

ARTUR WIKTOR, DOROTA WITROWA-RAJCHERT

ZASTOSOWANIE PULSACYJNEGO POLA ELEKTRYCZNEGO DO WSPOMAGANIA PROCESÓW USUWANIA WODY Z TKANEK ROŚLINNYCH

Streszczenie

Suszenie należy do najpowszechniej stosowanych operacji w technologii żywności. Głównym jego celem jest utrwalenie żywności, co wiąże się z ograniczeniem rozwoju mikroorganizmów oraz zahamowaniem reakcji enzymatycznych i nieenzymatycznych. Proces limitowany jest głównie przez wewnętrzne opory ruchu wody, będące konsekwencją komórkowej struktury suszonego materiału. Rosnące wymagania konsumentów, którzy domagają się produktów o wysokiej jakości, a także producentów, którzy poszukują ekonomicznych rozwiązań, są przyczyną poszukiwań alternatywnych do termicznych metod obróbki wstępnej przed suszeniem. Jedną z najbardziej przyszłościowych technik jest wykorzystanie fal elektrycznych o wysokiej amplitudzie napięcia – w skrócie PEF (ang. pulsed electric field). Szczególnie istotny wpływ stosowania zmiennego pola elektrycznego o wysokiej amplitudzie napięcia, jako zabiegu wstępnego przed właściwym procesem, stwierdzono w przypadku operacji determinowanych oporami ruchu masy wewnątrz materiału, np. ekstrakcji, tłoczenia, a szczególnie odwadniania osmotycznego i suszenia.

Słowa kluczowe: pulsacyjne pole elektryczne (PEF), suszenie, odwadnianie osmotyczne, obróbka wstępna

Wprowadzenie

Suszenie jest jedną z najstarszych, konwencjonalnych metod usuwania wody z żywności. Obecnie suszona żywność spożywana jest przez konsumentów bezpośrednio lub stanowi półprodukt do dalszego przetwarzania. Coraz częściej suszone owoce czy warzywa używane są jako składniki żywności wygodnej typu: *ready-to-cook* (gotowej do gotowania) czy nawet *ready-to-eat* (gotowej do spożycia) [12]. W związku z tym, jakość produktów suszonych spożywanych bezpośrednio oraz tych kierowanych do dalszego przerobu musi być wysoka. Jednocześnie świadomi konsumenci oczekują nie tylko artykułów o pożądanym walorach smakowych, ale także takich, w których

Mgr inż. A. Wiktor, prof. dr hab. D. Witrowa-Rajchert, Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Wydz. Nauk o Żywności, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159 C, 02-776 Warszawa

żywnościowo ważne substancje zostały zachowane w możliwie największym stopniu. Nie bez znaczenia są również wymagania producentów, którzy poszukują rozwiązań ekonomicznie uzasadnionych. W związku z tym prowadzone są badania nad nowymi metodami suszenia oraz zabiegami wstępnymi, których celem, oprócz intensyfikacji samego procesu, jest sprostanie wymaganiom rynku. Do najpopularniejszych metod obróbki wstępnej należą zabiegi termiczne, które, poprawiając warunki wymiany masy, powodują jednocześnie szereg niekorzystnych zmian w produkcie, np. nieodwracalne zmiany barwy czy degradację związków biologicznie aktywnych [3]. Jedną z najbardziej obiecujących nietermicznych technik obróbki wstępnej przed suszeniem jest wykorzystanie fal elektrycznych o wysokiej amplitudzie napięcia – PEF (*ang. pulsed electric field*) [26].

Pulsacyjne pole elektryczne w przetwórstwie żywności

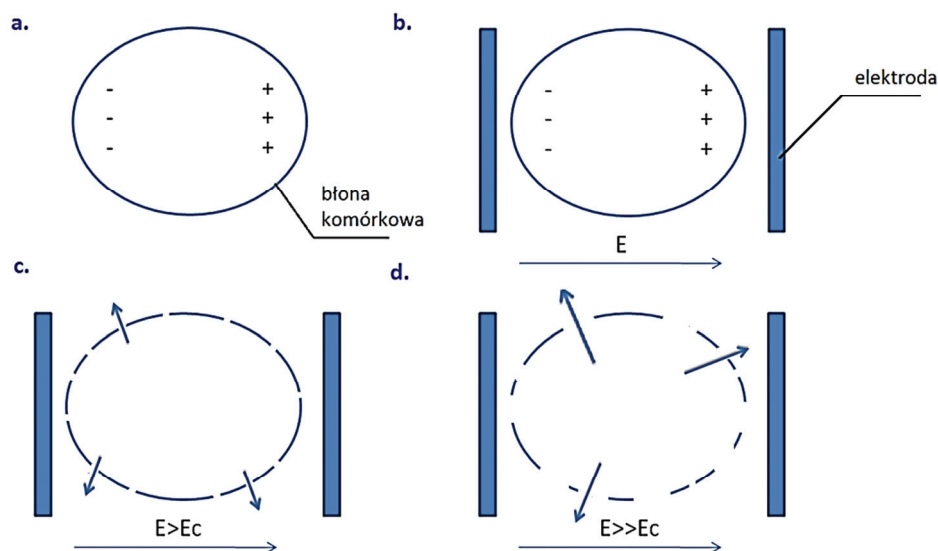
Zastosowanie prądu elektrycznego w przetwórstwie żywności było przedmiotem zainteresowania naukowców już na początku XX w. W 1920 r. opracowana została metoda pasteryzacji mleka („*ElectroPure Process*”) przy użyciu zmiennego prądu elektrycznego o niskiej częstotliwości. Pionierskie badania nad zastosowaniem pulsacyjnego prądu elektrycznego w technologii żywności prowadził niemiecki inżynier Doevenspeck, który w 1960 r. opatentował metodę wykorzystującą fale elektryczne o wysokim napięciu do dezintegracji komórek materiału żywnościowego w celu separacji poszczególnych faz [26].

Pilotowe systemy ELCRACK[®] i ELSTRIL[®], zaproponowane przez Krupp Maschinenteknik już w 1986 r., wykorzystywały pulsacyjne pole elektryczne do sterylizacji żywności oraz ekstrakcji olejów i tłuszczów jadalnych [27]. Mimo że nad zastosowaniem pulsacyjnego pola elektrycznego w przetwórstwie spożywczym pracuje około 20 grup badawczych [27], to jego wykorzystanie w skali przemysłowej wciąż ogranicza się do jednej stacji utrwalającej sok owocowy. Sok ten sprzedawany jest w Portland w stanie Oregon w USA [10].

Mechanizm elektropermeabilizacji i wpływ pola elektrycznego na komórki

Istotą zastosowania fal elektrycznych o wysokiej amplitudzie napięcia jest plazmoliza indukowana działaniem pola elektrycznego (elektroplazmoliza). Mechanizm tego zjawiska nie został jeszcze dobrze wyjaśniony, w związku z czym przyjęto określać je mianem elektropermeabilizacji [16]. Istnieje wiele teorii tłumaczących zmiany, które zachodzą w plazmolemmie pod wpływem pulsacyjnego pola elektrycznego [11]. Obecnie najbardziej popularnym i najszerzej akceptowanym wyjaśnieniem tego zjawiska jest elektroporacja błony komórkowej, czyli powstawanie lub wzrost natywnych, już istniejących porów membranowych. Komórka biologiczna zachowuje się w sposób podobny do kondensatora z niską wartością stałej dielektrycznej. W związku z tym,

gdy zostanie ona umieszczona w obszarze działania pola elektrycznego, jony znajdujące się wewnątrz oraz na zewnątrz komórki zaczną poruszać się zgodnie z kierunkiem przyłożonego pola elektrycznego. W konsekwencji prowadzi to do akumulacji wolnych, naładowanych przeciwnie ładunków elektrycznych po obu stronach błony komórkowej. Te ładunki mogą oddziaływać na siebie wzajemnie i powodują lokalne wzrosty ciśnienia, co prowadzi do zmian grubości błony komórkowej, a w konsekwencji do przzerwania jej ciągłości [16, 29]. W zależności od zastosowanych parametrów elektropermeabilizacja może mieć charakter odwracalny lub nieodwracalny. Nieodwracalna elektroporacja zachodzi, gdy naturalny potencjał membranowy komórki w wyniku aplikowanego pola elektrycznego wzrośnie powyżej naturalnej, krytycznej wartości, wynoszącej około 1V. W takim przypadku dochodzi do przzerwania ciągłości błony komórkowej, w wyniku czego komórka nie jest w stanie prowadzić normalnych funkcji życiowych (rys. 1).



Objaśnienia: / Explanatory notes:

E – aplikowane natężenie pola elektrycznego / applied electric field strength; E_c – krytyczne natężenie pola elektrycznego / critical electric field strength.

Rys. 1. Schematyczne przedstawienie wpływu pola elektrycznego na komórki.

Fig. 1. Schematic representation of impact of pulsed electric field on cells.

Źródło / Source: opracowanie własne na podstawie / the authors own study based on [26].

Uszkodzona błona komórkowa jest w większym stopniu przepuszczalna dla małych cząsteczek, co ułatwia wyrównanie ciśnienia osmotycznego pomiędzy środowiskiem zewnętrznym a zawartością komórki. Może to powodować jej pęcznienie

i ewentualne zniszczenie struktury komórkowej. Napięcie krytyczne zależy od wielkości komórki. Im jest ona mniejsza, tym większe napięcie krytyczne należy zastosować. Komórki owoców i warzyw mają większe rozmiary od komórek mikroorganizmów, więc krytyczny potencjał, powodujący ich permeabilizację, jest osiągany przy niższych natężeniach pola elektrycznego. Przykładowo, optymalna przepuszczalność membran papryki, określana wielkością pola powierzchni powstałych porów, jest osiągana przy natężeniu 1,5 - 3,0 kV/cm i przy zastosowaniu od 10 do 30 impulsów [2]. Natomiast natężenie niezbędne do inaktywacji drobnoustrojów wynosi 12 - 50 kV/cm [11, 21].

Częstotliwość aplikowanego pola elektrycznego mieści się w przedziale 1 – 1000 Hz. Zdarzają się jednak procesy, w których może ona wynosić ponad 1000 Hz [5].

Liczba impulsów również zależy od charakterystyki stosowanego urządzenia, cech surowca oraz celu procesu. Tedjo [25] wykazał, że największy efekt elektropermeabilizacji w przypadku winogron występuje przy aplikacji do 20 impulsów. Aplikacja ponad 20 impulsów zwiększa stopień permeabilizacji błony, jednak w znacznie mniejszym stopniu. Identyczne wnioski wysunęli Knorr i Angersbach [14]. Z kolei Rastogi i wsp. [21] oraz Ade-Omowaye i wsp. [2] nie stwierdzili korelacji pomiędzy wzrostem aplikowanych pulsów a zwiększeniem ubytku wody z jabłek podczas odwadniania osmotycznego.

Czas prowadzenia procesu, podobnie jak inne parametry, w dużej mierze zależy od założonego celu, właściwości materiału oraz stosowanego urządzenia. Bazhal i wsp. [7] udowodnili, że dłuższy czas aplikacji pulsacyjnego pola elektrycznego powodował większy stopień elektropermeabilizacji komórek jabłka.

Zniszczenie naturalnej struktury błony komórkowej (perforacja) ułatwia przebieg dyfuzji wody i składników w niej rozpuszczonych. Zmniejsza to opory ruchu masy (powoduje przyspieszenie wielu procesów, np. suszenia czy odwadniania osmotycznego) oraz poprawia warunki ekstrakcji.

Warto wspomnieć także o wpływie pulsacyjnego pola elektrycznego na działanie enzymów występujących w żywności. Zhao i wsp. [28] badali możliwości wykorzystania pulsacyjnego pola elektrycznego do inaktywacji polifenylooksydazy wyekstrahowanej z gruszki (*in vitro*). Maksymalną inaktywację, wynoszącą 95,5 %, stwierdzono w przypadku zastosowania prądu elektrycznego o natężeniu 35 kV/cm przez 1200 μ s w temp. 40 °C.

Ohshima i wsp. [17] również badali wpływ PEF na aktywność termicznie zdenaturowanych białek enzymatycznych. Stwierdzili, że PEF może prowadzić zarówno do inaktywacji enzymów, jak i do refoldingu enzymów zdenaturowanych. Należy zaznaczyć, że charakter zjawisk występujących w białkach po aplikacji PEF zależy od parametrów obróbki oraz od rodzaju enzymu. Przykładowo, aktywność zdenaturowanej peroksydazy wzrosła z 10 do 60 % (w porównaniu z enzymem natywnym niepodda-

nym żadnej obróbce) po aplikacji pulsacyjnego pola elektrycznego o natężeniu 12 kV/cm przez 30 s. W przypadku natywnej peroksydazy, aktywność enzymatyczna próbki poddanej działaniu 17 kV/cm przez 30 s wzrosła do 120 %. Z kolei pulsacyjny prąd elektryczny o natężeniu 23 kV/cm powodował obniżenie jej aktywności enzymatycznej. Podobne wartości uzyskano w przypadku natywnej β -galaktozydazy (13 kV/cm przez 30 s). Jak wspomniano, kierunek zjawisk występujących w białkach enzymatycznych indukowanych przez PEF zależy także od rodzaju enzymu. W przypadku dehydrogenazy mleczanowej (LDH) zaobserwowano, że aktywność enzymatyczna denaturowanego enzymu po obróbce PEF jest niższa od aktywności próbki, w której refolding wystąpił spontanicznie. Ogólnie należy stwierdzić, że działanie PEF może powodować pewne zmiany w konformacji, które wpływają na podwyższenie lub obniżenie aktywności enzymatycznej, w zależności od zastosowanych parametrów.

Rozwiązania konstrukcyjne aparatów służących do aplikacji pulsacyjnego pola elektrycznego

W ciągu ostatnich lat zaprezentowano wiele rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń wykorzystujących fale elektryczne o wysokiej amplitudzie napięcia do dezintegracji komórek żywności (elektroplazmolizery). Zasadniczo elektroplazmolizery składają się z następujących części składowych: generator pulsacyjnego pola elektrycznego, bateria kondensatorów, elektrody, komora obróbki elektrycznej [16]. Wymienione elementy stanowią podstawę działania aparatów do aplikacji pulsacyjnego pola elektrycznego. Oprócz nich w urządzeniach tego typu instaluje się również części, których zadaniem jest sterowanie oraz kontrolowanie procesu. W tej grupie należy wymienić: termopary, czujniki kontroli napięcia oraz natężenia, oscyloskopy, cyfrowe urządzenia rejestrujące [15]. Ważną częścią jest również oprogramowanie urządzeń gromadzących i rejestrujących dane, które powinno być niezawodne i łatwe w obsłudze. Najczęściej konstruuje się układy wytwarzające i aplikujące pulsy przemiennego prądu elektrycznego o prostokątnym sygnale fali elektrycznej. W porównaniu z układem generującym fale o sygnale wykładniczym, układ ten ma więcej kondensatorów oraz induktory, co oczywiście zwiększa koszty inwestycyjne. W literaturze stwierdza się jednak, że fale o takim kształcie wykazują lepszy efekt dezintegracyjny [16].

Pierwsze schematyczne propozycje budowy urządzeń wykorzystujących przemienny, pulsacyjny prąd elektryczny zaproponował i opatentował Doevenspack [26]. Zasugerował, aby elektrody umieszczone były odpowiednio w wale mieszadła oraz w ściankach zbiornika lub w przenośniku ślimakowym, w którym jedną z elektrod stanowiłaby oś wału, a drugą byłyby ściany przenośnika. Innym przykładem może być elektroplazmolizer o budowie rolkowej. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest połączenie wstępnej obróbki elektrycznej z obróbką mechaniczną [16].

Wpływ pulsacyjnego pola elektrycznego na przebieg wybranych operacji jednostkowych

Ekstrakcja i tłoczenie

Pulsacyjne pole elektryczne używane jest w szeroko rozumianych procesach ekstrakcji, np. jako zabieg wspomagający tłoczenie soku. Praporscic i wsp. [18] badali wpływ PEF na pozyskiwanie soku jabłkowego oraz marchwiowego. Wykazali, że działanie pulsacyjnego pola elektrycznego podwyższa wydajność tłoczenia oraz wpływa na cechy jakościowe otrzymanych produktów. Soki otrzymane poprzez tłoczenie wspomagane polem elektrycznym charakteryzowały się większą klarownością oraz większą zawartością suchej masy w porównaniu z produktami otrzymanymi metodą tradycyjną. Podobne wyniki otrzymali Bazhal i wsp. [6]. Udowodnili, że aplikacja PEF prowadzi do zwiększenia wydajności procesu tłoczenia soku jabłkowego oraz zmienia właściwości optyczne (absorbancję i transmitancję) produktów. Zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego przed tłoczeniem soku z buraka cukrowego spowodowało wzrost wydajności soku o 18 - 28 %, tym większy im większe było ciśnienie procesu [9].

Interesującym przykładem jest zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego do produkcji wina. Na etapie maceracji oraz fermentacji związki fenolowe obecne w skórce i nasionach owoców winorośli są ekstrahowane do moszczu. Odgrywają one szczególną rolę w kształtowaniu właściwości sensorycznych, takich jak: barwa, cierpkość czy kwasowość wina. Związki fenolowe, z uwagi na wysoką zdolność przeciwutleniającą, odpowiedzialne są również za właściwości prozdrowotne wina. Pulsacyjne pole elektryczne, aplikowane przed etapem maceracji i fermentacji, zwiększa wydajność ekstrakcji tych związków, przez co umożliwia nie tylko jej skrócenie, ale także otrzymanie produktów o zwiększonej zawartości cennych żywieniowo składników [19]. Puertolas i wsp. [20] stwierdzili, że działanie PEF o natężeniu 2 oraz 5 kV/cm zwiększa stężenie antocyjanów w moszczu w porównaniu z próbkami niepotraktowanymi PEF i umożliwia również skrócenie etapu maceracji. Maksymalne stężenie antocyjanów w próbce kontrolnej wynosiło 1216 mg/dm³ i zostało osiągnięte po 96 h maceracji. W próbce potraktowanej wstępnie PEF stężenie to osiągnięto po 50 h procesu.

Zamrażanie

Jakość żywności mrożonej w dużym stopniu zależy od czasu zamrażania, a więc od wielkości kryształów lodu oraz od ich położenia wewnątrz produktu. We wszystkich technikach zamrażania dąży się do tego, aby skracać czas wymrażania wody w żywności i zmniejszać rozmiary powstających kryształów lodu. Ben Ammar i wsp. [8] badali wpływ pulsacyjnego pola elektrycznego na przebieg owiewowego zamrażania ziemniaka (-80 °C, 2 m/s). Efektem ich pracy było stwierdzenie, że próbka wstępnie potraktowana polem elektrycznym (0,4 kV/cm) charakteryzowała się krótszym

efektywnym czasem zamrażania niż próbka kontrolna. Również Jalte i wsp. [13] prowadzili badania nad wpływem PEF na zamrażanie ziemniaka owiewem powietrza (-35 °C, 2 m/s). Stwierdzili istotną zależność pomiędzy stopniem dezintegracji a efektywnym czasem zamrażania. Wzrostowi elektroporacji błony komórkowej towarzyszyło skrócenie czasu mrożenia, a przy maksymalnej dezintegracji komórek uzyskano ponad 40 % oszczędność czasu. Warto również zauważyć, że mikrofotografie SEM rozmrożonych ziemniaków udowodniły, że PEF powoduje istotne zmiany w strukturze (duże nieuporządkowanie, duże puste wewnątrzkomórkowe przestrzenie).

Wpływ pulsacyjnego pola elektrycznego na przebieg suszenia i odwadniania osmotycznego

W wyniku usuwania wody otrzymuje się produkt mikrobiologicznie stabilny o możliwie długim okresie przydatności do spożycia. W ciągu ostatnich lat przedstawiono wiele nowych metod usprawniających, optymalizujących lub eliminujących niektóre wady suszenia. Wśród nich można wyróżnić różne zabiegi wstępne, np. odwadnianie osmotyczne, moczenie, zamrażanie czy powlekanie jadalnymi błonami. Jak wspomniano, można także zastosować jako operację wstępną przed suszeniem fale elektryczne o wysokiej amplitudzie napięcia. Jest to technika, która dzięki swoim zaletom, takim jak: możliwość aplikacji w procesach ciągłych, krótki czas obróbki elektrycznej i relatywnie niska energochłonność, zdaje się być bardzo dobrą alternatywą metod termicznych.

Lebovka i wsp. [15] badali wpływ pulsacyjnego pola elektrycznego oraz zamrożenia próbki przed procesem na przebieg suszenia konwekcyjnego ziemniaka. Wykazali, że zarówno zamrożenie tkanki, jak i aplikacja PEF powodowała skrócenie czasu suszenia. Szybkość uzyskiwania równowagowej zawartości wody zwiększała się wraz ze stopniem dezintegracji komórek. Tłumaczyć to można uwolnieniem treści wewnątrzkomórkowej w wyniku indukowanej działaniem pola elektrycznego o wysokim napięciu perforacji plazmolemmy. Należy jednak zaznaczyć, że w tym przypadku aplikacja PEF nie zwiększyła szybkości suszenia bardziej niż zamrażanie. Można więc przypuszczać, że obydwa procesy spowodowały podobną dezintegrację komórek ziemniaka. Eksperyment wykazał również, że czas uzyskiwania temperatury medium suszącego (60 °C) w środku geometrycznym był krótszy o około 20 % w przypadku próbek, w których stosowano wstępną obróbkę polem elektrycznym o natężeniu $E = 0,4 \text{ kV/cm}$ w ciągu $t_{\text{PEF}} = 0,5 \text{ s}$, w porównaniu z materiałem niepodanym działaniu PEF. Toepfl [26] otrzymał podobne wyniki. Wykazał, że czas suszenia ziemniaka wstępnie potraktowanego pulsacyjnym polem elektrycznym był krótszy o ok. 20 % niż w przypadku próbek odniesienia.

Gachovska i wsp. [12], badając wpływ pulsacyjnego pola elektrycznego oraz blanszowania na suszenie konwekcyjne marchwi, stwierdzili, że obydwie metody ob-

róbki wstępnej wpływają na zwiększenie szybkości suszenia w porównaniu z próbkami niepoddanymi żadnej obróbce wstępnej. Bezwymiarowa zawartość wody po 8 h suszenia była statystycznie różna i wynosiła 0,32; 0,25; 0,22 i 0,18 odpowiednio w przypadku próbek surowych, blanszowanych, poddanych działaniu PEF o natężeniu $E = 1 \text{ kV/cm}$ i $E = 1,5 \text{ kV/cm}$. Czas suszenia (do uzyskania stałej masy 4 g/kg) marchwi potraktowanej wstępnie PEF oraz blanszowanej był o 3 h krótszy od czasu suszenia próbek surowych.

Do podobnych wniosków doszli Amami i wsp. [4], którzy określali wpływ wstępnego odwadniania osmotycznego wspomaganego PEF ($E = 0,6 \text{ kV/cm}$) na przebieg suszenia konwekcyjnego marchwi. Stwierdzili, że obróbka wstępna PEF skróciła czas suszenia ($60 \text{ }^\circ\text{C}$) do wilgotności $0,1 \text{ g/g s.s.}$ o ok. 20 %. Warto podkreślić, że również odwadnianie osmotyczne wspomaganie pulsacyjnym polem elektrycznym skracало czas suszenia do 70 min. Czas ekspozycji materiału na wysoką temperaturę, dzięki kombinowanej obróbce wstępnej, uległ skróceniu aż o 81 %, w porównaniu z materiałem niepoddanym żadnym zabiegom wstępnym.

Aplikacja pola elektrycznego o wysokiej amplitudzie napięcia, z uwagi na zwiększenie szybkości i skrócenie czasu suszenia, pozwala także na modyfikację współczynnika dyfuzji wody. W tab. 1. przedstawiono takie współczynniki podczas suszenia konwekcyjnego tkanek roślinnych poddanych wstępnemu dezintegrowaniu PEF i niepoddawanych żadnej obróbce. Zwiększone współczynniki dyfuzji wody w materiałach poddanych działaniu PEF umożliwiają zastosowanie mniejszej temperatury suszenia. Przykładowo, obróbka wstępna polem elektrycznym pozwala obniżyć temperaturę suszenia buraka ćwikłowego o $20 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$ [23] i ziemniaka o $20 \text{ }^\circ\text{C}$ [15].

Tabela 1

Wartość współczynnika dyfuzji wody podczas suszenia różnych materiałów poddanych i niepoddanych działaniu PEF.

Value of water diffusion coefficient while drying various PEF-treated and untreated materials.

Materiał Material	$D \cdot 10^9 \text{ [m}^2\text{/s]}$		Natężenie pola elektrycznego Electric field strength [kV/cm]	Źródło Source
	bez obróbki untreated	PEF		
Marchew Carrot	0,3 – 0,93	0,4 – 1,17	0,6	[4]
Papryka czerwona Red bell pepper	1,10	1,51 – 1,58	2	[1]
Burak ćwikłowy Red beet	3,0	4,0	0,4	[23]
Ziemniak / Potato	5,5	8,5	0,5	[15]

Zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego, jako zabiegu wstępnego przed suszeniem, może powodować także modyfikację właściwości suszu. Shynkaryk i wsp. [23], badając wpływ pulsacyjnego pola elektrycznego na przebieg rehydracji buraka ćwikłowego, stwierdzili, że w przypadku tkanki niepoddanej żadnej obróbce wstępnej następuje szybsze uwalnianie składników jonowych podczas rehydracji. Taką sytuację autorzy tłumaczą zmianami strukturalnymi tkanki poddanej działaniu prądu elektrycznego, czego konsekwencją jest większy skurcz suszarniczy, który ogranicza możliwość wymiany związków rozpuszczalnych w wodzie pomiędzy produktem a cieczą. Podobne zależności uzyskali Taiwo i wsp. [24], według których wzrost masy suszonych plasterów jabłek poddanych wstępnie działaniu PEF podczas ich uwadniania był mniejszy niż próbek kontrolnych, niezależnie od zastosowanej temperatury rehydracji.

Według innych badań, współczynnik rehydracji marchwi suszonej konwekcyjnie, wyrażony jako stosunek masy wody wchłoniętej przez produkt podczas rehydracji do masy wody usuniętej z produktu podczas suszenia, był praktycznie taki sam w przypadku próbek poddanych obróbce wstępnej polem elektrycznym oraz próbek kontrolnych i wynosił po 6 h procesu około 0,8 [12].

Podsumowanie

Zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego do wspomagania procesów technologicznych wydaje się być techniką o dużym potencjale, stanowiącą bardzo dobrą alternatywę metod termicznych. Aplikacja PEF pozwala skrócić czas niektórych operacji, np. suszenia, więcej niż o 20 % oraz obniżyć temperaturę medium suszącego, co korzystnie wpływa na energochłonność procesu oraz jakość produktu. Mimo wielu zalet istnieją jednak pewne bariery (przekonanie konsumentów do nowej technologii, relatywnie wysokie koszty inwestycyjne czy dostępność przemysłowych systemów generujących pulsacyjne pole elektryczne) ograniczające wprowadzenie tej metody na skalę przemysłową. Niemniej jednak wiedza zawarta w dostępnej literaturze wskazuje na celowość prowadzenia badań nad zastosowaniem pulsacyjnego pola elektrycznego, jako zabiegu wstępnego przed różnymi procesami jednostkowymi stosowanymi w przetwórstwie żywności.

Literatura

- [1] Ade-Omowaye B.I.O., Talens P., Angersbach A., Knorr D.: Kinetics of osmotic dehydration of red bell peppers as influenced by pulsed electric field pretreatment. *Food Res. Int.*, 2003, **36**, 475-483.
- [2] Ade-Omowaye B.I.O., Rastogi N.K., Angersbach A., Knorr D.: Combined effect of pulsed electric field pre-treatment and partial osmotic dehydration on air drying behaviour of red bell pepper. *J. Food Eng.*, 2003, **60**, 89-98.
- [3] Aguilera J.M., Chiralt A., Fito P.: Food dehydration and product structure. *Trends Food Sci. Technol.*, 2003, **14(10)**, 432-437.

- [4] Amami E., Khezami L., Vorobiev E., Kechaou N.: Effect of pulsed electric field and osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of carrot tissue. *Drying Technol.*, 2008, **26**, 231-238.
- [5] Angersbach A., Heinz V., Knorr D.: Effect of pulsed electric fields on cell membranes in real food systems. *Innovative Food Scie. Emerg. Technol.*, 2000, **1**, 135-149.
- [6] Bazhal M.I., Lebovka N.I., Vorobiev E.: Pulsed electric field treatment of apple tissue during compression for juice extraction. *J. Food Eng.*, 2001, **50**, 129-139.
- [7] Bazhal M., Lebovka N., Vorobiev E.: Optimisation of pulsed electric field strength for electroporation of vegetable tissues. *Biosystems Eng.*, 2003, **86**, 339-345.
- [8] Ben Ammar J., Lanoisellé J-L., Lebovka N., Vorobiev E.: Effect of a Pulsed Electric Field and Osmotic Treatment on freezing of potato tissue. *Food Biophys.*, 2010, **5**, 247-254.
- [9] Bouzrara H., Vorobiev E.: Beet juice extraction by pressing and pulsed electric field. *Int. Sugar J.*, 2000, **102 (1216)**, 194-200.
- [10] Clark J.P.: Pulsed electric field processing. *Food Technol.*, 2006, **1 (60)**, 66-67
- [11] Fellows P.J.: *Food Processing Technology – Principles and Practice*. Woodhead Publishing Ltd., Abington 2000.
- [12] Gachovska T.K., Simpson M.V., Ngadi M.O., Raghavan G.S.V. Pulsed electric field treatment of carrots before drying and rehydration. *J. Sci. Food Agric.*, 2009, **89 (14)**, 2372-2376.
- [13] Jalté M., Lanoisellé J-L., Lebovka N., Vorobiev E.: Freezing of potato tissue pre-treated by pulsed electric fields. *LWT Food Sci. Technol.*, 2009, **42**, 576-580.
- [14] Knorr D., Angersbach A.: Impact of high intensity electric field pulses on plant membrane permeabilisation. *Trends Food Sci. Technol.*, 1998, **9**, 185-191.
- [15] Lebovka N.I., Shynkaryk N.V., Vorobiev E.: Pulsed electric field enhanced drying of potato tissue. *J. Food Eng.*, 2007, **78**, 606-613.
- [16] Ngadi M.O., Bazhal M.I., Raghavan G.S.V.: Engineering aspects of pulsed electroporation of vegetable tissues. *Agricultural Engineering International: the CIGR J. Scient. Res. Devel.*, 2003, **5**, 1-10.
- [17] Ohshima T., Tamura T., Sato M.: Influence of pulsed electric field on various enzyme activities. *J. Electrostat.*, 2007, **65**, 156-161.
- [18] Praporscic I., Shynkaryk M.V., Lebovka N., I., Vorobiev E.: Analysis of juice colour and dry matter content during pulsed electric field enhanced expression of soft plant tissues. *J. Food Eng.*, 2007, **79**, 662-670.
- [19] Puertolas E., Lopez N., Condon S., Alvarez I., Raso J.: Potential of PEF to improve red wine quality. *Trends Food Sci. Technol.*, 2010, **21**, 247-255.
- [20] Puertolas E., Lopez N., Saldana G., Alvarez I., Raso J.: Evaluation of phenolic extraction during fermentation of red grapes treated by a continuous pulsed electric fields process at pilot-plant scale. *J. Food Eng.*, 2010, **98**, 120-125.
- [21] Rastogi N.K., Eshtiaghi M.N., Knorr D.: Accelerated mass transfer during osmotic dehydration of high intensity electrical field pulse pretreated carrots. *J. Food Sci.*, 1999, **64**, 1020-1023.
- [22] Shin J.K., Lee S.J., Cho H.Y., Pyun Y.R., Lee J.H., Chung M.S.: Germination and subsequent inactivation of bacillus subtilis spores by pulsed electric field treatment. *J. Food Process. Preserv.*, 2010, **43**, 43-54.
- [23] Shynkaryk M.V., Lebovka N.I., Vorobiev E.: Pulsed electric field and temperature effects on drying and rehydration of red beetroots. *Drying Technol.*, 2008, **26**, 696-704.
- [24] Taiwo K.A., Angersbach A., Ade-Omonowaya B.I.O., Knorr D.: Effects of pretreatments on the diffusion kinetics and some quality parameters of osmotically dehydrated apple slices. *J. Agric. Food. Chem.*, 2001, **49**, 2804-2811.

- [25] Tedjo W.: Untersuchungen zum einatz von nichtthermischen zellmembranpermeabilisierungsmethoden beeinflussung des massentransport pflanzlichen lebensmitteln. Praca doktorska, Technischen Universität, Berlin 2003.
- [26] Toepfl S.: Pulsed Electric Fields (PEF) for Permeabilization of cell membranes in food- and bioprocessing – applications, process and equipment design and cost analysis. Praca doktorska. Technischen Universität, Berlin 2006.
- [27] Toepfl S., Volker H., Knorr D.: Application of pulsed electric fields in liquid processing. Proc. Conf.: Processing Developments for Liquids, EFFoST, Kolonia 2006.
- [28] Zhao W., Yang R., Xiao H., Zhang W., Tang Y., Chen T.: Inactivation of polyphenoloxidase of pear by Pulsed Electric Fields. *Int. J. Food Eng.*, 2010, **6 (3)**, 1-15.
- [29] Zimmerman U.: Electric breakdown, electropemeabilization and electrofision. *Rev. Physiol., Biochem. Pharmacol.*, 1986, **105**, 196-256.

APPLYING PULSED ELECTRIC FIELD TO ENHANCE PLANT TISSUE DEHYDRATION PROCESS

S u m m a r y

Drying is classified as one of the most commonly used unit operations in food technology. Its main purpose is to preserve food, and this is connected with reducing the growth of micro-organisms and with inhibiting enzymatic and non-enzymatic reactions. That process is limited mainly by internal resistances to water movement that are a consequence of the cellular structure of material being dried. The increasing requirements of both the consumers demanding high quality products and the manufacturers, who look for cost-effective solutions, are the reasons why alternative methods are sought to replace thermal methods of food pre-treatment prior to the drying process. One of the most promising pre-treatment techniques is the application of high voltage electric pulses, known as pulse electric fields (PEF). A high voltage, varying electric field applied as a pre-treatment prior to the main treatment process was found to have a particularly significant effect in the case of operations determined by mass-transfer resistance inside the material, for instance, during extraction, pressing, and, especially, during osmotic dehydration and drying.

Key words: pulsed electric field, PEF, drying, osmotic dehydration, pre-treatment ☒