

WPŁYW SONIKACJI IMMERSYJNEJ I KONTAKTOWEJ ORAZ PULSACYJNEGO POŁA ELEKTRYCZNEGO NA PRZEWODNOŚĆ ELEKTRYCZNĄ TKANKI MARCHWI*

Artur Wiktor¹, Katarzyna Rybak¹, Magdalena Śledź¹, Małgorzata Nowacka¹, Ewa Gondek¹, 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 wpływu sonikacji (US) immersyjnej i kontaktowej oraz obróbki pulsacyjnym polem elektrycznym (PEF) na przewodność elektryczną. Określono także zawartość suchej substancji w materiale poddanym obróbce US oraz PEF. W przypadku obróbki pulsacyjnym polem elektrycznym natężenie pola elektrycznego wynosiło 0,3 lub 5 kV·cm⁻¹, liczba impulsów 0–100, a właściwe zużycie energii 0–80 kJ·kg⁻¹. Aplikacja pulsacyjnego pola elektrycznego prowadzi do wzrostu przewodności elektrycznej analizowanej tkanki roślinnej. Największy wzrost tego parametru zanotowano w przypadku zastosowania natężenia 3 kV·cm⁻¹ oraz aplikacji 100 impulsów. Obróbka tkanki marchwi pulsacyjnym polem elektrycznym skutkowała także wzrostem zawartości suchej substancji w porównaniu z materiałem niepotraktowanym PEF, co wiązało się z wyciekaniem wody z materiału w wyniku elektroporacji. Z kolei wpływ sonikacji na przewodność elektryczną oraz zawartość suchej substancji był niejednoznaczny i prowadził, w zależności od zastosowanych parametrów, do wzrostu lub obniżenia wartości tych parametrów. W tym przypadku, na ogół, największe zmiany zanotowano w próbkach poddanych obróbce kontaktowej.

Słowa kluczowe: pulsacyjne pole elektryczne, sonikacja immersyjna, sonikacja kontaktowa, marchew, przewodność elektryczna

*Badania zrealizowane jako część projektu pt. „Zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego oraz kombinowanej metody z wykorzystaniem pulsacyjnego pola elektrycznego oraz ultradźwięków do wspomaganie procesu suszenia tkanki roślinnej” (LIDER/017/497/L-4/12/NCBR/2013) w ramach programu LIDER finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

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

WSTĘP

Pulsacyjne pole elektryczne (PEF), wysokie ciśnienie hydrostatyczne (HHP) oraz ultradźwięki (US) należą do jednych z najbardziej obiecujących, niekonwencjonalnych technologii przetwarzania żywności [Marszałek i Mitek 2012, Witrowa-Rajchert 2012a, Tao i Sun 2015]. Badania naukowe, dotyczące zwłaszcza ultradźwięków oraz pulsacyjnego pola elektrycznego, wskazują, że możliwe jest ich wykorzystanie zarówno w procesach mających na celu utrwalenie produktów spożywczych, jak i w celu wspomagania procesów opartych na wymianie masy i/lub ciepła, np. zamrażaniu, suszeniu czy odwadnianiu osmotycznym [Toepfl i in. 2007, Witrowa-Rajchert 2012b]. Mechanizm wpływu ultradźwięków na systemy biologiczne jest inny niż w przypadku oddziaływania pulsacyjnego pola elektrycznego. Aplikacja PEF prowadzi do elektroporacji materiału, czyli elektrycznie indukowanej (odwracalnej lub nieodwracalnej) perforacji błony komórkowej [Mahnič-Kalamiza i in. 2014]. W przypadku sonikacji mechanizm przyjęto określać jako tzw. efekt gąbki (ang. sponge effect), polegający na serii kompresji i dekompresji materiału, następujących bezpośrednio po sobie [Fernandes i in. 2008]. Aplikacja US w przypadku płynów prowadzi także do zjawiska kawitacji, w związku z tym implodujące pęcherzyki mogą prowadzić do uszkodzeń natywnej budowy komórkowej [Knorr i in. 2004].

Przewodność elektryczna materiału decyduje o przebiegu aplikacji pulsacyjnego pola elektrycznego czy ogrzewania oporowego (ohmowego). Na podstawie wartości przewodności elektrycznej (lub jej pochodnych, np. stopnia dezintegracji komórkowej) ocenia się także efektywność oddziaływania pulsacyjnego pola elektrycznego na tkankę roślinną [Lebovka i in. 2000]. Wiąże się to ze wzrostem wartości tego parametru, wskutek elektroporacji błony komórkowej, i uwolnieniu do międzykomórkowej przestrzeni treści wewnątrzkomórkowej. W związku z tym analiza otrzymanych wartości przewodności elektrycznej pozwala także w sposób pośredni dokonać oceny zmian strukturalnych materiału związanych z aplikacją PEF. Z kolei liczba doniesień naukowych, dotyczących wpływu sonikacji na wartość przewodności elektrycznej tkanki roślinnej, jest niewielka i dotyczy głównie zmian tego parametru w medium (np. woda), w którym prowadzono obróbkę ultradźwiękową.

Celem badań była analiza wpływu pulsacyjnego pola elektrycznego, sonikacji immersyjnej (w wodzie), jak również sonikacji kontaktowej na przewodność elektryczną właściwą tkanki marchwi.

MATERIAŁ I METODY

W badaniach wykorzystano marchew (var. Baltimore), zakupioną w lokalnym supermarkecie (Warszawa). Do badań wybrano materiał zdrowy, cały, charakteryzujący się podobnymi wymiarami oraz zbliżonym stopniem dojrzałości. Przed każdym eksperymentem materiał wyjmowano z komory chłodniczej (4°C), myto oraz rozdrabniano prostopadłe do wzdłużnej osi korzenia, do postaci cylindrów o średnicy $d = 30$ mm i wysokości $h = 10$ mm, używając do tego celu specjalnego noża tnącego.

Proces obróbki pulsacyjnym polem elektrycznym prowadzono w prototypowym reaktorze impulsowym (ERTEC, Wrocław) o maksymalnym napięciu roboczym 30 kV

i pojemności elektrycznej kondensatorów 0,25 μF . Materiał umieszczano wewnątrz celki o średnicy 40 mm i wysokości 16 mm, wykonanej z materiału dielektrycznego (obudowa) oraz dwóch elektrod wykonanych ze stali nierdzewnej. Następnie celkę zalewano wodą wodociągową ($13,6 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) o temperaturze pokojowej ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) i wkładano do komory reakcyjnej urządzenia, tak aby obie elektrody komory (stacjonarna i mobilna) przylegały do elektrod celki. Aparat aplikował impulsy o sygnale wykładniczym z częstotliwością 0,5 Hz. Częstotliwość pracy reaktora wybrano na podstawie wcześniejszych badań, tak aby zminimalizować wzrost temperatury po aplikacji PEF. Podstawowe parametry pracy reaktora impulsowego użyte w eksperymencie zestawiono w tabeli 1. Właściwe zużycie energii (W_s) podczas obróbki elektrycznej obliczono na podstawie poniższej zależności Zhang i innych [2012]:

$$W_s = \frac{(V^2 C n)}{2m} \quad (1)$$

gdzie: C – pojemność elektryczna kondensatora [F],
 V – napięcie elektryczne [V],
 n – liczba impulsów [-],
 m – masa próbki umieszczona w komorze elektrycznej [kg].

Aplikację ultradźwięków prowadzono metodą immersyjną oraz kontaktową. W przypadku sonikacji immersyjnej wykorzystano łącznie wykonane ze stali nierdzewnej (MKD-3, MKD Ultrasonic, Halinów) generujące fale ultradźwiękowe o częstotliwości odpowiednio 21 oraz 40 kHz przy mocy 180 W. Z kolei sonikację kontaktową prowadzono, wykorzystując zestaw składający się z sonotrody pierścieniowej (RIS200, Hielscher, Teltow, Niemcy), sita o średnicy oczek 500 μm (Retsch, Haan, Niemcy) oraz przetwornika ultradźwiękowego (UIS250L, Hielscher, Teltow, Niemcy).

Tabela 1. Parametry pulsacyjnego pola elektrycznego zastosowane w eksperymencie

Table 1. Parameters of PEF treatment and the energy delivered to the sample

Kod próbki Sample code	Natężenie pola elektrycznego Electric field intensity, E [$\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$]	Liczba impulsów Pulse number, n [-]	Właściwe zużycie energii Specific energy intake, W_s [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]
0_0	0	0	0
3_10	3	10	3
3_50	3	50	15
3_100	3	100	30
5_10	5	10	8
5_50	5	50	40
5_100	5	100	80

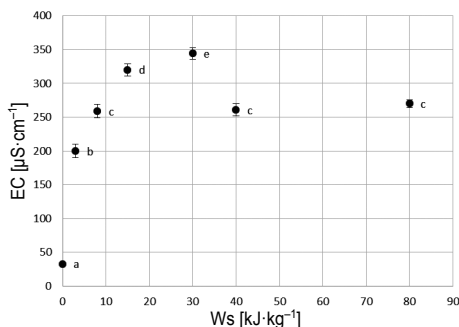
Czas sonikacji w obu zastosowanych metodach wynosił 5, 10, 20 lub 30 min przy 100-procentowym współczynniku wypełnienia (ang. duty cycle) oraz 60 min przy 50-procentowym współczynniku wypełnienia.

Przewodność elektryczną właściwą mierzono bezpośrednio po obróbce PEF lub US, wykorzystując do tego celu konduktometr (CPC-505, Elmetron, Gliwice), wyposażony w platynową, dwuigłową elektrodę własnej konstrukcji. Badanie wykonano w trzech powtórzeniach. Zawartość suchej substancji oznaczono zgodnie z metodyką AOAC 920.15, 2002.

Analiza statystyczna otrzymanych wyników obejmowała wykonanie jednoczynnikowej analizy wariancji (test Tukeya, $\alpha = 0,05$; jednorodność wariancji sprawdzono na podstawie testu Levena). W celu analizy zależności między wybranymi parametrami wykonano analizę korelacji Pearsona.

WYNIKI I DYSKUSJA

Aplikacja pulsacyjnego pola elektrycznego, bez względu na zastosowane parametry, doprowadziła do wzrostu przewodności elektrycznej właściwej tkanki marchwi (rys. 1). Przykładowo, wartość tego parametru w przypadku próbek niepotraktowanych PEF wynosiła $32,67 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, a w przypadku próbek potraktowanych 50 impulsami pola elektrycznego o natężeniu $5 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ wyniosła $260,90 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Oznacza to, że przewodność elektryczna właściwa w tym przypadku wzrosła 8-krotnie. Z kolei największą przewodność elektryczną ($344,43 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) oraz 10,5-krotny wzrost tego parametru stwierdzono w przypadku marchwi poddanej działaniu pola elektrycznego o natężeniu $E = 3 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ i liczbie impulsów $n = 100$. Warto zauważyć, że próbki, do których doprowadzono największą ilość energii ($5_100; 80 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) nie charakteryzowały się największą przewodnością elektryczną. Zjawisko to można wytłumaczyć biologiczną zmiennością materiału poddanego obróbce elektrycznej (której przebieg zależy m.in. od właściwości fizykochemicznych surowca) lub istnieniem optymalnych i charakterystycznych dla każdego surowca parametrów pulsacyjnego pola elektrycznego. Potwierdzeniem tej teorii mogą być wyniki otrzymane przez innych badaczy w odniesieniu do wpływu PEF na przebieg odwadniania osmotycznego jablek [Taiwo i in. 2003] czy marchwi [Rastogi i in. 1999].

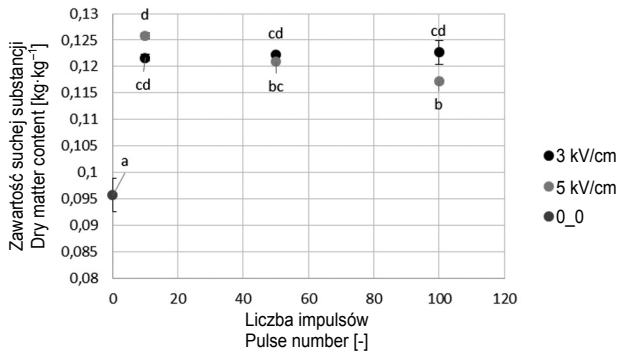


Rys. 1. Wartość przewodności elektrycznej właściwej (EC) w zależności od właściwego zużycia energii (W_s) próbek potraktowanych PEF. Ten sam indeks literowy oznacza brak statystycznie istotnej różnicy

Fig. 1. The relationship between electrical conductivity (EC) and specific energy input (W_s) of PEF treated samples. The same letter indices indicate a lack of statistically significant difference

Wzrost przewodności elektrycznej właściwej pod wpływem pulsacyjnego pola elektrycznego został stwierdzony także w przypadku tkanki jabłka (Lebovka i in. 2001, Wiktor i in. 2011), czerwonej papryki [Ade-Omowaye i in. 2003], ziemniaka [Lebovka i in. 2001, Mhemdi i in. 2013], buraka ćwikłowego [Shynkaryk i in. 2008] oraz lucerny [Gachowska i in. 2009].

Aplikacja pulsacyjnego pola elektrycznego wpłynęła także na zawartość suchej substancji tkanki marchwi (rys. 2). Próbkę poddane działaniu PEF charakteryzowały się większą zawartością suchej substancji niż marchew niepoddana obróbce elektrycznej, przy czym największe różnice (31,45%) zaobserwowano w przypadku marchwi potraktowanej 10 impulsami pola elektrycznego o natężeniu $5 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$. Przyczyny wzrostu zarówno przewodności elektrycznej właściwej, jak i zawartości suchej substancji można upatrywać w zjawisku elektroporacji. Zniszczenie plazmolemy komórek wiąże się z wyciekaniem substancji wewnątrzkomórkowej, zawierającej zarówno substancje potrafiące przewodzić prąd elektryczny, m.in. sole mineralne (co obserwowane było poprzez wzrost przewodności elektrycznej), jak i wodę (co z kolei wiązało się z większą zawartością suchej substancji próbek poddawanych działaniu PEF). Potwierdzeniem tego są także wyniki analizy korelacji Pearsona, która udowodniła statystycznie istotną zależność między przewodnością elektryczną właściwą a zawartością suchej substancji ($r = 0,878$; $R^2 = 0,762$; $p\text{-value} = 0,01$).

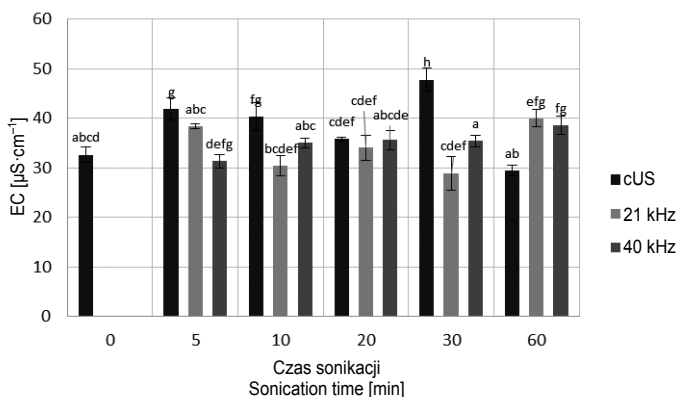


Rys. 2 Zawartość suchej substancji w tkance marchwi w zależności od zastosowanych parametrów PEF. Ten sam indeks literowy oznacza brak statystycznie istotnej różnicy

Fig. 2. Dry matter content of carrot tissue depending on the PEF parameters. The same letter indices indicate a lack of statistically significant difference

Wzrost liczby aplikowanych impulsów w przypadku zastosowania natężenia pola elektrycznego $E = 5 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ wiązał się ze zmniejszeniem zawartości suchej substancji. Przykładowo, zawartość suchej substancji wynosiła 12,58 i 11,72% odpowiednio w przypadku marchwi poddanej działaniu 10 i 100 impulsów ($E = 5 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$). Oznacza to, że wzrost ten wynosił odpowiednio 31,5 oraz 22,5% w stosunku do próbki referencyjnej. Z kolei aplikacja większej ilości impulsów PEF o natężeniu pola elektrycznego $E = 3 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ skutkowała niewielkimi zmianami zawartości suchej substancji wynoszącymi od 12,16 do 12,27%. W tym przypadku wzrost wynosił od 27,1 do 28,2%.

Rysunek 3 przedstawia wpływ obróbki ultradźwiękowej o różnych parametrach na przewodność elektryczną właściwą. Spośród wszystkich analizowanych przypadków próbki poddane sonikacji kontaktowej (ang. duty cycle) charakteryzowały się największymi wartościami przewodności elektrycznej, przy czym największą wartość tego parametru zanotowano w przypadku marchwi poddanej działaniu US metodą kontaktową przez 30 minut. W tym przypadku wzrost przewodności elektrycznej wyniósł 46,3% w porównaniu z próbką kontrolną.



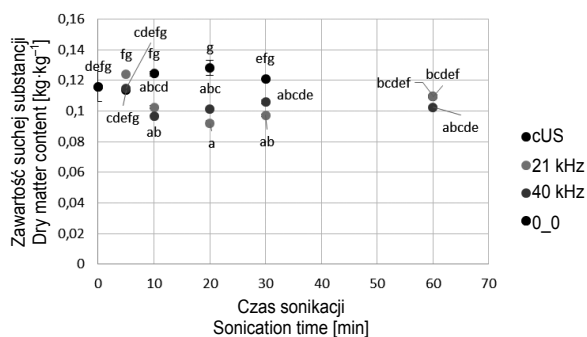
Rys. 3. Wartość przewodności elektrycznej właściwej (EC) w zależności od parametrów sonikacji. Ten sam indeks literowy oznacza brak statystycznie istotnej różnicy

Fig. 3. Electrical conductivity (EC) values depending on the parameters of sonication. The same letter indices indicate a lack of statistically significant difference

Aplikacja ultradźwięków metodą immersyjną nie powodowała na ogół statystycznie istotnych zmian konduktywności elektrycznej. Niemniej jednak, w niektórych przypadkach (np. obróbka przez 30 min falami ultradźwiękowymi o częstotliwości 21 kHz) obserwowano niewielki spadek konduktywności elektrycznej. Z kolei istotne zmiany wartości tego parametru stwierdzono jedynie w przypadku marchwi potraktowanej US przez 60 min (przy 50% współczynnika wypełnienia), bez względu na zastosowaną częstotliwość. Wzrost wartości tego parametru w tym przypadku wyniósł 15,3 i 22,7%, w przypadku łąni pracującej z częstotliwością odpowiednio 40 i 21 kHz. Wydłużenie czasu aplikacji US nie zawsze prowadziło do wzrostu EC. Wy tłumaczenia takiego zjawiska można poszukiwać w teorii zaproponowanej przez Jambraka i innych [2006]. Badacze ci analizowali wpływ immersyjnej obróbki ultradźwiękami na wybrane parametry materiału poddawane obróbce US (pieczarki, kapusta warzywna brukselska oraz kalafior) oraz wody, w której obróbka była realizowana. Stwierdzono, że sonikacja przez 3 minuty przy wykorzystaniu sonotrody trzpieniowej, pracującej z częstotliwością 20 kHz, spowodowała większy przyrost EC wody niż obróbka prowadzona przez 10 min. Z kolei w przypadku aplikacji US przy użyciu łąni ultradźwiękowej (40 kHz) zależność była odwrotna. Takie wyniki tłumaczono możliwością zamykania się porów znajdujących się na powierzchni sonikowanej z określoną częstotliwością tkanki, co ogranicza ruch masy

i wyplukiwanie substancji z wnętrza komórki do otaczającego materiał roztworu. Przywołane wyniki są analogiczne do przedstawionych na rysunku 3. Zastosowanie mniejszej wartości częstotliwości (21 kHz) przez 5 min spowodowało wzrost EC o $5,75 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ w porównaniu z próbką kontrolną. Z kolei wydłużenie tego czasu do 30 min wiązało się ze spadkiem wartości EC o $3,78 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ w odniesieniu do marchwi niepoddanej obróbce US. Podobnie jak w przypadku wyników przedstawionych przez Jambraka i innych [2006], odwrotne zależności zanotowano w przypadku zastosowania większej wartości częstotliwości (41 kHz).

Obróbka tkanki marchwi ultradźwiękami przyczyniła się także do zmiany zawartości suchej substancji (rys. 4), przy czym charakter zmian zależał od metody aplikacji US. Obróbka US metodą kontaktową na ogół prowadziła do wzrostu zawartości suchej substancji. Jedynie w przypadku zastosowania czasu 60 min przy 50-procentowym współczynnikiem wypełnienia zawartość suchej substancji w materiale (10,95%) była niższa (o 5,5%) niż w przypadku próbki odwoławczej (11,59%). Należy jednak zauważyć, że różnica była statystycznie nieistotna. Marchew poddana immersyjnej obróbce US charakteryzowała się na ogół mniejszą zawartością suchej substancji. Przykładowo, sonikacja prowadzona przez 20 min obniżyła zawartość suchej substancji o 12,4 i 20,7% w przypadku łaźni pracującej z częstotliwością odpowiednio 40 i 21 kHz. Spadek zawartości suchej substancji w przypadku tkanki poddanej działaniu US metodą immersyjną można wytłumaczyć przenikaniem substancji rozpuszczalnej w wodzie do medium, w którym obróbka była prowadzona. Z kolei w przypadku metody kontaktowej (próbki otoczone były przez powietrze) woda odparowywała w trakcie aplikacji US. Analogiczne wyniki otrzymali Schössler i inni [2012], badając wpływ kontaktowej aplikacji US na właściwości tkanki ziemniaka. Badacze stwierdzili, że zawartość wody próbek w części kontaktującej się bezpośrednio z powietrzem i poddanych obróbce ultradźwiękowej przez 1 h była mniejsza o 14,4 punktu procentowego w porównaniu z próbką referencyjną. W żadnym z omawianych przypadków nie stwierdzono istotnej korelacji między przewodnością elektryczną a zawartością suchej substancji ($p\text{-value} > 0,05$).



Rys. 4. Zawartość suchej substancji w zależności od parametrów sonikacji. Ten sam indeks literowy oznacza brak statystycznie istotnej różnicy

Fig. 4. Dry matter content depending on the parameters of sonication. The same letter indices indicate a lack of statistically significant difference

WNIOSKI

Aplikacja pulsacyjnego pola elektrycznego prowadzi do wzrostu przewodności elektrycznej właściwej oraz zawartości suchej substancji. Z kolei wpływ ultradźwięków na wartość przewodności elektrycznej oraz zawartość suchej substancji, w porównaniu z działaniem pulsacyjnego pola elektrycznego, nie jest jednoznaczny i zależy od metody aplikacji US. Może prowadzić zarówno do spadku, jak i do wzrostu wartości tych wyróżników. Przedstawione wyniki potwierdzają, że mechanizm wpływu PEF na komórki systemów biologicznych jest odmienny od mechanizmu oddziaływania US, co powinno warunkować odpowiednie wykorzystanie tych metod w celu wspomaganiania procesów i operacji jednostkowych.

LITERATURA

- Ade-Omowaye B.I.O., Talens P., Angersbach A., Knorr D., 2003. Kinetics of osmotic dehydration of red bell peppers as influenced by pulsed electric field pretreatment. *Food Res. Int.* 36, 475–483.
- Amiri Chayjan R., Amiri Parian J., Esna-Ashari M., 2011. Modeling of moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of high moisture corn in a fixed and fluidized bed convective dryer. *Span. J. Agric. Res.* 9, 28–40.
- Fernandes F.A., Gallão M.I., Rodrigues S., 2008. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pretreatment on cell structure: Melon dehydration. *Lwt-Food Sci. Technol.* 41, 604–610.
- Gachovska T.K., Adedeji A.A., Ngadi M.O., 2009. Influence of pulsed electric field energy on the damage degree in alfalfa tissue. *J. Food Eng.* 95, 558–563.
- Jambrak A.R., Mason T.J., Paniwnyk L., Lelas V., 2007. Ultrasonic effect on pH, electric conductivity, and tissue surface of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower. *Czech. J. Food Sci.* 25, 90–100.
- Knorr D., Zenker M., Heinz V., Lee D.U., 2004. Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends Food Sci. Tech.* 15, 261–266.
- Lebovka N.I., Bazhal M.I., Vorobiev E., 2000. Simulation and experimental investigation of food material breakage using pulsed electric field treatment. *J. Food Eng.* 44, 213–223.
- Lebovka N.I., Bazhal M.I., Vorobiev E., 2001. Pulsed electric field breakage of cellular tissues: visualisation of percolative properties. *Innov. Food Sci. Emerg.* 2, 113–125.
- Mahnič-Kalamiza S., Vorobiev E., Miklavčič D., 2014. Electroporation in Food Processing and Biorefinery. *J. Membr. Biol.* 247, 1279–1304.
- Marszałek K., Mitek M., 2012. Wpływ parametrów procesu ciśnieniowania na pojemność przeciwnielającą purée truskawkowego utrwalonego metodą UHP. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 571, 79–85.
- Mhemdi H., Grimi N., Bals O., Lebovka N.I., Vorobiev E., 2013. Effect of apparent density of sliced food particles on the efficiency of pulsed electric field treatment. *Innov. Food Sci. Emerg.* 18, 115–119.
- Rastogi N.K., Eshtiaghi M.N., Knorr D., 1999. Accelerated mass transfer during osmotic dehydration of high intensity electrical field pulse pretreated carrots. *J. Food Sci.* 64: 1020–1023.
- Schössler K., Thomas T., Knorr D., 2012. Modification of cell structure and mass transfer in potato tissue by contact ultrasound. *Food Res. Int.* 49, 425–431.

- Shynkaryk M.V., Lebovka N.I., Vorobiev E., 2008. Pulsed electric field and temperature effects on drying and rehydration of red beetroots. *Drying Technol.* 26, 696–704.
- Taiwo K.A., Angersbach A., Knorr D., 2003. Effects of pulsed electric field on quality factors and mass transfer during osmotic dehydration of apples. *J. Food Process Eng.* 26, 31–48.
- Tao Y., Sun D.W., 2013. Enhancement of food processes by ultrasound: a review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 55, 570–594.
- Toepfl S., Heinz V., Knorr D., 2007. High intensity pulsed electric fields applied for food preservation. *Chemical engineering and processing: Process intensification* 46, 537–546.
- Wiktor A., Witrowa-Rajchert D., Chudoba T., 2011. Przewodność elektryczna właściwa jako parametr stopnia dezintegracji komórek tkanki miększu jabłka poddanego działaniu pulsacyjnego pola elektrycznego. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 569, 293–300.
- Witrowa-Rajchert D., 2012a. Pulsacyjne pole elektryczne (PEF) – zastosowanie w produkcji żywności projektowanej. *Przemysł Spożywczy* 66(7), 32–34.
- Witrowa-Rajchert D., 2012b. Ultradźwięki w produkcji żywności projektowanej. *Przemysł Spożywczy* 66(11), 41–43.
- Zhang B., Zeng X.A., Sun D.W., Yu S.J., Yang M.F., Ma S., 2012. Effect of Electric Field Treatments on Brandy Aging in Oak Barrels. *Food Bioprocess. Tech.* 7, 1–9.

THE INFLUENCE OF IMMERSION SONICATION, CONTACT SONICATION AND PULSED ELECTRIC FIELD TREATMENT ON THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF CARROT TISSUE

Summary. The aim of this work was to analyze the influence of sonication (US) and pulsed electric field treatment on the electrical conductivity and dry matter content of the carrot tissue. The sonication was performed by contact (26 kHz) and immersion method (21 and 40 kHz). Ultrasounds application lasted 0, 5, 10, 20, 30 min at 100% duty cycle and 60 min at 50% duty cycle. The electric field intensity of PEF was equal to 0, 3 and 5 kV·cm⁻¹, the number of pulses varied from 0 to 100 and the specific energy input from 0 to 80 kJ·kg⁻¹. The application of PEF resulted in the increase of the electrical conductivity (EC) of the plant tissue from 32.67 to 199.67–344.43 μS·cm⁻¹, in the case of intact and PEF treated samples, respectively. The highest value of the electrical conductivity was observed in the material treated by 3 kV·cm⁻¹ and 100 pulses. The PEF treatment caused the increase of dry matter content (from 0.0957 to 0.1172–0.1258 kg·kg⁻¹), which could be linked to the cell membrane rupture and water leakage due to the electroporation phenomenon. However, the increase of pulse number from 10 to 100 at constant (5 kV·cm⁻¹) electric field intensity did not increase the dry matter content. The impact of sonication on the both electrical conductivity and dry matter content was ambiguous. The sonication carried out by immersion method in both frequencies for 0–30 min did not change the electrical conductivity significantly. The statistically relevant differences were stated only in the case of treatment which lasted 60 min at 50% duty cycle. The contact sonication caused the biggest changes of electrical conductivity in comparison to the untreated material. The highest EC was observed in the case of sample sonicated for 30 min (47.80 μS·cm⁻¹). However, in the case of samples treated by contact method for 20 and 60 min the differences in comparison with the intact carrot were irrelevant. Samples treated by immersion method were characterized by lower dry matter content whereas carrot treated by contact method exhibited higher values of dry

matter content in comparison to the intact tissue. Such behavior probably was correlated with the evaporation in the case of contact US-treated samples (surrounded by air during the sonication) and leakage to the water, in the case of immersion US processed material.

Key words: pulsed electric field, immersion sonication, contact sonication, carrot, electrical conductivity