

# ZASTOSOWANIE PULSACYJNEGO POLA ELEKTRYCZNEGO (PEF) JAKO ZABIEGU WSPOMAGAJĄCEGO EKSTRAKCJĘ

## APPLICATION OF THE PULSED ELECTRIC FIELD (PEF) AS THE EXTRACTION ASSISTANT TREATMENT

**Karolina Nowosad**

*Katedra Biotechnologii, Mikrobiologii i Żywnienia Człowieka,  
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie,  
Skromna 8, 20-704, Lublin, Poland  
e-mail: karolina.nowosad@up.lublin.pl*

---

Abstract

Wprowadzenie

1. Wykorzystanie pulsacyjnego pola elektrycznego w ekstrakcji biopaliwa oraz lipidów z mikroalg
2. Wykorzystanie pulsacyjnego pola elektrycznego w ekstrakcji związków fenolowych z owoców i warzyw
3. Zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego w ekstrakcji związków fenolowych z produktów ubocznych produkcji piwa

Uwagi końcowe

Piśmiennictwo cytowane

---

**Mgr inż. Karolina Nowosad** – ukończyła studia magisterskie z technologii żywności i żywienia człowieka oraz dietetyki na Wydziale Nauk o Żywności i Biotechnologii Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Od 2018 roku doktorantka na Wydziale Nauk o Żywności i Biotechnologii Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie w dyscyplinie technologia żywności i żywienia. Jej zainteresowania naukowe dotyczą zastosowania pulsacyjnego pola elektrycznego w technologii żywności. Interesuje się również dietetyką kliniczną.



<https://orcid.org/0000-0001-7664-1240>

## ABSTRACT

Fruits, vegetables and yeast contain numerous biologically active compounds called "phytonutrients". The phytonutrients can include phenolic compounds, minerals and vitamins. Conventional techniques used to extract these nutrients suffer from several disadvantages. These methods are characterized by poor efficiency of the extraction process, high energy and solvent consumption, long processing times and the formation of thermal decomposition by products. For this reason, scientists together with food engineers are looking for a safe and efficient extraction of bioactive compounds. In recent years, several modern techniques to support the extraction process have been proposed. One of them is the pulsed electric field (PEF). Pulsed electric field is one of the non-thermal methods used to control microbiological safety and change the properties (nutritional, sensory and physicochemical) of food products. The principle of operation of PEF is based on the formation of pores in the cell membrane under the influence of short bursts of electricity, which increases its permeability. Due to the formation of pores, various components, such as ions, molecules and other more complex compounds, such as vitamins or lipids, can flow freely through the cell membrane. The use of PEF for extraction reduces the process time, increases the efficiency of the process and is characterized by a low processing temperature. This review shows the use of a pulsed electric field as a process supporting the extraction of biological compounds from algae, vegetables, fruits and in the brewing industry. The optimal conditions of the pulsed electric field, which may affect the extraction efficiency, e.g. electric field strength, number of pulses and pulse width, are also discussed. Based on the collected literature data, it was found that the pulsed electric field contributes to the increase of the extraction efficiency.

Keywords: extraction, pulsed electric field, biofuel, phenolic compounds, brewing  
Słowa kluczowe: ekstrakcja, pulsacyjne pole elektryczne, biopaliwo, związki fenolowe, browarnictwo

---

---

**WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW**

PEF

– pulsacyjne pole elektryczne

## WPROWADZENIE

Przemysł spożywczy wymaga ciągłego dostosowywania procesów produkcyjnych do wytwarzania produktów możliwie najlepszej jakości przy niskich kosztach produkcji. Aby spełnić te wymagania, badane są potencjalne korzyści z zastosowania różnych innowacyjnych technologii [1].

W przemyśle spożywczym szeroko stosowaną operacją jednostkową jest ekstrakcja ciała stałe-ciecz. Polega na zjawisku transportu masy, w którym określone związki znajdujące się na ogół w komórkach migrują z nich do fazy ciekłej. Zatem szybkość ekstrakcji tych związków zależy w szczególności od przepuszczalności błon komórkowych [2], którą można zwiększyć wykorzystując pulsacyjne pole elektryczne. Zabieg ten może być stosowany również w innych gałęziach gospodarki, np. w wytwarzaniu biopaliwa [3].

Pulsacyjne pole elektryczne (ang. *PEF*) to technologia, która w ostatnich latach zyskuje coraz większe zainteresowanie przemysłu spożywczego [4]. Pulsacyjne pole elektryczne może być obiecującą alternatywą dla konwencjonalnych metod dezintegracji komórek np. homogenizacji, rozcierania, sonifikacji czy trawienia enzymatycznego. Ekspozycja komórek na impulsy pola elektrycznego o wysokim natężeniu może zmienić strukturę błony komórkowej. Przy odpowiednio wysokim napięciu transbłonowym (~0,5 - 1 V) zmienia się układ cząsteczek fosfolipidów. W efekcie błona traci swoją funkcję barierową i staje się przepuszczalna, co często określa się mianem „elektroporacji” lub „elektroprzepuszczalności” [5]. Według literatury, głównymi parametrami wpływającymi na skuteczność działania pulsacyjnego pola elektrycznego są: natężenie pola elektrycznego, kształt i czas trwania impulsu, liczba zastosowanych impulsów oraz energia dostarczona podczas aplikacji PEF. W zależności od warunków PEF przepuszczalność (elektropermeabilizacja) błony komórkowej może być odwracalna lub nieodwracalna. Do efektywnej ekstrakcji związków bioaktywnych niezbędna jest w większości przypadków nieodwracalna permeabilizacja błony komórkowej. Tworzenie porów zwiększa przepuszczalność błon, powodując wzmocnienie dyfuzji substancji rozpuszczonych przez błony komórkowe. Uszkodzenie błony sprzyja uwalnianiu materii wewnątrzkomórkowej i ułatwia dostęp rozpuszczalnika do komórki. Aplikacja PEF jest stosunkowo łagodnym procesem dezintegracji komórek, ponieważ zwykle odbywa się w temperaturze otoczenia i nie wprowadza do materiału dodatkowych zanieczyszczeń. Tym samym pomaga zapobiegać niepożądanym zmianom w materiale docelowym [6]. Z drugiej strony podczas aplikacji PEF powstają reaktywne formy tlenu (ang. *reactive oxygen species - ROS*), które z kolei mogą kompensować korzyści poprzez utlenianie wielu substancji np. antocyjanów [7]. W przeciwieństwie do innych procesów nietermicznych, np. obróbki wysokim ciśnieniem hydrostatycznym, technologia PEF wymaga bardzo krótkiego czasu przetwarzania, a przy tym obróbka może być stosowana w przepływie ciągłym [5].

Aparat wytwarzający pulsacyjne pole elektryczne składa się z kilku elementów: generatora impulsów wysokiego napięcia, komory zabiegowej, urządzenia sterującego oraz monitorującego. Generator impulsów wysokiego napięcia dostarcza impulsy o wymaganym kształcie, czasie trwania oraz intensywności. Następnie impulsy te przesyłane są do pary elektrod w komorze zabiegowej, między którymi znajduje się obrabiany produkt. Proces monitorowany jest przez centralny komputer, który służy również do ustawiania warunków procesu [7].

## **1. WYKORZYSTANIE PULSACYJNEGO POLA ELEKTRYCZNEGO W EKSTRAKCJI BIOPALIWA ORAZ LIPIDÓW Z MIKROALG**

Wysoki poziom dwutlenku węgla w atmosferze powoduje ocieplenie klimatu i pośrednio niekorzystnie wpływa na warunki pogodowe na świecie [8]. Rosnące zużycie paliw silnikowych w przemyśle transportowym oraz wytwarzanie energii elektrycznej i ciepłej powodują wzrost emisji gazów cieplarnianych. Z tego powodu badacze z całego świata poszukują nowych, alternatywnych źródeł energii jak, np. biopaliwa [8].

Jednym z surowców, które można wykorzystać do produkcji biopaliwa są mikroalgi. Są to fotosyntetyczne, wodne mikroorganizmy, które wykorzystują światło słoneczne, wodę oraz CO<sub>2</sub> do syntezy związków cukrowych [9, 10]. W porównaniu z innymi surowcami wykorzystywanymi do produkcji biodiesla, mikroalgi mają kilka zalet, np. charakteryzują się wysokim tempem wzrostu, mogą być uprawiane na gruntach nierolnych i przy użyciu wody niezdatnej do picia. Co więcej, hodowla mikroalg nie wypiera innych upraw roślin spożywczych i może być zbierana codziennie, jeśli uprawiana jest w systemie półciągłym lub ciągłym [11]. Są one również dobrym źródłem lipidów, pigmentów, nienasyconych kwasów tłuszczowych oraz polisacharydów [12]. Wiele wartościowych substancji wytwarzanych przez mikroalgi jest przechowywanych wewnątrzkomórkowo, a proces ich ekstrakcji obejmuje etap rozpadu komórek. Komórki alg mają grube ściany komórkowe, co sprawia, że rozpad komórek i ekstrakcja pożądaných związków wymagają nakładów energii. Na przykład produkcji biodiesla z mikroalg 30–50% kosztów produkcji wynika z etapu ekstrakcji [13]. Dlatego też poszukiwanie skutecznych, odpowiednich metod dezintegracji komórek jest niezbędne do zwiększenia konkurencyjności wykorzystywania alg w produkcji dużych ilości biopaliwa. Efektywny proces dezintegracji komórek powinien skutkować zmaksymalizowaniem wydajności ekstrakcji oraz zwiększać jakość wyekstrahowanych związków. Ponadto proces dezintegracji komórek nie powinien mieć negatywnego wpływu na kolejne etapy przetwarzania. Wyżej wymienione czynniki wpływają na ogólną wydajność procesu dezintegracji, a tym samym na

jego całkowitą energochłonność, co jest kluczowym zagadnieniem w produkcji biopaliw [12].

W badaniach Goettela i wsp. [12] glony hodowano w kontrolowanych warunkach w zamkniętym fotobioreaktorze. Po zebraniu alg zawiesiny zagęszczano i traktowano PEF impulsami kwadratowymi o czasie trwania 1  $\mu$ s. Badano wpływ energii właściwej obróbki (52–211 kJ/kg zawiesiny), natężenia pola elektrycznego (23–43 kV/cm) oraz stężenia biomasy (36–167 g suchej masy/kg zawiesiny) na stopień rozpadu komórek. Z badań tych autorów wynika, że skuteczność dezintegracji wzrastała wraz ze wzrostem energii właściwej obróbki. Dla zawiesin o zawartości biomasy wynoszącej 100 g suchej masy/kg zawiesiny pobór energii elektrycznej niezbędny do znacznego rozerwania komórek wynosił 1 MJ/kg suszonych glonów. Chociaż algi zawierały lipidy, traktowanie PEF doprowadziło jedynie do spontanicznego uwalniania rozpuszczalnych składników [12].

Zbinden i wsp. [14] technologię pulsacyjnego pola elektrycznego wykorzystywali jako strategię intensyfikacji procesu ekstrakcji lipidów z mokrej biomasy *Ankistrodesmus falcatus* przy użyciu zielonego rozpuszczalnika – octanu etylu. Wydajność ekstrakcji bez PEF była niższa (o 83–88%) od tej zachodzącej z wykorzystaniem pulsacyjnego pola elektrycznego. Wykorzystanie technologii PEF spowodowało liżę 90% komórek i znacznie zwiększyło tempo odzyskiwania lipidów przy użyciu octanu etylu [14].

Pataro i wsp. [15] badali wpływ parametrów PEF na ekstrakcję cennych związków z mikroalg *Chlorella vulgaris*. Eksperymenty z użyciem PEF przy różnym natężeniu pola ( $E=27-35$  kV/cm) i nakładzie energii (50-100-150 kJ/kg) prowadzono w skali laboratoryjnej w urządzeniu o przepływie ciągłym. Wyniki badań wykazały większy wzrost przewodności elektrycznej zawiesiny poddanej obróbce PEF w porównaniu z próbkami niepoddanymi obróbce. Ponadto zabieg PEF zwiększył zawartość suchej masy oraz ilość węglowodanów, białek i związków fenolowych uwalnianych do supernatantu z wnętrza komórek alg [15].

## **2. WYKORZYSTANIE PULSACYJNEGO POLA ELEKTRYCZNEGO W EKSTRAKCJI ZWIĄZKÓW FENOLOWYCH Z OWOCÓW I WARZYW**

Związki fenolowe znane są ze swoich zdolności do zmiatania wolnych rodników. Są one przeciwutleniaczami, które zmniejszają ryzyko zaburzeń neurodegeneracyjnych i powstania wielu form raka, zapobiegają chorobom naczyń krwionośnych i serca – poprzez hamowanie peroksydacji lipidów – oraz obniżają poziom cholesterolu LDL [16]. W ostatnich latach duże zainteresowanie naukowców wzbudzają związki o wysokim potencjale bioaktywności, ekstrahowane z warzyw i owoców. Badano różne metody ekstrakcji służące do odzyskania tych cennych związków z tkanek roślinnych [17]. Najczęściej stosowa-

nymi technikami były: konwencjonalna ekstrakcja cieczą pod zwiększonym ciśnieniem oraz ekstrakcja metodą Soxhleta z użyciem rozpuszczalników organicznych. Metody te charakteryzują się powtarzalnością i szybką ekstrakcją cennych związków z tkanek roślinnych, ale wymagają toksycznych rozpuszczalników oraz generują wysokie zużycie energii. Usuwanie rozpuszczalników organicznych jest również dużym problemem środowiskowym. W metodach tych może zachodzić dodatkowo termiczna degradacja związków bioaktywnych [18]. Z tego względu podjęto wiele wysiłków, aby znaleźć nowe metody efektywnej i przyjaznej dla środowiska ekstrakcji związków bioaktywnych z warzyw i owoców. W ostatnich latach badano różne nowe i niekonwencjonalne metody, które wspomagałyby proces ekstrakcji, np. pulsacyjne pole elektryczne, wysokie ciśnienie hydrostatyczne, ultradźwięki oraz mikrofałe [19].

Technika pulsacyjnego pola elektrycznego wykorzystywana jest w przemyśle owocowo-warzywnym ze względu na to, że nie stosowana jest wysoka temperatura i jest wydajna w ekstrakcji cząsteczek bioaktywnych [20]. Przemysł spożywczy zwraca uwagę także na nowatorskie techniki, które pozwalają konserwować soki i inne płynne produkty spożywcze, w celu zachowania trwałości i czystości mikrobiologicznej przez dłuższy czas przechowywania, przy jak najmniejszych stratach składników odżywczych. W technice PEF komórka roślinna jest czasowo wystawiona na jego działanie, co może sprzyjać destabilizacji lipidów, białek i dwuwarstw w błonach komórkowych [21].

Oliwa z oliwek z pierwszego tłoczenia jest jednym z najbardziej cenionych olejów roślinnych na świecie ze względu na swoje właściwości organoleptyczne. Ponadto zawiera wiele związków o charakterze prozdrowotnym np. fenole, fitosterole czy tokoferole, które przy regularnym spożyciu poprawiają parametry lipidowe krwi, zmniejszając ryzyko zachorowania na choroby układu krążenia [22]. Puértolas i de Marañón [22] na podstawie wyników badań wywnioskowali, że wydajność ekstrakcji oliwy z oliwek Arroniz wzrosła o 13,3% po obróbce z wykorzystaniem PEF (2 kV/cm; 11,25 kJ/kg). Ponadto oliwa z oliwek uzyskana z wyniku obróbki w warunkach PEF charakteryzowała się znacznie wyższą całkowitą zawartością fenoli (o 11,5%), tokoferoli (o 15,0%) i fitosteroli (o 9,9%) niż kontrolna (bez obróbki w warunkach PEF).

Owoce palmy daktylowej wpływają korzystnie na zdrowie człowieka, zwłaszcza osób zmagających się z chorobami serca, a ze względu na wysoką zawartość błonnika, wspomagają proces trawienia. Owoce palmy daktylowej uważane są za źródło antyoksydantów oraz związków fenolowych [22]. Siddeeg i wsp. [24] oceniali wpływ PEF na właściwości fizykochemiczne i przeciwutleniające soku z palmy daktylowej przechowywanego w temperaturze chłodniczej. Owoce poddano działaniu PEF o następujących parametrach: często-



tliwość 10 Hz, czas impulsu 100  $\mu$ s, liczba impulsów 30, natężenie pola elektrycznego: 1, 2 i 3 kV/cm. Z badań wynika, że przy stosowaniu największego natężenia pulsacyjnego pola elektrycznego wynoszącego 3 kV/cm ekstrakt wykazywał najsilniejszą aktywność przeciwutleniającą.

W badaniach Bobinaitė i wsp. [25] oceniano wpływ obróbki wstępnej owoców borówki czarnej (*Vaccinium myrtillus* L.) pulsacyjnym polem elektrycznym zarówno na wydajność ekstrakcji i właściwości przeciwutleniające soku otrzymanego przez tłoczenie, jak i na odzysk związków bioaktywnych z produktów ubocznych jagód (placka tłocznego). Zastosowanie PEF (1, 3 i 5 kV/cm przy 10 kJ/kg) znacząco zwiększyło wydajność soku (o 28%) w porównaniu z próbką niepoddaną obróbce. Sok uzyskany z jagód poddanych wstępnej obróbce PEF miał znacznie wyższą całkowitą zawartość fenoli (o 43%), całkowitą zawartość antocyjanów (o 60%) i aktywność przeciwutleniającą (o 31%). Zwiększenie intensywności obróbki PEF powyżej 1 kV/cm nie wpłynęła istotnie na zwiększenie zawartości związków fenolowych oraz poprawę aktywności przeciwutleniającej badanych próbek soku. Wyniki uzyskane w tych badaniach wskazują na zasadność wykorzystania PEF jako łagodnej metody obróbki wstępnej owoców stosowanej w celu poprawy wydajności ekstrakcji związków fenolowych [25].

Puértolas i wsp. [1] badali wpływ PEF na poprawę ekstrakcji antocyjanów i fenoli z czerwonych winogron na etapie maceracji i fermentacji w procesie produkcji wina. Stwierdzono, że zwiększenie natężenia pola elektrycznego z 2 do 7 kV/cm spowodowało wzrost szybkości ekstrakcji antocyjanów i fenoli ogółem. Przedstawiony w cytowanej pracy ciągły system PEF stanowił ważny krok w kierunku zastosowania technologii PEF w skali przemysłowej.

Wpływ wstępnej obróbki skórki winogron za pomocą pulsacyjnego pola elektrycznego przy natężeniu wynoszącym 5 i 10 kV/cm na intensywność koloru, zawartość antocyjanów i polifenoli ogółem oraz cechy wina po fermentacji był badany przez López i wsp. [26]. Zastosowanie obróbki PEF w temperaturze pokojowej powodowało zwiększenie intensywności koloru i wzrost zawartości antocyjanów w odniesieniu do próbek kontrolnych podczas całego procesu winifikacji. Wraz ze wzrostem natężenia pola elektrycznego z 5 do 10 kV/cm, w trakcie procesu maceracji następował wzrost intensywności koloru wina oraz wzrastało stężenie antocyjanów. Wyniki te wskazują, że obróbka PEF przed etapem maceracji w procesie produkcji wina czerwonego może przyczynić się do skrócenia czasu trwania maceracji [26].

Liu i wsp. [27] oceniali ekstrakcję rozpuszczalnych w wodzie związków fenolowych z cebuli, która była wspomagana przez obróbkę pulsacyjnym polem elektrycznym oraz badali aktywność przeciwutleniającą ekstraktów. Wyniki wykazały, że wydajność ekstrakcji rozpuszczalnych w wodzie związków fenolo-

wych z cebuli znacznie wzrosła po obróbce PEF. Optymalne parametry pulsacyjnego pola elektrycznego wynosiły: 2,5 kV/cm, 90 impulsów w temperaturze 45°C zarówno dla związków fenolowych, jak i związków flawonoidowych. W tych warunkach zawartość związków fenolowych wzrosła o 2,2 w porównaniu z próbką kontrolną (bez PEF).

Większość produkowanych na świecie pomidorów jest spożywana w postaci przetworzonej: pomidorów obranych (całych lub pokrojonych w kostkę), soków, sosów i ketchupu, których produkcja często wymaga usunięcia z nich skórki [28]. Przemysłowe przetwarzanie pomidorów zazwyczaj obejmuje fazę obierania owoców, polegającą na zastosowaniu roztworów gorącego ługu lub blanszowania parowego. Jednak wymienione metody mają różne wady, takie jak: konieczność usunięcia żrącego roztworu odpadowego o wysokim pH oraz nadmierne zużycie wody i energii [29]. Jak sugeruje literatura, można oczekiwać, że obróbka wstępna PEF będzie miała korzystny wpływ również na permeabilizację skórek pomidora, umożliwiając odzyskiwanie cennych związków wewnątrzkomórkowych [30]. Połączenie blanszowania parowego (ang. SB - steam blanching) całych pomidorów z pulsacyjnym polem elektrycznym, oprócz zmniejszenia energii potrzebnej do obierania pomidorów, może znacząco przyczynić się do odzyskiwania karotenoidów ze skórek. PEF i SB, wywołując znaczne uszkodzenia na poziomie naskórka, spowodowały wzrost zawartości karotenoidów ogółem (do 188% dla PEF i 189% dla SB) oraz mocy antyoksydacyjnej (do 372% dla PEF i 305% dla SB) w odniesieniu do skórek niepoddanych obróbce pomidorów. Zastosowanie zabiegu skojarzonego (PEF+SB) znacząco zwiększyło zawartość karotenoidów i moc przeciwutleniającą ekstraktów [29].

Manzoor i wsp. [31] badali wpływ pulsacyjnego pola elektrycznego różnym natężeniu (3–7 kV/cm i 0–300  $\mu$ s) na wydajność ekstrakcji karotenoidów ze skórki i pulpy pomidora w mieszaninie heksan:aceton:etanol i możliwość zmniejszenia ilości mniej „zielonych” rozpuszczalników w medium ekstrakcyjnym. Permeabilizacja miążgi pomidorowej PEF nie zwiększyła istotnie ekstrakcji karotenoidów. Natomiast traktowanie PEF przy 5 kV/cm poprawiło ekstrakcję karotenoidów ze skórki pomidora o 39% w porównaniu z próbką kontrolną w mieszaninie heksan:etanol:aceton (50:25:25). Zwiększenie natężenia pola elektrycznego z 5 do 7 kV/cm nie zwiększało istotnie ekstrakcji karotenoidów [31]. Obecność acetonu w mieszaninie rozpuszczalników nie wpływała pozytywnie na ekstrakcję karotenoidów, gdy skórki pomidorów były poddawane działaniu PEF. Zastosowanie obróbki PEF pozwoliło natomiast na zmniejszenie udziału procentowego heksanu w mieszaninie ekstrakcyjnej z 45 do 30% bez wpływu na wydajność ekstrakcji karotenoidów. Zdolność antyoksydacyjna ekstraktów uzyska-

nych ze skórki pomidora była skorelowana ze stężeniem karotenoidów i obróbka PEF nie miała na nią wpływu [31].

Kapusta czerwona i burak ćwikłowy są bogatym źródłem związków bioaktywnych: antocyjanów i betalain. Do ekstrakcji soku z kapusty czerwonej stosowano pulsacyjne pole elektryczne o parametrach: natężenie pola elektrycznego 1 kV/cm, 0,66  $\mu$ F i 20 impulsów. PEF wykorzystywano również do zwiększenia wydajności ekstrakcji soku z buraków czerwonych. W tym przypadku parametry pulsacyjnego pola elektrycznego wynosiły: natężenie pola elektrycznego 1,5 kV/cm, 0,66  $\mu$ F i 20 impulsów [32]. W badaniach oznaczono sumę zawartości związków polifenolowych, zawartość antocyjanów (czerwona kapusta) i betalain (buraki) oraz całkowitą aktywność antyoksydacyjną wyciśniętego soku. Obróbka pulsacyjnym polem elektrycznym zwiększyła ( $p \leq 0,01$ ) ekstrakcję soku, sumę fenoli, antocyjanów, betalain oraz aktywność przeciwutleniającą zarówno soku z czerwonej kapusty, jak i soku z buraków w porównaniu z próbkami przygotowanymi bez PEF [32].

W badaniach Bobinaitė [32] oceniano wpływ pulsacyjnego pola elektrycznego (PEF) na ekstrakcję antocyjanów z czerwonej kapusty przy użyciu wody. Zastosowanie PEF zwiększyło wydajność ekstrakcji antocyjanów z czerwonej kapusty 2,15 razy w porównaniu do próbek kontrolnych ( $p < 0,05$ ). Stabilność cieplna próbek poddanych działaniu PEF i próbek kontrolnych nie różniła się istotnie ( $p > 0,05$ ).

### **3. ZASTOSOWANIE PULSACYJNEGO POLA ELEKTRYCZNEGO W EKSTRAKЦИИ ZWIĄZKÓW FENOLOWYCH Z PRODUKTÓW UBOCZNYCH PRODUKCJI PIWA**

Młóto piwne (ang. BSG - beer spent grain) jest produktem ubocznym powstającym w produkcji piwa. Zawiera dużo związków bioaktywnych np. związków fenolowych, które można wykorzystać jako składniki funkcjonalne w przemyśle spożywczym [34]. Martín-García i wsp. [34] jako wstępną obróbkę do ekstrakcji tych związków stosowali pulsacyjne pole elektryczne (PEF). Przy optymalnych warunkach PEF wynoszących: 2,5 kV/cm, 50 Hz i 14,5 Hz, stężenie wolnych i związanych związków fenolowych było, odpowiednio: 2,7 i 1,7 razy wyższe niż w przypadku ekstrakcji bez obróbki wstępnej PEF. Wyniki badań wskazują, że zastosowanie PEF jako obróbki wstępnej młóta browarnianego poprawia odzysk fenoli [34]. W kolejnym badaniu obróbka wstępna pulsacyjnym polem elektrycznym (PEF) przy 2,8 kV/cm z 3000 impulsami o szerokości impulsu 20  $\mu$ s została zastosowana do młóta browarnianego (BSG), a następnie do ekstrakcji wodnej w temperaturze 55°C, 220 obr./min przez 16 godzin. Wstępna obróbka PEF wpłynęła na znaczne zwiększenie wydajności ( $p < 0,05$ ) węglowodanów, białka,

skrobi i cukru redukującego w ekstraktach z BSG w porównaniu z próbkami niepoddanymi obróbce [35].

Pulsacyjne pole elektryczne stosowano również w celu poprawy przepuszczalności błony komórkowej drożdży do ekstrakcji białka z drożdży piwarskich. Wyniki wykazały, że wydajność ekstrakcji białka na poziomie  $2,788 \pm 0,014\%$  osiągnięto gdy natężenie pola elektrycznego wynosiło 10 kV/cm, liczba impulsów 8, a stosunek ciecz-ciało stałe wynosił 40:1 [27].

Jednym z produktów ubocznych w przemyśle piwarskim są drożdże piwarskie z odpadów piwnych. Są one źródłem ekstraktów drożdżowych, które wzmacniają lub nadają mięsny posmak produktom spożywczym. Co więcej, w drożdżach z odpadów piwnych jest dość wysoka zawartość trehalozy i można je uznać za ważne źródło tego cukru. Obecnie trehaloza jest wysoko ceniona, ponieważ może działać jako zmiatacz wolnych rodników. Stosowana jest w produkcji kosmetyków jako składnik nawilżający, do produkcji sztucznych łez oraz jako utrwalacz zapachów [36].

W procesie ekstrakcji trehalozy z drożdży piwarskich z odpadów piwnych stosowano pulsacyjne pole elektryczne o wysokiej intensywności w celu poprawy przepuszczalności błony komórkowej drożdży. Badano kilka niezależnych zmiennych, takich jak: pH (od 3 do 7), natężenie pola elektrycznego (od 0 do 50 kV/cm), liczba impulsów (od 0 do 10) i stosunek ciecz-ciało stałe (od 20:1 do 60:1). Wyniki wykazały, że w warunkach natężenia pola elektrycznego 19,97 kV/cm, przy liczbie impulsów 6 i stosunku ciecz-ciało stałe 30:1, stopień ekstrakcji trehalozy osiągnął 2,635% [37]. Ponadto, wydajność ekstrakcji trehalozy poddanej obróbce PEF porównywano z innymi dwiema metodami wspomagającymi ekstrakcję: promieniowaniem mikrofalowym i ultradźwiękami. Stwierdzono, że wydajność ekstrakcji w warunkach oddziaływania PEF była 15,96 razy wyższa niż w warunkach działania fal mikrofalowych i 34,08 razy wyższa niż w wypadku zastosowania ultradźwięków. Badanie wykazało, że PEF można uznać za obiecującą technikę wspomagającą ekstrakcję trehalozy z odpadów piwnych [37].

## UWAGI KOŃCOWE

W niniejszym przeglądzie omówiono wpływ różnych czynników na ekstrakcję przy wspomaganie pulsacyjnym polem elektrycznym ze wskazaniem optymalnych parametrów jego stosowania w celu zwiększenia wydajności ekstrakcji związków biologicznych z kilku rodzajów materiałów: glonów, warzyw, owoców oraz drożdży piwarskich. Z porównania ekstrakcji z zastosowaniem pulsacyjnego pola elektrycznego z innymi metodami ekstrakcji, włączając konwencjonalne i niekonwencjonalne metody, wynika, że wydajności ekstrakcji tą metodą jest większa

przy krótszym czasie obróbki i mniejszym zużyciu energii. Ekstrakcja wspomagana za pomocą PEF charakteryzuje się niską temperaturą procesu, dzięki czemu zapobiega się utracie związków wrażliwych na ciepło.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] E. Puértolas, N. López, G. Saldaña, I. Álvarez, J. Raso, *J. Food Eng.*, 2010, **98(1)**, 120.
- [2] I. Sensoy, S. Sastry, *J. Food Sci.*, 2004, **69(1)**, 127.
- [3] K. Loginova, E. Vorobiev, O. Bals, N. Lebovka, *J. Food Eng.*, 2011, **102(4)**, 340.
- [4] S. Toepfl, V. Heinz, D. Knorr, *Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry. Fundamentals and Applications*. Springer, New York, 2006.
- [5] W. Frey, C. Gusbeth, T. Schwartz, *Mol. Membr. Biol.*, 2013, **246(10)**, 769.
- [6] M. Sack, J. Sigler, S. Frenzel, C. Eing, J. Arnold, T. Michelberger, G. Müller, *Food Eng. Rev.*, 2010, **2(2)**, 147.
- [7] K. Nowosad, M. Sujka, U. Pankiewicz, R. Kowalski, *J. Food Sci. Technol.*, 2021, **58(2)**, 397.
- [8] L. Brennan, P. Owende, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2010, **14(2)**, 557.
- [9] I. Rawat, R. Kumar, T. Mutanda, F. Bux, *Appl. Energy*, 2013, **103**, 444.
- [10] L. Gouveia, A. Oliveira, *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 2009, **36(2)**, 269.
- [11] C. Joannes, C. Sipaut, J. Dayou, S. Yasir, R. Mansa, *Int. J. Renew. Energy Res.*, 2015, **5(2)**, 598.
- [12] M. Goettel, C. Eing, C. Gusbeth, R. Straessner, W. Frey, *Algal Res.*, 2013, **2(4)**, 401.
- [13] H. Greenwell, L. Laurens, R. Shields, R. Lovitt, K. Flynn, *J. R. Soc. Interface*, 2010, **7(46)**, 703.
- [14] M. Zbinden, B. Sturm, R. Nord, W. Carey, D. Moore, H. Shinogle, S. Stagg Williams, *Biotechnol. Bioeng.*, 2013, **110(6)**, 1605.
- [15] G. Pataro, M. Goettel, R. Straessner, C. Gusbeth, G. Ferrari, W. Frey, *Chem. Eng. Trans.*, 2017, **57**, 67.
- [16] W. Adorno, K. Rezzadori, G. Arend, V. Chaves, F. Reginatto, M. Di Luccio, J. Petrus, *Int. J. Food Sci.*, 2017, **52(3)**, 781.
- [17] M. Soquetta, L. Terra, C. Bastos, *Cy-TA J. Food.*, 2018, **16(1)**, 400.
- [18] H. Wijngaard, M. Hossain, D. Rai, N. Brunton, *Food Res. Int.*, 2012, **46(2)**, 505.
- [19] Z. Liu, X. Zeng, M. Ngadi, *J. Food Process. Preserv.*, 2018, **42(9)**, 13755.
- [20] Z. Zhang, Q. Yu, X. Zeng, Z. Han, D. Sun, R. Muhammad-Aadil, *Int. J. Food Sci.*, 2015, **50(5)**, 1130.
- [21] R. Aadil, X. Zeng, Z. Han, A. Sahar, A. Khalil, U. Rahman, T. Mehmood, *J. Food Process. Preserv.*, 2018, **42(2)**, 13507.
- [22] E. Puértolas, I. de Marañón, *Food Chem.*, 2015, **167**, 497.
- [23] I. Al-Abdoulhadi, S. Al-Ali, K. Khurshid, F. Al-Shryda, A. Al-Jabr, A. Abdallah, *Indian J. Sci. Technol.*, 2011, **4(10)**, 1262.
- [24] A. Siddeeq, M. Faisal Manzoor, M. Haseeb Ahmad, N. Ahmad, Z. Ahmed, M. Kashif Iqbal Khan, A. Ammar, *Process*, 2019, **7(9)**, 585.
- [25] R. Bobinaité, G. Pataro, N. Lamanauskas, S. Šatkauskas, P. Viškelis, G. Ferrari, *J. Food Sci. Technol.*, 2015, **52(9)**, 5898.
- [26] N. López, E. Puértolas, S. Condón, I. Álvarez, J. Raso, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 2008, **9(4)**, 477.
- [27] M. Liu, M. Zhang, S. Lin, J. Liu, Y. Yang, Y. Jin, *Afr. J. Microbiol. Res.*, 2012, **6(22)**, 4739.
- [28] C. Rock, W. Yang, R. Goodrich-Schneider, H. Feng, *Food Eng. Rev.*, 2012, **4(1)**, 1.
- [29] G. Pataro, D. Carullo, S. Siddique, M. Falcone, F. Donsi, G. Ferrari, *J. Food Eng.*, 2018, **233**, 65.
- [30] F. Barba, O. Parniakov, S. Pereira, A. Wiktor, N. Grimi, N. Boussetta, E. Vorobiev, *Food Res. Int.*, 2015, **77**, 773.

- [31] M. Manzoor, X. Zeng, A. Rahaman, A. Siddeeg, R. Aadil, Z. Ahmed, D. Niu, *J. Food Sci. Technol.*, 2019, **56(5)**, 2355.
- [32] V. Kannan, *Food Sci. Technol.*, 2011, 11.
- [33] R. Bobinaitė, G. Pataro, N. Lamanauskas, S. Šatkauskas, P. Viškelis, G. Ferrari, *J. Food Sci. Technol.*, 2015, **52(9)**, 5898.
- [34] B. Martín-García, U. Tylewicz, V. Verardo, F. Pasini, A. Gómez-Caravaca, M. Caboni, M. Dalla Rosa, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 2020, **64**, 102402.
- [35] B. Kumari, B. Tiwari, D. Walsh, T. Griffin, N. Islam, J. Lyng, D. Rai, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 2019, **54**, 200.
- [36] B. Gibson, C. Boulton, W. Box, N. Graham, S. Lawrence, R. Linfoth, K. Smart, *Yeast*, 2008, **25(8)**, 549.
- [37] Y. Jin, M. Wang, S. Lin, Y. Guo, J. Liu, Y. Yin, *Afr. J. Biotechnol.*, 2011, **10(82)**, 19144.

Praca wpłynęła do Redakcji 26 sierpnia 2021 r.