

WPŁYW JEDNOKROTNEGO I DWUKROTNEGO ZAMRAŻANIA ORAZ ROZMRAŻANIA NA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE, A TAKŻE CIEPLNE WYBRANYCH PRODUKTÓW SPOŻYWCZYCH

Piotr Cieśluk, Artur Wiktor✉

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Celem pracy było określenie wpływu jedno- oraz dwukrotnego zamrażania i rozmrażania na wybrane właściwości fizyczne wybranych produktów spożywczych. W tym celu próbki tkanki roślinnej (ziemniaka, buraka, banana) oraz tkanki zwierzęcej (schabu wieprzowego) poddano jedno- lub dwukrotnemu zamrażaniu i rozmrażaniu, a następnie zmierzono w nich zawartość suchej substancji, przewodność elektryczną właściwą, przewodność cieplną właściwą, objętościowe ciepło właściwe oraz dyfuzyjność cieplną. Stwierdzono, że przewodność elektryczna właściwa w wyniku zamrażania/rozmrażania różnie istotnie w porównaniu z materiałem świeżym, niezależnie od rodzaju badanych próbek. Pomiar przewodności elektrycznej właściwej okazał się być skutecznym narzędziem do identyfikacji powtórnego zamrożenia tkanki warzyw (ziemniaka oraz buraka ćwikłowego). W większości przypadków nie stwierdzono natomiast istotnych zmian właściwości cieplnych wskutek zamrażania i rozmrażania bez względu na liczbę cykli tej obróbki technologicznej. Istotne zmiany stwierdzono wyłącznie w przypadku dyfuzyjności cieplnej banana oraz buraka ćwikłowego.

Słowa kluczowe: zamrażanie, przewodność elektryczna, przewodność cieplna, dyfuzyjność cieplna, rozmrażanie

WSTĘP

Zamrażanie jest jednym z najpopularniejszych sposobów utrwalania żywności. Następstwem mrożenia jest zahamowanie czynności życiowych mikroorganizmów i enzymów, które odpowiedzialne są za psucie żywności [Janiszewska i Sakowski 2012]. Zapewnienie odpowiedniej jakości oraz bezpieczeństwa produktu zamrożonego możliwe

✉artur_wiktor@sggw.pl

jest wyłącznie w przypadku utrzymania ciągłości łańcucha chłodniczego. Oznacza to, że produkt od momentu zamrożenia, poprzez transport i dystrybucję, musi być przechowywany w odpowiednio niskiej temperaturze, co także regulowane jest odpowiednimi przepisami prawnymi (Rozporządzenie WE 582/2004). Jeśli dojdzie do rozmrożenia żywności na jakimkolwiek etapie, produkt nie może być dopuszczony do dalszego obrotu. Istotne z punktu widzenia zarówno konsumenta, jak i producenta żywności wydaje się być zatem opracowanie obiektywnej metody pozwalającej ocenić, czy produkt mrożony po rozmrożeniu został ponownie zamrożony, zwłaszcza, że takie postępowanie może stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa żywności oraz prowadzić do niekorzystnych zmian jakości żywności [Ali i in. 2015].

Analiza zmian wewnątrzstrukturalnych żywności o budowie tkankowej mogłaby dostarczyć informacji na temat liczby cykli zamrażalniczych i rozmrażalniczych, którym żywność została poddana. Stan struktury wewnętrznej żywności przeważnie oceniany jest technikami mikroskopowymi. Niestety, procedury te są na ogół czasochłonne i kosztowne, co w oczywisty sposób limituje ich powszechne wykorzystanie. Celowe zatem wydają się poszukiwania metody, pozwalającej ocenić zmiany wywołane zamrażaniem i rozmrażaniem żywności w sposób krótszy oraz tańszy. Metody te, uwzględniając konsekwencje procesów zamrażania i rozmrażania, mogłyby być oparte na pomiarze wielkości elektrycznych lub termofizycznych żywności [Lewitt i in. 2007, Sarang i in. 2008, Wiktor i in. 2011, Lyng i in. 2013]. W związku z powyższym, celem pracy było zbadanie wpływu zamrażania i rozmrażania żywności oraz ponownego zamrażania i rozmrażania na właściwości elektryczne oraz cieplne wybranych surowców o budowie tkankowej.

MATERIAŁ I METODY

Materiał badany w przeprowadzonych doświadczeniach stanowiły trzy rodzaje produktów pochodzenia roślinnego: tkanka ziemniaka, tkanka buraka ćwikłowego i tkanka banana oraz jeden rodzaj tkanki pochodzenia zwierzęcego, którym były próbki mięśnia najdłuższego grzbietu (łac. *musculus longissimus*) tuszy wieprzowej. Surowce pochodzące z jednej partii zakupiono w lokalnym supermarkecie (Warszawa) i były przechowywane w komorze chłodniczej bez dostępu światła w temperaturze 4°C. Przed każdym doświadczeniem surowiec wyjmowano z komory chłodniczej, myto, osuszano i czekali aż jego temperatura wyrówna się z temperaturą pokojową (18 ± 2°C). Następnie ze środka produktu pobierano próbki w kształcie walca o średnicy 18 mm i wysokości 5 mm, które umieszczano w zamrażarce komorowej w -18°C (Indesit, LR 8S1SB). Po upływie 24 h próbki rozmrażano metodą konwekcji naturalnej w temperaturze pokojowej (18 ± 2°C). Po rozmrożeniu próbki poddawano analizom lub powtórnie zamrażano i rozmrażano, zgodnie z wyżej opisaną procedurą. Po jedno- lub dwukrotnym zamrożeniu i rozmrożeniu próbki poddawano następującym analizom: wyznaczeniu przewodności elektrycznej właściwej, wyznaczeniu właściwości cieplnych oraz oznaczeniu zawartości suchej substancji. Zamrażanie i rozmrażanie oraz ponowne zamrażanie i rozmrażanie wykonano w dwóch powtórzeniach dla każdego z badanych surowców spożywczych. Przewodność elektryczną właściwą (*EC*) wyznaczano z użyciem konduktometru (CPC-505, Elmetron, Gliwice), wyposażonego w dwuigłową, platynową elektrodę własnej konstrukcji (częstotliwość pomiaru 100 Hz). Wykonano po

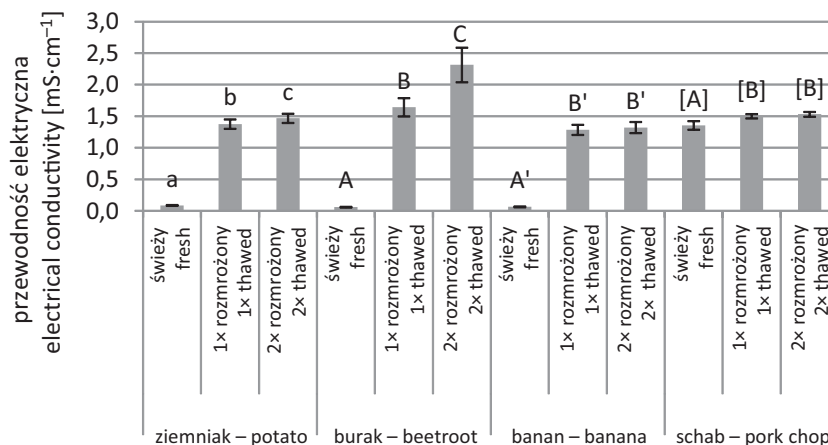
sześć pomiarów świeżego, jednokrotnie rozmrożonego oraz dwukrotnie zamrożonego i rozmrożonego materiału. Właściwości cieplne (przewodność cieplną właściwą, dyfuzyjność cieplną oraz objętościowe ciepło właściwe) badano, wykorzystując analizator właściwości cieplnych KD2 Pro (Decagon Devices Inc., USA). Czujnik typu SH-1 (Decagon Devices Inc., USA) umieszczano w badanych próbkach w taki sposób, aby przykryć całą długość igieł czujnika. Zgodnie z zaleceniami producenta, po umieszczeniu czujnika w próbce czekano 15 min w celu wyrównania temperatury czujnika oraz badanego materiału. Analizę właściwości cieplnych wykonano w czterech powtórzeniach dla każdego z badanych wariantów eksperymentu. Pomiary prowadzono w temperaturze $18 \pm 2^\circ\text{C}$. Zawartość suchej substancji oznaczono zgodnie z normą AOAC 920.15, 2002.

Wyniki zostały poddane analizie statystycznej przy użyciu jednoczynnikowej analizy wariancji oraz testu Tukeya ($\alpha = 0,05$). W celu określenia wpływu badanych czynników na zmienność analizowanych parametrów przeprowadzono także dwuczynnikową analizę wariancji – porównując otrzymane wartości p oraz wartości cząstkowego η^2 . Dodatkowo wykonano także analizę korelacji Pearsona oraz analizę głównych składowych (PCA). Przeprowadzone analizy statystyczne wykonano, korzystając z oprogramowania Statistica 12 (Statsoft).

WYNIKI I DYSKUSJA

Wartości przewodności elektrycznej właściwej badanych materiałów w zależności od ich obróbki technologicznej przedstawiono na rysunku 1.

Największymi wartościami tego parametru charakteryzowały się próbki mięśnia najdłuższego grzbietu (popularnie nazywanego schabem wieprzowym) niepoddanego żadnej obróbce technologicznej – ich przewodność elektryczna wynosiła $1,356 \pm 0,068 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$. W grupie materiałów pochodzenia roślinnego niepoddanych obróbce technologicz-

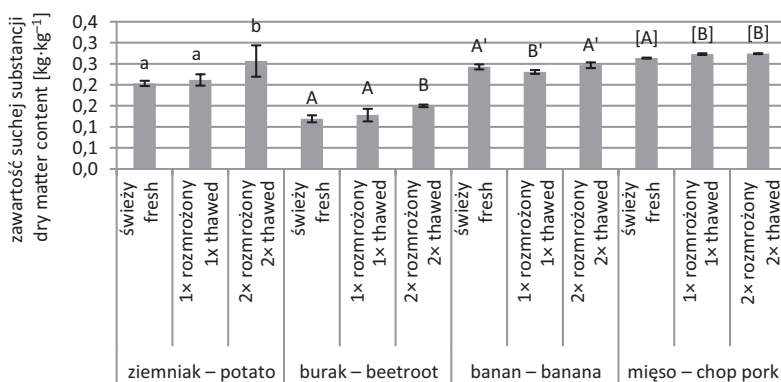


Rys. 1. Przewodność elektryczna właściwa świeżych, jednokrotnie (1 × rozmrażany) oraz dwukrotnie (2 × rozmrażany) rozmrażanych tkanek

Fig. 1. Electrical conductivity of fresh, once (1 × thawed) and twice (2 × thawed) thawed tissues

nej największą wartość badanej wielkości elektrycznej ($EC = 0,088 \pm 0,006 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) stwierdzono w przypadku ziemniaka. Świeże tkanki buraka ćwikłowego oraz banana cechowały się podobną przewodnością elektryczną właściwą, która wynosiła odpowiednio $0,061 \pm 0,005 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ oraz $0,065 \pm 0,006 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$. Z kolei Bazhal i inni [2003] stwierdzili, że banan ma większą przewodność elektryczną właściwą ($EC = 0,064\text{--}0,099 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$) niż ziemniak ($EC = 0,030\text{--}0,057 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$). Różnice między danymi prezentowanymi w niniejszym artykule a wartościami przywołanymi mogą być związane zarówno z innym pochodzeniem geograficznym czy botanicznym surowców (np. inna odmiana), jak i z inną charakterystyką zastosowanej metody pomiarowej (budowa elektrod, częstotliwość, przy której prowadzono pomiary). Za wytłumaczeniem tym przemawiają także wyniki dotyczące przewodności elektrycznej właściwej tkanki jabłka, której wartości mieściły się w zakresie $0,016\text{--}0,070 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ [Bazhal i in. 2003, Grimi i in. 2010, Wiktor i in. 2011]. Warto także dodać, że przewodność elektryczna żywności w dużym stopniu zależy od zawartości popiołu. Według danych literaturowych (Food Composition Database USDA, <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/search/list>), największą zawartość popiołu spośród badanych materiałów mają schab wieprzowy (1,2 %) oraz burak ćwikłowy (1,08 %). Zawartość popiołu w ziemniaku wynosi ok. 0,94%, a w bananie 0,82%. Można zatem stwierdzić, że dane te pozostają w zgodzie z otrzymanymi wynikami przewodności elektrycznej właściwej. Niezależnie od rodzaju badanej tkanki cykl zamrażania i rozmrażania doprowadził do istotnego statystycznie ($p < 0,05$) wzrostu przewodności elektrycznej właściwej. Przykładowo, wartość przewodności elektrycznej właściwej buraka ćwikłowego wzrosła ponad 27-krotnie wskutek zamrażania i rozmrażania i wynosiła $1,643 \pm 0,145 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$. Z kolei wartość tego parametru w próbkach ziemniaka oraz banana zamrożonych i rozmrożonych wynosiła odpowiednio $1,377 \pm 0,075$ oraz $1,286 \pm 0,080 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, co oznacza, że zmiana tej wielkości elektrycznej wskutek obróbki technologicznej była mniejsza niż w przypadku buraka. Co ciekawe, konduktywność tkanki pochodzenia zwierzęcego po jej zamrożeniu i rozmrożeniu wynosiła $1,502 \pm 0,034 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$. Oznacza to, że parametr ten wzrósł jedynie o 11% w porównaniu z materiałem świeżym, co w odniesieniu do zmian przewodności elektrycznej właściwej tkanek roślinnych należy uznać za zmianę stosunkowo niewielką. Przyczyn takiego stanu rzeczy należy upatrywać w zupełnie innej budowie wewnątrzkomórkowej tkanki roślinnej oraz tkanki zwierzęcej, a także w innej porowatości tych tkanek. Dwukrotne zamrożenie i rozmrożenie badanych produktów spożywczych doprowadziło także do wzrostu przewodności elektrycznej właściwej, przy czym zmiana ta nie zawsze miała statystycznie istotny charakter. W przypadku tkanki ziemniaka analizowana wielkość elektryczna próbki powtórnie zamrożonej i rozmrożonej wzrosła o 6,7% w porównaniu z tkanką poddaną jednokrotnemu cyklowi. Warto zaznaczyć, że różnica ta była istotna statystycznie ($p < 0,05$) zarówno w porównaniu z materiałem poddanym jednemu cyklowi zamrażania i rozmrażania, jak i z materiałem świeżym. W przypadku tkanki buraka ćwikłowego zmiany przewodności elektrycznej właściwej wywołane powtórным zamrażaniem i rozmrażaniem były największe spośród wszystkich analizowanych materiałów. Wartość tego parametru elektrycznego tkanki poddanej dwukrotnemu cyklowi zamrażania i rozmrażania wynosiła $2,314 \pm 0,274 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, co oznacza, że była 38,1-krotnie większa niż materiału świeżego oraz o 40,8% większa w porównaniu z burakiem ćwikłowym jednokrotnie zamrożonym i rozmrożonym. Podobnie jak w przypadku ziemniaka, różnice te miały charakter istot-

ny statystycznie ($p < 0,05$). W przypadku tkanek banana i schabu wieprzowego wzrost konduktywności wywołany powtórным zamrażaniem i rozmrażaniem był stosunkowo niewielki i wynosił odpowiednio 2,9 oraz 2,0% w porównaniu z próbkami zamrożonymi i rozmrożonymi jednokrotnie. Co jest warte podkreślenia, nie stwierdzono, aby różnice te były istotne statystycznie ($p > 0,05$). Różna odpowiedź, wyrażona w postaci zmian przewodności elektrycznej właściwej będącej odzwierciedleniem osłabienia natywnej struktury tkanek poddanych powtórному zamrażaniu i rozmrażaniu, może być powiązana (podobnie jak zmiany wywołane jednokrotnym zamrażaniem i rozmrażaniem) z ich różną budową histologiczną. Do podobnych stwierdzeń doszli Nayak i inni [2007], którzy stwierdzili, że zmiany niektórych właściwości mechanicznych tkanki roślinnej poddanej działaniu promieniowania gamma zależą między innymi od ich budowy histologicznej, a w szczególności od rozmiarów komórek tworzących tkankę. Analogiczne rezultaty otrzymali Ben Ammar i inni [2011], którzy badali podatność wybranych materiałów pochodzenia roślinnego o zróżnicowanych rozmiarach komórki na elektroporację. Dwuczynnikowa analiza wariancji pozwala także stwierdzić, że zarówno rodzaj badanego materiału, obróbka technologiczna (ilość cykli zamrażanie i rozmrażanie), jak i interakcja między tymi czynnikami istotnie ($p < 0,05$) kształtowały zmienność przewodności elektrycznej właściwej badanych tkanek. Warto dodać, że największą wartość cząstkowego η^2 (0,972) stwierdzono dla efektu powodowanego przez rodzaj obróbki technologicznej. Dla porównania, wartość cząstkowego η^2 dla rodzaju materiału i interakcji obu czynników wynosiła odpowiednio 0,865 i 0,919. Zawartość suchej substancji badanych materiałów wynosiła 0,119–0,274 kg ss·kg⁻¹, w zależności od rodzaju surowca oraz obróbki technologicznej (rys. 2).



Rys. 2. Zawartość suchej substancji w świeżych, jednokrotnie (1× rozmrażany) oraz dwukrotnie (2× rozmrażany) rozmrażanych tkankach

Fig. 2. Dry matter content of fresh, once (1× thawed) and twice (2× thawed) thawed tissues

Największą zawartością suchej substancji spośród świeżych surowców charakteryzowały się próbki schabu wieprzowego (0,264 kg ss·kg⁻¹), a najmniejszą zawartość suchej substancji stwierdzono w świeżym buraku ćwikłowym (0,119 kg ss·kg⁻¹). Przedstawione wyniki pozostają w zgodzie z danymi literaturowymi [Szopińska i Gawęda 2013, Wiktor i in. 2014, Food Composition Database USDA, <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/search/list>].

Jednokrotne zamrażanie i rozmrażanie na ogół prowadziło do niewielkiego wzrostu zawartości suchej substancji, przy czym w przypadku ziemniaka oraz buraka ćwikłowego były to zmiany nieistotne statystycznie ($p > 0,05$). Istotny statystycznie ($p < 0,05$), wynoszący 3,4% wzrost zawartości suchej substancji w porównaniu z materiałem świeżym stwierdzono natomiast w przypadku próbki schabu wieprzowego. Jedynie tkanka banana po jednokrotnym rozmrożeniu miała zawartość suchej substancji istotnie statystycznie ($p < 0,05$) mniejszą o 5% w porównaniu z próbką niepoddaną obróbce technologicznej. Dwukrotne zamrażanie i rozmrażanie próbek ziemniaka, buraka ćwikłowego oraz schabu wieprzowego doprowadziło do wzrostu zawartości suchej substancji w nich w porównaniu z materiałem świeżym oraz próbkami jednokrotnie zamrożonymi i rozmrożonymi. Należy jednakże podkreślić, że wzrost zawartości suchej substancji był istotny statystycznie ($p < 0,05$) wyłącznie w przypadku próbek ziemniaka oraz buraka. Wzrost zawartości suchej substancji w następstwie zamrażania i rozmrażania świadczy o ubytku wody z materiału. To z kolei spowodowane jest przede wszystkim wyciekiem rozmrażalniczym oraz w pewnym ograniczonym (ze względu na stosunkowo krótki czas przechowywania próbek w ujemnej temperaturze) zakresie przez ususzkę. Należy zauważyć, że trendy zmian zawartości suchej substancji były bardzo podobne do zmian przewodności elektrycznej właściwej badanych materiałów. Niemniej jednak, przeprowadzone analizy statystyczne dowiodły, że zależność ta jest istotna jedynie w przypadku próbek schabu wieprzowego ($r = 0,998$, $p < 0,05$). Wyniki dwuczynnikowej analizy wariancji dowodzą z kolei, że zawartość suchej substancji zależała istotnie statystycznie ($p < 0,05$) zarówno od rodzaju materiału, obróbki technologicznej oraz interakcji tych czynników. Wartość cząstkowego η^2 wynosiła 0,970, 0,623 oraz 0,546 odpowiednio dla wymienionych wcześniej czynników, co świadczy o tym, że największy udział w kształtowaniu zmienności zawartości suchej substancji miał rodzaj materiału, a następnie zastosowana obróbka technologiczna lub jej brak.

Właściwości cieplne zależą między innymi od integralności wewnętrznych struktur komórkowych czy też stanu cząsteczek chemicznych je tworzących (np. białek czy tłuszczów) [Niesteruk i Obidziński 2005]. Warto jednak raz jeszcze podkreślić, że wpływ zamrażania i rozmrażania na właściwości termofizyczne produktów spożywczych jest wielokierunkowy. Przykładowo, z jednej strony można oczekiwać wzrostu przewodności cieplnej właściwej (jako konsekwencję zniszczenia struktury komórkowej materiału, która limituje wymianę ciepła), a z drugiej zmniejszenia wartości tego parametru na skutek wycieku rozmrażalniczego, zdominowanego ilościowo przez wodę. W tabeli zaprezentowano otrzymane w doświadczeniu wyniki. Największą przewodnością cieplną właściwą wśród świeżych surowców miała tkanka ziemniaka ($0,573 \pm 0,31 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), a najmniejszą wartość stwierdzono w przypadku próbek banana ($0,474 \pm 0,22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). W większości badanych przypadków nie stwierdzono, aby przewodność cieplna właściwa zmieniła istotnie statystycznie ($p < 0,05$) swoją wielkość wskutek zamrażania i rozmrażania prowadzonego jedno- bądź dwukrotnie. Bardzo trudno wskazać także jakiegokolwiek tendencje – w niektórych przypadkach obróbka technologiczna prowadziła do niewielkiego spadku wartości przewodności cieplnej właściwej (ziemniak, schab wieprzowy), w innych zaś dochodziło do wzrostu tego parametru (burak, banan). Wyłącznie w przypadku tkanki banana zamrażanej po uprzednim rozmrożeniu zaobserwowano istotny statystycznie ($p < 0,05$), wynoszący 21,9%, wzrost w porównaniu z tkanką świe-

zą oraz 15,6% w porównaniu z tkanką zamrażaną i rozmrażaną jednokrotnie. Na podstawie wyników analizy statystycznej stwierdzono natomiast, że zmienność przewodności cieplnej właściwej zależała istotnie statystycznie ($p < 0,05$) wyłącznie od rodzaju surowca ($\eta^2 = 0,354$) oraz interakcji między obróbką technologiczną i rodzajem surowca ($\eta^2 = 0,418$).

Tabela. Właściwości cieplne badanych materiałów w zależności od rodzaju surowca oraz obróbki technologicznej

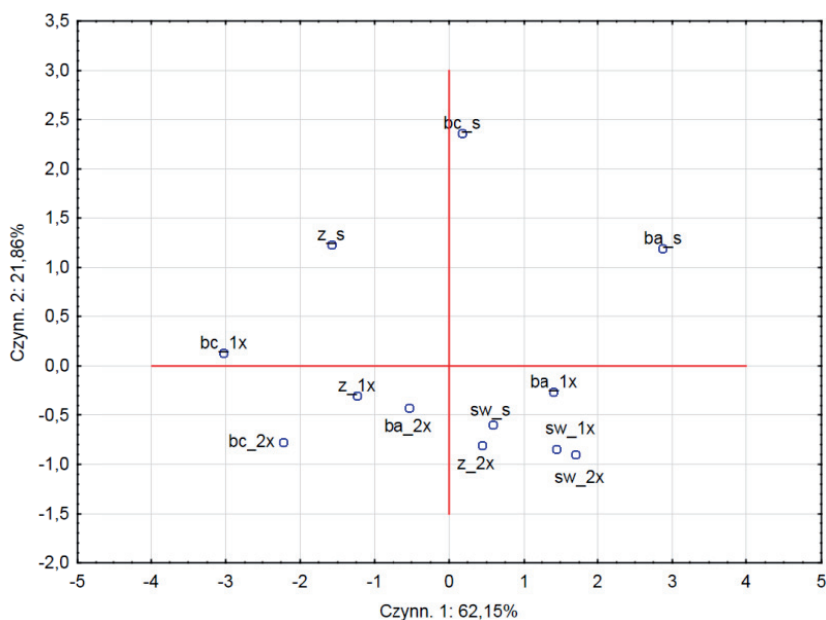
Table. Thermal properties of investigated samples depending on the raw material and type of treatment

Surowiec Raw material	Rodzaj obróbki technologicznej Type of the treatment	Przewodność cieplna właściwa Thermal conductivity [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Objętościowe ciepło właściwe Specific volumetric heat [MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹]	Dyfuzyjność cieplna Thermal diffusivity [mm ² ·s ⁻¹]
Ziemniak Potato	świeży fresh	0,573 ±0,031 a	3,825 ±0,343 a	0,150 ±0,007 a
	1× rozmrożony 1× thawed	0,558 ±0,033 a	3,799 ±0,125 a	0,147 ±0,005 a
	2× rozmrożony 2× thawed	0,527 ±0,043 a	3,655 ±0,153 a	0,144 ±0,006 a
Burak Beetroot	Świeży fresh	0,532 ±0,027 A	3,734 ±0,494 A	0,135 ±0,003 A
	1× rozmrożony 1× thawed	0,563 ±0,050 A	3,883 ±0,227 A	0,145 ±0,005 B
	2× rozmrożony 2× thawed	0,585 ±0,050 A	3,907 ±0,269 A	0,149 ±0,004 B
Banan Banana	Świeży fresh	0,474 ±0,022 A'	3,567 ±0,195 A'	0,132 ±0,002 A'
	1× rozmrożony 1x thawed	0,500 ±0,021 A'	3,592 ±0,161 A'	0,139 ±0,002 B'
	2× rozmrożony 2× thawed	0,578 ±0,050 B'	3,750 ±0,072 A'	0,141 ±0,002 B'
Mięso wieprzowe Pork chop	Świeży fresh	0,520 ±0,026 [A]	3,768 ±0,133 [A]	0,138 ±0,003 [A]
	1× rozmrożony 1× thawed	0,501 ±0,023 [A]	3,681 ±0,171 [A]	0,136 ±0,001 [A]
	2× rozmrożony 2× thawed	0,497 ±0,025 [A]	3,635 ±0,115 [A]	0,136 ±0,005 [A]

Z kolei wartość objętościowego ciepła właściwego mieściła się w zakresie 3,567–3,907 kJ·m⁻³·K⁻¹ w przypadku odpowiednio świeżego banana oraz jednokrotnie zamrożonego i rozmrożonego buraka ćwikłowego. Analiza statystyczna ($\alpha = 0,05$) udowodniła jednak, że badanych materiałów nie można w żaden sposób zróżnicować pod względem obróbki technologicznej, której zostały poddane. Podobne spostrzeżenie można wysunąć na podstawie wyników dwuczynnikowej analizy wariancji, która nie potwierdziła istotności żadnego z badanych czynników. Dyfuzyjność cieplna jest wielkością bardzo ważną w odniesieniu do procesów wymiany ciepła przebiegających w warunkach nieustalonych. Parametr ten nie zmieniał się wskutek zamrażania i rozmrażania analizowanych tkanek w porównaniu z odpowiednimi próbkami referencyjnymi. Przykładowo, nie stwierdzono

istotnych zmian dyfuzyjności cieplnej w wyniku obróbki technologicznej ziemniaka czy też schabu wieprzowego. Zaobserwowano natomiast, że zamrażanie rozmrażanie tkanek buraka ćwikłowego oraz banana prowadzi do istotnego statystycznie ($p < 0,05$) wzrostu tego współczynnika w porównaniu z surowcem świeżym. W przypadku buraka wzrost był jednak większy w odniesieniu do świeżego materiału i wynosił 9,7%, gdy próbka została poddana obróbce w jednym cyklu, oraz 7,4%, gdy produkt zamrażano ponownie. Co ważne, stwierdzono, że zarówno rodzaj surowca ($\eta^2 = 0,582$), obecność i typ obróbki technologicznej ($\eta^2 = 0,196$) oraz interakcja tych dwóch czynników ($\eta^2 = 0,477$) wpływały istotnie statystycznie ($p < 0,05$) na zróżnicowanie badanych próbek.

Rysunek 3 przedstawia wyniki analizy głównych składowych przeprowadzonej na podstawie wartości analizowanych zmiennych, co pozwoliło na kompleksową ocenę otrzymanych wyników.



Rys. 3. Wyniki analizy głównych składowych (PCA): z_s – ziemniak świeży; z_1x – ziemniak jednokrotnie zamrożony i rozmrożony; z_2x – ziemniak dwukrotnie zamrożony i rozmrożony; bc_s – burak ćwikłowy świeży; bc_1x – burak ćwikłowy jednokrotnie zamrożony i rozmrożony; bc_2x – burak ćwikłowy dwukrotnie zamrożony i rozmrożony; ba_s – banan świeży; ba_1x – banan jednokrotnie zamrożony i rozmrożony; ba_2x – banan dwukrotnie zamrożony i rozmrożony; sw_s – schab wieprzowy świeży; sw_1x – schab wieprzowy jednokrotnie zamrożony i rozmrożony; sw_2x – schab wieprzowy dwukrotnie zamrożony i rozmrożony

Fig. 3. Results of principle component analysis: z_s – fresh potato; z_1x – potato once frozen and thawed; z_2x – potato twice frozen and thawed; bc_s – fresh beetroot; bc_1x – beetroot once frozen and thawed; bc_2x – beetroot twice frozen and thawed; ba_s – fresh banana; ba_1x – banana once frozen and thawed; ba_2x – banana twice frozen and thawed; sw_s – fresh pork chop; sw_1x – pork chop once frozen and thawed; sw_2x – pork chop twice frozen and thawed

Na wykresie widać wyraźnie, że odległości między poszczególnymi rodzajami badanych świeżych tkanek są znaczne, co świadczy o dużym zróżnicowaniu tych materiałów i jest to dość oczywiste. Warto także zauważyć, że większość badanych próbek poddanych jedno- lub dwukrotnemu zamrażaniu i rozmrażaniu znajduje się blisko siebie – wszystkie znajdują się pod osią OX (co świadczy o ich dużym podobieństwie) i jednocześnie w stosunkowo dużej odległości od próbek świeżych (co z kolei podkreśla ich zróżnicowanie względem tych próbek). Analizując wyłącznie próbki pochodzące z jednego surowca, można stwierdzić, że odległość między świeżymi a zamrożonymi i rozmrożonymi jedno- lub dwukrotnie jest znaczna, co dowodzi ich zróżnicowania. Jedynie próbki schabu wieprzowego tworzą charakterystyczne skupisko niezależnie od wariantu eksperymentu, co wskazuje z kolei na ich duże podobieństwo.

WNIOSKI

1. Cykl zamrażania i rozmrażania prowadzi do zmian przewodności elektrycznej właściwej, przy czym wielkość zmiany zależna jest od rodzaju oraz pochodzenia (roślinnego lub zwierzęcego) surowca.
2. Spośród analizowanych zmiennych przewodność elektryczna właściwa jest najlepszym narzędziem umożliwiającym identyfikację zarówno jednokrotnego zamrażania i rozmrażania, jak i przeprowadzenia powtórnego cyklu zamrażania i rozmrażania tkanek warzyw (ziemniaka oraz buraka ćwikłowego). Zastosowanie pomiaru przewodności elektrycznej właściwej w przypadku mięsa wieprzowego oraz banana umożliwi wyłącznie stwierdzenie, że materiał był zamrożony i rozmrożony, niemożliwe jest natomiast określenie liczby cykli zamrażania i rozmrażania.
3. Właściwości cieplne wydają się mieć ograniczone zastosowanie w celu identyfikacji przerwania łańcucha chłodniczego żywności mrożonej, a następnie jej ponownego zamrożenia.

LITERATURA

- Ali S., Zhang W., Rajput N., Khan M.A., Li C.B., Zhou G.H., 2015. Effect of multiple freeze–thaw cycles on the quality of chicken breast meat. *Food Chem.* 173, 808–814.
- Bazhal M., Lebovka N., Vorobiev E., 2003. Optimisation of pulsed electric field strength for electroporation of vegetable tissues. *Biosyst. Eng.* 86(3), 339–345.
- Ben Ammar J., Lanoisellé J.L., Lebovka N.I., Van Hecke E., Vorobiev E., 2011. Impact of a pulsed electric field on damage of plant tissues: effects of cell size and tissue electrical conductivity. *J. Food Sci.* 76(1), 90–97.
- Grimi N., Mamouni F., Lebovka N., Vorobiev, E., Vaxelaire J., 2010. Acoustic impulse response in apple tissues treated by pulsed electric field. *Biosyst. Eng.* 105(2), 266–272.
- Janiszewska E., Sakowski P., 2012. Wpływ stopnia zagęszczenia soku marchwiowego oraz metody zamrażania na parametry procesu zamrażania. *ZPPNR*, 571, 49–58.
- Lewitt A., Mądro E., Krupienicz A., 2007. Podstawy teoretyczne i zastosowania analizy impedancji bioelektrycznej (BIA). *Endokrynologia, Otyłość, Zaburzenia Przemiany Materii* 3(4), 79–84.

- Lyng J.G., Zhang L., Marra F., Brunton N.P., 2013. The effect of freezing rate and comminution on the dielectric properties of pork. *Czech J. Food Sci.* 31(5), 413–418.
- Nayak C., Sugunaa K., Narasimhamurthy K., Rastogi N.K., 2007. Effect of gamma irradiation on histological and textural properties of carrot, potato and beetroot. *J. Food Eng.* 79(3), 765–770.
- Niesteruk R., Obidziński S., 2005. Właściwości termofizyczne zamrażanej żywności. *Inż. Rol.* 69, 225–232.
- Rozporządzenie (WE) nr 852/2004 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 kwietnia 2004 r. w sprawie higieny środków spożywczych. *Dz.U.* L 139/1.
- Sarang S., Sastry S.K., Knipe L., 2008. Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *J. Food Eng.* 87(3), 351–356.
- Szopińska A., Gawęda M., 2013. Comparison of yield and quality of red beet roots cultivated using conventional, integrated and organic method. *J. Hort. Res.* 21, 107–114.
- Wiktor A., Rybak K., Śledź M., Nowacka M., Gondek E., Chudoba T., Łojkowski W., Witrowa-Rajchert D., 2014. Wpływ sonikacji immersyjnej i kontaktowej oraz pulsacyjnego pola elektrycznego na przewodność elektryczną tkanki marchwi. *ZPPNR* 579, 101–110.
- Wiktor A., Witrowa-Rajchert D., Chudoba T., 2011. Przewodność elektryczna właściwa jako parametr stopnia dezintegracji komórek tkanki mięszu jabłka poddanego działaniu pulsacyjnego pola elektrycznego. *ZPPNR* 569, 293–300.

THE IMPACT OF ONCE AND DOUBLE FREEZING AND THAWING CYCLE ON ELECTRICAL AND THERMAL PROPERTIES OF SELECTED FOOD PRODUCTS

Summary. The aim of this work was to analyze the possibility of electrical conductivity and thermal properties measurement to identify repeated freezing and thawing treatment of food products. To do this three different plant origin tissues: potato, beetroot, banana and one animal origin sample (pork chop) were selected. Samples were prepared in a cylindrical form (diameter of 18 mm and height of 5 mm) and afterwards they were frozen at -18°C and kept in this temperature for 24 h. Afterwards all materials were thawed by the means of natural convection at room temperature (18°C) and either freezing and thawing cycle was repeated. Samples subjected to double freezing and thawing cycle underwent the same analysis that samples frozen and thawed only once. In thawed (or double thawed) material electrical conductivity, dry matter substance, thermal conductivity, specific volumetric heat and thermal diffusivity were determined. Obtained results were statistically analyzed by the means of ANOVA, two-way ANOVA, Pearson's correlation and PCA procedures. Electrical conductivity of frozen and thawed samples were higher in comparison to raw material regardless the number of freezing and thawing cycles. However, bigger differences were stated for plant origin tissue. For instance, electrical conductivity of frozen and thawed beetroot was 27.1 times higher than electrical conductivity of fresh material. In the case of pork chop the increment was only 1.1 times higher when compared to raw sample. It was possible to statistically ($\alpha = 0.05$) identify repeated freezing and thawing cycle only in the case of vegetable tissue, i.e. potato and beetroot. Similar results were obtained regarding dry matter content of examined materials. The differences between material which was frozen and thawed in one cycle and in two cycles were statistically irrelevant in the case of banana and pork chop samples. Freezing and thawing regardless the number of cycles

in general did not altered significantly the thermal conductivity and specific volumetric heat of investigated material. Relevant changes were found only for beetroot and banana in the case of thermal diffusivity when compared fresh and frozen and thawed material. Therefore, it can be stated that it is possible to utilize electrical conductivity to identify repeated freezing and thawing of vegetable tissue whereas thermal properties measurement utilization in this field is limited.

Key words: freezing, electrical conductivity, thermal conductivity, thermal diffusivity, thawing

