

ZASTOSOWANIE PRZEWODNOŚCI ELEKTRYCZNEJ WŁAŚCIWEJ DO OCENY PRZEBIEGU PROCESU ZAMRAŻANIA I ROZMRAŻANIA TKANKI ROŚLINNEJ*

Artur Wiktor¹, Aleksandra Fijałkowska¹, Iza Kućko¹,
Mariusz Wojnowski¹, Krzysztof Królikowski¹, Maria Hankus¹,
Tadeusz Chudoba², Witold Łojkowski³, Dorota Witrowa-Rajchert¹

¹Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

²Instytut Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk

³Politechnika Białostocka

Streszczenie. Celem pracy była analiza możliwości wykorzystania przewodności elektrycznej właściwej do oceny przebiegu procesu zamrażania oraz rozmrażania, a także wybranych parametrów jakościowych rozmrożonej tkanki roślinnej. W tym celu próbki marchwi, ziemniaka oraz jabłka poddano zamrażaniu owiewowemu (-20°C), owiewowo-szokowemu (-20 lub -40°C) oraz immersyjnemu (-20°C), a następnie rozmrażano w temperaturze pokojowej (konwekcja naturalna) oraz wyznaczono czasy trwania poszczególnych etapów tych procesów. Po rozmrożeniu wyznaczono ubytek masy, przewodność elektryczną właściwą i zawartość suchej substancji tkanki. Stwierdzono, że zamrażanie, a następnie rozmrażanie prowadziło do wzrostu przewodności elektrycznej, przy czym wielkość tych zmian zależała przede wszystkim od rodzaju materiału. Na podstawie analizy statystycznej (przeprowadzonej metodą analizy skupień) wyników badań udowodniono, że przewodność elektryczna może być zgrupowana w jednej kategorii z zawartością suchej substancji, czasem przemiany fazowej podczas zamrażania, rozmrażania oraz z całkowitym czasem rozmrażania.

Słowa kluczowe: zamrażanie, jabłko, ziemniak, marchew, przewodność elektryczna, konduktywność, rozmrażanie

*Badania zrealizowane dzięki środkom przyznanym na realizację zadań badawczych w ramach wewnętrznego trybu konkursowego SGGW (2014) dla młodego pracownika nauki/uczestnika studiów doktoranckich.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Artur Wiktor, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Nauk o Żywności, Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, ul. Nowoursynowska 159c, 02-776 Warszawa, e-mail: artur_wiktor@sggw.pl

WSTĘP

Zamrażanie żywności uznaje się za jedną z najważniejszych metod utrwalania surowców i produktów charakteryzujących się niską trwałością lub sezonową dostępnością [Sitkiewicz i in. 2013]. Niemniej jednak jakość żywności mrożonej zależy od bardzo wielu czynników związanych z charakterystyką samego surowca, metodą oraz parametrami zamrażania, a także obróbką wstępną surowca [Maestrelli i in. 2001, Postolski 2008, Rafalska i Kamińska-Dwórznicza 2014]. Bardzo ciekawych i cennych informacji, związanych z przebiegiem procesu zamrażania żywności, może dostarczyć analiza właściwości elektrycznych żywności. Wielkości te znajdują coraz większe zastosowanie w technologii żywności [Nelson 2006]. Ich znajomość okazuje się pomocna w przypadku oceny autentyczności i pochodzenia botanicznego miodów [Łuczycka 2010, Majewska i Kowalska 2011], może posłużyć do oceny zawartości tłuszczu czy obecności komórek somatycznych w mleku [Norberg i in. 2004, Żywica i in. 2012] oraz dostarczyć informacji na temat zawartości glutenu w mące [Łuczycka i Romański 2008]. Coraz częstsze wykorzystanie właściwości elektrycznych jest także związane z rozwojem niekonwencjonalnych metod przetwarzania produktów rolno-spożywczych, np. ogrzewania rezystancyjnego [Lebovka i in. 2006, Srivastav i Roy 2014] lub pulsacyjnego pola elektrycznego [De Vito i in. 2008, Wiktor i in. 2011, Jaeger i in. 2012]. Parametry elektryczne, a zwłaszcza przewodność elektryczna właściwa, determinują przebieg tych procesów. Dodatkowo znajomość przewodności elektrycznej właściwej jest kluczowa w przypadku oceny efektywności oddziaływania pulsacyjnego pola elektrycznego (elektroporacji) na żywność. Wiadomo powszechnie, że zamrażanie żywności, a następnie jej rozmrożenie prowadzi do zmian w komórkowej budowie tkanki roślinnej. Zmiany te najczęściej wiążą się z uszkodzeniem błony komórkowej wskutek wzrostu (a następnie roztopienia się) kryształów wymrażanej wody. Powoduje to wyciek treści wewnątrzkomórkowej zawierającej substancje zdolne do gromadzenia ładunku elektrycznego i w konsekwencji może prowadzić do wzrostu przewodności elektrycznej właściwej. W związku z tym można stwierdzić, że pomiar właściwości elektrycznych zamrożonej, a następnie rozmrożonej tkanki roślinnej może być cennym narzędziem służącym do oceny przebiegu tych procesów oraz do pośredniej oceny zmian strukturalnych wywołanych tak przeprowadzoną obróbką technologiczną. Warto dodać, że literatura związana z tymi zagadnieniami jest raczej uboga i ogranicza się, według wiedzy autorów, do kilku pozycji [Ohnishi i in. 2004, Marra 2013].

W związku z powyższym celem badań było określenie kinetyki zamrażania owiewowo-szokowego, immersyjnego oraz owiewowego, kinetyki rozmrażania konwekcyjnego oraz analiza możliwości wykorzystania przewodności elektrycznej właściwej do oceny przebiegu tych procesów oraz wybranych właściwości rozmrożonej tkanki.

MATERIAŁ I METODY

W badaniach wykorzystano tkanki jabłka (var. Ligol) i marchwi (var. Kazan), które pochodziły z Pól Doświadczalnych Katedry Sadownictwa SGGW, oraz ziemniaka (var. Bryza) zakupionego na lokalnym rynku. Surowce przechowywano w 4°C i wilgotności

względnej 80–90%. Bezpośrednio przed każdym eksperymentem surowiec wyjmowano z komory przechowalniczej, zostawiano w celu wyrównania temperatury z temperaturą pokojową ($20 \pm 1^\circ\text{C}$), myto, a następnie rozdrabniano (równoległe do głównej osi materiału), stosując specjalny nóż tnący. Przygotowane próbki miały kształt cylindra o średnicy 15 mm i wysokości 10 mm.

Zamrażanie immersyjne prowadzono w kriostacie (Kältemaschinenbau Peter Huber GmbH model CC-505, Niemcy) wypełnionym olejem silikonowym, w temperaturze -20°C , zamrażanie owiewowe w zamrażarce laboratoryjnej z wymuszonym obiegiem powietrza w temperaturze -20°C , a zamrażanie owiewowo-szkowe w zamrażarce szokowej (IRINOX, HCM 51.20, USA) w temperaturze -20 oraz -40°C .

Próbki umieszczano w odpowiednich urządzeniach natychmiast po ich przygotowaniu, zwracając szczególną uwagę na ich odpowiednie, powtarzalne rozmieszczenie. Zmiany temperatury monitorowano co 5 sekund przy użyciu termopary typu K, umieszczonej w centrum termicznym próbki, podłączonej do rejestratora danych. Pomiary wykonano w dwóch powtórzeniach.

Rozmrażanie prowadzono w powietrzu (konwekcja naturalna) w temperaturze pokojowej, rejestrując zmiany temperatury, z wykorzystaniem tego samego zestawu pomiarowego co w przypadku zamrażania.

Na podstawie otrzymanych krzywych zamrażania wyznaczono czasy trwania poszczególnych etapów, zgodnie z metodyką zaproponowaną przez Kamińską i Lewickiego [2006]. Czas schładzania określono jako czas od początku procesu zamrażania (20°C) do uzyskania temperatury 0°C , czas przemiany fazowej w zakresie temperatur od 0 do -4°C oraz czas domrażania od -4 do -15°C , zmierzonych w środku termicznym próbki. Analogicznie wyznaczono czasy poszczególnych faz rozmrażania, definiując następujące etapy tego procesu: ogrzewanie (od -15 do -4°C), przemianę fazową (od -4 do 0°C) oraz dogrzewanie (od 0 do 10°C) [Wiktor i in. 2015].

Przewodność elektryczną właściwą (EC) tkanek oznaczano przed i po zamrażaniu/rozmarzaniu materiału, stosując konduktometr (CPC-505, Elmetron, Gliwice), wyposażony w wykonaną z platyny, dwuigłową elektrodę własnej konstrukcji. Badanie wykonano w pięciu powtórzeniach dla każdego z analizowanych materiałów.

Na podstawie różnicy masy próbek przed zamrażaniem oraz po rozmrażaniu oceniono także ubytek masy w wyniku rozmrażania, wyrażony w stosunku do próbki świeżej niepoddanej obróbce technologicznej. Badanie wykonano w trzech powtórzeniach.

Suchą substancję oznaczono zgodnie z metodyką AOAC 920.15, 2002 w trzech powtórzeniach.

Otrzymane wyniki poddano analizie statystycznej, wykorzystując jednoczynnikową analizę wariancji (test Tukeya, $\alpha = 0,05$; jednorodność wariancji sprawdzono na podstawie testu Levena). W celu oceny możliwości zastosowania pomiaru przewodności elektrycznej właściwej do oceny przebiegu zamrażania oraz rozmrażania, a także właściwości rozmrożonej tkanki roślinnej dokonano analizy skupień (ang. Cluster Analysis) badanych parametrów. Analiza przeprowadzona w ten sposób dostarcza wiedzy na temat podobieństwa poszczególnych parametrów, które wyznaczano w ramach przeprowadzonego doświadczenia. Dodatkowo, w celu określenia zależności między wybranymi parametrami, przeprowadzono analizę korelacji Pearsona ($\alpha = 0,05$).

WYNIKI I DYSKUSJA

Analiza krzywych zamrażania i rozmrażania według opisanej wcześniej metodyki pozwoliła obliczyć czasy trwania poszczególnych etapów tych procesów (tab. 1 i 2).

Tabela 1. Czasy trwania poszczególnych etapów procesu zamrażania badanych tkanek roślinnych
Table 1. Times of each freezing stage depending on the investigated plant tissue

Materiał Material	Metoda zamrażania Freezing method	Czas etapu zamrażania Freezing stage time [s]			
		schładzanie cooling	przemiana fazowa phase transition	domrażanie subcooling	całkowity total
Jabłko Apple	owiewowo-szkowa shock freezing (-40°C)	155	50	305	510
	owiewowo-szkowa shock freezing (-20°C)	165	55	690	910
	owiewowa air freezing (-20°C)	205	60	715	980
	immersyjna immersive freezing (-20°C)	70	30	710	810
Marchew Carrot	owiewowo-szkowa shock freezing (-40°C)	165	35	360	560
	owiewowo-szkowa shock freezing (-20°C)	165	100	480	745
	owiewowa air freezing (-20°C)	165	165	830	1160
	immersyjna immersive freezing (-20°C)	165	445	490	1100
Ziemniak Potato	owiewowo-szkowa shock freezing (-40°C)	165	40	360	565
	owiewowo-szkowa shock freezing (-20°C)	220	60	195	475
	owiewowa air freezing (-20°C)	145	100	775	1020
	immersyjna immersive freezing (-20°C)	155	70	660	885

Najkrótszy całkowity czas zamrażania zanotowano w przypadku ziemniaka zamrażanego metodą owiewowo-szkową w temperaturze -20°C , a najdłuższy w przypadku owiewowego (-20°C) zamrażania marchwi. Analizując otrzymane wyniki, można także stwierdzić, że bez względu na rodzaj tkanki roślinnej, najszybsza okazała się metoda owiewowo-szkowa. Warto jednak dodać, że w przypadku marchwi i jabłka krótsze czasy zamrażania otrzymano w przypadku zastosowania temperatury -40°C , a w przypadku ziemniaka w temperaturze -20°C . Różnice te wynikają najprawdopodobniej z innej struktury opisywanych tkanek, a także z ich bioróżnorodności. Całkowity czas rozmrażania był przynajmniej dwukrotnie dłuższy niż całkowity czas zamrażania. Przykładowo zamrażanie immersyjne marchwi trwało 810 sekund, a rozmrażanie było 3,6 razy dłuższe i trwało 2935 sekund. Najdłuższym całkowitym czasem rozmrażania charakteryzowały się próbki marchwi zamrożonej owiewowo-szkowo w temperaturze -40°C . Można tak-

Tabela 2. Czasy trwania poszczególnych etapów procesu rozmrażania badanych tkanek roślinnych

Table 2. Times of each thawing stage depending on the investigated plant tissue

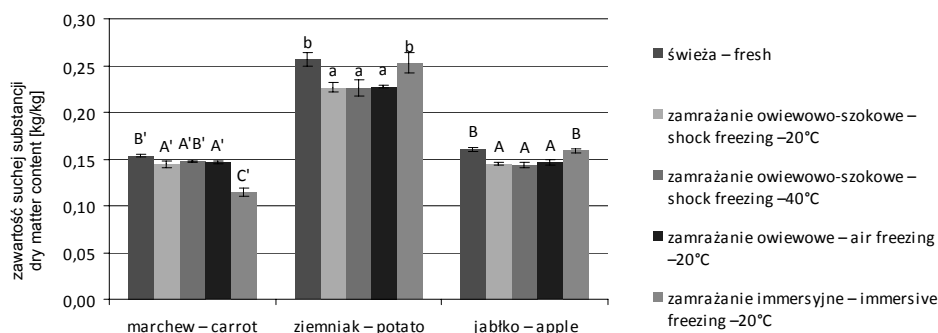
Material Material	Metoda zamrażania Freezing method	Czas etapu rozmrażania Thawing stage time [s]			
		ogrzewanie pre-heating	przemiana fazowa phase transition	dogrzewanie subheating	całkowity total
Jabłko Apple	owiewowo-szkowa shock freezing (-40°C)	1935	235	615	2785
	owiewowo-szkowa shock freezing (-20°C)	1455	195	610	2260
	owiewowa air freezing (-20°C)	2020	180	605	2805
	immersyjna immersive freezing (-20°C)	1795	305	455	2555
Marchew Carrot	owiewowo-szkowa shock freezing (-40°C)	2995	65	835	3895
	owiewowo-szkowa shock freezing (-20°C)	2610	45	900	3555
	owiewowa air freezing (-20°C)	1410	850	550	2810
	immersyjna immersive freezing (-20°C)	1430	910	595	2935
Ziemniak Potato	owiewowo-szkowa shock freezing (-40°C)	2830	165	645	3640
	owiewowo-szkowa shock freezing (-20°C)	1840	415	720	2975
	owiewowa air freezing (-20°C)	1915	540	630	3085
	immersyjna immersive freezing (-20°C)	1810	460	510	2780

że stwierdzić, że na ogół próbki zamrożone tą metodą rozmrażały się dłużej niż próbki zamrożone innymi metodami.

Jedynie w przypadku tkanki jabłka dłuższy czas tego procesu stwierdzono w przypadku tkanki zamrożonej owiewowo w -20°C . Przyczyną takiego zachowania może być rozmiar kryształów lodu, które powstają w wyniku szybkiego i powolnego rozmrażania. W przypadku zastosowania metody szokowej woda zawarta w komórkach ulega wymrożeniu w postaci niewielkich kryształów lodu. Z kolei zamrażanie powolne wiąże się z wolniejszą krystalizacją wody i tym samym powstaniem kryształów lodu o większych rozmiarach. W trakcie rozmrażania kryształy lodu znajdujące się w tkance roślinnej ulegają przemianie fazowej w wodę. Lód charakteryzuje się większą przewodnością cieplną właściwą niż woda, w związku z czym można stwierdzić, że warstwa wody, która powstaje na granicy faz lód – otoczenie, mimo że jej powstanie jest celem procesu, to jest jednocześnie czynnikiem spowalniającym jego przebieg (kinetykę). Większa liczba mniejszych kryształów lodu w tkance zamrażanej metodami szybkimi prawdopodobnie wiąże się z bardziej rozwiniętą powierzchnią warstwy wody, ograniczając tym samym proces rozmrażania. Otrzymane czasy ogrzewania – pierwszego etapu rozmrażania – także

potwierdzają powyższe rozważania. Należy podkreślić, że próbki marchwi oraz ziemniaka zamrażane metodą szokową charakteryzowały się najkrótszymi czasami przemiany fazowej zarówno w przypadku zamrażania, jak i rozmrażania. W przypadku jabłka najkrótszy czas przemiany fazowej podczas zamrażania zanotowano w przypadku metody immersyjnej. Związane jest to najprawdopodobniej z dużą porowatością tego materiału [Witrowa-Rajchert 1999], przez co ciekłe medium zastosowane w tej technice mogło wnikać w przestrzenie międzykomórkowe i dzięki temu wymiana ciepła była bardziej intensywna. Warto także zaznaczyć, że przeprowadzona analiza korelacji Pearsona wykazała istotną ($p < 0,05$) zależność między czasem przemiany fazowej podczas zamrażania oraz czasem przemiany fazowej podczas rozmrażania ($r = 0,758$).

Zawartość suchej substancji była zróżnicowana i zależała od rodzaju tkanki roślinnej. Wynosiła ona 0,1540; 0,2570 oraz 0,1602 kg s.s./kg w przypadku odpowiednio świeżej marchwi, ziemniaka oraz jabłka (rys. 1). Zamrażanie, a następnie rozmrażanie na ogół spowodowało zmniejszenie zawartości suchej substancji analizowanych materiałów. Przykładowo, zawartość suchej substancji rozmrożonej marchwi wynosiła od 0,1138 do 0,1472 kg s.s./kg. Oznacza to, że spadek zawartości suchej substancji wynosił od 4,41 do 26,10% w porównaniu z próbką surową. Z kolei w przypadku jabłka spadek ten był wyraźnie mniejszy i mieścił się w granicach od 0,87 do 10,30% w porównaniu z materiałem nieprzetworzonym.



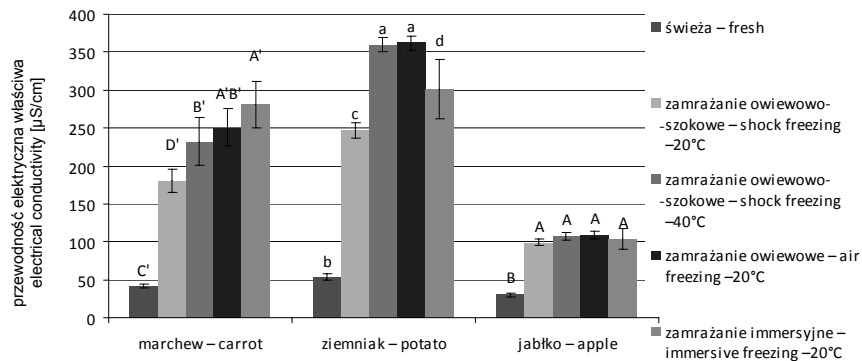
Rys. 1. Zawartość suchej substancji w świeżej oraz rozmrożonej tkance roślinnej

Fig. 1. The dry matter content of fresh and frizzed-thawed plant tissue

Zmniejszenie zawartości suchej substancji wywołane zamrażaniem/rozmrażaniem można wiązać ze zniszczeniem natywnych struktur komórkowych tkanki roślinnej, co z kolei może prowadzić do wycieku substancji wewnątrzkomórkowej.

Procesy zamrażania i rozmrażania nie spowodowały istotnych zmian zawartości suchej substancji jedynie w przypadku rozmrożonego jabłka oraz ziemniaka zamrażanych immersyjnie, a także w przypadku rozmrożonej marchwi, którą wcześniej zamroźono metodą owiewowo-szkowo w temperaturze -40°C .

Wartość przewodności elektrycznej właściwej w zależności od rodzaju surowca oraz od metody zamrażania/rozmrażania przedstawiono na rysunku 2. Materiał świeży charakteryzował się przewodnością elektryczną, wynoszącą 30,37; 41,64 oraz 53,30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ w przypadku odpowiednio jabłka, marchwi oraz ziemniaka. Wyższa przewodność tkanki marchwi wynika zarówno z innego składu chemicznego, jak i z odmiennej struktury ma-



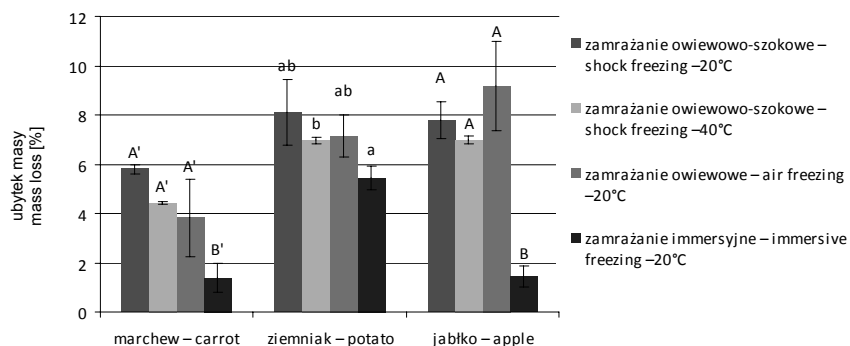
Rys. 2. Przewodność elektryczna właściwa świeżej i rozmrożonej tkanki roślinnej zamrażanej różnymi metodami

Fig. 2. Electrical conductivity of fresh and thawed plant tissue frozen by different methods

teriałów i jest analogiczna do wyników przedstawionych w literaturze [Wiktor i in. 2011, 2014, Bazhal i in. 2001]. Zamrażanie (bez względu na metodę prowadzenia tego procesu), a następnie rozmrażanie skutkowało zwiększeniem wartości przewodności elektrycznej właściwej. Największy, prawie siedmiokrotny wzrost tej wielkości, zaobserwowano w przypadku ziemniaka zamrażanego owiewowo w -20°C ($361,81 \mu\text{S}/\text{cm}$). Z kolei najmniejsze zmiany zanotowano w przypadku tkanki jabłka. W tym przypadku przewodność elektryczna tkanki rozmrożonej wynosiła $99,56$ – $108,45 \mu\text{S}/\text{cm}$ i nie zależała istotnie od zastosowanej metody zamrażania. Zamrażanie immersyjne, a następnie rozmrażanie tkanki marchwi spowodowało największe zmiany konduktywności elektrycznej spośród wszystkich metod zastosowanych do zamrażania tego materiału. Co ciekawe, w przypadku tkanki ziemniaka czy jabłka metoda ta nie wywołała aż tak dużych zmian. Różnice te, podobnie jak w przypadku różnic w czasie trwania poszczególnych etapów procesu, spowodowane są zarówno specyfiką każdej z analizowanych technik zamrażania, jak i wynikają z różnej struktury oraz porowatości badanych tkanek roślinnych.

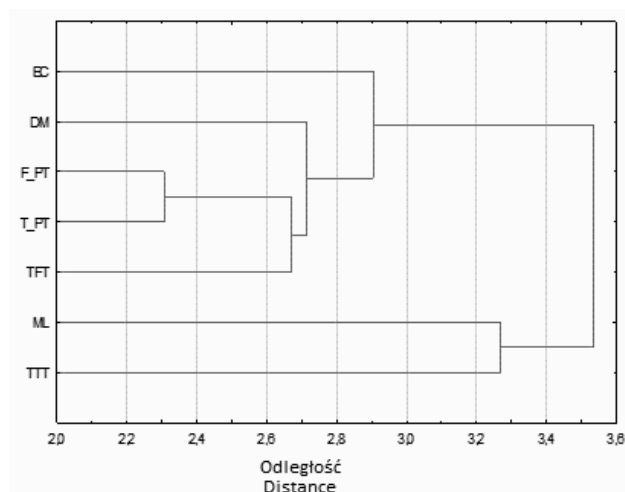
Śród badanych metod zamrażania najmniejszy ubytek masy po rozmrożeniu był charakterystyczny dla zamrażania prowadzonego immersyjnie (rys. 3). Wartość tego parametru wynosiła $1,40$; $5,46$ oraz $1,43\%$ w przypadku marchwi, ziemniaka oraz jabłka. Wyniki te pozostają w zgodzie z wartościami ubytku masy rozmrożonych próbek żywności zamrażanych immersyjnie dostępnymi w literaturze [Kozłowicz i in. 2013, Wiktor i in. 2015]. Próbki zamrożone pozostałymi metodami po rozmrażaniu charakteryzowały się ubytkiem masy mieszczącym się w zakresie od $3,83$ do $9,19\%$, przy czym najwyższe wartości obserwowano w przypadku jabłka, a najniższymi charakteryzowała się tkanka marchwi.

Rysunek 4 przedstawia wyniki analizy skupień przeprowadzonej w celu zbadania zależności między poszczególnymi parametrami użytymi w doświadczeniu do opisanego zarówno jakości tkanki roślinnej, jak i przebiegu procesu zamrażania i rozmrażania. Na podstawie otrzymanych rezultatów można wyróżnić dwie główne grupy parametrów. Pierwszą grupę tworzą następujące zmienne: TTT – całkowity czas rozmrażania i ML – ubytek masy. Z kolei druga grupa zawierała pięć następujących elementów: TFT – całkowity czas



Rys. 3. Ubytek masy po rozmrożeniu w zależności od materiału i zastosowanej metody zamrażania

Fig. 3. Mass loss after thawing depending on the material and freezing method



Rys. 4. Wyniki analizy skupień przeprowadzonej dla parametrów opisujących właściwości tkanek rozmrożonej oraz kinetykę procesu zamrażania i rozmrażania

Fig. 4. The results of Cluster Analysis performed for the quality features of thawed tissue and freezing and thawing process kinetics

zamrażania; T_PT – czas przemiany fazowej podczas rozmrażania; F_PT – czas przemiany fazowej podczas zamrażania; DM – zawartość suchej substancji oraz EC – przewodność elektryczna właściwa.

Obecność przewodności elektrycznej w jednej grupie wraz z wymienionymi wyżej parametrami wskazuje na pewne podobieństwo między tymi wielkościami. Oznacza to, że przewodność elektryczna może być parametrem pomocnym zarówno w ewaluacji i interpretacji kinetyki zamrażania/rozmrażania oraz jakości produktów rozmrożonych, jak i w ocenie zależności występujących między tymi cechami. Niemniej jednak warto dodać, że statystycznie istotną korelację Pearsona ($p < 0,05$) stwierdzono jedynie między wartością przewodności elektrycznej właściwej a zawartością suchej substancji ($r = 0,617$).

WNIOSKI

1. Zamrażanie (bez względu na zastosowaną metodę), a następnie rozmrażanie prowadzi do wzrostu przewodności elektrycznej właściwej analizowanych tkanek roślinnych.
2. Wielkość zmiany przewodności elektrycznej właściwej zależy przede wszystkim od rodzaju przetwarzanego surowca. Wpływ metody zamrażania na wartość tego parametru jest niejednoznaczny.
3. Przewodność elektryczna właściwa może być pomocna w ocenie przebiegu procesu zamrażania, a zwłaszcza do oceny zawartości suchej substancji produktu rozmrożonego.

LITERATURA

- Bazhal M., Lebovka N., Vorobiev E., 2003. Optimisation of pulsed electric field strength for electroporation of vegetable tissues. *Biosystems Engineering* 86(3), 339–345.
- De Vito F., Ferrari G., Lebovka N.I., Shynkaryk N.V., Vorobiev E., 2008. Pulse duration and efficiency of soft cellular tissue disintegration by pulsed electric fields. *Food and Bioprocess Technology* 1(4), 307–313.
- Jaeger H., Schulz M., Lu P., Knorr D., 2012. Adjustment of milling, mash electroporation and pressing for the development of a PEF assisted juice production in industrial scale. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 14, 46–60.
- Kamińska A., Lewicki P.P., 2006. Wpływ wstępnej obróbki osmotycznej na przebieg procesów zamrażania i rozmrażania jabłek. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość* 13(2 (47), Supl.), 101–107.
- Kozłowicz K., Kluza F., Góral D., 2013. Wpływ metody zamrażania na wyciek i twardość żeli żelatynowych otrzymywanych w różnych środowiskach. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość* 5(90), 107–118.
- Lebovka N.I., Shynkaryk M.V., Vorobiev E., 2006. Drying of potato tissue pretreated by ohmic heating. *Drying Technology* 24(5), 601–608.
- Łuczycza D., 2010. Właściwości dielektryczne wybranych odmian miodu. *Inżynieria Rolnicza* 5(123), 137–142.
- Łuczycza D., Romański L., 2008. Analiza zależności pomiędzy cechami dielektrycznymi a właściwościami chemicznymi mąki. *Inżynieria Rolnicza* 5(103), 91–95.
- Maestrelli A., Scalzo R.L., Lupi D., Bertolo G., Torreggiani D., 2001. Partial removal of water before freezing: cultivar and pre-treatments as quality factors of frozen muskmelon (*Cucumis melo*, cv *reticulatus* Naud.). *Journal of Food Engineering* 49(2), 255–260.
- Majewska, E., Kowalska, J., 2011. Badanie korelacji między przewodnością elektryczną i zawartością popiołu w wybranych miodach pszczelich. *Acta Agrophysica* 17(2), 369–376.
- Marra F., 2013. Impact of freezing rate on electrical conductivity of produce. *SpringerPlus* 2(1), 1–5.
- Nelson S.O., 2006. Agricultural applications of dielectric measurements. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 13, 688–702.
- Norberg E., Hogeveen H., Korsgaard I.R., Friggens N.C., Sloth K.H.M.N., Lřvendahl P., 2004. Electrical conductivity of milk: ability to predict mastitis status. *Journal of Dairy Science* 87(4), 1099–1107.
- Ohnishi S., Shimiya Y., Kumagai H., Miyawaki O., 2004. Effect of freezing on electrical and rheological properties of food materials. *Food Science And Technology Research* 10(4), 453–459.

- Postolski J., 2008. Prawie wszystko o... technologii chłodniczej żywności. Wykorzystanie mrożonej żywności. Teoretyczne podstawy procesu rozmrażania. *Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna* 10, 66–70.
- Rafalska U.K., Kamińska-Dwórznicza A., 2014. Wpływ dodatku wybranych biopolimerów na parametry procesu zamrażania modelowego roztworu sacharozy. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość* 4(95), 53–62.
- Sitkiewicz I., Piotrowski D., Janowicz M., Szlendak Ł., 2013. Analiza wpływu metody suszenia na wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne truskawek. *Acta Agrophysica* 20(2), 427–437.
- Srivastav S., Roy S., 2014. Changes in electrical conductivity of liquid foods during ohmic heating. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 7(5), 133–138.
- Wiktor A., Rybak K., Śledź M., Nowacka M., Gondek E., Chudoba T., Łojkowski W., Witrowa-Rajchert D., 2014. Wpływ sonikacji immersyjnej, kontaktowej oraz pulsacyjnego pola elektrycznego na przewodność elektryczną tkanki marchwi. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 579, 101–110.
- Wiktor A., Schulz M., Voigt E., Witrowa-Rajchert D., Knorr D., 2015. The effect of pulsed electric field treatment on immersion freezing, thawing and selected properties of apple tissue. *Journal of Food Engineering* 146, 8–16.
- Wiktor A., Witrowa-Rajchert D., Chudoba T., 2011. Przewodność elektryczna jako parametr stopnia dezintegracji komórek tkanki mięszu jabłka poddanego działaniu pulsacyjnego pola elektrycznego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 569, 293–300.
- Witrowa-Rajchert D., 1999. Rehydracja jako wskaźnik zmian zachodzących w tkance roślinnej w czasie suszenia. Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa.
- Żywica R., Banach J.K., Kielczewska K., 2012. An attempt of applying the electrical properties for the evaluation of milk fat content of raw milk. *Journal of Food Engineering* 111(2), 420–424.

THE UTILIZATION OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY FOR EVALUATION OF THE PLANT TISSUE FREEZING/THAWING PROCESS

Summary. The kinetics of freezing/thawing and quality of frozen-thawed materials depend on many factors which are linked to the processing method, features of the raw material and the pretreatment conditions. Therefore, it could be stated that there exist a need to develop a tool which could be helpful in the analysis of the course of the freezing process and which will help to evaluate the quality of freeze-thawed material. Measurement of electrical properties of the tissue, which are related to the integrity of the intercellular structure of the material, could provide a helpful data in both freezing process evaluation and optimization. The aim of this work was to analyze the dependence between the electrical conductivity and some parameters linked to the kinetics of freezing/thawing and physical parameters of frozen-thawed plant tissue. Apple, carrot and potato samples were used in the investigation. Plant materials were frozen by the means of air-freezing (-20°C), shock-air-freezing (-20 and -40°C) and immersion freezing (-20°) and thawed at the room temperature (free convection; $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$). After such processing in the samples, electrical conductivity, dry matter content and the mass loss were determined. The shortest total freezing time was noticed for the shock-air-freezing method regardless of the processed raw material wherein the lower freezing temperature resulted in shorter freezing time. Thawing lasted at least two times longer than freezing and the longest total thawing time was observed in the case of

carrots frozen by the means of shock-air-freezing at -40°C . Freezing and thawing generally reduced the dry matter content up to 26.1% in comparison to an unprocessed material. Furthermore, the lowest value of mass loss after thawing was observed in the case of samples which were processed by the immersion freezing regardless of the kind of the plant tissue. All thawed samples exhibited higher electrical conductivity than the unfrozen, raw tissues. The value of this parameter was even 7 times higher in the case of freeze-thawed potato frozen by the means of air-freezing (-20°C). Such situation was caused by the disintegration of the cell membrane as a consequence of ice crystal formation and thawing. Cluster analysis showed that the electrical conductivity can be aggregated in the same group with the dry matter content, phase transition time during freezing, phase transition time during thawing and total thawing time and thus it can facilitate the interpretation of the data.

Key words: freezing, apple, potato, carrot, electrical conductivity, thawing