

Małgorzata GÓRAL <sup>1)</sup>, Dariusz GÓRAL <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Katedra Analizy i Oceny Jakości Żywności,  
Wydział Nauk o Żywności i Biotechnologii, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

<sup>2)</sup> Katedra Chłodziwa i Energetyki Przemysłu Spożywczego,  
Wydział Inżynierii Produkcji, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

## Zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego do produkcji żywności wzbogaconej

### Streszczenie

Pulsacyjne pole elektryczne (PEF) jest coraz powszechniej stosowane w badaniach nad rozwojem nowych technologii przemysłu spożywczego. PEF ma zastosowanie m.in. do: wspomagania procesów ekstrakcji, suszenia, zamrażania oraz inaktywacji szkodliwych mikroorganizmów. W pracy dokonano krytycznego przeglądu możliwości zastosowania PEF do: zwiększenia odzysku prozdrowotnych składników żywności, umożliwienia tworzenia przyswajalnych kompleksów żelaza oraz akumulacji pierwiastków w komórkach drożdży.

**Słowa kluczowe:** PEF, żywność wzbogacona, bioakumulacja, drożdże

## Application of pulsed electric field for the production of fortified food

### Summary

Pulsed electric field (PEF) is increasingly being used in research on the development of new technologies of the food industry. PEF is used, among the others, to assist in the extraction, drying, freezing and inactivate harmful microorganisms. Critical review of the possibilities of applications of PEF to increase the recovery of nutrient ingredients of food, to enable the creation of iron complexes and accumulation of elements in yeast cells, have been done in this work.

**Key words:** PEF, fortified food, bioaccumulation, yeast

### Wprowadzenie

Wpływ energii elektrycznej na parametry wzrostu organizmów biologicznych, od wielu lat jest przedmiotem badań naukowych. Ponad sto lat temu zauważono znaczący wpływ energii elektrycznej na przeżywalność mikroorganizmów, a w połowie XX wieku wykorzystano pulsacyjne pole elektryczne w technologii żywności i przetwórstwie surowców rolniczych. Rewolucją w tej dziedzinie było zrozumienie zjawiska elektroporacji (utworzenie w błonie komórkowej hydrofilnych przestrzeni pod wpływem działania pola elektrycznego) prowadzącej do uszkodzenia błon komórkowych.

Pierwsze analizy z zastosowaniem PEF (*Pulsed electric field* – pulsacyjne pole elektryczne), służącego do inaktywacji mikroorganizmów przeprowadzono w 1960 r. Począwszy od roku 1990, zastosowanie PEF w przetwórstwie żywności stało się coraz bardziej popularne (Sitzmann i in., 2016). Obecnie pulsacyjne pole elektryczne stanowi interesującą alternatywę wobec konwencjonalnych metod przetwarzania żywności (Raso i Heinz 2006; Vorobiev i Lebovka, 2008). Poza przemysłem spożywczym PEF wykorzystywany jest również w medycynie, farmacji, kosmetyce oraz w produkcji biopaliw (Lebovka i Vorobiev, 2010).

Analizy z wykorzystaniem pulsacyjnego pola elektrycznego są coraz częściej prowadzone na poziomie nauk biotechnologicznych, ze względu na zmienność wywoływanych efektów biologicznych w komórkach (Morotomi-Yano i in., 2014). PEF, w przeciwieństwie do konwencjonalnych metod wykorzystywanych w technologii żywności, nie powo-

duje m.in.: zmian w barwie i zawartości polifenoli w winie (El Darra i in., 2016) oraz soku malinowym (Lamanauskas i in., 2016), nie ma negatywnego wpływu na wygląd i zmianę wartości odżywczej borówek czarnych (Jin i in., 2017) oraz pozwala na zachowanie fizykochemicznych i sensorycznych właściwości ciekłych produktów spożywczych (Evrendilek, 2016). Dodatkowo, pulsacyjne pole elektryczne może mieć zastosowanie we wspomaganiu akumulacji pierwiastków w komórkach prostych organizmów (Pankiewicz i in., 2015; Pankiewicz i in., 2017). Zjawiska te pozwalają na produkcję żywności wzbogaconej, o łatwo przyswajalnych składnikach odżywczych, przeznaczoną dla ludzi ze szczególnymi potrzebami żywieniowymi.

Celem niniejszego opracowania było opisanie zasady działania i krytyczny przegląd możliwości zastosowania pulsacyjnego pola elektrycznego w technologii żywności, ze szczególnym uwzględnieniem produkcji żywności wzbogaconej.

### Zasada działania i zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego w przemyśle spożywczym

Zasada działania pulsacyjnego pola elektrycznego polega na indukowaniu krótkich impulsów elektrycznych o natężeniu najczęściej od 100 V·cm<sup>-1</sup> nawet do 80 kV·cm<sup>-1</sup>, w określonym czasie (Vorobiev i Lebovka, 2008; Koubaa i in., 2015). PEF o natężeniu pola elektrycznego powyżej 20 kV·cm<sup>-1</sup> może stanowić alternatywę dla termicznych procesów obróbki żywności zapewniających jej trwałość mikrobiologiczną. Pod wpływem pulsacyjnego pola elektrycznego błona komórkowa organizmów ulega uszkodzeniu, przerwaniu lub permeabilizacji (zwiększeniu prze-

puszczalności). Zmiany powstałe w błonie mają charakter stały lub tymczasowy w zależności od zastosowanych parametrów procesu: natężenia pola elektrycznego, liczby i kształtu impulsów, ich szerokości i częstotliwości (Dellarosa i in., 2016; Traffano-Schiffo i in., 2016). Przerwanie membrany następuje po zastosowaniu natężenia pola powyżej wartości progowej określonej dla danego organizmu. Nieodwracalne zmiany dużych komórek (o średnicy 30–60  $\mu\text{m}$ ) występują przy natężeniu pola elektrycznego 100–500  $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ , natomiast małych (1–10  $\mu\text{m}$ ) – od 3  $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$  do 10  $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Oddziaływanie PEF zależy od kształtu, struktury, właściwości i wielkości komórek oraz od ich ilości w zawieszynie (Barba i in., 2015). Stopień przepuszczalności komórki zależy również od czasu trwania impulsu. Dłuższy czas trwania elektroporacji zwiększa zaburzenia w strukturze błony komórkowej na danym obszarze (Gehl, 2003). Umieszczenie materiału biologicznego pomiędzy dwiema elektrodami zwiększa przepuszczalność substancji przez błony otaczające komórkę oraz wakuolę (Quagliarriello i in., 2016). Pulsacyjne pole elektryczne o bardzo krótkim czasie trwania elektroporacji powoduje powstanie niewielkich porów w błonie komórkowej (elektroporacja odwracalna). Dzięki temu procesowi możliwe jest m.in. przenikanie jonów przez błony komórkowe, wprowadzanie barwników, radioznaczników, a także DNA i RNA (Gehl, 2003; Morotomi-Yano i in., 2014). Powrót komórki do stanu wyjściowego trwa od kilku sekund do kilku godzin (Pavlin i in., 2008).

Pulsacyjne pole elektryczne jest coraz częściej wykorzystywane w przemyśle spożywczym. Wspomaga m.in. procesy dyfuzji, ekstrakcji, suszenia i zamrażania oraz inaktywuje szkodliwe mikroorganizmy (elektroporacja nieodwracalna). Ułatwia przenikanie substancji, zwiększa wydajność ekstrakcji, skraca czas obróbki żywności, umożliwia zachowanie związków wrażliwych na działanie wysokich temperatur, zmniejsza koszty energii i niweluje negatywny wpływ na środowisko naturalne. PEF służy do wspomagania procesu ekstrakcji za pomocą dyfuzji z wykorzystaniem wysokiej temperatury i rozpuszczalników. Ułatwia przenikalność cennych składników zawartych w tkankach roślinnych w temperaturze otoczenia. Zapobiega degradacji termicznej ścian komórkowych, umożliwiając odzysk pektyn (Barba i in., 2015). Zjawisko to wykorzystywane było m.in. do ekstrakcji cukru z buraków cukrowych. El-Beghiti i Vorobiev (2005) prowadzili badania z zastosowaniem PEF o natężeniu pola elektrycznego 670  $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$  i w czasie 0,025 s do ługowania sacharozy z plasterów buraka cukrowego. Stwierdzono wówczas, że próby traktowane pulsacyjnym polem elektrycznym charakteryzowały się 93% odzyskiem substancji rozpuszczonych, natomiast próby niepoddane temu procesowi tylko 40%. Dzięki temu PEF może być wykorzystywany do wspomagania konwencjonalnych metod wykorzystywanych w przemyśle spożywczym. Technologia ta jest procesem efektywnym, przyjaznym środowisku oraz zmniejszającym zużycie energii, a tym samym powoduje obniżenie kosztów procesu (Barba i in., 2015). PEF jest również wykorzystywane w procesie odwadniania osmotycznego m.in. jabłek, marchwi, mango i papryki czerwonej (Amami i in., 2006) oraz w procesie suszenia.

Pulsacyjne pole elektryczne stanowi alternatywę dla wstępnych zabiegów obróbki żywności przed suszeniem (m.in. rozdrabniania i blanszowania) (Jayaraman i Das Gupta,

2006). Wspomaga dyfuzję wody (Wiktor i in., 2013) oraz pomaga skrócić czas suszenia produktów (Gachovska i in., 2008). W technologii chłodniczej PEF wykorzystywane jest m.in. do skrócenia czasu zamrażania produktów (Jalte i in., 2009). Wiktor i in. (2015) wykazali, że zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego jako procesu wstępnego przed mrożeniem, pozwoliło na skrócenie jego czasu trwania o 3,5–17,2%, w porównaniu z tradycyjną technologią. Inni badacze stwierdzili natomiast, że PEF, w połączeniu z substancjami kriogenicznymi i teksturotwórczymi, pozwala na zachowanie wysokiej jakości produktów spożywczych poprzez zmniejszenie wycieku rozmrażalniczego (Shayanfar i in., 2014). Pulsacyjne pole elektryczne ma również zastosowanie w procesie zimnej pasteryzacji. Sharma i in. (2014) wykorzystali PEF do inaktywacji mikroorganizmów w mleku. Zastosowano następujące parametry procesu: natężenie pola elektrycznego 22–28  $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ , czas trwania elektroporacji 20  $\mu\text{s}$  i częstotliwość pola 10–60 Hz. PEF spowodowało wówczas zmniejszenie liczby *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* i *Listeria innocua*, poniżej poziomu wykrywalności, w procesie stacjonarnym.

### Charakterystyka żywności wzbogaconej

Człowiek potrzebuje 49 składników odżywczych (wody, białka składającego się z aminokwasów, kwasów tłuszczowych, mikro- i makroelementów oraz witamin) do prawidłowego funkcjonowania organizmu. Niedostateczne spożywanie co najmniej jednego składnika prowadzi do poważnych zaburzeń metabolicznych, złego stanu zdrowia, zahamowania rozwoju u dzieci i generuje wysokie koszty ekonomiczne dla całego społeczeństwa (Welch i in., 2004). Dzielne zalecane spożycie składników odżywczych jest zróżnicowane w zależności od płci. Kobiety między 25 a 50 rokiem życia powinny dostarczać codziennie do organizmu m.in. około 2200 kcal energii, w tym: 50 g białka, 800  $\mu\text{g}$  witaminy A, 5  $\mu\text{g}$  witaminy D, 8 mg witaminy E, 65  $\mu\text{g}$  witaminy K, 60 mg witaminy C oraz 800 mg Ca i P, 280 mg Mg i 55  $\mu\text{g}$  Se. Natomiast mężczyźni około 2900 kcal i m.in.: 63 g białka, 1000  $\mu\text{g}$  witaminy A, 5  $\mu\text{g}$  witaminy D, 10 mg witaminy E, 80  $\mu\text{g}$  witaminy K, 90 mg witaminy C oraz 800 mg Ca i P, 350 mg Mg i 70  $\mu\text{g}$  Se (FAO/WHO, 2000).

Na całym świecie około 3 miliardów ludzi cierpi z powodu niedożywienia. Skrajne niedobory składników odżywczych przyczyniają się do zwiększenia zachorowalności i śmiertelności ludzi, powodują problemy z uczeniem się, rozwojem i wzrostem dzieci i młodzieży (Caballero, 2002). Monokulturowe, wielkoobszarowe uprawy sprzyjają wyjałowieniu gleb i spadkowi związków mineralnych pobieranych przez rośliny. Również przetwarzanie surowców spożywczych powoduje spadek zawartości witamin i minerałów w żywności (Chaudhary i in., 2010).

Odpowiedzią na ten problem może być produkcja żywności funkcjonalnej uzupełnionej o składniki pokarmowe. Wzbogacanie żywności o składniki odżywcze dozwolone jest we wszystkich krajach Unii Europejskiej (Godfrey i in., 2004). Na mocy Ustawy o Bezpieczeństwie Żywności i Żywienia (25 sierpnia 2006) dopuszczalne jest: uzupełnienie składników odżywczych utraconych podczas przetwarzania i przechowywania żywności (fortyfikacja wyrównawcza), dodawanie składników odżywczych do powszechnie spo-

żywnych produktów i uzupełnianie składu produktów o jeden lub wiele substancji odżywczych niezależnie od ich naturalnego występowania w danym produkcie. W niektórych Państwach Członkowskich istnieje nawet obowiązek wzbogacania żywności o wybrane składniki (Rozporządzenie WE 20 grudnia 2006). Stosowanie żywności wzbogaconej wyprodukowanej zgodnie z obowiązującymi przepisami nie powoduje ryzyka nadmiernego spożycia wybranych składników odżywczych. Może ono nastąpić jedynie w przypadku długotrwałej suplementacji farmakologicznej (Ratkovska i in., 2007).

### Możliwość wykorzystania PEF jako innowacyjnej technologii wzbogacania żywności

Pulsacyjne pole elektryczne umożliwia produkcję żywności o wyższej zawartości witamin i związków polifenolowych niż umożliwiają to tradycyjne procesy technologiczne. Odriozola-Serrano i in. (2009) wykorzystali PEF w celu uzyskania soków o wyższej wartości odżywczej. Prowadzono badania soku owocowego wyprodukowanego w warunkach laboratoryjnych. Wykorzystano pulsacyjne pole elektryczne o natężeniu pola elektrycznego  $35 \text{ kV cm}^{-1}$ , częstotliwości pola w zakresie 50- 250 Hz i szerokości impulsu od 1 do 7  $\mu\text{s}$ . Zastosowano impulsy bipolarne oraz monopolarne. W soku analizowano zawartość witaminy C, antocyjanów i przeciwutleniaczy. Zaobserwowano 98% retencję witaminy C, stosując monopolarne impulsy i zoptimalizowane parametry PEF: szerokość impulsu 7  $\mu\text{s}$  przy częstotliwości 75 Hz lub odpowiednio 3  $\mu\text{s}$  przy 250 Hz. Również bipolarne impulsy spowodowały 98% retencję tego związku. Autorzy zastosowali wówczas następujące parametry PEF: szerokość impulsu 6  $\mu\text{s}$  przy częstotliwości 50 Hz lub odpowiednio 2  $\mu\text{s}$  przy 250 Hz. Zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego umożliwiło wyższą retencję witaminy C niż konwencjonalna termiczna obróbka żywności. Wysoka temperatura prowadzi do straty zawartości tego związku ze względu na utlenianie kwasu askorbinowego pod wpływem ciepła (Gahler i in., 2003). Retencja antocyjanów w soku truskawkowym poddawanym działaniu PEF wahała się między 83 a 102%. Częstotliwość PEF w zakresie 100 i 250 Hz spowodowała, że sok zachował wyjściową zawartość antocyjanów. W wyniku pasteryzacji zawartość antocyjanów w soku truskawkowym spadła nawet o 27% (Klopotek i in., 2005). Retencja zdolności antyoksydacyjnej soku traktowanego PEF wynosiła od 75 do 100%. Maksymalną retencję uzyskano, stosując bipolarne impulsy przy natężeniu pola elektrycznego  $35 \text{ kV cm}^{-1}$ , szerokości impulsu 1  $\mu\text{s}$  i częstotliwości 250 Hz (Odriozola-Serrano i in., 2009). Również zdolność antyoksydacyjna soku pomidorowego była wyższa przy zastosowaniu impulsów bipolarnych (Odriozola-Serrano i in., 2007). Cortes i in. (2006) zauważyli wyższą zawartość witaminy A w soku poddanym oddziaływaniu PEF niż w soku pasteryzowanym. Różnica w zawartości tej substancji w soku pomarańczowym wynosiła 8,1%. Salya-Trujillo i in. (2011) wykazali, że napój mleczny z dodatkiem soku owocowego, zawierającego kiwi, mango, pomarańcze i ananasy, poddany elektroporacji ma wyższą zawartość witaminy B<sub>2</sub> niż sok poddany obróbce termicznej. Agcam i in. (2014) w badaniach porównawczych soku pomarańczowego traktowanego PEF i poddanego obróbce termicznej stwierdzili, że w wyniku elektro-

poracji wzrosło całkowite stężenie związków fenolowych. Ponadto, flawonoidy i kwasy fenolowe w soku poddanym elektroporacji charakteryzowały się wyższą stabilnością podczas przechowywania.

Pulsacyjne pole elektryczne pozwala również na zachowanie wyjściowej zawartości kwasów tłuszczowych i aminokwasów w produkcie. Zulueta i in. (2007) nie zauważyli spadku zawartości nasyconych, jednonienasyconych lub wielonienasyconych kwasów tłuszczowych w soku pomarańczowym z dodatkiem mleka. Morales-De La Peña i in. (2012) zaobserwowali wzrost zawartości wolnych aminokwasów w przechowywanym napoju stanowiący mieszaninę mleka sojowego i soków owocowych (pomarańczowy, kiwi, ananasowy). Produkt poddany konwencjonalnej obróbce termicznej charakteryzował się natomiast zmniejszoną zawartością histydyny, tyrozyny, metioniny i leucyny.

Niezwykle istotna jest również biodostępność substancji odżywczych występujących w produktach. Badacze zauważyli, że dostępność biologiczna witaminy C w przechowywanej w warunkach chłodniczych zupie warzywnej oraz soku pomarańczowym, poddanych działaniu pulsacyjnego pola elektrycznego, jest znacznie wyższa niż w przypadku produktów niepoddanych żadnym procesom technologicznym (Sánchez-Moreno i in., 2004). PEF przyspiesza ekstrakcję witaminy C z owoców i warzyw, przyczyniając się do zwiększenia korzyści zdrowotnych spowodowanych spożywaniem przetworzonych produktów (Rodríguez-Roque i in., 2015).

Pulsacyjne pole elektryczne może być również wykorzystywane do wspomagania tworzenia kompleksu żelaza z glicyną. Jak powszechnie wiadomo żelazo jest niezbędnym składnikiem codziennej diety ludzi. Wchodzi w skład hemoglobiny, mioglobiny i enzymów oraz bierze udział w wielu reakcjach biochemicznych (Torres-Fuentes i in., 2012). Powszechnym sposobem na zapobieganie niedoborom tego pierwiastka jest jego dodatek do żywności w postaci soli żelaza. Jednak zazwyczaj stosowane związki chemiczne w niewielkim stopniu wchłaniają się w organizmie człowieka (Zhu i in., 2006). Zhang i in. (2017) uzyskali najwyższą wydajność kompleksu Fe-glicyna (81,2%) oraz najwyższą zdolność chelatowania żelaza ( $107,13 \text{ mg-L}^{-1}$ ), stosując PEF o natężeniu pola elektrycznego  $4 \text{ kV cm}^{-1}$  przez 15 min. Uzyskana wartość wydajności była wyższa od kompleksu tworzonego poprzez obróbkę cieplną (30 min,  $60^\circ\text{C}$ ). Na podstawie uzyskanych wyników autorzy stwierdzili, że PEF może być wykorzystywane w przemyśle do tworzenia kompleksów jonów metali z aminokwasami białkowymi.

Pankiewicz i in. (2015) wykorzystali pulsacyjne pole elektryczne do tworzenia kompleksów białkowych z jonami metali w komórkach *Saccharomyces cerevisiae*. Pierwiastki w formie biopreparatów są łatwiej przyswajane przez organizm ludzki w porównaniu z suplementami farmaceutycznymi. Wykazują również większą stabilność oraz odporność na negatywny wpływ innych składników odżywczych. PEF o natężeniu pola elektrycznego  $5,0 \text{ kV cm}^{-1}$ , szerokości impulsu 20  $\mu\text{s}$ , częstotliwości 1 Hz, czasie elektroporacji 15 min, spowodowało akumulację  $2,85 \text{ mg-g}^{-1}$  s.s. magnezu i  $11,41 \text{ mg-g}^{-1}$  s.s. cynku. Wyniki te były wyższe odpowiednio o 1,5 i 2 razy, w porównaniu z hodowlą niepoddaną działaniu PEF (Pankiewicz i in., 2014). Pula-

cyjne pole elektryczne znalazło również zastosowanie we wzbogacaniu komórek drożdży w wapń i selen. Pankiewicz i Jamroz (2013), stosując PEF o natężeniu pola elektrycznego 5 kV·cm<sup>-1</sup>, szerokości impulsu 20 μs i 20 minutową elektroporację, uzyskali akumulację Ca na poziomie 2,98 mg·g<sup>-1</sup> s.s., co stanowiło 30% całkowitej ilości wapnia zawartego w pożywce. Zoptymalizowane parametry pulsacyjnego pola elektrycznego (czas ekspozycji PEF 10 min) spowodowały akumulację selenu w komórkach *Rodothorula rubra* na poziomie 72 mg·g<sup>-1</sup> s.s. (Jamroz i Pankiewicz, 2004)

## Podsumowanie

Pulsacyjne pole elektryczne jest coraz powszechniej wykorzystywane w technologiach przemysłu spożywczego. Może wspomagać konwencjonalne procesy technologiczne lub może być wykorzystywane, jako element wstępnej obróbki żywności. Zastosowanie tej techniki skraca czas trwania procesu oraz zapewnia jego wyższą efektywność, przyczyniając się dzięki temu do zmniejszenia kosztów produkcji żywności. Dotychczas prowadzone badania potwierdziły pozytywny wpływ PEF na procesy technologiczne wykorzystywane w przetwórstwie żywności. Dzięki tej technice możliwe było m.in. zwiększenie wydajności ekstrakcji sacharozy z buraka cukrowego (93%), skrócenie czasu suszenia i zamrażania produktów (o 3,5-17,2%) oraz minimalizacja liczby drobnoustrojów przy zastosowaniu zimnej pasteryzacji. Dodatkowo, PEF umożliwia odzysk cennych składników żywności, m.in.: wpływa na zwiększenie retencji witaminy C, B<sub>2</sub> i A oraz antocyjanów. Ponadto, oddziałuje na stabilność flawonoidów i kwasów fenolowych w żywności poddanej przechowywaniu. W przeciwieństwie do klasycznych procesów technologicznych, nie powoduje strat zawartości podstawowych składników odżywczych w produktach takich jak kwasy tłuszczowe i aminokwasy. Prowadzone były również badania nad wykorzystaniem pulsacyjnego pola elektrycznego do wspomaganie tworzenia łatwo przyswajalnego kompleksu jonów żelaza oraz wzbogacania komórek drożdży w jony metali. Wykorzystanie powyższych zabiegów na skalę przemysłową umożliwiłoby produkcję żywności wzbogaconej. Dzięki temu możliwe by było rozwiązanie problemu niedoboru składników odżywczych u ludzi.

## Bibliografia

- Agcam, E., Akyildiz, A., Evrendilek, G.A. (2014). Comparison of phenolic compounds of orange juice processed by pulsed electric fields (PEF) and conventional thermal pasteurisation. *Food Chemistry*, 143, 354–361. DOI: [10.1016/j.foodchem.2013.07.115](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.07.115).
- Amami, E., Vorobiev, E., Kechaou, N. (2006). Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apple tissue pre-treated by pulsed electric field. *LWT — Food Science and Technology*, 39, 1014–1021. DOI: [10.1016/j.lwt.2006.02.017](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.02.017).
- Barba, F.J., Pamiakov, O., Pereira, S.A., Wiktor, A., Grimi, N., Boussetta, N., Saraiva, J.A., Raso, J., Martin-Belloso, O., Włórowa-Rajchert, D., Lebovka, N., Vorobiev, E. (2015). Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Research International*, 77, 773–798. DOI: [10.1016/j.foodres.2015.09.015](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.015).
- Caballero B. (2002). Global patterns of child health: the role of nutrition. *Annals of Nutrition and Metabolism* 46, 3–7. DOI: [10.1159/000066400](https://doi.org/10.1159/000066400).
- Cortés, C., Torregrosa, F., Esteve, M.J., Frígola, A. (2006). Carotenoid profile modification during refrigerated storage in untreated and pasteurized orange juice and orange juice treated with high-intensity pulsed electric fields. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 6247–6254. DOI: [10.1021/jf060995q](https://doi.org/10.1021/jf060995q).
- Dellarosa, N., Tappi, S., Ragni, L., Lagni, L., Rocculi, P., Dalla Rosa, M. (2016). Metabolic response of fresh-cut apples induced by pulsed electric fields. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 38, 356–364. DOI: [10.1016/j.ifset.2016.06.016](https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.016).
- Dz.U. 2006 nr 171 poz. 1225 Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o bezpieczeństwie żywności i żywienia
- El Darra, N., Turk, M.F., Ducasse, M.A., Grimi, N., Maroun, R. G., Louka, N., Vorobiev, E. (2016). Changes in polyphenol profiles and color composition of freshly fermented model wine due to pulsed electric field, enzymes and thermovinification pretreatments. *Food Chemistry*, 194, 944–950. DOI: [10.1016/j.foodchem.2015.08.059](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.059).
- El-Belghiti, K., Vorobiev, E. (2005). Modelling of solute aqueous extraction from carrots subjected to a pulsed electric field pre-treatment. *Biosystems Engineering*, 90, 289–294. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2004.10.009](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.10.009).
- Evrendilek, G.A. (2016). Change regime of aroma active compounds in response to pulsed electric field treatment time, sour cherry juice apricot and peach nectars, and physical and sensory properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 195–205. DOI: [doi.org/10.1016/j.ifset.2015.11.020](https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.11.020).
- FAO/WHO. 2000. Preliminary report on recommended nutrient intakes. Joint FAO/WHO Expert Consultation on Human Vitamin and Mineral Requirements, FAO, Bangkok, Thailand, September 21±30, 1998, revised July 13, 2000. Food and Agricultural Organization of the United Nations Rome, Italy and World Health Organization, Geneva, Switzerland
- Gachovska, T.K., Adedeji, A.A., Ngadi, M., Raghavan, G.V.S. (2008). Drying characteristics of pulsed electric field-treated carrot. *Drying Technology*, 26, 1244–1250. DOI: [10.1080/07373930802307175](https://doi.org/10.1080/07373930802307175).
- Gahler, S., Otto, K., Bohm, V. (2003). Alterations of vitamin C, total phenolics, and antioxidant capacity as affected by processing tomatoes to different products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 7962–7968. DOI: [10.1021/jf034743q](https://doi.org/10.1021/jf034743q).
- Gehl, J. (2003). Electroporation: theory and methods, perspectives for drug delivery, gene therapy and research. *Acta Physiologica Scandinavica*, 177, 437–447. DOI: [10.1046/j.1365-201X.2003.01093.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-201X.2003.01093.x).
- Godfrey, D., Tennant, D., Davidson, J. (2004). The impact of fortified foods on total dietary consumption in Europe. *Nutrition Bulletin*, 29, 188–198. DOI: [10.1111/j.1467-3010.2004.00442.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-3010.2004.00442.x).
- Jalté, M., Lanoisellé, J.-L., Lebovka, N.I., Vorobiev, E. (2009). Freezing of potato tissue pretreated by pulsed electric

- fields. *LWT — Food Science and Technology*, 42, 576–580. DOI: [10.1016/j.lwt.2008.09.007](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.09.007).
- Jamroz, J., Pankiewicz, U. (2004). Wpływ pulsacyjnego pola elektrycznego na akumulację seleniu w drożdżach *Rhodotorula rubra*. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio E, Agricultura*, 59, 2053-2059.
- Jayaraman, K.S., Das Gupta, D.K. (2006). Drying of fruits and vegetables. [In] A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (pp. 606–631). New York: Taylor & Francis Group, LLC, ISBN 9781466596658.
- Jin, T.Z., Yu, Y., Gurtler, J.B. (2017). Effects of pulsed electric field processing on microbial survival, quality change and nutritional characteristics of blueberries. *LWT-Food Science and Technology*, 77, 517-524. DOI: [10.1016/j.lwt.2016.12.009](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.009).
- Klopotek, Y., Otto, K., Bohm, V. (2005). Processing strawberries to different products alters contents of vitamin C, total phenolics, total anthocyanins, and antioxidant capacity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 5640–5646. DOI: [10.1021/jf047947v](https://doi.org/10.1021/jf047947v).
- Koubaa, M., Roselló-Soto, E., Šic Žlabur, J., Režek Jambrak, A., Brnčić, M., Grimi, N., Barba, F. J. (2015). Current and new insights in the sustainable and green recovery of nutritionally valuable compounds from *Stevia Rebaudiana bertonii*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63, 6835-6846. DOI: [10.1021/acs.jafc.5b01994](https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b01994).
- Lamanauskas, N., Pataro, G., Bobinas, Č., Šatkauskas, S., Viškėlis, P., Bobinaite, R., Ferrari, G. (2016). Impact of pulsed electric field treatment on juice yield and recovery of bioactive compounds from raspberries and their by-products. *Žemdirbystė (Agriculture)*, 103, 83-90. DOI: [10.13080/z-a.2016.103.011](https://doi.org/10.13080/z-a.2016.103.011).
- Lebovka, N., Vorobiev, E. (2010). Food and biomaterials processing assisted by electroporation. [In] A. G. Pakhomov, D. Miklavčič, M. S. Markov (Ed.), *Advanced Electroporation Techniques in Biology and Medicine* (pp. 463–490). New York, CRC Press, ISBN 9781439819067.
- Morales-De La Peña, M., Salvia-Trujillo, L., Garde-Cerdán, T., Rojas-Graü, M., Martín-Belloso, O. (2012). High intensity pulsed electric fields or thermal treatments effects on the amino acid profile of a fruit juice-soy milk beverage during refrigeration storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 16, 47–53. DOI: [10.1016/j.ifset.2012.04.004](https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.04.004).
- Morotomi-Yano, K., Akiyama, H., Yano, K. (2014). Different involvement of extracellular calcium in two modes of cell death induced by nanosecond pulsed electric fields. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 555, 47-54. DOI: [10.1016/j.abb.2014.05.020](https://doi.org/10.1016/j.abb.2014.05.020).
- Odrizola-Serrano, I., Aguilo-Aguayo, I., Soliva-Fortuny, R., Gimeno-An˜o, V., Martín-Belloso, O. (2007). Lycopene, vitamin C, and antioxidant capacity of tomato juice as affected by high-intensity pulsed electric fields critical parameters. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 9036–9042. DOI: [10.1021/jf0709101](https://doi.org/10.1021/jf0709101).
- Odrizola-Serrano, I., Soliva-Fortuny, R., Martín-Belloso, O. (2009). Impact of high-intensity pulsed electric fields variables on vitamin C, anthocyanins and antioxidant capacity of strawberry juice. *LWT-Food Science and Technology*, 42, 93-100. DOI: [10.1016/j.lwt.2008.05.008](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.05.008).
- Pankiewicz, U., Sujka, M., Jamroz, J. (2015). Bioaccumulation of the Selected Metal Ions in *Saccharomyces cerevisiae* Cells Under Treatment of the Culture with Pulsed Electric Field (PEF). *The Journal of Membrane Biology*, 248, 943-949. DOI: [10.1007/s00232-015-9844-3](https://doi.org/10.1007/s00232-015-9844-3).
- Pankiewicz, U., Sujka, M., Kowalski, R., Mazurek, A., Włodarczyk-Stasiak, M., Jamroz, J. (2017). Effect of pulsed electric fields (PEF) on accumulation of selenium and zinc ions in *Saccharomyces cerevisiae* cells. *Food Chemistry*, 221, 1361-1370. DOI: [10.1016/j.foodchem.2016.11.018](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.018).
- Pankiewicz, U., Sujka, M., Włodarczyk-Stasiak, M., Mazurek, A., Jamroz, J. (2014). Effect of pulse electric fields (PEF) on accumulation of magnesium and zinc ions in *Saccharomyces cerevisiae* cells. *Food Chemistry*, 157, 125-131. DOI: [10.1016/j.foodchem.2014.02.028](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.028).
- Pavlin, M., Kotnik, T., Miklavčič, D., Kramar, P., Lebar, A.M. (2008). Electroporation of planar lipid bilayers and membranes. [In] L. A. Leitmanova (Ed.), *Advances in Planar Lipid Bilayers and Liposomes*. (pp. 165–226). Amsterdam, Elsevier, ISBN: 978-0-12-802878-0.
- Quagliariello, V., Iaffaioli, R.V., Falcone, M., Ferrari, G., Pataro, G., Donsì, F. (2016). Effect of pulsed electric fields-assisted extraction on anti-inflammatory and cytotoxic activity of brown rice bioactive compounds. *Food Research International*, 87, 115-124. DOI: [10.1016/j.foodres.2016.07.005](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.07.005).
- Raso, J., Heinz, V. (2006). *Pulsed electric field technology for the food industry. Fundamentals and applications*. Springer, New York, ISBN 978-0-387-31122-7.
- Ratkowska, B., Kunachowicz, H., Przygoda, B. (2007). Krajowy rynek produktów wzbogaconych w witaminy i składniki mineralne wobec wymagań prawnych UE. *Zywność Nauka Technologia Jakość*, 14, 90-99.
- Rodríguez-Roque, M.J., De Ancos, B., Sanchez-Moreno, C., Cano, M.P., Elez-Martinez, P., Martín-Belloso, O. (2015). Impact of food matrix and processing on the in vitro bioaccessibility of vitamin C, phenolic compounds, and hydrophilic antioxidant activity from fruit juice-based beverages. *Journal of Functional Foods*, 14, 33–43. DOI: [10.1016/j.jff.2015.01.020](https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.01.020).
- Rozporządzenie (WE) Nr 1925/2006 parlamentu Europejskiego i rady z dnia 20 grudnia 2006.
- Salvia-Trujillo, L., Morales-De La Peña, M., Rojas-Graü, M.A., Martín-Belloso, O. (2011). Changes in water-soluble vitamins and antioxidant capacity of fruit juice-milk beverages as affected by high-intensity pulsed electric fields (HIPEF) or heat during chilled storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 10034–10043. DOI: [10.1021/jf2011497](https://doi.org/10.1021/jf2011497).
- Sánchez-Moreno, C., Cano, M.P., De Ancos, B., Plaza, L., Olmedilla, B., Granada, F., Elez-Martínez, P. (2004). Pulsed electric fields-processed orange juice consumption increases plasma vitamin C and decreases F2-isoprostanes in healthy humans. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 15, 601–607. DOI: [10.1016/j.jnutbio.2004.04.007](https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2004.04.007).
- Sharma, P., Bremer, P., Oey, I., Everett, D.W. (2014). Bacterial inactivation in whole milk using pulsed electric field processing. *International Dairy Journal*, 35, 49–56. DOI: [doi.org/10.1016/j.idairyj.2013.10.005](https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2013.10.005).
- Shayanfar, S., Chauhan, O., Toepfl, S., Heinz, V. (2014). Pulsed electric field treatment prior to freezing carrot discs significantly maintains their initial quality parameters after thawing. *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 1224–1230. DOI: [10.1111/ijfs.12421](https://doi.org/10.1111/ijfs.12421).

- Sitzmann, W., Vorobiev, E., Lebovka, N. (2016). Applications of electricity and specifically pulsed electric fields in food processing: Historical backgrounds. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37, 302-311. DOI: [10.1016/j.ifset.2016.09.021](https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.09.021).
- Torres-Fuentes, C., Alaiz, M., Vioque, J. (2012). Iron-chelating activity of chickpea protein hydrolysate peptides. *Food Chemistry*, 134, 1585-1588. DOI: [10.1016/j.foodchem.2012.03.112](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.112).
- Traffano-Schiffo, M.V., Tylewicz, U., Castro-Giraldez, M., Fito, P.J., Ragni, L., Dalla Rosa, M. (2016). Effect of pulsed electric fields pre-treatment on mass transport during the osmotic dehydration of organic kiwifruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 38, 243-251. DOI: [10.1016/j.ifset.2016.10.011](https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.10.011).
- Vorobiev, E.I., Lebovka, N.I. (2008). *Electrotechnologies for extraction from food plants and biomaterials*. Springer, New York, ISBN 978-0-387-79374-0.
- Vorobiev, E., Lebovka, N.I. (2008). *Electrotechnologies for extraction from food plants and biomaterials*. New York, Springer, 978-0-387-79373-3.
- Welch, R.M., Graham, R.D. (2004). Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. *Journal of Experimental Botany*, 55, 353-364. DOI: [10.1093/jxb/erh064](https://doi.org/10.1093/jxb/erh064).
- Wiktor, A., Iwaniuk, M., Sledz, M., Nowacka, M., Chudoba, T., Witrowa-Rajchert, D. (2013). Drying kinetics of apple tissue treated by pulsed electric field. *Drying Technology*, 31, 112-119. DOI: [10.1080/07373937.2012.724128](https://doi.org/10.1080/07373937.2012.724128).
- 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. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2014.08.013](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.08.013).
- Zhang, Z.H., Han, Z., Zeng, X.A., Wang, M.S. (2017). The preparation of Fe-glycine complexes by a novel method (pulsed electric fields). *Food Chemistry*, 219, 468-476. DOI: [10.1016/j.foodchem.2016.09.129](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.129).
- Zhu, L., Glahn, R.P., Yeung, C.K., Miller, D.D. (2006). Iron uptake by Caco-2 cells from NaFeEDTA and FeSO<sub>4</sub>: Effects of ascorbic acid, pH, and a Fe(II) chelating agent. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 7924-7928. DOI: [10.1021/jf061036z](https://doi.org/10.1021/jf061036z).
- Zulueta, A., Esteve, M.J., Frascuet, I., Frígola, A. (2007). Fatty acid profile changes during orange juice-milk beverage processing by high-pulsed electric field. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109, 25-31. DOI: [10.1002/ejlt.200600202](https://doi.org/10.1002/ejlt.200600202).

**Dariusz Góral**

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie  
Katedra Chłodnictwa i Energetyki Przemysłu Spożywczego  
ul. Doświadczalna 44, 20-280 Lublin  
e-mail: [dariusz.goral@up.lublin.pl](mailto:dariusz.goral@up.lublin.pl)