,90	0,03
Burak	KIO ₃	105,25	3	35,08	6102,21	0,00
	KI	0,22	3	0,07	212,32	0,00
Marchew	KIO ₃	163,76	6	27,29	42,98	0,00
	KI	3,54	6	0,59	1,35	0,29
Kalafior	KIO ₃	163,76	6	27,29	42,98	0,00
	KI	3,54	6	0,59	1,35	0,29
Po 320 dniach przechowywania w temp. 21°C						
Dyńia	KIO ₃	1101,4	3	367,1	902,50	0,00
	KI	38,40	3	12,81	16,42	0,00
Brokuł	KIO ₃	191,69	6	31,95	104,50	0,00
	KI	0,92	6	0,15	0,18	0,97
Burak	KIO ₃	451,37	3	150,45	95024,34	0,00
	KI	1,62	3	0,54	676,78	0,99
Marchew	KIO ₃	291,38	6	48,56	51,15	0,00
	KI	0,65	6	0,11	0,48	0,81
Kalafior	KIO ₃	291,38	6	48,56	51,15	0,00
	KI	0,65	6	0,11	0,48	0,81

Objaśnienia: SS – sumy kwadratów; df – liczba stopni swobody; MSE – średnia suma kwadratów; F – wartość testu F; *p* – poziom prawdopodobieństwa

PODSUMOWANIE

W wyniku badań nad zdolnością fortyfikowanych jodem suszy warzyw do neutralizacji wolnych rodników wykazano, że dodanie jodu w postaci KI nie wpływa na aktywność przeciwutleniającą badanych matryc w zakresie stężeń roztworów jodu od 0,023 do 3,0 mg kg⁻¹. Natomiast w przypadku KIO₃ wprowadzonego w stężeniu $\geq 2,3$ mg kg⁻¹ jodu, stwierdzono statystycznie istotny spadek zdolności do neutralizacji wolnych rodników, w porównaniu do prób bez dodatku jodu, który wynosił dla dyni 7-11% ABTS^{•+} i 6-8% DPPH[•] w próbach po suszeniu oraz 7-9% ABTS^{•+} i 8-11% DPPH[•] w próbach po przechowywaniu, brokułu odpowiednio 5-6% ABTS^{•+} i DPPH[•] oraz 15% ABTS^{•+}, 18% DPPH[•], kalafiora oraz marchwi 6-9% ABTS^{•+} i 9% DPPH[•] oraz 8-9% ABTS^{•+} i DPPH[•], buraka 7% ABTS^{•+} i DPPH[•] oraz 21% ABTS^{•+}, 29% DPPH[•]. W związku z powyższym, w celu uzyskania maksymalnej skuteczności redukcji wolnych rodników przez badane matryce, sugeruje się wprowadzenie jodu w postaci KI i KIO₃ w kontrolowanych stężeniach. W przypadku zastosowania KIO₃ jako źródła jodu, zawartość tego pierwiastka powinna być mniejsza niż 2,3 mg kg⁻¹.

Podsumowując, hipoteza szczegółowa H5. Stężenie i rodzaj wprowadzonego nośnika jodu (KI, KIO₃) wpływa na aktywność przeciwutleniającą fortyfikowanej matrycy (marchew, dynia, brokuł, kalafior, burak) została częściowo potwierdzona. Na podstawie uzyskanych wyników potwierdzono statystycznie istotną zależność pomiędzy formą nośnika jodu (KI/KIO₃) naniesionego na warzywa a aktywnością przeciworodnikową badanych uzyskanych fortyfikowanych suszy warzywnych. Potwierdzono również statystycznie istotną zależność pomiędzy stężeniem naniesionego jodu w formie KIO₃ a aktywnością przeciworodnikową (testy ABTS^{•+} i DPPH[•]) fortyfikowanych suszy warzyw. Zależności tej nie potwierdzono dla suszy fortyfikowanych jodem w formie KI. Jedynie w układach zawierających buraka oraz wybrane odmiany dyni potwierdzono zależność pomiędzy stężeniem naniesionego jodu a obniżeniem aktywności przeciworodnikowej fortyfikowanych suszy.

Powyższy rozdział został opracowany na podstawie publikacji:

Zaremba A., Hęś M., Jędrusek-Golińska A., Przeor M., Szymandera-Buszk K. (2023): The antioxidant properties of selected varieties of pumpkin fortified with iodine in the form of potassium iodide and potassium iodate. *Foods* 12 (14): 2792 <https://doi.org/10.3390/foods12142792>;

Jankowska A., Kobus Cisowska J., Szymandera-Buszk K. (2023): Antioxidant properties of beetroot fortified with iodine. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 68 (2): 10-15 <https://doi.org/10.53502/TXIY9852>;

Szymandera-Buszk K., **Jankowska A.**, Hęś M., Jędrusek- Golińska A. (2023): Właściwości przeciwutleniające brokułów fortyfikowanych jodem w postaci jodku potasu lub jodanu(V) potasu. *Żywność jako wyzwanie dla współczesnej nauki i przemysłu*: 317-329, Kraków;

Jankowska A., Szymandera-Buszk K. (2024): The effect of iodine fortification on –the antioxidant activity of carrots and cauliflower. *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.*, 23(3), 371–378.

3.5. Ocena wybranych wskaźników wartości odżywczej wegańskich produktów zbożowych z dodatkiem fortyfikowanych w jod suszy warzywnych. (A7 i dane niepublikowane)

W niektórych krajach program profilaktyki jodowej obejmuje jodowanie nie tylko soli przeznaczonej do bezpośredniego spożycia w gospodarstwach domowych, ale także tej przeznaczonej do produkcji żywności np. chleba (Rasmussen i in., 2014).

W kolejnym etapie pracy zaprojektowano wegańskie produkty zbożowe z dodatkiem fortyfikowanych jodem suszy warzywnych jako matrycy wprowadzającej jod do gotowego produktu spożywczego. W wyniku prac zweryfikowano poniższe hipotezy szczegółowe:

- **H6.** Typ nośnika jodu (KI, KIO₃) oraz matryca (rodzaj warzywa) dla jodu, wprowadzonych do produktów zbożowych typu bułki Ciabatta i kluski Gnocchi, wpływają na zawartość wybranych wskaźników wartości odżywczej, takich jak zawartość jodu i tiaminy oraz właściwości przeciwutleniające produktu.
- **H7.** Zaprojektowane produkty zbożowe (bułki typu Ciabatta oraz kluski typu Gnocchi) z dodatkiem fortyfikowanych w jod suszy warzyw stanowią dobre źródło jodu w diecie i mogą być stosowane jako element profilaktyki IDD.

METODYKA

Material

Materiał do przygotowania jodowanych suszy warzywnych stanowiły dynia (*Cucurbita pepo* L.), kalafior (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.), brokuły (*Brassica oleracea* L.), marchew (*Daucus carota* L.) i burak (*Beta vulgaris* L.). Jako źródło jodu wykorzystano jodek potasu (KI) oraz jodan potasu (KIO₃) (Merck, Darmstadt, Niemcy).

Przygotowane z powyższych warzyw fortyfikowane jodem susze warzywne zostały wykorzystane do zaprojektowania wegańskich produktów zbożowych tj. bułek typu Ciabatta oraz klusek typu Gnocchi.

Wszystkie warzywa oraz produkty spożywcze, niezbędne do przygotowania zaprojektowanych wegańskich produktów zbożowych, zostały zakupione w handlu detalicznym.

Przygotowanie fortyfikowanych jodem suszy warzywnych

Fortyfikowane jodem susze warzywne zostały przygotowane zgodnie z metodyką opisaną w publikacji A2. Zastosowano następujące warunki impregnacji:

- dla marchwi, dyni, kalafiora i brokuła - uwodnienie 1:1 (m/v); kondycjonowanie w temp. $-76^{\circ}\text{C}/12\text{h}$.
- buraka uwodnienie 1:2 (m/v); kondycjonowanie w temp. $-76^{\circ}\text{C}/12\text{h}$ (publikacja A7).

Następnie impregnowane preparaty warzywne liofilizowano do zawartości wody na poziomie 4–5% i homogenizowano (homogenizator — Foss, Hilleroed, Dania).

Przygotowanie bułek typu Ciabatta z dodatkiem fortyfikowanych w jod suszy warzywnych

Ciasto przygotowano w dwóch wariantach: z dodatkiem fortyfikowanych i niefortyfikowanych w jod suszy warzywnych. Uwzględniono także wariant bez dodatku suszy, z uwzględnieniem próbki bez dodatku jodu (NaCl cz.d.a) oraz z dodatkiem soli jodowanej (KI/KIO_3). Do przygotowania ciasta użyto zmiennych proporcji mąki oraz suszy warzywnych: wariant ciasta z dodatkiem fortyfikowanych w jod suszy warzywnych zawierał 52% mąki pszennej oraz 5% fortyfikowanych lub niefortyfikowanych w jod suszy warzywnych, natomiast wariant ciasta tradycyjnego zawierał zwiększoną do 57% zawartość mąki pszennej. Pozostałe składniki dodano do wszystkich wariantów ciasta w stałych, następujących proporcjach: woda (41,8%); drożdże instant (0,9%); sól niejodowana lub jodowana (0,3%). Przygotowano następujące warianty ciasta:

B_WN — próbka kontrolna, bez dodatku suszy warzywnych + NaCl cz.d.a;

B_WN_KIO₃ — próbka kontrolna, bez dodatku suszy warzywnych + sól jodowana KIO₃

B_WN_KI — próbka kontrolna, bez dodatku suszy warzywnych + sól jodowana KI

B_P — z dodatkiem suszu dyni nieimpregnowanej jodem + NaCl cz.d.a

B_P_KIO₃ — z dodatkiem suszu dyni impregnowanej KIO₃;

B_P_KI — z dodatkiem suszu dyni impregnowanej KI;

B_CR — z dodatkiem suszu marchwi nieimpregnowanej jodem + NaCl cz.d.a

B_CR_KIO₃ — z dodatkiem suszu marchwi impregnowanej KIO₃;

B_CR_KI — z dodatkiem suszu marchwi impregnowanej KI;

B_CF — z dodatkiem suszu kalafiora nieimpregnowanego jodem + NaCl c.z.d.a

B_CF_KIO₃ — z dodatkiem suszu kalafiora impregnowanego KIO₃;

B_CF_KI — z dodatkiem suszu kalafiora impregnowanego jodkiem potasu;

B_B — z dodatkiem suszu brokuła nieimpregnowanego jodem + NaCl cz.d.a

B_B_KIO₃ — z dodatkiem suszu brokuła impregnowanego KIO₃;

B_B_KI — z dodatkiem suszu brokuła impregnowanego KI;

B_BT — z dodatkiem suszu buraka nieimpregnowanego jodem + NaCl cz.d.a

B_BT_KIO₃ — z dodatkiem suszu buraka impregnowanego KIO₃;

B_BT_KI — z dodatkiem suszu buraka impregnowanego KI.

Po przygotowaniu wszystkich wariantów ciasta pozostawiono je do wyrośnięcia na 1 godzinę w temperaturze $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Bułki uformowano na kształt charakterystyczny dla pieczywa Ciabatta i pieczono w piecu konwekcyjno-parowym w temperaturze 220°C przez 20 minut (Rational, Landsberg am Lech, Niemcy). Bułki pozostawiono do ostygnięcia na około 1 godzinę.

Przygotowanie klusek typu Gnocchi z dodatkiem fortyfikowanych w jod suszy warzywnych

Kluski Gnocchi przygotowano w zmiennych wariantach, analogicznie do produktu bułka typu Ciabatta. Do przygotowania ciasta użyto ziemniaków oraz wprowadzonych w stałych proporcjach mąki ziemniaczanej (10%) i wody (10%). Do wariantu wzbogaconego w jod dodatkowo wprowadzono jodowane susze warzywne w ilości 24%. Udział ilościowy dodanych warzyw został wybrany na podstawie wcześniejszych badań dotyczących wzbogacania klusek typu Gnocchi w susze warzywne (Szymandera-Buszk a i in., 2021). Nieobrane ziemniaki umyto i gotowano w wodzie wodociągowej 1:2 (m/v)) doprowadzonej do wrzenia (w garnku ze stali nierdzewnej) przez 25 min w temperaturze 100°C , aż do uzyskania miękkości konsumpcyjnej. Następnie ziemniaki odsączono i schłodzono w temperaturze $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$ przez 15 min. Obrane ziemniaki rozgnieciono za pomocą praski (Westmark GmbH, Lennestadt-Elspe, Niemcy). Przygotowano następujące warianty klusek:

G_WN — próbka kontrolna, bez dodatku suszy warzywnych + NaCl cz.d.a.;

G_WN_KIO₃ — próbka kontrolna, bez dodatku suszy warzywnych + sól jodowana KIO₃

G_WN_KI — próbka kontrolna, bez dodatku suszy warzywnych + sól jodowana KI

G_P — z dodatkiem suszu dyni nieimpregnowanej jodem + NaCl cz.d.a

G_P_KIO₃ — z dodatkiem suszu dyni impregnowanej KIO₃;

G_P_KI — z dodatkiem suszu dyni impregnowanej KI;

G_CR — z dodatkiem suszu marchwi nieimpregnowanej jodem + NaCl cz.d.a

G_CR_KIO₃ — z dodatkiem suszu marchwi impregnowanej KIO₃;

G_CR_KI — z dodatkiem suszu marchwi impregnowanej KI;

G_CF — z dodatkiem suszu kalafiora nieimpregnowanego jodem + NaCl cz.d.a

G_CF_KIO₃ — z dodatkiem suszu kalafiora impregnowanego KIO₃;

G_CF_KI — z dodatkiem suszu kalafiora impregnowanego KI;

G_B — z dodatkiem suszu brokułu nieimpregnowanego jodem + NaCl cz.d.a

G_B_KIO₃ — z dodatkiem suszu brokułu impregnowanego KIO₃;

G_B_KI — z dodatkiem suszu brokułu impregnowanego KI;

G_BT — z dodatkiem suszu buraka nieimpregnowanego jodem + NaCl cz.d.a

G_BT_KIO₃ — z dodatkiem suszu buraka impregnowanego KIO₃;

G_BT_KI — z dodatkiem suszu buraka impregnowanego KI.

Preparaty suszy warzywnych impregnowanych lub nieimpregnowanych jodem dodano do ciasta w formie uwodnionej (w proporcjach 1:3 (m/v)). Po dokładnym wymieszaniu dodatków (około 10 min) uformowano kawałki o typowym dla klusek Gnocchi, owalnym kształcie i podobnej wadze (około 5 g).

Warunki przechowywania

Bułki typu Ciabatta były przechowywane po upieczeniu bez dostępu światła w temperaturze 21°C przez 8 dni oraz -21°C przez 100 dni.

Kluski typu Gnocchi były przechowywane w formie po ugotowaniu w temperaturze -21°C przez 100 dni, w warunkach bez dostępu światła.

Oznaczanie zawartości jodu

Dla oznaczenia zawartości jodu przyjęto następujące punkty pomiarowe:

- Bułki typu Ciabatta - przed obróbką termiczną („surowe” ciasto), bezpośrednio po obróbce termicznej (pieczone) oraz po przechowywaniu w temperaturze 21°C przez 8 dni oraz w temp. -21°C przez 100 dni próbek upieczonych.
- Kluski typu Gnocchi – przed obróbką termiczną („surowe” kluski), bezpośrednio po obróbce termicznej (gotowanie) („ugotowane” kluski) oraz po przechowywaniu próbek „ugotowane” kluski w -21°C przez 100 dni.

W ramach próbek przechowywanych przyjęto okresowe punkty pomiarowe w trakcie przechowywania. Zawartość jodu w bułkach typu Ciabatta w trakcie przechowywania w temperaturze 21°C była oznaczana w 2, 3, 4, 5, 6, 7 i 8 dniu przechowywania. Natomiast oznaczenia zawartości jodu dla obu rodzajów produktów (bułki typu Ciabatta i kluski typu Gnocchi) przechowywanych w temperaturze -21°C były wykonywane w 10, 20, 30, 40, 60, 80 i 100 dniu przechowywania.

Zmiany ilościowe jodu całkowitego określono przy użyciu metody makrochemicznej z tiocyjanianem potasu opisaną przez Kühne, Wirtha i Wagnera (Kühne i in., 1993), dokonano

także późniejszej analizy kolorymetrycznej, zgodnie z metodą opisaną przez Moxona i Dixona (Moxon, Dixon, 1980).

Wszystkie próbki analizowano w 6 powtórzeniach (3 pomiary x 2 niezależne serie).

Oznaczanie zawartości tiaminy

Zawartość tiaminy oznaczono w bułkach typu Ciabatta. Oznaczeń dokonano w „surowym” cieście oraz po upieczeniu, a także w kilku punktach pomiarowych przechowywania, podobnie jak w przypadku oznaczeń zawartości jodu. Nie wykonano oznaczeń tiaminy w kluskach typu Gnocchi ze względu na jej niską zawartość w surowcach tj. w ziemniakach (0,042 mg/100g; 0,05261mg/100g) oraz mące ziemniaczanej (0,0 mg/100g) (Kunachowicz i in., 2012, oznaczenia własne).

Analiza zawartości tiaminy została wykonana za pomocą metody tiochromowej (Szymandera-Buszka, Waszkowiak, 2014; Waszkowiak, Szymandera-Buszka, 2007), która obejmowała ilościowe zmiany zawartości tiaminy w postaci wolnej (chlorowodurek tiaminy) i związanej (pirofosforan tiaminy). Do pomiaru fluorescencji tiochromu użyto fluorymetru Jenway model 6200 (Jenway. Stone. UK) (filtr wejściowy o maksymalnej długości fali 365 nm i filtr wyjściowy o maksymalnej długości fali 435 nm).

Wszystkie oznaczenia wykonano w dwóch niezależnych seriach.

Oznaczanie aktywności przeciwutleniającej (zdolność do redukcji DPPH[•] i ABTS^{•+})

Aktywność antyoksydacyjna bułek typu Ciabatta i klusek typu Gnocchi z dodatkiem fortifikowanych i niefortifikowanych w jod suszy warzywnych oraz próbek bez dodatku suszy została zbadana w „surowych” kluskach i „surowych” bułkach, po obróbce termicznej (pieczenie, gotowanie) oraz po przechowywaniu.

Z wskazanych powyżej próbek sporządzono ekstrakty etanolowe w drodze dwugodzinnej maceracji 80% etanolem (Gudiño i in., 2022). Aktywność antyoksydacyjna wszystkich próbek była oceniana na podstawie zdolności do wychwytywania kationorodnika ABTS (Re i in., 1999) i rodnika DPPH (Chu i in., 2000; Nuutila i in., 2003). Zdolność wychwytywania ABTS^{•+} analizowano poprzez spektrofotometryczny pomiar zmian stężenia kationu rodnikowego ABTS (2,2'-Azino-bis (3-etylobenzotiazolino-6-kwas sulfonowy) diamonowa sól) (98%) (Sigma-Aldrich. Saint Louis. Missouri. USA), przy absorbancji 734 nm. Zdolność wychwytywania DPPH[•] analizowano metodą spektrofotometryczną z wykorzystaniem rodnika DPPH (2,2-difenyl-1-pikrylhydrazyl) (Sigma-Aldrich. Saint Louis. Missouri. USA), przy absorbancji 517 nm.

Ocena sensoryczna

Ocenie sensorycznej poddano następujące zmienne:

- Bułki typu Ciabatta - bezpośrednio po obróbce termicznej (pieczone),
- Kluski typu Gnocchi – bezpośrednio po obróbce termicznej (gotowanie).

Badania przeprowadzono w odpowiednio zaprojektowanym i wyposażonym laboratorium analizy sensorycznej (PN-EN ISO 8589, 2010), w Katedrze Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, zgodnie z Kodeksem Etyki Światowego Towarzystwa Lekarskiego, Zgoda Rektorskiej Komisji ds. Etyki Badań Naukowych Prowadzonych z Udziałem Ludzi – Nr 3/2023 z dnia 25.05.2023r.

Próbki analizowanych produktów (bułki typu Ciabatta i kluski typu Gnocchi) z dodatkiem fortyfikowanych i niefortyfikowanych w jod suszy warzywnych oraz bez dodatku suszy, poddano analizie sensorycznej. Wykorzystano metodę analizy sensorycznej konsumenckiej w grupie 156 osób (91 osób deklarowało dietę zwyczajową, a 65 osób dietę wegańską) w wieku 21–35 lat. Wszyscy badani wyrazili pisemną świadomą zgodę na udział w badaniu. W analizie sensorycznej wykorzystano ocenę pożądalności sensorycznej wobec atrybutów: barwy, zapachu, smaku oraz uwzględniono ogólną pożądalność. W badaniu tym wykorzystano skalę liniową 10-centymetrową ciągłą z określeniami brzegowymi „brak pożądalności” – „wysoka pożądalność”.

Próbki do oceny zostały zakodowane, przy użyciu liczb 3-cyfrowych, kolejność prezentacji próbek dla poszczególnych osób także była losowa.

Analiza statystyczna

Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej z zastosowaniem oprogramowania STATISTICA™ PL 13.3 (StatSoft, Kraków, Polska). Przeprowadzono analizę zależności statystycznych pomiędzy średnimi aktywnościami antyoksydacyjnymi, zawartością tiaminy i zawartością jodu ($p < 0,01$) z zastosowaniem testu Tukey’a. Hipotezy testowano przy $\alpha = 0,01$. Do przewidywania dynamiki zmian zawartości tiaminy w próbkach bułek typu Ciabatta podczas przechowywania wykorzystano ubytki rzędu 25% ($T_{25\%}$). Dokładność modeli oszacowano za pomocą współczynnika determinacji (R^2) i błędu średniokwadratowego (RMSE). Poziom istotności dla wszystkich analiz przyjęto na poziomie 5%.

OMÓWIENIE WYNIKÓW

Zmiany zawartości wybranych wskaźników wartości odżywczej bułek typu Ciabatta oraz klusek typu Gnocchi z dodatkiem suszy warzywnych fortyfikowanych jodem podczas obróbki cieplnej.

Na podstawie uzyskanych wyników (Wykres 8 i Wykres 9) potwierdzono statystycznie istotne obniżenie zawartości jodu w produktach po obróbce cieplnej. Dotyczyło to wszystkich zaprojektowanych produktów, zarówno bułek typu Ciabatta jak i klusek typu Gnocchi. Potwierdzono statystycznie istotnie ($p < 0,00$) większe straty jodu przy zastosowaniu jako obróbki cieplnej pieczenia. W bułkach typu Ciabatta straty jodu wynosiły 33 – 51% a w kluskach typu Gnocchi 14 – 21%. Większe straty jodu w próbkach poddanych pieczeniu, mogą wynikać z wrażliwości zastosowanych form jodu wobec wysokiej temperatury, co potwierdzają także wcześniejsze badania (Rana, Raghuvanshi, 2013).

Analiza statystyczna predyktorów modeli wariancji dla zmian zawartości jodu w bułkach typu Ciabatta oraz kluskach typu Gnocchi z dodatkiem wzbogaconych jodem suszy warzywnych (Tabela 9) potwierdziła wcześniejsze wyniki badań (Zaremba i in., 2022), dotyczące zależności pomiędzy formą jodu użytego do wzbogacenia (KI/KIO_3) a stabilnością zawartego jodu. Dotyczyło to zarówno próbek pieczywa, jak i klusek ($F=2616,57$ i $F=19063,34$; $p<0,00$). W próbkach Gnocchi z dodatkiem jodu wprowadzonego w formie KI straty jodu były wyższe o około 1 – 2 pkt%. Natomiast w warunkach pieczenia bułek typu Ciabatta, temperatury powyżej $200^{\circ}C$, różnice te były wyższe nawet o 10,8 pkt% dla próbek z dodatkiem suszu buraka.

Analiza uzyskanych wyników ($p < 0,00$) badań potwierdziła efektywność zastosowania analizowanych warzyw jako matrycy dla jodu. Potwierdzono statystycznie istotnie ($p < 0,00$), niższe straty jodu naniesionego na analizowane warzywa w odniesieniu do próbek z formą jodu naniesioną na chlorek sodu. Dotyczyło to szczególnie próbek bułek Ciabatta wzbogaconych suszem dyni fortyfikowanej jodem w formie KIO_3 . W próbkach tych potwierdzono niższe straty jodu w wariancie po obróbce, w odniesieniu do produktu z dodatkiem jodu naniesionego na chlorek sodu o 42%. Podobną tendencję potwierdzono dla próbek klusek typu Gnocchi, wzbogaconych fortyfikowanymi warzywami. W próbkach z dodatkiem suszu brokułu fortyfikowanego jodem w formie KIO_3 potwierdzono niższe straty jodu w próbce po obróbce w odniesieniu do produktu z dodatkiem jodu naniesionego na chlorek sodu o 40%. Podobne tendencje potwierdzono dla próbek z dodatkiem suszu dyni.

Analiza zawartości tiaminy w próbkach bułek typu Ciabatta potwierdziła straty zawartej naturalnie w produkcie tiaminy, na poziomie 8,85 – 21% (Wykres 8 i Wykres 9). Największe straty tiaminy dotyczyły próbek zawierających sól jodowaną w formie KI (21%.) Straty te były

wyższe o 3pkt% w porównaniu do próbek z dodatkiem NaCl cz.d.a. Analiza statystyczna zawartości tiaminy w próbkach pieczywa z dodatkiem suszy fortyfikowanych jodem nie potwierdziła statystycznie istotnych różnic w zawartości tiaminy w próbkach fortyfikowanych, jak i niefortyfikowanych. Dotyczyło to zarówno próbek z dodatkiem KI jak i KIO₃.

Analiza predyktorów modeli wariancji dla zmian zawartości tiaminy w bułkach typu Ciabatta z dodatkiem wzbogaconych jodem suszy warzywnych (Tabela 9) potwierdziła zależność pomiędzy rodzajem warzywa użytego do wzbogacenia a stabilnością zawartej tiaminy ($F=518,50$ $p<0,00$). Analiza uzyskanych wyników ($p < 0,00$). badań potwierdziła najniższe straty tiaminy w próbkach z dodatkiem suszu dyni (9%). Dotyczyło to obu form naniesionego jodu, jak i próbek bez dodatku jodu. Wcześniejsze badania, związane z analizą możliwości nanoszenie tiaminy na warzywa, także potwierdziły najwyższą stabilność tiaminy w obecności dyni (Szymandera-Buszk, Piechocka, i in., 2021).

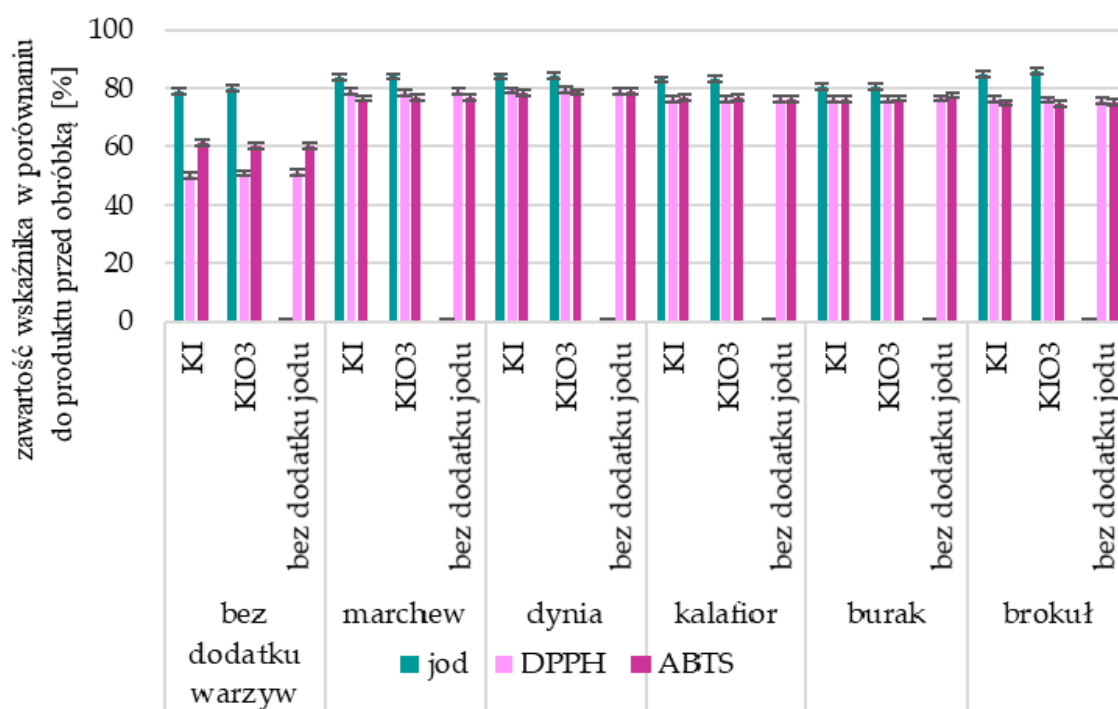
Analiza uzyskanych wyników badań potwierdziła statystycznie istotny wpływ dodatku wszystkich analizowanych suszy warzyw na podwyższenie **aktywności przeciwutleniającej** wzbogaconych produktów. Analiza statystyczna predyktorów modeli wariancji dla zmian aktywności przeciwutleniającej w bułkach typu Ciabatta z dodatkiem wzbogaconych jodem suszy warzywnych (Tabela 1) potwierdziła zależność pomiędzy rodzajem warzywa użytego do wzbogacenia a aktywnością antyoksydacyjną wszystkich próbek, dotyczącą wychwytywania kationorodnika ABTS ($F=7810,55$, $p<0,00$) oraz rodnika DPPH ($F=2618,00$, $p<0,00$). Podobne tendencje potwierdzono dla próbek klusek typu Gnocchi. Analiza statystyczna uzyskanych wyników ($p<0,00$) potwierdziła brak zależności pomiędzy formą naniesionego jodu na analizowane warzywa a ich aktywnością przeciwutleniającą.

Tabela 9. Istotność statystyczna predyktorów (odmiany warzywa i formy jodu) modeli kowariancji dla zmian zawartości jodu w produktach bułki typu Ciabatta oraz kluski typu Gnocchi z dodatkiem suszy warzywnych wzbogaconych jodem (KI/KIO₃) po obróbce termicznej (jednoczynnikowa analiza wariancji ANOVA). (Opracowanie własne)

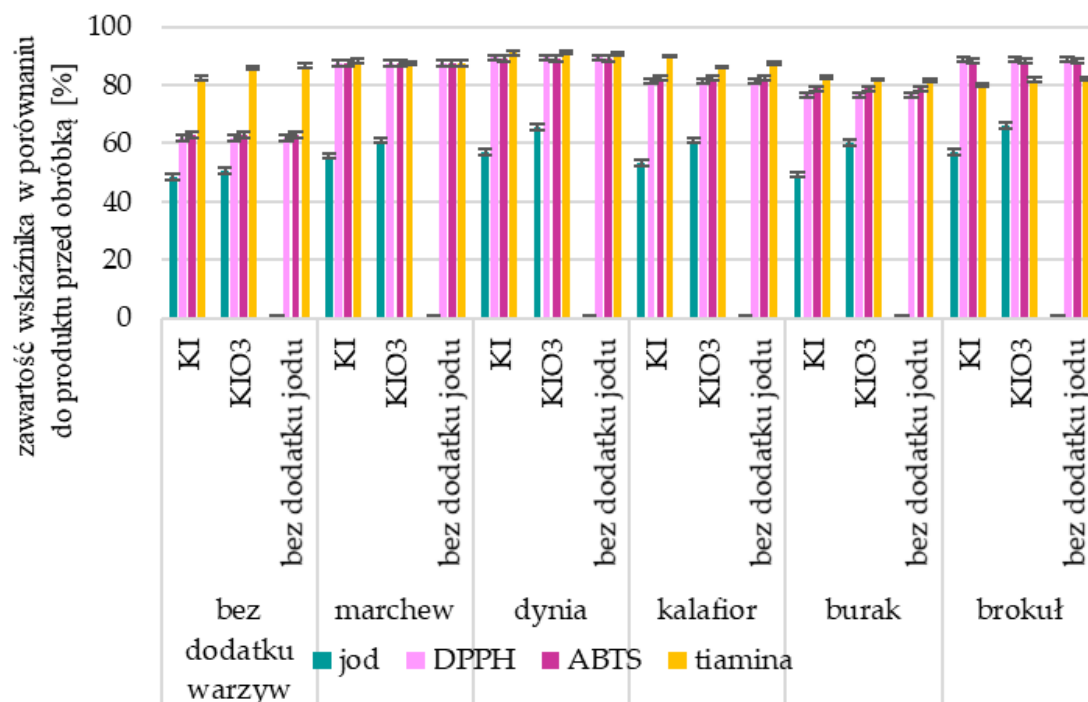
Wariant	SS*	df	MSE	F	p
Zawartość jodu					
Ciabatta					
Rodzaj warzywa	8.58	4.00	2.15	3.26	0.03
Forma jodu	16.06	1.00	16.06	50.03	0.00
Gnocchi					
Rodzaj warzywa	1083.10	5.00	216.62	1.06	0.40
Forma jodu	9680.54	2.00	4840.27	19063.34	0.00
Zawartość tiaminy					
Ciabatta					

Rodzaj warzywa	0.01	5.00	0.00	518.50	0.00
Forma jodu	0.00	2.00	0.00	0.18	0.84
DPPH*					
Ciabatta					
Rodzaj warzywa	2623,20	5,00	524,60	2618,00	0,00
Forma jodu	188,40	2,00	94,20	1,73	0.19
Gnocchi					
Rodzaj warzywa	2622,40	5.00	523.50	2614.00	0.00
Forma jodu	187,24	2.00	93.15	1.78	0.20
ABTS**					
Ciabatta					
Rodzaj warzywa	2188,86	5,00	437,77	7810,55	0,00
Forma jodu	171,90	2,00	86,00	1,92	0.16
Gnocchi					
Rodzaj warzywa	2181,80	5,00	436,40	7034,00	0,00
Forma jodu	170,30	2,00	85,20	1,90	0.16

Objaśnienia: SS – sumy kwadratów; df – liczba stopni swobody; MSE – średnia suma kwadratów; F – wartość testu F; p – poziom prawdopodobieństwa



Wykres 8. Zmiany wartości odżywczej (jod, ABTS •+, DPPH •) klusek typu Gnocchi wzbogaconych suszami warzyw fortyfikowanych jodem, podczas obróbki cieplnej (zawartość w porównaniu do próbek przed obróbką cieplną – gotowanie). (Opracowanie własne)



Wykres 9. Zmiany wartości odżywczej (jod, tiamina, ABTS •+, DPPH •) bułek typu Ciabatta z dodatkiem suszy warzyw fortifikowanych jodem podczas obróbki cieplnej (pieczenie) (zawartość w porównaniu do próbek przed obróbką cieplną). (Opracowanie własne)

Zmiany zawartości wybranych wskaźników wartości odżywczej bułek typu Ciabatta oraz klusek typu Gnocchi z dodatkiem suszy warzywnych fortifikowanych jodem podczas przechowywania.

Zawartość jodu

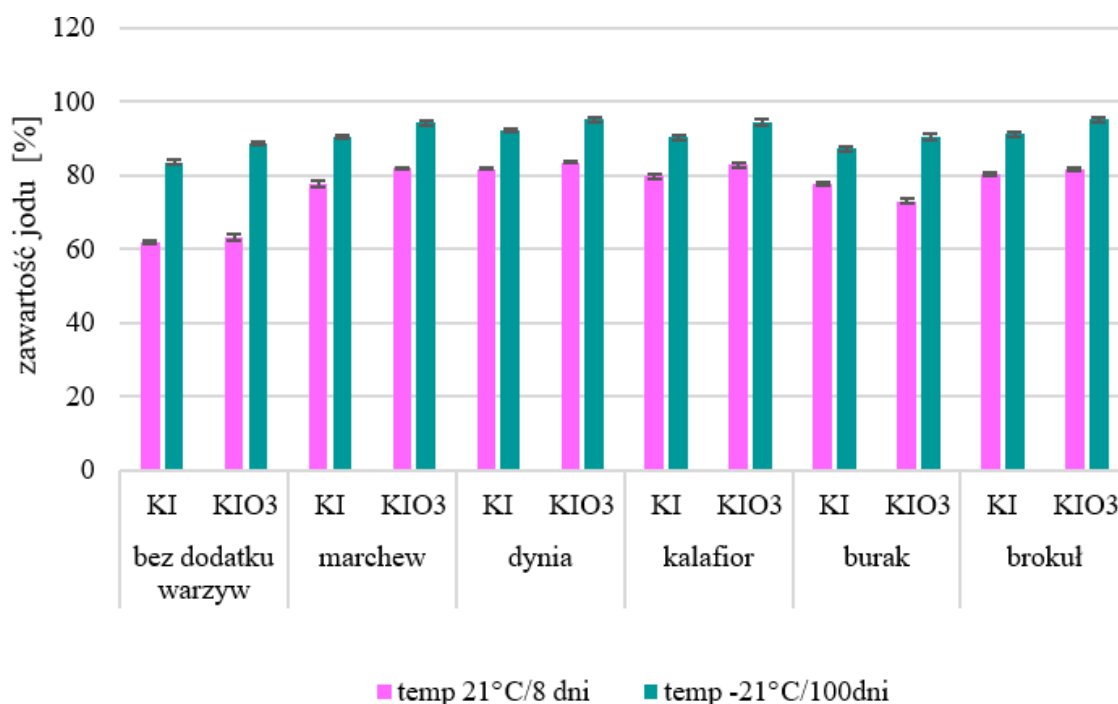
Analiza zmian zawartości jodu [%] w **bulkach typu Ciabatta** z dodatkiem warzyw fortifikowanych jodem potwierdziła obniżenie zawartości jodu podczas przechowywania. Dotyczyło to wszystkich analizowanych próbek przechowywanych w temperaturze 21°C przez 8 dni (Wykres 10), jak i przez 100 dni w temp. -21°C (Wykres 10). Straty jodu określono na poziomie 4 do 38%.

Wykazano natomiast wyższą stabilność jodu w produktach wzbogaconych warzywami fortifikowanymi jodem, w porównaniu do próbek z dodatkiem soli jodowanej. Dotyczyło to obu analizowanych form jodu (KI, KIO₃) ($p < 0,00$). Uzyskane wyniki analizy statystycznej nie potwierdziły statystycznie istotnego wpływu rodzaju warzywa użytego do wzbogacenia na stabilność jodu podczas przechowywania ($p = 0,15$) w produktach przechowywanych w warunkach zamrażalniczych. Potwierdzono natomiast związek pomiędzy rodzajem warzywa a zawartością jodu w próbkach przechowywanych w temperaturze 21°C ($F = 9,56$, $p < 0,00$).

Potwierdzono statystycznie istotnie niższą zawartość w próbkach z dodatkiem suszu buraka fortyfikowanego zarówno KI jak i KIO₃.

Analiza statystyczna predyktorów modeli wariancji dla zmian zawartości jodu w tej grupie produktów z dodatkiem suszy warzywnych fortyfikowanych jodem (Tabela 10) wykazała, statystycznie istotny wpływ formy (KI/KIO₃) wprowadzonego jodu na jego stabilność podczas przechowywania ($F=9260,35$, $p<0,00$). Uzyskaną zależność potwierdzono zarówno dla próbek z dodatkiem suszy fortyfikowanych, jak i soli jodowanej i przechowywanych w obu analizowanych zmiennych temperaturowych (21°C i – 21°C).

Analiza statystyczna predyktorów modeli wariancji dla zmian zawartości jodu w tej grupie produktów z dodatkiem wzbogaconych jodem suszy warzywnych (Tabela 10) wykazała także, statystycznie istotny wpływ temperatury (21°C i – 21°C) przechowywania próbek na stabilność wprowadzonego jodu ($F=83,60$, $p<0,00$). Po ośmiu dniach przechowywania w temp 21°C straty jodu wynosiły od 16 do 38% (Wykres 10). Analiza zawartości jodu w próbkach pieczywa przechowywanego w warunkach zamrażalniczych (–21°C) przez 100 dni (Wykres 10) potwierdziła znacznie mniejsze straty jodu, które wynosiły od 4 do 16%.



Wykres 10. Zmiany zawartości jodu [%] w bułkach typu Ciabatta z dodatkiem i bez dodatku suszy warzyw fortyfikowanych jodem (KI i KIO₃) po przechowywaniu temp. 21°C przez 8 dni oraz w temp. –21°C przez 100 dni (Opracowanie własne)

Tabela 10. Istotność statystyczna predyktorów (odmiany warzywa i formy jodu) modeli kowariancji dla zmian zawartości jodu w produktach bułki typu Ciabatta oraz kluski typu Gnocchi z dodatkiem suszy warzywnych wzbogaconych jodem (KIO_3/KI) po przechowywaniu (jednoczynnikowa analiza wariancji ANOVA). (Opracowanie własne)

Wariant	SS*	df	MSE	F	p
Zawartość jodu					
CIABATTA					
Rodzaj warzywa	145,32	5	29,06	1,62	0,15
Temperatura przech.	504923,40	1	504923,40	83,60	0,00
Forma jodu	14033,30	2	7016,65	9260,35	0,00
przechowywanie 21°C/8 dni					
Rodzaj warzywa	202,7	5	40,5	9,56	0,00
Forma jodu	2,80	2	1,40	0,13	0,88
przechowywanie -21°C/100 dni					
Rodzaj warzywa	386,60	5	77,3	43,71	0,00
Forma jodu	3,30	2	1,60	0,29	0,76
GNOCCHI					
Rodzaj warzywa	591,37	5	118,27	0,65	0,00
Forma jodu	31027,57	2	15513,79	908,15	0,00
Zawartość tiaminy					
CIABATTA					
Rodzaj warzywa	0,12	5	0,02	180,20	0,00
Forma jodu	0,00	2	0,00	4,10	0,02
przechowywanie 21°C/8 dni					
Rodzaj warzywa	386,60	5	77,30	43,71	0,00
Forma jodu	10,20	2	5,10	0,19	0,83
przechowywanie -21°C/100 dni					
Rodzaj warzywa	202,70	5	40,50	9,56	0,00
Forma jodu	16,70	2	8,30	0,53	0,60
DPPH					
CIABATTA					
przechowywanie 21°C/8 dni					
Rodzaj warzywa	2623,20	5,00	524,60	2618,00	0,00
Forma jodu	0,43	2,00	0,21	0,00	1,00
przechowywanie -21°C/100 dni					
Rodzaj warzywa	4200,55	5	840,11	6820,10	0,00
Forma jodu	0,67	2	0,33	0,00	1,00
GNOCCHI					
Rodzaj warzywa	2452,79	5	490,56	49431	0
Forma jodu	0,00	2	0,00	0,00	1,00
ABTS ⁺					
CIABATTA					
przechowywanie 21°C/ 8 dni					
Rodzaj warzywa	2188,86	5,00	437,77	7810,55	0,00
Forma jodu	0,45	2	0,22	0,008	0,999201
przechowywanie -21°C/100 dni					

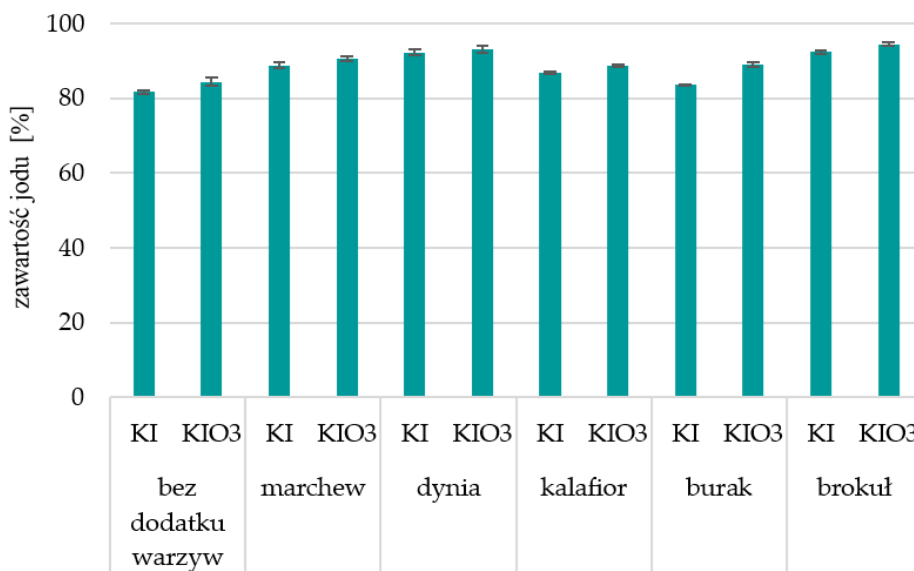
Rodzaj warzywa	4185,59	5	837,12	4489,4	0,00
Forma jodu	171,85	2,00	85,93	0,38	0,69
GNOCCHI					
Rodzaj warzywa	2716,77	5	543,35	7232,70	0,00
Forma jodu	0,15	2	0,08	0,00	1,00

Objaśnienia: SS – sumy kwadratów; df – liczba stopni swobody; MSE – średnia suma kwadratów; F – wartość testu F; p – poziom prawdopodobieństwa

Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.

Analiza statystyczna zmian zawartości jodu [%] w ugotowanych i przechowywanych w temp. -21°C /100 dni **kluskach typu Gnocchi** z dodatkiem warzyw fortifikowanych jodem potwierdziła obniżenie zawartości jodu podczas przechowywania (Wykres 11). Dotyczyło to wszystkich analizowanych próbek, zarówno z dodatkiem fortifikowanych warzyw jak i soli jodowanej. Straty нанесionego jodu określono na poziomie 5 do 18%.

Analogicznie do próbek bułek Ciabatta, wykazano wyższą stabilność jodu w produktach wzbogaconych warzywami fortifikowanymi jodem, w porównaniu do próbek z dodatkiem soli jodowanej. Dotyczyło to obu analizowanych form jodu (KI, KIO_3) ($p < 0,00$). Uzyskane wyniki analizy statystycznej potwierdziły związek pomiędzy rodzajem fortifikowanego warzywa a zawartością jodu w próbkach przechowywanych ($F = 0,65$, $p < 0,00$). Potwierdzono statystycznie istotnie wyższą zawartość jodu w próbkach z dodatkiem suszu brokułu i dyni fortifikowanych zarówno KI jak i KIO_3 (5,5 - 7,7%). Statystycznie niższą zawartość jodu potwierdzono w próbkach z dodatkiem suszu buraka fortifikowanego, szczególnie KI (16,4%).



Wykres 11. Zmiany zawartości jodu [%] w kluskach typu Gnocchi z dodatkiem i bez dodatku suszy warzyw fortifikowanych jodem (KI i KIO_3) po przechowywaniu w temp. -21°C przez 100 dni (Opracowanie własne)

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej predyktorów modeli wariancji dla zmian zawartości jodu w tej grupie produktów z dodatkiem wzbogaconych dodatkiem suszy warzywnych fortyfikowanych jodem (Tabela 10) wykazała, statystycznie istotny wpływ formy (KI/KIO₃) wprowadzonego jodu na jego stabilność podczas przechowywania ($F=908,15$, $p<0,00$). Niższą stabilność jodu potwierdzono zarówno dla próbek z dodatkiem suszy fortyfikowanych, jak i soli jodowanej. Zawierającej jod w formie KI. Dla próbek z dodatkiem fortyfikowanego buraka, różnica była największa i wynosiła 5,5 pkt % w porównaniu do próbek z dodatkiem KIO₃. Należy jednak zaznaczyć, że siła związku między formą jodu a stabilnością jodu dla próbek klusek Gnocchi była niższa w porównaniu do próbek bułek Ciabatta.

Zawartość tiaminy

Analiza zmian zawartości naturalnie występującej tiaminy [%] w **bulkach typu Ciabatta** z dodatkiem warzyw fortyfikowanych i niefortyfikowanych jodem oraz soli jodowanej potwierdziła obniżenie jej zawartości podczas przechowywania. Dotyczyło to wszystkich analizowanych próbek przechowywanych w temperaturze 21°C przez 8 dni (Wykres 12), jak i przez 100 dni w temp. –21°C (Wykres 12). Straty tiaminy określono na poziomie 7 do 25%.

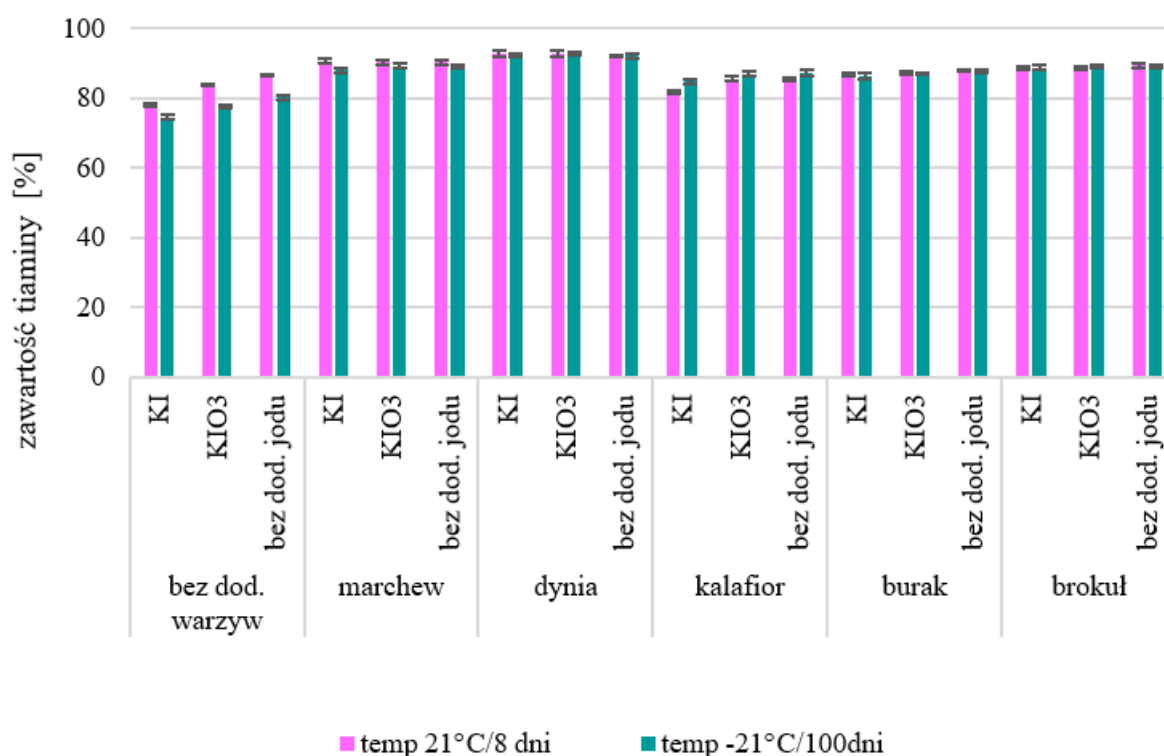
Wykazano statystycznie istotnie ($p<0,00$) wyższą stabilność tiaminy w produktach wzbogaconych warzywami fortyfikowanymi jodem, w porównaniu do próbek z dodatkiem soli jodowanej. W próbkach klusek z dodatkiem soli jodowanej przechowywanych w warunkach 21°C/ 8 dni potwierdzono statystycznie istotnie wyższe straty tiaminy (5,6 – 8,79 pkt%) w porównaniu do próbek bez dodatku jodu. Natomiast w próbkach z dodatkiem suszy fortyfikowanych jodem straty tiaminy w porównaniu do próbek z dodatkiem suszy niefortyfikowanych były na podobnym poziomie lub wyższe o 1 pkt%. Jedynie dla próbek z dodatkiem suszu kalafiora straty te były wyższe o 3 pkt%. Podobne tendencje potwierdzono dla próbek bułek typu Ciabatta przechowywanych w temperaturze –21°C/100 dni.

Analiza statystyczna nie potwierdziła statystycznie istotnego wpływu formy (KI/KIO₃) wprowadzonego jodu na stabilność zawartej tiaminy, zarówno podczas przechowywania w temperaturze 21°C/ 8 dni ($p=0,83$), jak i –21°C/ 100 dni ($p=0,60$) (Tabela 11). Jedynie dla próbek z dodatkiem suszu kalafiora potwierdzono wyższe straty dla próbek z dodatkiem KI o 2 pkt% dla próbek przechowywanych w temp. 21°C/8 dni i 4 pkt% dla próbek przechowywanych w temp. –21°C/100 dni.

Analiza statystyczna predyktorów modeli wariancji dla zmian zawartości tiaminy potwierdziła natomiast statystycznie istotny wpływ rodzaju fortyfikowanego warzywa użytego do wzbogacenia bułek typu Ciabatta na stabilność zawartej w nich tiaminy, zarówno podczas

przechowywania w temperaturze $-21^{\circ}\text{C}/100$ dni ($F=9,56$, $p<0,00$), jak i w temperaturze $21^{\circ}\text{C}/8$ dni ($F=43,71$, $p<0,00$). Najmniejsze straty (7,38 – 8,04%) potwierdzono dla próbek z dodatkiem suszu dyni fortyfikowanej jak i nie fortyfikowanej ($p<0,00$). Dotyczyło to obu zmiennych przechowywania (21°C i -21°C). Najwyższe straty tiaminy potwierdzono natomiast dla próbek z dodatkiem suszu kalafiora (13 -18%).

Uzyskane wcześniej wyniki potwierdziła także analiza dynamiki zmian zawartości tiaminy ($T_{25\%}$) (Tabela 11). Potwierdzono najszybsze tempo przemian tiaminy w próbkach przechowywanych w warunkach $21^{\circ}\text{C}/8$ dni fortyfikowanych KI. Dotyczyło to wszystkich produktów z dodatkiem wszystkich rodzajów warzyw. Potwierdzono także statystycznie najwolniejsze tempo przemian tiaminy w układach zawierających susze dyni. Dotyczyło to obu analizowanych zmiennych temperaturowych (21°C i -21°C).



Wykres 12. Zmiany zawartości tiaminy [%] w bułkach typu Ciabatta z dodatkiem i bez dodatku suszu warzyw fortyfikowanych jodem (KI i KIO_3) po przechowywaniu w temperaturze $-21^{\circ}\text{C}/100$ dni oraz 21°C przez 8 dni. (Opracowanie własne)

Tabela 11. Dynamika zmian zawartości tiaminy [mg/100g] naturalnie zawartej w bułkach typu Ciabatta wzbogaconych dodatkiem fortyfikowanych i niefortyfikowanych jodem suszu warzywnych (marchew, dynia, kalafior, burak, brokuły) podczas przechowywania ($21^{\circ}\text{C}/8$ dni i $-21^{\circ}\text{C}/100$ dni) (Opracowanie własne).

Wskaźniki dynamiki zmian zawartości tiaminy podczas przechowywania					
Rodzaj warzywa	T _{25%} [dni]	R ²	RMSE	k	A ₀ *
przechowywanie -21°C/100dni					
G_WN_KI	98,03	0,925	0,157	-0,0005	1,233
G_WN_KIO ₃	108,79	0,885	0,157	-0,0005	1,227
G_WN	115,46	0,918	0,155	-0,0005	1,234
G_CR_KI	205,71	0,978	0,154	-0,0004	1,233
G_CR_KIO ₃	231,81	0,968	0,150	-0,0002	1,208
G_CR	222,56	0,935	0,148	-0,0002	1,209
G_P_KI	310,09	0,890	0,002	-0,0001	1,214
G_P_KIO ₃	332,12	0,962	0,001	-0,0002	1,240
G_P	326,80	0,954	0,001	-0,0002	1,241
G_CP_KI	168,84	0,984	0,007	-0,0003	1,219
G_CP_KIO ₃	200,68	0,965	0,001	-0,0002	1,212
G_CP	207,22	0,972	0,001	-0,0002	1,214
G_B_KI	181,70	0,979	0,001	-0,0002	1,194
G_B_KIO ₃	200,29	0,945	0,002	-0,0002	1,179
G_B	203,38	0,951	0,002	-0,0002	1,185
G_BT_KI	208,74	0,922	0,002	-0,0002	1,194
G_BT_KIO ₃	215,74	0,962	0,001	-0,0002	1,218
G_BT	219,46	0,922	0,002	-0,0002	1,221
przechowywanie 21°C/8dni					
G_WN_KI	8,63	0,922	0,005	-0,0067	1,239
G_WN_KIO ₃	12,44	0,909	0,003	-0,0042	1,230
G_WN	15,84	0,908	0,003	-0,0049	1,237
G_CR_KI	20,90	0,911	0,017	-0,0024	1,234
G_CR_KIO ₃	20,52	0,869	0,002	-0,0022	1,210
G_CR	19,66	0,878	0,002	-0,0023	1,211
G_P_KI	25,08	0,919	0,002	-0,0020	1,216
G_P_KIO ₃	25,66	0,871	0,002	-0,0019	1,241
G_P	26,11	0,911	0,001	-0,0019	1,241
G_CP_KI	11,61	0,868	0,006	-0,0052	1,225
G_CP_KIO ₃	12,58	0,908	0,020	-0,0041	1,218
G_CP	14,18	0,919	0,002	-0,0033	1,218
G_B_KI	14,57	0,912	0,005	-0,0062	1,199
G_B_KIO ₃	15,91	0,834	0,003	-0,0024	1,180
G_B	16,28	0,891	0,004	-0,0022	1,184
G_BT_KI	16,00	0,841	0,004	-0,0013	1,192
G_BT_KIO ₃	16,85	0,836	0,003	-0,0028	1,222
G_BT	17,18	0,812	0,009	-0,0027	1,224

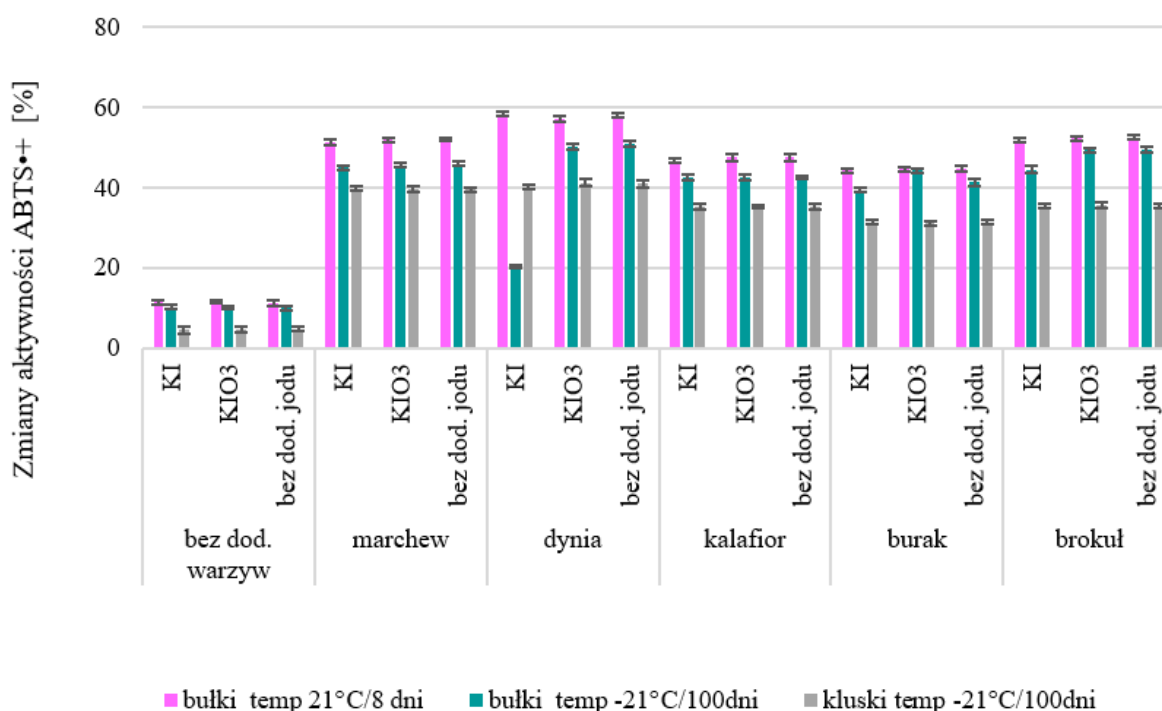
* objaśnienia: * A₀ - początkowa ilość jodu, k - stała zaniku.

Podsumowując można stwierdzić, że dodatek suszy warzywnych fortyfikowanych jodem podwyższa stabilność tiaminy w obecności jodu, zarówno w formie jodku potasu, jak i jodanu potasu.

Aktywność przeciwutleniająca

Wskaźniki aktywności przeciwutleniającej (ABTS^{•+}, DPPH[•]) były oznaczane w surowym cieście obu produktów, po obróbce termicznej oraz po zakończeniu przechowywania.

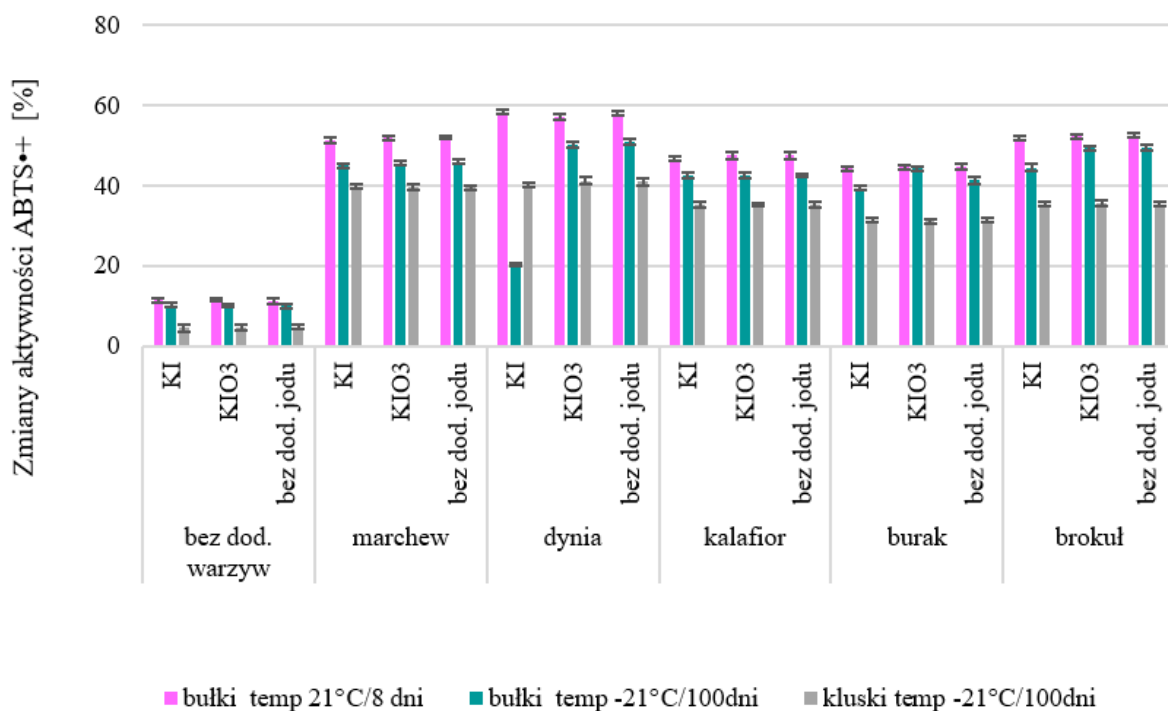
Analiza uzyskanych wyników badań potwierdziła statystycznie istotny wpływ dodatku wszystkich analizowanych suszy warzyw na podwyższenie aktywności przeciwutleniającej wzbogaconych produktów. Dotyczyło to zarówno suszy fortifikowanych, jak i niefortyfikowanych. Wyższą aktywność przeciwutleniającą potwierdzono dla klusek typu Gnocchi, niezależnie od zastosowanego rodzaju warzywa, co należy tłumaczyć wyższą jego ilością w produkcie (24%) (



Wykres 13 i Wykres 14).

Analiza statystyczna zmian [%] aktywności przeciwutleniającej (ABTS^{•+}, DPPH[•]) w ugotowanych i przechowywanych w temp. -21°C/100 dni kluskach typu Gnocchi z dodatkiem warzyw fortifikowanych jodem, potwierdziła obniżenie tej aktywności podczas

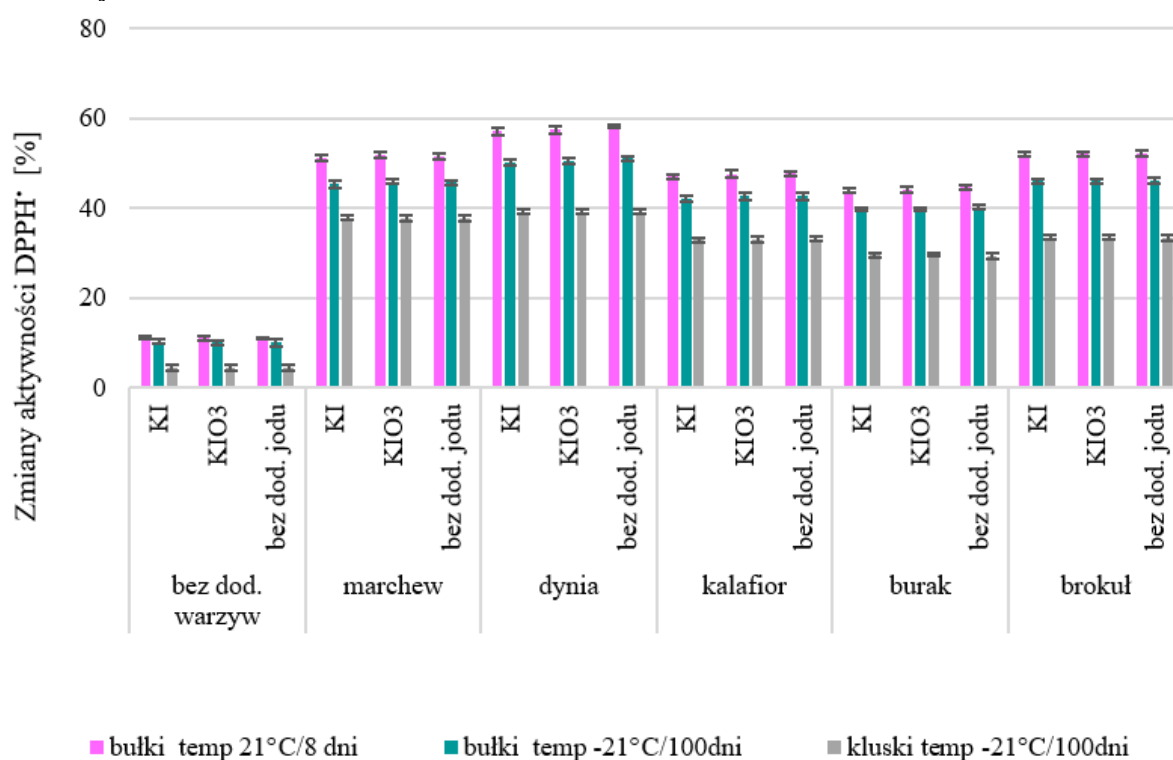
przechowywania (



Wykres

13

i

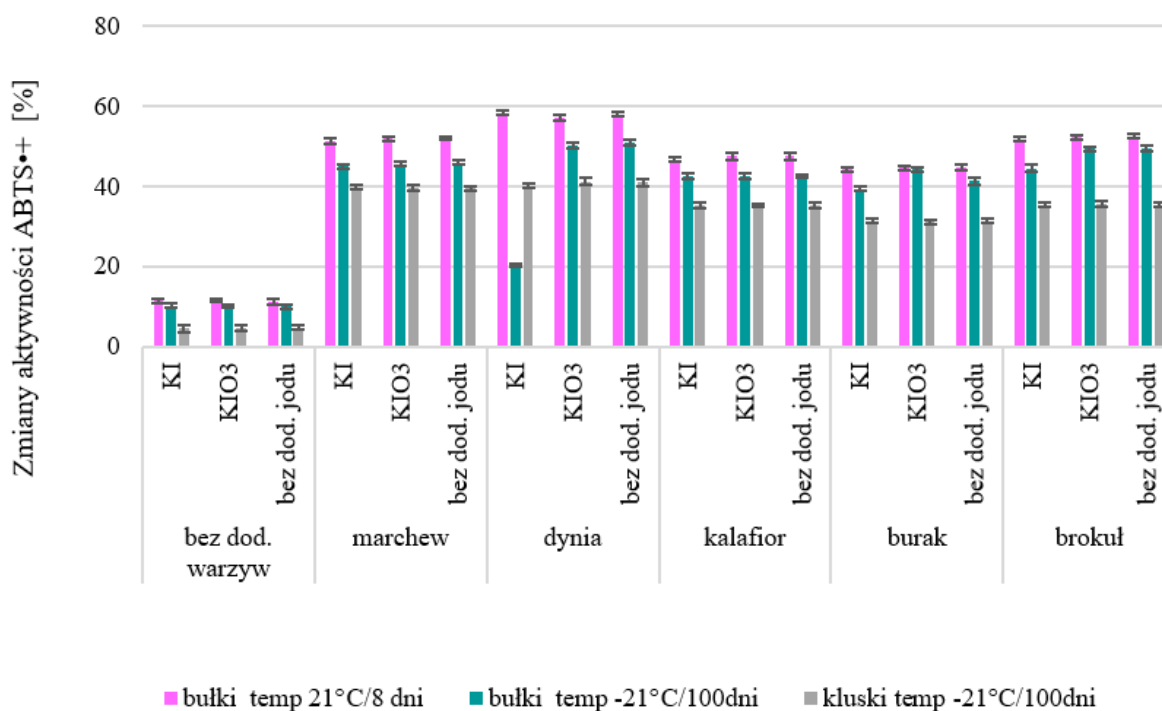


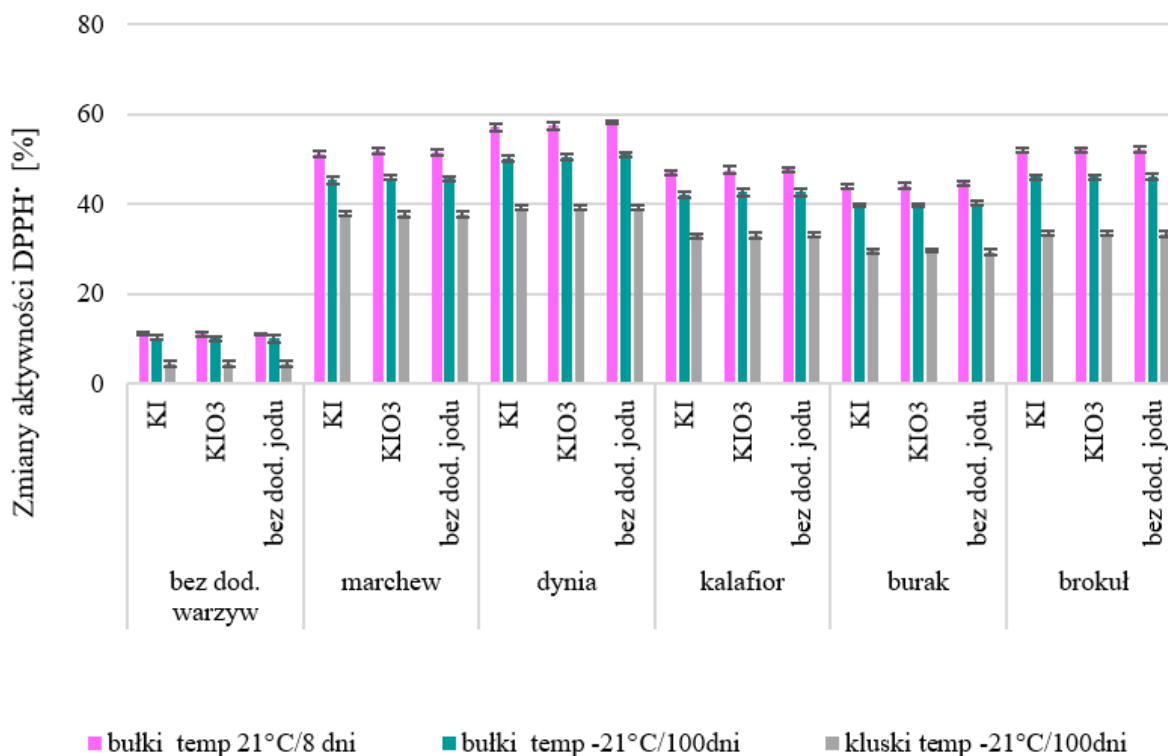
Wykres 14). Dotyczyło to wszystkich analizowanych próbek, zarówno z dodatkiem fortifikowanych i niefortyfikowanych warzyw jak i soli jodowanej.

Analiza statystyczna predyktorów modeli wariancji dla zmian aktywności przeciwutleniającej w kluskach typu Gnocchi z dodatkiem wzbogaconych jodem suszy

warzywnych (Tabela 10) i przechowywanych w temperaturze $-21^{\circ}\text{C}/100$ dni potwierdziła zależność pomiędzy rodzajem warzywa użytego do wzbogacenia a aktywnością antyoksydacyjną wszystkich próbek, dotyczącą wychwytywania kationorodnika ABTS ($F=7232,7$, $p<0,00$) oraz rodnika DPPH ($F=49431$, $p<0,00$). Nie potwierdzono natomiast związku pomiędzy formą (KI/KIO_3) a aktywnością antyoksydacyjną wszystkich próbek, dotyczącą wychwytywania kationorodnika ABTS ($p=1,00$) oraz rodnika DPPH ($p=1,00$). Podobne tendencje potwierdzono dla próbek przechowywanych w temperaturze $21^{\circ}\text{C}/8$ dni. Potwierdzono zależność pomiędzy rodzajem warzywa użytego do wzbogacenia a aktywnością antyoksydacyjną wszystkich próbek, dotyczącą wychwytywania kationorodnika ABTS ($F=436,40$, $p<0,00$) oraz rodnika DPPH ($F=523,50$, $p<0,00$). Nie potwierdzono natomiast związku pomiędzy formą (KI/KIO_3) a aktywnością antyoksydacyjną wszystkich próbek, dotyczącą wychwytywania kationorodnika ABTS ($p=0,16$) oraz rodnika DPPH ($p=0,20$).

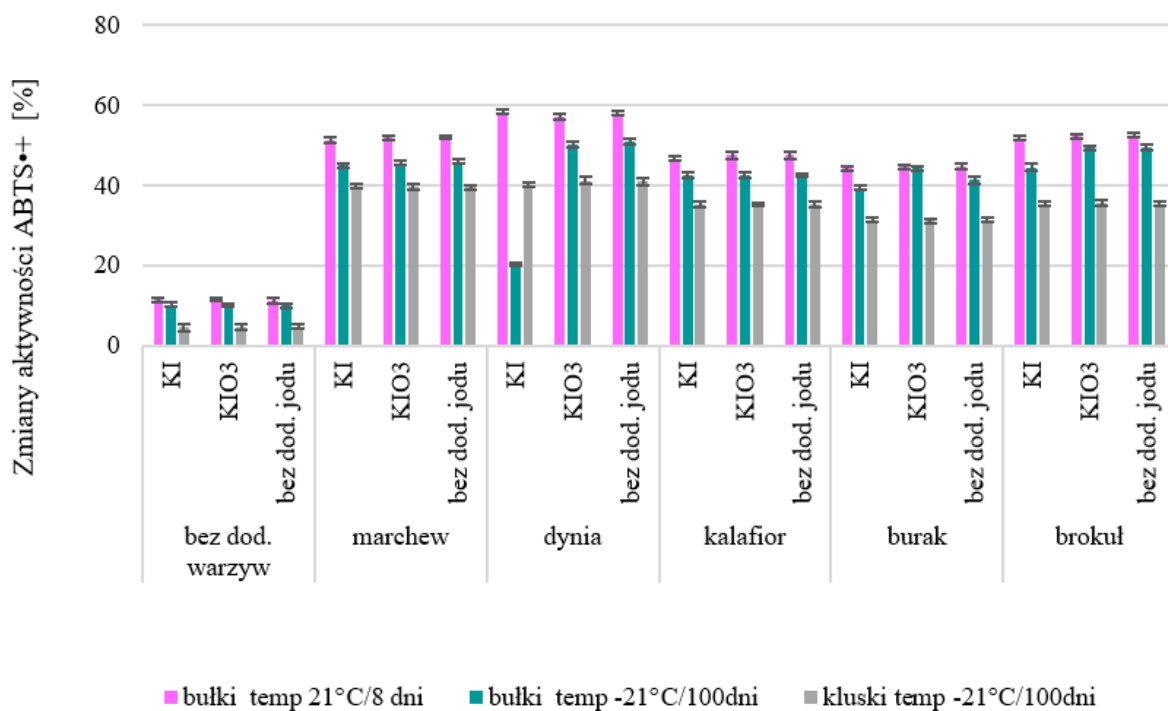
Analiza aktywności przeciwutleniającej **bułek typu Ciabatta** z dodatkiem suszy warzyw potwierdziła obniżenie tej aktywności podczas przechowywania (



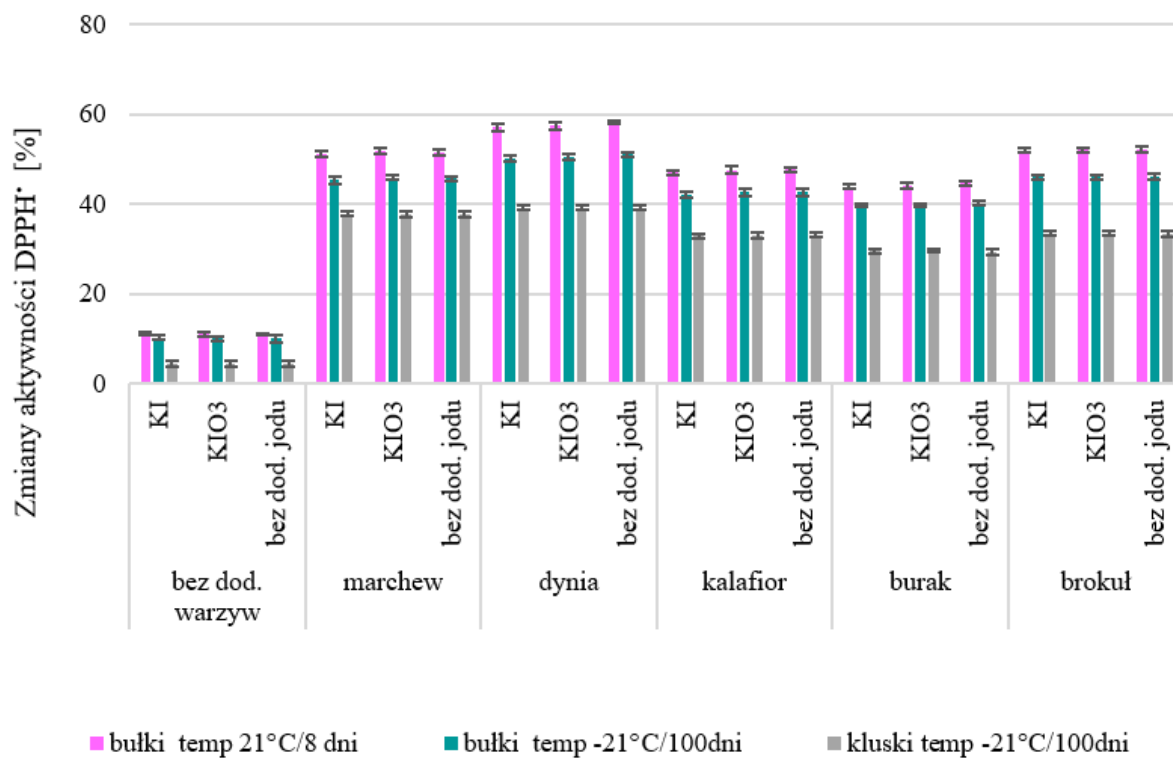


Wykres 14). Dotyczyło to wszystkich analizowanych próbek, zarówno z dodatkiem fortyfikowanych i niefortyfikowanych warzyw, jak i soli jodowanej.

Analiza statystyczna predyktorów modeli wariancji dla zmian aktywności przeciwutleniającej w bułkach typu Ciabatta z dodatkiem wzbogaconych jodem suszy warzywnych (Tabela 10 **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**) i przechowywanych w temperaturze $-21^{\circ}\text{C}/100$ dni, potwierdziła zależność pomiędzy rodzajem warzywa użytego do wzbogacenia a aktywnością antyoksydacyjną wszystkich próbek, dotyczącą wychwytywania kationorodnika ABTS ($F=4489,4$, $p<0,00$) oraz rodnika DPPH ($F=6820,1$, $p<0,00$). Nie potwierdzono natomiast związku pomiędzy formą (KI/KIO₃) aktywnością antyoksydacyjną wszystkich próbek, dotyczącą wychwytywania kationorodnika ABTS ($p=0,69$) oraz rodnika DPPH ($p=1,0$). Podobne tendencje potwierdzono dla próbek przechowywanych w temperaturze $21^{\circ}\text{C}/8$ dni. Potwierdzono zależność pomiędzy rodzajem warzywa użytego do wzbogacenia a aktywnością antyoksydacyjną wszystkich próbek, dotyczącą wychwytywania kationorodnika ABTS ($F=7810,55$, $p<0,00$) oraz rodnika DPPH ($F=26,18,0$, $p<0,00$). Nie potwierdzono natomiast związku pomiędzy formą (KI/KIO₃) a aktywnością antyoksydacyjną wszystkich próbek, dotyczącą wychwytywania kationorodnika ABTS ($p=1,0$) oraz rodnika DPPH ($p=1,0$).



Wykres 13. Zmiany aktywności przeciwutleniającej [%] (ABTS^{•+}) w kluskach typu Gnocchi i w bułkach typu Ciabatta z dodatkiem i bez dodatku suszy warzyw fortifikowanych jodem (KI i KIO₃) po przechowywaniu w temperaturze -21°C /100dni oraz 21°C przez 8 dni. (Opracowanie własne)



Wykres 14. Zmiany aktywności przeciwutleniającej [%] (DPPH[•]) w kluskach typu Gnocchi i w bułkach typu Ciabatta z dodatkiem i bez dodatku suszy warzyw fortifikowanych jodem (KI i KIO₃) po przechowywaniu w temperaturze -21°C /100 dni oraz 21°C przez 8 dni. (Opracowanie własne)

Podsumowanie

W produktach zbożowych (bułka typu Ciabatta i kluski typu Gnocchi) z dodatkiem suszy warzywnych fortifikowanych jodem (KI i KIO₃) stabilność wskaźników przeciwutleniających (ABTS^{•+}, DPPH[•]) była wyższa w porównaniu do wzbogaconych w jod przy zastosowaniu soli jodowanej. Potwierdzono także niezmienną stabilność tych wskaźników przeciwutleniających w porównaniu do produktów z dodatkiem niefortyfikowanych jodem suszy warzywnych.

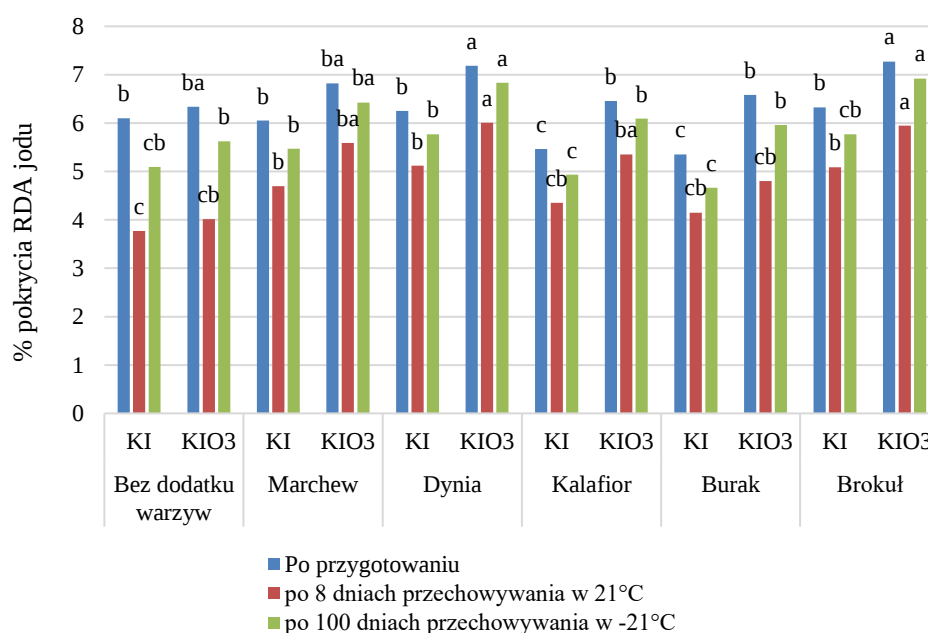
Analiza skuteczności zastosowania dodatku fortifikowanych jodem suszy warzywnych do produktów zbożowych na podstawie pokrycia RDA na jod

Zaprojektowane **bułki typu Ciabatta** zostały wzbogacone w jod poprzez 5% dodatek fortifikowanych jodem (KI, KIO₃) suszy warzywnych lub poprzez dodatek NaCl wzbogaconego w jod w ilości odpowiadającej tej wprowadzonej przy pomocy suszy warzywnych. Na podstawie analizy zawartości jodu w zaprojektowanych produktach wykonano analizę stopnia pokrycia [%] zalecanego dziennego spożycia jodu (RDA) przy spożyciu 100g wzbogaconych w jod bułek typu Ciabatta (Wykres 15) oraz klusek typu Gnocchi (Wykres 16).

Na podstawie przeprowadzonej analizy określono, że spożycie zaprojektowanych bułek typu Ciabatta z dodatkiem suszy fortifikowanych jodem pozwoliłoby na pokrycie RDA dla jodu na poziomie 3,5 – 7,0%. Analiza statystyczna stopnia pokrycia [%] zalecanego dziennego spożycia jodu (RDA) przy spożyciu 100g wzbogaconych w jod bułek typu Ciabatta (Wykres 15) wykazała, że najkorzystniej pod względem pokrycia RDA na jod byłoby spożywać bułki bezpośrednio po przygotowaniu. Spożycie 100g bułek typu Ciabatta wzbogaconych w susze fortifikowane jodem w dniu upieczenia pozwoliłoby na pokrycie RDA dla jodu w formie KIO₃ w zakresie 6,3%-7,3%. Natomiast spożycie pieczywa wzbogaconego przy zastosowaniu KI pozwoliłoby na pokrycie RDA dla jodu na poziomie 5,4%-6,3%.

Najniższy % RDA dla jodu potwierdzono dla pieczywa typu Ciabatta przechowywanego w temp. 21°C przez okres 8 dni. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na oszacowanie, że spożycie 100g pieczywa przechowywanego przez 8 dni w temp. 21°C pozwoliłoby na pokrycie RDA dla jodu w formie KIO₃ w zakresie 4%-6%. Natomiast spożycie pieczywa wzbogaconego przy zastosowaniu KI pozwoliłoby na pokrycie RDA dla jodu na poziomie 3,8%-5,0%.

Analiza rodzaju zastosowanego warzywa jako matrycy dla jodu do wzbogacenia bułek typu Ciabatta pozwoliła na potwierdzenie szacunkowego najwyższego pokrycia RDA dla jodu po spożyciu bułek wzbogaconych suszem marchwi, dyni lub brokułu. W najniższym stopniu, ale wyższym niż w próbkach z dodatkiem jodu naniesionego na chlorek sodu, szacunkowe pokrycie RDA na jod dotyczyłoby spożycia bułek z dodatkiem fortyfikowanego KIO_3 suszu kalafiora i buraka. Najniższe pokrycie RDA jodu wykazano dla bułek typu Ciabatta z dodatkiem fortyfikowanych KI suszu kalafiora i buraka.

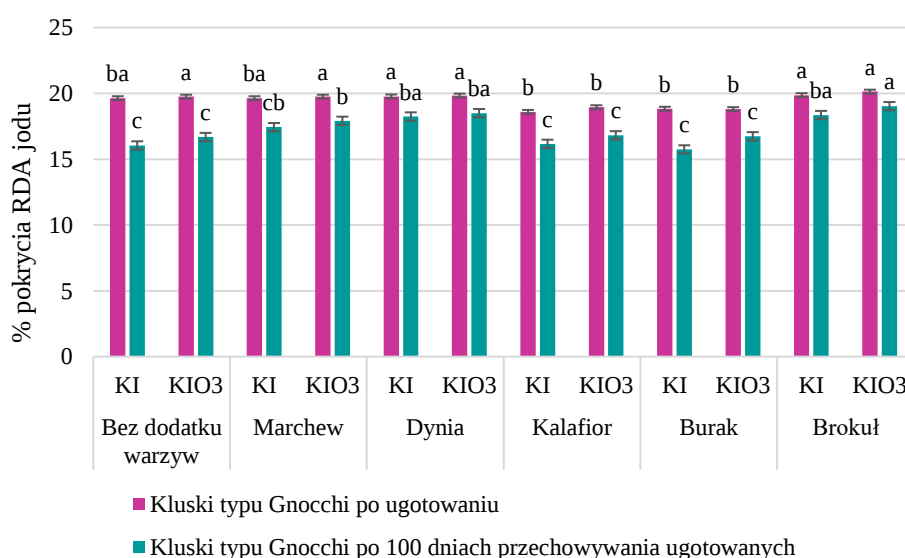


Wykres 15. Stopień pokrycia [%] zalecanego dziennego spożycia jodu (RDA) przy spożyciu 100g wzbogaconych w jod bułek typu Ciabatta, w zależności od zastosowanego nośnika jodu, formy jodu oraz sposobu przechowywania. *Różne litery oznaczają statystycznie istotną różnicę średnich ($n=6$) przy $p \leq 0,05$. (Opracowanie własne)

Zaprojektowane **kluski typu Gnocchi** zostały wzbogacone w jod poprzez 24% dodatek fortyfikowanych w jod (KI, KIO_3) suszy warzywnych lub poprzez dodatek NaCl wzbogaconego w jod, w ilości odpowiadającej tej wprowadzonej przy pomocy suszy warzywnych. Na podstawie przeprowadzonej analizy określono, że spożycie 100g zaprojektowanych klusek typu Gnocchi z dodatkiem suszy fortyfikowanych jodem pozwoliłoby na pokrycie RDA dla jodu na poziomie 16,4 – 22,0 %. Dodatek dyni jako matrycy dla wprowadzonego do produktu jodu pozwolił na pokrycie RDA dla jodu w najwyższym stopniu.

Analiza statystyczna stopnia pokrycia [%] zalecanego dziennego spożycia jodu (RDA) przy spożyciu 100g wzbogaconych w jod klusek typu Gnocchi (Wykres 16) wykazała, że najkorzystniej, pod względem pokrycia RDA na jod, byłoby spożywać kluski bezpośrednio po obróbce cieplnej (gotowaniu). Analiza uzyskanych wyników zawartości jodu pozwoliła na oszacowanie, że spożycie 100g ugotowanych klusek typu Gnocchi wzbogaconych w susze fortyfikowane jodem, nie przechowywanych wcześniej i spożytych bezpośrednio po ugotowaniu, pozwoliłoby na pokrycie RDA dla jodu w formie KIO_3 w zakresie 19%-20,1%. Natomiast spożycie produktu wzbogaconego przy zastosowaniu KI pozwoliłoby na pokrycie RDA dla jodu na poziomie 18,6%-19,9%. Jedną z form dystrybucji potraw typu kluski są warunki zamrażalnicze. Analiza zawartości jodu w zaprojektowanych kluskach typu Gnocchi ugotowanych i przechowywanych przez 100 dni w temperaturze $-21^{\circ}C$ potwierdziła, że spożycie 100g tej grupy produktów pozwoliłoby szacunkowo na pokrycie RDA dla jodu w formie KIO_3 w zakresie 16,75 – 18,56 %, a dla jodu w formie KI w zakresie 15,75% - 18,25%.

Analiza rodzaju zastosowanego warzywa jako matrycy dla jodu wzbogacającego kluski typu Gnocchi pozwoliła na potwierdzenie szacunkowego najwyższego pokrycia RDA dla jodu po spożyciu klusek wzbogaconych suszem marchwi, dyni lub brokułu. W niższym stopniu, ale nadal wyższym niż w próbkach z dodatkiem jodu naniesionego na chlorek sodu, szacunkowe pokrycie RDA jodu dotyczyłoby spożycia klusek z dodatkiem fortyfikowanego jodem suszu kalafiora. Najniższe pokrycie RDA jodu zapewniają kluski typu Gnocchi z dodatkiem fortyfikowanych w jod suszy buraka.



Wykres 16. Stopień pokrycia [%] zalecanego dziennego spożycia (RDA) jodu przy spożyciu 100g wzbogaconych w jod klusek typu Gnocchi, w zależności od zastosowanego nośnika jodu i formy jodu.

*Różne litery oznaczają statystycznie istotną różnicę średnich ($n=6$) przy $p \leq 0,05$ (Opracowanie własne)

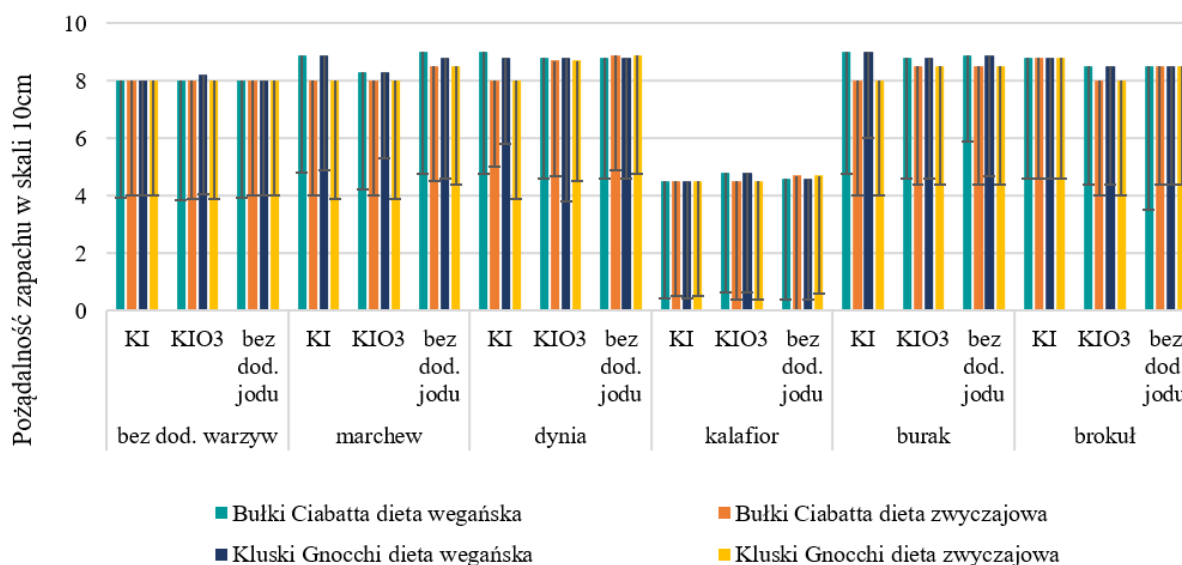
Zawartość jodu w produktach wzbogaconych, zwłaszcza spożywanych codziennie lub kilka razy dziennie, jak w przypadku pieczywa, nie powinna być zbyt wysoka, gdyż może stwarzać ryzyko nadmiernego spożycia tego pierwiastka, co jest wysoce niekorzystne. W przypadku zaprojektowanych bułek typu Ciabatta i klusek typu Gnocchi, spożycie nawet 0,5kg produktu nie pokryje dziennego zapotrzebowania na jod w całości.

Ocena sensoryczna

Analizowane produkty typu bułki Ciabatta i kluski Gnocchi wzbogacone suszem warzyw fortyfikowanych jodem charakteryzują się wysoką stabilnością jodu, tiaminy, jak i aktywnością przeciwutleniającą. Jednak czynnikiem decydującym o powodzeniu produktu i deklaracji przyszłego zakupu jest także odpowiednio wysoka jakość sensoryczna, zwłaszcza w odbiorze potencjalnego konsumenta. Ocenie konsumenckiej poddano kluski typu Gnocchi i bułki typu Ciabatta po obróbce cieplnej. Analizowano pożądalność sensoryczną wobec zapachu, barwy, smaku. Przyjęto także ocenę ogólnej pożądalności. Na podstawie uzyskanych wyników badań oceny konsumenckiej wśród potencjalnych ich odbiorców (konsumentów deklarujących dietę wegańską jak i „zwyczajową”) potwierdzono wysoką pożądalność wobec wszystkich atrybutów dla wszystkich ocenianych produktów.

Na podstawie uzyskanych wyników badań potwierdzono wysoką pożądalność wobec zapachu (4,5-8,9 pkt) dla wszystkich ocenianych próbek (Wykres 17).

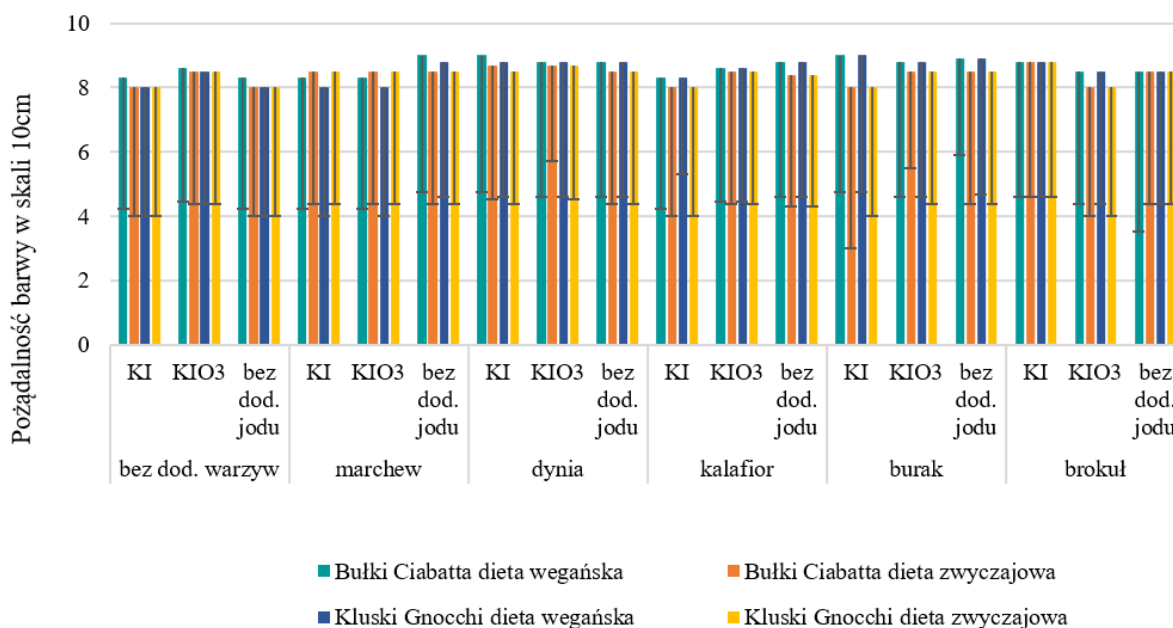
Analiza statystyczna predyktorów modeli wariancji dla pożądalności sensorycznej wobec zapachu dla klusek typu Gnocchi i bułek typu Ciabatta z dodatkiem fortyfikowanych jodem suszy warzywnych (Tabela 12) potwierdziła zależność pomiędzy rodzajem warzywa użytego do wzbogacenia a pożądalnością wobec zapachu zarówno bułek typu Ciabatta, ($F=166,05$, $p<0,00$), jak i klusek typu Gnocchi ($F=180,68$, $p<0,00$). Potwierdzono obniżenie pożądalności sensorycznej wobec zapachu dla klusek, jak i bułek z dodatkiem suszu kalafiora (średnia ocen 4,5 pkt). Tendencja ta dotyczyła próbek z dodatkiem suszu fortyfikowanego jodem jak i niefortyfikowanego. Nie potwierdzono związku pomiędzy formą wprowadzonej soli (NaCl cz.d.a./ KI/KIO_3) a pożądalnością sensoryczną wobec zapachu analizowanych próbek, zarówno dla bułek typu Ciabatta ($p=0,96$) oraz klusek typu Gnocchi ($p=0,97$). Nie potwierdzono także związku pomiędzy rodzajem deklarowanej diety oceniających a pożądalnością sensoryczną wobec zapachu analizowanych próbek zarówno dla bułek typu Ciabatta ($p=0,58$) oraz klusek typu Gnocchi ($p=0,59$).



Wykres 17. Charakterystyka oceny pożądalności sensorycznej zapachu wobec klusek typu Gnocchi i bułek typu Ciabatta z dodatkiem wzbogaconych jodem nośników (Opracowanie własne oraz Zaremba i in., (2022))

Na podstawie uzyskanych wyników badań potwierdzono także wysoką pożądalność wobec barwy (8,0-9,5 pkt) dla wszystkich ocenianych próbek, zarówno bułek typu Ciabatta jak i klusek typu Gnocchi z dodatkiem wszystkich analizowanych suszy warzywnych fortyfikowanych i niefortyfikowanych w jod (Wykres 18).

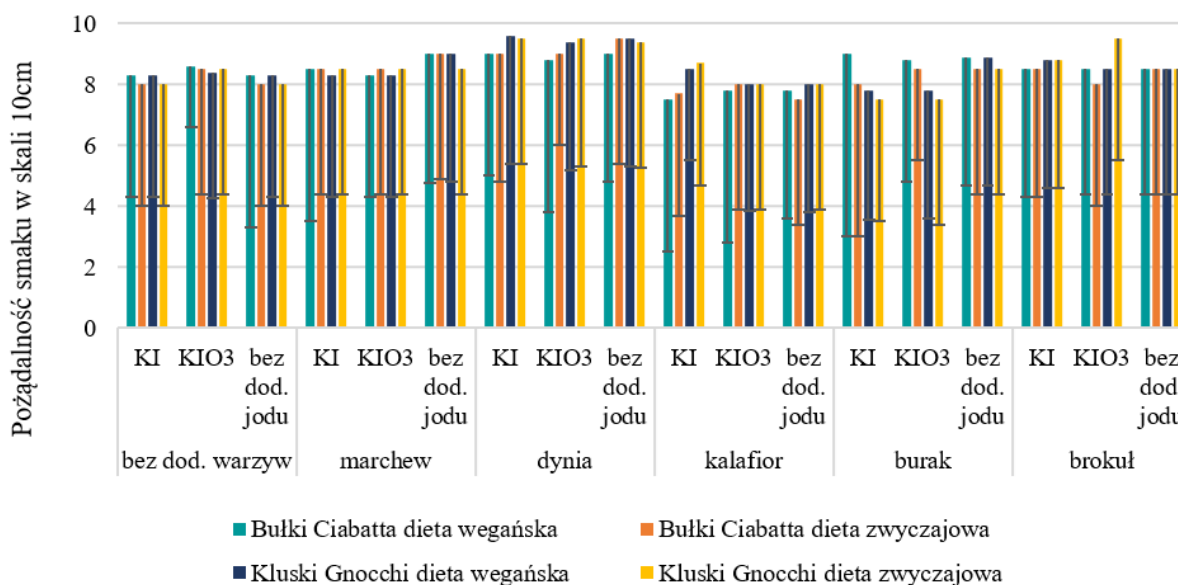
Analiza statystyczna predyktorów modeli wariancji dla pożądalności sensorycznej wobec barwy ocenianych produktów (Tabela 12) nie potwierdziła zależności pomiędzy formą wprowadzonej soli (NaCl cz.d.a./KI/KIO₃) a pożądalnością wobec barwy, zarówno bułek typu Ciabatta, ($p=0,79$) oraz klusek typu Gnocchi ($p=0,60$). Nie wykazano związku między rodzajem deklarowanej diety oceniających a pożądalnością sensoryczną wobec barwy bułek typu Ciabatta ($p=0,10$). Nie potwierdzono także związku pomiędzy rodzajem deklarowanej diety oceniających a pożądalnością sensoryczną wobec barwy klusek typu Gnocchi ($p=0,11$). Podobne tendencje potwierdzono dla rodzaju warzywa wykorzystanego jako matryca dla jodu, wprowadzonego zarówno do bułek typu Ciabatta ($p=0,10$) oraz klusek typu Gnocchi ($F=2,53$, $p=0,05$). Należy zwrócić uwagę na wysoką pożądalność wobec barwy ocenianych produktów, pomimo ich dużej różnorodności.



Wykres 18. Charakterystyka oceny pożądalności sensorycznej barwy wobec klusek typu Gnocchi i bułek typu Ciabatta z dodatkiem wzbogaconych jodem nośników (Opracowanie własne oraz Zaremba i in., (2022))

Na podstawie uzyskanych wyników badań potwierdzono także wysoką pożądalność wobec smaku (6,0-9,6 pkt) dla wszystkich ocenianych próbek, zarówno bułek typu Ciabatta jak i klusek typu Gnocchi z dodatkiem wszystkich analizowanych suszy warzywnych fortifikowanych i niefortifikowanych (Wykres 19).

Analiza statystyczna predyktorów modeli wariancji dla pożądalności sensorycznej wobec smaku dla ocenianych produktów z dodatkiem fortifikowanych jodem suszy warzywnych (Tabela 12) nie potwierdziła zależności pomiędzy formą wprowadzonej soli (NaCl cz.d.a./KI/KIO₃) a pożądalnością wobec smaku, zarówno bułek typu Ciabatta, ($p=0,98$) oraz klusek typu Gnocchi ($p=0,92$). Nie potwierdzono także związku pomiędzy rodzajem deklarowanej diety ocenianych a pożądalnością sensoryczną wobec smaku dla próbek bułek typu Ciabatta ($p=0,89$) oraz klusek typu Gnocchi ($p=0,89$). Nieistotne statystycznie różnice w deklaracji wysokiej pożądalności wobec smaku, zarówno w grupie osób na diecie zwyczajowej jak i wegańskiej świadczyć mogą o przyszłym zainteresowaniu potencjalnych konsumentów. Rodzajem warzywa wykorzystanego jako matryca dla jodu, wprowadzonego do analizowanych produktów miał istotny statystycznie związek z pożądalnością sensoryczną wobec smaku dla bułek typu Ciabatta ($F=102,47$, $p<0,00$) oraz klusek typu Gnocchi, przy czym dla klusek był wyraźnie słabszy ($F=14,89$, $p<0,00$).

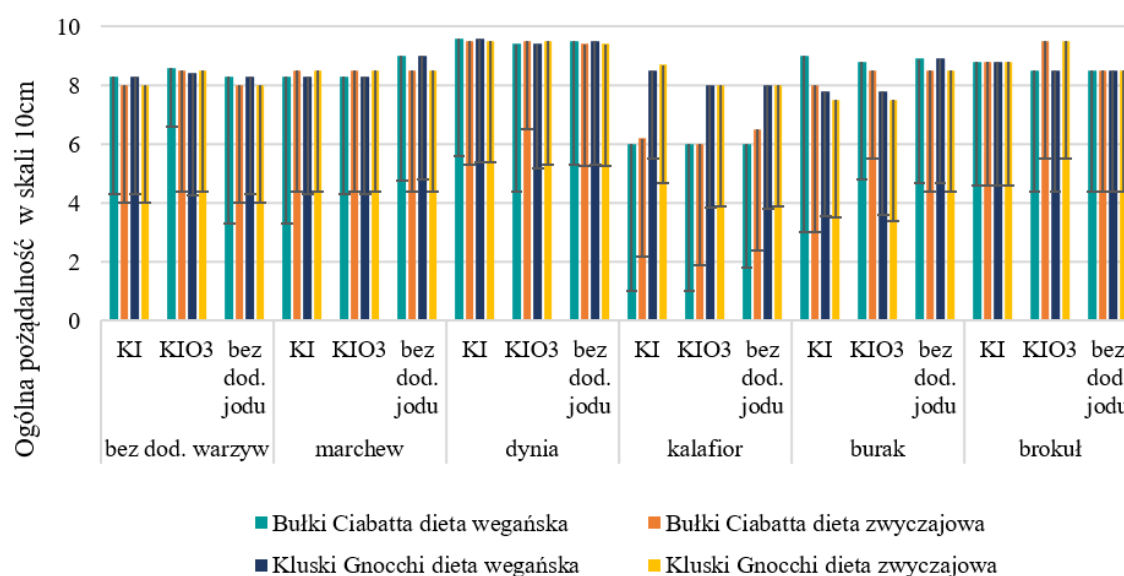


Wykres 19. Charakterystyka oceny pożądalności sensorycznej smaku wobec klusek typu Gnocchi i bułek typu Ciabatta z dodatkiem wzbogaconych jodem nośników (Opracowanie własne oraz Zaremba i in., (2022))

Na podstawie uzyskanych wyników badań potwierdzono także wysoką ogólną pożądalność (6,0-9,5 pkt) dla wszystkich ocenianych próbek, zarówno bułek typu Ciabatta jak i klusek typu Gnocchi z dodatkiem wszystkich analizowanych suszy warzywnych fortyfikowanych i niefortyfikowanych (Wykres 20).

Analiza statystyczna predyktorów modeli wariancji dla pożądalności sensorycznej wobec ogólnej pożądalności wobec ocenianych produktów z dodatkiem fortyfikowanych jodem suszy warzywnych (Tabela 12) nie potwierdziła zależności pomiędzy formą wprowadzonej soli (NaCl cz.d.a./KI/KIO₃) a pożądalnością wobec smaku, zarówno bułek typu Ciabatta, ($p=0,70$) oraz klusek typu Gnocchi ($p=0,32$). Podobną tendencję potwierdzono pomiędzy rodzajem deklarowanej diety oceniających a ogólną pożądalnością sensoryczną dla próbek bułek typu Ciabatta ($p=0,52$) oraz klusek typu Gnocchi ($p=0,45$). Nieistotne statystycznie różnice w deklaracji wysokiej pożądalności wobec smaku, zarówno w grupie osób na diecie zwyczajowej jak i wegańskiej świadczyć mogą o przyszłym zainteresowaniu potencjalnych konsumentów. Analiza statystyczna potwierdziła natomiast zależność pomiędzy rodzajem warzywa użytego do wzbogacenia a ogólną pożądalnością zarówno bułek typu Ciabatta, ($F=17,09$, $p<0,00$) oraz klusek typu Gnocchi ($F=10,19$, $p<0,00$). Wyniki analizy konsumenckiej potwierdziły niższą pożądalność ogólną zarówno wobec bułek typu Ciabatta jak i klusek Gnocchi z dodatkiem suszu kalafiora fortyfikowanego jak i niefortyfikowanego.

Wykres 20. Charakterystyka oceny ogólnej pożądalności sensorycznej wobec klusek typu Gnocchi i bułek typu Ciabatta z dodatkiem wzbogaconych jodem nośników (Opracowanie własne oraz Zaremba i in., (2022))



Wyniki oceny konsumenckiej pożądalności sensorycznej wykazały, że bułki typu Ciabatta jak i kluski typu Gnocchi, zarówno z dodatkiem, jak i bez nośników jodu charakteryzowały się podobną i wysoką pożądanością ogólną, a także smaku, barwy i zapachu. Obniżenie oceny pożądalności zapachu, zarówno klusek jak i bułek z dodatkiem suszu kalafiora związane było z cechami warzywa a nie obecnością związków jodu.

Tabela 12. Istotność statystyczna predyktorów modeli kowariancji dla oceny pożądalności sensorycznej wobec klusek typu Gnocchi i bułek typu Ciabatta z dodatkiem wzbogaconych jodem nośników (jednoczynnikowa analiza wariancji ANOVA). (Opracowanie własne, Zaremba i in., 2022)

Wariant	SS*	df	MSE	F	p
CIABATTA					
Pożądalność barwy					
Rodzaj warzywa	0,76	5	0,15	2,02	0,10
Forma jodu	0,04	2	0,02	0,24	0,79
Dieta	0,56	1	0,56	7,86	0,10
Pożądalność zapachu					
Rodzaj warzywa	76,15	5	15,23	166,05	0,00
Forma jodu	0,18	2	0,09	0,04	0,96
Dieta	0,72	1	0,72	0,31	0,58
Pożądalność smaku					
Rodzaj warzywa	39,20	5	7,84	102,47	0,00
Forma jodu	0,05	2	0,03	0,02	0,98

Dieta	0,02	1	0,02	0,02	0,89
Ogólna pożądalność					
Rodzaj warzywa	5,93	5	1,19	17,09	0,00
Forma jodu	0,17	2	0,08	0,36	0,70
Dieta	0,10	1	0,10	0,43	0,52
GNOCCHI					
Pożądalność barwy					
Rodzaj warzywa	1,02	5	0,20	2,53	0,05
Forma jodu	0,11	2	0,05	0,52	0,60
Dieta	0,25	1	0,25	2,66	0,11
Pożądalność zapachu					
Rodzaj warzywa	75,64	5	15,13	180,68	0,00
Forma jodu	0,13	2	0,06	0,03	0,97
Dieta	0,67	1	0,67	0,29	0,59
Pożądalność smaku					
Rodzaj warzywa	8,60	5	1,72	14,89	0,00
Forma jodu	0,06	2	0,03	0,09	0,92
Dieta	0,01	1	0,01	0,02	0,89
Ogólna pożądalność					
Rodzaj warzywa	3,75	5	0,75	10,19	0,00
Forma jodu	0,40	2	0,20	1,19	0,32
Dieta	0,10	1	0,10	0,58	0,45

Objaśnienia: SS – sumy kwadratów; df – liczba stopni swobody; MSE – średnia suma kwadratów; F – wartość testu F; p – poziom prawdopodobieństwa

DYSKUSJA

W wyniku przeprowadzonych doświadczeń oraz analizy statystycznej stwierdzono, że dodatek do produktów zbożowych fortifikowanych w jod suszy warzyw pozytywnie wpływa na badane parametry ich wartości odżywczej w porównaniu do produktów zbożowych bez dodatku badanych suszy. Spożywanie pieczywa i klusek z dodatkiem suszy warzywnych, finalnie może zwiększyć spożycie substancji odżywczych i bioaktywnych zawartych w warzywach. Badanie wartości odżywczej makaronu instatnt z dodatkiem puree marchwiowego (Prerana, Anupama, 2020) wykazało, że w porównaniu z próbą kontrolną, makarony wzbogacone w puree marchwiowe charakteryzowały się zwiększoną zawartością błonnika pokarmowego, karotenoidów i składników minerałów, takich jak wapń, fosfor, żelazo, potas w przeliczeniu na 100g suchego makaronu. Podobnie wzbogacanie chleba w proszek z papryki czerwonej (Kaur i in., 2020) pozwoliło uzyskać wyższą zawartość błonnika pokarmowego, składników mineralnych (fosforu, magnezu, wapnia, żelaza, manganu), a także związków bioaktywnych takich jak fenole ogółem, flawonoidy, karotenoidy i aktywność przeciwutleniającą, w porównaniu do chleba bez dodatku proszku z papryki czerwonej.

Przy planowaniu wzbogacania produktów zbożowych w warzywa należy wziąć pod uwagę szereg czynników. Sobota i in. (2020) stwierdzili znaczące różnice między zastosowaniem do wzbogacenia produktu zbożowego koncentratu warzywnego oraz warzyw w formie sproszkowanej. Makaron typu Tagliatelle wzbogacony sproszkowaną marchwią, burakiem i jarmużem charakteryzował się stabilniejszą, choć mniej intensywną barwą oraz wyższą zawartością błonnika pokarmowego i składników mineralnych w porównaniu do makaronu wzbogaconego koncentratami z wymienionych warzyw. Innym aspektem jest wpływ obróbki termicznej stosowanej do uzdatnienia produktu do spożycia. W zaprojektowanych bułkach typu Ciabatta oraz kluskach typu Gnocchi zaobserwowano zwiększenie strat zawartości jodu w produkcie po upieczeniu lub ugotowaniu w porównaniu do produktu niepoddanego obróbce termicznej („surowego”). Zjawisko to wynika z wrażliwości związków jodu na działanie podwyższonej temperatury (Winger i in., 2008). Spadek zawartości jodu w produkcie po obróbce termicznej stwierdził w swoich badaniach również Wisnu (2008). Gotowanie zupy warzywnej i szpinakowej z dodatkiem soli kuchennej jodowanej jodanem potasu spowodowało straty jodu na poziomie 48,5% i 34,6%.

Ważnym aspektem projektowania żywności wzbogaconej jest jej atrakcyjność sensoryczna. Ciecierska i in. (2018) wykazała, że konsumenci są skłonni wybierać pieczywo z dodatkami, kierując się przy tym ich wartością odżywczą ale również sensoryczną, gdyż cenią sobie typowy smak i zapach pieczywa. Z kolei Hobbs i in. (2014) na podstawie badań akceptowalności sensorycznej pieczywa wzbogaconego w kilka rodzajów warzyw, stwierdzili, że ogólnie konsumenci akceptują dodatek warzyw do pieczywa. Jednakże niską akceptowalnością, w porównaniu do próby badanej, charakteryzowało się pieczywo z dodatkiem buraka. Poziom akceptowalności wobec poszczególnych rodzajów pieczywa był różny w poszczególnych grupach badanych. Ponadto stwierdzono, że podanie informacji żywieniowej o produkcie nie zwiększyło jego akceptowalności sensorycznej w badanej grupie.

Betoret i Rosell, (2020) wskazują, że pieczywo jest dobrym obiektem fortyfikacji, ponieważ jest spożywane codziennie, w wielu krajach na całym świecie, a przy tym jego produkcja jest prosta i tania. Podobnie makarony i kluski stały się produktem międzynarodowym (Prerana, Anupama, 2020) i spełniają powyższe założenia. Produkty zbożowe były już z powodzeniem wykorzystywane w programach profilaktyki IDD. W Dani (Rasmussen i in., 2014) oraz Niderlandach (Verkaik-Kloosterman i in., 2017) sól jodowaną wykorzystywano do produkcji fortyfikowanego w jod pieczywa. W obu przypadkach programy profilaktyczne z udziałem fortyfikowanego pieczywa zwiększyły UIC badanej populacji, a fortyfikowany chleb stanowił jedno z głównych źródeł jodu w diecie.

PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych analiz statystycznych potwierdzono wyższą stabilność KIO_3 względem KI wprowadzonego do produktu spożywczego, bez względu na rodzaj produktu, a także nośnik jodu i metodę przechowywania.

Wykazano, że zaprojektowane bułki typu Ciabatta wzbogacone w jod z zastosowaniem suszy warzywnych jako nośnika, charakteryzowały się wyższą stabilnością jodu w porównaniu do produktów wzbogaconych w jod za pomocą NaCl, niezależnie od formy jodu, rodzaju produktu i warunków przechowywania.

Dodatek badanych suszy warzywnych do bułek typu Ciabatta pozytywnie wpłynął na stabilność tiaminy w trakcie przechowywania produktu, zarówno w temp. 21°C , jak i -21°C . Ponadto, nie wykazano znaczącego wpływu formy jodu zastosowanej do fortyfikacji nośników na stabilność tiaminy w trakcie przechowywania pieczywa, niezależnie od zastosowanych warunków.

Badane produkty zbożowe z dodatkiem suszy warzywnych charakteryzowały się wysoką aktywnością przeciwutleniającą (ABTS^{*+} , DPPH^*), dzięki dodatkowi suszy analizowanych warzyw i ich wysokiej aktywności przeciwutleniającej, przez co wpłynęły pozytywnie na parametry ABTS^{*+} i DPPH^* produktów, do których zostały dodane.

Fortyfikowane w jod susze warzyw spełniają funkcje nośnika soli jodu w zaprojektowanych produktach zbożowych oraz polepszają badane wskaźniki wartości odżywczej (zawartość jodu, tiaminy i aktywność przeciwutleniająca). Wśród badanych suszy jako najkorzystniejsze do wprowadzenia do produktów zbożowych (bułek typu Ciabatta i klusek typu Gnocchi) zidentyfikowano susze dyni oraz brokułu.

Zaprojektowane produkty, kluski typu Gnocchi oraz bułki typu Ciabatta z dodatkiem fortyfikowanych w jod suszy warzywnych, mogą stanowić dobre źródło jodu w profilaktyce IDD. Spożycie 100g bułek typu Ciabatta (1 szt.) zapewnia pokrycie zapotrzebowania na jod na poziomie $\sim 6\%$ RDA, natomiast 100 g klusek typu Gnocchi (20 szt.) $\sim 19\%$ RDA.

Podsumowując, hipotezy szczegółowe **H6**. Typ nośnika jodu (KI, KIO_3) oraz matryca (rodzaj warzywa) dla jodu, wprowadzonych do produktów zbożowych typu bułki Ciabatta i kluski Gnocchi, wpływają na zawartość wybranych wskaźników wartości odżywczej, takich jak zawartość jodu i tiaminy oraz właściwości przeciwutleniające produktu oraz **H7**. Zaprojektowane produkty zbożowe (bułki typu Ciabatta oraz kluski typu Gnocchi) z dodatkiem fortyfikowanych w jod suszy warzyw stanowią dobre źródło jodu w diecie i mogą być stosowane jako element profilaktyki IDD, zostały potwierdzone.

Powyższy rozdział został opracowany na podstawie publikacji: Zaremba A., Cichoń N., Szymandera-Buszk K., (2023): Projekt produktu pochodzenia roślinnego wzbogaconego burakiem fortifikowanym jodem. Monografia pokonferencyjna XXVI Sesji Naukowej Sekcji Młodej Kadry Naukowej 22-36. <https://doi.org/10.17306/m.978-83-67112-29-1> oraz niepublikowanych wyników badań własnych.

4. Podsumowanie

W wyniku analiz przeprowadzonych w trakcie badań przedstawionych w niniejszej rozprawie postawiono następujące wnioski:

1. Weganie stanowią grupę szczególnie narażoną na niedobór jodu, ze względu na restrykcje żywieniowe eliminujące z diety najważniejsze, odzwierzęce źródła jodu, takie jak ryby, owoce morza i przetwory mleczne. Ponadto, ograniczone pozyskiwanie jodu z soli jodowanej, w wyniku jej niskiego spożycia oraz dodawania jej na początku obróbki cieplnej, znacząco zmniejsza spożycie jodu z tego źródła. Dodatkowo wykazano, że oferowane na rynku polskim produkty wegańskie nie stanowią dobrego źródła jodu w diecie, mimo ich wysokiego deklarowanego spożycia przez osoby na diecie wegańskiej. Niskie pokrycie RDA dla jodu wynikało także z niskiego spożycia alg morskich, zatem nie można uznać ich za źródło jodu w badanej grupie osób na diecie wegańskiej z Polski.

Dieta wegan wymaga wprowadzenia nowego źródła jodu lub rozpoczęcia fortyfikacji jodem produktów wegańskich w celu zapewnienia pokrycia zalecanego dziennego spożycia tego pierwiastka.

2. Deklarowana dieta oraz wiek osób ankietowanych, zarówno deklarujących dietę zwyczajową, jak i wegańską, nie miały wpływu na ich nastawienie wobec fortyfikowania w jod najczęściej spożywanych przez nich rodzajów warzyw. Płeć respondentów była jedynym istotnym predyktorem wpływającym na wyrażenie chęci spożywania konkretnych rodzajów warzyw fortyfikowanych w jod. Kobiety wykazywały bardziej pozytywne nastawienie do spożywania fortyfikowanych w jod dyni, marchwi, brokułu i kalafiora. Potwierdzono niekorzystne nastawienie do fortyfikacji jodem ziemniaków, w przypadku których stwierdzono największą częstotliwość spożycia.
3. Rodzaj formy nanoszonego jodu (KI/KIO_3) wpływał na jego stabilność podczas procesu impregnacji, jak i późniejszego przechowywania uzyskanych suszy warzywnych fortyfikowanych jodem. Jodan potasu (KIO_3) charakteryzował się wyższą stabilnością względem jodku potasu (KI) zarówno po procesie impregnacji, jak i po przechowywaniu, niezależnie od stosowanej matrycy i stężenia roztworu wzbogacającego.
4. Zmienne warunki impregnacji jodem (stopień uwodnienia, temperatura i czas procesu) badanych warzyw wpływały na odtwarzalność naniesionego na nie jodu. Jako warunki

impregnacji pozwalające na uzyskanie najwyższej odtwarzalności jodu po procesie impregnacji badanych preparatów zidentyfikowano następujące: temperatura impregnacji – 76°C, stopień uwodnienia 1:1 (m/v). Za najmniej korzystne warunki uznano temperaturę 4°C, czas namaczania 6 h przy uwodnieniu 1:4 (m/v). Całkowita odtwarzalność jodu po procesie impregnacji była silnie skorelowana ze stopniem uwodnienia i temperaturą procesu impregnacji. Proces kondycjonowania suszy warzywnych w temperaturze 4°C wiązał się z niższą odtwarzalnością jodu po impregnacji i jego niższą zawartością po przechowywaniu, w porównaniu do prób poddanych mrożeniu po procesie impregnacji. Nie zaleca się zatem stosowania metody kondycjonowania w temp. 4°C w procesie impregnacji jodem suszy badanych warzyw.

5. Forma nanoszonego jodu (KI/KIO₃) wpływa na aktywność przeciwutleniającą (ABTS⁺, DPPH^{*}) fortyfikowanej matrycy (marchew, dynia, brokuł, kalafior, burak). Zastosowanie jako nośnika jodu KI nie wpłynęło na obniżenie aktywności przeciwrodnikowej wszystkich fortyfikowanych suszy, niezależnie od zastosowanego stężenia naniesionego jodu (0,023 do 3,0 mg/100g). Potwierdzono natomiast statystycznie istotną zależność pomiędzy stężeniem naniesionego jodu w formie KIO₃ a aktywnością przeciwrodnikową fortyfikowanych suszy warzyw. W suszach warzywnych fortyfikowanych jodem w formie KIO₃ wprowadzonym w stężeniu $\geq 2,3$ mg/100g jodu stwierdzono statystycznie istotny spadek zdolności do neutralizacji wolnych rodników, w porównaniu do prób bez dodatku jodu.
6. Wykazano, że wszystkie analizowane susze warzywne mogą stanowić wysoką jakościowo matrycę dla obu form jodu w celu wzbogacania żywności w ten składnik mineralny. W produktach zbożowych (bułki typu Ciabatta i kluski typu Gnocchi) z dodatkiem suszy warzywnych fortyfikowanych jodem (KI i KIO₃) stabilność jodu, tiaminy oraz wskaźników przeciwutleniających (ABTS⁺, DPPH^{*}) była wyższa w porównaniu do wzbogaconych w jod przy zastosowaniu soli jodowanej. Potwierdzono także niezmienną stabilność tiaminy oraz wskaźników przeciwutleniających w porównaniu do produktów z dodatkiem niefortyfikowanych jodem suszy warzywnych. Zaprojektowane produkty zbożowe (kluski typu Gnocchi i bułki typu Ciabatta) wykazywały wysoką akceptowalność sensoryczną w grupie młodych dorosłych.
7. Analiza pokrycia zalecanego dziennego spożycia (RDA) jodu wykazała, że zaprojektowane produkty zbożowe mogą stanowić dobre źródło jodu w diecie i mogą być stosowane jako element profilaktyki IDD. Spożycie zaprojektowanych bułek typu Ciabatta z dodatkiem suszy fortyfikowanych jodem pozwoliłoby na pokrycie RDA dla

jodu na poziomie 3,5 – 7,0 %, a klusek typu Gnocchi na poziomie 16,4 – 22,0 %. Użycie jako matrycy dla jodu dyni, marchwi i brokułu pozwoliło na pokrycie w najwyższym stopniu RDA dla jodu.

Susze dyni (*Cucurbita pepo* L.), kalafiora (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.), brokułu (*Brassica oleracea* L.) i marchwi (*Daucus carota* L.) stanowią stabilną matrycę dla soli jodu, stosowaną w technologii żywności, gdyż wykazują wyższą stabilność naniesionego na nie jodu w porównaniu do soli jodowanej, niezależnie od zastosowanej formy jodu oraz etapu procesu impregnacji i przechowywania. Ponadto mogą być stosowane jako element wspomagający w profilaktyce IDD.

Wniosek praktyczny

Badane warzywa (brokuł, burak, dynia, kalafior i marchew) stanowią konkurencyjną, w stosunku do chlorku sodu, matrycę dla jodu możliwą do zastosowania w profilaktyce IDD. Uzyskane wyniki pozwoliły na wyznaczenie punktów krytycznych związanych z warunkami impregnacji i wskazanie tych pozwalających na zachowanie najwyższej stabilności jodu przy długim czasie przechowywania. Badane preparaty wykazują wysoka stabilność jodu w trakcie produkcji oraz przechowywania i mogą być z powodzeniem wprowadzane do żywności jako dodatek funkcjonalny. Ponad to, w trakcie prac wskazano zarówno na zachowania w gospodarstwach domowych zmniejszające zawartość jodu w soli, jak i na uwarunkowania technologiczne wpływające na zawartość jodu w produkcie końcowym, takie jak warunki impregnacji oraz przechowywania. Opisane w pracy zależności mogą być interesujące i przydatne zarówno dla dietetyków, jak i producentów żywności oferujących produkty dla konsumentów o wysokim ryzyku niedoboru jodu, takich jak weganie czy kobiety w ciąży. Badane preparaty mogą posłużyć producentom żywności funkcjonalnej lub żywności wegańskiej do rozszerzenia swojej oferty.

Spis literatury cytowanej w autoreferacie

- Alzahrani, A., Ebel, R., Norton, G., Raab, A., & Feldmann, J. (2023). Iodine in plant-based dairy products is not sufficient in the UK: A market survey. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 79, 127218. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2023.127218>
- Appleton, K. M., Hemingway, A., Saulais, L., Dinnella, C., Monteleone, E., Depezay, L., Morizet, D., Armando Perez-Cueto, F. J., Bevan, A., & Hartwell, H. (2016). Increasing vegetable intakes: rationale and systematic review of published interventions. *European Journal of Nutrition*, 55(3), 869–896. <https://doi.org/10.1007/s00394-015-1130-8>
- Bailote, H. B., Linhares, D., Carvalho, C., Prazeres, S., Rodrigues, A. S., & Garcia, P. (2022). Iodine Intake and Related Cognitive Function Impairments in Elementary Schoolchildren. *Biology*, 11(10), 1507. <https://doi.org/10.3390/biology11101507>
- Bertinato, J. (2021). Iodine nutrition: Disorders, monitoring and policies. In M. Eskin (Ed.), *Advances in Food and Nutrition Research* (1st ed., Vol. 96, pp. 365–415). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2021.01.004>
- Betoret, E., & Rosell, C. M. (2020). Enrichment of bread with fruits and vegetables: Trends and strategies to increase functionality. In *Cereal Chemistry* (Vol. 97, Issue 1, pp. 9–19). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/cche.10204>
- Bilal, M. Y., Dambaeva, S., Kwak-Kim, J., Gilman-Sachs, A., & Beaman, K. D. (2017). A role for iodide and thyroglobulin in modulating the function of human immune cells. *Frontiers in Immunology*, 8, 1573. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2017.01573>
- Blasco, B., Rios, J. J., Cervilla, L. M., Sánchez-Rodríguez, E., Ruiz, J. M., & Romero, L. (2008). Iodine biofortification and antioxidant capacity of lettuce: potential benefits for cultivation and human health. *Annals of Applied Biology*, 152(3), 289–299. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2008.00217.x>
- Blikra, M. J., Sigrun, H., & Aakre, I. (2022). Iodine from brown algae in human nutrition, with an emphasis on bioaccessibility, bioavailability, chemistry, and effects of processing: A systematic review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 1517–1536. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12918>
- Boadi, N. O., Badu, M., Kortei, N. K., Saah, S. A., Annor, B., Mensah, M. B., Okyere, H., & Fiebor, A. (2021). Nutritional composition and antioxidant properties of three varieties of carrot (*Daucus carota*). *Scientific African*, 12, e00801. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00801>

- Brzóska, F., Szybiński, Z., & Śliwiński, B. (2009). Iodine concentration in Polish milk-variations due to season and region. *Polish Journal of Endocrinology*, 60(6), 449–454.
- Brzóska, F., Szybiński, Z., & Śliwiński, B. (2015). Jod w mleku spożywczym w Polsce oraz jego rola w profilaktyce zdrowotnej człowieka. *Wiadomości Zootechniczne*, 53(4), 41–49.
- Bürgi, H., Schaffner, T., & Seiler, J. P. (2001). The Toxicology of Iodate: A Review of the Literature. *Thyroid*, 11(5), 449–456. <https://doi.org/10.1089/105072501300176408>
- Campos, A. C., Cruz Carvalho, I., Sarmiento, S., & Fonseca, T. (2023). Iodine-Induced Hypothyroidism After Chemoembolization With Ethiodized Oil: A Case of Failure to Escape From Wolff-Chaikoff Effect (WCE). *Cureus*, 15(5), e39352. <https://doi.org/10.7759/cureus.39352>
- Cappuccio, F. P. (2016). Pro: Reducing salt intake at population level: Is it really a public health priority? *Nephrology Dialysis Transplantation*, 31(9), 1392–1396. <https://doi.org/10.1093/ndt/gfw279>
- Chen, L., Zhu, Y., Hu, Z., Wu, S., & Jin, C. (2021). Beetroot as a functional food with huge health benefits: Antioxidant, antitumor, physical function, and chronic metabolomics activity. *Food Science and Nutrition*, 9(11), 6406–6420. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2577>
- Chu, Y.-H., Chang, C.-L., & Hsu, H.-F. (2000). Flavonoid content of several vegetables and their antioxidant activity. *J. Sci. Food Agric.*, 80(5), 561–566. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(200004\)80:5<561::AID-JSFA574>3.0.CO;2-%23](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(200004)80:5<561::AID-JSFA574>3.0.CO;2-%23)
- Ciecierska, M., Warszycka, A., Kowalska, J., Derewiaka, D., Drużyńska, B., Majewska, E., & Wołosiaś, R. (2018). Preferencje konsumenckie na rynku pieczywa. *Nauka Przyroda Technologie*, 12(1), 55–63. <http://10.0.67.154/J.NPT.00230%0Ahttp://han.up.poznan.pl/han/ebSCO/search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=128868404&lang=pl&site=eds-live>
- Consentino, B. B., Ciriello, M., Sabatino, L., Vultaggio, L., Baldassano, S., Vasto, S., Roupheal, Y., La Bella, S., & De Pascale, S. (2023). Current Acquaintance on Agronomic Biofortification to Modulate the Yield and Functional Value of Vegetable Crops: A Review. *Horticulturae*, 9, 219. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020219>
- Dineva, M., Rayman, M. P., & Bath, S. C. (2021). Iodine status of consumers of milk-alternative drinks v. cows' milk: Data from the UK National Diet and Nutrition Survey. *British Journal of Nutrition*, 14(126), 28–36. <https://doi.org/10.1017/S0007114520003876>

- Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries. (n.d.). *More than 20 algae species can now be sold as food or food supplements in the EU*. https://Oceans-and-Fisheries.Ec.Europa.Eu/News/More-20-Algae-Species-Can-Now-Be-Sold-Food-or-Food-Supplements-Eu-2024-02-26_en.
- Dobosy, P., Nguyen, H. T. P., Záray, G., Strelí, C., Ingerle, D., Ziegler, P., Radtke, M., Buzanich, A. G., Endrédi, A., & Fodor, F. (2024). Effect of iodine species on biofortification of iodine in cabbage plants cultivated in hydroponic cultures. *Scientific Reports*, 14, 15794. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66575-z>
- Donato, A., Godos, J., Ghelfi, F., Tieri, M., Titta, L., Lafranconi, A., Marventano, S., Alonzo, E., Gambera, A., Sciacca, S., Buscemi, S., Ray, S., Galvano, F., Del Rio, D., & Grosso, G. (2019). Fruit and vegetable consumption and health outcomes: an umbrella review of observational studies. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 70(6), 652–667. <https://doi.org/10.1080/09637486.2019.1571021>
- Drabińska, N., Jeż, M., & Nogueira, M. (2021). Variation in the accumulation of phytochemicals and their bioactive properties among the aerial parts of cauliflower. *Antioxidants*, 10(10), 1–13. <https://doi.org/10.3390/antiox10101597>
- Duborská, E., Urik, M., & Šeda, M. (2020). Iodine Biofortification of Vegetables Could Improve Iodine Supplementation Status. *Agronomy*, 10(10), 1574. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101574>
- Eveleigh, E., Coneyworth, L., Zhou, M., Burdett, H., Malla, J., Nguyen, V. H., & Welham, S. (2022). Vegans and vegetarians living in Nottingham (UK) continue to be at risk of iodine deficiency. *British Journal of Nutrition*, 21, 1–18. <https://doi.org/10.1017/S0007114522000113>
- Eveleigh, E. R., Coneyworth, L., & Welham, S. J. M. (2023). Systematic review and meta-analysis of iodine nutrition in modern vegan and vegetarian diets. *British Journal of Nutrition*, 130, 1580–1594. <https://doi.org/10.1017/S000711452300051X>
- Fallon, N., & Dillon, S. A. (2020). *Low Intakes of Iodine and Selenium Amongst Vegan and Vegetarian Women Highlight a Potential Nutritional Vulnerability*. 20(7), 72. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00072>
- Fulton, S. L., McKinley, M. C., Young, I. S., Cardwell, C. R., & Woodside, J. V. (2016). The Effect of Increasing Fruit and Vegetable Consumption on Overall Diet: A Systematic Review and Meta-analysis. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(5), 802–816. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.727917>

- Gawęcki, J. (2012). Wzbogacanie żywności. In *Żywnienie człowieka. Podstawy nauki o żywieniu*. PWN.
- Gostas, D. E., Larson-Meyer, D. E., Yoder, H. A., Huffman, A. E., & Johnson, E. C. (2020). Dietary relationship with 24 h urinary iodine concentrations of young adults in the mountain west region of the United States. *Nutrients*, 12, 121. <https://doi.org/10.3390/nu12010121>
- Granfors, M., Andersson, M., Stinca, S., Åkerud, H., Skalkidou, A., Sundström Poromaa, I., Wikström, A.-K., & Filipsson Nyström, H. (2015). Iodine deficiency in a study population of pregnant women in Sweden. *Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica*, 94(11), 1168–1174. <https://doi.org/10.1111/aogs.12713>
- Gudiño, I., Martín, A., Casquete, R., Prieto, M. H., Ayuso, M. C., & Córdoba, M. G. (2022). Evaluation of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) crop by-products as sources of bioactive compounds. *Scientia Horticulturae*, 304(15), 111284. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111284>
- Haldimann, M., Alt, A., Blanc, A., & Blondeau, K. (2005). Iodine content of food groups. *Journal of Food Composition and Analysis*, 18(6), 461–471. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2004.06.003>
- Halka, M., Smoleń, S., & Ledwozyw-Smoleń, I. (2020). Antioxidant potential and iodine accumulation in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings as the effect of the application of three different iodobenzoates. *Folia Horticulturae*, 32(2), 203–219. <https://doi.org/10.2478/fhort-2020-0019>
- Hatch-McChesney, A., & Lieberman, H. R. (2022). Iodine and Iodine Deficiency: A Comprehensive Review of a Re-Emerging Issue. *Nutrients*, 14(17), 3474. <https://doi.org/10.3390/nu14173474>
- Hays, S. M., Poddalgoda, D., Macey, K., Aylward, L., & Nong, A. (2018). Biomonitoring Equivalents for interpretation of urinary iodine. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 94(January), 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2018.01.017>
- Herzig, I., Trávníček, J., Kursá, V., Kroupová, J., & Řezníček. (2007). Content of Iodine in Broiler Meat. *Acta Veterinaria Brno*, 76(1), 137–141. <https://doi.org/10.2754/avb200776010137>
- Hobbs, D. A., Ashouri, A., George, T. W., Lovegrove, J. A., & Methven, L. (2014). The consumer acceptance of novel vegetable-enriched bread products as a potential vehicle to increase vegetable consumption. *Food Research International*, 58, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.038>

- Hunter, R. W., Dhaun, N., & Bailey, M. A. (2022). The impact of excessive salt intake on human health. *Nature Reviews Nephrology*, 18(5), 321–335. <https://doi.org/10.1038/s41581-021-00533-0>
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 2483:1973; Sodium Chloride for Industrial Use—Determination of the Loss of Mass at 110 Degrees C (Reviewed and Confirmed in 2018)*.
- Iwan, P., Stępnia, J., & Karbownik-Lewińska, M. (2021). Pro-oxidative effect of KIO₃ and protective effect of melatonin in the thyroid—comparison to other tissues. *Life*, 11, 592. <https://doi.org/10.3390/life11060592>
- Izydorczyk, G., Ligas, B., Mikula, K., Witek-Krowiak, A., Moustakas, K., & Chojnacka, K. (2021). Biofortification of edible plants with selenium and iodine – A systematic literature review. *Science of the Total Environment*, 754, 141983. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141983>
- Jarosz, M., Rychlik, E., Stoś, K., & Charzewska, J. (2020). Normy żywienia dla populacji Polski i ich zastosowanie. In *Narodowe Centrum Edukacji Żywieniowej*. Narodowe Centrum Edukacji Żywieniowej.
- Jeżewska-Zychowicz, M., Gawęcki, J., Wadołowska, L., Czarnocińska, J., Galiński, G., Kollajtis-Dołowy, A., Roszkowski, W., Wawrzyniak, A., Przybyłowicz, K., Krusińska, B., & et al. (2017). Dietary Habits and Nutrition Beliefs Questionnaire and the Manual for Developing of Nutritional Data. *The Committee of Human Nutrition, Polish Academy of Sciences*.
- Jones, M. R., Chance, R., Dadic, R., Hannula, H. R., May, R., Ward, M., & Carpenter, L. J. (2023). Environmental iodine speciation quantification in seawater and snow using ion exchange chromatography and UV spectrophotometric detection. *Analytica Chimica Acta*, 25(1239), 340700. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.340700>
- Karthika, K. S., Rashmi, I., Neenu, S., & Philip, P. S. (2023). Agronomic Biofortification: An Effective Tool for Alleviating Nutrient Deficiency in Plants and Human Diet. In M. Hasanuzzaman, M. S. Tahir, M. Tanveer, & A. N. Shah (Eds.), *Mineral Biofortification in Crop Plants for Ensuring Food Security*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4090-5_1
- Kaur, R., Kaur, K., Wagh, R. V., Kaur, A., & Aggarwal, P. (2020). Red bell pepper (*Capsicum annuum* L.): Optimization of drying conditions and preparation of functional bread. *Journal of Food Science*, 85(8), 2340–2349. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15317>

- Kelly, F. C. (1953). Studies on the stability of iodine compounds in iodized salt. *Bulletin of the World Health Organization*, 9(2), 217–230.
- Kiferle, C., Gonzali, S., Holwerda, H. T., Ibaceta, R. R., & Perata, P. (2013). Tomato fruits: A good target for iodine biofortification. *Frontiers in Plant Science*, 27(4), 205. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00205>
- Konno, N., Makita, H., Yuri, K., Iizuka, N., & Kawasaki, K. (1994). Association between dietary iodine intake and prevalence of subclinical hypothyroidism in the coastal regions of Japan. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 8(2), 393–397.
- Krela-Kaźmierczak, I., Czarnywojtek, A., Skoracka, K., Rychter, A. M., Ratajczak, A. E., Szymczak-Tomczak, A., Ruchała, M., & Dobrowolska, A. (2021). Is there an ideal diet to protect against iodine deficiency? *Nutrients*, 13(2), 513. <https://doi.org/10.3390/nu13020513>
- Krzepińko, A., Kościuk, B., Skowrońska, M., Kuśmierz, S., Walczak, J., & Prażak, R. (2023). Quality of Rye Plants (*Secale cereale*) as Affected by Agronomic Biofortification with Iodine. *Plants*, 12(1), 100. <https://doi.org/10.3390/plants12010100>
- Krzepińko, A., Prażak, R., Skwaryło-Bednarz, B., & Molas, J. (2019). Agronomic biofortification as a means of enriching plant foodstuffs with iodine. *Acta Agrobotanica*, 72(2), 1766. <https://doi.org/10.5586/aa.1766>
- Krzepińko, A., Święciło, A., & Zych-Wężyk, I. (2021). The antioxidant properties and biological quality of radish seedlings biofortified with iodine. *Agronomy*, 11(10), 2011. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102011>
- Krzepińko, A., Zych-Wężyk, I., & Molas, J. (2015). Alternative ways of enriching the human diet with iodine. *Journal of Pre-Clinical and Clinical Research*, 9(2), 167–171. <https://doi.org/10.5604/18982395.1186500>
- Kühne, D., Wirth, F., & Wagner, H. (1993). Iodine determination in iodized meat products. *Fleischwirtschaft*, 73(2), 175–178.
- Kulczyński, B., Sidor, A., & Gramza-Michałowska, A. (2020). Antioxidant potential of phytochemicals in pumpkin varieties belonging to *Cucurbita moschata* and *Cucurbita pepo* species. *CYTA - Journal of Food*, 18(1), 472–484. <https://doi.org/10.1080/19476337.2020.1778092>
- Kunachowicz, H., Nadolna, I., Iwanow, K., & Przygoda, B. (2012). Wartość odżywcza wybranych produktów spożywczych i typowych potraw. In 5 (6th ed.). Wydawnictwo Lekarskie PZWL.

- Lähteenmäki-Uutela, A., Rahikainen, M., Lonkila, A., & Yang, B. (2021). Alternative proteins and EU food law. *Food Control*, 130, 108336. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108336>
- Leandro, A., Pacheco, D., Cotas, J., Marques, J. C., Pereira, L., & Gonçalves, A. M. M. (2020). Seaweed's bioactive candidate compounds to food industry and global food security. *Life*, 10(8), 140. <https://doi.org/10.3390/life10080140>
- Ledwożyw-Smoleń, I., Smoleń, S., Rożek, S., Sady, W., & Strzetelski, P. (2020). Iodine Biofortification of Potato (*Solanum tuberosum* L.) Grown in Field. *Agronomy*, 10(12), 1916. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121916>
- Lisco, G., De Tullio, A., Triggiani, D., Zupo, R., Giagulli, V. A., De Pergola, G., Piazzolla, G., Guastamacchia, E., Sabbà, C., & Triggiani, V. (2023). Iodine Deficiency and Iodine Prophylaxis: An Overview and Update. *Nutrients*, 15(4), 1004. <https://doi.org/10.3390/nu15041004>
- Mackowiak, C. L., & Grossl, P. R. (1999). Iodate and iodide effects on iodine uptake and partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture. *Plant and Soil*, 212(2), 135143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/a:1004666607330>
- Markou, K., Georgopoulos, N., Kyriazopoulou, V., & Vagenakis, A. G. (2001). Iodine-Induced Hypothyroidism. *Thyroid*, 11(5), 501–510. <https://doi.org/10.1089/105072501300176462>
- Marques, E., Darby, H. M., & Kraft, J. (2021). Benefits and limitations of non-transgenic micronutrient biofortification approaches. *Agronomy*, 11, 464. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030464>
- Mathiapparagam, S., de Macedo, A. N., Mente, A., Poirier, P., Lear, S. A., Wielgosz, A., Teo, K. K., Yusuf, S., & Britz-McKibbin, P. (2022). The Prevalence and Risk Factors Associated with Iodine Deficiency in Canadian Adults. *Nutrients*, 14(13), 2570. <https://doi.org/10.3390/nu14132570>
- Mayunga, K. C., Lim-A-Po, M., Lubberts, J., Stoutjesdijk, E., Touw, D. J., Muskiet, F. A. J., & Dijck-Brouwer, D. A. J. (2022). Pregnant Dutch Women Have Inadequate Iodine Status and Selenium Intake. *Nutrients*, 14(19), 3936. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/nu14193936>
- Mikláš, Š., Tančin, V., Toman, R., & Trávníček, J. (2021). Iodine concentration in milk and human nutrition: A review. *Czech Journal of Animal Science*, 66(6), 189–199. <https://doi.org/10.17221/167/2020-CJAS>

- Miyai, K., Tokushige, T., Kondo, M., & Iodine Research Group. (2008). Suppression of Thyroid Function during Ingestion of Seaweed “Kombu” (*Laminaria japonica*) in Normal Japanese Adults. *Endocrine Journal*, 55(6), 1103–1108.
- Moxon, R. E., & Dixon, E. J. (1980). Semi-automatic method for the determination of total iodine in food. *The Analyst*, 105(1249), 344–352. <https://doi.org/10.1039/an9800500344>
- Nedić, O. (2023). Iodine: Physiological importance and food sources. *EFood*, 4(1), 1–8. <https://doi.org/10.1002/efd2.63>
- Nicol, K., Nugent, A. P., Woodside, J. V., Hart, K. H., & Bath, S. C. (2024). Iodine and plant-based diets: a narrative review and calculation of iodine content. *British Journal of Nutrition*, 131(2), 265–275. <https://doi.org/10.1017/S0007114523001873>
- Niwattisaiwong, S., Burman, K. D., & Li-Ng, M. (2017). Iodine deficiency: Clinical implications. *Cleveland Clinic Journal of Medicine*, 84(3), 236–244. <https://doi.org/10.3949/ccjm.84a.15053>
- 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>
- Nuutila, A. M., Puupponen-Pimiä, R., Aarni, M., & Oksman-Caldentey, K.-M. (2003). Comparison of antioxidant activities of onion and garlic extracts by inhibition of lipid peroxidation and radical scavenging activity. *Food Chemistry*, 81(4), 485–493. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00476-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00476-4)
- Olson, R., Gavin-Smith, B., Ferraboschi, C., & Kraemer, K. (2021). Food fortification: The advantages, disadvantages and lessons from sight and life programs. *Nutrients*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/nu13041118>
- Osendarp, S. J. M., Martinez, H., Garrett, G. S., Neufeld, L. M., De-Regil, L. M., Vossenaar, M., & Darnton-Hill, I. (2018). Large-Scale Food Fortification and Biofortification in Low- and Middle-Income Countries: A Review of Programs, Trends, Challenges, and Evidence Gaps. *Food and Nutrition Bulletin*, 39(2), 315–331. <https://doi.org/10.1177/0379572118774229>
- Pahuja, D. N., Rajan, M. G., Borkar, A. V., & Samuel, A. M. (1993). Potassium Iodate and Its Comparison to Potassium Iodide As a Blocker of ¹³¹I Uptake by the Thyroid in Rats. *Health Physics*, 65(5), 545–549. <https://doi.org/10.1097/00004032-199311000-00014>
- Pehrsson, P. R., Roseland, J. M., Patterson, K. Y., Phillips, K. M., Spungen, J. H., Andrews, K. W., Gusev, P. A., Gahche, J. J., Haggans, C. J., Merkel, J. M., & Ershow, A. G. (2022). Iodine in Foods and Dietary Supplements: A Collaborative Database Developed by NIH,

- FDA and USDA. *Journal of Food Composition and Analysis*, 109(104369).
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104369>
- PN-EN ISO 8589 (2010).
- Prerana, S., & Anupama, D. (2020). Influence of carrot puree incorporation on quality characteristics of instant noodles. *Journal of Food Process Engineering*, 43(3).
<https://doi.org/10.1111/jfpe.13270>
- Prosapio, V., & Lopez-Quiroga, E. (2020). Freeze-Drying Technology in Foods. *Foods*, 9(7), 920. <https://doi.org/10.3390/foods9070920>
- Rakoczy-Lelek, R., Smoleń, S., Grzanka, M., Ambroziak, K., Pitała, J., Skoczylas, Ł., Liszka-Skoczylas, M., & Kardasz, H. (2021). Effectiveness of Foliar Biofortification of Carrot With Iodine and Selenium in a Field Condition. *Frontiers in Plant Science*, 12, 656283.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.656283>
- Ramya, V., & Patel, P. (2019). Health benefits of vegetables. *International Journal of Chemical Studies*, 7(2), 82–87.
- Rana, R., & Raghuvarshi, R. S. (2013). Effect of different cooking methods on iodine losses. *Journal of Food Science and Technology*, 50(6), 1212–1216.
<https://doi.org/10.1007/s13197-011-0436-7>
- Rasmussen, L. B., Jørgensen, T., Perrild, H., Knudsen, N., Krejbjerg, A., Laurberg, P., Pedersen, I. B., Bjergved, L., & Ovesen, L. (2014). Mandatory iodine fortification of bread and salt increases iodine excretion in adults in Denmark - A 11-year follow-up study. *Clinical Nutrition*, 33(6), 1033–1040. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2013.10.024>
- Re, R., Pellegrini, N., Protegente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9–10), 1231–1237.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Roseland, J. M., Somanchi, M., Bahadur, R., Haytowitz, D. B., & Pehrsson, P. R. (2020). Content and variability of vitamin D and iodine in processed egg products in the United States (U.S.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 86, 103379.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103379>
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z Dnia 16.09.2010 r. w Sprawie Substancji Wzbogacających Dodawanych Do Żywności., Pub. L. No. Dz. U. z 2010 r. Nr 174 poz. 1184, 13419 (2010).
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) NR 1169/2011 w Sprawie Przekazywania Konsumentom Informacji Na Temat Żywności, Pub. L. No. Dz.U. L 304 z 22.11.2011, s. 18 (2011).

- Santos, J. A. R., Christoforou, A., Trieu, K., McKenzie, B. L., Downs, S., Billot, L., Webster, J., & Li, M. (2019). Iodine fortification of foods and condiments, other than salt, for preventing iodine deficiency disorders. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2019(2), CD010734. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD010734.pub2>
- Schöne, F., Spörl, K., & Leiterer, M. (2017). Iodine in the feed of cows and in the milk with a view to the consumer's iodine supply. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 39, 202–209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.10.004>
- Siejak, P., Smulek, W., Fathordobady, F., Grygier, A., Baranowska, H. M., Rudzińska, M., Masewicz, Ł., Jarzębska, M., Nowakowski, P. T., Makiej, A., Kazemian, P., Drobnik, P., Stachowiak, B., Jarzębski, M., & Pratap-singh, A. (2021). Multidisciplinary studies of folk medicine “five thieves’ oil” (Olejek pięciu złodziei) components. *Molecules*, 26(10), 2931. <https://doi.org/10.3390/molecules26102931>
- Skoczylas, Ł., Liszka-Skoczylas, M., Żmudziński, D., & Rudnik, D. (2018). Biofortyfikacja roślin uprawnych jako metoda walki z deficytem składników mineralnych w diecie człowieka. In J. Słupski, T. Tarko, & I. Drożdż (Eds.), *Składniki Bioaktywne Surowców i Produktów Roslinnych* (pp. 58–67). Oddział Małopolski Polskiego Towarzystwa Technologów Żywności.
- Skoczylas, Ł., Tabaszewska, M., Smoleń, S., Słupski, J., Liszka-Skoczylas, M., & Barański, R. (2020). Carrots (*Daucus carota* L.) biofortified with iodine and selenium as a raw material for the production of juice with additional nutritional functions. *Agronomy*, 10(9), 1360. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091360>
- Śliwiński, B., Brzóska, F., Węglarzy, K., Szybiński, Z., & Kłopotek, E. (2015). The effects of iodised salt licks and teat dipping on the iodine content of cow's milk and blood plasma. *Endokrynologia Polska*, 66(3), 244–250. <https://doi.org/10.5603/EP.2015.0032>
- Smoleń, S., Skoczylas, Ł., Żyw-Smoleń, I. L., Rakoczy, R., Kopeć, A., Piątkowska, E., Żanowska-Kopeć, R. B., Koronowicz, A., & Kapusta-Duch, J. (2016). Biofortification of carrot (*Daucus carota* L.) with iodine and selenium in a field experiment. *Frontiers in Plant Science*, 7, 730. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00730>
- Sobota, A., Wirkijowska, A., & Zarzycki, P. (2020). Application of vegetable concentrates and powders in coloured pasta production. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(6), 2677–2687. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14521>
- Sorrenti, S., Baldini, E., Pironi, D., Lauro, A., D'orazi, V., Tartaglia, F., Tripodi, D., Lori, E., Gagliardi, F., Praticò, M., Illuminati, G., D'andrea, V., Palumbo, P., & Ulisse, S. (2021).

- Iodine: Its role in thyroid hormone biosynthesis and beyond. *Nutrients*, 13(12), 4469. <https://doi.org/10.3390/nu13124469>
- Sularz, O., Smoleń, S., Koronowicz, A., Kowalska, I., & Leszczyńska, T. (2020). Chemical composition of lettuce (*Lactuca sativa* L.) biofortified with iodine by KIO₃, 5-Iodo-, and 3,5-diiodosalicylic acid in a hydroponic cultivation. *Agronomy*, 10(7), 1022. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071022>
- Szybiński, Z. (2009). Iodine prophylaxis in Poland in the lights of the WHO recommendation on reduction of the daily salt intake. *Pediatric Endocrinology, Diabetology and Metabolism*, 15(2), 103–107. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/mdl-19772817>
- Szybiński, Z., Jarosz, M., Hubalewska-Dydejczyk, A., Stolarz-Skrzypek, K., Kawecka-Jaszcz, K., Traczyk, I., & Stoś, K. (2010). Iodine-deficiency prophylaxis and the restriction of salt consumption — a 21 st century challenge. *Endokrynologia Polska*, 61(1), 135–140.
- Szymandera-Buszka, K., Piechocka, J., Zaremba, A., Przeor, M., & Jędrusek-Golińska, A. (2021). Pumpkin, cauliflower and broccoli as new carriers of thiamine compounds for food fortification. *Foods*, 10(3), 578. <https://doi.org/10.3390/foods10030578>
- Szymandera-Buszka, K., & Waszkowiak, K. (2014). Effect of selected fat products on stability of thiamine hydrochloride. *Food Science Technology Quality*, 21(6), 150–158. <https://doi.org/10.15193/ZNTJ/2014/97/150-158>
- Szymandera-Buszka, K., Waszkowiak, K., Kaczmarek, A., & Zaremba, A. (2021). Wheat dietary fibre and soy protein as new carriers of iodine compounds for food fortification – The effect of storage conditions on the stability of potassium iodide and potassium iodate. *LWT - Food Science and Technology*, 137, 110424. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110424>
- Tattersall, J. K., Peiris, M. S., Arai, M., McCully, K., Pearce, N., Rayman, M. P., Stergiadis, S., & Bath, S. C. (2024). Variation in milk-iodine concentration around the world: a systematic review and meta-analysis of the difference between season and dairy-production system. *Food Chemistry*, 459, 140388. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140388>
- van der Reijden, O. L., Zimmermann, M. B., & Galetti, V. (2017). Iodine in dairy milk: Sources, concentrations and importance to human health. *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism*, 31(4), 385–395. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.beem.2017.10.004>

- Verkaik-Kloosterman, J., Buurma-Rethans, E. J. M., Dekkers, A. L. M., & Van Rossum, C. T. M. (2017). Decreased, but still sufficient, iodine intake of children and adults in the Netherlands. *British Journal of Nutrition*, 117(7), 1020–1031. <https://doi.org/10.1017/S0007114517000733>
- Wallace, T. C., Bailey, R. L., Blumberg, J. B., Burton-Freeman, B., Chen, C. y. O., Crowe-White, K. M., Drewnowski, A., Hooshmand, S., Johnson, E., Lewis, R., Murray, R., Shapses, S. A., & Wang, D. D. (2020). Fruits, vegetables, and health: A comprehensive narrative, umbrella review of the science and recommendations for enhanced public policy to improve intake. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(13), 2174–2211. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1632258>
- Wang, T., Liu, Y., Kong, Q., Cao, X., Liu, Y., Xia, S., Zheng, T., & Yu, L. (2022). Effect of Moderate-to-Severe Iodine Deficiency in Early Pregnancy on Subclinical Hypothyroidism: A Longitudinal Study in an Iodine-Sufficient Region in China. *Frontiers in Nutrition*, 9, 839651. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.839651>
- Waszkowiak, K., & Szymandera-Buszk, K. (2007). Effect of collagen preparations used as carriers of potassium iodide on retention of iodine and thiamine during cooking and storage of pork meatballs. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, 87(8), 1473–1479. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2844>
- Wendin, K., & Undeland, I. (2020). Seaweed as food – Attitudes and preferences among Swedish consumers. A pilot study. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 22, 100265. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100265>
- Wierzbńska, J., Smoleń, S., & Sady, W. (2011). Effect of iodine from on the efficiency of its uptake, yield and nitrogen metabolism of tomato plants cultivated in NTF system. *EPISTEME: Czasopismo Naukowo-Kulturalne*, 1(12), 359–364.
- Winder, M., Kosztyła, Z., Boral, A., Kocelak, P., & Chudek, J. (2022). The Impact of Iodine Concentration Disorders on Health and Cancer. *Nutrients*, 14(11), 2209. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/nu14112209>
- Winger, R. J., König, J., & House, D. A. (2008). Technological issues associated with iodine fortification of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 19(2), 94–101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.08.002>
- Wisnu, C. (2008). Determination of iodine species content in iodized salt and foodstuff during cooking. *International Food Research Journal*, 15(3), 325–330.
- Witard, O. C., Bath, S. C., Dineva, M., Sellem, L., Mulet-Cabero, A. I., Dongen, L. H. van, Zheng, J. S., Valenzuela, C., & Smeuninx, B. (2022). Dairy as a Source of Iodine and

- Protein in the UK: Implications for Human Health Across the Life Course, and Future Policy and Research. *Frontiers in Nutrition*, 9, 800559. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.800559>
- World Health Organization. (2004). *Iodine status worldwide. WHO Global Database on Iodine Deficiency*. (B. de Benoist, Ed.). Department of Nutrition for Health and Development World Health Organization.
- World Health Organization. (2006). Forum and Technical Meeting on Reducing Salt Intake in the Population. In *Paris, France*. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehx058>
- World Health Organization. (2007). Salt as a Vehicle for Fortification. Report of a WHO Expert Consultation. In *Report of a WHO Expert Consultation*. World Health Organization.
- World Health Organization. (2014). Guideline: Fortification of food-grade salt with iodine for the prevention and control of iodine deficiency disorders. *WHO Guideline*, 1–54. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25473709>
- World Health Organization. (2022). *Universal salt iodization and sodium intake reduction: compatible, cost-effective strategies of great public health benefit*.
- Wu, Y., Zhang, D., Jiang, X., & Jiang, W. (2015). Fruit and vegetable consumption and risk of type 2 diabetes mellitus: A dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 25(2), 140–147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.numecd.2014.10.004>
- Xing, M., Gu, S., Wang, X., Mao, G., Mo, Z., Lou, X., Li, X., Huang, X., Wang, Y., & Wang, Z. (2021). Low Iodine Intake May Decrease Women's Fecundity: A Population-Based Cross-Sectional Study. *Nutrients*, 13(9), 3056. <https://doi.org/10.3390/nu13093056>
- Yeliosof, O., & Silverman, Lawrence. A. (2018). Veganism as a cause of iodine deficient hypothyroidism. *J Pediatr Endocrinol Metab.*, 31(1), 91–94. <https://doi.org/10.1515/jpem-2017-0082>
- Young, M., Paul, N., Birch, D., & Swanepoel, L. (2022). Factors Influencing the Consumption of Seaweed amongst Young Adults. *Foods*, 11, 3053. <https://doi.org/10.3390/foods11193052>
- Zaremba, A., Cichoń, N., & Szymandera-Buszk, K. (2022). Projekt produktu pochodzenia roślinnego wzbogaconego burakiem fortyfikowanym jodem. In M. Beszterda-Buszczak & M. Przeor (Eds.), *Żywność dzisiaj. Lokalna czy globalna, tradycyjna czy innowacyjna? : Monografia pokonferencyjna* (pp. 22–36). Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. <https://reader.ibuk.pl/?p=book:284403>

- Zaremba, A., Gramza-Michałowska, A., Pal, K., & Szymandera-Buszk, K. (2023). The Effect of a Vegan Diet on the Coverage of the Recommended Dietary Allowance (RDA) for Iodine among People from Poland. *Nutrients*, 15(5), 1163. <https://doi.org/doi.org/10.3390/nu15051163>
- Zaremba, A., Jędrusek-Golińska, A., Kobus-Cisowska, J., & Szymandera-Buszk, K. (2023). Zachowania konsumentów wobec napojów roślinnych jako alternatywy mleka. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego*, 1, 111.
- Zaremba, A., Waszkowiak, K., Kmiecik, D., Jędrusek-Golińska, A., Jarzębski, M., & Szymandera-Buszk, K. (2022). The Selection of the Optimal Impregnation Conditions of Vegetable Matrices with Iodine. *Molecules*, 27(10), 3351. <https://doi.org/10.3390/molecules27103351>
- Zhan, J., Liu, Y.-J., Cai, L.-B., Xu, F.-R., Xie, T., & He, Q.-Q. (2017). Fruit and vegetable consumption and risk of cardiovascular disease: A meta-analysis of prospective cohort studies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(8), 1650–1663. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1008980>
- Zhang, Y., Cao, H., Wang, M., Zou, Z., Zhou, P., Wang, X., & Jin, J. (2023). A review of iodine in plants with biofortification: Uptake, accumulation, transportation, function, and toxicity. *The Science of the Total Environment*, 878, 163203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163203>
- Zhao, Y., Zhang, Y., Yang, H., Xu, Z., Li, Z., Zhang, Z., Zhang, W., & Deng, J. (2024). A comparative metabolomics analysis of phytochemicals and antioxidant activity between broccoli floret and by-products (leaves and stalks). *Food Chemistry*, 443, 138517. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138517>
- Zimmermann, M. B. (2023). The remarkable impact of iodisation programmes on global public health. *Proceedings of the Nutrition Society*, 82(2), 113–119. <https://doi.org/10.1017/S0029665122002762>
- Zimmermann, M. B., & Andersson, M. (2021). GLOBAL ENDOCRINOLOGY: Global perspectives in endocrinology: coverage of iodized salt programs and iodine status in 2020. *European Journal of Endocrinology*, 185(1), R13–R21. <https://doi.org/10.1530/EJE-21-0171>
- Zimmermann, M., & Trumbo, P. R. (2013). Iodine. *Advances in Nutrition*, 4(2), 262–264. <https://doi.org/https://doi.org/10.3945/an.113.003665>

Opublikowane prace wchodzące w skład rozprawy doktorskiej

Article

The Effect of a Vegan Diet on the Coverage of the Recommended Dietary Allowance (RDA) for Iodine among People from Poland

Agata Zaremba ¹, Anna Gramza-Michalowska ¹ , Kunal Pal ²  and Krystyna Szymandera-Buszk a ^{1,*} 

¹ Department of Gastronomy Science and Functional Foods, Faculty of Food Science and Nutrition, Poznań University of Life Sciences, Wojska Polskiego 31, 60-624 Poznań, Poland

² Department of Biotechnology and Medical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela 769008, India

* Correspondence: krystyna.szymandera_buszka@up.poznan.pl

Abstract: The aim of this research was to estimate the effect of a vegan diet on the Recommended Dietary Allowance (RDA) coverage for iodine in people from Poland. It was hypothesized that the problem of iodine deficiency is a concern, especially among vegans. The survey study was conducted in the years 2021–2022 on 2200 people aged 18–80 with omnivore and vegan diets. The exclusion criteria in the study were pregnancy and lactation. The study found that the coverage of RDA for iodine among people with a vegan diet was lower than among people with an omnivore diet ($p < 0.05$); 90% of the participants with a vegan diet had an iodine intake below 150 µg/day. Plant-based dairy and meat analogs were consumed by vegans frequently and in large portions, but none were fortified with iodine. It was found that iodized salt was each group's primary source of iodine. However, it was observed that the iodine supply from this source was limited among vegans, especially in female subjects, who consumed less salt and smaller portions of meals. That is why consideration should be given to the iodine fortification of plant-based foods commonly consumed by vegans.

Keywords: iodine sources; iodized salt; vegan; omnivores; iodine deficiencies; food consumption



Citation: Zaremba, A.; Gramza-Michalowska, A.; Pal, K.; Szymandera-Buszk a, K. The Effect of a Vegan Diet on the Coverage of the Recommended Dietary Allowance (RDA) for Iodine among People from Poland. *Nutrients* **2023**, *15*, 1163. <https://doi.org/10.3390/nu15051163>

Academic Editors: Roberto Iacone and Hongbing Sun

Received: 1 February 2023

Revised: 16 February 2023

Accepted: 23 February 2023

Published: 25 February 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

In recent years, there has been an increase in interest in plant-based diets. Earlier consumer studies showed that from 2019 to 2020, as many as 5 million consumers in the United States shifted to avoiding meat altogether, becoming either vegetarians or vegans [1].

The popularity of vegan cuisine is most evident in the UK, Australia, Israel, Austria, New Zealand, and Germany. The Swedes, the Swiss, and Canadians are also more likely to follow a plant-based diet [2]. According to the Vegan Society, 2021, 6% of the US population follows a strict vegan diet, compared with up to 4% in Europe and 13% in Asia [3]. In Israel, 5% of the population declares themselves vegans [4]. In Poland, the sale of meat products fell by 7.5% over the last three years, whereas the sale of plant-based foods grew by 30% for dairy products and 60% for meat products [5]. Among the reasons for switching to a plant-based diet are environmental protection, altruism towards animals, or the desire to improve wellbeing [6].

Veganism is considered the most stringent form of vegetarianism [7]. Due to sometimes very significant differences in the selection of products, the nutritional status of individual nutrients in people who adhere to plant diets differs from that in people who consume meat and other animal products [8].

The health benefits of using plant-based diets include reducing the risk of sclerosis, metabolic syndrome, or certain cancers [8,9]. At the same time, despite the many positive aspects of limiting animal products in the diet, risk factors should also be considered. Numerous studies show that a plant-based diet, especially vegan, is characterized by

an insufficient supply of ingredients such as protein, ω -3 fatty acids, vitamin B12, iron, vitamin D, and calcium [9–11]. Less numerous studies also indicate deficiencies in zinc and iodine [12,13].

Iodine is necessary for the proper development and functioning of the human body due to its participation in the synthesis of thyroid hormones (T3, T4). Moreover, it affects basic metabolism [14–16]. A deficiency of an element that affects so many processes in the body leads to a spectrum of symptoms classified as iodine deficiency disorders (IDD), including goiter and hypothyroidism. Chronic, severe iodine deficiency in children causes cretinism or developmental delay [17,18]. The intake of stable iodine is also considered an effective countermeasure for reducing the risk of thyroid cancer in the case of a possible release of radioactive iodine following a nuclear accident [19]. The recommended daily iodine intake for adults was established at 150 μ g [20]. Studies suggest that iodine content in vegetarian diets may be inadequate, but adherence to a balanced vegetarian diet need not lead to iodine deficiency. The iodine intake by the vegan Japanese population is among the highest in the world [21]. However, younger Japanese vegans tend to consume food with low iodine content [22,23]. The latest statistics indicate that 56.9% of Europeans have an insufficient intake of iodine [20,24,25]. The diet of Poles can also be generally low in iodine [17]. This is because primary sources of iodine are excluded from the diet. The primary naturally occurring sources of iodine in the diet are animal products such as fish, seafood, eggs, milk, and dairy products [26]. In contrast, the content of iodine in plant products is strongly correlated with the content of this element in the soil [25]. The primary plant source of iodine may be algae, as the content of this element is high in them [25]. Earlier research confirms that the highest iodine intake was recorded for females following vegan diets with regular consumption of seaweed [27,28]. However, seaweed is not customarily consumed in the Western diet, although its popularity is increasing. As there is also no culture of consuming these types of products in Poland, they are not present in traditional gastronomy. In addition, the possibilities of enriching food with algae are limited due to legal restrictions [29]. Plant-based dairy and meat analogs are increasingly popular, but they are naturally low in iodine, so they cannot be considered nutritionally equivalent to milk.

To minimize the risk of deficiency of this element caused by insufficient amounts in the diet, programs to fortify food with iodine are carried out in many countries around the world. One of the most common fortification strategies, also used in Poland, is salt iodization. The salt's iodine fortification consists of soaking the product in a solution of potassium iodide or potassium iodate at an appropriate concentration. In Poland, these concentrations are legally regulated and amount to (30 ± 10) mg/kg of potassium iodide (KI) or (39 ± 13) mg/kg of potassium iodate (KIO_3). The program of obligatory salt iodization in Poland has had very good results. In 2002, Poland was classified by the WHO as a country with sufficient iodine supply at the population level [20,30]. The analysis of iodine consumption shows that iodized salt was the primary source of iodine [26]. However, in 2006, the World Health Organisation introduced a recommendation to limit salt intake to 5 g/day, as it is a risk factor for atherosclerosis and hypertension. Consequently, the iodine supply from this source can be limited. Therefore, appropriate activities must be undertaken to promote the joint implementation of programs for reducing sodium intake and eliminating IDD through salt iodization [31].

Considering the above, this research aimed to estimate the effect of a vegan diet on the coverage of the RDA for iodine and evaluate the prevalence of the risk of inadequate iodine intake (below 41% of RDA for iodine) among people aged 18–80 from Poland. It was hypothesized that the problem of iodine deficiency in the diet especially concerns the vegan group. Our study also assessed the impact of variables concerning age, sex, and education level. We estimated the relative contributions of iodized salt and iodine introduced by foods to the total iodine intake.

2. Materials and Methods

2.1. The Survey Questionnaire

The study was conducted using an anonymous questionnaire based on the KomPAN questionnaire [32] and the author's questions. The author's questions were validated. The average correlation coefficients for the intake frequency of individual products were $r = 0.81$, and for product quantities, the coefficients were $r = 0.79$.

The survey questionnaire was completed from January 2021 to June 2022. A total of 2341 questionnaires were sent in and registered in the system; of these, 2200 questionnaires were correct (94%).

The questionnaire was made available in electronic form via Google Forms. The surveys were distributed on Polish internet forums for vegans, nutrition, and nutrition for the elderly. Questionnaires were also completed in outpatient family doctor clinics using the investigator's computer.

No ethical approval was required for this study. Participants were informed about the study's aim and that their participation was entirely voluntary; therefore, they could stop the analysis at any point, and the responses were anonymous. The authors did not ask for sensitive data and personal information. Formal dependence was not used in recruiting subjects for the study.

The questionnaire contained questions about the type of diet, the frequency and amount of consumed products, and the types of culinary processes used when preparing products with iodized salt (allowing for a complete determination of the iodine content in the diet from salt) (Table S1 and S2). The information on the method of food preparation (the types of culinary processes used) consisted of how salt was added to the food (or whether salt was added at all) at the end of heating, halfway through heating, and at the beginning of water heating. Based on the authors' preliminary research (unpublished data) on the content of iodine in iodized salt cooked under varying conditions, iodine losses were assumed. Adding salt at the end of heating (losses of 0%), adding salt halfway through heating (losses of 25%), and adding salt at the beginning (losses of 50%) of water heating. The conversion factor assumed the cooking of meats (for approximately 30 min), potatoes (for approximately 20 min), pasta, rice, and groats (for approximately 10 min), and losses were taken into account only for these culinary processes. For the purpose of calculations of iodine from salt, only salt as a household additive was used. Food products for which the frequency and amount of consumption were asked in the questionnaire were: eggs; dairy products (butter, milk, yogurt, kefir, buttermilk, sour milk, sour cream, cottage cheese, cheese, e.g., Emmental, Mozzarella, Cheddar, Gouda, Brie, Gorgonzola); vegetable drinks; vegan products and dishes (vegan burgers, vegan sausages, bacon, and meat free ham); soy and its products (tofu, tempeh); legume seeds (peas, beans, chickpeas, lentils); vegetables (cabbage, Brussels sprouts, leek, garlic, onion, pepper, tomato, asparagus, and spinach); fruits (banana, apple, blueberries, strawberries, raspberries, peaches, apricots, tangerines, figs, plums); algae; poultry (chicken, turkey, duck, goose); red meat (pork, beef); cold cuts; fish (salmon, mackerel, tuna, cod, haddock, plaice, pollock, sprat, herring, trout); sushi; bread (light, wholemeal, graham, rye, wheat bread); and grain products (buckwheat, millet, barley, white rice, bran, and flakes).

Based on the frequency and amount of consumption of particular products as declared by the respondents, as well as on the iodine content in the products, the weekly iodine consumption and the percentage coverage of the demand for this element were estimated. Iodine content in the products was determined based on the tables of composition and nutritional value [33,34]. For iodine calculations from salt, only salt as a household additive was used. For iodine calculations from plant-based dairy and meat analogs—none of them were fortified with iodine, and no iodine content was assumed. Taking into account the average iodine content in 100 g of the product, the content of this element was converted into the usual portion size provided by the respondents. Then, the content of iodine was converted into weekly consumption based on the frequency of consumption, according to an 8-point scale declared by the respondents. The following conversion scheme was

adopted: 1—‘less often/never’ means consumption of 0 servings per week; 2—‘several times a year’ means consumption of 0.1 servings per week; 3—‘once a month’ means consumption of 0.25 servings per week; 4—‘several times a month’ means consumption of 0.75 servings per week; 5—‘once a week’ means consumption of 1 serving per week; 6—‘several times a week’ means consumption of 3 servings per week; 7—‘once a day’ means consumption of 7 servings per week; 8—‘several times a day’ means consumption of 21 servings per week. When calculating the coverage of iodine demand, the daily dose of this element was assumed to be 150 µg, i.e., 1050 µg per week.

2.2. The Group of Respondents

The group selection was random, with stratified sampling taking into account the sampling of Polish society in terms of the type of diet, sex, and age. The exclusion criteria in the study were age (under 18) and pregnancy and lactation. The study population consisted of 2200 people of both sexes (i.e., 49% males and 51% females) aged 18–80 years in different areas of Poland. The subjects were on an omnivore diet and a vegan diet (Table 1).

Table 1. Distribution [%] of respondents by age groups ($n = 2200$).

Diet	Sex	Educational Level	Age	Distribution	Diet	Sex	Educational Level	Age	Distribution
Omnivorous	Women $n = 541$ $p < 0.05$	Vocational $n = 151$	18–30	21	Vegan	Women $n = 564$ $p < 0.05$	Vocational $n = 160$	18–30	20
			31–40	25				31–40	25
			41–50	27				41–50	27
			51–60	23				51–60	29
			61–70	24				61–70	27
			71–80	31				71–80	32
		Secondary $n = 150$	18–30	25			Secondary $n = 171$	18–30	27
			31–40	25				31–40	26
			41–50	24				41–50	28
			51–60	20				51–60	23
			61–70	31				61–70	40
			71–80	25				71–80	27
	Men $n = 531$ $p < 0.05$	Higher $n = 240$	18–30	31		Men $n = 564$ $p < 0.05$	Higher $n = 233$	18–30	32
			31–40	29				31–40	29
			41–50	34				41–50	33
			51–60	42				51–60	40
			61–70	50				61–70	49
			71–80	54				71–80	50
		Vocational $n = 175$	18–30	34			Vocational $n = 182$	18–30	33
			31–40	29				31–40	32
			41–50	12				41–50	11
			51–60	52				51–60	35
			61–70	13				61–70	31
			71–80	35				71–80	40
		Secondary $n = 135$	18–30	18			Secondary $n = 161$	18–30	20
			31–40	27				31–40	31
			41–50	9				41–50	16
			51–60	35				51–60	28
			61–70	14				61–70	30
			71–80	32				71–80	36
		Higher $n = 221$	18–30	29			Higher $n = 221$	18–30	23
			31–40	35				31–40	38
			41–50	28				41–50	23
			51–60	61				51–60	35
			61–70	24				61–70	52
			71–80	44				71–80	50

Regarding education, the largest group was people with higher education (41.6%); people with vocational education accounted for 30.36% of the study group, and people with secondary education 28.05%. The subjects were divided into age groups: 18–30; 31–40; 41–50; 51–60; 61–70; and 71–80 (Table 1).

2.3. Statistical Analysis

The data were analyzed with Statistica (Software v. 13, StatSoft, Tulsa, OK, USA). The calculations were performed at a confidence level of 0.95, and the maximum error rate was set at 0.05. One-way analysis of variance (ANOVA) was carried out to compare the means of the groups (covering RDA for iodine) at a significance level of $p < 0.05$. Then, post hoc Tukey's test was applied. Interdependencies between the qualitative variables (diet, age, sex, education level) were determined with the chi-squared independence test at $\alpha = 0.05$, which showed differences between the diet and sex.

The logistic regression analysis (the odds ratio—OR) was applied to predict the covering of the RDA for iodine among people with a vegan diet. The ranges assumed were: high (above 100% RDA); moderately high (81–100% RDA); medium (60–80% RDA); low (41–60% RDA); very low (21–40% RDA); or alarmingly low (below 20% RDA) RDA for iodine depending on the people with a vegan diet and among women.

3. Results

3.1. Iodine Intake

The recommended amount of iodine that adults should consume each day is 150 μg .

Unfortunately, approximately 50% of respondents from Poland declared the consumption of food products that allowed for the coverage of RDA for iodine below 100%.

The research results showed that the intake estimate of iodine from foods in the Polish population ranged from 9 to 160 $\mu\text{g}/\text{day}$, i.e., 67–1120 $\mu\text{g}/\text{weekly}$, which is 8 to 152% of RDA for iodine intake (Figure 1).

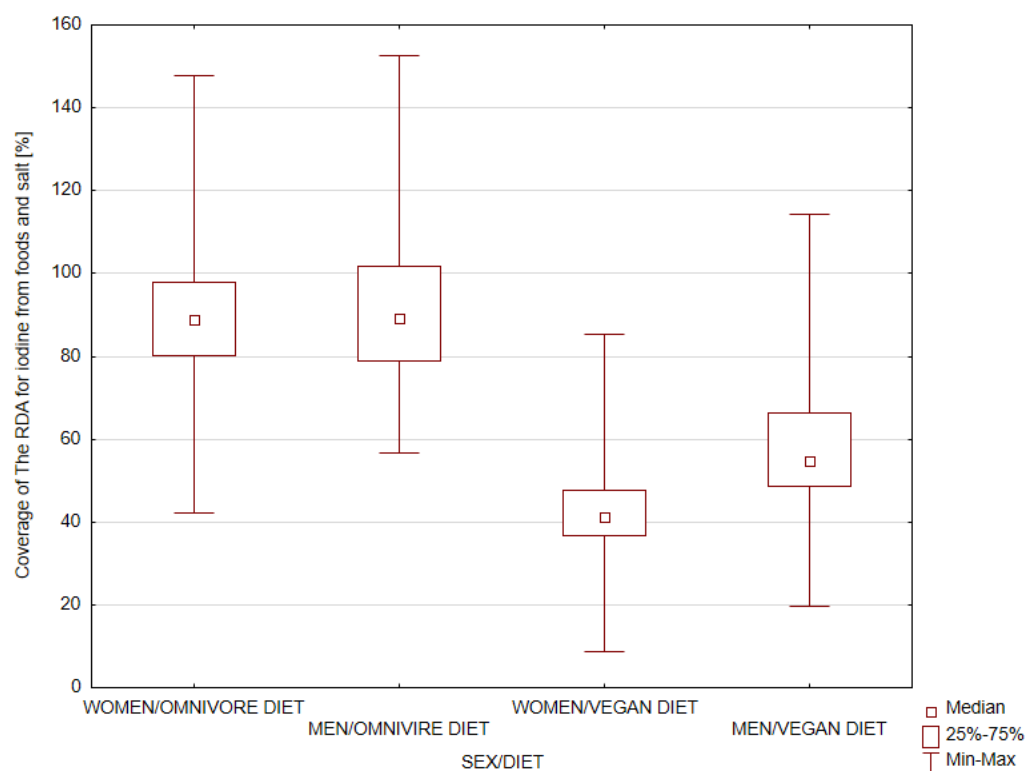


Figure 1. Contribution percentage of food sources to the coverage of total RDA for iodine among women and men in different diet groups (vegan, omnivore) aged 18–80 from Poland.

The covariance analysis (Table 2) showed a statistically significant influence ($p < 0.05$) of the predictors, i.e., the type of diet, sex, and age, on the amount of coverage of the RDA for iodine.

Table 2. Statistical significance of predictors of covariance models for changes in the average weekly coverage of demand for iodine.

Predictors	SS	df	MSE	F-Value	p-Value	Post Hoc Power $\alpha = 0.05$
Diet	8.448×10^5	1	8.448×10^5	3.550×10^3	<0.05	1.000
Sex	3.832×10^4	1	3.832×10^4	6.335×10^1	<0.05	1.000
Age	2.635×10^4	5	5.269×10^3	8.618×10^0	<0.05	0.999
Education	3.457×10^3	2	1.729×10^3	2.783×10^0	0.063	0.549

SS—Statistical Significance; df—degrees of freedom; MSE—mean sum of squares.

Taking the strength of statistically significant influence (Table 2) into account, the predictors can be ranked from the most to the least impact in the following order: the type of diet > sex > age > education level. The statistical analysis showed that the diet's most significant effect was confirmed.

A chi-squared independence test (Table 3) also confirmed the strongest relationship between the type of diet ($p < 0.05$) and the coverage of RDA for iodine. People with a vegan diet had a significantly lower intake of iodine from food than people with an omnivore diet ($p < 0.05$; Table 3).

Table 3. Dependence between the covering the RDA for iodine and selected factors (diet; education, sex, age) among people aged 18–80 (chi-square independence test).

Type of Group	Test Value	The Degrees of Freedom (df)	p-Value
Diet	1.478×10^3	5	<0.05
Sex	2.267×10^1	5	<0.05
Age	1.164×10^1	25	<0.05
Education	2.451×10^{-2}	10	0.094

In vegan people (Figure 1), the estimated iodine intakes ranged from 8 µg/day to 114 µg/day, but on average, 51% RDA for iodine (Median value = 48 µg/day). In people with an omnivore diet, the intake was 90% RDA for iodine on average (Median value = 79 µg/day). In the group of participants with a vegan diet, 90% had an iodine intake below 150 µg/day. Only 1% of vegans had an intake of iodine above 150 µg/day (Figure 2). For omnivore participants, the percentage with an iodine intake below 150 µg/day was 76%. The estimated iodine intake above 150 µg/day was 24% of omnivores.

To maintain homeostasis and hormone synthesis, the thyroid absorbs 60 µg/day of iodine when the supply is sufficient [35]. Therefore, logistic regression analysis was applied to predict very low (21–40%) or alarmingly low (below 20%) coverage of the RDA for iodine among people with a vegan diet (Table 4; Figure 2). The logistic regression analysis indicated a strong relationship between alarmingly low (below 20%) and very low (21–40%) coverage of RDA for iodine and a vegan diet (Table 4).

A chi-squared independence test also showed a relationship between the sex of the respondents and the covering RDA for iodine, especially in the vegan group (Table 3).

It was found that 64% of men vegan participants had an iodine intake below 61% of RDA for iodine, and 94% of vegan women had an iodine intake below 61% of RDA iodine, including 43% who had below 41% RDA iodine.

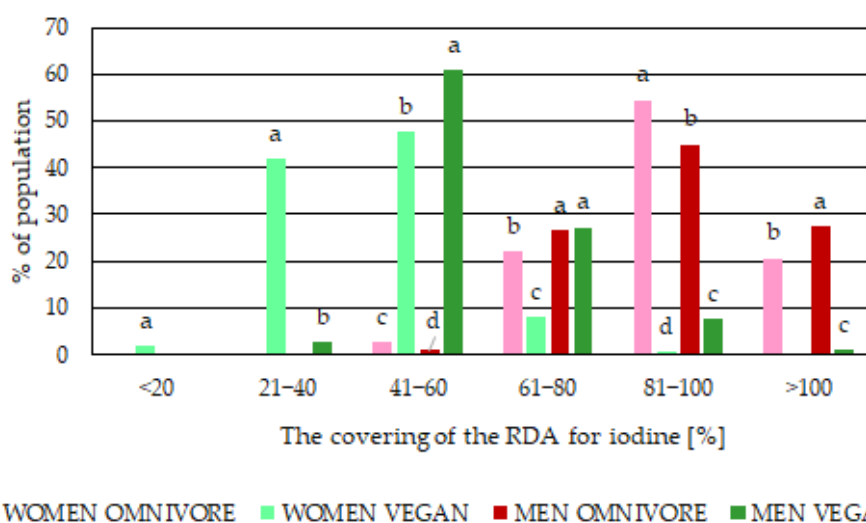


Figure 2. Contribution percentage of the coverage of total RDA for iodine according to ranges (above 100% RDA; 81–100% RDA; 60–80% RDA; 41–60% RDA; 21–40% RDA; below 20% RDA) among women and men in different diet groups (vegan, omnivore) aged 18–80 from Poland; different letters (a–d) denote a significant difference at $p < 0.05$ (one-way ANOVA, and post hoc Tukey test) between men and women in different diet groups (vegan, omnivore) within a given RDA ranges.

Table 4. Results of logistic regression analysis to the covering the Recommended Dietary Allowance of iodine among people with vegan Diet.

Level	Odd Ratio (OR)	95% CI
TOTAL GROUP		
<20	9.848×10^5	13.801–31.622
21–40	2.887×10^7	0.444–17.171
41–60	6.597×10^1	0.348–4.189
61–80	6.656×10^{-1}	−0.407–0.642
81–100	4.283×10^{-2}	−3.150–1.991
>100	1.970×10^{-2}	0.000–0.015
WOMEN		
<20	1.805×10^6	14.412–31.623
21–40	7.195×10^7	0.444–11.809
41–60	3.457×10^1	0.348–3.543
61–80	3.042×10^{-1}	−1.190–0.642
81–100	4.459×10^{-3}	−5.413–1.991
>100	0.000×10^0	−17.082–1.471
MEN		
<20	1.776×10^5	12.091–31.623
21–40	2.920×10^6	0.444–14.887
41–60	1.633×10^2	0.348–5.095
61–80	1.039×10^0	0.038–0.642
81–100	0.101×10^{-1}	−2.294–1.990
>100	3.314×10^{-2}	−3.407–1.471

3.2. Iodine Sources

Figures 3 and 4 present the sources of iodine in people with a vegan diet and the omnivore diet (men and women). It was found that estimated iodine intake from food products (without iodine salt) contributed 31% among women and men with vegan diets (Figure 3a). In women and men with an omnivore diet, this intake contributed 53% of RDA coverage for iodine (Figure 3b).

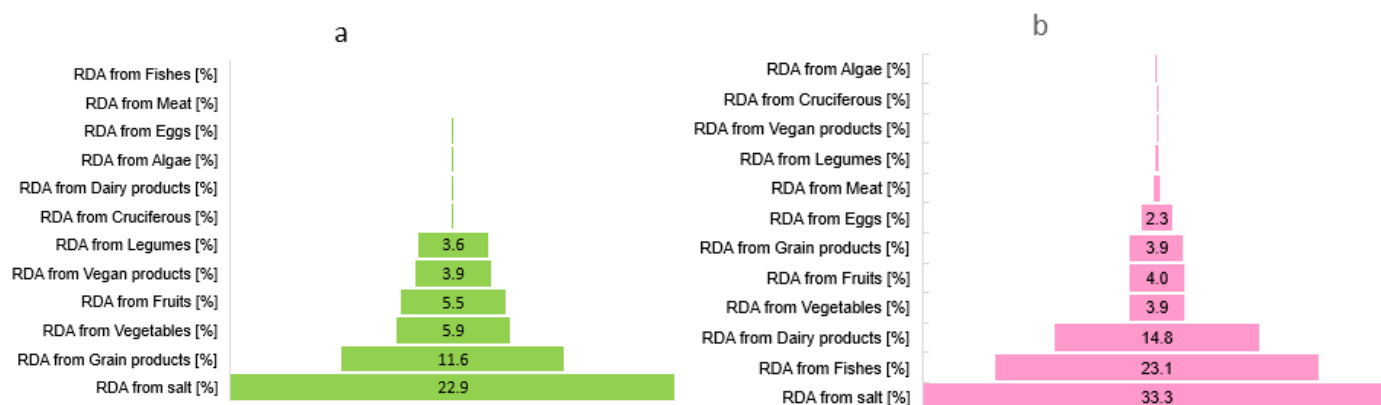


Figure 3. Ranked covering of the RDA for iodine from products among women and men with the vegan diet (a) and the omnivore diet (b) aged 18–80 from Poland.

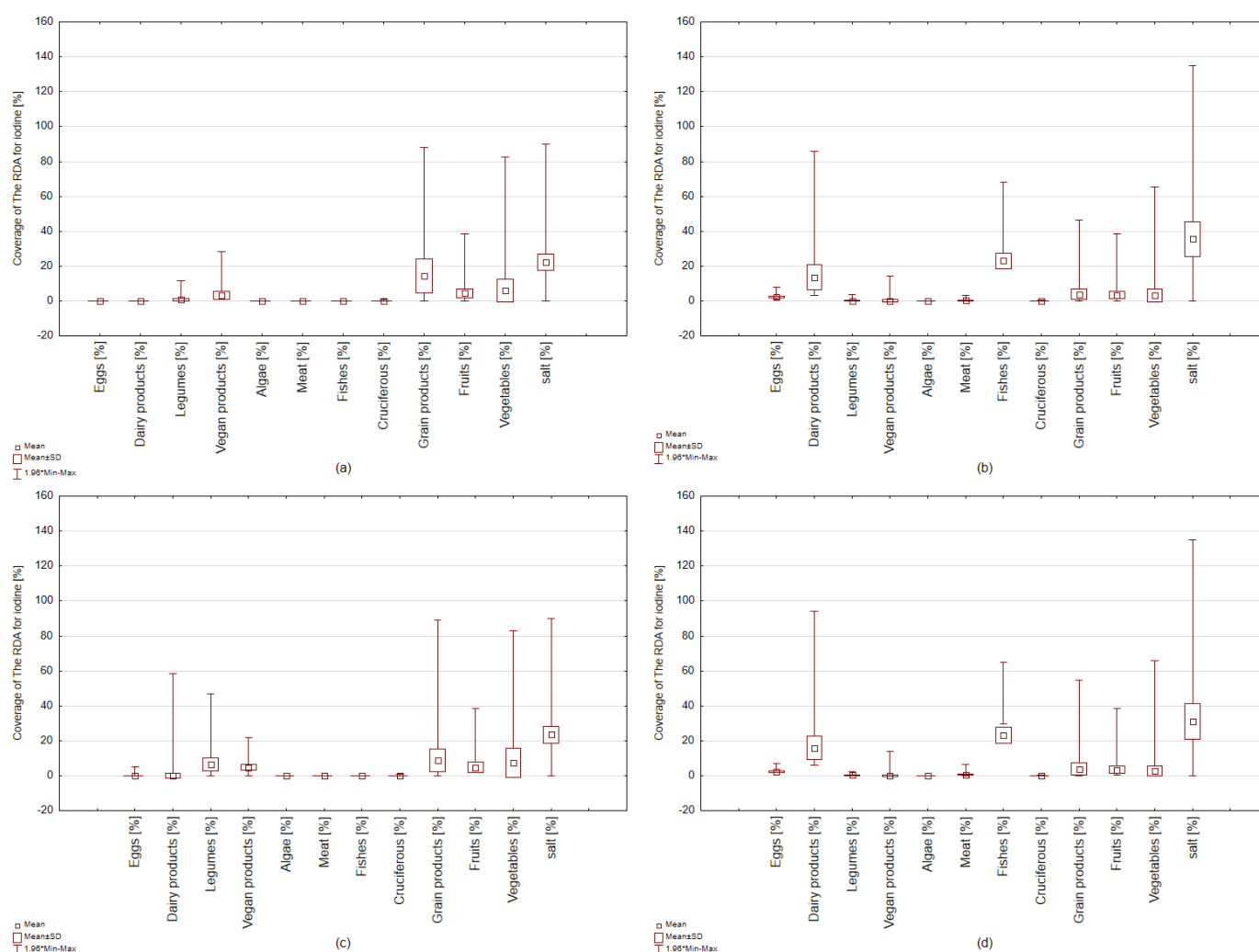


Figure 4. Contribution percentage of RDA for iodine from product groups among women with the vegan diet (a) and the omnivore diet (b) and men with the vegan diet (c) and the omnivore diet (d) aged 18–80 from Poland.

It was found that dairy products were only consumed by the people surveyed with an omnivore diet, both in women and men (Figures 3b and 4b,d). These products met 17% of the iodine-recommended daily allowance among women and 19% among men.

Sea fish and seafood (rich iodine sources) contributed to the iodine intake of only 23%, but only among people with an omnivore diet. A low frequency of consumption of these products (twice a month on average) was found in both women and men. In women with an omnivore diet, egg products contributed 2% of total iodine intake and meat products 0.5% (Figure 4b,c), while in men, 4% and 0.6% of intake, respectively. Fruit and vegetables contributed approximately 8% of the total iodine intake in both women and men with an omnivore diet.

Our studies showed a high prevalence of iodine deficiency among vegans, especially in women of all ages (Figure 4a,c). Iodine content in food of plant origin is lower than in animal origin due to the low iodine concentration in soil.

Vegan dairy products were frequently consumed by the surveyed women with a vegan diet but could satisfy only 4% of the RDA for iodine. These products were not iodine-fortified. A total of 40% of women and 10% of men consumed them daily, an average of 200 g/day. Similarly, vegan meat substitutes (i.e., vege-ham, vege-sausage, vege-burger) were frequently consumed by the surveyed vegan population, especially men. Unfortunately, with these products, women could meet a mere 2% of the recommended daily allowance and men 3%. These products were not iodine-fortified. Legumes and their fermented products contributed 2% of total iodine intake among vegan women and 3% among men. These products were frequently and in large portions consumed by the surveyed women and men but were not iodine-fortified. Seaweed (rich iodine sources) contributed to an iodine intake of only 1%. A low frequency of consumption of these products (once a month on average) was found.

Fruit and vegetables contributed approximately 11% of the total iodine intake in both women and men with vegan diets. High consumption of cruciferous vegetables, especially broccoli, cabbage, and cauliflower, was found. Unfortunately, a high frequency of consumption of these products was found (daily), especially among women with a vegan diet. This can decrease iodine absorption and also contribute to the incidence of thyroid cancer [36]. In vegan women, cereal products (groats, pasta, bread) contributed 8% of total iodine intake, and among men, 9% (Figure 4). Whereas in both women and men with an omnivore diet, cereal products (groats, pasta, bread) intake contributed 5% of total iodine intake. The iodine intake from these products contributed to the covering of RDA for iodine 14% and 8% among women and men with vegan diets, respectively, and 4% with an omnivore diet.

It was found that iodized salt was each group's primary source of iodine. However, the iodine supply from this source was found to be limited among vegans, especially concerning women. Women (vegan and omnivore) declared average salt consumption at the level of 3 g/day. Among men, salt consumption was similar to women, 3 g/day.

However, it is known that a significant amount of iodine (10–40%) in salt may be lost during culinary processing [37–42]. Therefore, our research (Figure 5) was also concerned with analyzing habits related to salt being added to the food (at the end of heating, halfway through heating, at the beginning of water heating, or no salt was added). Our study found that 96% of vegan women and 26% with an omnivore diet declared adding iodized salt at the beginning of water heating, e.g., to potatoes or pasta. It is not a good practice because the loss of iodine can be as high as 20–50%. Therefore, for those who indicated adding salt at the beginning of cooking, the iodine content was calculated at 50% of the initial content. Unfortunately, only 36% of women with an omnivore diet declared adding salt at the end of heating. None of the women with a vegan diet declared adding salt at the end of heating. Hence, the differences in RDA for iodine from salt. Among the vegan women group, it was found that 22% of RDA for iodine was from iodized salt, and among women with an omnivore diet, 36% (Figure 4). Similarly, it was found that 96% of vegan men and 57% of omnivore men also declared adding iodized salt at the beginning of water heating.

Therefore, our studies showed that in the Polish population average daily consumption of iodized salt met 28% of the recommended allowance of iodine. It was found that those who did not consume iodized salt ($n = 10$) ingested an estimated 14% of the RDA for iodine.

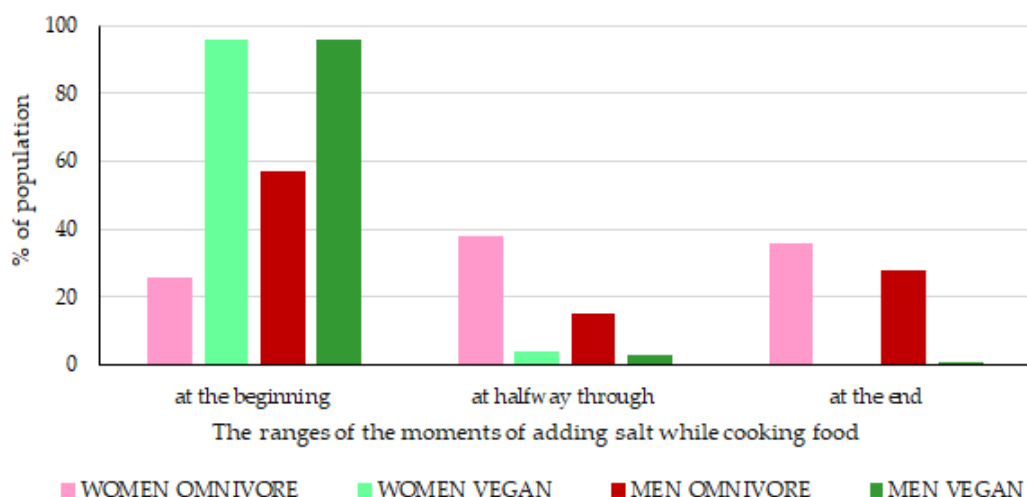


Figure 5. The time (at the beginning, halfway through, the end) to add salt to food while cooking among women and men with the vegan diet and the omnivore diet aged 18–80 from Poland.

4. Discussion

The present study found that people with a vegan diet had a significantly lower intake of iodine from food than people with an omnivore diet. Low iodine intakes have also been reported in other European populations, especially vegans [43–46]. Iodine nutrition is also a growing issue within industrialized countries, including the US, due to declining iodine intake, partly attributable to changing dietary patterns and food manufacturing practices [26]. A recent national iodine survey found Israel’s population to be mildly iodine deficient, possibly due to unmonitored changes in the food content of dietary iodine [47].

In our research, we confirmed that vegan women and men from Poland have low iodine intake, regardless of age and education level.

Krajcovicová–Kudlacková et al. (2003) and Groufh–Jacobsen (2020) confirmed similar tendencies in their research. They found that vegetarian groups from Europe, mainly vegan, tended to have the lowest iodine intake [48,49].

In our research, we confirmed that women, especially those with a vegan diet, have worse compliance with the iodine recommendations than those with an omnivore diet. The trend of lower iodine intake in women than men, especially vegans, was confirmed by Groufh–Jacobsen (2020) and Hatch–McChesney (2022) [26,48]. The low intake of iodine in women is in agreement with earlier studies showing a low iodine intake among women in Norway [44,50–55]. According to Eveleigh et al. (2020), iodine intakes for moderate vegans (vegetarians), vegetarians, and pescatarians from some populations were similar between sexes but also were below RDA for iodine [43].

Our studies confirmed that in people with an omnivore diet, the most important iodine sources were dairy products, especially yogurt, cheeses, and fish, especially sea fish. Similar trends were confirmed among Norwegians by Carlsen (2018) [56–59]. In the UK, the main sources of dietary iodine are cow’s milk and dairy products (2022). Similarly, Israel’s milk and dairy products are iodine rich [42]. Brzóska et al. (2015), after analyzing the iodine content in milk in various regions of Poland, found that the average iodine content in drinking milk in Poland, taking into account its losses as a result of pasteurization, is at the level of about 100–200 µg/l. The authors confirm that Polish milk may be an important element of IDD prevention [60]. Thanks to the iodine content in milk, its products (cheese, fermented milk drinks) are also a source of this element. These have a higher iodine content due to the higher content of dry matter [61,62]. On average, cheese contains 37.5 mcg of iodine per 100 g of cheese; 100 g of Cheddar cheese provides 32% of the daily requirement for iodine.

Our research confirmed an earlier study that while the intake of white cheese has increased, there has been a decrease in the intake of milk [62]. Our research also drew

attention to the tendencies of lower frequency and amount of milk consumed among young people. These trends and even stronger ones were confirmed in earlier studies [63–68]. However, an increasing frequency of consumption of those gaining in popularity, such as plant-based alternatives, was observed.

Our study showed that people on a vegan diet consumed significant amounts of milk-alternative drinks. Dinewa et al. (2021), analyzing the consumption of cow's milk and milk-alternative drinks in the UK population, found that cow milk consumers have higher UIC medians than those consuming milk-alternative drinks. On the basis of the collected data, it was proved that people who consumed milk-alternative drinks were at risk of deficiency of this element [26,69,70]. These authors also point to the need to fortify milk-alternative drinks so that they provide at least as much iodine as cow's milk [71].

Due to their high consumption, chicken eggs can be a source of iodine in the diet [72]. This was confirmed by our research among omnivore subjects. On the basis of our data, it was proved that people who consumed eggs (a few times a week) were less at risk of deficiency of this element. However, the authors point to the seasonal variability of iodine content in eggs due to feed.

Sea fish are a rich source of iodine [34]. Lower iodine intake was found among women compared to men, which can also be seen in an earlier study [73,74]. These studies showed that the consumption of fish products was so low that it only covered 10% of the iodine requirement [73].

Vegans consume plant-based foods and omit all types of animal products.

Algae are a plant product that provides significant amounts of iodine. Earlier research confirms that the highest iodine intake was recorded for females following a vegan diet with regular (daily) consumption of seaweed [75,76]. It has recently become popular in UK food products as a whole and as a functional ingredient [27]. However, in our study, a low frequency of consumption of these products (once a month on average) was found. Moreover, iodine content significantly differs between seaweed species consumed [28].

Unfortunately, in the study group, vegans were found to have a high consumption of plant-based food groups (fruit, vegetables, legumes, tubers, cereals, and grains) [55,77–79], along with tofu and soya-based products that naturally have a low iodine content. The Polish market also does not offer biofortified vegetables.

In our research, a high frequency of consumption of cereal products was found (several times a day), especially among men. In vegan women, cereal products (groats, pasta, bread) contributed 20% of total iodine intake, and among men, 22%. However, these were not as high iodine sources as in the research among Norwegians [55]. The Norwegian and American markets offer a wide range of iodized bread with iodized salt [34,55]. In Switzerland, iodine-fortified bread is a significant contributor to dietary iodine and can be consumed by all dietary groups [80]. Unfortunately, bread does not introduce high iodine amounts into the diet though it is a staple food in Poland's population.

Our research confirms an earlier study [46] which indicated that the population could not reach the recommended iodine intake from food sources [37,55,62,81]. The most practical and cost-effective way to provide iodine supplementation to deficient populations is with iodized salt, as advocated by several international organizations such as the WHO, United Nations Children's Fund, and International Council for Control of Iodine Deficiency Disorders [82,83].

However, it was found that the iodine supply from this source is limited, especially concerning vegan women. This follows a reduction in iodized salt consumption, possibly influenced by efforts to reduce salt consumption in the general public [84,85]. Additionally, bad habits exist related to the use of salt in the household.

Our study found that over 80% of the respondents declared adding iodized salt at the beginning of water heating, e.g., to potatoes or pasta. Therefore, in our research, the amount of salt (for declaring adding iodized salt at the beginning of water heating) added during the processing was reduced to 50%.

A strength of this study was the sample size of over 2202 participants (1000 vegan, aged 18–80), compared to previously conducted studies on vegans and vegetarians [51,86,87]. Another strength is the assessment of iodine intake with methods including the assessment of iodine intake from iodized salt. The earlier study did not identify adjusting iodine intakes to account for the types of culinary processes used.

The main limitations were that the presented study did not take into account the place of residence of the respondents and regional differences in the frequency of consumption of products [88], and the lack of measurements of urinary iodine concentration. Therefore, further research should focus on confirming the obtained dependencies using such measurements.

5. Conclusions

The study found that the coverage of the Recommended Dietary Allowance (RDA) for iodine among people with a vegan diet was lower than among people with an omnivore diet. A total of 90% of the participants with a vegan diet had an iodine intake below 150 µg/day. The results also showed a relationship between the vegan diet of women and the lowest coverage of the RDA for iodine, below 41%. Plant-based dairy and meat analogs were consumed frequently and in large portions by vegans, but none were fortified with iodine. It was found that iodized salt was each group's primary source of iodine. However, the iodine supply from this source was also limited among vegans, especially among women. This follows a reduction in iodized salt consumption, unfavorable habits related to the use of salt in the household, and smaller portions of meals. That is why consideration should be given to iodine fortification of foods commonly consumed by vegans, including plant-based milk alternatives, within the acceptable dosage range.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/nu15051163/s1>. Table S1: Questions about the consumption of products as iodine carriers and types of culinary processing for meats product; Table S2: Questions about how salt was added to the food (time of cooking).

Author Contributions: Conceptualization, A.Z. and K.S.-B.; methodology, A.Z., A.G.-M. and K.S.-B.; software, K.S.-B., A.G.-M. and K.P.; validation, A.Z., K.S.-B. and K.P.; formal analysis, A.Z.; investigation, A.Z., A.G.-M., K.P. and K.S.-B.; data curation, A.Z. and K.S.-B.; writing—original draft preparation, A.Z., A.G.-M., K.P. and K.S.-B.; writing—review and editing, A.Z., A.G.-M., K.P. and K.S.-B.; visualization, A.Z. and K.S.-B.; supervision, K.S.-B., A.G.-M. and K.P. 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: Not applicable.

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

References

1. Tso, R.; Forde, C.G. Unintended Consequences: Nutritional Impact and Potential Pitfalls of Switching from Animal to Plant-based Foods. *Nutrients* **2021**, *13*, 2527. [CrossRef]
2. Mandel, A. Record Interest in Veganism. Available online: <https://www.rp.pl/przemysl-spozywczy/art523671-rekordowe-zainteresowanie-weganizmem> (accessed on 16 September 2020).
3. Selinger, E.; Neuenschwander, M.; Koller, A.; Gojda, J.; Kühn, T.; Schwingshackl, L.; Barbaresko, J.; Schlesinger, S. Evidence of a Vegan Diet for Health Benefits and Risks—An Umbrella Review of Meta-Analyses of Observational and Clinical Studies. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2022**, 1–11. [CrossRef]
4. Gvion, L. Generation V: Millennial Vegans in Israel. *J. Contemp. Ethnogr.* **2020**, *49*, 564–586. [CrossRef]
5. Mazurkiewicz, P. Poles Turn Their Backs on Meat. More and More Plant Substitutes on the Shelves. Available online: <https://www.rp.pl/przemysl-spozywczy/art36804141-polacy-odwracaja-sie-od-miesia-na-polkach-coraz-wiecej-roslinnych-zamiennikow> (accessed on 2 August 2022).

6. Janssen, M.; Busch, C.; Rödigier, M.; Hamm, U. Motives of Consumers Following a Vegan Diet and Their Attitudes towards Animal Agriculture. *Appetite* **2016**, *105*, 643–651. [\[CrossRef\]](#)
7. Sakkas, H.; Bozidis, P.; Touzios, C.; Kolios, D.; Athanasiou, G.; Athanasopoulou, E.; Gerou, I.; Gartzonika, C. Nutritional Status and the Influence of the Vegan Diet on the Gut Microbiota and Human Health. *Medicina* **2020**, *56*, 88. [\[CrossRef\]](#)
8. Clarys, P.; Deliens, T.; Huybrechts, I.; Deriemaeker, P.; Vanaelst, B.; De Keyser, W.; Hebbelinck, M.; Mullie, P. Comparison of Nutritional Quality of the Vegan, Vegetarian, Semi-Vegetarian, Pesco-Vegetarian and Omnivorous Diet. *Nutrients* **2014**, *6*, 1318–1332. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
9. Magkos, F.; Tetens, I.; Bügel, S.G.; Felby, C.; Schacht, S.R.; Hill, J.O.; Ravussin, E.; Astrup, A. Perspective: A Perspective on the Transition to Plant-Based Diets: A Diet Change May Attenuate Climate Change, but Can It Also Attenuate Obesity and Chronic Disease Risk? *Adv. Nutr.* **2020**, *11*, 1–9. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
10. Craig, W.J. Health Effects of Vegan Diets. *Am. J. Clin. Nutr.* **2009**, *89*, 3–9. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
11. Lee, Y.; Park, K. Adherence to a Vegetarian Diet and Diabetes Risk: A Systematic Review and Meta-Analysis of Observational Studies. *Nutrients* **2017**, *9*, 603. [\[CrossRef\]](#)
12. Krela-Kaźmierczak, I.; Czarnywojtek, A.; Skoracka, K.; Rychter, A.M.; Ratajczak, A.E.; Szymczak-Tomczak, A.; Ruchała, M.; Dobrowolska, A. Is There an Ideal Diet to Protect against Iodine Deficiency? *Nutrients* **2021**, *13*, 513. [\[CrossRef\]](#)
13. Medawar, E.; Huhn, S.; Villringer, A.; Veronica Witte, A. The Effects of Plant-Based Diets on the Body and the Brain: A Systematic Review. *Transl. Psychiatry* **2019**, *9*, 226. [\[CrossRef\]](#)
14. Villette, C.; Vasseur, P.; Lapidus, N.; Debin, M.; Hanslik, T.; Blanchon, T.; Steichen, O.; Rossignol, L. Vegetarian and Vegan Diets: Beliefs and Attitudes of General Practitioners and Pediatricians in France. *Nutrients* **2022**, *14*, 3101. [\[CrossRef\]](#)
15. Ahad, F.; Ganie, S.A. Iodine, Iodine Metabolism and Iodine Deficiency Disorders Revisited. *Indian J. Endocrinol. Metab.* **2010**, *14*, 13–17.
16. Zimmermann, M.B. The Role of Iodine in Human Growth and Development. *Semin. Cell Dev. Biol.* **2011**, *22*, 645–652. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
17. Kowalska, K.; Brodowski, J.; Pokorska-Niewiada, K.; Szczuko, M. The Change in the Content of Nutrients in Diets Eliminating Products of Animal Origin in Comparison to a Regular Diet from the Area of Middle-Eastern Europe. *Nutrients* **2020**, *12*, 2986. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
18. Winder, M.; Koszyła, Z.; Boral, A.; Kocelak, P.; Chudek, J. The Impact of Iodine Concentration Disorders on Health and Cancer. *Nutrients* **2022**, *14*, 2209. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
19. WHO Radiation Emergency: Iodine Thyroid Blocking. Available online: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/radiation/1_ki_final.pdf?sfvrsn=d7d94d88_3 (accessed on 20 December 2022).
20. WHO. *Assessment of Iodine Deficiency Disorders and Monitoring Their Elimination: A Guide for Programme Managers*; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2007; ISBN 978924 1595827.
21. Zava, T.T.; Zava, D.T. Assessment of Japanese Iodine Intake Based on Seaweed Consumption in Japan: A Literature-Based Analysis. *Thyroid Res.* **2011**, *4*, 14. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
22. Nishiyama, S.; Mikeda, T.; Okada, T.; Nakamura, K.; Kotani, T.; Hishinuma, A. Transient Hypothyroidism or Persistent Hyperthyrotropinemia in Neonates Born to Mothers with Excessive Iodine Intake. *Thyroid* **2004**, *14*, 1077–1083. [\[CrossRef\]](#)
23. Arasaki, S.; Arasaki, T. *Vegetables from the Sea*; Japan Publications Inc.: Tokyo, Japan, 1983.
24. Andersson, M.; Takkouche, B.; Egli, I.; Allen, H.E.; De Benoist, B. Current Global Iodine Status and Progress over the Last Decade towards the Elimination of Iodine Deficiency. *Bull. World Health Organ.* **2005**, *83*, 518–525. [\[PubMed\]](#)
25. Hatch-McChesney, A.; Lieberman, H.R. Iodine and Iodine Deficiency: A Comprehensive Review of a Re-Emerging Issue. *Nutrients* **2022**, *14*, 3474. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
26. Szymandera-Buszka, K.; Waszkowiak, K.; Woźniak, P. The Estimation of Consumption of Food Products Being Iodine Sources among Women of the Wielkopolska Region. *Probl. Hig. Epidemiol.* **2011**, *92*, 73–76.
27. Yeliosof, O.; Silverman, L.A. Veganism as a Cause of Iodine Deficient Hypothyroidism. *J. Pediatr. Endocrinol. Metab.* **2018**, *31*, 91–94. [\[CrossRef\]](#)
28. Blikra, M.J.; Henjum, S.; Aakre, I. Iodine from Brown Algae in Human Nutrition, with an Emphasis on Bioaccessibility, Bioavailability, Chemistry, and Effects of Processing: A Systematic Review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **2022**, *21*, 1517–1536. [\[CrossRef\]](#)
29. Lähteenmäki-Uutela, A.; Rahikainen, M.; Lonkila, A.; Yang, B. Alternative proteins and EU food law. *Food Control* **2021**, *130*, 108336. [\[CrossRef\]](#)
30. Szybiński, Z. Iodine prophylaxis in Poland in the lights of the WHO recommendation on reduction of the daily salt intake. *Pediatr. Endocrinol. Diabetol. Metab.* **2009**, *15*, 103–107.
31. WHO. *Universal Salt Iodization and Sodium Intake Reduction Compatible, Cost-Effective Strategies of Great Public Health Benefit*; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2022. Available online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240053717> (accessed on 22 August 2022).

32. Jezewska-Zychowicz, M.; Gawęcki, J.; Wadolowska, L.; Czarnocinska, J.; Galinski, G.; Kollajtis-Dolowy, A.; Roszkowski, W.; Wawrzyniak, A.; Przybyłowicz, K.; Krusinska, B.; et al. Dietary Habits and Nutrition Beliefs Questionnaire and the Manual for Developing of Nutritional Data; The Committee of Human Nutrition, Polish Academy of Sciences. 2017. Available online: http://www.knozc.pan.pl/images/stories/MLonnie/EN_Kwestionariusz_KomPAN_i_PROCEDURA_versja_2_znak_tow_2019_2.pdf (accessed on 10 June 2019).
33. Kurosad, A.; Nicpoń, J.; Kubiak, K.; Jankowski, M.; Kungl, K. Iodine Occurrence, Circulation, Deficiency Region and the Main Iodine Sources in Human and Animal Nutrition. *Adv. Clin. Exp. Med.* **2005**, *14*, 1019–1025.
34. Kunachowicz, H.; Przygoda, B.; Nadolna, I.; Iwanow, K. *Tables of Food Composition and Nutritional Value*; PZWL: Warszawa, Poland, 2020.
35. Smyth, P.P.A. Iodine, Seaweed, and the Thyroid. *Eur. Thyroid J.* **2021**, *10*, 101–108. [\[CrossRef\]](#)
36. Truong, T.; Baron-Dubourdieu, D.; Rougier, Y.; Guénel, P. Role of dietary iodine and cruciferous vegetables in thyroid cancer: A countrywide case-control study in New Caledonia. *Cancer Causes Control* **2010**, *21*, 1183–1192. [\[CrossRef\]](#)
37. Szymandera-Buszk, K.; Waszkowiak, K.; Kaczmarek, A.; Zaremba, A. Wheat Dietary Fibre and Soy Protein as New Carriers of Iodine Compounds for Food Fortification—The Effect of Storage Conditions on the Stability of Potassium Iodide and Potassium Iodate. *LWT—Food Sci. Technol.* **2021**, *137*, 110424. [\[CrossRef\]](#)
38. Li, M.; Eastman, C.J. The Changing Epidemiology of Iodine Deficiency. *Nat. Rev. Endocrinol.* **2012**, *8*, 434–440. [\[CrossRef\]](#)
39. Szymandera-Buszk, K.; Waszkowiak, K. Iodine Retention in Ground Pork Burgers Fried in Fat Free Conditions. *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.* **2004**, *3*, 157–162.
40. Waszkowiak, K.; Szymandera-Buszk, K. Effect of Collagen Preparations Used as Carriers of Potassium Iodide on Retention of Iodine and Thiamine during Cooking and Storage of Pork Meatballs. *J. Sci. Food Agric.* **2007**, *87*, 1473–1479. [\[CrossRef\]](#)
41. Waszkowiak, K.; Szymandera-Buszk, K. Effect of Storage Conditions on Potassium Iodide Stability in Iodised Table Salt and Collagen Preparations. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2008**, *43*, 895–899. [\[CrossRef\]](#)
42. Rana, R.; Raghuvanshi, R.S. Effect of Different Cooking Methods on Iodine Losses. *J. Food Sci. Technol.* **2013**, *50*, 1212–1216. [\[CrossRef\]](#)
43. Eveleigh, E.; Coneyworth, L.; Zhou, M.; Burdett, H.; Malla, J.; Nguyen, V.H.; Welham, S. Vegans and Vegetarians Living in Nottingham (UK) Continue to Be at Risk of Iodine Deficiency. *Br. J. Nutr.* **2022**, 1–46. [\[CrossRef\]](#)
44. Nyström, H.F.; Brantsæter, A.L.; Erlund, I.; Gunnarsdóttir, I.; Hulthén, L.; Laurberg, P.; Mattisson, I.; Rasmussen, L.B.; Virtanen, S.; Meltzer, H.M. Iodine Status in the Nordic Countries Past and Present. *Food Nutr. Res.* **2016**, *60*, 31969. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
45. Granfors, M.; Andersson, M.; Stinca, S.; Åkerud, H.; Skalkidou, A.; Sundström Poromaa, I.; Wikström, A.K.; Filipsson Nyström, H. Iodine Deficiency in a Study Population of Pregnant Women in Sweden. *Acta Obstet. Gynecol. Scand.* **2015**, *94*, 1168–1174. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
46. Lindorfer, H.; Krebs, M.; Kautzky-Willer, A.; Bancher-Todesca, D.; Sager, M.; Gessl, A. Iodine Deficiency in Pregnant Women in Austria. *Eur. J. Clin. Nutr.* **2015**, *69*, 349–354. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
47. Ovadia, Y.S.; Arbelle, J.E.; Gefel, D.; Brik, H.; Wolf, T.; Nadler, V.; Hunziker, S.; Zimmermann, M.B.; Troen, A.M. First Israeli National Iodine Survey Demonstrates Iodine Deficiency among School-Aged Children and Pregnant Women. *Thyroid* **2017**, *27*, 1083–1091. [\[CrossRef\]](#)
48. Groufh-Jacobsen, S.; Hess, S.Y.; Aakre, I.; Gjengedal, E.L.F.; Pettersen, K.B.; Henjum, S. Vegans, Vegetarians and Pescatarians Are at Risk of Iodine Deficiency in Norway. *Nutrients* **2020**, *12*, 3555. [\[CrossRef\]](#)
49. Krajčovicová-Kudláčková, M.; Bucková, K.; Klimes, I.; Sebková, E. Iodine Deficiency in Vegetarians and Vegans. *Ann. Nutr. Metab.* **2003**, *47*, 183–185. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
50. Dahl, L.; Johansson, L.; Julshamn, K.; Meltzer, H.M. The Iodine Content of Norwegian Foods and Diets. *Public Health Nutr.* **2004**, *7*, 569–576. [\[CrossRef\]](#)
51. Brantsæter, A.L.; Abel, M.H.; Haugen, M.; Meltzer, H.M. Risk of Suboptimal Iodine Intake in Pregnant Norwegian Women. *Nutrients* **2013**, *5*, 424–440. [\[CrossRef\]](#)
52. Brantsæter, A.L.; Knutsen, H.K.; Johansen, N.C.; Nyheim, K.A.; Erlund, I.; Meltzer, H.M.; Henjum, S. Inadequate Iodine Intake in Population Groups Defined by Age, Life Stage and Vegetarian Dietary Practice in a Norwegian Convenience Sample. *Nutrients* **2018**, *10*, 230. [\[CrossRef\]](#)
53. Henjum, S.; Aakre, I.; Lilleengen, A.M.; Garnweidner-holme, L.; Borthne, S.; Id, Z.P.; Blix, E.; Lovise, E.; Gjengedal, F.; Lise, A.; et al. Suboptimal Iodine Status among Pregnant Women in the Oslo Area, Norway. *Nutrients* **2018**, *10*, 280. [\[CrossRef\]](#)
54. Manousou, S.; Dahl, L.; Heinsbaek Thuesen, B.; Hulthén, L.; Nyström Filipsson, H. Iodine Deficiency and Nutrition in Scandinavia. *Minerva Med.* **2017**, *108*, 147–158. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
55. Henjum, S.; Lilleengen, A.M.; Aakre, I.; Dudareva, A.; Gjengedal, E.L.F.; Meltzer, H.M.; Brantsæter, A.L. Suboptimal Iodine Concentration in Breastmilk and Inadequate Iodine Intake among Lactating Women in Norway. *Nutrients* **2017**, *9*, 643. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
56. Carlsen, M.H.; Andersen, L.F.; Dahl, L.; Norberg, N.; Hjartåker, A. New Iodine Food Composition Database and Updated Calculations of Iodine Intake among Norwegians. *Nutrients* **2018**, *10*, 930. [\[CrossRef\]](#)
57. Witard, O.C.; Bath, S.C.; Dineva, M.; Sellem, L.; Mulet-Cabero, A.I.; van Dongen, L.H.; Zheng, J.S.; Valenzuela, C.; Smeuninx, B. Dairy as a Source of Iodine and Protein in the UK: Implications for Human Health Across the Life Course, and Future Policy and Research. *Front Nutr.* **2022**, *9*, 64. [\[CrossRef\]](#)

58. WHO. *Scientific Update on the Iodine Content of Portuguese Foods*; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2018. Available online: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/392877/iodine-portugal.pdf (accessed on 4 April 2022).
59. Sakai, N.; Esho, O.; Mukai, M. Iodine Concentrations in Conventional and Organic Milk in the Northeastern US. *Dairy* **2022**, *3*, 211–219. [CrossRef]
60. Brzóska, F.; Szybiński, Z.; Świński, B. Iodine in consumer milk in Poland and its role in disease prevention in humans. *Wiadomości Zootech.* **2015**, *53*, 41–49.
61. Mikláš, Š.; Tancin, V.; Toman, R.; Trávníček, J. Iodine Concentration in Milk and Human Nutrition: A Review. *Czech J. Anim. Sci.* **2021**, *66*, 189–199. [CrossRef]
62. van der Reijden, O.L.; Zimmermann, M.B.; Galetti, V. Iodine in Dairy Milk: Sources, Concentrations and Importance to Human Health. *Best Pract. Res. Clin. Endocrinol. Metab.* **2017**, *31*, 385–395. [CrossRef] [PubMed]
63. Ovadia, Y.S.; Gefel, D.; Weizmann, N.; Raizman, M.; Goldsmith, R.; Mabjeesh, S.J.; Dahl, L.; Troen, A.M. Low Iodine Intake from Dairy Foods Despite High Milk Iodine Content in Israel. *Thyroid* **2018**, *28*, 1042–1051. [CrossRef] [PubMed]
64. Kardas, M.; Grochowska-Niedworok, E.; Calyniuk, B.; Kolasa, I.; Grajek, M.; Bielaszka, A.; Kiciak, A.; Muc-Wierzoń, M. Consumption of Milk and Milk Products in the Population of the Upper Silesian Agglomeration Inhabitants. *Food Nutr. Res.* **2016**, *60*, 28976. [CrossRef] [PubMed]
65. Totland, T.H.; Melnæs, B.K.; Lundberg-Hallen, N.; Helland-Kigen, M.K.; Lund-Blix, N.A.; Myhre, J.B.; Johansen, A.M.W.; Løken, E.B.; Andersen, L. Norkost 3. En Landsomfattende Kostholdsundersøkelse Blant Menn Og Kvinner i Norge i Alderen 18–70 År, 2010–2011. Available online: https://www.helsedirektoratet.no/rapporter/norkost-3-landsomfattende-kostholdsundersokelse-blant-menn-og-kvinner-i-norge-i-alderen-18-70-ar-2010-11/Norkost%203%20en%20landsomfattende%20kostholdsundersokelse%20blant%20menn%20og%20kvinner%20i%20Norge%20i%20alderen-18-70%20%C3%A5r%202010-11.pdf/_/attachment/inline/b7bafaab-6059-4450-8d76-c3ed9f3eaf3f:be251cd1153cf1ae8e4c46eedddc13b36da3d11d/Norkost%203%20en%20landsomfattende%20kostholdsundersokelse%20blant%20menn%20og%20kvinner%20i%20Norge%20i%20alderen-18-70%20%C3%A5r%202010-11.pdf; (accessed on 15 December 2022).
66. Ozdogan, Y.; Yardimci, H.; Ozcelik, A.O. Young Adults' Milk Consumption Habits and Knowledge about Milk. *Stud. Ethno-Med.* **2017**, *11*, 106–113. [CrossRef]
67. Sritharan, A. Do People in Europe Still Want Dairy? Available online: <https://www.newfoodmagazine.com/news/164605/do-people-in-europe-still-want-dairy/> (accessed on 5 May 2022).
68. Kuchler, F.; Stewart, H. Fluid Milk Consumption Continues Downward Trend, Proving Difficult to Reverse. Available online: <https://www.ers.usda.gov/amber-waves/2022/june/fluid-milk-consumption-continues-downward-trend-proving-difficult-to-reverse/> (accessed on 21 June 2022).
69. Dineva, M.; Rayman, M.P.; Bath, S.C. Iodine Status of Consumers of Milk-Alternative Drinks v. Cows' Milk: Data from the UK National Diet and Nutrition Survey. *Br. J. Nutr.* **2021**, *126*, 28–36. [CrossRef]
70. Bath, S.C.; Hill, S.; Infante, H.G.; Elghul, S.; Neziyanya, C.J.; Rayman, M.P. Iodine Concentration of Milk-Alternative Drinks Available in the UK in Comparison with Cows' Milk. *Br. J. Nutr.* **2017**, *118*, 525–532. [CrossRef] [PubMed]
71. Aydar, E.F.; Tutuncu, S.; Ozcelik, B. Plant-Based Milk Substitutes: Bioactive Compounds, Conventional and Novel Processes, Bioavailability Studies, and Health Effects. *J. Funct. Foods* **2020**, *70*, 103975. [CrossRef]
72. Nerhus, I.; Markhus, M.W.; Nilsen, B.M.; Øyen, J.; Maage, A.; Ødegård, E.R.; Midtbø, L.K.; Frantzen, S.; Kögel, T.; Graff, I.E.; et al. Iodine Content of Six Fish Species, Norwegian Dairy Products and Hen's Egg. *Food Nutr. Res.* **2018**, *62*, 1–13. [CrossRef]
73. Szymandera-Buszk, K.; Jedrusek-Golińska, A. Estimation of fish consumption as iodine source. *Bromatol. Chem. Toksykol.* **2008**, *41*, 319–322.
74. Sprague, M.; Chau, T.C.; Givens, D.I. Iodine Content of Wild and Farmed Seafood and Its Estimated Contribution to UK Dietary Iodine Intake. *Nutrients* **2021**, *14*, 195. [CrossRef]
75. Goldberg, G.R.; Black, A.E. Assessment of the Validity of Reported Energy Intakes—Review and Recent Developments. *Scand. J. Nutr.* **1998**, *42*, 6–9. [CrossRef]
76. Beverley, B.; David, C.; Kerry, S.J.; Polly, P.; Caireen, R.; Toni, S.; Gillian, S. National Diet and Nutrition Survey Rolling Programme Years 9 to 11 (2016/2017 to 2018/2019). 2020. Available online: <https://doi.org/10.17863/CAM.81787> (accessed on 15 December 2022). [CrossRef]
77. Allès, B.; Baudry, J.; Méjean, C.; Touvier, M.; Péneau, S.; Hercberg, S.; Kesse-Guyot, E. Comparison of Sociodemographic and Nutritional Characteristics between Self-Reported Vegetarians, Vegans, and Meat-Eaters from the Nutrinet-Santé Study. *Nutrients* **2017**, *9*, 1023. [CrossRef] [PubMed]
78. Bakaloudi, D.R.; Halloran, A.; Rippin, H.L.; Oikonomidou, A.C.; Dardavesis, T.I.; Williams, J.; Wickramasinghe, K.; Breda, J.; Chourdakis, M. Intake and Adequacy of the Vegan Diet. A Systematic Review of the Evidence. *Clin. Nutr.* **2021**, *40*, 3503–3521. [CrossRef] [PubMed]
79. Rizzo, G.; Baroni, L. Soy, Soy Foods and Their Role in Vegetarian Diets. *Nutrients* **2018**, *10*, 43. [CrossRef] [PubMed]
80. Remer, T.; Neubert, A.; Manz, F. Increased Risk of Iodine Deficiency with Vegetarian Nutrition. *Br. J. Nutr.* **1999**, *81*, 45–49. [CrossRef] [PubMed]
81. Fields, C.; Borak, J. Iodine Deficiency in Vegetarian and Vegan Diets: Evidence-Based Review of the World's Literature on Iodine Content in Vegetarian Diets. In *Comprehensive Handbook of Iodine. Nutritional, Biochemical, Pathological and Therapeutic Aspects*; Preedy, V.R., Burrow, G.N., Watson, R., Eds.; Academic Press Inc.: Cambridge, MA, USA, 2009; pp. 521–531.

82. Zimmermann, M.B. Iodine Deficiency. *Endocr. Rev.* **2009**, *30*, 376–408. [[CrossRef](#)]
83. Iodine, D.J. *Modern Nutrition in Health and Disease*; Lippincott Williams & Wilkins: New York, NY, USA, 2006.
84. Mente, A.; Dagenais, G.; Wielgosz, A.; Lear, S.A.; McQueen, M.J.; Zeidler, J.; Fu, L.; DeJesus, J.; Rangarajan, S.; Bourlaud, A.-S.; et al. Assessment of Dietary Sodium and Potassium in Canadians Using 24-Hour Urinary Collection. *Can. J. Cardiol.* **2016**, *32*, 319–326. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
85. He, F.J.; Brown, M.; Tan, M.; MacGregor, G.A. Reducing population salt intake—An update on latest evidence and global action. *J. Clin. Hypertens.* **2019**, *21*, 1596–1601. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
86. Leung, A.M.; LaMar, A.; He, X.; Braverman, L.E.; Pearce, E.N. Iodine Status and Thyroid Function of Boston-Area Vegetarians and Vegans. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* **2011**, *96*, 1303–1307. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
87. Fallon, N.; Dillon, S.A. Low Intakes of Iodine and Selenium Amongst Vegan and Vegetarian Women Highlight a Potential Nutritional Vulnerability. *Front. Nutr.* **2020**, *7*, 72. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
88. Sharma, A.; Minh Duc, N.T.; Luu Lam Thang, T.; Nam, N.H.; Ng, S.J.; Abbas, K.S.; Huy, N.T.; Marušić, A.; Paul, C.L.; Kwok, J.; et al. A Consensus-Based Checklist for Reporting of Survey Studies (CROSS). *J. Gen. Intern. Med.* **2021**, *36*, 3179–3187. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

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.

Article

The Selection of the Optimal Impregnation Conditions of Vegetable Matrices with Iodine

Agata Zaremba ¹, Katarzyna Waszkowiak ¹, Dominik Kmiecik ², Anna Jędrusek-Golińska ¹, Maciej Jarzębski ³ and Krystyna Szymandera-Buszkwa ^{1,*}

- ¹ Department of Gastronomy Science and Functional Foods, Faculty of Food Science and Nutrition, Poznań University of Life Sciences, Wojska Polskiego 31, 61-624 Poznań, Poland; agata.zaremba@up.poznan.pl (A.Z.); katarzyna.waszkowiak@up.poznan.pl (K.W.); anna.jedrusek-golinska@up.poznan.pl (A.J.-G.)
- ² Department of Food Technology of Plant Origin, Faculty of Food Science and Nutrition, Poznań University of Life Sciences, Wojska Polskiego 31, 61-624 Poznań, Poland; dominik.kmiecik@up.poznan.pl
- ³ Department of Physics and Biophysics, Faculty of Food Science and Nutrition, Poznań University of Life Sciences, Wojska Polskiego 38/42, 60-637 Poznań, Poland; maciej.jarzebski@up.poznan.pl
- * Correspondence: krystyna.szymandera_buszka@up.poznan.pl; Tel.: +48-061-848-7326 or +48-061-848-6093

Abstract: This study aimed to determine the use of selected vegetables (pumpkin, cauliflower, broccoli, carrot) as carriers of potassium iodide (KI) and potassium iodate (KIO₃) by determining changes in iodine content under various conditions of impregnation as the degree of hydration, impregnated sample temperature, and impregnation time. The influence of these conditions on iodine contents in vegetables after their fortification and storage (21 °C/230 days) was analyzed. The results showed that all selected vegetables could be efficient iodine carriers. However, the conditions of the impregnation process are crucial for fortification efficiency, particularly the degree of hydration and the temperature of the impregnated samples before drying. The results showed that the lowest iodine content was in samples fortified at 4 °C and 1:4 hydration. On the other hand, the highest reproducibility of iodine was for the following fortification conditions: temperature of −76 °C and hydration of 1:1. The studies confirmed the higher stability of iodine in KIO₃ form compared to KI. To increase recovery of the introduced iodine in the product after drying, using the conditioning step at 4 °C is not recommended. We recommend freezing vegetables immediately after the impregnation process

Keywords: iodine; iodine carriers; fortification; minerals; vegetables

Citation: Zaremba, A.; Waszkowiak, K.; Kmiecik, D.; Jędrusek-Golińska, A.; Jarzębski, M.; Szymandera-Buszkwa, K. The Selection of the Optimal Impregnation Conditions of Vegetable Matrices with Iodine. *Molecules* **2022**, *27*, 3351. <https://doi.org/10.3390/molecules27103351>

Academic Editors: Laura Sabatino, Lorena Tedeschi and Davide Bertelli

Received: 2 April 2022

Accepted: 19 May 2022

Published: 23 May 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

Nutrient deficiencies are common in developing countries, but they are also found in developed ones [1,2]. Iodine deficiency is one of the most common nutrient deficiencies [3,4]. The crucial cause of iodine deficiency is low levels of iodine in foods [5]. The daily requirement for iodine is 150 mcg/day. Food enrichment offers significant benefits, from reducing the prevalence of nutritional deficiencies to providing benefits for societies and economies [6–11].

The possible forms of food enrichment include agricultural strategies of biofortification of plants with nutrients, such as iron, iodine, zinc, or folic acid [12]. These methods aim to enrich consumers' diets with nutrients, including iodine, by increasing the concentration of a particular element in the edible part of the plant before harvesting [12–14]. Pilot studies confirm that it is possible to use iodine for the biofortification of vegetables [4,15]. The undoubted advantage of agronomic biofortification is the possibility of increasing the content of this element in plants during their natural growth [7,16]. However, biofortification with iodine can also affect the content of other minerals. These changes can

be negative, as they can reduce the plant's nutrition with other important micro- and macro-nutrients, thereby reducing the nutrient content of plant food products. Biofortification of plants with iodine is a relatively time-consuming method, requiring yield quality control at many stages of plant growth, thus generating additional costs [17].

Another method of enrichment is to introduce nutrients during the production process after harvesting the plant. This method is considered to be the most effective and cost-efficient way to prevent mineral and vitamin deficiencies, even safer than supplementation [4,18,19].

Enriching foods with iodine may be another way to eliminate iodine deficiency, usually by table salt iodization [20–24]. Potassium iodide and potassium iodate are sources of iodine in table salt. Table salt iodization is used as an intervention fortification in many countries, including Poland [3,23]. However, in 2006 the World Health Organisation introduced a recommendation to limit salt intake to 5 g/d as it is a risk factor for atherosclerosis and hypertension. It is, therefore, necessary to find new carriers for iodine salts [25–27].

Previous studies have confirmed the feasibility of applying iodine salts (KI and KIO₃) to protein preparations such as collagen, soy preparations, and fiber preparations. Methods for the enrichment of protein preparations have already been developed [28–31]. Nevertheless, high protein intake is not advisable in some diets [32]. Consumers may also show little confidence in high-protein preparations, associating them with the diets of physically active people rather than as a standard part of everyday diet [33–35]. The application of protein preparations, especially soy, may be limited for allergy sufferers [36].

The fortification of vegetables may constitute an attractive alternative source of iodine for all groups of consumers, especially vegetarians and vegans [37–40]. The selection of plant-based products also allows for an increase in the dietary intake of fiber, for which dietitians recommend increasing daily amounts in an adult's diet to 25–35 g [41,42].

Food fortification is a relatively simple and highly effective method of preventing and treating the most common nutrient deficiencies in the population, including iodine deficiency [6,18,43]. Economically and politically, it is quite profitable and is easily accepted by society [40,44]. It can be nationally standardized and controlled. However, it should be noted that the effectiveness of a food fortification program is measured based on the improvement of the nutritional and health status of the target population [6,45]. This result can be achieved, among other things, by identifying the critical points of the adopted fortification stages [46,47]. Therefore, when designing a food fortification program, it is necessary to identify the optimum impregnation conditions related to the choice of the nutrient form, matrix, variable conditions of fortification, water removal as well as storage to maximize the content of the nutrient in the final product [48,49]. This will make it possible to identify the maximum shelf life for the product under specified conditions and to indicate it correctly on the label.

The stability of nutrients is related to conditions of application of the nutrient to the matrix [20,30,50–52]. Iodate is a strong oxidizing agent, and iodide is a reducing agent, which can lead to the initiation of redox reactions in foods. These reactions may be, in turn, associated with changes in the stability and shelf life of food ingredients [30,53,54]. Iodine is also sensitive to light and temperature [55]. During the fortification process, it is crucial to determine the optimum time and hydration [56] of the matrix to achieve even distribution and, at the same time, stability of the introduced compound during processes related to the storage or production of new food products [30,48,55]. Therefore, this study aimed to investigate the use of selected vegetables (pumpkin, cauliflower, broccoli, carrot) as carriers of potassium iodide (KI) and potassium iodate (KIO₃) by determining changes in the iodine content under various conditions of impregnation with iodine compounds. It was also hypothesized that the fortification parameters affect the continued stability of the applied iodine during the storage of the enriched dried product. Our study assessed the impact of the treatment after the impregnation process. It was investigated whether a conditioning step of the fortified plant material at 4 °C was required before freeze-drying

or if it was better to freeze it immediately for the process. The influence of the freezing temperature on iodine retention ($-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-76\text{ }^{\circ}\text{C}$) was also investigated.

2. Results and Discussion

2.1. $L^*a^*b^*$ Color Properties

The tables containing all the color parameters data are included in Supplementary Materials Tables S1–S8. It was found that the application of iodine to the analyzed vegetables did not affect their color parameters ($L^*a^*b^*$). Additionally, the application of variable impregnation conditions did not alter these parameters (Tables S1–S8). It was confirmed that regardless of the variant of the fortification process used (hydration, temperature, and time) within the same vegetables, the differences were statistically insignificant.

2.2. Iodine Content after Fortification

Results of the study confirmed the effectiveness of the application of vegetables as a matrix for iodine application. This was true for all analyzed vegetables and the forms of iodine (KI, KIO_3). Figures 1–3 show the iodine content (%) of enriched vegetables (pumpkin, broccoli, cauliflower, and carrot) after the drying process of samples fortified with iodine KI and KIO_3 using variable parameters of fortification, i.e., temperature (4 , -21 , $-76\text{ }^{\circ}\text{C}$) and time (1 , 2 , 6 , 12 h) of conditioning, at three hydration conditions ($1:1$, $1:2$, and $1:4$, respectively).

An analysis of iodine content (Figures 1–3) showed a recovery of the introduced iodine in the product after drying to 98%. This level can be considered very high [30,57,58]. Previous data on the fortification of protein preparations confirm the maximum reproducibility of iodine in fortified matrices at a similar level. However, there was considerable variability in the results related to the variable parameters of iodine fortification.

The differences in iodine content in the range of 78–97% were confirmed, depending on the selected fortification method. The lowest iodine content (78%) was found in KI-enriched carrot samples fortified after $1:4$ hydration at $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 6 h . The highest reproducibility of iodine was found when the pumpkin matrix was fortified using KIO_3 at the temperature of $-76\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $1:1$ hydration conditions.



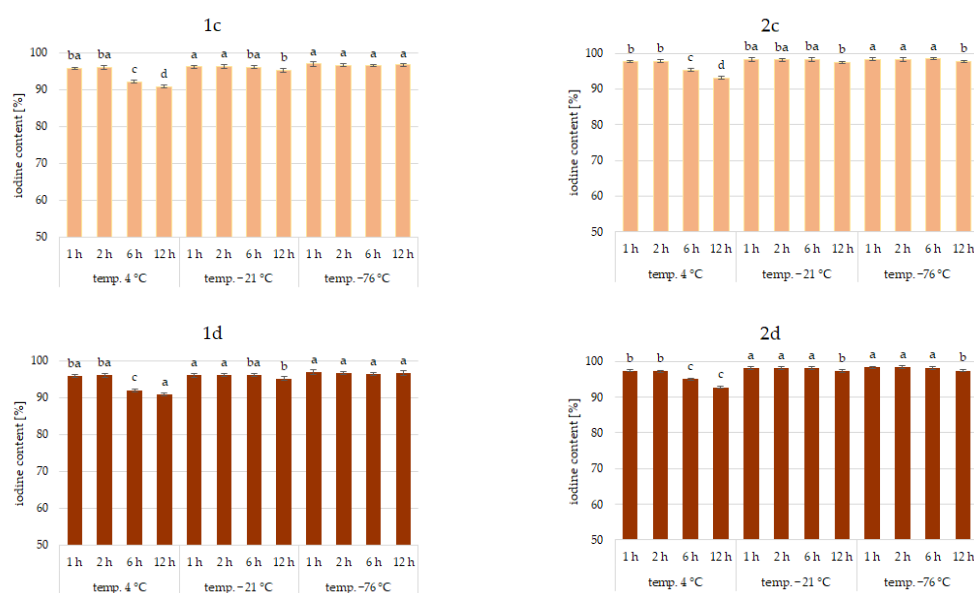


Figure 1. Iodine content (%) in pumpkin (1a,2a), broccoli (1b,2b), cauliflower (1c,2c), and carrot (1d,2d) fortified with KI and KIO₃, respectively, at hydration ratio 1:1 and different temperatures (4 °C, −21 °C, −76 °C) and times; different letters (a–e) denote a significant difference at $p < 0.05$ (one-way ANOVA, and post hoc Tukey test). Mean values ($n = 4$). Error bars are confidence intervals with a confidence coefficient of 0.95.



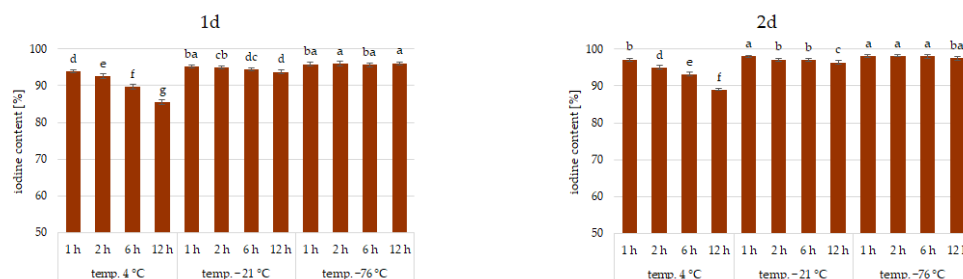


Figure 2. Iodine content (%) in pumpkin (**1a,2a**), broccoli (**1b,2b**), cauliflower (**1c,2c**), and carrot (**1d,2d**) fortified with KI and KIO₃, respectively, at hydration ratio 1:2 and different temperatures (4 °C, -21 °C, -76 °C) and times; different letters (a–g) denote a significant difference at $p < 0.05$ (one-way ANOVA, and post hoc Tukey test). Mean values ($n = 4$). Error bars are confidence intervals with a confidence coefficient of 0.95.

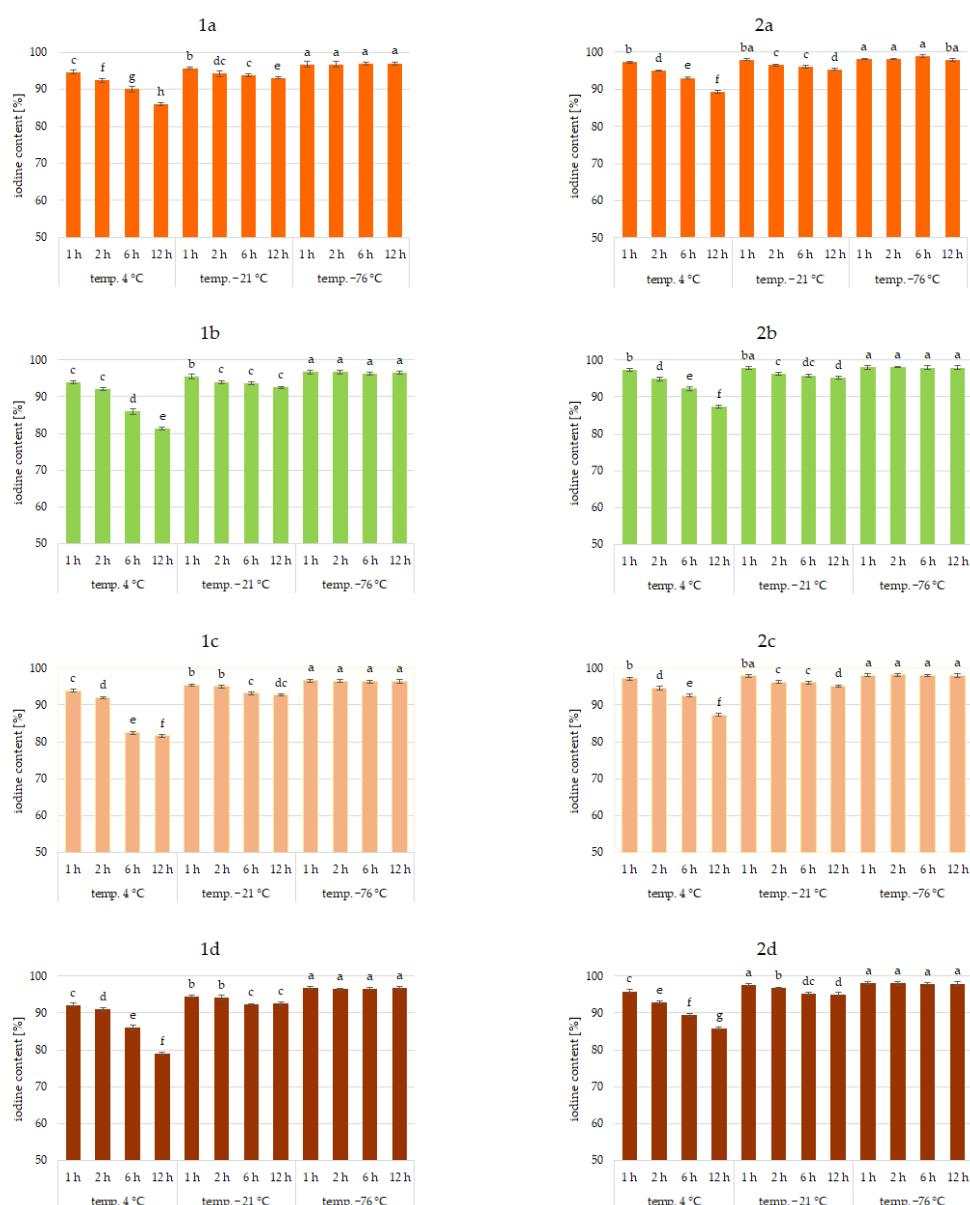


Figure 3. Iodine content (%) in pumpkin (**1a,2a**), broccoli (**1b,2b**), cauliflower (**1c,2c**), and carrot (**1d,2d**) fortified with KI and KIO₃, respectively, at hydration ratio 1:4 and different temperatures (4 °C, -21 °C, -76 °C) and times; different letters (a–h) denote a significant difference at $p < 0.05$ (one-way ANOVA, and post hoc Tukey test). Mean values ($n = 4$). Error bars are confidence intervals with a confidence coefficient of 0.95.

The analysis of covariance showed (Table 1) a statistically significant effect ($p < 0.05$) of the type of iodine compound used for fortification (KI, KIO₃). However, taking all predictive factors into account (Table 1), the impregnation temperature, followed by the degree of hydration associated with iodine application, was confirmed to have a stronger effect on the final iodine content than the form of iodine.

Table 1. Statistical significance of predictors of covariance models for changes in iodine content in selected iodine carriers during impregnation.

Predictors	SS	df	SEM	F-Value	p-Value	Post hoc Power $\alpha = 0.05$
Temperature	0.676	2	0.338	80.00	0.000	1.00
Hydration	0.125	2	0.063	10.20	0.000	0.98
Time	0.269	3	0.090	15.80	0.000	0.99
Form iodine	0.253	1	0.253	44.60	0.000	0.99
Vegetable	0.017	3	0.006	0.80	0.473	0.23

SS—Statistical Significance; df—degrees of freedom SEM—the Standard Error of the Mean.

It was found that the total iodine content after drying the samples was most strongly correlated with the degree of hydration ($r = 0.903$) and the temperature of the impregnated samples ($r = 0.99$). This is also confirmed by previous studies [30,56,59,60]. The lowest stability of iodine was shown for samples impregnated at 4 °C. This phenomenon can be explained by the fact that the higher the temperature, the higher the rate of conversion of iodine compounds, especially potassium iodide. A higher rate of conversion of iodine compounds to free iodine is related to the lower activation energy required for this process [61]. All unfrozen water is maintained under these conditions, resulting in increased activity of the iodine compounds dissolved in a solution. In addition, in a non-frozen structure, the passage of iodine to the atmosphere through diffusion is much more efficient [62]. The lower the temperature of the samples, the lower the activity of this process [54,59,63].

The lowest iodine content (79%) was in samples impregnated with 1:4 hydration. Regardless of the impregnation temperature, the iodine content of the sample was lower by 11% compared to samples impregnated at 1:1 hydration. This fact could be attributed to the accelerating chemical reactions of KI and KIO₃ with increasing water content in the system and decreasing activation energy for the conversion of iodine compounds and evaporation [59,62,64]. The highest differences (11%) were observed for samples impregnated at an impregnation temperature of 4 °C. Using an impregnation temperature of −76 °C, iodine losses at 1:2 hydration were only 4% higher on average, and at 1:1 were statistically insignificant. This fact is confirmed by the increase in activity at 4 °C.

Impregnation time was also a factor affecting iodine content ($r = 0.765$). However, the significance of this factor depended on the degree of hydration and even more on the impregnation temperature [30,55,60,62,65]. The use of 1:4 hydration and impregnation temperature of 4 °C yielded total iodine ranging from 78 to 97%. The lowest iodine content (78%) was in samples fortified at 4 °C for 12 h.

For an incubation temperature of −21 °C and hydration of 1:4, the content of total iodine in samples fortified for 12 h was higher by 6–7% compared to 4 °C, and for the hydration of samples of 1:2, by 6–9%. The effect of incubation time for the impregnation temperature of −76 °C was statistically insignificant. These trends concerning the effect of impregnation time are confirmed by previous studies indicating that prolonged exposure of components to adverse factors increases iodine loss [59,61,64]. Increased time at conditions of the highest potassium iodide and potassium iodate activity promotes the transition to free iodine forms and facilitates volatilization [20,59,57].

When analyzing the form of iodine, KI showed higher sensitivities to impregnation conditions, which was especially true for 1:4 hydration and a fortification temperature of 4 °C. Differences varied up to 12%. Previous studies also confirmed the higher instability of iodine in the form of KI [30,53,54]. Iodine in this form is easily sublimed and then quickly lost to the atmosphere by diffusion. The lower activation energy of this process compared to iodate transformations can explain this. Potassium iodate can be reduced by agents present in the carrier, e.g., iron ions or environmental reaction, but the process is

longer. An increase in temperature and water content increased the rate of both reactions [61,64].

Significant differences in the iodine content of the samples depending on the type of vegetable were not found. The only exception was impregnation conditions of 1:4 hydration, fortification temperature of 4 °C, and an impregnation time of more than 6 h, where a significant effect of the type of enriched vegetable was found ($r > 0.985$). The highest losses were confirmed for samples of carrots and the lowest for pumpkin. The highest stability of iodine applied to pumpkins may be related to the higher protein content and lower pH of the product compared to carrots [66,67]. This is confirmed by previous data on the impregnation of vegetables with thiamine [42].

Principal Component Analysis (PCA)

Principal component analysis (PCA) was applied to observe possible clusters in fortified pumpkin, broccoli, cauliflower, and carrot prepared at different times, hydration degrees, and temperatures. The result of the distribution of the samples depending on the differentiating factor (time, hydration degree, and temperature) is shown in Figure 4.

Four clusters were found (Figure 4A) when time effect was analyzed. Samples fortified 1 and 2 h are located close to the plot center, not far from each other. The exception to this is a cauliflower sample fortified for 2 h at 4 °C and 1:4 hydration (134). This sample had the lowest content of KIO_3 and KI among the samples fortified for 2 h.

In the two remaining groups, a much greater dispersion of the samples was observed. When the fortification time was 6 h, most of the samples were on the left side of the y-axis. Two outliers were also observed in this group: broccoli (63) and cauliflower (99) samples, which were fortified at 4 °C and 1:4 hydrations. Both samples were below the x-axis. The samples fortified for 12 h showed the highest dispersion. All samples in this group were distributed along the y-axis.

When analyzing hydration degree, a much larger dispersion of the samples was observed (Figure 4B) compared to the plot when the differentiating factor was time. In the first two groups (hydration 1:1 and 1:2), the dispersion scale of the samples was similar. When the hydration was 1:4, many outliers outside the group of samples located near the center of the plot could be observed. The outliers, apart from the highest hydration, were also characterized by the longest fortification time (12 h) carried out at the highest temperature (4 °C).

When the process was carried out at −76 °C, the content of KIO_3 and KI was the highest, and the samples were the least diverse. This group of samples is located to the right of the y axis and at a small distance from each other. The KIO_3 and KI content ranged from 2.4847 to 2.5246 (mg DM I kg^{−1}) and from 2.4449 to 2.4786 (mg DM I kg^{−1}), respectively. When the temperature was higher (−21 °C), the samples were still well grouped, but their dispersion was bigger. The samples were shifted to the left towards the center of the graph. In samples prepared at −21 °C, the content of KIO_3 and KI was lower and ranged from 2.4280 to 2.5093 (mg DM I kg^{−1}) and from 2.3585 to 2.4600 (mg DM I kg^{−1}), respectively. The highest dispersion of the results was characteristic of the process carried out at the temperature of 4 °C. In this cluster, there were samples with both the highest and the lowest content of KIO_3 and KI.

The factor that most influenced the diversity of the groups was the temperature of the fortification process (Figure 4C). There are three clusters in the score plot.

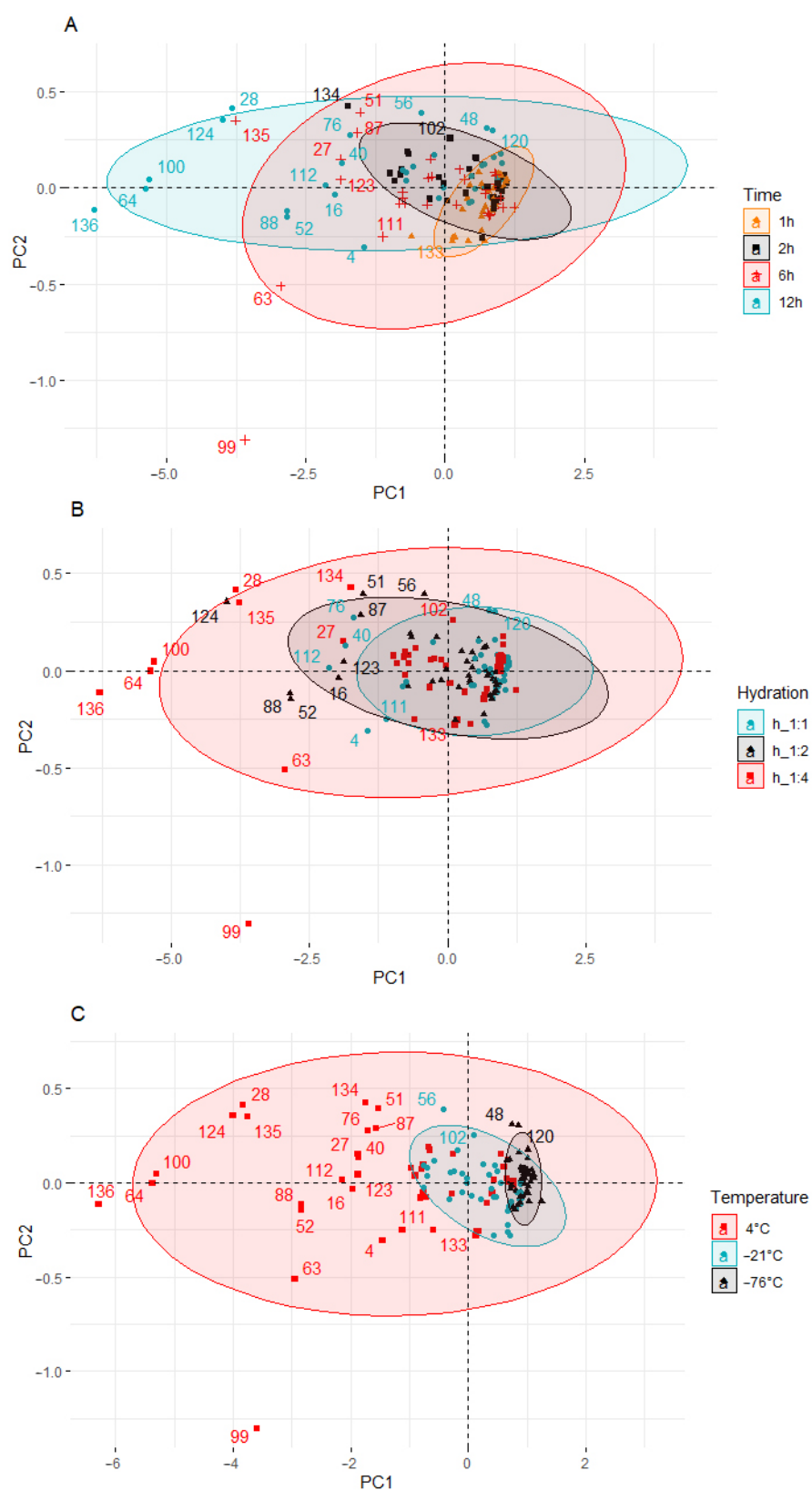


Figure 4. Principal component analysis (PCA) of the score plot of data from KIO_3 and KI content in pumpkin, broccoli, cauliflower, and carrot fortified at different times (A), hydration ratios (B), and temperatures (C).

The PCA results showed differences between the individual vegetable samples fortified under different conditions of time, temperature, and hydration. The samples prepared under the conditions of 1 h, 1:1 hydration ratio, and temperature of -76°C were characterized by the lowest variability and the highest KIO_3 and KI content. The extension of the processing time, the increase in the degree of hydration, and the temperature were related to the decrease in the content of iodine compounds in the analyzed samples. The differentiation of the samples resulted to a greater extent from the process conditions than from the type of vegetable used.

2.3. Storage of Iodine Sources

This study showed the significant effect of the impregnation conditions on the stability of iodine during storage. The tables containing all the iodine concentration data are included in the Supplementary Materials Tables S9–S16. The experiment assumed storage at 21°C . Analysis of the dynamics of changes in iodine content (half-life $T_{(1/2)}$) based on the adopted model (Table 2) [30] showed that all variable impregnation conditions, i.e., temperature, degree of hydration, and time, significantly affected the stability of iodine in vegetable matrices. Iodine content (% relative to the amount after drying) of fortified vegetables after 230 days of storage differed, ranging from 83 to 67% (Tables S9–S16). The stability of iodine in the vegetable carriers during storage was at least as high as in protein and fiber carriers and higher than in table salt shown in previous studies [30,54,65,68].

It was confirmed that the most unfavorable iodine impregnation conditions decreased iodine stability the most during sample storage (Table 2).

This was especially true for KI, for which the rate of iodine loss was faster, up to 11%, compared to KIO_3 . This observation is explained by the lower stability of KI and a higher rate of iodine transformation transition to free iodine during impregnation [56].

It was found that the total iodine content after the storage (230 days) of dried fortified samples was correlated most strongly with the degree of hydration ($r = -0.801$), especially for impregnation at 4°C ($r = -0.972$). Iodine losses were the lowest for samples impregnated at -76°C (22–24%) and highest for those impregnated at 4°C (27–32%). The half-life values (Table 2) suggest that the lower the impregnation temperature and the degree of hydration of the vegetables, the lower the dynamics of iodine loss during dried storage. For samples fortified at -21°C , the iodine losses were higher compared to -76°C (by an average of 10%) and lower than at 4°C (by about 7%).

The rate of iodine transformation during storage was the highest for samples impregnated at 1:4 hydration and 4°C , irrespective of the form of iodine applied or matrix. For samples impregnated at the hydration degree of 1:4 and the temperature of 4°C , the incubation time was also a relevant factor affecting losses during sample storage. Increasing the incubation time to 12 h resulted in a reduction in $T_{(1/2)}$ of iodine up to 20% (1:4) and 9% (1:2) during storage. At lower temperatures (-76°C), the impregnation time did not affect its stability.

The least significant factor affecting the stability of applied iodine during storage was the type of vegetable. The vegetable matrix only influenced iodine stability in stored vegetable samples pre-impregnated at 1:4 hydration and 4°C . The half-lives of iodine $T_{(1/2)}$ for pumpkin impregnated in these parameters were longer, up to 20%, compared to the samples of carrot. The ranking of vegetables according to increasing sensitivity to changing conditions of pre-impregnation during storage was as follows: pumpkin > cauliflower = broccoli > carrot.

Further research on the correlation between the type of vegetable carriers (especially pumpkin and carrot) and the stability of iodine is necessary to clarify this point. The results may be interesting for nutritionists, as well as for food producers who offer food for consumers at risk of iodine deficiency, for example, vegans and vegetarians.

Table 2. Dynamic of changes in iodine content (mg kg^{−1}) during 230 days of storage of the dried iodine fortified vegetables under various conditions (temperature, hydration, and time).

Fortification Pa- rameters			Dynamic of Change in Iodine Content during 230 Days									
Hydratation	Temperature	Time [Hours]	T _{1/2} (Days)	R ²	RMSE	k	A ₀	T _{1/2} (Days)	R ²	RMSE	k *	A ₀ *
KIO3						KI						
PUMPKIN												
1:1	4 °C	1	344	0.988	0.016	−0.00202	12.30	291	0.988	0.019	−0.00239	11.57
		2	341	0.983	0.019	−0.00203	12.21	292	0.990	0.017	−0.00238	11.54
		6	349	0.991	0.014	−0.00199	11.54	289	0.982	0.023	−0.00240	10.95
		12	349	0.988	0.016	−0.00199	11.09	301	0.987	0.019	−0.00230	9.75
	−21 °C	1	358	0.976	0.112	−0.00194	12.32	294	0.993	0.359	−0.00236	11.58
		2	360	0.977	0.021	−0.00193	12.37	292	0.989	0.018	−0.00237	11.64
		6	355	0.971	0.025	−0.00195	12.42	294	0.992	0.016	−0.00235	11.62
		12	372	0.982	0.030	−0.00187	12.13	297	0.992	0.304	−0.00234	11.44
	−76 °C	1	327	0.982	0.021	−0.00212	12.62	291	0.993	0.031	−0.00238	11.81
		2	328	0.982	0.021	−0.00211	12.60	297	0.992	0.015	−0.00233	11.79
		6	328	0.985	0.021	−0.00211	12.49	293	0.992	0.016	−0.00237	11.75
		12	325	0.983	0.021	−0.00213	12.56	296	0.994	0.016	−0.00234	11.73
1:4	4 °C	1	275	0.977	0.028	−0.00252	12.33	275	0.991	0.010	−0.00273	11.18
		2	271	0.966	0.035	−0.00256	11.72	251	0.984	0.010	−0.00276	10.63
		6	288	0.979	0.026	−0.00241	10.80	267	0.981	0.015	−0.00260	9.72
		12	278	0.969	0.032	−0.00249	9.81	261	0.985	0.017	−0.00265	8.79
	−21 °C	1	281	0.964	0.376	−0.00247	12.76	262	0.984	0.254	−0.00264	11.65
		2	294	0.966	0.032	−0.00236	12.17	276	0.975	0.005	−0.00251	11.13
		6	302	0.964	0.032	−0.00230	11.75	278	0.969	0.011	−0.00250	10.75
		12	306	0.975	0.026	−0.00227	11.41	279	0.974	0.013	−0.00248	10.45
	−76 °C	1	328	0.983	0.115	−0.00211	12.55	293	0.994	0.303	−0.00236	11.73
		2	325	0.980	0.020	−0.00214	12.55	294	0.993	0.002	−0.00235	11.72
		6	330	0.983	0.021	−0.00210	12.78	290	0.996	0.002	−0.00239	11.79
		12	326	0.984	0.022	−0.00212	12.47	290	0.993	0.001	−0.00239	11.84
BROCCOLI												
1:1	4 °C	1	324	0.977	0.024	−0.00214	12.27	290	0.976	0.027	−0.00239	11.55
		2	323	0.965	0.030	−0.00215	12.39	284	0.982	0.024	−0.00244	11.63
		6	333	0.983	0.020	−0.00208	11.36	298	0.983	0.022	−0.00233	10.38
		12	331	0.984	0.019	−0.00210	10.70	300	0.984	0.021	−0.00231	9.74
	−21 °C	1	332	0.967	0.028	−0.00209	12.38	290	0.981	0.365	−0.00239	11.51
		2	322	0.952	0.035	−0.00215	12.40	296	0.986	0.020	−0.00234	11.48
		6	332	0.964	0.029	−0.00209	12.41	297	0.989	0.018	−0.00233	11.50
		12	331	0.967	0.028	−0.00209	12.08	302	0.980	0.299	−0.00229	11.19
	−76 °C	1	335	0.963	0.035	−0.00207	12.30	292	0.986	0.041	−0.00237	11.66
		2	334	0.970	0.030	−0.00208	12.36	299	0.980	0.021	−0.00232	11.62
		6	326	0.966	0.030	−0.00213	12.35	298	0.983	0.021	−0.00232	11.53
		12	331	0.969	0.026	−0.00209	12.10	293	0.984	0.024	−0.00236	11.63
1:4	4 °C	1	261	0.965	0.037	−0.00266	12.58	304	0.990	0.017	−0.00228	10.84

		2	263	0.975	0.031	−0.00264	11.68	313	0.990	0.016	−0.00221	10.34
		6	275	0.982	0.025	−0.00252	10.64	286	0.989	0.036	−0.00242	8.79
		12	271	0.982	0.025	−0.00256	9.33	223	0.985	0.029	−0.00310	7.72
		1	270	0.973	0.394	−0.00257	12.75	398	0.991	0.344	−0.00174	11.34
	−21 °C	2	284	0.982	0.024	−0.00244	12.07	397	0.991	0.253	−0.00175	10.92
		6	297	0.978	0.025	−0.00233	11.70	290	0.989	0.018	−0.00239	10.71
		12	266	0.968	0.035	−0.00261	11.61	265	0.989	0.020	−0.00261	10.41
		1	317	0.978	0.127	−0.00218	12.49	332	0.991	0.175	−0.00209	11.65
	−76 °C	2	312	0.979	0.024	−0.00222	12.51	329	0.990	0.015	−0.00210	11.65
		6	311	0.977	0.024	−0.00223	12.48	337	0.991	0.015	−0.00206	11.56
		12	308	0.980	0.024	−0.00225	12.49	339	0.991	0.015	−0.00205	11.63
		CAULIFLOWER										
1:1	4 °C	1	335	0.988	0.017	−0.00207	12.23	289	0.976	0.027	−0.00240	11.54
		2	335	0.984	0.019	−0.00207	12.32	289	0.982	0.023	−0.00239	11.57
		6	339	0.992	0.013	−0.00205	11.45	298	0.974	0.028	−0.00232	10.37
		12	340	0.992	0.013	−0.00204	10.72	297	0.986	0.020	−0.00234	9.92
	−21 °C	1	341	0.979	0.021	−0.00203	12.37	292	0.982	0.363	−0.00238	11.47
		2	339	0.977	0.023	−0.00204	12.34	294	0.979	0.025	−0.00236	11.46
		6	341	0.986	0.018	−0.00204	12.30	289	0.983	0.023	−0.00240	11.47
		12	342	0.987	0.017	−0.00202	12.05	293	0.981	0.308	−0.00237	11.18
	−76 °C	1	343	0.987	0.028	−0.00202	12.31	292	0.984	0.048	−0.00237	11.65
		2	335	0.979	0.017	−0.00207	12.45	297	0.979	0.022	−0.00233	11.50
		6	342	0.983	0.018	−0.00203	12.45	296	0.984	0.024	−0.00234	11.47
		12	340	0.981	0.022	−0.00204	12.22	289	0.984	0.025	−0.00240	11.58
1:4	4 °C	1	266	0.973	0.031	−0.00260	12.42	252	0.991	0.019	−0.00275	10.97
		2	263	0.975	0.031	−0.00263	11.62	246	0.989	0.022	−0.00281	10.55
		6	274	0.982	0.025	−0.00253	10.70	279	0.981	0.067	−0.00249	8.09
		12	271	0.982	0.025	−0.00255	9.29	261	0.974	0.033	−0.00266	7.91
	−21 °C	1	269	0.971	0.395	−0.00258	12.73	258	0.990	0.413	−0.00269	11.58
		2	275	0.976	0.029	−0.00252	12.11	256	0.981	0.263	−0.00271	11.43
		6	293	0.984	0.022	−0.00237	11.75	270	0.977	0.029	−0.00256	10.63
		12	284	0.972	0.030	−0.00244	11.55	268	0.980	0.027	−0.00259	10.43
	−76 °C	1	317	0.984	0.106	−0.00219	12.42	281	0.987	0.134	−0.00246	11.73
		2	315	0.986	0.020	−0.00220	12.44	287	0.993	0.021	−0.00241	11.68
		6	314	0.978	0.020	−0.00221	12.39	285	0.994	0.021	−0.00243	11.69
		12	317	0.986	0.019	−0.00219	12.30	278	0.992	0.014	−0.00249	11.73
1:1	CARROT											
	4 °C	1	311	0.983	0.022	−0.00223	12.13	279	0.980	0.026	−0.00249	11.43
		2	309	0.982	0.022	−0.00224	12.07	279	0.985	0.023	−0.00248	11.40
		6	309	0.990	0.016	−0.00224	11.38	291	0.976	0.027	−0.00238	9.96
		12	312	0.989	0.017	−0.00222	10.65	291	0.985	0.022	−0.00238	9.43
	−21 °C	1	315	0.981	0.022	−0.00220	12.36	284	0.983	0.372	−0.00244	11.09
		2	312	0.974	0.026	−0.00222	12.32	285	0.979	0.026	−0.00243	11.05
		6	306	0.983	0.021	−0.00226	12.29	279	0.983	0.024	−0.00248	11.28
		12	306	0.986	0.020	−0.00227	12.05	283	0.981	0.319	−0.00245	11.02
	−76 °C	1	293	0.991	0.028	−0.00237	12.40	284	0.982	0.047	−0.00244	11.45
		2	292	0.990	0.016	−0.00238	12.43	283	0.981	0.024	−0.00245	11.36
		6	290	0.983	0.016	−0.00239	12.43	285	0.983	0.025	−0.00243	11.36
		12	310	0.982	0.018	−0.00223	12.06	281	0.981	0.025	−0.00247	11.53

1:4	4 °C	1	257	0.971	0.034	−0.00269	11.89	244	0.989	0.022	−0.00284	10.41
		2	263	0.980	0.028	−0.00264	10.91	237	0.986	0.025	−0.00292	10.18
		6	270	0.976	0.029	−0.00257	9.79	256	0.976	0.042	−0.00271	8.77
		12	264	0.977	0.029	−0.00263	8.88	257	0.979	0.047	−0.00270	7.31
	−21 °C	1	256	0.971	0.413	−0.00270	12.54	249	0.986	0.427	−0.00278	11.21
		2	261	0.976	0.030	−0.00266	12.14	247	0.978	0.256	−0.00281	11.06
		6	280	0.980	0.025	−0.00247	11.39	260	0.971	0.034	−0.00266	10.29
		12	270	0.970	0.033	−0.00257	11.40	256	0.974	0.032	−0.00271	10.31
	−76 °C	1	292	0.989	0.108	−0.00237	12.36	267	0.990	0.137	−0.00260	11.63
		2	300	0.987	0.018	−0.00231	12.26	272	0.995	0.019	−0.00255	11.59
		6	293	0.987	0.019	−0.00237	12.24	271	0.995	0.019	−0.00256	11.61
		12	297	0.988	0.020	−0.00234	12.22	265	0.993	0.013	−0.00262	11.71

* A_0 —the initial amount of iodine, k —decay constant [30].

3. Materials and Methods

3.1. Material

Vegetables, i.e., pumpkin (*Cucurbita pepo* L.), cauliflower (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.), broccoli (*Brassica oleracea* L.), and carrot (*Daucus carota* L.), were used as a matrix for the iodine. The products in a ripe state were purchased in the retail trade in the months of September and October. The KI and KIO₃ constituted the sources of iodine (Merck, Darmstadt, Germany).

3.1.1. Conditions of Impregnation

The experimental scheme is presented in Figure 5. The vegetables were washed under running tap water. The pumpkin and carrot were peeled with knives, and the seeds of the pumpkin were removed. The vegetables were cut into small pieces: pumpkins into cubes in size about 4 × 4 × 4 cm, carrots in slices 4 cm thick, and cauliflower and broccoli in florets. Next, the vegetables were steamed (100 °C; 100% steam/10 min) in a convection oven (Rational, Landsberg am Lech, Germany). The vegetables were subsequently drained and subjected to homogenization (homogenizer—Foss, Hilleroed, Denmark) to obtain a particle size of 250 µm. The next stage of impregnation was the conditioning of the vegetables in an aqueous solution of KI/KIO₃ (Table 3). For the next impregnation steps, the variability of conditions was assumed:

- Degree of hydration—in the ratio 1:1, 1:2, 1:4 (m/v) at temperature 21 °C;
- Temperature of conditioning (4, −21, −76 °C);
- Time of conditioning (1, 2, 6, 12 h).

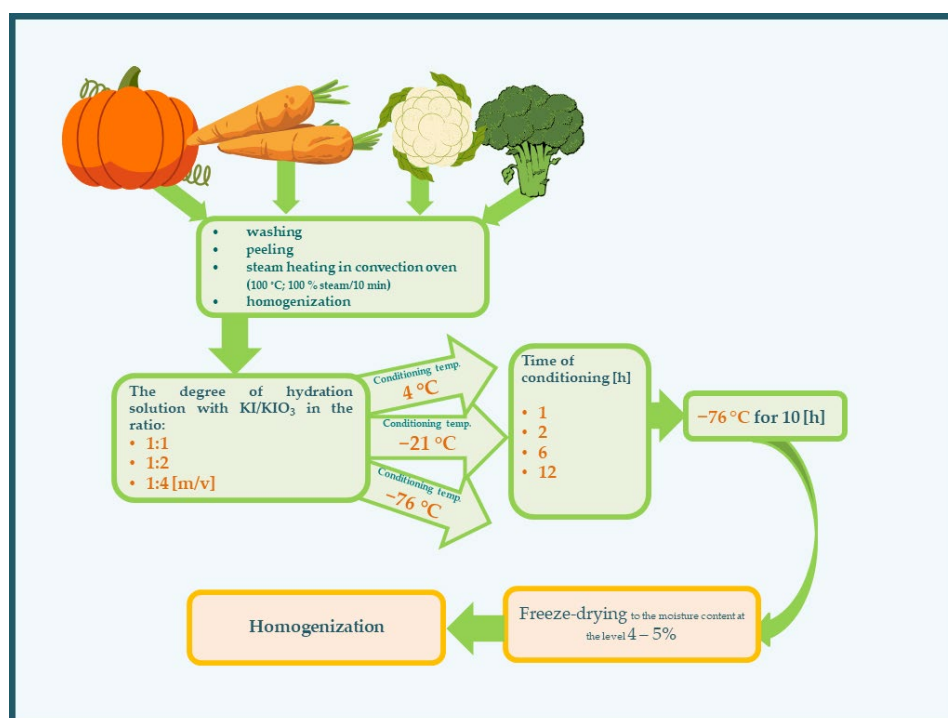


Figure 5. Scheme of the impregnation conditions of vegetables with iodine.

Table 3. Parameters of carrier iodination of the iodine carriers.

Iodine Carrier	Iodine Salt Solution Concentration (mg L ⁻¹)
Degree of hydration: 1:1 (carrier: solution ratio; m/v)	
Iodized KI	30.00
Iodized KIO ₃	39.00
Degree of hydration: 1:2 (carrier: solution ratio; m/v)	
Iodized KI	15.00
Iodized KIO ₃	19.50
Degree of hydration: 1:4 (carrier: solution ratio; m/v)	
Iodized KI	7.50
Iodized KIO ₃	9.75

All the samples (including those impregnated at $-76\text{ }^{\circ}\text{C}$) were stored at $-76\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 10 h before drying. Then, the impregnated preparations were freeze-dried (Alpha 1–4 443 LSC Freeze dryer; Christ, Hagen, Germany; at the temperature of the shelf $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ and condenser $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$, and vacuum 0.520 mbar) to the moisture content at the level of 4–5%. Freeze-drying times for samples hydrated in the ratio 1:1 were 28–30 h, and 1:3 and 1:4 were 49–53 h and 69–74 h, respectively. The dried vegetables were subjected to homogenization (homogenizer—Foss, Hilleroed, Denmark) to obtain a powder particle size of approximately $250\text{ }\mu\text{m}$.

3.1.2. Storage Conditions of Iodine Sources

The impregnated and freeze-dried vegetables under investigation were stored in jars (black glass, closed with screw top, $d = 7\text{ cm}$, $h = 10\text{ cm}$). The influence of storage conditions on the stability of KI and KIO₃ was tested during storage of $21 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

The iodine contents in the investigated carriers were monitored on the selected storage days: 1, 30, 60, 90, 120, 150, 180, and 230.

3.2. Methods

3.2.1. Stability of Iodine

In order to determine the effectiveness of the iodine impregnation conditions, the iodine content of the vegetables was determined after the application of iodine and storage.

Directly after drying of fortified samples, quantitative changes in the total and inorganic iodine were determined with a macro chemical method with potassium thiocyanate described by Kuhne, Wirth, and Wagner [69] and Moxon and Dixon [70]. The details of the method were described previously by Waszkowiak and Szymandera-Buszkwa [71].

3.2.2. Dry Mass

Iodine content was converted to dry weight. For this purpose, the dry mass (DM) of iodine carriers was estimated by drying at 105 °C to constant weight [72].

3.2.3. $L^*a^*b^*$ Color Properties

For L^* , a^* , b^* color evaluation of powdered vegetables, an NH310 portable colorimeter (Shenzhen Three NH Technology Co., Ltd., Shiyan, China) equipped with Light Source is LED blue light excitation with illuminating/viewing geometry 8/d, and internal software was applied. Before the measurements, the colorimeter was calibrated with the use of a white plate (provided by the manufacturer), and the black color calibration was manually performed (calibration on air). During measurements, the powder of the vegetables was inserted into the dedicated powder dark chamber.

The color tests were repeated 10 times, and average values with SD were recorded [73].

3.3. Statistical Analysis

STATISTICA PL 13.3 (Tibco Software Inc., Palo Alto, CA, USA) and R software (version 4.1 with packages FactoMineR v.2.4 and factoextra v.1.0.7) were the software used for principal components analysis (PCA) and calculating significant differences between means ($p < 0.05$, analysis of variance ANOVA), Tukey's multiple range test.

The iodine content of the tested samples was analyzed in 6 samples (2 independent samples and 3 measurements for each sample). Hypotheses were tested at $\alpha = 0.01$. To predict the dynamics of changes in iodine content in carriers during storage, the half-life value ($T_{1/2}$) was used. This is a term that describes the time within which the initial iodine content decreases by half. The half-life was calculated from an exponential decay mode [30]. The accuracy of the models was estimated using the coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE). The significance level for all analyses was set at 5%.

4. Conclusions

The research presented in this paper shows that all selected vegetables (pumpkin, broccoli, cauliflower, and carrots) can be used as iodine carriers and can therefore be an alternative to table salt and even protein preparations. The presence of introduced iodine did not affect the color parameters of the dry vegetables fortified with iodine.

The results confirmed the hypothesis that the fortification parameters affect the stability of the iodine during fortification and continued storage.

After drying the samples, the total iodine content was most strongly correlated with the degree of hydration and the temperature of the impregnation process. The lowest iodine content was in samples fortified with 1:4 hydration at 4 °C for 6 h. The highest reproducibility of iodine was for the following fortification conditions: temperature of −76 °C and 1:1 hydration.

This study confirms that the most unfavorable iodine impregnation conditions also decreased iodine stability during storage of the fortified samples. The preferred form of iodine was KIO_3 rather than KI.

In order to maximize recovery of the introduced iodine in the product after drying up, using the conditioning step at 4 °C is not recommended. On the other hand, freezing fortified vegetables immediately after the impregnation process is strongly recommended.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/molecules27103351/s1>, Table S1: The color parameters of fortified pumpkin with KI; Table S2: The color parameters of fortified pumpkin with KIO₃; Table S3: The color parameters of fortified broccoli with KI; Table S4: The color parameters of fortified broccoli with KIO₃; Table S5: The color parameters of fortified cauliflower with KI; Table S6: The color parameters of fortified cauliflower with KIO₃; Table S7: The color parameters of fortified carrot with KI; Table S8: The color parameters of fortified carrot with KIO₃; Table S9: The iodine content (%) during 230 days of storage of the dried KI fortified pumpkin at various conditions (temperature, hydration, and time); Table S10: The iodine content (%) during 230 days of storage of the dried KIO₃ fortified pumpkin at various conditions (temperature, hydration, and time); Table S11: The iodine content (%) during 230 days of storage of the dried KI fortified broccoli at various conditions (temperature, hydration, and time); Table S12: The iodine content (%) during 230 days of storage of the dried KIO₃ fortified broccoli at various conditions (temperature, hydration, and time); Table S13: The iodine content (%) during 230 days of storage of the dried KI fortified cauliflower at various conditions (temperature, hydration, and time); Table S14: The iodine content (%) during 230 days of storage of the dried KIO₃ fortified cauliflower at various conditions (temperature, hydration, and time); Table S15: The iodine content (%) during 230 days of storage of the dried KI fortified carrot at various conditions (temperature, hydration, and time); Table S16: The iodine content (%) during 230 days of storage of the dried KIO₃ fortified carrot at various conditions (temperature, hydration, and time).

Author Contributions: Conceptualization, A.Z., K.W., and K.S.-B.; methodology, K.W., M.J., and K.S.-B.; software, D.K.; validation, A.Z., D.K., A.J.-G., and K.S.-B.; formal analysis, A.Z., M.J., and K.S.-B.; writing—original draft preparation, A.Z., K.W., A.J.-G., and K.S.-B.; writing—review and editing, A.Z., K.W., A.J.-G., and K.S.-B.; visualization, A.Z., D.K., A.J.-G., and K.S.-B.; supervision, K.S.-B.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by statutory funds of the Department of Gastronomy Science and Functional Foods of Poznan University of Life Sciences (grant no. 506.751.03.00). The publication was financed within the framework of the Polish Ministry of Science and Higher Education's program "Regional Initiative Excellence" in the years 2019–2022 (no. 005/RID/2018/19)", financing amount of 12,000,000 PLN.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

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

Sample Availability: Samples of the compounds are available from the authors.

References

1. Kreutz, J.M.; Adriaanse, M.P.M.; van der Ploeg, E.M.C.; Vreugdenhil, A.C.E. Narrative review: Nutrient deficiencies in adults and children with treated and untreated celiac disease. *Nutrients* **2020**, *12*, 500. <https://doi.org/10.3390/nu12020500>.
2. Gunnarsdottir, I.; Dahl, L. Iodine intake in human nutrition: a systematic literature review. *Food Nutr. Res.* **2012**, *56*, 19731. <https://doi.org/10.3402/fnr.v56i0.19731>.
3. Krela-Kaźmierczak, I.; Czarnywojtek, A.; Skoracka, K.; Rychter, A.M.; Ratajczak, A.E.; Szymczak-Tomczak, A.; Ruchała, M.; Dobrowolska, A. Is there an ideal diet to protect against iodine deficiency? *Nutrients* **2021**, *13*, 513. <https://doi.org/10.3390/nu13020513>.
4. Van Der Straeten, D.; Bhullar, N.K.; De Steur, H.; Gruissem, W.; MacKenzie, D.; Pfeiffer, W.; Qaim, M.; Slamet-Loedin, I.; Strobbe, S.; Tohme, J.; et al. Multiplying the efficiency and impact of biofortification through metabolic engineering. *Nat. Commun.* **2020**, *11*, 5203. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19020-4>.
5. Fallon, N.; Dillon, S.A. Low Intakes of Iodine and Selenium Amongst Vegan and Vegetarian Women Highlight a Potential Nutritional Vulnerability. *Front Nutr.* **2020**, *7*, 72. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00072>.

6. Olson, R.; Gavin-Smith, B.; Ferraboschi, C.; Kraemer, K. Food fortification: The advantages, disadvantages and lessons from sight and life programs. *Nutrients* **2021**, *13*, 1118. <https://doi.org/10.3390/nu13041118>.
7. Krzepiński, A.; Zych-Wężyk, I.; Molas, J. Alternative ways of enriching the human diet with iodine. *J. Pre-Clin. Clin. Res.* **2015**, *9*, 167–171. <https://doi.org/10.5604/18982395.1186500>.
8. Seyed, M.M.J.; Seid, T.G. The importance of minerals in human nutrition: Bioavailability, food fortification, processing effects and nanoencapsulation. *Trends Food Sci. Technol.* **2017**, *62*, 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.02.017>.
9. Kulczyński, B.; Suliburska, J.; Rybarczyk, M.; Gramza-Michałowska, A. The effect of osmotic dehydration conditions on the calcium content in plant matrices. *Food Chem.* **2021**, *343*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128519>.
10. Melero, V.; Runkle, I.; Garcia, N.; Torre, D.; Miguel, P. De; Valerio, J.; Valle, L.; Barabash, A.; Moraga, I.; Familiar, C.; et al. The Consumption of Food-Based Iodine in the Immediate Pre-Pregnancy Period in Madrid Is Insufficient. San Carlos and Pregnancy Cohort Study. *Nutrients* **2021**, *13*, 4458. <https://doi.org/10.3390/nu13124458>.
11. Shahzad, R.; Jamil, S.; Ahmad, S.; Nisar, A.; Khan, S.; Amina, Z.; Kanwal, S.; Aslam, H.M.U.; Gill, R.A.; Zhou, W. Biofortification of Cereals and Pulses Using New Breeding Techniques: Current and Future Perspectives. *Front. Nutr.* **2021**, *8*, 721728. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.721728>.
12. Grzanka, M.; Smoleń, S.; Skoczylas, Ł.; Grzanka, D. Biofortification of sweetcorn with iodine: Interaction of organic and inorganic forms of iodine combined with vanadium. *Agronomy* **2021**, *11*, 1720. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091720>.
13. Smoleń, S.; Czernicka, M.; Kowalska, I.; Kęska, K.; Halka, M.; Grzebelus, D.; Grzanka, M.; Skoczylas, Ł.; Pitala, J.; Koronowicz, A.; et al. New Aspects of Uptake and Metabolism of Non-organic and Organic Iodine Compounds—The Role of Vanadium and Plant-Derived Thyroid Hormone Analogs in Lettuce. *Front. Plant Sci.* **2021**, *12*, 608. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.653168>.
14. Medrano-Macías, J.; Leija-Martínez, P.; González-Morales, S.; Juárez-Maldonado, A.; Benavides-Mendoza, A. Use of iodine to biofortify and promote growth and stress tolerance in crops. *Front. Plant Sci.* **2016**, *7*, 1146. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01146>.
15. Bouis, H.E.; Saltzman, A. Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Glob. Food Sec.* **2017**, *12*, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.009>.
16. Gonzali, S.; Kiferle, C.; Perata, P. Iodine biofortification of crops: agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability. *Curr. Opin. Biotechnol.* **2017**, *44*, 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.10.004>.
17. Stangoulis, J.C.R.; Knez, M. Biofortification of major crop plants with iron and zinc—Achievements and future directions. *Plant Soil* **2022**. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05330-7>.
18. Mackerras, D.; Powers, J.; Boorman, J.; Loxton, D.; Giles, G.G. Estimating the impact of mandatory fortification of bread with iodine on pregnant and post-partum women. *J. Epidemiol. Community Health* **2011**, *65*, 1118–1122. <https://doi.org/10.1136/jech.2009.089169>.
19. Charlton, K.; Skeaff, S. Iodine fortification: Why, when, what, how, and who? *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care* **2011**, *14*, 618–624. <https://doi.org/10.1097/MCO.0b013e32834b2b30>.
20. Diosady, L.L.; Alberti, J.O.; Venkatesh Mannar, M.G.; FitzGerald, S.; Helmyati, S.; Narendra, Y.H.; Septi, P.; Rochyana, I.; Endri, Y.; Codex Alimentarius Commission; et al. The molecular properties of peanut protein: impact of temperature, relative humidity and vacuum packaging during storage. *Molecules* **2014**, *23*, 2618. <https://doi.org/10.3390/molecules23102618>.
21. Diosady, L.L.; Mannar, V.M.G. Stability of iodine in iodized salt. In Proceedings of the 8th World Salt Symposium, The Hague, the Netherlands, 7–11 May 2000; pp. 977–982.
22. Modupe, O.; Krishnaswamy, K.; Diosady, L.L. Technology for triple fortification of salt with folic acid, iron, and iodine. *J. Food Sci.* **2019**, *84*, 2499–2506.
23. Trofimiuk-Müldner, M.; Konopka, J.; Sokołowski, G.; Dubiel, A.; Kieć-Klimczak, M.; Kluczyński, Ł.; Motyka, M.; Rzepka, E.; Walczyk, J.; Sokołowska, M.; et al. Current iodine nutrition status in Poland (2017): Is the Polish model of obligatory iodine prophylaxis able to eliminate iodine deficiency in the population? *Public Health Nutr.* **2020**, *23*, 2467–2477. <https://doi.org/10.1017/S1368980020000403>.
24. Chotivichien, S.; Chongchaitet, N.; Aksornchu, P.; Boonmongkol, N.; Duangmusik, P.; Knowles, J.; Sinawat, S. Assessment of the contribution of industrially processed foods to salt and iodine intake in Thailand. *PLoS ONE* **2021**, *16*, e0253590. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253590>.
25. Pyka, B.; Zieleń-Zynek, I.; Kowalska, J.; Ziółkowski, G.; Hudzik, B.; Gąsior, M.; Zubelewicz-Szkodzińska, B. Dietary recommendations for iodine intake - in search of a consensus between cardiologists and endocrinologists. *Folia Cardiol.* **2019**, *14*, 156–160. <https://doi.org/10.5603/fc.2019.0020>.
26. Pyka, Ł.; Hawranek, M.; Wilczek, K.; Piegza, J.; Szkodziński, J.; Lekston, A.; Gąsior, M. Imaging-guided percutaneous coronary intervention with ultra-low contrast angiographic control for patients at extreme risk of contrast induced nephropathy. *Cardiol. J.* **2019**, *26*, 796–798. <https://doi.org/10.5603/CJ.2019.0117>.
27. WHO. *Reducing Salt Intake in Population*; WHO Press: Geneva, Switzerland, 2006.
28. Waszkowiak, K.; Szymandera-Buska, K. Utilization preparations of connective tissue proteins as carriers of potassium iodide – studies of iodine retention during their storage. *Polish J. Hum. Nutr. Metab.* **2005**, *32*, 1130–1134.
29. Waszkowiak, K.; Szymandera-Buska, K. Effect of collagen preparations used as carriers of potassium iodide on retention of iodine and thiamine during cooking and storage of pork meatballs. *J. Sci. Food Agric.* **2007**, *87*, 1473–1479. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2844>.

30. Szymandera-Buszka, K.; Waszkowiak, K.; Kaczmarek, A.; Zaremba, A. Wheat dietary fibre and soy protein as new carriers of iodine compounds for food fortification—The effect of storage conditions on the stability of potassium iodide and potassium iodate. *LWT* **2021**, *137*, 110424. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110424>.
31. Heś, M.; Waszkowiak, K.; Szymandera-Buszka, K. The effect of iodine salts on lipid oxidation and changes in nutritive value of protein in stored processed meats. *Meat Sci.* **2012**, *92*, 139–143.
32. Delimaris, I. Adverse Effects Associated with Protein Intake above the Recommended Dietary Allowance for Adults. *ISRN Nutr.* **2013**, *2013*, 126929. <https://doi.org/10.5402/2013/126929>.
33. Sakkas, H.; Bozidis, P.; Touzios, C.; Kolios, D.; Athanasiou, G.; Athanasopoulou, E.; Gerou, I.; Gartzonika, C. Nutritional Status and the Influence of the Vegan Diet on the Gut Microbiota and Human Health. *Medicina* **2020**, *56*, 88. <https://doi.org/10.3390/medicina56020088>.
34. Varela, P.; Arvisenet, G.; Gonera, A.; Myhrer, K.S.; Fifi, V.; Valentin, D. Meat replacer? No thanks! The clash between naturalness and processing: An explorative study of the perception of plant-based foods. *Appetite* **2022**, *169*, 105793. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2021.105793>.
35. Hartmann, C.; Furtwaengler, P.; Siegrist, M. Consumers' evaluation of the environmental friendliness, healthiness and naturalness of meat, meat substitutes, and other protein-rich foods. *Food Qual. Prefer.* **2022**, *97*, 104486. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2021.104486>.
36. Jedrusek-Golinska, A.; Piasecka-Kwiatkowska, D.; Zielinska, P.; Zielinska-Dawidziak, M.; Szymandera-Buszka, K.; Hes, M. Soy preparations are potentially dangerous factors in the course of a food allergy. *Foods* **2019**, *8*, 655. <https://doi.org/10.3390/foods8120655>.
37. Wang, Z.; Wang, J.; Xu, W.; Xu, J.; Li, X.; Zhao, J.; Wang, G.; Yang, X. Iodine Content of Processed Foods and Condiments Sampled in China, 2017–2019. *Food Nutr. Sci.* **2021**, *12*, 1217–1231. <https://doi.org/10.4236/fns.2021.1212089>.
38. Bath, S.C.; Hill, S.; Infante, H.G.; Elghul, S.; Neziyanya, C.J.; Rayman, M.P. Iodine concentration of milk-alternative drinks available in the UK in comparison with cows' milk. *Br. J. Nutr.* **2017**, *118*, 525–532. <https://doi.org/10.1017/S0007114517002136>.
39. Eveleigh, E.R.; Coneyworth, L.J.; Avery, A.; Welham, S.J.M. Vegans, vegetarians, and omnivores: How does dietary choice influence iodine intake? A systematic review. *Nutrients* **2020**, *12*, 1606. <https://doi.org/10.3390/nu12061606>.
40. Groufh-Jacobsen, S.; Hess, S.Y.; Aakre, I.; Gjengedal, E.L.F.; Pettersen, K.B.; Henjum, S. Vegans, vegetarians and pescatarians are at risk of iodine deficiency in Norway. *Nutrients* **2020**, *12*, 3555. <https://doi.org/10.3390/nu12113555>.
41. Li, Y.O.; Komarek, A.R. Dietary fibre basics: health, nutrition, analysis, and applications. *Food Qual. Saf.* **2017**, *1*, 47–59. <https://doi.org/10.1093/fqs/fyx007>.
42. Szymandera-Buszka, K.; Piechocka, J.; Zaremba, A.; Przeor, M.; Jedrusek-Golińska, A. Pumpkin, Cauliflower and Broccoli as New Carriers of Thiamine Compounds for Food Fortification. *Foods* **2021**, *10*, 578. <https://doi.org/10.3390/foods10030578>.
43. Chadare, F.J.; Idohou, R.; Nago, E.; Affonfere, M.; Agossadou, J.; Fassinou, T.K.; Kénou, C.; Honfo, S.; Azokpota, P.; Linnemann, A.R.; et al. Conventional and food-to-food fortification: An appraisal of past practices and lessons learned. *Food Sci. Nutr.* **2019**, *7*, 2781–2795. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1133>.
44. Schaffner, M.; Rochau, U.; Mühlberger, N.; Conrads-Frank, A.; Rushaj, V.Q.; Sroczynski, G.; Koukkou, E.; Thuesen, B.H.; Völzke, H.; Oberaigner, W.; et al. The economic impact of prevention, monitoring and treatment strategies for iodine deficiency disorders in Germany. *Endocr. Connect.* **2021**, *10*, 1–12. <https://doi.org/10.1530/EC-20-0384>.
45. Friesen, V.M.; Aaron, G.J.; Myatt, M.; Neufeld, L.M. Assessing coverage of population-based and targeted fortification programs with the use of the Fortification Assessment Coverage Toolkit (FACT): Background, toolkit development, and supplement overview. *J. Nutr.* **2017**, *147*, 981S–983S. <https://doi.org/10.3945/jn.116.242842>.
46. Osendarp, S.J.M.; Martinez, H.; Garrett, G.S.; Neufeld, L.M.; De-Regil, L.M.; Vossenaar, M.; Darnton-Hill, I. Large-Scale Food Fortification and Biofortification in Low- and Middle-Income Countries: A Review of Programs, Trends, Challenges, and Evidence Gaps. *Food Nutr. Bull.* **2018**, *39*, 315–331. <https://doi.org/10.1177/0379572118774229>.
47. Gorstein, J.L.; Bagriansky, J.; Pearce, E.N.; Kupka, R.; Zimmermann, M.B. Estimating the Health and Economic Benefits of Universal Salt Iodization Programs to Correct Iodine Deficiency Disorders. *Thyroid* **2020**, *30*, 1802–1809. <https://doi.org/10.1089/thy.2019.0719>.
48. Dwyer, J.T.; Wiemer, K.L.; Dary, O.; Keen, C.L.; King, J.C.; Miller, K.B.; Philbert, M.A.; Tarasuk, V.; Taylor, C.L.; Gaine, P.C.; et al. Fortification and health: Challenges and opportunities. *Adv. Nutr.* **2015**, *6*, 124–131. <https://doi.org/10.3945/an.114.007443>.
49. Garg, M.; Sharma, A.; Vats, S.; Tiwari, V.; Kumari, A.; Mishra, V.; Krishania, M. Vitamins in Cereals: A Critical Review of Content, Health Effects, Processing Losses, Bioaccessibility, Fortification, and Biofortification Strategies for Their Improvement. *Front. Nutr.* **2021**, *8*, 254. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.586815>.
50. Wawrzyniak, N.; Suliburska, J.; Kulczyński, B.; Kołodziejewski, P.; Kurzawa, P.; Gramza-Michałowska, A. Calcium-enriched pumpkin affects serum leptin levels and fat content in a rat model of postmenopausal osteoporosis. *Nutrients* **2021**, *13*, 2334. <https://doi.org/10.3390/nu13072334>.
51. Keats, E.C.; Das, J.; Siddiqua, A.; Als, D.; Bhutta, Z.A. PROTOCOL: Large-scale food fortification (LSFF) efforts for improving health outcomes in low- and middle-income countries: a systematic review. *Campbell Syst. Rev.* **2018**, *14*, 1–30. <https://doi.org/10.1002/cl2.204>.
52. Szymandera-Buszka, K.; Waszkowiak, K. Unstability of iodine in iodized table salt during storage. *Polish J. Environ. Stud.* **2004**, *13*, 562–565.

53. Szymandera-Buszka, K.; Waszkowiak, K. Iodine retention in ground pork burgers fried in fat free conditions. *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.* **2004**, *3*, 157–162.
54. Waszkowiak, K.; Szymandera-Buszka, K. Effect of storage conditions on potassium iodide stability in iodised table salt and collagen preparations. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2008**, *43*, 895–899. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01538.x>.
55. Fallah, S.H.; Khalilpour, A.; Amouei, A.; Rezapour, M.; Tabarinia, H. Stability of iodine in iodized salt against heat, light and humidity. *Int. J. Heal. Life Sci.* **2020**, *6*, e100098, doi:doi: 10.5812/ijhls.100098.
56. Shi, H. Adding an oxidant increases the stability of iodine in iodized salt. *Food Nutr. Bull.* **2004**, *25*, 137–141. <https://doi.org/10.1177/156482650402500205>.
57. Ekott, E.; Etukudo, U. Iodine Stability in Commercial Salt Brands in Nigeria. *Int. J. Eng. Tech. Res.* **2017**, *7*, 10–13.
58. Shawel, D.; Hagos, S.; Lachat, C.K.; Kimanya, M.E.; Kolsteren, P. Post-production losses in iodine concentration of salt hamper the control of iodine deficiency disorders: A case study in Northern Ethiopia. *J. Heal. Popul. Nutr.* **2010**, *28*, 238–244. <https://doi.org/10.3329/jhpn.v28i3.5550>.
59. Diosady, L.L.; Alberti, J.O.; Mannar, M.G.V.; Stone, T.G. Stability of iodine in iodized salt used for correction of iodine-deficiency disorders. *Food Nutr. Bull.* **1997**, *18*, 388–397. <https://doi.org/10.1177/156482659801900306>.
60. Vithanage, M.; Herath, I.; Achinthya, S.S.; Bandara, T.; Weerasundara, L.; Mayakaduwa, S.S.; Jayawardhana, Y.; Kumarathilaka, P. Iodine in commercial edible iodized salts and assessment of iodine exposure in Sri Lanka. *Arch. Public Health* **2016**, *74*. <https://doi.org/10.1186/s13690-016-0133-0>.
61. Biber, F.Z.; Unak, P.; Yurt, F. Stability of iodine content in iodized salt. *Isotopes Environ. Health Stud.* **2002**, *38*, 78–93.
62. Saiz-Lopez, A.; Blaszcak-Boxe, C.S.; Carpenter, L.J. A mechanism for biologically induced iodine emissions from sea ice. *Atmos. Chem. Phys.* **2015**, *15*, 9731–9746. <https://doi.org/10.5194/acp-15-9731-2015>.
63. Szymandera-Buszka, K.; Waszkowiak, K. Stability of iodinated salts during roasting and storage of pork meatballs. *Polish J. food Nutr. Sci.* **2007**, *57*, 335–338.
64. Rana, R.; Raghuvanshi, R.S. Effect of different cooking methods on iodine losses. *J. Food Sci. Technol.* **2013**, *50*, 1212–1216. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0436-7>.
65. Diosady, L.L.; Alberti, J.O.; Ramcharan, K.; Mannar, M.G.V. Iodine stability in salt double-fortified with iron and iodine. *Food Nutr. Bull.* **2002**, *23*, 196–207. <https://doi.org/10.1177/156482650202300209>.
66. Kulczynski, B.; Gramza-Michałowska, A. The profile of secondary metabolites and other bioactive compounds in cucurbita Pepo L. And cucurbita moschata pumpkin cultivars. *Molecules* **2019**, *24*, 2945. <https://doi.org/10.3390/molecules24162945>.
67. Hassan, M.F.Y.; Barakat, H. Effect of Carrot and Pumpkin Pulps Adding on Chemical, Rheological, Nutritional and Organoleptic Properties of Ice Cream. *Food Nutr. Sci.* **2018**, *9*, 969–982. <https://doi.org/10.4236/fns.2018.98071>.
68. Tariku, W.B.; Mazengia, A.L. Knowledge and Utilization of Iodized Salt and Its Associated Factors at Household Level in Mecha District, Northwest Ethiopia. *J. Nutr. Metab.* **2019**, *2019*, 9763830. <https://doi.org/10.1155/2019/9763830>.
69. Kuhne, D.; Wirth, F.; Wagner, H. Iodine determination in iodized meat products. *Fleischwirtschaft* **1993**, *73*, 175–178.
70. Moxon, R.E.; Dixon, E.J. Semi-automatic method for the determination of total iodine in food. *Analyst* **1980**, *105*, 344–352. <https://doi.org/10.1039/an9800500344>.
71. Waszkowiak, K.; Szymandera-Buszka, K. The application of wheat fibre and soy isolate impregnated with iodine salts to fortify processed meats. *Meat Sci.* **2008**, *80*, 1340–1344. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.06.011>.
72. ISO 2483:1973; Sodium Chloride for Industrial Use—Determination of the Loss of Mass at 110 Degrees C (Reviewed and Confirmed in 2018). International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018.
73. Siejak, P.; Smulek, W.; Fathordobady, F.; Grygier, A.; Baranowska, H.M.; Rudzińska, M.; Masewicz, Ł.; Jarzębska, M.; Nowakowski, P.T.; Makiej, A.; et al. Multidisciplinary studies of folk medicine “five thieves’ oil” (Olejek pięciu złodziei) components. *Molecules* **2021**, *26*, 2931. <https://doi.org/10.3390/molecules26102931>.

Article

The Antioxidant Properties of Selected Varieties of Pumpkin Fortified with Iodine in the Form of Potassium Iodide and Potassium Iodate

Agata Zaremba , Marzanna Heś, Anna Jędrusek-Golińska , Monika Przeor  and Krystyna Szymandera-Buszkwa * 

Department of Gastronomy Science and Functional Foods, Faculty of Food Science and Nutrition, Poznań University of Life Sciences, Wojska Polskiego 31, 60-624 Poznań, Poland; agata.zaremba@up.poznan.pl (A.Z.); marzanna.hes@up.poznan.pl (M.H.); anna.jedrusek-golinska@up.poznan.pl (A.J.-G.); monika.przeor@up.poznan.pl (M.P.)

* Correspondence: krystyna.szymandera_buszka@up.poznan.pl

Abstract: This study aimed to investigate the use of selected pumpkin varieties as carriers of potassium iodide (KI) and potassium iodate (KIO₃) at different concentrations (2.3, 0.23, and 0.023 mg/100 g). It was hypothesized that the concentrations and form of iodine fortification in pumpkins affect the antioxidant activity of pumpkins. The results showed a high recovery of the introduced iodine in all pumpkin varieties after drying, as well as high iodine stability during storage, especially for KIO₃. However, statistical analysis confirmed a relationship between the forms and concentration of iodine and the ABTS cation radical and the DPPH cation radical test results. In the systems with iodine concentration at 0.023 and 0.23 mg/100 g, the antioxidant activity did not change. However, for all pumpkin varieties fortified with a KIO₃ concentration at 3.9 mg/100 g (2.3 mg/100 g of iodine), a statistically significant decrease in free-radical scavenging was confirmed. Therefore, for maximum effectiveness in pumpkin's free-radical scavenging indices, it is suggested to introduce iodine in the form of KI and KIO₃, but in controlled concentrations. However, KIO₃ should be added at a maximum amount of 0.39 mg/100 g.

Keywords: fortification; pumpkin; iodine carriers; oxidative stability; vegetables



Citation: Zaremba, A.; Heś, M.; Jędrusek-Golińska, A.; Przeor, M.; Szymandera-Buszkwa, K. The Antioxidant Properties of Selected Varieties of Pumpkin Fortified with Iodine in the Form of Potassium Iodide and Potassium Iodate. *Foods* **2023**, *12*, 2792. <https://doi.org/10.3390/foods12142792>

Academic Editors: Juristo Fonollá and Sandra González-Palacios

Received: 31 May 2023

Revised: 20 July 2023

Accepted: 20 July 2023

Published: 23 July 2023



Copyright: © 2023 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

Pumpkin belongs to the *Cucurbitaceae* family and is widely used in cuisines worldwide. For example, pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch ex Poir) is one of Mexico's most significant vegetable crops. It is commonly cultivated in South Asia, Africa, India, Latin America, and the United States [1,2]. This vegetable is frequently consumed in Mediterranean populations and is often cooked in many ways [3]. In industry, it is used to make baby food, juices, and marinades [4]. The use of pumpkin as a natural coloring agent in pasta and flour mixes has also been found [5,6]. Due to the lack of dominant sensory characteristics, pumpkin flesh is an excellent addition to many other products [7,8]. The industrial food applications of pumpkins also include meat products (beef meatballs, chicken burgers, and low-fat meatballs), grain products (bread, cake, biscuits, cookies, muffins, and pasta), beverages (juice, pineapple juice, and smoothies), and dairy (yoghurt and ice cream) [1,8–10]. It can also be incorporated into foods such as candies and rice cakes, as well as the traditional Indonesian cake 'Bingka' [11,12]. Enriching food products with pumpkin can be considered a strategy to increase the consumption of vegetables and the bioactive ingredients present in them without significantly changing eating habits of the population [12–15]. This is especially true of starch products, e.g., pasta and noodles. Therefore, in many studies, attempts have been made to improve the nutritional properties of these products through enrichment with vegetables, including pumpkin [8,16,17]. A significant advantage of

pumpkin fruit is the low level of absorption of pollutants from the soil, thanks to which its flesh is characterized by a much lower level of heavy metals than in other vegetables [18]. Moreover, pumpkin has experienced increased interest in recent years because of its nutritional and health-protective effects. Pumpkin pulp is a good source of potassium, calcium, and carotene [5,19,20]. Pumpkin fiber is characterized by a high content of pectins, which lowers starch digestion and reduces the risk of diabetes [21]. Moreover, it contains crucial active substances such as avenasterol, spinasterol, sitosterol, and stigmasterol, as well as bioactive substances such as triterpenoids, sesquiterpenoids, carotenoids, tocopherols, and polyphenols [12]. For example, improved lipid profile and lowered blood pressure have been shown after eating the anatomical parts of pumpkin [10]. Moreover, the antioxidant properties of pumpkin extracts have also been confirmed [5,22,23].

Other results suggested the addition of pumpkin pulp to dairy products, e.g., ice cream [24]. In these studies, it was confirmed that the addition of pumpkin pulp to ice cream increases the nutritional value of this product. Following the addition of pumpkin pulp at the level of 10–20% to ice cream, the vitamin C content in these products was significantly increased. The antioxidant activity of these products was also high. The DPPH radical-scavenging activity of ice cream with pumpkin pulp significantly increased with increasing pumpkin substitution level (from 10% to 20%).

Food fortification is the most commonly used strategy to alleviate human nutrients deficiencies [25]. Previous studies also showed that pumpkins could be a suitable matrix for many nutrients, e.g., β -carotene (vitamin-A), thiamine, and calcium [1,26,27]. The study of de Escalada Pla also found that pumpkin flesh is an adequate raw material for the development of functional food fortified with iron [13]. Our preliminary research showed that pumpkin could also serve as raw material for iodine fortification [28].

Approximately 30% of the world's population remains at risk of iodine deficiency [29]. From a public health perspective, pregnant women, fetuses, neonates, and infants are the most vulnerable groups because of the irreversible effects of iodine deficiency disorders (IDD) [30].

Iodine deficiency may be associated with exclusion from the diet of primary sources of iodine. Avoiding the consumption of animal-sourced food (vegan diet) may also be related to hypothyroidism. Vegans eliminate the primary sources of iodine from their diet, such as dairy products and fish, which makes them a group at particular risk of deficiency of this element [25,31–36]. Programs for food fortification with iodine are carried out in many countries worldwide to minimize the risk of this element's deficiency in the diet [36,37]. One of the most common fortification strategies is salt iodization. However, in 2006, the World Health Organization recommended limiting salt intake to 5 g/day, as it is a risk factor for atherosclerosis and hypertension [38]. Consequently, the iodine supply from this source can be limited [32,39–41]. There is a danger of returning to the state from before the fortification of salt with iodine. Therefore, there is an urgent need to introduce new matrices for iodine salts.

The fortification of pumpkins may also constitute an attractive alternative source of iodine for all consumers, especially vegetarians and vegans [16,17,42]. However, the suitability of this type of product as a matrix for food enrichment may be determined by factors influencing the stability of iodine [43–45]. The complexity of iodine fortification encompasses the choice of the chemical form of the compound and the optimum time and hydration [28] of the matrix. For the iodine fortification process to be as effective as possible, the conditions of impregnation process must be carefully selected, particularly relating to the degree of hydration and the temperature of the impregnated samples before drying. As the most effective parameters for fortifying the dried products, it is recommended to impregnate the vegetables with hydration of 1:1 or 1:2 and an impregnation temperature of $-76\text{ }^{\circ}\text{C}$ [28].

Preliminary studies support the possibility of using pumpkin as an iodine matrix. However, the difficulty may lie in selecting a pumpkin variety to preserve the highest iodine stability during production and storage. Additionally, iodine-enriched food should be

easily and quickly produced, and it should improve rather than lower the health-promoting properties of fortified food [46]. High doses of iodine (up to 3 mg/100 g) are often used in the preparation of iodine-fortified concentrates [47]. Preliminary studies indicated the existence of certain correlations between the antioxidant activity and content of iodine.

It was found that both KI and KIO₃ have different pro- and antioxidative properties; KI is the reductant, whereas KIO₃ is the oxidant and may react with oxidizable substances [48].

It was confirmed that potassium iodide only increased lipid peroxidation when used in the highest concentrations (≥ 50 mM), whereas potassium iodate increased lipid peroxidation in concentrations from 2.5 mM [49]. Many studies confirmed the antioxidant properties of pumpkin [17,50–52]. However, the antioxidant activity of pumpkins fortified with iodine was not tested. Therefore, this study aimed to investigate the use of selected pumpkin varieties as carriers of potassium iodide (KI) and potassium iodate (KIO₃) at different concentrations. It was hypothesized that the different pumpkin varieties affect iodine stability during the storage of enriched dried product and its antioxidant activity. It was also hypothesized that the concentrations of pumpkin iodine fortification would affect the antioxidant activity of fortified pumpkin.

2. Materials and Methods

2.1. Material

Pumpkin varieties, i.e., *Cucurbita pepo* (Spaghetti (Sp) and Delicata (DI)) and *Cucurbita moschata* (Butternut Squash (BtnS), Butterkin (Btk), Shishigatani (Ss), Butternut Orange (BtnOr), and Muscat Provence (MsP)), were used as a matrix for the iodine. The plant material was from farms and marketplaces in the Wielkopolska region of Poland. Purchases were made during the harvest of pumpkin, in September–October (2021), when they reached maturity. The pumpkin was then transported to the laboratory and prepared for further analysis.

All pumpkin varieties contained iodine in the amount below 0.001 mg/100 g. The products were purchased in retail trade. KI and KIO₃ constituted the sources of iodine (Merck, Darmstadt, Germany).

The DPPH[•]-scavenging capacity was tested using the DPPH radical (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) (Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA). The ABTS^{•+}-scavenging capability was tested using the ABTS radical cation (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt) (98%), (Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA).

The DPPH- and ABTS-scavenging capability was tested using Trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchromane-2-carboxylic acid) (97%) (Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, USA).

2.1.1. Conditions of Impregnation

The pumpkins were washed under running tap water and peeled with knives, and the pumpkin seeds were removed.

All the pumpkin samples were cut into small pieces of approximately 4 × 4 × 4 cm. Next, the samples were steamed (100 °C; 10 min) in a convection oven (Rational, Landsberg am Lech, Germany). The pumpkin samples were subsequently drained and subjected to homogenization (homogenizer—Foss, Hilleroed, Denmark). The next impregnation stage was the soaking of the pumpkin samples in the aqueous solution of KI/KIO₃.

In the research, the model adopted three variable iodine concentrations: 0.023 mg/kg (0.030 mg/100 g of KI or 0.039 mg/100 g of KIO₃—low iodine level in food products), 0.23 mg/kg (0.30 mg/100 g of KI or 0.39 mg/100 g of KIO₃—natural iodine levels in foods from iodized salt), and 2.3 mg/100 g (3.01 mg/100 g of KI or 3.88 mg/100 g of KIO₃—fortified matrices for food fortification).

The following conditions of impregnation were assumed: the degree of hydration in the ratio 1:1 (m/v) and incubation at −76 °C/12 h. Then, the impregnated preparations were freeze-dried to the moisture content at the level of 4–5%. The dried pumpkin samples were subjected to homogenization (homogenizer—Foss, Hilleroed, Denmark) to obtain a

powder particle size of approximately 250 μm (fine sieves—Sigma-Aldrich, Taufkirchen, Germany).

2.1.2. Storage Conditions of Iodine Sources

The impregnated and freeze-dried samples of pumpkin under investigation were stored in jars (black glass, closed with a screw top, $d = 7\text{ cm}$, $h = 10\text{ cm}$). The influence of storage conditions on the stability of KI and KIO_3 was tested during storage of $21 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$. Our research confirmed that this temperature is often used and favorable for storing dried vegetables, wheat dietary fiber, and soy protein [26,53]. The iodine contents in the investigated carriers were monitored for 320 days.

2.2. Methods

2.2.1. Stability of Iodine

To determine the effectiveness of the iodine impregnation conditions, the iodine content of the pumpkin samples was determined after the application of iodine and storage. The iodine contents in the investigated carriers were monitored on selected storage days: 1, 60, 120, 180, 240, and 320.

The quantitative changes in the total iodine were determined using a macro chemical method with potassium thiocyanate described by Kuhne, Wirth, and Wagner [54], as well as subsequent colorimetric analysis, according to the method described by Moxon and Dixon [55].

2.2.2. Antioxidant Activity

All pumpkin samples, after drying and 320 days of storage, were taken for analysis of antioxidant activity. Ethanol extracts of pumpkin were prepared by 2 h maceration of dried pumpkin (10 g) with 100 mL of 80% ethanol [50].

The antioxidant activity of the tested ethanol extracts of pumpkins with iodine was examined on the basis of the free-radical scavenging indices—the DPPH-scavenging capacity ($\text{DPPH}^\bullet$) and the ABTS-scavenging capability ($\text{ABTS}^{\bullet+}$).

The $\text{DPPH}^\bullet$ -scavenging capacity [56,57] was tested using spectrophotometric methods with the use of DPPH radical. The resultant mixture was shaken thoroughly and allowed to stand at room temperature in the dark for 30 min, after which the absorbance of the solution was measured at 517 nm. The result was expressed as mg Trolox/100 g dry matter of extract.

The $\text{ABTS}^{\bullet+}$ -scavenging capability [58] was tested using spectrophotometric measurement of changes in the concentration of ABTS radical cation (98%). The absorbance was measured at 734 nm. The DPPH- and ABTS-scavenging capability was tested with regard to the scavenging capacity of Trolox (97%). The result was expressed as mg Trolox/100 g dry matter of extract.

2.3. Statistical Analysis

The obtained results were subject to statistical analysis using the STATISTICATM PL 13.3 (StatSoft, Cracow, Poland) software. The software was used to calculate significant differences between means ($p < 0.05$; analysis of variance ANOVA and Tukey's multiple range test).

The iodine content and the antioxidant activity of the tested samples were analyzed in six samples (two independent samples and three measurements for each sample). Hypotheses were tested at $\alpha = 0.05$. To predict the dynamics of changes in iodine content in carriers during the storage, losses of 25% ($T_{25\%}$) were used. This term describes the time within which the initial iodine content decreased by 25%. This parameter was calculated from an exponential decay mode [53]. The accuracy of the models was estimated using the coefficient of determination (R^2) and root-mean-square error (RMSE). The significance level for all analyses was set at 5%.

3. Results

3.1. Iodine Stability

3.1.1. Iodine Stability after Drying Pumpkins Fortified with Iodine

It was found that all samples of pumpkin proved to be a good material for fortification with iodine. Table 1 shows the iodine content (%) of enriched pumpkin varieties after the drying process of samples fortified with iodine KI and KIO₃. The differences in iodine content in the range of 85–95% were confirmed, depending on the form of iodine, variety of pumpkin, and concentration of iodine. The analysis of variance (one-way ANOVA test) showed (Table 2) a statistically significant effect ($p < 0.05$) of the type of iodine compound used for fortification (KI, KIO₃). Both iodine forms showed a capacity to accumulate iodine in large amounts, with a higher iodine concentration noted for KIO₃ than KI. The analysis of variance (one-way ANOVA test) also showed a statistically significant effect ($p < 0.05$) of the pumpkin varieties. The accumulation of iodine in fortified pumpkin depended on the amount of iodine applied. However, the amount of iodine applied did not affect the percentage of the recovery of the analyzed component. Taking all the predictive factors into account (Table 2), the iodine form was confirmed to have a stronger effect on the final iodine content than the varieties of pumpkin and iodine concentration. The lowest iodine content (85%) was found in KI-fortified *C. moschata* Butterkin (Btk) samples. The highest reproducibility of iodine was found when the pumpkin matrix was fortified using KIO₃ for *C. moschata* Delicata (DI) varieties.

Table 1. Iodine content [%] in selected varieties of pumpkin fortified with KIO₃ and KI.

Iodine Form	Pumpkin Variety	Iodine Concentration [mg·kg ^{−1}]					
		0.023		0.23		2.30	
		%	Standard Deviation	%	Standard Deviation	%	Standard Deviation
KIO ₃	Sp	93.59 ^{aB} *	0.14	93.75 ^{aB}	0.21	93.45 ^{aB}	0.12
	DI	95.45 ^{aA}	0.28	95.11 ^{aA}	0.25	95.03 ^{aA}	0.19
	BtnS	93.42 ^{aB}	0.25	93.35 ^{aB}	0.39	93.89 ^{aB}	0.21
	Btk	93.12 ^{aB}	0.19	93.13 ^{aB}	0.28	93.23 ^{aB}	0.25
	Ss	93.87 ^{aB}	0.29	93.38 ^{aB}	0.19	93.12 ^{aB}	0.19
	BtnOr	92.98 ^{aB}	0.21	93.12 ^{aB}	0.21	92.89 ^{aB}	0.19
	MsP	93.12 ^{aB}	0.19	93.45 ^{aB}	0.19	93.01 ^{aB}	0.26
KI	Sp	87.25 ^{aB}	0.19	87.03 ^{aB}	0.29	87.98 ^{aB}	0.14
	DI	90.03 ^{aA}	0.20	89.45 ^{aA}	0.22	89.6 ^{aA}	0.12
	BtnS	89.45 ^{aB}	0.19	88.38 ^{aB}	0.15	88.75 ^{aB}	0.23
	Btk	84.78 ^{aC}	0.28	85.03 ^{aC}	0.19	85.02 ^{aC}	0.31
	Ss	87.54 ^{aB}	0.11	87.69 ^{aB}	0.25	87.99 ^{aB}	0.25
	BtnOr	88.21 ^{aB}	0.14	88.02 ^{aB}	0.28	87.98 ^{aB}	0.14
	MsP	87.02 ^{aB}	0.21	88.12 ^{aB}	0.14	87.42 ^{aB}	0.21

* Mean values (n = 6); different letters (lower case letters in the same varieties of pumpkin; upper case letters in the same concentration of iodine) denote a significant difference at $p < 0.05$ (one-way ANOVA and post hoc Tukey test).

Table 2. Statistical significance of predictors of variance models for changes in iodine content in selected iodine-fortified pumpkins after drying (one-way ANOVA test).

Predictors	SS	df	MSE	F-Value	p-Value
Iodine concentration	0.07	2	0.04	0.09	0.91
Pumpkin type	111.70	6	18.62	48.36	0.00
Iodine form	1075.73	1	1075.73	2794.51	0.00

SS—statistical significance; df—degrees of freedom MSE—mean sum of squares.

3.1.2. Iodine Stability during Storage of Dried Pumpkins Fortified with Iodine

The experiment assumed storage of dried all varieties pumpkin at 21 °C. The tables containing all the iodine concentration data are included in Supplementary Tables S1 and S2.

The statistical analysis (one-way ANOVA test) (Table 3) showed the strongest correlation between the forms of iodine (KI/KIO₃) ($F = 4239.00$; $p < 0.05$) and iodine stability during storage.

Table 3. Statistical significance of predictors of variance models for changes in iodine content in selected iodine-fortified pumpkins after 320 days of storage (one-way ANOVA test).

Predictors	SS	df	MSE	F-Value	p-Value
Iodine concentration	1.50	2	0.80	2.00	0.15
Pumpkin type	423.70	6	70.60	180.00	0.00
Iodine form	1667.10	1	1667.10	4239.00	0.00

SS—statistical significance; df—degrees of freedom MSE—mean sum of squares.

The iodine content of fortified pumpkins after 320 days of storage differed, ranging from 83% to 70% of the initial content after drying. Iodine losses were lower for samples impregnated with KIO₃ than KI. This was true for all concentrations of iodine and pumpkin varieties applied. The exception to this was the sample of the Spaghetti (Sp) variety. This sample had the lowest content of KIO₃ and KI after 320 days of storage (Figure 1a–c). The highest iodine content was found when the pumpkin matrix was fortified using KIO₃ for the Delicata (Dl) variety (83–88%).

Analysis of the dynamics of changes in iodine content ($T_{25\%}$) (Table 4) confirmed a faster rate for KI than for KIO₃. Similar dynamics of iodine loss during storage for all pumpkin varieties were found. A statistically significantly faster rate of iodine loss was found only for spaghetti pumpkin. For these varieties, the rate of iodine loss was faster by 10% for KI and 8% for KIO₃.

Table 4. Dynamics of changes in iodine content (mg·kg^{−1}) during 320 days of storage of the dried iodine-fortified pumpkins with various iodine concentrations and pumpkin types.

Parameters Fortifications			Dynamics of Change in Iodine Content over 320 Days								
Pumpkin Variety	Iodine Concentration [mg·kg ^{−1}]	$T_{25\%}$ [days]	R^2	RMSE	k *	A_0 *	$T_{25\%}$ [days]	R^2	RMSE	k *	A_0 *
KIO ₃						KI					
Sp	0.023	341.50	0.978	0.000	−0.0000	1.022	255.14	0.989	0.000	0.000	1.020
	0.23	343.24	0.979	0.002	−0.0002	1.239	258.22	0.989	0.001	0.000	1.220
	2.3	343.48	0.987	0.019	−0.0015	8.427	263.22	0.990	0.010	−0.001	7.484
Dl	0.023	517.58	0.948	0.000	−0.0000	1.022	336.73	0.985	0.000	0.000	1.021
	0.23	520.89	0.879	0.002	−0.0002	1.242	338.08	0.982	0.001	0.000	1.228
	2.3	490.05	0.982	0.004	−0.0015	8.864	345.75	0.975	0.006	−0.001	7.806
BtNS	0.023	478.23	0.996	0.000	0.0000	1.022	336.27	0.981	0.000	0.000	1.021
	0.23	484.35	0.996	0.000	−0.0001	1.239	339.41	0.981	0.001	0.000	1.225
	2.3	505.16	0.996	0.003	−0.0005	8.638	342.57	0.984	0.006	−0.001	7.650
Btk	0.023	482.99	0.996	0.000	0.0000	1.022	336.15	0.976	0.000	0.000	1.020
	0.23	476.69	0.996	0.000	−0.0001	1.239	335.30	0.971	0.000	0.000	1.216
	2.3	503.81	0.996	0.004	−0.0007	8.500	343.46	0.975	0.004	−0.001	7.040
Ss	0.023	487.16	0.983	0.000	0.0000	1.022	342.63	0.985	0.000	0.000	1.020
	0.23	473.25	0.980	0.000	0.0000	1.239	339.90	0.981	0.015	0.000	1.223
	2.3	496.96	0.981	0.003	−0.0005	8.490	337.43	0.984	0.006	−0.001	7.520
BtNOr	0.023	473.34	0.986	0.000	0.0000	1.022	335.03	0.982	0.000	0.000	1.020
	0.23	469.47	0.985	0.000	0.0000	1.239	340.52	0.984	0.001	0.000	1.224
	2.3	483.69	0.978	0.003	−0.0004	8.449	339.40	0.987	0.007	−0.001	7.514
MsP	0.023	476.90	0.987	0.029	−0.0000	1.022	337.05	0.986	0.000	0.000	1.020
	0.23	483.44	0.987	0.057	−0.0001	1.243	328.70	0.986	0.006	0.000	1.230
	2.3	482.76	0.985	0.072	−0.0011	8.652	332.40	0.981	0.006	−0.001	7.425

* A_0 —the initial amount of iodine, k—decay constant [59].

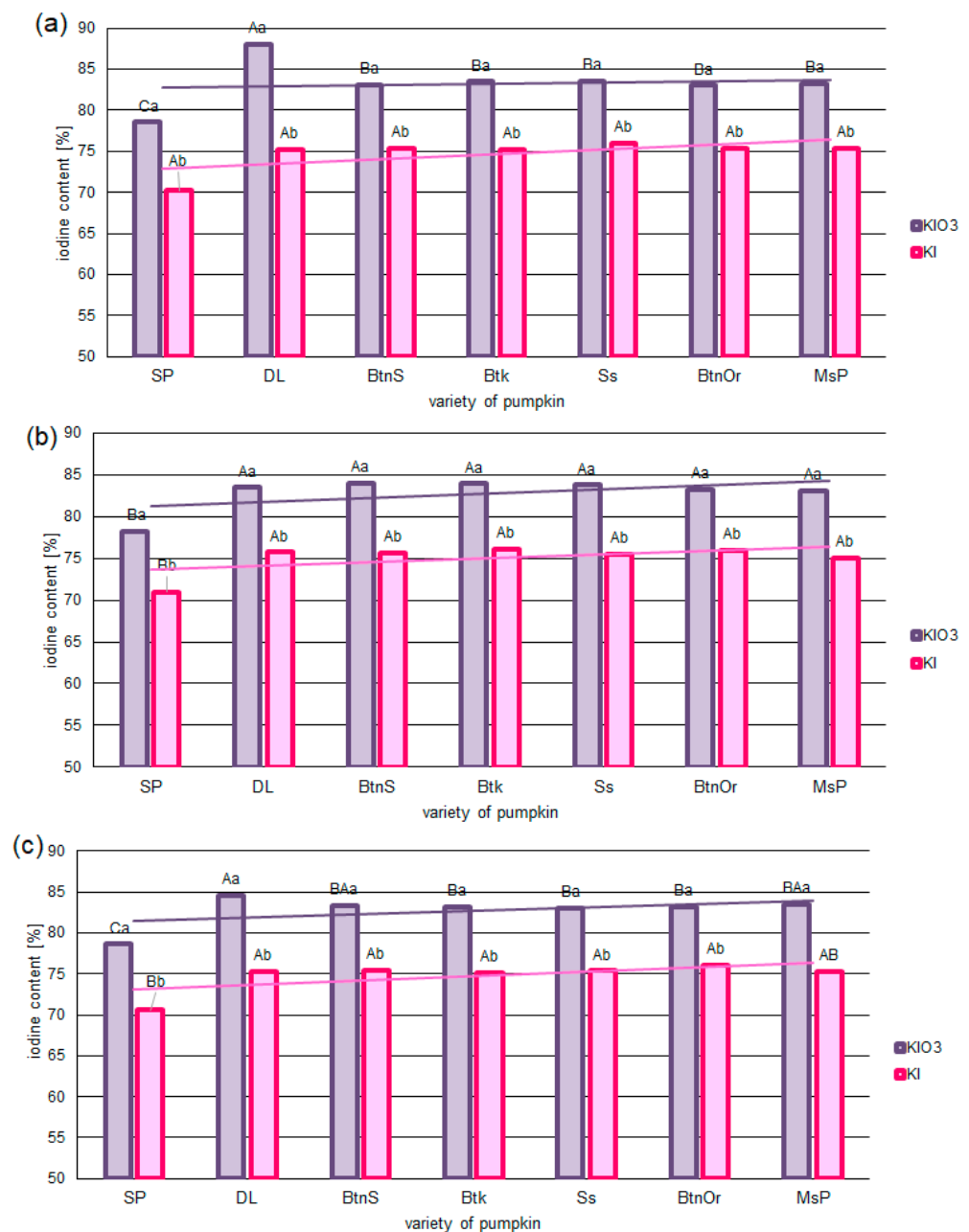


Figure 1. Iodine content [%] in selected varieties of pumpkin fortified with KIO₃ or KI in concentrations of 0.023 mg/100 g (a), 0.23 mg/100 g (b), and 2.3 mg/100 g (c). Mean values (n = 6); different letters (lower letters in the same varieties of pumpkin; upper case letters in the same form of iodine) denote a significant difference at $p < 0.05$ (one-way ANOVA and post hoc Tukey test).

3.2. Antioxidant Activity of Dried Pumpkins Fortified with Iodine after Drying and 320 Days of Storage

The antioxidant activity of the tested ethanol extracts of all pumpkin varieties was examined on the basis of free-radical scavenging indices—the ABTS-scavenging capability (DPPH[•]) and the DPPH-scavenging capacity (ABTS^{•+}). The analysis concerned samples after drying and after storing for 320 days. The results of our study confirmed the antiradical effect of all pumpkin varieties on DPPH[•] and ABTS^{•+}.

3.2.1. ABTS Radical-Scavenging and DPPH Radical-Scavenging Activity in the Samples without Iodine Fortification

The ABTS^{•+} test results showed that the variety of Delicata exhibited the highest antioxidant activity (149.30 mg Trolox/100 g dm) (Table S3). Strong antioxidant activity was also found for the Spaghetti variety. A high ability to scavenge cation radicals was also found among all varieties of *C. moschata* pumpkins. The highest ABTS^{•+} was confirmed in varieties of Butterkin and Shishigatani. Similar activity was confirmed for other pumpkin varieties. The lowest ability to neutralize ABTS^{•+} was found in the variety of Muscat Provence (99.36 mg Trolox/100 g dm).

Similarly to the previous results, a high ability to scavenge free radicals in the DPPH[•] test was found for all pumpkin varieties. The highest antioxidant activity was observed in *C. pepo* cultivar Delicata (155.50 mg Trolox/100 g dm). In the case of *C. moschata*, the highest antioxidant potential was confirmed for varieties of Butternut Orange, Shishigatani, and Butternut Squash (Table S4). The lowest ability to neutralize DPPH[•] was found for the Butterkin (69.78 mg Trolox/100 g dm).

3.2.2. ABTS Radical-Scavenging and DPPH Radical-Scavenging Activity in the Samples with Iodine Fortification

The statistical analysis (Table 5) confirmed a relationship between the forms of iodine (KI/KIO₃) and the ABTS^{•+} and the DPPH[•] test results.

The strongest relationship (one-way ANOVA test) was confirmed between iodine concentration in the form KIO₃ and the ABTS^{•+} ($F = 3836.00$; $p < 0.05$) and the DPPH[•] test results ($F = 902.00$; $p < 0.05$).

It was observed that, in the systems with iodine concentration at 0.023 and 0.23 mg/100 g (0.030 and 0.301 mg/100 g of KI or 0.039 and 0.388 mg/100 g of KIO₃), the antioxidant activity based on free-radical scavenging capacity indices (ABTS^{•+} and DPPH[•]) did not change. This was confirmed for the samples after drying and 320 days of storage.

It was also found that fortification with KI concentration at 2.3 mg/100 g caused no significant changes in antioxidant activity in the iodine-fortified pumpkin. A statistically significant decrease in the free-radical scavenging indices was only observed in systems containing varieties of Delicata and Butterkin (with KI at 2.3 mg/100 g). This was confirmed for the samples after drying and 320 days of storage. In the samples containing KI at 2.3 mg/100 g, the capacity to terminate the ABTS^{•+} decreased by 3% compared to samples without iodine. This was confirmed for samples (dried Delicata and Butterkin) after drying and 320 days of storage. The values to neutralize DPPH[•] decreased by 3% (for samples after drying) and 5% (for samples after 320 days of storage) compared to samples without iodine. These values were confirmed for both pumpkin varieties (Delicata and Butterkin).

For all pumpkin varieties fortified with KIO₃ concentration at 3.8 mg/100 g (2.3 mg/100 g of iodine), a statistically significant decrease in free-radical scavenging (Figures 2a–g and 3a–g) was confirmed. The capacity for ABTS^{•+} scavenging decreased by 7–11% (for samples after drying) and 7–9% (for samples after 320 days of storage) compared to samples without iodine. The lowest ability to neutralize ABTS^{•+} was found in the iodine-fortified Butterkin variety with 2.3 mg iodine/100 g. This was confirmed in the samples after drying (from 128.36 mg Trolox/100 g to 114.56 mg Trolox/100 g) and 320 days of storage (from 56.77 mg Trolox/100 g to 43.68 mg Trolox/100 g).

Similarly, the deactivation of DPPH[•] was reduced. In the samples with KIO₃ at the level of 2.3 mg, the DPPH-scavenging capability was found to be reduced by 6–8% for the samples after drying, while, for the samples after 320 days of storage, the scavenging of DPPH[•] decreased by 8–11%. The largest reduction in DPPH[•] was confirmed for the variety of Butterkin.

Table 5. Statistical significance of predictors of covariance models for changes in the ABTS^{•+}- and the DPPH[•]-scavenging capacity in the selected iodine-fortified pumpkins after drying and 320 days of storage (one-way ANOVA test).

Predictors	SS	df	MSE	F-Value	p-Value
ABTS ^{•+}					
after drying, fortified with KIO ₃					
Iodine concentration	1352.30	3	450.8	510.00	0.00
Pumpkin type	26.90	6	4.51	5.11	0.00
after drying, fortified with KI					
Iodine concentration	68.50	3	22.80	15.30	0.00
Pumpkin type	38.61	6	6.40	4.30	0.00
after 320 days of storage, fortified with KIO ₃					
Iodine concentration	1277.7	3	425.90	3836.00	0.00
Pumpkin type	18.62	6	3.12	28.00	0.00
after 320 days of storage, fortified with KI					
Iodine concentration	186.10	3	62.00	65.71	0.00
Pumpkin type	63.30	6	10.61	11.21	0.00
DPPH [•]					
after drying, fortified with KIO ₃					
Iodine concentration	149.90	3	50.10	97.10	0.00
Pumpkin type	11.20	6	1.90	4.12	0.00
after drying, fortified with KI					
Iodine concentration	93.20	3	31.10	5.90	0.00
Pumpkin type	150.30	6	25.00	4.80	0.00
after 320 days of storage, fortified with KIO ₃					
Iodine concentration	1101.4	3	367.1	902.50	0.00
Pumpkin type	19.9	6	3.3	8.10	0.00
after 320 days of storage, fortified with KI					
Iodine concentration	38.40	3	12.81	16.42	0.00
Pumpkin type	34.61	6	5.80	7.40	0.00

SS—statistical significance; df—degrees of freedom MSE—mean sum of squares.



Figure 2. The ABTS^{•+}-scavenging capability of selected varieties of pumpkin: Spaghetti (a), Delicata (b), Butternut Squash (c), Butterkin (d), Shishigatani (e), Butternut Orange (f), and Muscat Provence (g): fortified with iodine KI and KIO₃ (concentration: 0.023 mg/100 g, 0.23 mg/100 g, and 2.3 mg/100 g), compared to samples without iodine. Mean values (n = 6); different letters (lower letters in the same varieties of iodine concentration; upper case letters in the same form of iodine) denote a significant difference at $p < 0.05$ (one-way ANOVA and post hoc Tukey test).

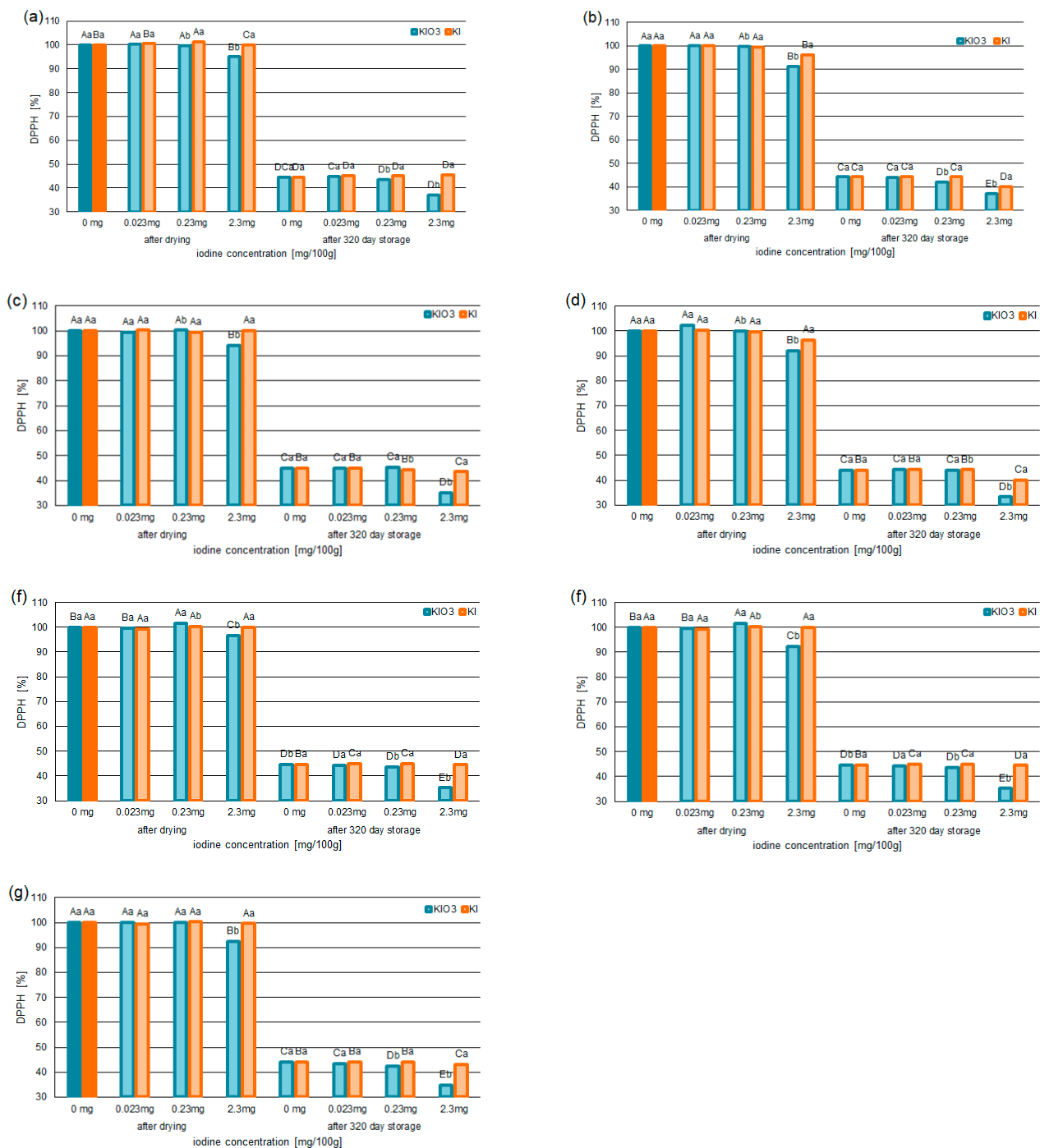


Figure 3. The DPPH•-scavenging capability of the selected varieties of pumpkin: Spaghetti (a), Delicata (b), Butternut Squash (c), Butterkin (d), Shishigatani (e), Butternut Orange (f), and Muscat Provence (g); fortified with iodine KI and KIO₃ (in concentration: 0.023 mg/100 g, 0.23 mg/100 g, 2.3 mg/100 g), compared to samples without iodine. Mean values (n = 6); different letters (lower letters in the same varieties of iodine concentration; upper case letters in the same form of iodine) denote a significant difference at $p < 0.05$ (one-way ANOVA and post hoc Tukey test).

4. Discussion

Approximately 30% of the world's population remains at risk of iodine deficiency. Therefore, the need to enrich food with iodine justifies research to find a new matrix for iodine fortification.

Analysis of iodine content showed a high recovery of the introduced iodine in all pumpkin varieties after drying to 95%. Previous data on the fortification of protein preparations and vegetables confirm the maximum reproducibility of iodine in fortified matrices at a similar level [28]. Furthermore, high iodine stability in storage was confirmed. The dynamics of changes in iodine content during storage were similar to previous data on the fortification of protein preparations [53] and vegetables [28].

Both iodine forms showed a capacity to accumulate iodine in large amounts, with higher iodine stability noted for KIO_3 than KI, which was confirmed by earlier studies [53,59,60]. This particularly affected the stored samples. This observation is explained by the lower stability of KI and a higher rate of iodine transformation transition to free iodine [61].

The high stability of KIO_3 is explained by the mechanism of the iodine form transformation. Iodate is reduced to iodide, and potassium iodide behaves like a simple ionic salt and is easily oxidized to I^2 [49,62,63].

This increased stability of iodine applied to pumpkins may also be related to the appropriate protein content and lower pH [24,64,65]. This was confirmed by previous data on impregnating vegetables with thiamine and iodine [26,28]. Iodine applied to food remains in the form of inorganic iodine (I^2), but some of its parts interact with protein or phenolic compounds. Dried pumpkin contains protsein on the level of 10 g, which promotes the formation of complexes with the protein. It was found that the stability of organic iodine in food is higher than that of inorganic iodine [59,66]. Other studies also confirmed that iodine effectively stabilized in the pH range of 1.5–10.5, similar to the pH of pumpkin [62,66]. Other data indicated that pH 8 seemed to have the most adverse effects on iodine stability [62,66]. A study also showed iodine's instability at pH values < 1.5 and > 10.5 , and suggested optimal iodine stability (without appreciable iodine volatilization) in the $1.5 \leq \text{pH} < 7$ range [67].

The ability to scavenge free radicals is one of the most essential features that determine high antioxidant properties [5,17,50,51,68–70]. The results of our study confirmed the antiradical effect of all pumpkin varieties using the DPPH $\bullet$ and ABTS $\bullet^+$ methods. Previous studies also indicated a high antioxidant activity of dried pumpkins [52,71]. Moreover, this research showed the highest ability to scavenge cation radicals for pumpkins Delicata, Butterkin and Shishigatani. Other studies also confirmed that pumpkin polysaccharides possess antioxidant activities and can be utilized to develop antioxidant food and medicines [72,73].

These trends were also confirmed in the samples during storage. However, a significant reduction was found in the ability to scavenge the free radicals of all pumpkin varieties. An earlier study also confirmed that, after storage, a significant decrease in the antioxidant activity of pumpkins was observed. However, the samples with pumpkin additives still presented a higher score than the control samples [52]. Other results also showed that the antioxidant activities of juice from *Momordica charantia* L. decreased substantially after 3 days of storage. It was found that this antioxidant activity decreased more rapidly at higher storage temperatures [74]. Similar trends were also found for dried kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) [75].

Our studies show that, in the systems with iodine concentration at 0.3 and 0.03 of KI and 0.39 and 0.039 mg/kg of KIO_3 , the antioxidant activity based on free-radical scavenging indices (ABTS and DPPH assays) did not change.

Moreover, according to Krzepiřko et al. [76], iodization of radish sprouts did not affect the total antioxidant capacity of hydrophilic antioxidants measured by the ABTS method or hydrophobic antioxidants measured by the DPPH method in either cultivar. In contrast, Blasco et al. [77] showed increased antioxidant activity in lettuce iodized with KI.

Our studies showed that, in fortifying with KIO_3 at 3.9 mg/100 g (2.3 mg/100 g of iodine), the capacity to scavenge the ABTS $\bullet^+$ and DPPH $\bullet$ radicals decreased. This applied to all pumpkin varieties.

An earlier study confirmed that KI and KIO₃ have different pro- and antioxidative properties; KI is the reductant, while KIO₃ is the oxidant [78–80]. The research of Iwan et al. [48] showed the prooxidative effects of KIO₃ when this prooxidant was used in doses resulting in physiological concentrations of iodine in the thyroid. According to Milczarek [49], KIO₃ increased lipid peroxidation in porcine thyroid homogenates in concentrations ≥ 2.5 mM. The damaging effect of KIO₃ increased gradually from the concentration of 2.5 mM to 10 mM. The strongest damaging effect was observed at the KIO₃ concentration of 10 mM. The research of Bürgi et al. confirmed the oxidative potential of iodate [81]. However, it was confirmed that, among three halogenate salts, i.e., iodate, bromate, and chlorate, the first was characterized by the lowest redox potential [49,81]. At the same time, iodine used as KI did not reveal in the present study any toxic effects on membrane lipids, and it even prevented experimentally induced lipid peroxidation when used in the same range of concentrations. This study supported that the use of KI in iodine fortification is safer than KIO₃, in terms of their influence on oxidative damage to macromolecules [49].

An earlier study also confirmed that iodine, especially iodate, may react with oxidizable substances [82]. Previous research also confirmed the correlation between the content of bioactive compounds and the pumpkin pulp's antioxidant activity. According to Krzepidło et al. [76], Kulczyński and Gramza [64], and Stryjecka et al. [83], the major antioxidant compounds in plants are phenolic compounds, ascorbic acid, and compounds containing thiol groups. It was confirmed that fortification with high levels of iodine reduced the content of phenolic compounds [76] and may react with oxidizable substances [78]. This decrease in antioxidant activity in the presence of KIO₃ at high concentrations can also be related to the reactions of iodine with antioxidant proteins [84–86]. It was found that a polysaccharide with a low molecular weight (3.5 kDa) extracted from pumpkin displayed antioxidant activities toward free radicals [23]. Other research suggested a relationship among the formation of sulfur compounds (sulfhydryl and disulfide groups), amino acids (cysteine), and high concentrations of iodine [87]. This was confirmed by the better-known substitution reactions of iodine with proteins involving tyrosine or histidine. Similarly, an earlier study confirmed that higher contents of available lysine characterized the meatballs iodized with KI than those iodized with KIO₃ [88]. A relationship was found among the formation of these complexes, protein function changes, and antioxidant activity. The conclusions of Hassan (2018) suggested a relationship between the antioxidant activity of products with pumpkin and vitamin C content [24]. Other research confirmed a dependence between the degradation of ascorbic acid to dehydroascorbic acid (or reverse) and a high concentration of iodine. Ascorbic acid is a strong reducing agent that quenches any singlet oxygen present, formed during oxidation reactions in foods. Ascorbic acid may react preferentially with iodate, if present, rather than oxygen and, thus, be lost as an antioxidant.

Only a few studies have been performed until now to compare the antioxidant effects of iodine present in two different sources, namely, KI and KIO₃. Therefore, in future studies, it is worthwhile to further develop this topic by studying, for example, the negative effect of a more varied range of concentrations of iodine and the possibility of the interaction of iodine with other ingredients of vegetables and related oxidative effects. Particular regard should be given to analyzing the relationship between different carbohydrate–protein profiles of the pumpkin fortified with iodine and their antioxidant stability.

5. Conclusions

High recovery of the introduced iodine in all investigated pumpkin varieties after drying and high stability during storage make them an attractive source of the matrix for iodine. Pumpkins of all varieties can be fortified with iodine, with higher stability obtained using KIO₃. However, the research on all pumpkin varieties fortified with KIO₃ at 3.9 mg/100 g (2.3 mg/100 g of iodine) confirmed a statistically significant decrease in free-radical scavenging. Therefore, for maximum effectiveness in pumpkin's free-radical

scavenging indices, it is suggested to introduce iodine in the form of KI and KIO₃, but in controlled concentrations. KIO₃ should be added at a maximum amount of 0.39 mg/100 g.

Therefore, to maintain iodine stability and the high antioxidant activity of pumpkin, it is necessary to consider iodine addition to the systems in concentrations that limit their interactions.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/foods12142792/s1>: Table S1. Iodine content [mg/100 g] in selected varieties of pumpkin: Spaghetti (Sp), Delicata (DI), Butternut Squash (BtnS), Butterkin (Btk), Shishigatani (Ss), Butternut Orange (BtnO), and Muscat Provence (MsP), fortified with KIO₃; Table S2. Iodine content [mg/100 g] in selected varieties of pumpkin Spaghetti (Sp), Delicata (DI), Butternut Squash (BtnS), Butterkin (Btk), Shishigatani (Ss), Butternut Orange (BtnO), and Muscat Provence (MsP), fortified with KI in concentration; Table S3. The ABTS^{•+}-scavenging capacity of selected varieties of pumpkin: Spaghetti (Sp), Delicata (DI), Butternut Squash (BtnS), Butterkin (Btk), Shishigatani (Ss), Butternut Orange (BtnO), and Muscat Provence (MsP), fortified with iodine KI and KIO₃ (mg Trolox/100 g dm); Table S4. The DPPH[•]-scavenging capacity of selected varieties of pumpkin: Spaghetti (Sp), Delicata (DI), Butternut Squash (BtnS), Butterkin (Btk), Shishigatani (Ss), Butternut Orange (BtnO), and Muscat Provence (MsP), fortified with iodine KI and KIO₃ (mg Trolox/100 g dm).

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

Funding: Publication was co-financed within the framework of the Polish Ministry of Science and Higher Education's program "Regional Excellence Initiative" in the years 2019–2023 (No. 005/RID/2018/19; financing amount 12,000,000.00 PLN).

Data Availability Statement: Not applicable.

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

References

1. Aziz, A.; Noreen, S.; Khalid, W.; Ejaz, A.; Faiz, I.; Munir, A.; Javed, M.; Ercisli, S.; Okcu, Z.; Marc, R.A.; et al. Pumpkin and Pumpkin Byproducts: Phytochemical Constitutes, Food Application and Health Benefits. *ACS Omega* **2023**, *8*, 23346–23357. [CrossRef]
2. Muimba-Kankolongo, A. Vegetable Production. In *Food Crop Production by Smallholder Farmers in Southern Africa*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2018; ISBN 9780128143834.
3. del Pilar Ramírez-Anaya, J.; Castañeda-Saucedo, M.C.; Olalla-Herrera, M.; Villalón-Mir, M.; de la Serrana, H.L.G.; Samaniego-Sánchez, C. Changes in the antioxidant properties of extra virgin olive oil after cooking typical mediterranean vegetables. *Antioxidants* **2019**, *8*, 246. [CrossRef]
4. Yadav, D.K.; Rai, R.; Kumar, N.; Singh, S.; Misra, S.; Sharma, P.; Shaw, P.; Pérez-Sánchez, H.; Mancera, R.L.; Choi, E.H.; et al. New arylated benzo[h]quinolines induce anti-cancer activity by oxidative stress-mediated DNA damage. *Sci. Rep.* **2016**, *6*, 38128. [CrossRef] [PubMed]
5. Hussain, A.; Kausar, T.; Sehar, S.; Sarwar, A.; Ashraf, A.H.; Jamil, M.A.; Noreen, S.; Rafique, A.; Iftikhar, K.; Qudoods, M.Y.; et al. A Comprehensive review of functional ingredients, especially bioactive compounds present in pumpkin peel, flesh and seeds, and their health benefits. *Food Chem. Adv.* **2022**, *1*, 100067. [CrossRef]
6. Dhiman, A.K.; Sharma, K.D.; Attri, S. Functional constituents and processing of pumpkin: A review. *J. Food Sci. Technol.* **2009**, *46*, 411–417.
7. de Almeida, A.B.; de Lima, T.M.; de Oliveira Filho, J.G.; Santana, R.V.; Lima, D.S.; Moreira, E.A.; Egea, M.B. Relation between physicochemical characteristics and sensory profiles of cooked pumpkin varieties. *Emir. J. Food Agric.* **2019**, *31*, 697–700. [CrossRef]
8. Aljahani, A.H.; Al-Khuarieef, A.N. Effect of mixing wheat flour with pumpkin and dates on the nutritional and sensory characteristics of cake. *Pak. J. Nutr.* **2017**, *16*, 273–278. [CrossRef]
9. Liubych, V.; Novikov, V.; Pushka, O.; Pushka, I.; Cherchel, V.; Kyrpa, M.; Kolibabchuk, T.; Kirian, V.; Moskalets, V.; Moskalets, T. Development of the recipe of pasta with pumpkin flour. *EUREKA Life Sci.* **2023**, *1*, 57–65. [CrossRef]
10. Hussain, A.; Kausar, T.; Jamil, M.A.; Noreen, S.; Iftikhar, K.; Rafique, A.; Iqbal, M.A.; Majeed, M.A.; Qudoods, M.Y.; Aslam, J.; et al. In Vitro Role of Pumpkin Parts as Pharma-Foods: Antihyperglycemic and Antihyperlipidemic Activities of Pumpkin Peel, Flesh, and Seed Powders, in Alloxan-Induced Diabetic Rats. *Int. J. Food Sci.* **2022**, *2022*, 4804408. [CrossRef]

11. Murzaini, N.M.N.; Taip, F.S.; Aziz, N.A.; Rahman, N.A.A. Effect of pre-treatment in producing pumpkin powder using air fryer and its application in 'Bingka' baking. *Curr. Res. Nutr. Food Sci.* **2020**, *8*, 48–64. [\[CrossRef\]](#)
12. Kim, C.J.; Kim, H.W.; Hwang, K.E.; Song, D.H.; Ham, Y.K.; Choi, J.H.; Kim, Y.B.; Choi, Y.S. Effects of dietary fiber extracted from pumpkin (*Cucurbita maxima* Duch.) on the physico-chemical and sensory characteristics of reduced-fat frankfurters. *Korean J. Food Sci. Anim. Resour.* **2016**, *36*, 309–318. [\[CrossRef\]](#)
13. de Escalada Pla, M.F.; Flores, S.K.; Genevois, C.E. Innovative strategies and nutritional perspectives for fortifying pumpkin tissue and other vegetable matrices with iron. *Food Sci. Hum. Wellness* **2020**, *9*, 103–111. [\[CrossRef\]](#)
14. Baldassano, S.; Di Gaudio, F.; Sabatino, L.; Caldarella, R.; De Pasquale, C.; Di Rosa, L.; Nuzzo, D.; Picone, P.; Vasto, S. Biofortification: Effect of Iodine Fortified Food in the Healthy Population, Double-Arm Nutritional Study. *Front. Nutr.* **2022**, *9*, 871638. [\[CrossRef\]](#)
15. Famuwagun, A.A.; Odunlade, T.V.; Taiwo, K.A.; Gbadamosi, S.O.; Oyedele, D.J.; Adebooye, O.C. Some chemical compositions and sensory properties of wheat bread fortified with fluted pumpkin leaf slurry. *Acta Hort.* **2019**, *1238*, 117–128. [\[CrossRef\]](#)
16. Minarovičová, L.; Lauková, M.; Kohajdová, Z.; Karovičová, J.; Kuchtová, V. Effect of pumpkin powder incorporation on cooking and sensory parameters of pasta. *Potravin. Slovak J. Food Sci.* **2017**, *11*, 373–379. [\[CrossRef\]](#)
17. Ghosh, P.; Rana, S.S. Physicochemical, nutritional, bioactive compounds and fatty acid profiling of Pumpkin flower (*Cucurbita maxima*), as a potential functional food. *SN Appl. Sci.* **2021**, *3*, 1–14. [\[CrossRef\]](#)
18. Stepniowska, A.; Czech, A.; Sujak, A.; Matusevicius, P.; Chałabis-Mazurek, A. The effect of pumpkin varieties on the content of selected toxic elements from south-eastern Poland. *J. Food Compos. Anal.* **2020**, *94*, 103632. [\[CrossRef\]](#)
19. Montesano, D.; Rocchetti, G.; Putnik, P.; Lucini, L. Bioactive profile of pumpkin: An overview on terpenoids and their health-promoting properties. *Curr. Opin. Food Sci.* **2018**, *22*, 81–87. [\[CrossRef\]](#)
20. Buzigi, E.; Pillay, K.; Siwela, M. Potential of pumpkin to combat vitamin A deficiency during complementary feeding in low and middle income countries: Variety, provitamin A carotenoid content and retention, and dietary reference intakes. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2022**, *62*, 6103–6112. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
21. Salima, B.; Seloua, D.; Djamel, F.; Samir, M. Structure of pumpkin pectin and its effect on its technological properties. *Appl. Rheol.* **2022**, *32*, 34–55. [\[CrossRef\]](#)
22. Sharma, A.; Minh Duc, N.T.; Luu Lam Thang, T.; Nam, N.H.; Ng, S.J.; Abbas, K.S.; Huy, N.T.; Marušić, A.; Paul, C.L.; Kwok, J.; et al. A Consensus-Based Checklist for Reporting of Survey Studies (CROSS). *J. Gen. Intern. Med.* **2021**, *36*, 3179–3187. [\[CrossRef\]](#)
23. Li, F.; Wei, Y.; Liang, L.; Huang, L.; Yu, G.; Li, Q. A novel low-molecular-mass pumpkin polysaccharide: Structural characterization, antioxidant activity, and hypoglycemic potential. *Carbohydr. Polym.* **2021**, *251*, 117090. [\[CrossRef\]](#)
24. Hassan, M.F.Y.; Barakat, H. Effect of Carrot and Pumpkin Pulps Adding on Chemical, Rheological, Nutritional and Organoleptic Properties of Ice Cream. *Food Nutr. Sci.* **2018**, *09*, 969–982. [\[CrossRef\]](#)
25. de Escalada Pla, M.F.; Campos, C.A.; Gerschenson, L.N.; Rojas, A.M. Pumpkin (*Cucurbita moschata* Duchesne ex Poirlet) mesocarp tissue as a food matrix for supplying iron in a food product. *J. Food Eng.* **2009**, *92*, 361–369. [\[CrossRef\]](#)
26. Szymandera-Buszk, K.; Piechocka, J.; Zaremba, A.; Przeor, M.; Jędrusek-Golińska, A. Pumpkin, Cauliflower and Broccoli as New Carriers of Thiamine Compounds for Food Fortification. *Foods* **2021**, *10*, 578. [\[CrossRef\]](#)
27. Wawrzyniak, N.; Gramza-Michałowska, A.; Pruszyńska-Oszmałek, E.; Sassek, M.; Suliburska, J. Effects of Calcium Lactate-Enriched Pumpkin on Calcium Status in Ovariectomized Rats. *Foods* **2022**, *11*, 2084. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
28. Zaremba, A.; Waszkowiak, K.; Kmiecik, D.; Jędrusek-Golińska, A.; Jarzębski, M.; Szymandera-Buszk, K. The Selection of the Optimal Impregnation Conditions of Vegetable Matrices with Iodine. *Molecules* **2022**, *27*, 3351. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
29. Hatch-McChesney, A.; Lieberman, H.R. Iodine and Iodine Deficiency: A Comprehensive Review of a Re-Emerging Issue. *Nutrients* **2022**, *14*, 3474. [\[CrossRef\]](#)
30. World Health Organization. *Urinary Iodine Concentrations for Determining Iodine Status in Populations*; WHO: Geneva, Switzerland, 2013; pp. 1–5.
31. Kreła-Kaźmierczak, I.; Czarnywojtek, A.; Skoracka, K.; Rychter, A.M.; Ratajczak, A.E.; Szymczak-Tomczak, A.; Ruchała, M.; Dobrowolska, A. Is there an ideal diet to protect against iodine deficiency? *Nutrients* **2021**, *13*, 513. [\[CrossRef\]](#)
32. Zaremba, A.; Gramza-Michałowska, A.; Pal, K.; Szymandera-Buszk, K. The Effect of a Vegan Diet on the Coverage of the Recommended Dietary Allowance (RDA) for Iodine among People from Poland. *Nutrients* **2023**, *15*, 1163. [\[CrossRef\]](#)
33. Dawczynski, C.; Weidauer, T.; Richert, C.; Schlattmann, P.; Dawczynski, K.; Kiehntopf, M. Nutrient Intake and Nutrition Status in Vegetarians and Vegans in Comparison to Omnivores—The Nutritional Evaluation (NuEva) Study. *Front. Nutr.* **2022**, *9*, 819106. [\[CrossRef\]](#)
34. Dineva, M.; Rayman, M.P.; Bath, S.C. Iodine status of consumers of milk-alternative drinks v. cows' milk: Data from the UK National Diet and Nutrition Survey. *Br. J. Nutr.* **2021**, *126*, 28–36. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
35. Brantsæter, A.L.; Knutsen, H.K.; Johansen, N.C.; Nyheim, K.A.; Erlund, I.; Meltzer, H.M.; Henjum, S.; Leung, A.M.; LaMar, A.; He, X.; et al. Inadequate Iodine Intake in Population Groups Defined by Age, Life Stage and Vegetarian Dietary Practice in a Norwegian Convenience Sample. *Nutrients* **2018**, *10*, 230. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
36. Chanthilath, B.; Chavasit, V.; Chareonkiatkul, S.; Judprasong, K. Iodine stability and sensory quality of fermented fish and fish sauce produced with the use of iodated salt. *Food Nutr. Bull.* **2009**, *30*, 183–188. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
37. Dasgupta, P.K.; Liu, Y.; Dyke, J.V. Iodine nutrition: Iodine content of iodized salt in the United States. *Environ. Sci. Technol.* **2008**, *42*, 7025. [\[CrossRef\]](#)

38. WHO. *Salt as a Vehicle for Fortification: Report of a WHO Expert Consultation*; WHO Press: Geneva, Switzerland, 2007; ISBN 978-92-4-159678-7.
39. Eveleigh, E.; Coneyworth, L.; Zhou, M.; Burdett, H.; Malla, J.; Nguyen, V.H.; Welham, S. Vegans and vegetarians living in Nottingham (UK) continue to be at risk of iodine deficiency. *Br. J. Nutr.* **2022**, *129*, 1510–1527. [\[CrossRef\]](#)
40. WHO. *Universal Salt Iodization and Sodium Intake Reduction Compatible, Cost-Effective Strategies*; Public Health Benefit; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2022; pp. 1–10. Available online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240053717> (accessed on 22 August 2022).
41. WHO. *Reducing Salt Intake in Population*; WHO Press: Geneva, Switzerland, 2006.
42. Yadav, M.; Jain, S.; Tomar, R.; Prasad, G.B.K.S.; Yadav, H. Medicinal and biological potential of pumpkin: An updated review. *Nutr. Res. Rev.* **2010**, *23*, 184–190. [\[CrossRef\]](#)
43. Wachowska, M.; Adamczak, M. Importance of Iodine Fortification in Food Production: Human Health and Technology. *J. Elem.* **2023**, *28*, 199–222. [\[CrossRef\]](#)
44. Thomson, B.M. Stability of added iodine in processed cereal foods. *Food Addit. Contam.* **2009**, *26*, 25–31. [\[CrossRef\]](#)
45. Anarado, C.J.O.; Anarado, C.E.; Areh, R.I.; Ifoh, N.; Eze, E.O.; Ikeakor, E. Iodine Fortification Study of Some Common African Vegetables. *J. Agric. Chem. Environ.* **2019**, *08*, 172–183. [\[CrossRef\]](#)
46. Chadare, F.J.; Idohou, R.; Nago, E.; Affonfere, M.; Agossadou, J.; Fassinou, T.K.; Kénou, C.; Honfo, S.; Azokpota, P.; Linnemann, A.R.; et al. Conventional and food-to-food fortification: An appraisal of past practices and lessons learned. *Food Sci. Nutr.* **2019**, *7*, 2781–2795. [\[CrossRef\]](#)
47. Smoleń, S.; Czernicka, M.; Kowalska, I.; Kęska, K.; Halka, M.; Grzebelus, D.; Grzanka, M.; Skoczylas, Ł.; Pitala, J.; Koronowicz, A.; et al. New Aspects of Uptake and Metabolism of Non-organic and Organic Iodine Compounds—The Role of Vanadium and Plant-Derived Thyroid Hormone Analogs in Lettuce. *Front. Plant Sci.* **2021**, *12*, 1–26. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
48. Iwan, P.; Stepniak, J.; Karbownik-Lewinska, M. Pro-oxidative effect of kio3 and protective effect of melatonin in the thyroid—Comparison to other tissues. *Life* **2021**, *11*, 592. [\[CrossRef\]](#)
49. Milczarek, M.; Stepniak, J.; Lewinski, A.; Karbownik-Lewinska, M. Potassium iodide, but not potassium iodate, as a potential protective agent against oxidative damage to membrane lipids in porcine thyroid. *Thyroid Res.* **2013**, *6*, 1. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
50. Kulczyński, B.; Sidor, A.; Gramza-Michałowska, A. Antioxidant potential of phytochemicals in pumpkin varieties belonging to *Cucurbita moschata* and *Cucurbita pepo* species. *CYTA J. Food* **2020**, *18*, 472–484. [\[CrossRef\]](#)
51. Hussain, A.; Jamil, M.A. Antioxidant and Antimicrobial Properties of Pumpkin (*Cucurbita maxima*) Peel, Flesh and Seeds Powders. *J. Biol. Agric. Healthc.* **2021**, *11*, 42–51. [\[CrossRef\]](#)
52. Santos, M.E.; Rodriguez, J.A.; Lorenzo, J.M.; Mondrag, A.C.; Pateiro, M.; Guti, E.; Ferreira, T.A. Antioxidant Effect of Pumpkin Flower (*Cucurbita maxima*) in Chicken Patties. *Foods* **2022**, *11*, 2258. [\[CrossRef\]](#)
53. Szymandera-Buszka, K.; Waszkowiak, K.; Kaczmarek, A.; Zaremba, A. Wheat dietary fibre and soy protein as new carriers of iodine compounds for food fortification—The effect of storage conditions on the stability of potassium iodide and potassium iodate. *LWT* **2021**, *137*, 110424. [\[CrossRef\]](#)
54. Kuhne, D.; Wirth, F.; Wagner, H. Iodine determination in iodized meat products. *Fleischwirtschaft* **1993**, *73*, 175–178.
55. Moxon, R.E.; Dixon, E.J. Semi-automatic method for the determination of total iodine in food. *Analyst* **1980**, *105*, 344–352. [\[CrossRef\]](#)
56. Chu, Y.H.; Chang, C.L.; Hsu, H.F. Flavonoid content of several vegetables and their antioxidant activity. *J. Sci. Food Agric.* **2000**, *80*, 561–566. [\[CrossRef\]](#)
57. Nuutila, A.M.; Puupponen-Pimia, R.; Aarni, M.; Oksman-Caldentey, K.M. Comparison of antioxidant activities of onion and garlic extracts by inhibition of lipid peroxidation and radical scavenging activity. *Food Chem.* **2003**, *81*, 485–493. [\[CrossRef\]](#)
58. Re, R.; Pellegrini, N.; Protegente, A.; Pannala, A.; Yang, M.C.; Rice-Evans, C. Antioxidant activity an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Rad. Biol. Med.* **1999**, *26*, 1231–1237. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
59. Rana, R.; Raghuvanshi, R.S. Effect of different cooking methods on iodine losses. *J. Food Sci. Technol.* **2013**, *50*, 1212–1216. [\[CrossRef\]](#)
60. Diosady, L.L.; Mannar, V.M.G. Stability of Iodine in Iodized Salt. In Proceedings of the 8th World Salt Symposium, Hague, The Netherlands, 7–11 May 2000; Geertman, R.M., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2000; pp. 977–982.
61. Shi, H. Adding an oxidant increases the stability of iodine in iodized salt. *Food Nutr. Bull.* **2004**, *25*, 137–141. [\[CrossRef\]](#)
62. Diosady, L.L.; Alberti, J.O.; Venkatesh Mannar, M.G.; FitzGerald, S. Stability of iodine in iodized salt used for correction of iodine-deficiency disorders. II. *Food Nutr. Bull.* **1998**, *19*, 240–250. [\[CrossRef\]](#)
63. Ramachandran, L.K. Protein-iodine interaction. *Chem. Rev.* **1956**, *56*, 199–218. [\[CrossRef\]](#)
64. Kulczynski, B.; Gramza-Michałowska, A. The profile of secondary metabolites and other bioactive compounds in cucurbita Pepo, L. and cucurbita moschata pumpkin cultivars. *Molecules* **2019**, *24*, 2945. [\[CrossRef\]](#)
65. Gliemmo, M.F.; Latorre, M.E.; Gerschenson, L.N.; Campos, C.A. Color stability of pumpkin (*Cucurbita moschata*, Duchesne ex Poiré) puree during storage at room temperature: Effect of pH, potassium sorbate, ascorbic acid and packaging material. *LWT* **2009**, *42*, 196–201. [\[CrossRef\]](#)
66. Helmyati, S.; Narendra, Y.H.; Septi, P.; Rochyana, I.; Endri, Y. The stability of double fortification of salt with iodine and iron in different storage conditions. *Int. Food Res. J.* **2014**, *21*, 2183–2187.

67. Cook, M.K.; Dial, A.R.; Hendy, I.L. Iodine stability as a function of pH and its implications for simultaneous multi-element ICP-MS analysis of marine carbonates for paleoenvironmental reconstructions. *Mar. Chem.* **2022**, *245*, 104148. [\[CrossRef\]](#)
68. Lobo, V.; Patil, A.; Phatak, A.; Chandra, N. Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. *Pharmacogn. Rev.* **2010**, *4*, 118–126. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
69. Apak, R.; Calokerinos, A.; Gorinstein, S.; Segundo, M.A.; Hibbert, D.B.; Gülçin, I.; Demirci Çekiç, S.; Güçlü, K.; Özyürek, M.; Çelik, S.E.; et al. Methods to evaluate the scavenging activity of antioxidants toward reactive oxygen and nitrogen species (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.* **2022**, *94*, 87–144. [\[CrossRef\]](#)
70. Osendarp, S.J.M.; Martinez, H.; Garrett, G.S.; Neufeld, L.M.; De-Regil, L.M.; Vossenaar, M.; Darnton-Hill, I. Large-Scale Food Fortification and Biofortification in Low- and Middle-Income Countries: A Review of Programs, Trends, Challenges, and Evidence Gaps. *Food Nutr. Bull.* **2018**, *39*, 315–331. [\[CrossRef\]](#)
71. Indrianingsih, A.W.; Rosyida, V.T.; Apriyana, W.; Nur Hayati, S.; Nisa, K.; Darsih, C.; Kusumaningrum, A.; Ratih, D.; Indirayati, N. Comparisons of antioxidant activities of two varieties of pumpkin (*Cucurbita moschata* and *Cucurbita maxima*) extracts. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2019**, *251*, 012021. [\[CrossRef\]](#)
72. Bai, Y.; Zhang, M.; Atluri, C.S.; Chena, J.; Gilbert, R. Relations between digestibility and structures of pumpkin starches and pectins. *Food Hydrocoll.* **2020**, *106*, 105894. [\[CrossRef\]](#)
73. Ji, X.; Peng, B.; Ding, H.; Cui, B.; Nie, H.; Yan, Y. Purification, Structure and Biological Activity of Pumpkin Polysaccharides: A Review. *Food Rev. Int.* **2021**, *39*, 307–319. [\[CrossRef\]](#)
74. Lin, Y.S.; Huang, W.Y.; Ho, P.Y.; Hu, S.Y.; Lin, Y.Y.; Chen, C.Y.; Chang, M.Y.; Huang, S.L. Effects of storage time and temperature on antioxidants in juice from *Momordica charantia* L. and *Momordica charantia* L. var. *abbreviata* ser. *Molecules* **2020**, *25*, 3614. [\[CrossRef\]](#)
75. Korus, A. Effect of preliminary processing, method of drying and storage temperature on the level of antioxidants in kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) leaves. *LWT* **2011**, *44*, 1711–1716. [\[CrossRef\]](#)
76. Krzepiłko, A.; Świącilo, A.; Zych-Weżyk, I. The antioxidant properties and biological quality of radish seedlings biofortified with iodine. *Agronomy* **2021**, *11*, 2011. [\[CrossRef\]](#)
77. Blasco, B.; Rios, J.J.; Cervilla, L.M.; Sánchez-Rodríguez, E.; Ruiz, J.M.; Romero, L. Iodine biofortification and antioxidant capacity of lettuce: Potential benefits for cultivation and human health. *Ann. Appl. Biol.* **2008**, *152*, 289–299. [\[CrossRef\]](#)
78. Cao, X.; Ma, W.; Liu, L.; Xu, J.; Wang, H.; Li, X.; Wang, J.; Zhang, J.; Wang, Z.; Gu, Y. Analysis of potassium iodate reduction in tissue homogenates using high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *J. Trace Elem. Med. Biol.* **2015**, *32*, 1–6. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
79. Liu, L.; Li, X.; Wang, H.; Cao, X.; Ma, W. Reduction of iodate in iodated salt to iodide during cooking with iodine as measured by an improved HPLC/ICP-MS method. *J. Nutr. Biochem.* **2017**, *42*, 95–100. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
80. Winger, R.J.; König, J.; House, D.A. Technological issues associated with iodine fortification of foods. *Trends Food Sci. Technol.* **2008**, *19*, 94–101. [\[CrossRef\]](#)
81. Bürgi, H.; Schaffner, T.; Seiler, J.P. The toxicology of iodate: A review of the literature. *Thyroid* **2001**, *11*, 449–456. [\[CrossRef\]](#)
82. Li, X.; Cao, X.; Li, J.; Xu, J.; Ma, W.; Wang, H.; Wang, J.; Zhang, Y. Effects of high potassium iodate intake on iodine metabolism and antioxidant capacity in rats. *J. Trace Elem. Med. Biol.* **2020**, *62*, 126575. [\[CrossRef\]](#)
83. Stryjecka, M.; Krochmal-Marczak, B.; Cebulak, T.; Kiełtyka-Dadasiewicz, A. Assessment of Phenolic Acid Content and Antioxidant Properties of the Pulp of Five Pumpkin Species Cultivated in Southeastern Poland. *Int. J. Mol. Sci.* **2023**, *24*, 8621. [\[CrossRef\]](#)
84. Marchetti, A.; Pizzi, A.; Bergamaschi, G.; Demitri, N.; Stollberg, U.; Diederichsen, U.; Pigliacelli, C.; Metrangolo, P. Fibril Structure Demonstrates the Role of Iodine Labelling on a Pentapeptide Self-Assembly. *Chem. A Eur. J.* **2022**, *28*, e202104089. [\[CrossRef\]](#)
85. Liu, Z.; Julian, R.R. Deciphering the Peptide Iodination Code: Influence on Subsequent Gas-Phase Radical Generation with Photodissociation ESI-MS. *J. Am. Soc. Mass Spectrom.* **2009**, *20*, 965–971. [\[CrossRef\]](#)
86. Gonzali, S.; Kiferle, C.; Perata, P. Iodine biofortification of crops: Agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability. *Curr. Opin. Biotechnol.* **2017**, *44*, 16–26. [\[CrossRef\]](#)
87. Packer, J.E. A reinvestigation of the oxidation of cysteine by Br_2^{2-} and I_2^{2-} . Evidence for $\text{CyS} \cdot^-$, Br^- and $\text{CyS} \cdot^-$, I^- . *J. Chem. Soc. Perkin Trans.* **1987**, *2*, 1015–1024. [\[CrossRef\]](#)
88. Heś, M.; Waszkowiak, K.; Szymandera-Buszk, K. The effect of iodine salts on lipid oxidation and changes in nutritive value of protein in stored processed meats. *Meat Sci.* **2012**, *92*, 139–143. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

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.



Antioxidant properties of beetroot fortified with iodine

Agata Jankowska^a 

Joanna Kobus-Cisowska^a 

Krystyna Szymandera-Buszk^{a*} 

^a Poznań University of Life Sciences, Faculty of Food Science and Nutrition, Poznań, Poland

Article info

Received: 28 July 2023

Accepted: 01 December 2023

Published online: 21 December 2023

Keywords

iodine fortification

vegetables

beetroot

oxidative stability

This study aimed to investigate the use of beetroot as a carrier of potassium iodide (KI) and potassium iodate (KIO₃) at different concentrations (2.3, 0.23, and 0.023 mg kg⁻¹). It was hypothesised that the concentrations and forms of iodine fortification affect the antioxidant activity of beetroot. The results showed a high recovery of the introduced iodine, especially for KIO₃.

However, a relationship it was confirmed between the forms, and concentration of iodine and the free radical scavenging (the ABTS^{•+} and the DPPH[•]) test results. In the systems with the iodine concentration at 0.023; 0.23 mg kg⁻¹, the antioxidant activity of the beetroot did not change. Nevertheless, a statistically significant decrease in free radical scavenging was confirmed for the beetroot fortified with the KIO₃ concentration of 3.9 mg kg⁻¹ (2.3 mg kg⁻¹ of iodine). Therefore, maximum amount of KIO₃ addition to beetroot should be 0.39 mg kg⁻¹.

DOI: <https://doi.org/10.53502/TXIY9852>

Published by Łukasiewicz Research Network-Poznań Institute of Technology. This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>.

1. Introduction

Food fortification is the most common strategy to alleviate human nutrient deficiencies [1]. Approximately 30% of the world's population remains at risk of iodine deficiency [2]. Programs for food fortification with iodine are carried out in many countries worldwide to minimise the risk of this element's deficiency in the diet [3, 4]. One of the most common fortification strategies is salt iodization. Nonetheless, in 2006, the World Health Organisation recommended limiting salt intake to 5 g/day as it is a risk factor for atherosclerosis and hypertension [5]. Consequently, the iodine supply from this source can be limited [6–8]. It is, therefore, necessary to find new carriers for iodine salts. Preliminary studies showed the possibility of using beetroot as a carrier of iodine salt with the

simultaneous design of a cereal product with its addition [9]. The fortification of beetroot may constitute an attractive alternative source of iodine for all consumers, especially vegetarians and vegans. Beetroot is commonly consumed in addition to juice, powder, bread, and gels. They are consumed in boiled, oven-dried, pickled, and pureed forms. Beetroot supplements are also an important source of dietary polyphenols owing to their many health benefits [10]. Many studies also confirm the antioxidant properties of beetroot [11–14]. However, preliminary studies indicate the existence of certain correlations between the antioxidant activity and the iodine content [15]. The antioxidant activity of pumpkin in the presence of iodine was found to be variable. A statistically significant decrease in free radical

* Corresponding author: krystyna.szymandera-buszk@up.poznan.pl

scavenging was confirmed for pumpkin varieties fortified with a KIO_3 concentration of 2.3 mg kg^{-1} . In contrast, fortification with a KI concentration of 2.3 mg kg^{-1} caused no significant changes in the antioxidant activity in the iodine-fortified pumpkin. Also, such an impact was not found at lower concentrations of both iodide and iodate [16].

2. Materials and methods

2.1. Material

Beetroot (*Beta vulgaris* L. subsp. *Vulgaris*, var. Czerwona Kula) was used as the matrix for the iodine. The plant material was from marketplaces in the region of Poland - Wielkopolska.

2.1.1. Conditions of impregnation

The samples were steamed (100°C ; 10 min) in a convection oven (Rational, Landsberg am Lech, Germany), drained and homogenised (homogenizer—Foss, Hilleroed, Denmark). The next impregnation stage was soaking the beetroot samples in an aqueous solution of KI/ KIO_3 . In the research, the model adopted three variable iodine concentrations: 0.023 mg kg^{-1} (0.030 mg kg^{-1} of KI or 0.039 mg kg^{-1} of KIO_3 – low iodine level in food products), 0.23 mg kg^{-1} (0.30 mg kg^{-1} of KI or 0.39 mg kg^{-1}

Therefore, this study aimed to investigate to possibility of using beetroot as a carrier of potassium iodide (KI) and potassium iodate (KIO_3) at different concentrations. It was hypothesised that the concentrations of iodine fortification affect the antioxidant activity of fortified beetroot.

The product contained iodine in the amount below 0.003 mg kg^{-1} . The KI and KIO_3 constituted the sources of iodine (Merck, Germany).

of KIO_3 - natural iodine levels in foods from iodized salt) and 2.3 mg kg^{-1} (3.01 mg kg^{-1} of KI or 3.88 mg kg^{-1} of KIO_3 - fortified matrices for food fortification). The following impregnation conditions were assumed: the degree of hydration in the ratio 1:1 (m/v) and incubation at $-76^\circ\text{C}/12 \text{ h}$. Then the impregnated preparations were freeze-dried to a moisture content of 4–5%. Finally, the dried samples were homogenised (homogenizer—Foss, Hilleroed, Denmark).

2.1.2. Storage conditions of iodine sources

The impregnated and freeze-dried beetroot samples were stored in jars (black glass, closed with a screw

top, $d=7 \text{ cm}$, $h=10 \text{ cm}$). The influence of the storage conditions on the stability of KI and KIO_3 was tested during storage during 320 days at $21\pm1^\circ\text{C}$.

2.2. Methods

2.2.1. Stability of iodine

The quantitative changes in the total iodine (after drying and at 1, 60, 120, 180, 240 and 320 days of storage) were determined by means of the macro

chemical method with potassium thiocyanate described by Kuhne, Wirth, and Wagner [17], and subsequent colorimetric analysis [18].

2.2.2. Antioxidant activity

All the beetroot samples directly after drying and after 320 days of storage were taken for analysis of antioxidant activity. Ethanol extracts from beetroot were prepared by 2-h maceration of the dried beetroot with 80% ethanol (1:10 (m/v)) [19].

The antioxidant activity of the prepared ethanol extracts of beetroot with iodine was examined based on the free radical scavenging indices — the DPPH scavenging capacity (DPPH $^{\bullet}$) and the ABTS scavenging capability (ABTS $^{+\bullet}$).

The DPPH $^{\bullet}$ scavenging capacity [20, 21] was tested utilising spectrophotometric methods with the DPPH radical.

The ABTS $^{+\bullet}$ scavenging capability [22], was tested by means of spectrophotometric measurement of changes in the concentration of the ABTS radical cation (98%). The DPPH and ABTS scavenging capability was tested with regard to the scavenging capacity of Trolox (97%). The result was expressed as mg Trolox/100 g dry matter of extract.

3. Chemicals

The following chemicals were used: KI and KIO₃ — the sources of iodine (Merck, Germany); DPPH radical (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) (Sigma-Aldrich, Saint Louis, Missouri, USA); ABTS radical cation (2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt) (98%), (Sigma-Aldrich, Saint

Louis, Missouri, USA); Trolox (6-Hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchromane-2-carboxylic acid) (97%), (Sigma-Aldrich, Saint Louis, Missouri, USA). All the chemicals and solvents used in the tests were of an analytical grade.

4. Statistical analysis

The obtained results were subject to statistical analysis using STATISTICATM PL 13.3 (StatSoft, Cracow, Poland) software. The software was employed to calculate significant differences between the means ($p < 0.05$, analysis of variance ANOVA), and Tukey's mul

tipale range test. The iodine content and the antioxidant activity of the tested samples were analysed in 6 samples (2 independent samples and three measurements for each sample) (2 independent samples and three measurements for each sample).

5. Results and discussion

5.1. Iodine stability

Table 1 shows the iodine content (%) of the beetroot samples fortified with iodine KI and KIO₃ directly after drying and after storing. It was found that the differences in the iodine content in were in the range of 83-92% directly after drying, and 61-76% after storage. Previous data on the fortification of protein preparations and vegetables confirm the maximum reproducibility of iodine in fortified matrices at a similar level [16, 23]. High iodine stability in storage was

also confirmed. The analysis of variance (One-Way ANOVA test) revealed (Table 2) a statistically significant effect ($p < 0.05$) of the type of iodine compound used for fortification (KI, KIO₃). Both iodine forms exhibited a capacity to accumulate iodine in large amounts, with a higher concentration noted for KIO₃ than KI. Previous studies also confirmed the higher instability of iodine in the form of KI [24].

5.2. Antioxidant activity directly after drying and after 320 days of storage.

The results of our study confirmed the antiradical effect of beetroot with the DPPH• and ABTS^{•+} methods [10, 19].

The statistical analysis (Table 3) confirmed a relationship between the forms of iodine (KI/KIO₃) and the ABTS^{•+} and the DPPH• test results. The strongest relationship (one-way ANOVA test) was confirmed between the iodine concentration in the form KIO₃ and ABTS^{•+} ($F = 10248.00$; $p < 0.05$) and the DPPH• test results ($F = 95024.34$; $p < 0.05$). In the systems with the iodine concentration at 0.023 and 0.23 mg kg⁻¹ (0.030 and 0.301 mg kg⁻¹ of KI or 0.039 and 0.388 mg kg⁻¹ of KIO₃), the free-radical scavenging capacity indices (ABTS^{•+} and DPPH•) did not change. This was confirmed for the samples directly after drying and after 320 days of storage. The fortification with KI at 2.3 mg kg⁻¹ caused no significant changes in antioxidant activity in the iodine-fortified beetroot.

Nevertheless, in the samples directly after drying containing KIO₃ at 2.3 mg kg⁻¹, the capacity to terminate ABTS^{•+} and DPPH• decreased by 7% compared to the samples without iodine. This was also confirmed for the samples after storage. It was found that the capacity to terminate DPPH• decreased by 29% and ABTS^{•+} by 21%, compared to the samples without iodine.

An earlier study confirmed that KI and KIO₃ have different pro- and antioxidative properties; KI is the reductant, while KIO₃ is the oxidant [25, 26]. An earlier study also confirmed that iodine, especially iodate, may react with oxidizable substances [27]. It was found that lipid oxidation, the degradation of ascorbic acid, and changes in protein functions could be mediated through the presence of iodate. Additionally, it was confirmed that iodate in high concentrations with herbs damages rat thyroid follicular cells less, which may be related to the oxidant activity of iodate and the high antioxidant capacity of these herbs [28].

6. Conclusions

Beetroot can be fortified with iodine with a higher stability obtained using KIO_3 . The addition of iodine in the form of KI does not affect the free radical scavenging activity of beetroot. Nonetheless, the addition of KIO_3 at 3.9 mg kg^{-1} (2.3 mg kg^{-1} of iodine) confirmed

a statistically significant decrease in free radical scavenging. Therefore, for maximum effectiveness in beetroot free radical scavenging indices, it is suggested to introduce iodine in the form of KI and KIO_3 , but in controlled concentrations. The maximum addition of KIO_3 should be 0.39 mg kg^{-1} .

Table 1. Iodine content [%] in beetroot fortified with KIO_3 and KI

Iodine form	Iodine concentration [mg kg^{-1}]					
	0.023	standard deviation	0.23	standard deviation	2.30	standard deviation
	%		%		%	
<u>directly after drying</u>						
KI	83.27 ^{bA*}	0.15	83.28 ^{bB}	0.22	84.21 ^{bB}	0.11
KIO_3	91.25 ^{aB}	0.20	92.03 ^{aB}	0.21	92.10 ^{aA}	0.14
<u>after storage (320 days)</u>						
KI	61.25 ^{bA}	0.19	61.45 ^{bBA}	0.31	61.56 ^{bB}	0.19
KIO_3	73.58 ^{aB}	0.22	75.02 ^{aB}	0.11	75.98 ^{aA}	0.24

*Mean values ($n = 6$); different letters (lower case letters in same form of iodine; upper case letters in same concentration of iodine) denote significant difference at $p < 0.05$ (one-way ANOVA, and post hoc Tukey test).

Table 2. Statistical significance of predictors of variance models for changes in iodine content in fortified beetroot directly after drying and after 320 days of storage (one-way ANOVA test)

Predictors	SS	df	MSE	F-value	p-value
<u>directly after drying</u>					
Iodine concentration	2.42	2	1.21	0.06	0.94
Iodine form	303.81	1	303.81	1546.41	0.00
<u>after storage (320 days)</u>					
Iodine concentration	13.39	2	6.70	0.09	0.92
Iodine form	4081.20	1	4081.41	110.94	0.00

*SS – statistical significance; df - degrees of freedom; MSE - mean sum of squares.

Table 3. Statistical significance of predictors (iodine concentration) of covariance models for changes in ABTS^{•+} and DPPH[•] scavenging capacity in iodine-fortified beetroot directly after drying and 320 days of storage (one-way ANOVA test)

Predictors	SS	df	MSE	F-value	p-value
ABTS^{•+}					
<u>directly after drying</u>					
KIO_3	108.95	3	36.32	421.72	0.00
KI	0.15	3	0.05	264.12	0.00
<u>after 320 days of storage</u>					
KIO_3	204.96	3	68.32	10248.00	0.00
KI	2.43	3	0.81	1298.60	0.00
DPPH[•]					
<u>directly after drying</u>					
KIO_3	105.25	3	35.08	6102.21	0.00
KI	0.22	3	0.07	212.32	0.00
<u>after 320 days of storage</u>					
KIO_3	451.37	3	150.45	95024.34	0.00
KI	1.62	3	0.54	676.78	0.99

*SS – statistical significance; df - degrees of freedom; MSE - mean sum of squares

References

- [1] de Escalada Pla, M.F.; Campos C.A.; Gerschenson L.N.; Rojas A.M.: Pumpkin (*Cucurbita moschata* Duchesne ex Poir.) mesocarp tissue as a food matrix for supplying iron in a food product. *Journal of Food Engineering*, 2009, 92, 361–369, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.11.013>.
- [2] Hatch-McChesney A., Lieberman H.R.: Iodine and Iodine Deficiency: A Comprehensive Review of a Re-Emerging Issue. *Nutrients* 2022, 14, doi: <https://doi.org/10.3390/nu14173474>.
- [3] Chanthilath B., Chavasit V., Chareonkiatkul S., Judprasong K.: Iodine stability and sensory quality of fermented fish and fish sauce produced with the use of iodated salt. *Food and Nutrition Bulletin* 2009, 30, 183–188, doi: <https://doi.org/10.1177/15648265090300021>.
- [4] Dasgupta P.K., Liu Y., Dyke J. V.: Iodine nutrition: Iodine content of iodized salt in the United States. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42, 7025, doi: <https://doi.org/10.1021/es8016073>.
- [5] WHO Salt as a vehicle for fortification: report of a WHO expert consultation. WHO Press: Geneva, 2007; ISBN 978 92 4 159678 7.
- [6] Eveleigh E., Coneyworth L.; Zhou M., Burdett H., Malla J., Nguyen V.H., Welham S.: Vegans and vegetarians living in Nottingham (UK) continue to be at risk of iodine deficiency. *British Journal of Nutrition*, 2023, 129, 1510–1527, doi: <https://doi.org/10.1017/S0007114522000113>.
- [7] WHO. Universal salt iodization and sodium intake reduction compatible, cost – effective strategies. Public Heal. Benefit; World Heal. Organ. Geneva, Switzerland, 2022, 1–10, www: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240053717> (accessed on 22 August 2022).
- [8] Zaremba A., Gramza-Michalowska A., Pal K., Szymandera-Buszk K.: The Effect of a Vegan Diet on the Coverage of the Recommended Dietary Allowance (RDA) for Iodine among People from Poland. *Nutrients* 2023, 15, doi: <https://doi.org/10.3390/nu15051163>.
- [9] Zaremba A., Cichoń N., Szymandera-Buszk K.: Design of a plant product enriched with beetroot fortified with iodine. *Żywność dzisiaj. Lokalna czy globalna, tradycyjna czy innowacyjna?: Monografia pokonferencyjna*, Beszterda-Buszcak M., Przeor M., Eds., Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu: Poznań, 2022; 22–36 ISBN 978-83-67112-29-1.
- [10] Arazi H., Eghbali E.: Possible Effects of Beetroot Supplementation on Physical Performance Through Metabolic, Neuroendocrine, and Antioxidant Mechanisms: A Narrative Review of the Literature. *Frontiers in Nutrition* 2021, 8, 1–19, doi: <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.660150>.
- [11] Ramírez-Melo L.M., Cruz-Cansino N. del S., Delgado-Olivares L., Ramírez-Moreno E., Zafra-Rojas Q.Y., Hernández-Traspeña J.L., Suárez-Jacobo Á.: Optimization of antioxidant activity properties of a thermosonicated beetroot (*Beta vulgaris* L.) juice and further in vitro bioaccessibility comparison with thermal treatments. *Lwt* 2022, 154, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112780>.
- [12] Olumese F.E., Oboh H.A.: Antioxidant and Antioxidant capacity of raw and processed Nigerian Beetroot (*Beta vulgaris*). *Niger Journal of Basic and Applied Sciences*, 2016, 24, 35, doi: [10.4314/njbas.v24i1.6](https://doi.org/10.4314/njbas.v24i1.6)
- [13] Chen L., Zhu Y., Hu Z., Wu S., Jin C.: Beetroot as a functional food with huge health benefits: Antioxidant, antitumor, physical function, and chronic metabolomics activity. *Food Science and Nutrition*, 2021, 9(11), 6406–6420, doi: <https://doi.org/10.1002/fsn3.2577>.
- [14] Czapski J., Mikołajczyk K., Kaczmarek M.: Relationship between antioxidant capacity of red beet juice and contents of its betalain pigments. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 2009, 59, 119–122.
- [15] Iwan P., Stepniak J., Karbownik-Lewinska M.: Pro-oxidative effect of KIO₃ and protective effect of melatonin in the thyroid—comparison to other tissues. *Life* 2021, 11(6), 1–14, doi: <https://doi.org/10.3390/life11060592>.
- [16] Zaremba A., Heś M., Jędrusek-Golińska A., Przeor M., Szymandera-Buszk K.: The Antioxidant Properties of Selected Varieties of Pumpkin Fortified with Iodine in the Form of Potassium Iodide and Potassium Iodate. *Foods* 2023, 12(14), 2792, doi: <https://doi.org/10.3390/foods12142792>.
- [17] Kuhne D., Wirth F., Wagner H.: Iodine determination in iodized meat products. *Fleischwirtschaft* 1993, 73, 175–178.
- [18] Moxon R.E., Dixon E.J.: Semi-automatic method for the determination of total iodine in food. *Analyst* 1980, 105(1249), 344–352, doi: [10.1039/an9800500344](https://doi.org/10.1039/an9800500344).
- [19] Wołosiak R., Cheda K.: Właściwości przeciwutleniające buraków ćwikłowych i ich przetworów Wstęp. 2011, 2011.
- [20] Chu Y.H., Chang C.L., Hsu H.F.: Flavonoid content of several vegetables and their antioxidant activity. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 2000, 80, 561–566.
- [21] Nuutila A.M., Puupponen-Pimia R., Aarni M., Oksman-Caldentey K.M.: Comparison of antioxidant activities of onion and garlic extracts by inhibition of lipid peroxidation and radical scavenging activity. *Food Chem* 2003, 81, 485–493, doi: [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00476-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00476-4)
- [22] Re R., Pellegrini N., Protegente A., Pannala A., Yang M.C., Rice-Evans C.: Antioxidant activity an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 1999, 26, 1231–1237, doi: [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3).
- [23] Szymandera-Buszk K., Waszkowiak K., Kaczmarek A., Zaremba A.: Wheat dietary fibre and soy protein as new

- carriers of iodine compounds for food fortification – The effect of storage conditions on the stability of potassium iodide and potassium iodate. *LWT* 2021, 137, 110424, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110424>.
- [24] Habib M.A., Chowdhury A.I., Alam M.R., Rahman T.: Commercially available iodized salts in Noakhali, Bangladesh: Estimation of iodine content, stability, and consumer satisfaction level. *Food Chemistry Advances*, 2023, 2, 100294, doi: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100294>.
- [25] Cao X., Ma W., Liu L., Xu J., Wang H., Li X., Wang J., Zhang J., Wang Z., Gu Y.: Analysis of potassium iodate reduction in tissue homogenates using high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 2015, 32, 1–6, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2015.04.005>.
- [26] Winger R.J., König J., House D.A.: Technological issues associated with iodine fortification of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 2008, 19, 94–101, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.08.002>.
- [27] Li X., Cao X., Li J., Xu J., Ma W., Wang H., Wang J., Zhang Y.: Effects of high potassium iodate intake on iodine metabolism and antioxidant capacity in rats. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2020, 62, 126575, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2020.126575>.
- [28] Karbownik-Lewińska M., Stępnia J., Iwan P., Lewiński A.: Iodine as a potential endocrine disruptor—a role of oxidative stress. *Endocrine* 2022, 78, 219–240, doi: doi.org/10.1007/s12020-022-03107-7.

Żywność jako wyzwanie dla współczesnej nauki i przemysłu

Monografia pod redakcją naukową
Emilii Bernaś, Doroty Gałkowskiej, Kingi Topolskiej

**Polskie Towarzystwo Technologów Żywności
Wydawnictwo Naukowe PTTŻ**

Kraków 2023

Recenzenci naukowci

dr hab. inż. Emilia Bernaś, prof. URK; prof. dr hab. Aleksandra Duda; dr hab. inż. Dorota Gałkowska, prof. URK; dr hab. inż. Dorota Gumul, prof. URK; prof. dr hab. inż. Lesław Juszcak; dr hab. Karen Khachatryan, prof. URK; prof. dr hab. inż. Teresa Leszczyńska; dr hab. inż. Marcin Łukasiewicz, prof. URK; prof. dr hab. inż. Władysław Migdał; dr hab. inż. Dorota Najgebauer-Lejko, prof. URK; dr hab. inż. Anna Ptaszek, prof. URK; dr Łukasz Skoczylas, prof. URK; dr hab. inż. Jacek Słupski, prof. URK; dr hab. inż. Bożena Stodolak, prof. URK; prof. dr hab. inż. Krzysztof Surówka; dr hab. Kinga Topolska, prof. URK; prof. dr hab. inż. Mariusz Witczak

Opracowanie redakcyjne i korekta

Dr hab. inż. Emilia Bernaś, prof. URK

Dr hab. inż. Dorota Gałkowska, prof. URK

Dr hab. Kinga Topolska, prof. URK

Projekt okładki

Dr inż. Michał Pancerz

Wydawnictwo

Polskie Towarzystwo Technologów Żywności Wydawnictwo Naukowe PTTŻ

31-149 Kraków, ul. Balicka 122

<http://wydawnictwo.pttz.org>

© Copyright by Polskie Towarzystwo Technologów Żywności, Kraków 2023, Poland

ISBN 978-83-953897-5-7

Publikacja dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Doskonała nauka”; nr projektu DNK/SP/549771/2022, kwota dofinansowania 20 000,00 zł, całkowita wartość projektu 94 040,00 zł.



**Doskonała
Nauka**

Za treści zamieszczonych materiałów odpowiadają ich autorzy.

Właściwości przeciwutleniające brokułów fortyfikowanych jodem w postaci jodku potasu lub jodanu(V) potasu

Krystyna Szymandera-Buszka*, Agata Jankowska, Marzanna Hęś,
Anna Jędrusek-Golińska

*Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu,
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej*

**Autor korespondencyjny: krystyna.szymandera_buszka@up.poznan.pl*

Streszczenie

Celem pracy było zbadanie możliwości wykorzystania brokułu w roli nośnika jodu pierwiastkowego pochodzącego z jodku potasu (KI) lub jodanu(V) potasu (KIO₃). Postawiono hipotezę, że zarówno stężenie roztworu soli KI lub KIO₃, w którym namaczano brokuły, jak i rodzaj użytej soli będącej źródłem jodu wpływają na efektywność fortyfikowania brokułów oraz na ich aktywność przeciwutleniającą.

Jako materiał do badań wykorzystano dwie odmiany brokułu: Cezar i Sebastian. Fortyfikacja brokułu jodem polegała na namaczaniu go w roztworze soli (KI lub KIO₃), a następnie na jego wysuszeniu. Zarówno w próbkach bezpośrednio po wysuszeniu, jak i po 320 dniach przechowywania w temperaturze 21 ± 1 °C oznaczono zawartość jodu. Ponadto, zbadano aktywność przeciwutleniającą próbek metodami neutralizowania rodnika DPPH oraz kationorodnika ABTS.

Na podstawie wyników badań stwierdzono wysoki odzysk jodu w próbkach po suszeniu oraz wysoką stabilność jodu w próbkach w czasie ich przechowywania. Wolniejsze tempo zmian zawartości jodu wykazano w próbkach traktowanych KIO₃. Wyniki analizy statystycznej wykazały istnienie zależności ($p < 0,01$) aktywności przeciwutleniającej próbek od rodzaju soli fortyfikującej oraz od jej stężenia. Nie stwierdzono różnic w zdolnościach do dezaktywacji kationorodnika ABTS i rodnika DPPH między próbką niefortyfikowaną i próbkami fortyfikowanymi roztworami KI. Podobnie, aktywność przeciworodnikowa próbek traktowanych KIO₃ o stężeniu nieprzekraczającym 1,3 mg jodu/100 g nie różniła się od tej wykazywanej przez próbkę niefortyfikowaną. Z kolei próbki brokułu namaczane w roztworze KIO₃ o wyższych stężeniach wykazywały istotnie niższą zdolność do neutralizowania wolnych rodników.

Słowa kluczowe: jod, fortyfikacja jodem, brokuły, profilaktyka jodowa

1. Wprowadzenie

Przyjmuje się, że około 30% światowej populacji jest nadal narażona na ryzyko niedoboru jodu (Hatch-McChesney i Lieberman 2022). Niedobór jodu może wynikać z wykluczenia z diety podstawowych jego źródeł (de Escalada Pla, Flores i Genevois 2020, Krela-Kaźmierczak i in. 2021). Wskazuje się na fakt niedoboru tego składnika szczególnie u młodych kobiet (Zaremba i Gramza-Michalowska i in. 2023). Weganie eliminują ze swojej

diety podstawowe źródła jodu, takie jak nabiał i ryby, co czyni ich grupą szczególnie narażoną na niedobory tego pierwiastka. W wielu krajach świata prowadzone są programy wzbogacania żywności w jod, aby zminimalizować ryzyko niedoborów tego pierwiastka w diecie (Chanthilath i in. 2009, Dasgupta i in. 2008). Jedną z najczęstszych strategii wzbogacania jest jodowanie soli. Jednak w 2006 roku Światowa Organizacja Zdrowia zaleciła ograniczenie spożycia soli do 5 g/dzień, gdyż jest ona czynnikiem ryzyka miażdżycy i nadciśnienia tętniczego (WHO 2008). W konsekwencji podaż jodu z tego źródła może być ograniczona (WHO 2022). Konieczne jest zatem znalezienie innych nośników jodu. Liczne badania wskazują na skuteczność biofortyfikacji jodem produktów roślinnych (Golob i in. 2020, Krzepińko i in. 2015). Fortyfikowanie żywności jest stosunkowo prostą i wysoce skuteczną metodą zapobiegania występowaniu najczęstszych niedoborów składników odżywczych, w tym jodu, w populacji oraz metodą uzupełniania tych niedoborów (Chadare i in. 2019, Mackerras i in. 2011, Olson i in. 2021). Potwierdzono możliwość wykorzystania zarówno preparatów białkowych, jak i błonnikowych jako dobrych nośników jodu (Szymandera-Buszka i in. 2021b, Waszkowiak i Szymandera-Buszka 2005). Wstępne badania potwierdziły także możliwość wykorzystania warzyw, np. dyni, jako dobrych nośników jodu (Zaremba i in. 2022b). Potwierdzono wysoką efektywność wzbogacenia pieczywa w susz buraków fortifikowanych jodem (Zaremba i in. 2022). Warzywa mogą stanowić element urozmaicenia diety, a jednocześnie atrakcyjne alternatywne źródło jodu dla wszystkich konsumentów, zwłaszcza wegetarian i wegan.

Brokuły są spożywane m.in. w postaci dodatku (w formie suszu lub żelu) do chleba, makaronów i innych produktów zbożowych (Gonnella i in. 2019, Porter 2012, Szymandera-Buszka i in. 2021a). Produkty z dodatkiem brokułów są również ważnym źródłem polifenoli (Syed 2019). Wiele badań potwierdza ich właściwości przeciwutleniające (Porter 2012, Syed i in. 2023). Potwierdzono zmienną aktywność przeciwutleniającą suszu dyni fortifikowanej jodem, w zależności od ilości oraz rodzaju soli będącej źródłem jodu (Zaremba i in. 2023b).

Celem niniejszej pracy było zbadanie możliwości wykorzystania brokułu jako nośnika jodu, wprowadzanego w postaci soli (KI lub KIO_3) użytej w formie roztworów o stężeniach od 0,023 mg jodu/100 g do 3,000 mg jodu/100 g. Postawiono hipotezę, że stężenie i rodzaj soli będącej źródłem jodu wpływają na efektywność fortyfikowania brokułów oraz na ich aktywność przeciwutleniającą.

2. Materiał i metody badań

2.1. Materiał badany

Jako matrycę dla jodu wykorzystano dwie odmiany brokułu: Cezar (*Brassica oleracea* var. *botrytis italica*) i Sebastian (*Brassica oleracea* convar. *botrytis* var. *cymosa*). Materiał roślinny pochodził z targowisk Wielkopolski. Surowiec zawierał jod w ilości poniżej 0,003 mg/100 g. Substancjami fortyfikującymi były jodek potasu (KI) oraz jodan(V) potasu (Merck, Niemcy).

Warzywa umyto i podzielono na różyczki. Następnie gotowano je na parze (100 °C, 10 min) w piecu konwekcyjnym (Rational, Landsberg am Lech, Niemcy), odsączano i poddano homogenizacji (homogenizator Foss, Hilleroed, Dania). W kolejnym etapie obróbki, próbki brokułów moczo w roztworze KI lub KIO₃, zachowując stosunek masy surowca do objętości roztworu soli wynoszący 1:1. Zastosowano roztwory soli o następujących stężeniach: 3,000; 2,300; 1,300; 0,770; 0,230 i 0,023 mg jodu/100 g. Następnie próbki brokułów inkubowano w temperaturze -76 °C przez 12 h, po czym poddano je liofilizacji (do zawartości wody wynoszącej 4-5%) oraz homogenizacji (homogenizator Foss, Hilleroed, Dania). Próbkę przechowywano w słojach zamykanych zakrętką (szkło czarne, d = 7 cm, h = 10 cm) w temperaturze 21 ± 1 °C, przez 1 dzień, 60 dni, 120 dni, 180 dni, 240 dni oraz 320 dni.

2.2. Metody badań

2.2.1. Badanie zawartości jodu

Zawartość jodu ogólnego w próbkach nieprzechowywanych (bezpośrednio po suszeniu) oraz przechowywanych przez 1 dzień, 60 dni, 120 dni, 180 dni, 240 dni oraz 320 dni oznaczono metodą makrochemiczną z tiocyjaniem potasu (Kuhne i in. 1993) oraz metodą kolorymetryczną (Moxon i Dixon 1980). Analizy przeprowadzono w sześciu powtórzeniach (dwie próbki niezależne, po trzy pomiary każdej próbki). Określono dynamikę zmian zawartości jodu w próbkach przechowywanych biorąc pod uwagę wartość okresu, w którym początkowa zawartość jodu zmniejszyła się o 25% ($T_{25\%}$).

2.2.2. Badanie aktywności przeciwutleniającej

Z próbek bezpośrednio po suszeniu oraz przechowywanych przez 320 dni sporządzono ekstrakty etanolowe w drodze dwugodzinnej maceracji 80% etanolem (stosunek masy produktu do objętości ekstrahenta wynosił 1:10) (Gudiño i in. 2022). Aktywność przeciwutleniającą ekstraktów badano metodami neutralizowania kationorodnika ABTS (ABTS^{•+}) (Re i in. 1999) oraz rodnika DPPH (DPPH[•]) (Chu i in. 2000). Wyniki oznaczeń wyrażono, odpowiednio, w % inhibicji kationorodnika ABTS oraz w % inhibicji rodnika DPPH. Analizy przeprowadzono w sześciu powtórzeniach (dwie próbki niezależne, po trzy pomiary każdej próbki).

2.3. Analiza statystyczna

Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej przy użyciu programu STATISTICA™ PL 13.3 (StatSoft, Polska): przeprowadzono analizę ANOVA ($p < 0,05$) oraz test Tukeya. Dokładność modeli dynamiki zmian zawartości jodu w próbkach podczas przechowywania oszacowano za pomocą współczynnika determinacji (R^2) i błędu średniokwadratowego (RMSE). Poziom istotności we wszystkich analizach statystycznych przyjęto na poziomie 5%.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Zawartość i stabilność jodu

W tabeli 1 przedstawiono wyniki oznaczeń zawartości jodu w fortyfikowanych jodem suszach brokułów bezpośrednio po suszeniu oraz przechowywanych 320 dni. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono wysoki odzysk wprowadzonego jodu (87-93%) w próbkach każdej odmiany warzywa bezpośrednio po suszeniu oraz wysoką stabilność jodu w czasie przechowywania (320 dni) (79-74%). Dotychczasowe dane literaturowe dotyczące wzbogacania warzyw (np. dyni) wskazują na podobny poziom odzysku jodu we wzbogacanych matrycach (Szymandera-Buszk a i in. 2021, Zaremba i in. 2023). We wcześniejszych badaniach mających na celu fortyfikację dyni jodem także stwierdzono wysoką stabilność jodu podczas przechowywania warzyw. Wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej wyników oznaczeń wykazały istotny wpływ ($p < 0,05$) rodzaju soli użytej do wzbogacenia brokułów na stabilność jodu. Stwierdzono wysoką stabilność jodu w próbkach fortyfikowanych, przy czym wyższą stabilność odnotowano w przypadku użycia roztworu KIO_3 do fortyfikacji. Analiza dynamiki zmian zawartości jodu ($T_{25\%}$) potwierdziła najszybsze tempo przemian jodu w próbkach fortyfikowanych przy użyciu roztworu KI (tab. 2). Wcześniejsze badania również wykazały większą niestabilność zawartości jodu w przypadku fortyfikacji soli jodkiem potasu (Diosady i Mannar 2000). Powyższe obserwacje tłumaczy się mechanizmem przemiany formy jodu. Jodan(V) potasu ulega redukcji do jodku potasu, a ten zachowuje się jak zwykła sól jonowa i łatwo ulega utlenieniu do I_2 (Rana i Raghuvanshi 2013, Shi 2004). Biorąc pod uwagę niską zawartość wody w produkcie oraz warunki przechowywania zapewniające ograniczony dostęp tlenu, powyższe przemiany były spowolnione.

Wyniki badań wykazały przeciwrodnikowe działanie brokułów obu odmian, zarówno względem rodnika DPPH, jak i kationorodnika ABTS. Obserwacje te są zgodne z danymi literaturowymi (Cebulak i in. 2015, Hwang 2015). Stwierdzono jednak obniżenie zdolności wychwytywania wolnych rodników ($ABTS^{*+}$ i DPPH *) przez próbki przechowywane przez 320 dni (rys. 1 i 2), co jest zgodne z wynikami innych badań (Cao i in., 2015, Zaremba i in., 2023, Winger i in. 2008). Wyniki analizy statystycznej wykazały istnienie związku pomiędzy rodzajem soli wprowadzającej jod oraz jej stężeniem a aktywnością przeciwutleniającą produktów, zarówno badanych bezpośrednio po suszeniu, jak i po przechowywaniu (tab. 3). Zaobserwowano silną zależność aktywności przeciwutleniającej (wyznaczonej dwiema metodami) od stężenia jodu wprowadzanego w formie KIO_3 ($F = 85,20$; $p < 0,05$ oraz $F = 447,50$; $p < 0,05$; odpowiednio w teście z $ABTS^{*+}$ i w teście z DPPH *). Stwierdzono, że w układach z KIO_3 oraz KI, w których stężenie jodu wynosiło 0,023 i 0,230 mg/100 g i badanych po 320 dniach przechowywania wielkość inhibicji wolnych rodników ($ABTS^{*+}$ i DPPH *) nie różniła się statystycznie istotnie od wielkości tych parametrów mierzonych w próbkach bezpośrednio po suszeniu (rys. 1b i 2b). Podobnie, w próbkach traktowanych roztworami KI, w których stężenie jodu wynosiło 1,300; 2,300 i 3,000 mg/100 g, nie stwierdzono różnic w zdolności do neutralizacji wolnych rodników. Z kolei traktowanie obu

odmian brokułów roztworem KIO_3 w dawce 2,300 lub 3,000 mg jodu/100 g spowodowało znaczące zmniejszenie stopnia neutralizacji wolnych rodników w porównaniu do próbek niefortyfikowanych – o 5-6% w przypadku niższej dawki jodu w próbkach nieprzechowywanych (rys. 1a i 2a) oraz o 15% i 18% w przypadku wyższej dawki jodu w próbkach przechowywanych (rys. 1b i 2b).

Tabela 1. Zawartość jodu (%)* w suszach brokułowych fortifikowanych jodem

Stężenie jodu w roztworze soli (mg/100 g)	Odmiana brokułu			
	Cezar		Sebastian	
	Rodzaj soli			
	KIO ₃	KI	KIO ₃	KI
Próbki bezpośrednio po suszeniu				
0,023	91,25 ^{Ab} ± 0,56	89,69 ^{Ba} ± 0,45	92,32 ^{Ab} ± 0,52	88,36 ^{Cb} ± 0,35
0,230	92,03 ^{Ab} ± 0,48	88,12 ^{Bb} ± 0,37	91,98 ^{Acb} ± 0,29	87,65 ^{Bb} ± 0,52
0,770	91,36 ^{Ab} ± 0,51	89,02 ^{Bba} ± 0,46	91,26 ^{Adc} ± 0,51	89,90 ^{Ba} ± 0,56
1,300	91,89 ^{Ab} ± 0,48	88,12 ^{Cb} ± 0,41	90,56 ^{Bd} ± 0,49	87,45 ^{Cb} ± 0,49
2,300	93,54 ^{Aa} ± 0,39	87,89 ^{Cb} ± 0,22	91,30 ^{Bcb} ± 0,36	88,36 ^{Cb} ± 0,53
3,000	92,03 ^{ba} ± 0,42	87,69 ^{Cb} ± 0,34	93,45 ^{Aa} ± 0,45	87,56 ^{Cb} ± 0,59
Próbki przechowywane 320 dni				
0,023	78,54 ^{Aba} ± 0,58	75,32 ^{Ba} ± 0,35	77,98 ^{Ab} ± 0,50	75,14 ^{Ba} ± 0,39
0,230	78,62 ^{Aba} ± 0,44	74,45 ^{Ba} ± 0,46	78,45 ^{Aba} ± 0,37	75,03 ^{Ba} ± 0,38
0,770	78,19 ^{Ab} ± 0,61	74,89 ^{Ba} ± 0,39	78,12 ^{Ab} ± 0,43	75,12 ^{Ba} ± 0,43
1,300	79,25 ^{Aa} ± 0,38	75,42 ^{Ba} ± 0,48	79,03 ^{Aa} ± 0,49	74,56 ^{Ba} ± 0,51
2,300	78,68 ^{Aba} ± 0,42	75,38 ^{Ba} ± 0,51	77,98 ^{Ab} ± 0,55	74,38 ^{Ba} ± 0,49
3,000	78,54 ^{Aba} ± 0,46	75,01 ^{Ba} ± 0,49	78,36 ^{Aba} ± 0,31	75,21 ^{Ba} ± 0,56

Objaśnienia: *w odniesieniu do próbek przed suszeniem; dane w postaci: średnia arytmetyczna ($n = 6$) ± odchylenie standardowe; średnie w danej kolumnie opatrzone różnymi małymi literami różnią się statystycznie istotnie ($p < 0,05$); średnie w danym wierszu opatrzone różnymi wielkimi literami różnią się statystycznie istotnie ($p < 0,05$)

Tabela 2. Dynamika zmian zawartości jodu w ciągu 320 dni przechowywania suszy brokułowych wzbogaconych jodem

		Wskaźniki dynamiki zmian zawartości jodu podczas przechowywania (320 dni)				
Od- miana brokułu	Stężenie jodu w roztworze soli (mg/100 g)	T _{25%} (dni)	R ²	RMSE	k	A ₀ *
KIO ₃						
Cezar	0,023	366,01	0,974	0,000	0,000	1,022
	0,230	367,57	0,975	0,003	-0,000	1,241
	0,770	363,20	0,963	0,011	-0,001	2,053
	1,300	377,73	0,970	0,016	-0,001	3,337
	2,300	365,06	0,965	0,032	-0,002	8,987
	3,000	373,86	0,972	0,036	-0,002	16,735
Sebastian	0,023	350,80	0,960	0,000	0,000	1,021
	0,230	365,65	0,971	0,003	-0,000	1,240
	0,770	360,68	0,971	0,008	-0,001	2,044
	1,300	370,48	0,973	0,013	-0,001	3,310
	2,300	357,11	0,972	0,024	-0,002	8,482
	3,000	367,88	0,972	0,030	-0,002	17,378
KI						
Cezar	0,023	329,40	0,984	0,000	0,000	1,021
	0,230	323,33	0,982	0,002	0,000	1,228
	0,770	325,71	0,975	0,010	-0,001	2,011
	1,300	329,57	0,979	0,014	-0,001	3,208
	2,300	327,53	0,979	0,026	-0,002	7,854
	3,000	320,47	0,970	0,042	-0,002	14,733
Sebastian	0,023	317,24	0,978	0,000	0,000	1,021
	0,230	324,82	0,987	0,002	0,000	1,227
	0,770	322,52	0,982	0,007	-0,001	2,018
	1,300	321,88	0,985	0,011	-0,001	3,165
	2,300	315,80	0,981	0,023	-0,002	7,870
	3,000	325,83	0,987	0,024	-0,002	14,120

Objaśnienia: * A_0 – początkowa ilość jodu; k – stała zaniku

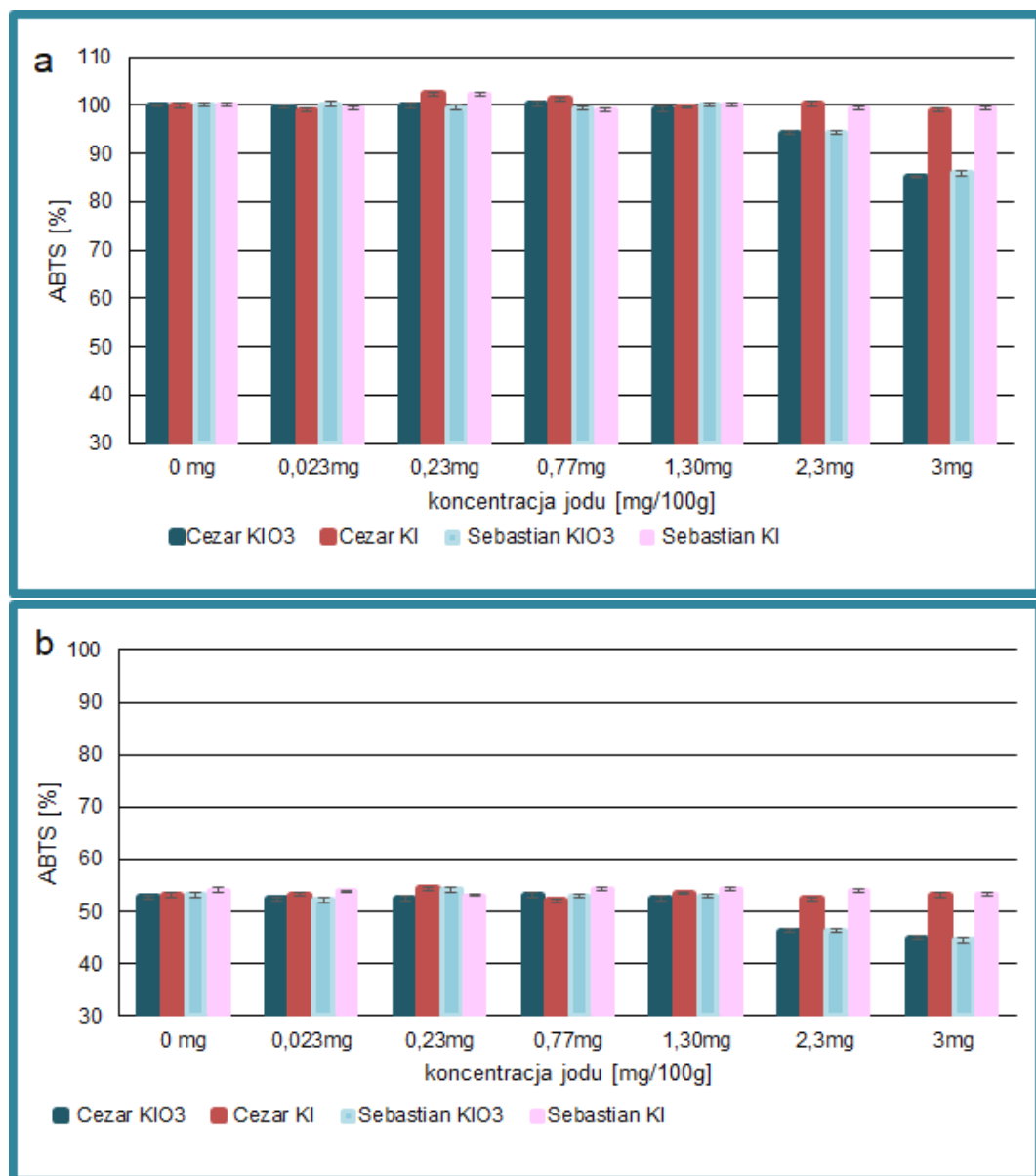
Tabela 3. Istotność statystyczna predyktorów (odmiany warzywa i stężenie jodu w roztworze soli) modeli kowariancji dla zmian zdolności neutralizacji wolnych rodników (ABTS** i DPPH*) w suszach brokułowych fortyfikowanych jodem bezpośrednio po suszeniu i po przechowywaniu przez 320 dni

Wariant		SS	df	MSE	F	p
ABTS**						
Próbki bezpośrednio po suszeniu						
odmiana brokułu	KIO ₃	0,31	1,00	0,30	0,02	0,88
	KI	0,20	1,00	0,20	0,10	0,74
stężenie jodu	KIO ₃	133,60	6,00	22,30	85,20	0,00
	KI	13,50	6,00	2,20	4,90	0,03
Próbki po przechowywaniu (320 dni)						
odmiana brokułu	KIO ₃	0,31	1,00	0,31	0,024	0,88
	KI	2,27	1,00	2,27	5,80	0,03
stężenie jodu	KIO ₃	158,04	6,00	26,34	104,20	0,00
	KI	0,92	6,00	0,15	0,18	0,97
DPPH*						
Próbki bezpośrednio po suszeniu						
odmiana brokułu	KIO ₃	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00
	KI	0,20	1,00	0,20	0,10	0,74
stężenie jodu	KIO ₃	507,60	6,00	84,60	447,50	0,00
	KI	13,50	6,00	2,20	4,90	0,03
Próbki po przechowywaniu (320 dni)						
odmiana brokułu	KIO ₃	0,90	1,00	0,90	0,06	0,82
	KI	2,27	1,00	2,27	5,80	0,03
stężenie jodu	KIO ₃	191,69	6,00	31,95	104,50	0,00
	KI	0,92	6,00	0,15	0,18	0,97

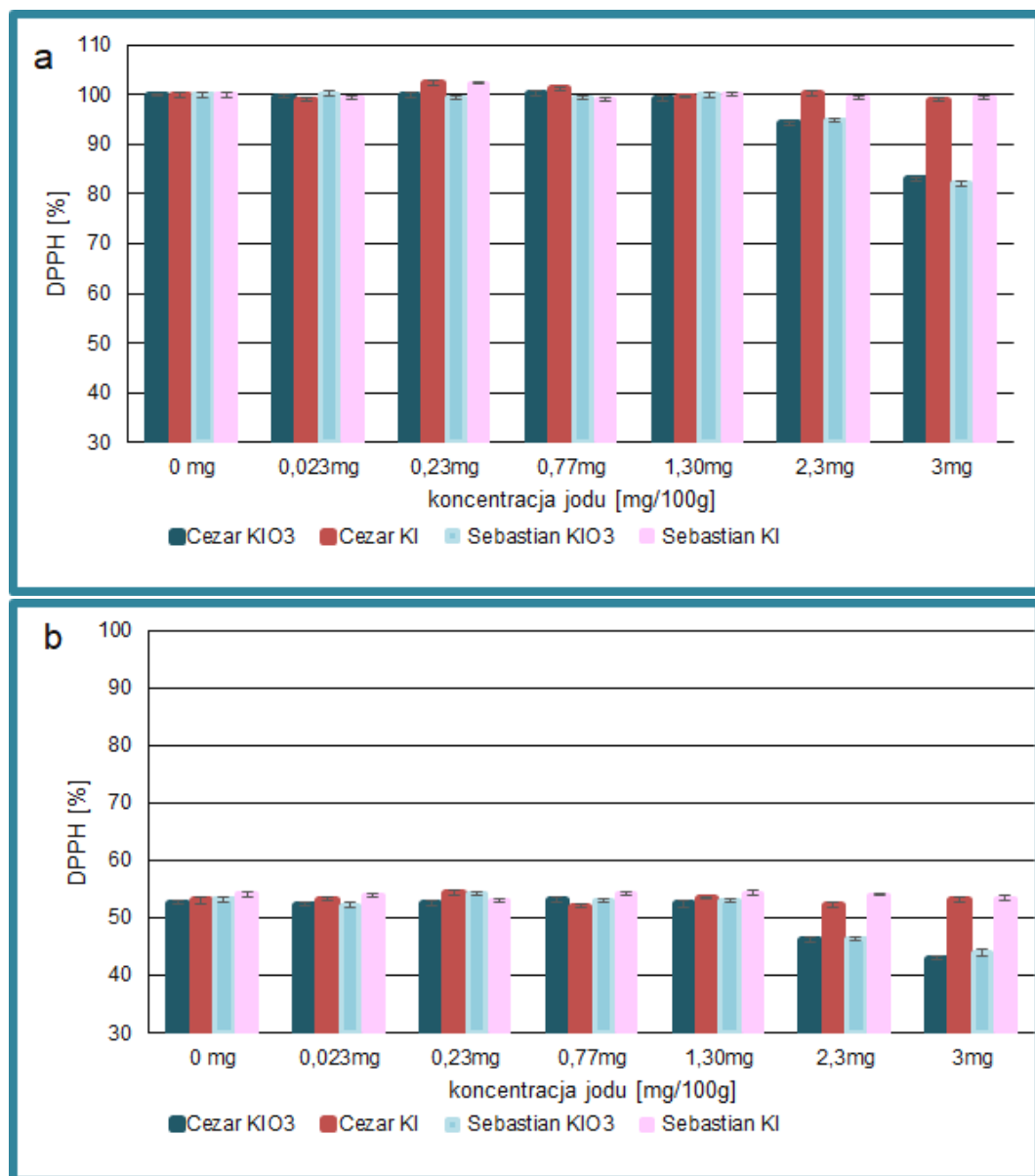
Objaśnienia: SS – sumy kwadratów; df – liczba stopni swobody; MSE – średnia suma kwadratów; F – wartość testu F; p – poziom prawdopodobieństwa

Wcześniejsze badania wykazały, że KI i KIO₃ mają odmienne właściwości, odpowiednio: anty- i prooksydacyjne. KI ma cechy reduktora, natomiast KIO₃ – utleniacza (Cao i in. 2015, Winger i in. 2008, Li i in. 2020). Według Milczarek i in. (2013) KIO₃ w stężeniach $\geq 2,5$ mM zwiększał peroksydację lipidów w homogenatach tarczycy świń. Szkodliwe działanie KIO₃ narastało stopniowo od stężenia 2,5 mM do stężenia 10 mM. Obniżenie aktywności przeciwutleniającej może także mieć związek z podwyższoną zawartością witaminy C (Habib i in. 2023). Literatura przedmiotu wskazuje na wpływ wysokiego stężenia jodanu(V) na stymulowanie przemiany kwasu askorbinowego do kwasu dehydroaskorbinowego, co w konsekwencji prowadzi do utraty cennego przeciwutleniacza jakim jest kwas askorbinowy.

W przyszłych badaniach warto kontynuować niniejszą tematykę, np. w zakresie oceny interakcji jodu z innymi składnikami warzyw i związanych z tym skutków oksydacyjnych. Szczególną uwagę należy zwrócić na analizę związku pomiędzy różnymi profilami węglowodanowo-białkowymi warzyw wzbogaconych jodem a ich stabilnością przeciwutleniającą.



Rysunek 1. Zdolność do neutralizacji wolnych rodników (ABTS*) (wartości średnie) przez susze brokułowe niefortyfikowane oraz fortyfikowane jodem wprowadzanym w formie roztworów KI lub KIO₃ w zmiennych stężeniach: (a) bezpośrednio po suszeniu; (b) po przechowywaniu 320 dni



Rysunek 2. Zdolność do neutralizacji wolnych rodników (DPPH*) (wartości średnie) przez susze brokułowe niefortyfikowane oraz fortyfikowane jodem wprowadzanym w formie roztworów KI lub KIO_3 w zmiennych stężeniach: (a) bezpośrednio po suszeniu; (b) po przechowywaniu 320 dni

4. Podsumowanie

Wysoki odzysk jodu wprowadzanego do brokułów dwóch odmian i poddanych suszeniu oraz wysoka stabilność zawartości tego pierwiastka podczas przechowywania fortyfikowanych produktów czynią brokuły atrakcyjnym źródłem matrycy dla jodu, szczególnie w przypadku fortyfikacji przebiegającej z udziałem KIO_3 . W celu uzyskania możliwie

najwyższej zdolności brokułów wzbogacanych jodem do neutralizacji wolnych rodników sugeruje się wprowadzenie jodu w postaci roztworu KIO_3 o stężeniu odpowiadającym zawartości w nim jodu nie większej niż 1,300 mg/100 g.

Badania oraz publikacja zostały sfinansowane ze środków statutowych Katedry Nauk o Gastronomii i Żywności Funkcjonalnej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu (506.751.03.00).

Literatura

1. Cao X., Ma W., Liu L., Xu J., Wang H., Li X., Wang J., Zhang J., Wang Z., Gu Y. (2015). Analysis of potassium iodate reduction in tissue homogenates using high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 32, 1-6.
2. Cebulak T., Kapusta I., Czernicka M. (2015). Wartość odżywcza i prozdrowotna brokułów. *Bromatologia i Chemia Toksykologiczna*, 48(4), 660-666.
3. Chadare F. J., Idohou R., Nago E., Affonfere M., Agossadou J., Fassinou T. K., Kénou C., Honfo S., Azokpota P., Linnemann A. R., Hounhouigan D. J. (2019). Conventional and food-to-food fortification: An appraisal of past practices and lessons learned. *Food Science and Nutrition*, 7(9), 2781-2795.
4. Chanthilath B., Chavasit V., Chareonkiatkul S., Judprasong K. (2009). Iodine stability and sensory quality of fermented fish and fish sauce produced with the use of iodated salt. *Food and nutrition bulletin*, 30(2), 183-188.
5. Chu Y. H., Chang C. L., Hsu H. F. (2000). Flavonoid content of several vegetables and their antioxidant activity. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 50, 561-566.
6. Dasgupta P. K., Liu Y., Dyke J. V. (2008). Iodine nutrition: iodine content of iodized salt in the United States. *Environmental Science and Technology*, 42(18), 7025.
7. de Escalada Pla M. F., Flores S. K., Genevois C. E. (2020). Innovative strategies and nutritional perspectives for fortifying pumpkin tissue and other vegetable matrices with iron. *Food Science and Human Wellness*, 9(2), 103-111.
8. Diosady L. L., Mannar V. M. G. (2000). Stability of iodine in iodized salt. In 8th World Salt Symposium, ed by Geertman RM, Elsevier, the Hague, 977-982.
9. Golob A., Novak T., Maršić N. K., Šircelj H., Stibilj V., Jerše A., Kroflič A., Germ M. (2020). Biofortification with selenium and iodine changes morphological properties of *Brassica oleracea* L. var. *gongylodes*) and increases their contents in tubers. *Plant Physiology and Biochemistry*, 150, 234-243.
10. Gonnella M., Renna M., D'Imperio M., Santamaria P., Serio F. (2019). Iodine biofortification of four brassica genotypes is effective already at low rates of potassium iodate. *Nutrients*, 11(451), 1-14.
11. Gudiño I., Martín A., Casquete R., Prieto M. H., Ayuso M. C., Córdoba M. G. (2022). Evaluation of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) crop by-products as sources of bioactive compounds. *Scientia Horticulturae*, 304, 111284.

- 12.Habib M. A., Chowdhury A. I., Alam M. R., Rahman T. (2023). Commercially available iodized salts in Noakhali, Bangladesh: Estimation of iodine content, stability, and consumer satisfaction level. *Food Chemistry Advances*, 2, 100294.
- 13.Hatch-McChesney A., Lieberman H. R. (2022). Iodine and iodine deficiency: a comprehensive review of a re-emerging issue. *Nutrients*, 14(17), 3474.
- 14.Hwang, J. (2015). Antioxidant and anticancer activities of broccoli by-products from different cultivars and maturity stages at harvest. *Preventive Nutrition and Food Science*, 20(1), 8–14.
- 15.Iwan P., Stepniak J., Karbownik-Lewinska M. (2021). Pro-oxidative effect of KIO₃ and protective effect of melatonin in the thyroid-comparison to other tissues. *Life*, 11(6), 1-14.
- 16.Krela-Kaźmierczak I., Czarnywojtek A., Skoracka K., Rychter A. M., Ratajczak A. E., Szymczak-Tomczak A., Ruchała M., Dobrowolska A. (2021). Is there an ideal diet to protect against iodine deficiency? *Nutrients*, 13(2), 1-15.
- 17.Krzepińko A., Zych-Wężyk I., Molas J. (2015). Alternative ways of enriching the human diet with iodine. *Journal of Pre-Clinical and Clinical Research*, 9(2), 167-171.
- 18.Kuhne D., Wirth F., Wagner H. (1993). Iodine determination in iodized meat products. *Fleischwirtschaft*, 73(2), 175-178.
- 19.Li X., Cao X., Li J., Xu J., Ma W., Wang H., Wang J., Zhang Y. (2020). Effects of high potassium iodate intake on iodine metabolism and antioxidant capacity in rats. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 62, 126575.
- 20.Mackerras D., Powers J., Boorman J., Loxton D., Giles G. G. (2011). Estimating the impact of mandatory fortification of bread with iodine on pregnant and post-partum women. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 65(12), 1118-1122.
- 21.Milczarek M., Stepniak J., Lewinski A., Karbownik-Lewinska M. (2013). Potassium iodide, but not potassium iodate, as a potential protective agent against oxidative damage to membrane lipids in porcine thyroid. *Thyroid Research*, 6(1), 1.
- 22.Moxon R. E., Dixon E. J. (1980). Semi-automatic method for the determination of total iodine in food. *Analyst*, 105, 344-352.
- 23.Olson R., Gavin-Smith B., Ferraboschi C., Kraemer K. (2021). Food fortification: The advantages, disadvantages and lessons from sight and life programs. *Nutrients*, 13(4), 1118.
- 24.Porter Y. (2012). Antioxidant properties of green broccoli and purple-sprouting broccoli under different cooking conditions. *Bioscience Horizons*, 5, 1-11.
- 25.Rana R., Raghuvanshi R. S. (2013). Effect of different cooking methods on iodine losses. *Journal of Food Science and Technology*, 50(6), 1212-1216.
- 26.Re R., Pellegrini N., Protegente A., Pannala A., Yang M. C., Rice-Evans C. (1999). Antioxidant activity an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free radical biology and medicine*, 26(9-10), 1231-1237.

27. Shi H. (2004). Adding an oxidant increases the stability of iodine in iodized salt. *Food and Nutrition Bulletin*, 25(2), 137-141.
28. Syed Q. A. (2019). Nutritional and therapeutic importance of the pumpkin seeds. *Biomedical Journal of Scientific Technical Research*, 21(2), 15798-15803.
29. Syed R. U., Moni S. S., Khaled M., Break B., Khojali W. M. A., Jafar M., Alshammari M. D., Abdelsalam K., Taymour S., Saad K., Alreshidi M., Mohamed M., Taha E., Mohan S. (2023). Broccoli: A multi-faceted vegetable for health: an in-depth review of its nutritional attributes, antimicrobial abilities, and anti-inflammatory properties. *Antibiotics*, 12(7), 1157.
30. Szymandera-Buszka K., Piechocka J., Zaremba A., Przeor M., Jędrusek-Golińska A. (2021a). Pumpkin, cauliflower and broccoli as new carriers of thiamine compounds for food fortification. *Foods*, 10(3), 578.
31. Szymandera-Buszka K., Waszkowiak K., Kaczmarek A., Zaremba A. (2021b). Wheat dietary fibre and soy protein as new carriers of iodine compounds for food fortification - The effect of storage conditions on the stability of potassium iodide and potassium iodate. *LWT*, 137, 110424.
32. Waszkowiak K., Szymandera-Buszka K. (2005). Utilization preparations of connective tissue proteins as carriers of potassium iodide - studies of iodine retention during their storage. *Polish Journal of Human Nutrition and Metabolism*, 32, 1130-1134.
33. WHO (2022). Universal salt iodization and sodium intake reduction compatible, cost - effective strategies. Public Health Benefit; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 1–10. <https://doi.org/Available> online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240053717> (dostęp 22 sierpnia 2022 r.).
34. WHO (2008). World Health Organization (2008). Salt as a vehicle for fortification. Report of a WHO Expert Consultation. Luxembourg, 21-22 March 2007.
35. Winger R. J., König J., House D. A. (2008). Technological issues associated with iodine fortification of foods. *Trends in Food Science and Technology*, 19(2), 94–101.
36. Zaremba A., Cichoń N., Szymandera-Buszka K. (2022). Design of a plant product enriched with beetroot fortified with iodine. W M. Beszterda-Buszczak M. Przeor (Red.), *Żywność dzisiaj. Lokalna czy globalna, tradycyjna czy innowacyjna? Monografia pokonferencyjna* (s. 22–36). Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu.
37. Zaremba A., Gramza-Michalowska A., Pal K., Szymandera-Buszka K. (2023a). The Effect of a Vegan Diet on the Coverage of the Recommended Dietary Allowance (RDA) for Iodine among People from Poland. *Nutrients*, 15(5), 1163.
38. Zaremba A., Hęś M., Jędrusek-Golińska A., Przeor M., Szymandera-Buszka K. (2023b). The antioxidant properties of selected varieties of pumpkin fortified with iodine in the form of potassium iodide and potassium iodate. *Foods*, 14(14), 2792.
39. Zaremba A., Waszkowiak K., Kmiecik D., Jędrusek-Golińska A., Jarzębski M., Szymandera-Buszka K. (2022). The selection of the optimal impregnation conditions of vegetable matrices with iodine. *Molecules*, 27(10), 1-18.

Antioxidant properties of broccoli fortified with iodine in the form of potassium iodide or potassium iodate

Abstract

The study aimed to investigate the use of broccoli as a carrier of iodine (KI and KIO₃) at various concentrations (3.000; 2.300; 1.300; 0.770; 0.230 and 0.023 mg of iodine/100 g). It was hypothesised that the concentration and form of iodine influence the fortification effectiveness and broccoli's antioxidant activity. Broccoli varieties, i.e. Cezar and Sebastian, were used as a matrix for the iodine. The influence of storage conditions on the stability of iodine was tested during storage for 320 days at 21 ± 1 °C. After drying and 320 days of storage, all broccoli samples were taken to analyse antioxidant activity by neutralizing the DPPH radical and the ABTS cation radical.

The results showed a high recovery of the introduced iodine in broccoli varieties after drying and high iodine stability during storage, especially for KIO₃. Statistical analysis confirmed a relationship between the forms and concentration of iodine and the ABTS cation radical and the DPPH radical test results. In the systems with iodine concentrations of up to 1.300 mg/100 g, the antioxidant activity did not change. However, a statistically significant decrease in free-radical scavenging was confirmed for broccoli varieties fortified with a KIO₃ at a concentration of 2.300 or 3.000 mg/100 g of iodine).

THE EFFECT OF IODINE FORTIFICATION ON – THE ANTIOXIDANT ACTIVITY OF CARROTS AND CAULIFLOWER

Agata Jankowska, Krystyna Eleonora Szymandera-Buszka✉

Department of Gastronomy Science and Functional Foods, Poznań University of Life Sciences
Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań, Poland

ABSTRACT

Introduction. In many countries worldwide, food fortification programs with iodine are carried out to minimise the risk of a deficiency of this element in the diet. However, preliminary studies have shown correlations between antioxidant activity and iodine content.

Aim. The aim of this study was to examine the use of cauliflower and carrots as matrices for potassium iodide (KI) and potassium iodate (KIO₃) at different concentrations. It was hypothesised that iodine compounds and their concentrations affect the antioxidant activity of fortified cauliflower and carrots.

Material and methods. The study tested variable iodine concentrations: 0.023; 0.23; 0.77; 1.30; 2.30 and 3.0 mg KIO₃ or KI/100 g. These iodine concentrations were applied to two varieties of carrot and two varieties of cauliflower. After the fortification process and 60, 120, 180, 240, and 320 days of storage, the iodine content was determined. Additionally, after 320 days of storage, the antioxidant activity of all vegetable samples was analysed (based on two free radicals scavenging indices, the DPPH scavenging capacity (DPPH[•]) and the ABTS scavenging capability (ABTS^{•+})).

Results. Covariance between the iodine compound (KI/KIO₃) and the ABTS^{•+} and DPPH[•] test results of fortified carrots and cauliflower was noted. For the samples of dried carrots and cauliflower with iodine concentrations from 0.23 to 3.0 mg kg⁻¹ of KI or 0.23 to 1.30 mg kg⁻¹ of KIO₃, the free-radical scavenging capacity indices were similar to those for samples not fortified with iodine. However, for the samples of both carrots and cauliflower with KIO₃ at 2.30 to 3.0 mg kg⁻¹, the capacity to terminate ABTS^{•+} and DPPH[•] was lower than in samples without iodine. This was especially true after storage.

Conclusions. Cauliflower and carrots can be good iodine matrices. However, to maximise free radical scavenging indices, iodine should be fortified at concentrations of up to 2.30 mg kg⁻¹.

Keywords: iodine fortification, cauliflower, carrot, antioxidant activity

INTRODUCTION

Vegans eliminate both fish and dairy products from their diet, making them particularly vulnerable to iodine deficiency. Additionally, the iodine content in plant products is related to the concentration of this element in the soil (Hatch-McChesney and Lieberman, 2022). The primary plant source of iodine may be algae, as they are rich in this element (Hatch-McChesney

and Lieberman, 2022). However, seaweed is not customarily consumed in the Western diet, although its popularity is increasing. This also applies to the diet in Poland (Zaremba et al., 2023a). In addition, legal restrictions limit the potential to enhance food with algae (Cruz and Vasconcelos, 2024). Plant-based dairy and meat analogues are becoming increasingly

✉krystyna.szymandera_buszka@up.poznan.pl, <https://orcid.org/0000-0003-0264-6027>

popular, but because they are naturally low in iodine, they cannot be thought of as nutritionally equivalent to milk. In many countries, iodine fortification programs are implemented to minimise the possibility of dietary iodine deficiency (Chanthilath et al., 2009).

The fortification of salt with iodine is one of the most common strategies for preventing iodine deficiency. However, in 2006, the World Health Organization recommended limiting salt intake to 5 g/day (WHO, 2007). Consequently, the supply of iodine from this source may be limited (WHO, 2022). This necessitates the use of new and stable carriers for iodine. Numerous studies indicate the effectiveness of iodine biofortification of plant products, including vegetables (Krzepiłko et al., 2015). Preliminary research has confirmed that vegetables such as pumpkins and beets are good matrices for iodine (Jankowska et al., 2023; Zaremba et al., 2023b). The high effectiveness of enriching bread with beets fortified with iodine has been confirmed. Our preliminary research has also confirmed that there is no change in the taste (Zaremba et al., 2022). Enriching other vegetables could diversify the diets of consumers and also be an effective alternative source of iodine. This may especially apply to both overweight people and vegetarians, particularly vegans. Carrot is often eaten as an addition (dried juice or gel) to ice cream, pasta, cereal snacks and other cereal products (Dziki, 2021). Also, the enrichment of pasta and bread with cauliflower could be thought of as a support to increase vegetable consumption without seriously changing the population's eating habits (Nartea et al., 2023; Shamshad et al., 2023). Products containing cauliflower and carrot are also an important source of polyphenols (Nartea et al., 2023), and many studies have confirmed their antioxidant properties. However, preliminary studies have shown some correlations between antioxidant activity and iodine content (Iwan et al., 2021). The variable antioxidant activity of pumpkin dried, fortified with iodine, has also been observed. It depended on the pumpkin variety and the amount and type of iodine compound used (Zaremba et al., 2023b). Therefore, the aim of this study was to investigate using cauliflower and carrots as a matrix for potassium iodide (KI) and potassium iodate (KIO_3) at different concentrations. It was hypothesised that iodine compounds and their concentrations may influence the antioxidant properties of fortified cauliflower and carrot.

MATERIALS AND METHODS

Materials

Cauliflower (*Brassica oleracea* var. Botrytis L., var. David and Bora) and carrot (*Daucus carota* L.) were used as matrices for the iodine. The products, in a ripe state, were bought at a retail store (Poznań, Poland) in August and September. KI and KIO_3 were used as iodine compounds (Merck, Darmstadt, Germany).

Methods

Conditions of preparation

Washed and peeled (carrot) vegetables were heat treated (100°C; 10 min) in a convection oven (Rational, Landsberg am Lech, Germany), drained and homogenised (homogeniser Foss, Hilleroed, Denmark). Then, the carrot or cauliflower homogenates were soaked in the aqueous solution of KI/ KIO_3 (1:1 (m/v)) at $18 \pm 2^\circ\text{C}$ (Zaremba et al., 2022). Variable iodine concentrations were adopted: 0.023; 0.23; 0.77; 1.30; 2.30; and 3.0 mg/100 g. The homogenates of carrot and cauliflower with iodine were subjected to the freeze-drying process (4–5% of the moisture content). The samples of dried carrots and cauliflower fortified with iodine were stored in glass containers for 320 days at $21 \pm 1^\circ\text{C}$.

Stability of iodine

The total iodine content in all samples after 60, 120, 180, 240 and 320 days of storage was determined with a macro chemical method using potassium thiocyanate (Kuhne et al., 1993; Moxon and Dixon, 1980).

Antioxidant activity

The antioxidant activity of dried carrots and cauliflower fortified with iodine was analysed immediately after freeze-drying and after 320 days of storage. Extracts from carrot or cauliflower were prepared by 2-h maceration of dried vegetables with 80% ethanol (1:10 (m/v)) (Gudiño et al., 2022).

The antioxidant activity of dried carrots and cauliflower fortified with iodine was analysed based on two free radical scavenging indices: the DPPH scavenging capacity (DPPH $^{\cdot}$) (Chu et al., 2000; Nuutila et al., 2003) and the ABTS scavenging capability (ABTS $^{+\cdot}$) (Re et al., 1999). The DPPH $^{\cdot}$ scavenging capacity was analysed by the spectrophotometric method using the

DPPH radical (2,2-difenylo-1-pikrylhydrazyl) (Sigma-Aldrich, Saint Louis, Missouri, USA) at 517 nm of absorbance. The ABTS⁺ scavenging capability was analysed by spectrophotometric measurement of changes in the concentration of the ABTS radical cation (2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt)) (98%), (Sigma-Aldrich, Saint Louis, Missouri, USA) at 734 nm of absorbance.

Statistical methods

An analysis of the statistical dependencies between the means of antioxidant activity, iodine content and iodine compound ($p < 0.01$) was performed with Tukey's multiple range test and PCA analysis. These analyses were calculated using the software STATISTICA PL 13.3 (StatSoft, Cracow, Poland). The iodine content was analysed in 6 samples (3 measurements / 2 independent series). Hypotheses were tested at $\alpha = 0.01$. To predict the dynamics of losses of iodine in dried carrots and cauliflower fortified with iodine throughout storage, the $T_{25\%}$ value was used. This calculation indicates the time in which the losses will amount to 25% (Szymandera-Buszk et al., 2021).

RESULTS AND DISCUSSION

Iodine stability after the fortification process and storage

Our results confirmed that all types of dried carrots and cauliflower (both varieties) were suitable as iodine

fortification matrices (Fig. 1). The iodine reproducibility content was found to be 68–80% directly after drying. Higher iodine stability was confirmed for cauliflower samples (post hoc Tukey test; $p < 0.05$). Earlier research on the enrichment of protein preparations and pumpkin with iodine confirms the reproducibility of iodine at similar values (Zaremba et al., 2022). The statistical analysis (one-way ANOVA test) confirmed the significance of iodine compound (KI, KIO₃) (F-value = 81.70) and vegetable type (F-value = 5.40) as predictors of changes in iodine content (Table 1). A higher concentration of iodine was confirmed in cauliflower than in carrots. Our research confirmed that both forms of iodine exhibited high iodine stability after the freeze-drying process, with a higher concentration noted for KIO₃ than for KI. Previous studies also found a higher stability of iodine in the form of KIO₃ (Waszkowiak and Szymandera-Buszk, 2007).

High iodine stability during storage was also confirmed. The statistical analysis (one-way ANOVA test) also revealed a statistically significant effect ($p < 0.05$) of the type of iodine compound used for fortification (KI, KIO₃) (F-value = 26.45) and vegetable type (F-value = 23.89) (Table 1). A higher concentration of iodine was noted for KIO₃ than for KI. The highest stability of iodine after 320 days of storage was found for KIO₃ applied to cauliflower and the lowest stability for KI added to carrot. In future research, this topic should be further developed by examining, for example, the

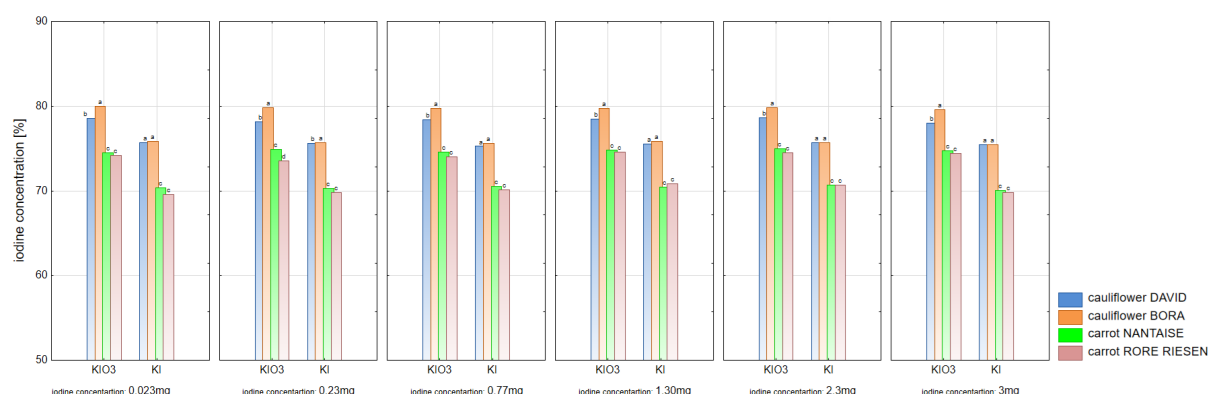


Fig. 1. The concentration of iodine (%) in dried carrots and cauliflower fortified with KI or KIO₃ in concentrations from 0.023 to 3.0 mg/100 g. Different letters signify a significant difference at $p < 0.05$ (tests of one-way ANOVA and post-hoc Tukey test) in the same concentration and type of iodine; values of the mean ($n = 6$)

Table 1. Statistical analysis of losses in iodine content for dried carrots and cauliflower (both varieties) fortified with iodine after the fortification process and after 320 days of storage (test of one-way ANOVA)

Predictors	SS	df	MSE	F-value	p-value
After drying					
Iodine concentration	1.50	5	0.30	0.10	0.99
Vegetables type	35.80	3	11.90	5.40	0.00
Iodine form	85.30	1	85.30	81.70	0.00
After 320 days of storage					
Iodine concentration	1.10	5	0.20	0.02	1.00
Vegetables type	301.10	3	100.40	23.89	0.00
Iodine form	177.40	1	177.40	26.45	0.00

*SS – statistical significance; df – degrees of freedom; MSE – mean sum of squares.

possibility of iodine interactions with other vegetable ingredients and the related impact on iodine stability. Particular attention should be paid to analysing the different carbohydrate profiles and degree of ripeness of vegetables, especially for KI.

The analysis of the dynamics of losses in iodine content ($T_{25\%}$) confirmed a slower pace for KIO_3 (by 14–19%) than for KI (Table 2). The dynamics of iodine changes during storage were at a similar level for all iodine concentrations. However, the type of vegetable influenced these dynamics. Iodine applied to carrots had a statistically significantly faster pace of iodine loss. For cauliflower, the pace was slower by 14 to 20%.

Antioxidant properties of dried carrots and cauliflower enriched with iodine

Our research results confirmed (using the DPPH[•] and ABTS^{•+} methods) the antioxidant effect of dried carrots and cauliflower (Blando et al., 2021; Kapusta-Duch et

Table 2. The dynamics of changes in iodine content ($mg\ kg^{-1}$) for the storage (320 days) of dried carrots and cauliflower fortified with iodine at variable concentrations and in different vegetable types

Parameters fortifications			Dynamics of change in iodine content during 320 days of vegetable storage								
Vegetable variety	Iodine concentration $mg\ kg^{-1}$	$T_{25\%}$ days	R^2	RMSE	k	A_0^*	$T_{25\%}$ days	R^2	RMSE	k*	A_0^*
			KIO_3					KI			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cauliflower DAVID	0.23	379.07	0.99	0.00	0.000	1.02	330.13	0.99	0.00	0.000	1.02
	0.23	373.95	0.98	0.00	0.000	1.26	327.65	0.98	0.00	0.000	1.26
	0.77	379.66	0.99	0.01	–0.001	2.18	324.98	0.98	0.01	–0.001	2.18
	1.30	377.38	0.99	0.01	–0.001	3.72	326.95	0.98	0.01	–0.001	3.73
	2.30	377.14	0.99	0.01	–0.002	10.14	330.08	0.99	0.02	–0.002	10.29
	3.00	371.06	0.98	0.02	–0.002	20.82	323.80	0.98	0.04	–0.002	21.15
Cauliflower BORA	0.023	386.51	0.97	0.00	0.000	1.02	323.14	0.98	0.00	0.000	1.02
	0.23	388.36	0.96	0.00	0.000	1.26	325.01	0.97	0.00	0.000	1.26
	0.77	379.21	0.95	0.01	–0.001	2.19	319.19	0.97	0.01	–0.001	2.18
	1.30	385.64	0.96	0.02	–0.001	3.76	325.07	0.97	0.02	–0.001	3.72
	2.30	386.42	0.96	0.03	–0.002	10.43	323.63	0.98	0.03	–0.002	10.33
	3.00	379.30	0.95	0.04	–0.002	21.50	323.10	0.99	0.04	–0.002	20.78

Table 2 – cont.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Carrot NANTAISE	0.023	316.28	0.99	0.00	0.000	1.02	276.61	0.99	0.00	0.000	1.02
	0.23	318.65	0.98	0.00	0.000	1.26	274.60	0.99	0.00	0.000	1.26
	0.77	315.18	0.98	0.01	–0.001	2.19	276.08	0.99	0.01	–0.001	2.18
	1.30	316.97	0.99	0.01	–0.001	3.73	274.44	0.99	0.01	–0.001	3.75
	2.30	319.44	0.99	0.02	–0.002	10.34	276.47	0.99	0.03	–0.002	10.43
	3.00	314.53	0.98	0.04	–0.003	21.19	270.96	0.99	0.03	–0.003	19.47
Carrot RORE RIESEN	0.023	313.65	0.99	0.00	0.000	1.02	271.05	0.99	0.00	0.000	1.02
	0.23	310.59	0.98	0.00	0.000	1.26	274.46	0.99	0.00	0.000	1.26
	0.77	310.81	0.98	0.01	–0.001	2.18	275.12	0.99	0.00	–0.001	2.19
	1.30	316.27	0.99	0.01	–0.001	3.74	277.65	0.99	0.01	–0.001	3.75
	2.30	315.69	0.98	0.02	–0.002	10.40	278.90	0.99	0.02	–0.002	10.4
	3.00	313.46	0.99	0.00	–0.003	21.10	270.96	0.98	0.00	–0.003	20.95

* A_0 – the initial content (immediately after drying) of iodine, k – decay constant (Szymandera-Buszk et al., 2020).

al., 2017). However, there were differences between the different varieties of vegetable. The highest anti-radical activity was observed in cauliflower (David variety) and the lowest in carrots (Nantaise variety).

The statistical analysis also indicated a relationship between the type of iodine compound (KIO_3/KI) and the $ABTS^{+}$ and the $DPPH^{\cdot}$ test results (Table 3). The

Table 3. Statistical analysis of changes in $ABTS^{+}$ and $DPPH^{\cdot}$ scavenging capacity in dried carrots and cauliflower varieties fortified with iodine (KIO_3/KI) after the fortification process and after storage (320 days) (one-way ANOVA test)

Predictors	SS	df	MSE	F-value	p-value
1	2	3	4	5	6
$ABTS^{+}$					
After drying, fortified with KIO_3					
Iodine concentration	263.93	6	43.99	433.00	0.00
Vegetable variety	0.39	3	0.13	1.26	0.32
After drying, fortified with KI					
Iodine concentration	0.03	3	0.02	0.57	0.58
Vegetable variety	0.73	6	0.121	4.415	0.06
After 320 days of storage, fortified with KIO_3					
Iodine concentration	271.96	6	45.33	25.64	0.00
Vegetable variety	0.40	3	0.10	0.01	1.00

Table 3 – cont.

1	2	3	4	5	6
After 320 days of storage, fortified with KI					
Iodine concentration	0.39	6	0.06	0.45	0.83
Vegetable variety	39.52	3	13.17	22.47	0.00
$DPPH^{\cdot}$					
After drying, fortified with KIO_3					
Iodine concentration	163.76	6	27.29	42.98	0.00
Vegetable variety	4.09	3	1.36	2.15	0.13
After drying, fortified with KI					
Iodine concentration	3.54	6	0.59	1.35	0.29
Vegetable variety	0.80	3	0.27	0.61	0.62
After 320 days of storage, fortified with KIO_3					
Iodine concentration	291.38	6.00	48.56	51.15	0.00
Vegetable variety	17.29	3.00	5.76	0.47	0.71
After 320 days of storage, fortified with KI					
Iodine concentration	0.65	6	0.11	0.48	0.81
Vegetable variety	10.91	3	3.64	16.18	0.00

*SS – statistical significance; df – degrees of freedom; MSE – mean sum of squares.

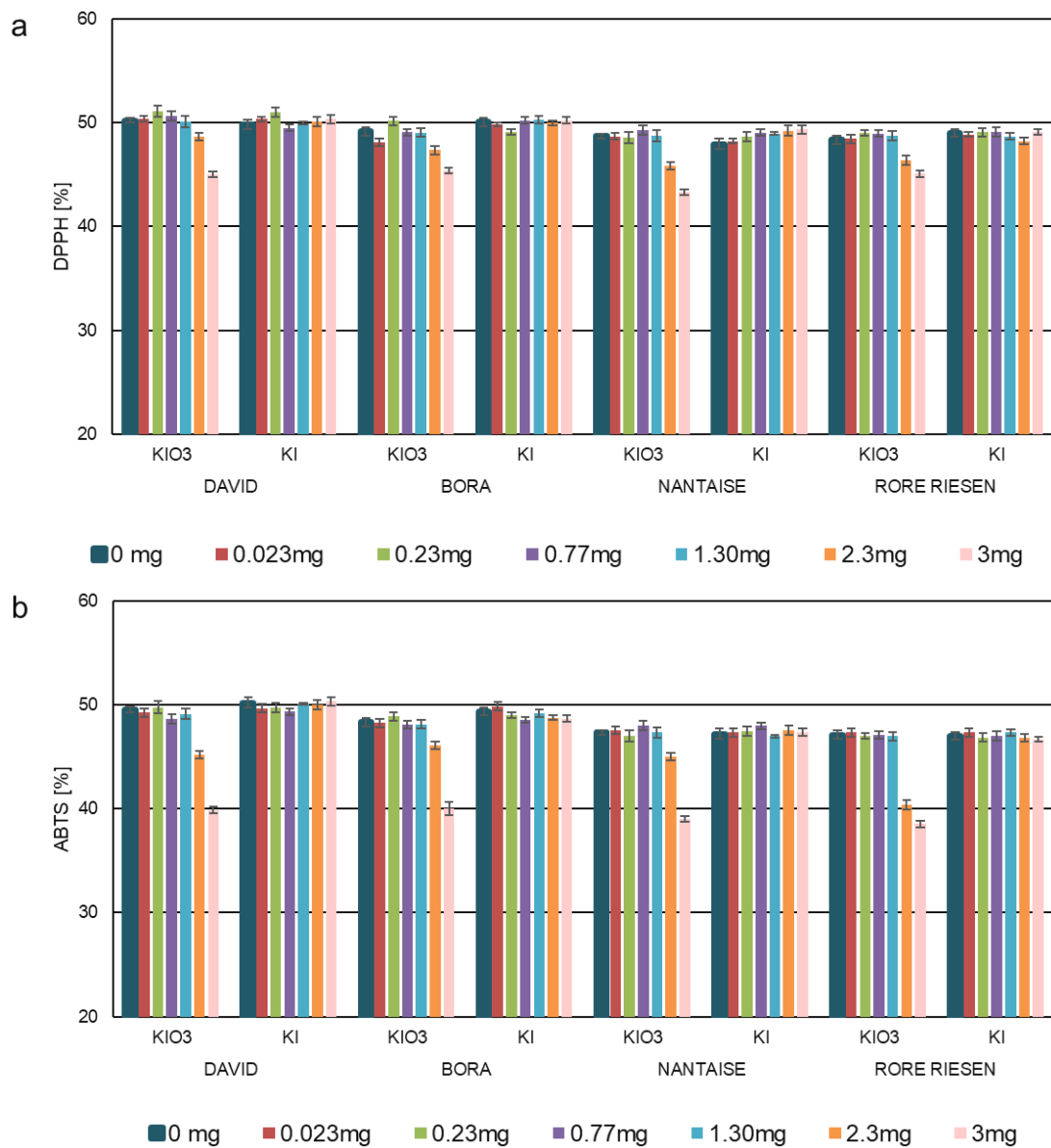


Fig. 2. The DPPH[•] (a) and ABTS^{•+} (b) free radical scavenging capability of carrots and cauliflower enriched with KI and KIO₃ at levels from 0.023 to 3.0 mg/100 g after 320 days, compared to non-iodised samples

strongest relationship (one-way ANOVA test) was between the content of iodine in the compounds KIO₃ and the results of the DPPH[•] ($F = 291.38$; $p < 0.05$) and ABTS^{•+} tests ($F = 271.00$; $p < 0.05$). In the samples of dried carrots and cauliflower enriched with iodine at levels of 0.023 and 0.23 mg kg⁻¹ (for both iodine compounds), the capacity indices derived from the ABTS^{•+} and DPPH[•] methods did not change (Figure 2a and

2b). Similarly, fortification with iodine in the form of potassium iodide at a level of 2.3 mg kg⁻¹ resulted in no significant changes in the antioxidant properties of the enriched carrots and cauliflower. This relationship was found after both the drying and storage processes. In the samples containing KIO₃ at 2.3 mg kg⁻¹, on the other hand, the capacity to terminate ABTS^{•+} and DPPH[•] was decreased. This relationship was found

both for the carrot and cauliflower samples. For these enriched varieties, the indicators of DPPH[•] decreased by 9% and ABTS^{•+} by 6–9% immediately after drying, compared to those without iodine.

This trend was also found after storage. The indicators of DPPH[•] and ABTS^{•+} decreased by 8–9% compared to the non-iodised samples.

An earlier study verified that KIO₃ and KI can have different pro- and antioxidative properties. The research results also indicate that iodine, especially in the form of iodate, has strong chemical activity and is also prooxidative (Li et al., 2020). Lipid oxidation, the variable stability of ascorbic acid, and changes in protein function could be mediated by the presence of iodate. The results of other authors have demonstrated the variable impact of applying iodine in its iodide (I⁻) and potassium iodate (IO₃⁻) forms on antioxidant concentration in tomato seedlings (Medrano-Macías et al., 2016).

CONCLUSIONS

Cauliflower and carrots can be fortified with iodine, and iodine-fortified carrots and cauliflower can be stored for a long time. Iodine stability after 320 days of storage was 70–80%, with a higher stability obtained using KIO₃. However, to maximise free radical scavenging indices, iodine should be fortified at concentrations of up to 2.30 mg/100 g.

DECLARATIONS

Data statement

All data supporting this study has been included in this manuscript.

Ethical Approval

Not applicable.

Competing Interests

The authors declare that they have no conflicts of interest.

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

- Blando, F., Marchello, S., Maiorano, G., Durante, M., Signore, A., Laus, M. N., ..., Mita, G. (2021). Bioactive compounds and antioxidant capacity in anthocyanin-rich carrots: A comparison between the black carrot and the apulian landrace “polignano” carrot. *Plants*, 10(3), 1–15. <https://doi.org/10.3390/plants10030564>
- Chanthilath, B., Chavasit, V., Chareonkiatkul, S., Judprasong, K. (2009). Iodine stability and sensory quality of fermented fish and fish sauce produced with the use of iodated salt. *Food Nutr. Bull.*, 30(2), 183–188. <https://doi.org/10.1177/156482650903000210>
- Chu, Y. H., Chang, C. L., Hsu, H. F. (2000). Flavonoid content of several vegetables and their antioxidant activity. *J. Sci. Food Agric.*, 50, 561–566. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(200004\)80:5<561::AID-JSFA574>3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(200004)80:5<561::AID-JSFA574>3.0.CO;2-%23)
- Cruz, D., Vasconcelos, V. (2024). Legal Aspects of Microalgae in the European Food Sector. *Foods*, 13(1), 124. <https://doi.org/10.3390/foods13010124>
- Dziki, D. (2021). Current trends in enrichment of wheat pasta: Quality, nutritional value and antioxidant properties. *Processes*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/pr9081280>
- Gudiño, I., Martín, A., Casquete, R., Prieto, M. H., Ayuso, M. C., Córdoba, M. G. (2022). Evaluation of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) crop by-products as sources of bioactive compounds. *Sci. Horticult.*, 304 (July). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111284>
- Hatch-McChesney, A., Lieberman, H. R. (2022). Iodine and Iodine Deficiency: A Comprehensive Review of a Re-Emerging Issue. *Nutrients*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/nu14173474>

- Iwan, P., Stepniak, J., Karbownik-Lewinska, M. (2021). Pro-oxidative effect of KIO₃ and protective effect of melatonin in the thyroid—comparison to other tissues. *Life*, 11(6), 1–14. <https://doi.org/10.3390/life11060592>
- Jankowska, A., Kobus-Cisowska, J., Szymandera-Buszka, K. (2023). Antioxidant properties of beetroot fortified with iodine. *J. Res. Appl. Agric. Eng.*, 68(2), 10–15. <https://doi.org/10.53502/txiy9852>
- Kapusta-Duch, J., Leszczyńska, T., Borczak, B., Florkiewicz, A., Załubska, A. (2017). Impact of Different Packaging Systems on Selected Antioxidant Properties of Frozen-Stored Cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis). *Pol. J. Food Nutr. Sci.*, 67(3), 211–217. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2016-0017>
- Krzepiło, A., Zych-Wężyk, I., Molas, J. (2015). Alternative ways of enriching the human diet with iodine. *J. Pre-Clin. Clin. Res.*, 9(2), 167–171. <https://doi.org/10.5604/18982395.1186500>
- Kuhne, D., Wirth, F., Wagner, H. (1993). Iodine determination in iodized meat products. *Fleischwirtschaft*, 73(2), 175–178.
- Li, X., Cao, X., Li, J., Xu, J., Ma, W., Wang, H., ..., Zhang, Y. (2020). Effects of high potassium iodate intake on iodine metabolism and antioxidant capacity in rats. *J. Trace Elem. Med. Biol.*, 62 (September 2019), 126575. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2020.126575>
- Medrano-Macias, J., Leija-Martínez, P., González-Morales, S., Juárez-Maldonado, A., Benavides-Mendoza, A. (2016). Use of iodine to biofortify and promote growth and stress tolerance in crops. *Front. Plant Sci.*, 7(AUG2016), 1–20. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01146>
- Moxon, R. E., Dixon, E. J. (1980). Semi-automatic method for the determination of total iodine in food. *Analyst*, 105, 344–352. <https://doi.org/10.1039/an9800500344>
- Nartea, A., Fanesi, B., Pacetti, D., Lenti, L., Fiorini, D., Lucci, P., ..., Falcone, P. M. (2023). Cauliflower by-products as functional ingredient in bakery foods: Fortification of pizza with glucosinolates, carotenoids and phytosterols. *Curr. Res. Food Sci.*, 6 (January), 100437. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100437>
- Nuutila, A. M., Puupponen-Pimia, R., Aarni, M., Oksman-Caldentey, K. M. (2003). Comparison of antioxidant activities of onion and garlic extracts by inhibition of lipid peroxidation and radical scavenging activity. *Food Chem.*, 81, 485–493. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00476-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00476-4)
- Re, R., Pellegrini, N., Protegente, A., Pannala, A., Yang, M. C., Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Rad. Biol. Med.*, 26, 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Shamshad, A., Ihtisham-Ul-Haq, Butt, M. S., Nayik, G. A., Al Obaid, S., Ansari, M. J., ..., Ramniwas, S. (2023). Effect of storage on physicochemical attributes of ice cream enriched with microencapsulated anthocyanins from black carrot. *Food Sci. Nutr.*, 11(7), 3976–3988. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3384>
- Szymandera-Buszka, K., Waszkowiak, K., Kaczmarek, A., Zaremba, A. (2020). Wheat dietary fibre and soy protein as new carriers of iodine compounds for food fortification – The effect of storage conditions on the stability of potassium iodide and potassium iodate. *LWT*, 137, 110424. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110424>
- Waszkowiak, K., Szymandera-Buszka, K. (2007). Effect of collagen preparations used as carriers of potassium iodide on retention of iodine and thiamine during cooking and storage of pork meatballs. *J. Sci. Food Agric.*, 87(8), 1473–1479. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2844>
- WHO (2007). Salt as a vehicle for fortification: report of a WHO expert consultation. WHO Report. Geneva: WHO Press.
- WHO (2022). Universal salt iodization and sodium intake reduction compatible, cost – effective strategies. Public Health Benefit. Geneva, Switzerland World Health Organization, 1–10. Retrieved 22 August 2024 from <https://www.who.int/publications/i/item/9789240053717>
- Zaremba, A., Cichoń, N., Szymandera-Buszka, K. (2022). Design of a plant product enriched with beetroot fortified with iodine. In: M. Beszterda-Buszczak and M. Przeor (Eds.), *Food today. Local or global, traditional or innovative?* Conference monograph (pp. 22–36). Poznań: Poznań University of Life Sciences Publishing. <https://doi.org/10.17306/m.978-83-67112-31-4>
- Zaremba, A., Gramza-Michałowska, A., Pal, K., Szymandera-Buszka, K. (2023a). The Effect of a Vegan Diet on the Coverage of the Recommended Dietary Allowance (RDA) for Iodine among People from Poland. *Nutrients*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/nu15051163>
- Zaremba, A., Hęś, M., Jędrusek-Golińska, A., Przeor, M., Szymandera-Buszka, K. (2023b). The Antioxidant Properties of Selected Varieties of Pumpkin Fortified with Iodine in the Form of Potassium Iodide and Potassium Iodate. *Foods*, 14(14), 2792. <https://doi.org/10.3390/foods12142792>
- Zaremba, A., Waszkowiak, K., Kmiecik, D., Jędrusek-Golińska, A., Jarzębski, M., Szymandera-Buszka, K. (2022). The Selection of the Optimal Impregnation Conditions of Vegetable Matrices with Iodine. *Molecules*, 27(10), 1–18. <https://doi.org/10.3390/molecules27103351>

Żywność dzisiaj

Lokalna czy globalna,
tradycyjna czy innowacyjna?

Monografia pokonferencyjna

Redakcja

Monika Beszterda-Buszcak

Monika Przeor

Wydawnictwo
Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu

Przewodniczący Komitetu Redakcyjnego

prof. dr hab. Jacek Wójtowski

Redaktor Wydziału Nauk o Żywności i Żywieniu

prof. UPP dr hab. inż. Julita Reguła

Recenzent

prof. dr hab. Anna Żbikowska

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie



**Ministerstwo
Edukacji i Nauki**

Konferencja i monografia pokonferencyjna zostały dofinansowane przez Ministerstwo Edukacji i Nauki na podstawie umowy nr DNK/SN/512883/2021 ze środków przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę w ramach programu „Dokonała Nauka”. Nazwa projektu: „XXVI Sesja Naukowa Sekcji Młodej Kadry Naukowej”.

Organizatorzy

**UNIwersytet
PRzyrodniczy
w POZNANIU**

Copyright © by Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań 2022

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

Opracowanie redakcyjne: Paulina Kaczmarek

Projekt, opracowanie graficzne i przygotowanie do druku: Stanisław Tuchołka / panbook.pl

Projekt okładki: Tomasz Adamski / exemplum.pl

ISBN 978-83-67112-27-7

ISBN wersji elektronicznej 978-83-67112-29-1

<https://doi.org/10.17306/m.978-83-67112-29-1>

ark. wyd. 9,2 ark. druk. 8,1

Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu
ul. Witosza 45, 61-693 Poznań

Druk i oprawa
Zakład Graficzny Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu
ul. Wojska Polskiego 67, 60-625 Poznań

Wersja elektroniczna dostępna w serwisie <https://www.ibuk.pl/>

Projekt produktu pochodzenia roślinnego wzbogaconego burakiem fortyfikowanym jodem

Agata Zaremba^{1✉}, Natalia Cichoń¹, Krystyna Szymandera-Buszk¹

¹Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej, Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Poznań

✉agata.zaremba@up.poznan.pl

Streszczenie. Celem pracy była analiza możliwości zastosowania buraka w roli nośnika soli jodu oraz zaprojektowanie produktu zbożowego z dodatkiem fortyfikowanego jodem suszu buraka. Efektywność wykorzystania buraka (*Beta vulgaris* L.) jako matrycy dla jodu badano przy użyciu dwóch form tego składnika: KI oraz KIO₃. Zaprojektowano także bułki typu ciabatta z dodatkiem wzbogaconego jodem suszu buraka, wprowadzonego na poziomie 5%. Analizowano zawartość jodu w produkcie przed wypiečeniem i po, a także podczas przechowywania w zmiennych warunkach temperaturowych (4°C, 21°C i -21°C). Do przewidywania dynamiki zmian zawartości jodu we wzbogaconym produkcie podczas zmiennych warunków przechowywania wykorzystano wartość okresu półtrwania jodu ($T_{1/2}$). Zaprojektowane produkty poddano także ocenie semikonsumenckiej w grupie osób deklarujących stosowanie diety mieszanej i wegańskiej. Wyniki badań semikonsumenckich potwierdziły wysoką pożądalność w odniesieniu do barwy, smaku i zapachu zaprojektowanych bułek typu ciabatta z dodatkiem fortyfikowanego jodem suszu buraka zarówno wśród osób deklarujących dietę wegańską, jak i mieszaną. Nie stwierdzono wpływu rodzaju naniesionej soli (KI lub KIO₃) na poziom pożądalności. Stwierdzono natomiast większą stabilność jodu wprowadzonego jako jodan potasu (KIO₃). Uzyskane wyniki potwierdziły straty jodu podczas wypieku pieczywa typu ciabatta sięgające 40%. Analiza stabilności jodu podczas przechowywania potwierdziła najmniejsze tempo powstawania strat jodu podczas przechowywania zamrażalniczego pieczywa (10–13%), a największe podczas przechowywania w temp. 21°C. Badania potwierdziły możliwość wprowadzenia wzbogaconego w jod suszu buraka do pieczywa typu ciabatta jako składnika zwiększającego efektywność profilaktyki jodowej.

Słowa kluczowe: jod, warzywa suszone, burak, wzbogacanie żywności, pieczywo

Wstęp

Jod jest pierwiastkiem niezbędnym do produkcji hormonów tarczycy – trójiodotyroniny (T3) i tyroksyny (T4). Hormony te pełnią wiele ważnych funkcji, m.in. przyczyniają się do prawidłowego funkcjonowania i rozwoju mózgu oraz

układu nerwowego, biorą udział w przemianie składników odżywczych, a także termoregulacji (Farebrother i Rohner, 2018; Pilarczyk i in., 2019).

Niedostateczna podaż jodu skutkuje zespołem zaburzeń spowodowanych jego niedoborem (ang. Iodine deficiency disorders – IDD). Wśród objawów tego zespołu wymieniane są: wole endemiczne, niedoczynność tarczycy, rak pęcherzykowaty tarczycy, obniżenie funkcji umysłowych, a u dzieci kretynizm, zaburzenia rozwoju umysłowego czy wady wrodzone (Ahad i Ganie, 2010; Zimmermann i in., 2008).

W żywności wysoką zawartość jodu odnotowuje się przede wszystkim w roślinach morskich, np. w algach, a także rybach słonowodnych (Hays i in., 2018). Źródłem tego pierwiastka mogą być również produkty o niższej zawartości, ale częstszym spożyciu. W diecie Polaków są to mleko i produkty mleczne oraz jaja (Brzóska i in., 2015).

Jod nie jest niezbędny dla życia roślin, dlatego też jego zawartość w warzywach i owocach jest niska i zależy od zdolności absorpcyjnych rośliny, zawartości selenu w podłożu oraz stosowania związków azotowych (Skoczylas i in., 2018; Krzepiło i in., 2015). Niektóre rośliny zawierają związki goitrogenne, które ograniczają wchłanianie jodu z pożywienia (Kurosad i in., 2005). Do takich roślin należą warzywa krzyżowe, np. brukselka, brokuł, kalafior, kapusta. Ponadto niektóre z warzyw (między innymi soja) zawierają tioglikozydy, którym przy długotrwałym spożywaniu przypisuje się działanie wolotwórcze. Substancje te blokują wiązanie jodu i konwersję tyrozyny do tyroksyny, która jest niezbędna do produkcji hormonów tarczycy (Bouga i in., 2018; Krela-Kaźmierczak i in., 2021).

Biorąc pod uwagę niewielkie spożycie źródeł odzwierzęcych jodu (lub brak) oraz duże spożycie roślin zawierających goitrogeny i tioglikozydy, uważa się wegan i wegetarian za grupy szczególnie narażone na niedobory jodu (Brytek-Matera, 2020; Fallon i Dillon, 2020).

Głównym rezerwuarem jodu jest woda morska i oceaniczna, co skutkuje nierównomiernym rozmieszczeniem w środowisku. Ludność wielu państw znajduje się w strefach naturalnie niedoborowych w jod, co zwiększa ryzyko epidemii IDD (Zimmermann i Trumbo, 2013). WHO i UNICEF uznały niedobór tego pierwiastka za poważny problem światowego zdrowia publicznego i w związku z tym w 1993 r. wydały zalecenia, które wdrożone przez władze poszczególnych państw przyniosły widoczną poprawę wysycenia populacji jodem (WHO, 2014). Jodowanie soli kuchennej jest najbardziej rozpowszechnioną, a przy tym skuteczną i niedrogą praktyką, zapewniającą stabilną podaż jodu w obrębie dużych populacji poszczególnych krajów (Olson i in., 2021).

Biorąc jednak pod uwagę zalecenie WHO z 2006 roku, aby ograniczyć spożycie soli do 5 g dziennie u osób dorosłych, podaż jodu z tego źródła może ulec obniżeniu (Szybiński, 2009). Konieczne jest zatem znalezienie nowych nośników dla soli jodu.

Burak (*Beta vulgaris* L.) jest warzywem korzeniowym szeroko stosowanym w kuchni wielu krajów, ale również cenionym surowcem przemysłu spożywczego. Właściwości prozdrowotne buraka wynikają z zawartości składników mineralnych, kwasu askorbinowego, karotenoidów, fenenoli i betalain. Betalainy wykazują m.in. działanie przeciwutleniające, przeciwzapalne, przeciwnowotworowe, obniżające ciśnienie krwi i stężenie lipidów, a także przeciwcukrzycowe i przeciwdziałające otyłości (Chhikara i in., 2020). Dzięki swoim właściwościom zdrowotnym, a także szerokiej dostępności burak wydaje się dobrą alternatywą dla soli kuchennej jako nośnik jodu (Lucky i in., 2020). Dlatego celem pracy była analiza możliwości zastosowania buraka w roli nośnika soli jodu oraz zaprojektowanie produktu zbożowego z dodatkiem fortyfikowanego jodem suszu buraka.

Materialy i metody

Jako matrycę dla jodu wybrano korzeń buraka (*Beta vulgaris* L.). Impregnowano go roztworami jodku potasu (KI) oraz jodanu potasu (KIO_3). Analizując dane literaturowe dotyczące częstości spożycia różnych grup produktów, wybrano rodzaj produktu finalnego, a następnie zaprojektowano bułki typu ciabatta z dodatkiem wzbogaconego jodem suszu buraka (Stoś i in., 2021). Buraki zakupiono w handlu detalicznym. W pierwszym etapie poddano je obróbce wstępnej, na którą składało się mycie, obieranie, płukanie. Warzywa pokrojono, a następnie gotowano na parze w piecu konwekcyjno-parowym w temperaturze 100°C przez 25 minut. Po obróbce cieplnej warzywa poddano homogenizacji. Przygotowano wodny roztwór KI oraz KIO_3 o stężeniu odpowiednio 0,5 mg/1000 ml oraz 0,64 mg/1000 ml. Odpowiednio przygotowane roztwory dodano do zhomogenizowanych warzyw, uwzględniając uwodnienie 1:2 (masa warzyw:masa roztworu).

Następnie wszystkie próby schładzano przez 30 minut w temperaturze 4°C , zamrażano i poddano liofilizacji. Po tym procesie następowała powtórna homogenizacja w celu uzyskania sypkiego proszku.

Z dodatkiem podanych jodowanych preparatów przygotowano bułki typu ciabatta w 2 wariantach – z wykorzystaniem preparatów buraka jodowanych

jodkiem potasu (KI) oraz jodanem potasu (KIO_3). Do przygotowania ciasta wykorzystano: 150 g mąki pszennej, 120 g wody, 2,5 g drożdży instant, 1 g soli niejodowanej oraz 14,4 g wzbogaconego jodem suszu buraka (5% w stosunku do masy). Następnie pozostawiono je do wyrośnięcia na 1 godzinę w temperaturze pokojowej, formowano ciabatty i pieczono w piecu konwekcyjno-parowym w temperaturze 220°C przez 20 minut.

Po przygotowaniu prototypu wykonano pomiar zawartości jodu w surowym cieście i w bułkach bezpośrednio po wypieczeniu oraz po przechowywaniu, w temperaturze 21°C oraz 4°C przez 2, 3, 4 i 5 dni, a także w warunkach zamrażalniczych (-21°C) po 10, 20, 30, 40, 60, 80 i 100 dniach. Zawartość jodu w badanych nośnikach oznaczono metodą kolorymetryczną, którą opisali Kühne i in. (1993) oraz Szymandera-Buszk a i in. (2021). Analizy wykonano w dwóch niezależnych seriach, dla każdej próby w serii wykonano po 3 powtórzenia.

Przeprowadzono również semikonsumencką ocenę organoleptyczną wypieczonych bułek wzbogaconych jodanem potasu (KIO_3) i jodkiem potasu (KI). Badanie przeprowadzono metodą skalowania przy wykorzystaniu dziesięciopunktowej skali liniowej niestrukturyzowanej.

W badaniu wzięło udział 136 osób. Wiek ankietowanych był zróżnicowany (od 20 do 57 lat). Kobiety stanowiły 54%. 91 osób deklarowało dietę mieszaną (67%).

Uzyskane wyniki badań poddano jednoczynnikowej analizie wariancji. Wyniki analizowano statystycznie za pomocą oprogramowania Excel 2016 oraz STATISTICATM PL 13.3 (StatSoft, Tulusa, OK, USA). W celu określenia istotności różnic między próbkami zawierającymi różne formy jodu (KI i KIO_3) użyto testu Tukeya ($p \leq 0,05$). W celu określenia dynamiki zmian zawartości jodu podczas przechowywania wyliczono również czas połowicznego rozpadu jodu, czyli czas, w którym początkowa zawartość jodu zmniejszyła się o połowę (Szymandera-Buszk a i in., 2021).

Wyniki

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że średnie straty jodu po upieczeniu bułek typu ciabatta w porównaniu do zawartości w cieście przed wypiekiem wynosiły 38,94% dla jodanu potasu (KIO_3) oraz 40,32% dla jodku potasu (KI).

W przyjętym projekcie badań analizowano stabilność zawartego jodu podczas zmiennych warunków przechowywania upieczonego pieczywa. Zawartość jodu (tab. 1) we wszystkich próbkach – niezależnie od formy jodu i warunków

Tabela 1. Czas połowicznego rozpadu [dni] jodu zawartego w bułkach typu ciabatta wzbogaconych suszem buraka fortyfikowanego jodem (KI, KIO₃) podczas zmiennych warunków przechowywania (temp. 21, 4, –21°C)

Table 1. Half-life [days] of iodine contained in bread – ciabatta rolls enriched with dried beetroot fortified with iodine (KI, KIO₃) during variable storage conditions (temperature 21, 4, –21°C)

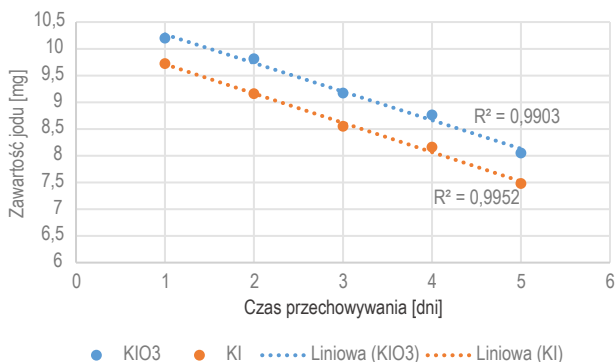
Forma jodu/ temp. przechowywania	KI		KIO ₃	
	T _{1/2}	R	T _{1/2}	R
21°C	11,1	0,995	10,6	0,990
4°C	13,1	0,948	15,0	0,975
–21°C	379,5	0,900	466,7	0,921

przechowywania pieczywa wzbogaconego w fortyfikowanego jodem buraka – zmieniała się liniowo (KIO₃: $R^2 = 0,990 - 0,921$, KI: $R^2 = 0,995 - 0,900$). Analiza czasu połowicznego rozpadu jodu (tab. 1) wykazała, że najwolniejsze tempo przemian jodu podczas przechowywania pieczywa typu ciabatta wzbogaconego jodowanym suszem buraka zapewniają warunki zamrażalnicze (–21°C). Natomiast najszybsze tempo przemian jodu i największe jego straty potwierdzono w próbkach przechowywanych w temperaturze 21°C.

Na podstawie uzyskanych wyników (ryc. 1) przedstawiono charakterystykę zmian zawartości jodu (KIO₃ i KI) we wzbogacanych w jodowany susz buraka bułkach typu ciabatta podczas przechowywania w temperaturze 21°C. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że bez względu na zastosowaną formę jodu zawartość pierwiastka zmniejszała się z każdym dniem przechowywania. W 5 dniu przechowywania pieczywa wzbogaconego suszem buraka fortyfikowanego jodem stwierdzono spadek zawartości jodu naniesionego w postaci KIO₃ na poziomie 21,07%, a w formie KI na poziomie 23,05%.

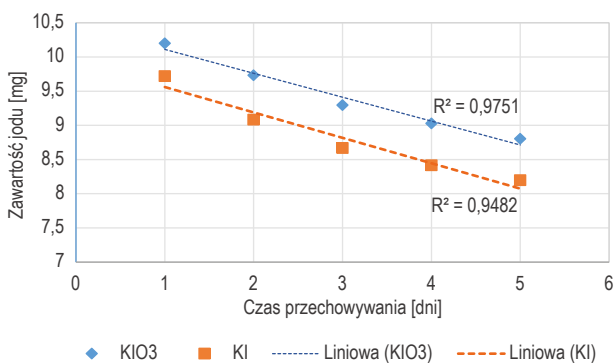
Uzyskane wyniki potwierdziły większą stabilność jodu wprowadzonego w formie jodanu potasu.

Na podstawie uzyskanych wyników (ryc. 2) przedstawiono charakterystykę zmian zawartości jodu (KIO₃ i KI) we wzbogacanych w jodowany susz buraka bułkach typu ciabatta podczas przechowywania w temperaturze 4°C. Potwierdzono istotny wpływ wydłużenia czasu przechowywania na stabilność zawartego jodu. Potwierdzono, że niezależnie od zastosowanej formy jodu zawartość tego pierwiastka zmniejszała się z każdym dniem przechowywania.



Ryc. 1. Charakterystyka zmian zawartości jodu w bułkach typu ciabatta wzbogaconych suszem buraka fortyfikowanego jodem (KI, KIO₃) podczas przechowywania w temperaturze 21°C

Fig. 1. Changes of iodine content in ciabatta-type bun, enriched in powdered beetroot fortified with iodine (KI, KIO₃), during storage at temperature 21°C



Ryc. 2. Charakterystyka zmian zawartości jodu w bułkach typu ciabatta wzbogaconych suszem buraka fortyfikowanego jodem (KI, KIO₃) podczas przechowywania w temperaturze 4°C

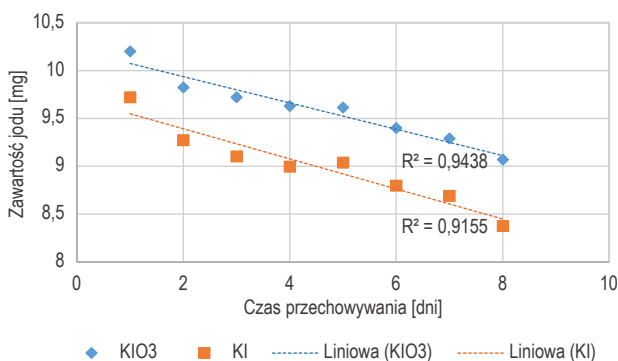
Fig. 2. Changes of iodine content in ciabatta-type bun, enriched in powdered beetroot fortified with iodine (KI, KIO₃), during storage at temperature 4°C

W przypadku jodanu potasu odnotowano 13,67% spadek zawartości jodu w 5 dniu przechowywania, natomiast jodku potasu o 15,67%. Uzyskane wyniki zawartości jodu potwierdziły liniową zależność zmiany zawartości jodu w czasie przechowywania jodowanych preparatów buraka (KIO₃; R² = 0,975,

KI: $R^2 = 0,948$). Potwierdzono większą stabilność jodu wprowadzonego w formie jodanu potasu.

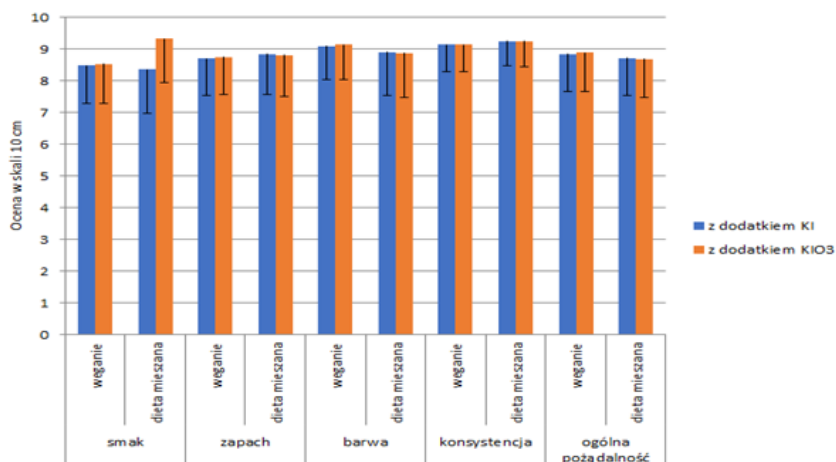
Analiza zawartości jodu w próbkach pieczywa typu bułki ciabatta wzbogaconych suszem buraka fortyfikowanym jodem przechowywanych w temperaturze -21°C potwierdziła wcześniejsze tendencje (ryc. 3). Potwierdzono istotny wpływ wydłużenia czasu przechowywania na stabilność zawartego jodu. Potwierdzono także większą stabilność jodu wprowadzonego w formie jodanu potasu. Analiza zawartości jodu wykazała, że niezależnie od zastosowanej formy jodu zawartość pierwiastka zmniejszała się z każdym dniem przechowywania. W przypadku jodanu potasu odnotowano 11,06% spadek zawartości jodu w 100 dniu przechowywania, natomiast jodku potasu o 13,83%. Zawartość jodu w obu jodowanych preparatach buraka zmieniała się liniowo (KIO_3 : $R^2 = 0,943$, KI: $R^2 = 0,915$). Analiza zawartości jodu podczas przechowywania w tej temperaturze wykazała, że są to warunki w najmniejszym stopniu wpływające na powstałe straty. Straty jodu wprowadzonego w formie jodanu potasu były mniejsze o 5% w odniesieniu do temperatury 4°C i 11% w porównaniu do 21°C .

Pożądalność sensoryczna jest ważnym czynnikiem decydującym o zakupie i wielkości spożycia produktów spożywczych (Kowalska i in., 2012). W związku z tym zdecydowano się na przeprowadzenie oceny semikonsumenckiej uzyskanych produktów. Analiza średnich z ocen poszczególnych wyróżników sensorycznych pieczywa typu ciabatta z dodatkiem wzbogacanego fortyfikowanym



Ryc. 3. Charakterystyka zmian zawartości jodu – w bułkach typu ciabatta wzbogaconych suszem buraka fortyfikowanego jodem (KI, KIO_3) podczas przechowywania w temperaturze -21°C

Fig. 3. Changes of iodine content in Ciabatta-type bun, enriched in powdered beetroot fortified with iodine (KI, KIO_3), during storage at temperature -21°C



Ryc. 4. Charakterystyka pożądalności sensorycznej wobec pieczywa – bułki typu ciabatta wzbogaconej suszem buraka fortyfikowanym jodem (KI, KIO₃) wśród wegan i osób stosujących dietę mieszaną

Fig. 4. Sensory attractiveness of Ciabatta-type bun enriched in iodine-fortified (KI, KIO₃) beetroot among vegans and people on mixed diet

jodem suszu buraka (ryc. 4) wykazała, że ogólnie konsumenci wysoko ocenili badane produkty (średnia 8,79). Na uwagę zasługuje fakt wysokiej oceny pożądalności (powyżej 8,0 pkt.) barwy zaprojektowanych produktów, pomimo odmiennej od tego typu produktu, bo jasnoczerwonej. Wykazano (tab. 2),

Tabela 2. Istotność statystyczna predyktorów modeli kowariancji dla oceny pożądalności sensorycznej wobec pieczywa – bułki typu ciabatta wzbogaconej suszem buraka fortyfikowanym jodem (KI, KIO₃)

Table 2. Statistical significance of predictors of covariance models for the assessment of sensory desire for bread – ciabatta rolls enriched with dried beetroot fortified with iodine (KI, KIO₃)

Predyktory	SS	df	SEM	F	p	Moc testu $\alpha = 0,05$
Dieta	0,002	1	0,002	0,01	0,916	0,005
Forma jodu	0,273	1	0,273	2,15	0,596	0,284

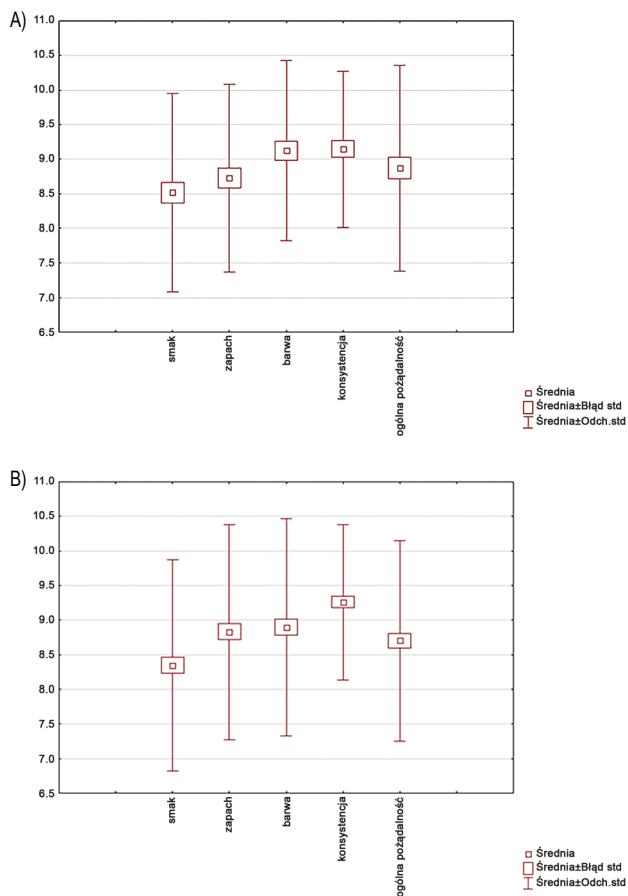
SS – odchylenie standardowe (standard deviation)

df – stopnie swobody (degrees of freedom)

SEM – standardowy błąd pomiaru (standard error of measurement)

F – test F (F-test)

p – wartość p (p-value).

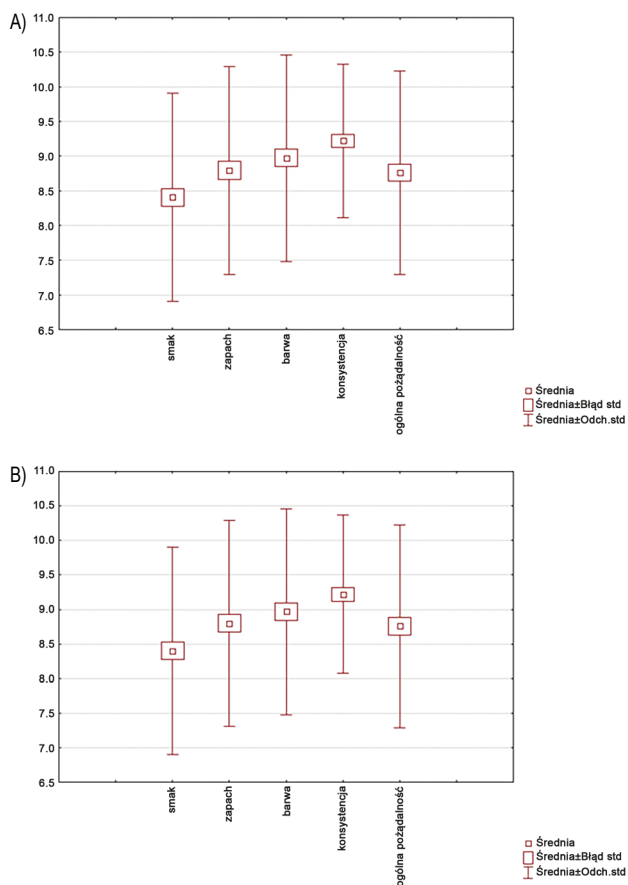


Ryc. 5. Wyróżniki sensoryczne pieczywa – bułki typu ciabatta wzbogaconej suszem buraka fortyfikowanym jodem (KI, KIO₃) wśród wegan (A) i osób stosujących dietę mieszaną (B)

Fig. 5. Sensory attractiveness descriptors of ciabatta-type bun enriched in iodine-fortified (KI, KIO₃) beetroot among vegans (A) and people on mixed diet (B)

że rodzaj diety ankietowanych osób (wegańska lub mieszana) i forma jodu nie miały wpływu na pożądalność sensoryczną wśród badanych osób (tab. 4, ryc. 5). Potwierdzono, że zarówno wśród wegan, jak i osób stosujących dietę mieszaną pożądalność ogólna jest na poziomie powyżej 8,5 pkt. w przyjętej skali 10 cm. Nie stwierdzono także wpływu wprowadzonej formy jodu (KI, KIO₃) na różnice w odbiorze deklarowanej pożądalności sensorycznej wobec

ocenianego pieczywa – bułek typu ciabatta (ryc. 4 i 6). Potwierdzono wysoką pożądaną sensoryczną zarówno wobec produktów z dodatkiem jodu w formie jodku, jak i jodanu potasu (ryc. 6).



Ryc. 6. Charakterystyka zmienności ocen pożądaności sensorycznej wśród wegan i osób stosujących dietę mieszaną dla poszczególnych wyróżników sensorycznych pieczywa typu bułki ciabatta wzbogaconej suszem buraka fortyfikowanym jodem – jodkiem potasu (A) i jodanem potasu (B)

Fig. 6. Variance of sensory attractiveness descriptors among vegans and people on mixed diet of ciabatta-type ban enriched in powdered beetroot fortified with potassium iodide (A) and potassium iodate (B)

Analiza potwierdziła, że oceny deklarowanej pożądalności sensorycznej konsumentów wobec ocenianych próbek odznaczały się małą zmiennością, co wskazuje na wysoki potencjał konsumpcyjny analizowanych produktów – bułek typu ciabatta z dodatkiem wzbogaconego w jod suszu buraka, niezależnie od zastosowanej form jodu (ryc. 5–8).

Dyskusja

Dodatek preparatów warzywnych do pieczywa pozwala na zwiększenie spożycia warzyw w ciągu dnia. Mogą one wzbogacać pieczywo w cenne składniki mineralne i substancje odżywcze. Pieczywo jest zwyczajowym elementem diety, przez co dodatek preparatów jodowanych może istotnie zwiększyć także podaż jodu w diecie człowieka. Badania dotyczące zawartości jodu w pieczywie (Manzoor i in., 2018), do którego przygotowania stosuje się sól jodowaną, wykazują, że poziom jodu nie jest zbyt wysoki, lecz wyższy niż przy zastosowaniu soli niejodowanej. Wyższy poziom jodu zaobserwowano, gdy do pieczywa dodano roztwór jodku potasu, a w dodatku smak pieczywa uległ poprawie.

Wzbogacanie pieczywa w jod było już powszechnie stosowane w Niderlandach, gdzie obligatoryjne było jodowanie soli dodawanej do pieczywa. Działanie to przyniosło wymierne efekty w walce z niedoborem jodu wśród mieszkańców tego kraju (Verkaik-Kloosterman i in., 2017).

Wcześniejsze badania Szymandery-Buszki i in. (2021) potwierdzają możliwość nanoszenia innych składników odżywczych na warzywa. W cytowanym badaniu nośnikiem tiaminy były kalafior oraz dynia.

W innym badaniu wykorzystano błonnik pszenny oraz białko sojowe jako nośnik jodu (Szymandera-Buszka i in., 2021). Stabilność podczas przechowywania otrzymanego preparatu zależna była od warunków przechowywania, zastosowanej formy jodu (KI czy KIO_3) oraz rodzaju nośnika. Jod naniesiony na badane preparaty wykazywał większą stabilność w porównaniu do soli kuchennej.

Straty jodu, które nastąpiły w trakcie wypieku bułek typu ciabatta, były duże, lecz jest to typowe dla badanego składnika mineralnego. Wisnu (2008) na podstawie badań nad stabilnością jodu zawartego w jodowanej jodanem potasu soli kuchennej, dodanego do zupy warzywnej i szpinakowej, stwierdził niższą zawartość jodu po obróbce termicznej – odpowiednio o 48,52% i 34,62%.

Istotne jest dostosowanie warunków przechowywania produktów w celu zminimalizowania strat jodu. Rodzaj zastosowanej formy chemicznej substancji

wzbogacającej ma również wpływ na wielkość strat podczas przechowywania. Potwierdza to badanie zespołu Wirakartakusumahi i Hariyadi (1998), gdzie zastosowano beta-karoten do fortyfikacji soku owocowego witaminą A. W ten sposób ograniczono straty tej witaminy podczas przechowywania w stosunku do zastosowania retinolu.

Z badań Ciecierskiej i in. (2018) wynika, że ankietowani cenią sobie smak i zapach pieczywa. Chętnie wybierają pieczywo z dodatkami, kierując się przy tym zdrowotnością i atrakcyjnością sensoryczną.

Wnioski

Wyniki badań semikonsumenckich potwierdziły wysoką pożądalność sensoryczną w odniesieniu do barwy, smaku i zapachu zaprojektowanych bułek typu ciabatta, wzbogaconych suszem buraka fortyfikowanym jodem na poziomie 5%. Nie stwierdzono statystycznie istotnego wpływu zastosowanej formy jodu (KIO_3 oraz KI) na analizowaną pożądalność sensoryczną. Uzyskane wyniki potwierdziły straty jodu podczas wypieku pieczywa sięgające 40%.

Potwierdzono większą stabilność jodu wprowadzonego jako jodan potasu (KIO_3). Analiza zawartości jodu w pieczywie potwierdziła najmniejsze tempo zmian jodu, a więc i najmniejsze jego straty (10–13%) podczas przechowywania zamrażalniczego. W celu uzyskania maksymalnej stabilności jodu zalecanymi warunkami przechowywania produktu typu ciabatta wzbogaconego fortyfikowanymi jodem preparatami warzywnymi są warunki chłodnicze (temp. 4°C) i zamrażalnicze, natomiast zalecaną formą jodu jest wprowadzenie KIO_3 .

Spożycie 100 g zaprojektowanego pieczywa pozwoliłoby na pokrycie około 6,5% dziennego zapotrzebowania na jod dla osoby dorosłej.

Badania potwierdzają możliwość wprowadzenia wzbogaconego w jod suszu buraka do pieczywa typu Ciabatta jako składnika zwiększającego efektywność profilaktyki jodowej, przy jednoczesnym założeniu strat tego składnika związanych z wypiekiem i przechowywaniem na poziomie 40–50%. W związku z tym zalecane jest uwzględnienie poziomu strat przy nanoszeniu jodu, przez wprowadzenie na surowiec docelowej ilości soli jodu zwiększonych o potencjalne straty.

Źródło finansowania: płatne z zadania badawczego: 506.751.03.00

Konflikt interesów: brak

Literatura

- Ahad, F., Ganie, S.A. (2010). Iodine, iodine metabolism and iodine deficiency disorders revisited. *Indian Journal of Endocrinology and Metabolism*, 14(1), 13–17. Pobrano z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21448409><http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC3063534>
- Bouga, M., Lean, M.E.J., Combet, E. (2018). Contemporary challenges to iodine status and nutrition: The role of foods, dietary recommendations, fortification and supplementation. *Proceedings of the Nutrition Society*, 77(3), 302–313. <https://doi.org/10.1017/S0029665118000137>
- Brytek-Matera, A. (2020). Restrained eating and vegan, vegetarian and omnivore dietary intakes. *Nutrients*, 12(7), 1–16. <https://doi.org/10.3390/nu12072133>
- Brzóska, F., Szybiński, Z., Śliwiński, B. (2015). Jod w mleku spożywczym w Polsce oraz jego rola w profilaktyce zdrowotnej człowieka. *Wiadomości Zootechniczne*, 53(4), 41–49.
- Chhikara, N., Kushwaha, K., Sharma, P., Gat, Y., Panghal, A. (2019). Bioactive compounds of beetroot and utilization in food processing industry: A critical review. *Food Chemistry*, 272, 192–200. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.022>
- Ciecierska, M., Warszucka, A., Kowalska, J., Derewiaka, D., Drużyńska, B., Majewska, E., Wołosiak, R. (2018). Preferencje konsumenckie na rynku pieczywa. *Nauka Przyroda Technologie*, 12(1), 55–63. Pobrano z: <http://10.0.67.154/J.NPT.00230%0Ahttp://han.up.poznan.pl/han/ebSCO/search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=128868404&lang=pl&site=eds-live>
- Fallon, N., Dillon, S.A. (2020). Low intakes of iodine and selenium amongst vegan and vegetarian women highlight a potential nutritional vulnerability. *Frontiers in Nutrition*, 7(72). <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00072>
- Farebrother, J., Rohner, F. (2018). Thyroid function and growth: The mechanisms of iodine. In: *The Biology of the First 1000 Days* (pp. 105–119). <https://doi.org/10.1201/9781315152950-8>
- Hadipour, E., Taleghani, A., Tayarani-Najaran, N., Tayarani-Najaran, Z. (2020). Biological effects of red beetroot and betalains: A review. *Phytotherapy Research*, 34(8), 1847–1867. <https://doi.org/10.1002/ptr.6653>
- Hays, S.M., Poddalgoda, D., Macey, K., Aylward, L., Nong, A. (2018). Biomonitoring equivalents for interpretation of urinary iodine. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 94(January), 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2018.01.017>
- Kowalska, H., Marzec, A., Mucha M. (2012). Ocena sensoryczna wybranych rodzajów pieczywa funkcjonalnego oraz preferencje pieczywa wśród konsumentów. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 571, 67–78.
- Krela-Kaźmierczak, I., Czarnywojtek, A., Skoracka, K., Rychter, A.M., Ratajczak, A.E., Szymczak-Tomczak, A., Dobrowolska, A. (2021). Is there an ideal diet to protect against iodine deficiency? *Nutrients*, 13(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/nu13020513>

- Krzepiłko, A., Zych-Wężyk, I., Molas, J. (2015). Alternative ways of enriching the human diet with iodine. *Journal of Pre-Clinical and Clinical Research*, 9(2), 167–171. <https://doi.org/10.5604/18982395.1186500>
- Kühne, D., Wirth, F., Wagner, H. (1993). Jodbestimmung in jodierten Fleischerzeugnissen. *Fleischwirtschaft*, 73(2), 175–178.
- Kurosad, A., Nicpoń, J., Kubiak, K., Jankowski, M., Kungl, K. (2005). Występowanie, obieg i obszary niedoboru jodu oraz główne jego źródła w żywieniu człowieka i zwierząt. *Advances In Clinical and Experimental Medicine*, 14(5), 1019–1025.
- Lucky, A.R., Al-Mamun, A., Hosen, A., Toma, M.A., Mazumder, M.A.R. (2020). Nutritional and sensory quality assessment of plain cake enriched with beetroot powder. *Food Research*, 4(6), 2049–2053. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(6\).268](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(6).268)
- Manzoor, M.S., Pasha, I., Ahmad, S., Sharif, M.K., Chughtai, M.F.J. (2018). Fortification and stability of iodine in bread to mitigate iodine deficiency disorder. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research Series B: Biological Sciences*, 61(3), 145–150. <https://doi.org/10.52763/pjsir.biol.sci.61.3.2018.145.150>
- Olson, R., Gavin-Smith, B., Ferraboschi, C., Kraemer, K. (2021). Food fortification: The advantages, disadvantages and lessons from sight and life programs. *Nutrients*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/nu13041118>
- Pilarczyk, B., Tomza-Marciniak, A., Pilarczyk, R., Marciniak, A., Bąkowska, M., Udała, J. (2019). Iodine. In: E. Kalisińska (Ed.), *Mammals and birds as bioindicators of trace element contaminations in terrestrial environments* (pp. 163–180). https://doi.org/10.1007/978-3-030-00121-6_5
- Skoczylas, Ł., Liszka-Skoczylas, M., Żmudziński, D., Rudnik, D. (2018). Biofortyfikacja roślin uprawnych jako metoda walki z deficytem składników mineralnych w diecie człowieka. In: J. Słupski, T. Tarko, I. Drożdż (red.), *Składniki bioaktywne surowców i produktów roślinnych* (pp. 58–67). Kraków: Oddział Małopolski Polskiego Towarzystwa Technologów Żywności.
- Stoś, K., Rychlik, E., Woźniak, A., Ołtarzewski, M. (2021). Krajowe badanie sposobu żywienia i stanu odżywienia populacji polskiej. Warszawa: Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego PZH – Państwowy Instytut Badawczy.
- Szybiński, Z. (2009). Sytuacja profilaktyki jodowej w Polsce w świetle ostatnich rekomendacji WHO dotyczących ograniczenia spożycia soli. *Pediatric Endocrinology, Diabetology and Metabolism*, 15(2), 103–107. Pobrano z: <https://pesquisa.bvsaud.org/portal/resource/pt/mdl-19772817>
- Szymandera-Buszk, K., Piechocka, J., Zaremba, A., Przeor, M., Jędrusek-Golińska, A. (2021). Pumpkin, cauliflower and broccoli as new carriers of thiamine compounds for food fortification. *Foods*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/foods10030578>
- Szymandera-Buszk, K., Waszkowiak, K., Kaczmarek, A., Zaremba, A. (2021). Wheat dietary fibre and soy protein as new carriers of iodine compounds for food fortification – The effect of storage conditions on the stability of potassium iodide and potassium iodate. *LWT – Food Science and Technology*, 137(October), 110424. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110424>

- Verkaik-Kloosterman, J., Buurma-Rethans, E.J.M., Dekkers, A.L.M., Van Rossum, C.T.M. (2017). Decreased, but still sufficient, iodine intake of children and adults in the Netherlands. *British Journal of Nutrition*, 117(7), 1020–1031. <https://doi.org/10.1017/S0007114517000733>
- Wirakartakusumah, M.A., Hariyadi, P. (1998). Technical aspects of food fortification. *Food and Nutrition Bulletin*, 19(2), 101–108. <https://doi.org/10.1177/156482659801900203>
- Wisnu, C. (2008). Determination of iodine species content in iodized salt and foodstuff during cooking. *International Food Research Journal*, 15(3), 325–330.
- WHO (World Health Organization) (2014). Guideline: Fortification of food-grade salt with iodine for the prevention and control of iodine deficiency disorders. WHO Guideline, 1–54. Pobrano z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25473709>
- Zimmermann, M.B., Jooste, P.L., Pandav, C.S. (2008). Iodine-deficiency disorders. *Lancet* (London, England), 372(9645), 1251–1262. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(08\)61005-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(08)61005-3)
- Zimmermann, M., Trumbo, P.R. (2013). Iodine. *Advances in Nutrition*, 4(2), 262–264. <https://doi.org/10.3945/an.113.003665>

Designing a new plant product enriched in iodine with the additive of beetroot-fortified with iodine

Abstract. The aim of the study was to analyze the possibility of using beetroot as a carrier of iodine salt with the simultaneous design of a cereal product with its addition. The effectiveness of the use of beetroot (*Beta vulgaris* L.) as a matrix for iodine was tested with the use of two forms of this ingredient: KI and KIO₃. Ciabatta buns with the addition of dried beetroot enriched with iodine were also designed. The iodine content in the product was analyzed before and after baking, as well as during storage in changing temperature conditions (4°C, 21°C and –21°C). The value of iodine half-life ($T_{1/2}$) was used to predict the dynamics of changes in the iodine content in the enriched product during variable storage conditions. The designed products were also subjected to a semi-consumer assessment in a group of people declaring a mixed and vegan diet. The results of the semi-consumer research confirmed the high desirability for the colour, taste and smell of the designed Ciabatta buns with the addition of dried beetroot at the level of 5%. The obtained results confirmed the loss of iodine during baking of buns reaching 40%. Previous trends regarding the greater stability of iodine introduced as potassium iodate (KIO₃) were confirmed. The lowest rate of iodine changes was confirmed during storage of frozen buns (10–13%). In order to obtain maximum iodine stability, the recommended storage conditions for the Ciabatta buns enriched with fortified iodine vegetable preparations are cooling (4°C) and freezing conditions. The research confirms the possibility of introducing iodine-enriched dried beetroot into Ciabatta buns as an ingredient increasing the effectiveness of iodine prophylaxis.

Keywords: iodine, dried vegetables, beetroot, food fortification, buns

**Oświadczenia doktoranta oraz współautorów dotyczące ich
wkładu w przygotowanie opublikowanych artykułów naukowych
wchodzących w skład rozprawy doktorskiej**

mgr Agata Jankowska
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba, A., Gramza-Michałowska, A., Pal, K., Szymandera-Buszk, K. (2023) The Effect of a Vegan Diet on the Coverage of the Recommended Dietary Allowance (RDA) for Iodine among People from Poland. *Nutrients* 15, 1163. <https://doi.org/10.3390/nu15051163> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, opracowaniu części założeń i metod, współudziale w walidacji, przeprowadzeniu badań, w tym zbieraniu danych, współudziale w analizie i interpretacji wyników, współudziale w gromadzeniu danych, opracowanie części manuskryptu, opracowaniu części grafik i odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 04.10.2024r.

Podpis

Agata Jankowska

- * wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

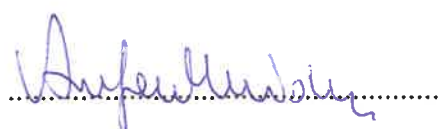
Prof. dr hab. inż. Anna Gramza-Michałowska
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba, A., Gramza-Michałowska, A., Pal, K., Szymandera-Buszk, K. (2023) The Effect of a Vegan Diet on the Coverage of the Recommended Dietary Allowance (RDA) for Iodine among People from Poland. *Nutrients* 15, 1163. <https://doi.org/10.3390/nu15051163> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na opracowaniu części założeń i metod, wykonaniu części obliczeń statystycznych, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowanie części manuskryptu, nadzorze merytorycznym nad częścią prac, odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 4.10.2024

Podpis



- * wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

Prof. Kunal Pal

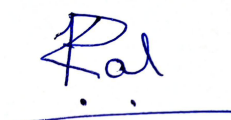
National Institute of Technology Rourkela

Rourkela, Orissa 769008, India

Declaration on co-authorship

I hereby declare that in the work Zaremba, A., Gramza-Michałowska, A., Pal, K., Szymandera-Buszk, K. (2023) The Effect of a Vegan Diet on the Coverage of the Recommended Dietary Allowance (RDA) for Iodine among People from Poland. *Nutrients* 15, 1163. <https://doi.org/10.3390/nu15051163> my individual contribution to its preparation consisted in statistical calculations, validation, analysis and interpretation of results, preparation of the manuscript, writing—review and editing, supervision.

Date 25 Sept 2024



.....
Signature

* enter as appropriate: authorship of the concept, preparation of a research project, elaboration of a critical literature review, elaboration of assumptions and methods, execution of research, including collection of data, analysis of results, interpretation of results and formulation of conclusions, statistical calculations, preparation of figures, preparation of the manuscript, others (indicate as appropriate)

prof. UPP, dr hab. Krystyna Szymandera-Buszka
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba, A., Gramza-Michałowska, A., Pal, K., Szymandera-Buszka, K. (2023) The Effect of a Vegan Diet on the Coverage of the Recommended Dietary Allowance (RDA) for Iodine among People from Poland. *Nutrients* 15, 1163. <https://doi.org/10.3390/nu15051163> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, opracowaniu części założeń i metod, wykonaniu części obliczeń statystycznych, współudziale w walidacji, współudziale w analizie i interpretacji wyników, współudziale w gromadzeniu danych, opracowanie części manuskryptu, opracowaniu części grafik, nadzorze merytorycznym nad częścią prac, odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 04.10.2024

Podpis

K. Szymandera-Buszka

- * wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

mgr Agata Jankowska
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba, A.; Waszkowiak, K.; Kmiecik, D.; Jędrusek-Golińska, A.; Jarzębski, M.; Szymandera-Buszk, K. (2022) The Selection of the Optimal Impregnation Conditions of Vegetable Matrices with Iodine. *Molecules* 27, 3351. <https://doi.org/10.3390/molecules27103351> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, współudziale w walidacji, przeprowadzeniu części badań, w tym zbieraniu danych, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowaniu części manuskryptu, opracowaniu części grafik, odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 04.10.2024r.

Podpis

Agata Jankowska

- * wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

dr hab. inż. Katarzyna Waszkowiak
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba, A.; Waszkowiak, K.; Kmieciak, D.; Jędrusek-Golińska, A.; Jarzębski, M.; Szymandera-Buszk, K. (2022) The Selection of the Optimal Impregnation Conditions of Vegetable Matrices with Iodine. *Molecules* 27, 3351. mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, opracowaniu części założeń i metod, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowaniu części manuskryptu, odniesieniu się do części uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 04.10.2024

Podpis

K. Waszkowiak

- * wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

prof. UPP dr hab. Dominik Kmieć
Katedra Technologii Żywności Pochodzenia Roślinnego
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba, A.; Waszkowiak, K.; Kmieć, D.; Jędrusek-Golińska, A.; Jarzębski, M.; Szymandera-Buszka, K. (2022) The Selection of the Optimal Impregnation Conditions of Vegetable Matrices with Iodine. *Molecules* 27, 3351. <https://doi.org/10.3390/molecules27103351> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na wykonaniu obliczeń statystycznych, współudziale w walidacji, współudziale w analizie i interpretacji wyników oraz opracowaniu części grafik.

Data 4.10.2024

Podpis

..... D. Kmieć

- * wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

dr hab. Anna Jędrusek-Golińska

Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej

Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba, A.; Waszkowiak, K.; Kmiecik, D.; Jędrusek-Golińska, A.; Jarzębski, M.; Szymandera-Buszk, K. (2022) The Selection of the Optimal Impregnation Conditions of Vegetable Matrices with Iodine. *Molecules* 27, 3351. <https://doi.org/10.3390/molecules27103351> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współudziale w walidacji, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowaniu części manuskryptu, opracowaniu części grafik, odniesieniu się do części uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data4.10.2024.....

Podpis

.....A. Jędrusek-Golińska.....

- * wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

dr hab. inż. Maciej Jarzębski
Katedra Fizyki i Biofizyki
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba, A.; Waszkowiak, K.; Kmieciak, D.; Jędrusek-Golińska, A.; Jarzębski, M.; Szymandera-Buszk, K. (2022) The Selection of the Optimal Impregnation Conditions of Vegetable Matrices with Iodine. *Molecules* 27, 3351. <https://doi.org/10.3390/molecules27103351> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na opracowaniu części założeń i metod, przeprowadzeniu części badań, w tym zbieraniu danych oraz współudziale w analizie i interpretacji wyników.

Data

Podpis



Podpisany elektronicznie przez
Maciej Jarzębski
04.10.2024
14:57:41 +02'00'

- * wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

prof. UPP, dr hab. Krystyna Szymandera-Buszk
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba, A.; Waszkowiak, K.; Kmiecik, D.; Jędrusek-Golińska, A.; Jarzębski, M.; Szymandera-Buszk, K. (2022) The Selection of the Optimal Impregnation Conditions of Vegetable Matrices with Iodine. *Molecules* 27, 3351. <https://doi.org/10.3390/molecules27103351> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, opracowaniu części założeń i metod, współudziale w walidacji, przeprowadzeniu części badań, w tym zbieraniu danych, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowaniu części manuskryptu, opracowaniu części grafik, nadzorze merytorycznym oraz odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 04.10.2024

Podpis

K. Szymandera-Buszk

- * wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

mgr Agata Jankowska
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba A., Hęś M., Jędrusek-Golińska A., Przeor M., Szymandera-Buszk K. (2023): The antioxidant properties of selected varieties of pumpkin fortified with iodine in the form of potassium iodide and potassium iodate. *Foods* 12 (14): 2792 <https://doi.org/10.3390/foods12142792> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, opracowaniu części założeń i metod, wykonaniu części obliczeń statystycznych, współudziale w walidacji, przeprowadzeniu badań, w tym zbieraniu danych, współudziale w analizie i interpretacji wyników, współudział w gromadzeniu danych, opracowaniu części manuskryptu, opracowaniu części grafik oraz odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 04.10.2021r.

Podpis

Agata Jankowska

- * wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

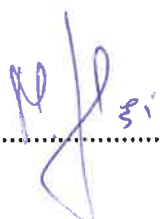
dr hab. Marzanna Hęś
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba A., Hęś M., Jędrusek-Golińska A., Przeor M., Szymandera-Buszk K. (2023): The antioxidant properties of selected varieties of pumpkin fortified with iodine in the form of potassium iodide and potassium iodate. *Foods* 12 (14): 2792 <https://doi.org/10.3390/foods12142792> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na opracowaniu części założeń i metod, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowaniu części manuskryptu, nadzorze merytorycznym nad częścią prac oraz odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 1. 10. 2024 r.

Podpis

..... 

wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

dr hab. Anna Jędrusek-Golińska
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba A., Hęś M., Jędrusek-Golińska A., Przeor M., Szymandera-Buszk K. (2023): The antioxidant properties of selected varieties of pumpkin fortified with iodine in the form of potassium iodide and potassium iodate. *Foods* 12 (14): 2792 <https://doi.org/10.3390/foods12142792> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współudziale w walidacji, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowaniu części manuskryptu, nadzorze merytorycznym nad częścią prac oraz odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 4.10.2024

Podpis

..... A. Golińska

wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

dr inż. Monika Przeor
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba A., Hęś M., Jędrusek-Golińska A., Przeor M., Szymandera-Buszk K. (2023): The antioxidant properties of selected varieties of pumpkin fortified with iodine in the form of potassium iodide and potassium iodate. *Foods* 12 (14): 2792 <https://doi.org/10.3390/foods12142792> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na wykonaniu części obliczeń statystycznych, opracowaniu części manuskryptu, opracowaniu części grafik oraz odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 4.10.2024r.

Podpis



wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

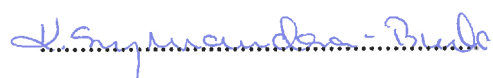
prof. UPP, dr hab. Krystyna Szymandera-Buszk
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba A., Hęś M., Jędrusek-Golińska A., Przeor M., Szymandera-Buszk K. (2023): The antioxidant properties of selected varieties of pumpkin fortified with iodine in the form of potassium iodide and potassium iodate. *Foods* 12 (14): 2792 <https://doi.org/10.3390/foods12142792> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, opracowaniu części założeń i metod, współudziale w walidacji, współudziale w analizie i interpretacji wyników, współudziale w gromadzeniu danych, opracowaniu części manuskryptu, nadzorze merytorycznym nad częścią prac oraz odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 04.10.2024

Podpis

.....

wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

mgr Agata Jankowska
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Jankowska A., Kobus Cisowska J., Szymandera-Buszka K. (2023): Antioxidant properties of beetroot fortified with iodine. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 68 (2): 10-15 <https://doi.org/10.53502/TXIY9852> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, opracowaniu części założeń i metod, wykonaniu części obliczeń statystycznych, współudziale w walidacji, przeprowadzeniu badań, w tym zbieraniu danych, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowaniu części manuskryptu, opracowaniu części grafik oraz odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 04.10.2024r.

Podpis

Agata Jankowska

wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

prof. dr hab. inż. Joanna Kobus-Cisowska
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Jankowska A., Kobus Cisowska J., Szymandera-Buszka K. (2023): Antioxidant properties of beetroot fortified with iodine. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 68 (2): 10-15 <https://doi.org/10.53502/TXIY9852> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na wykonaniu części obliczeń statystycznych, współudziale w walidacji, współudziale w analizie i interpretacji części wyników, opracowaniu części manuskryptu oraz odniesieniu się do części uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data04.10.2024.....

Podpis


.....

wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

prof. UPP, dr hab. Krystyna Szymandera-Buszka
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Jankowska A., Kobus Cisowska J., Szymandera-Buszka K. (2023): Antioxidant properties of beetroot fortified with iodine. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 68 (2): 10-15 <https://doi.org/10.53502/TXIY9852> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, opracowaniu części założeń i metod, wykonaniu części obliczeń statystycznych, współudziale w walidacji, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowaniu części manuskryptu, opracowaniu części grafik, nadzorze merytorycznym oraz odniesieniu się do części uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 04.10.2024

Podpis

K. Szymandera-Buszka

wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

prof. UPP, dr hab. Krystyna Szymandera-Buszka
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Szymandera-Buszka K., Jankowska A., Hęś M., Jędrusek-Golińska A. (2023): Właściwości przeciwutleniające brokułów fortyfikowanych jodem w postaci jodku potasu lub jodanu(V) potasu. *Żywność jako wyzwanie dla współczesnej nauki i przemysłu* 317-329 Monografia pokonferencyjna mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, opracowaniu części założeń i metod, wykonaniu części obliczeń statystycznych, współudziale w walidacji, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowaniu części manuskryptu, opracowaniu części grafik, nadzorze merytorycznym oraz odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 04.10.2024...

Podpis

K. Szymandera-Buszka

wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

mgr Agata Jankowska

Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej

Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Szymandera-Buszka K., Jankowska A., Heś M., Jędrusek-Golińska A. (2023): Właściwości przeciwutleniające brokułów fortyfikowanych jodem w postaci jodku potasu lub jodanu(V) potasu. *Żywność jako wyzwanie dla współczesnej nauki i przemysłu* 317-329 Monografia pokonferencyjna mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, opracowaniu części założeń i metod, wykonaniu części obliczeń statystycznych, współudziale w walidacji, przeprowadzeniu części badań, w tym zbieraniu danych, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowaniu części manuskryptu, opracowaniu części grafik oraz odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 04.10.2021...

Podpis

Agata Jankowska

wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

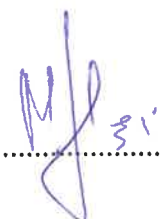
dr hab. Marzanna Hęś
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Szymandera-Buszka K., Jankowska A., Hęś M., Jędrusek-Golińska A. (2023): Właściwości przeciwutleniające brokułów fortyfikowanych jodem w postaci jodku potasu lub jodanu(V) potasu. *Żywność jako wyzwanie dla współczesnej nauki i przemysłu* 317-329 Monografia pokonferencyjna mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na wykonaniu części obliczeń statystycznych, współudziale w walidacji, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowaniu części manuskryptu oraz odniesieniu się do części uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 4. 10. 2024 r.

Podpis

.....


wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

dr hab. Anna Jędrusek-Golińska
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Szymandera-Buszka K., Jankowska A., Hęś M., Jędrusek-Golińska A. (2023): Właściwości przeciwutleniające brokułów fortyfikowanych jodem w postaci jodku potasu lub jodanu(V) potasu. *Żywność jako wyzwanie dla współczesnej nauki i przemysłu* 317-329 Monografia pokonferencyjna mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na wykonaniu części obliczeń statystycznych, współudziale w walidacji, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowaniu części manuskryptu oraz odniesieniu się do części uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data4.10.2024.....

Podpis

.....A. Jędrusek-Golińska.....

wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

mgr Agata Jankowska
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Jankowska A., Szymandera-Buszka K. (2024): The effect of iodine fortification on – the antioxidant activity of carrots and cauliflower. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 23(3), 371–378. <http://doi.org/10.17306/J.AFS.001254> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, opracowaniu części założeń i metod, wykonaniu części obliczeń statystycznych, współudziale w walidacji, przeprowadzeniu badań, w tym zbieraniu danych, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowaniu części manuskryptu, opracowaniu części grafik oraz odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 04.10.2024r.

Podpis

Agata Jankowska

wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

prof. UPP, dr hab. Krystyna Szymandera-Buszka
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Jankowska A., Szymandera-Buszka K. (2024): The effect of iodine fortification on – the antioxidant activity of carrots and cauliflower. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 23(3), 371–378. <http://doi.org/10.17306/J.AFS.001254> mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, opracowaniu części założeń i metod, wykonaniu części obliczeń statystycznych, współudziale w walidacji, współudziale w analizie i interpretacji wyników, opracowaniu części manuskryptu, opracowaniu części grafik, nadzorze merytorycznym oraz odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 04.10.2024

Podpis

K. Szymandera-Buszka

wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

mgr Agata Jankowska
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba A., Cichoń N., Szymandera-Buszka K., (2023): Projekt produktu pochodzenia roślinnego wzbogaconego burakiem fortyfikowanym jodem. *Żywność dzisiaj – globalna czy lokalna, tradycyjna czy innowacyjna?* 22-36 Monografia pokonferencyjna XXVI Sesji Naukowej Sekcji Młodej Kadry Naukowej, mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, opracowaniu części założeń i metod, współudziale w walidacji, przeprowadzeniu części badań, w tym zbieraniu danych, wykonaniu części obliczeń statystycznych, współudziale w analizie i interpretacji wyników, współudziale w gromadzeniu danych, opracowanie części manuskryptu, opracowaniu części grafik oraz odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 04.10.2021rr.

Podpis

Agata Jankowska

- * wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

Inż. Natalia Cichoń

Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej

Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba A., Cichoń N., Szymandera-Buszk K., (2023): Projekt produktu pochodzenia roślinnego wzbogaconego burakiem fortifikowanym jodem. *Monografia pokonferencyjna XXVI Sesji Naukowej Sekcji Młodej Kadry Naukowej 22-36*, mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na przygotowaniu projektu części badań, przeprowadzeniu tych badań, w tym zbieraniu danych.

Data 1.10.2024r.

Podpis

Natalia Cichoń

- * wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)

prof. UPP, dr hab. Krystyna Szymandera-Buszka
Katedra Technologii Gastronomicznej i Żywności Funkcjonalnej
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Oświadczenie o współautorstwie

Niniejszym oświadczam, że w pracy Zaremba A., Cichoń N., Szymandera-Buszka K., (2023): Projekt produktu pochodzenia roślinnego wzbogaconego burakiem fortyfikowanym jodem. *Żywność dzisiaj – globalna czy lokalna, tradycyjna czy innowacyjna?* 22-36 Monografia pokonferencyjna XXVI Sesji Naukowej Sekcji Młodej Kadry Naukowej, mój indywidualny udział w jej powstaniu polegał na współautorstwie koncepcji, opracowaniu części założeń i metod, współudziale w walidacji, wykonaniu części obliczeń statystycznych, współudziale w analizie i interpretacji wyników, współudziale w gromadzeniu danych, opracowanie części manuskryptu, nadzorze merytorycznym, opracowaniu części grafik oraz odniesieniu się do uwag recenzentów i redakcji tekstu wraz ze współautorami.

Data 06.10.2024...

Podpis

K. Szymandera-Buska

- * wpisać właściwe: autorstwo koncepcji, przygotowanie projektu badań, opracowanie krytycznego przeglądu literatury, opracowanie założeń i metod, przeprowadzenie badań, w tym zbieranie danych, analiza wyników, interpretacja wyników i sformułowanie wniosków, obliczenia statystyczne, opracowanie grafik, opracowanie manuskryptu, inne (należy wskazać)