

Skoncentrowane pole mikrofalowe (CMF) jako niekonwencjonalna metoda utrwalania płynnych produktów spożywczych w ramach „teorii płotkowej”

Streszczenie. Skoncentrowane pole mikrofalowe (CMF) jest jedną z niekonwencjonalnych metod utrwalania żywności. W pracy scharakteryzowano urządzenie, w którym można metodą CMF utrwalać płynne produkty spożywcze. W części eksperymentalnej przetestowano skuteczność oddziaływania CMF w odniesieniu do bakterii *Escherichia coli*, którymi zaszczepiono masę jajową i białko jaja kurzego. W wielowariantowym eksperymencie stwierdzono skuteczność metody CMF w odniesieniu do inaktywacji *E. coli*, co czyni metodę atrakcyjną w ramach „teorii płotkowej”.

Abstract. Concentrated Microwave Field is one of the unconventional food preservation method. Our CMF equipment was characterized in the work. During the practical experiment we found that CMF had preservation effect on *Escherichia coli* placed in Liquid Whole Eggs and in the liquid albumen. Results of our experiment confirmed the effectiveness of CMF for liquid food as a part of more complex treatment in the context of hurdle theory (**Concentrated Microwave Field CMF as unconventional preservation methods of liquid food in the framework of „hurdle theory”**).

Słowa kluczowe: skoncentrowane pole mikrofalowe, utrwalanie żywności, teoria płotkowa, *Escherichia coli*

Keywords: concentrated microwave field, food preservation, hurdle theory, *Escherichia coli*

Wstęp

Klienci w coraz większym stopniu chcieli by kupować żywność smaczną, odżywczą, jak najbardziej naturalną i coraz łatwiejszą w przyrządzeniu [1]. Nietermiczne metody utrwalania żywności, do których zaliczyć można m.in. pulsacyjne pole elektryczne (PEF) czy skoncentrowane pole mikrofalowe (CMF), wpływają w niewielkim stopniu na obniżenie wartości odżywczej żywności, walorów smakowo-zapachowych czy właściwości funkcjonalnych. Wiele badań wskazuje, że metody te są coraz skuteczniejsze w inaktywacji drobnoustrojów przy jednoczesnym zachowaniu walorów sensorycznych utrwalanej żywności [2, 3]. Za pomocą oddziaływań PEF [4] utrwała się najczęściej takie płynne produkty spożywcze jak masa jajowa, soki owocowe oraz produkty mleczne. Podobną funkcję może pełnić utrwalanie takich produktów za pomocą skoncentrowanego pola mikrofalowego CMF.

Fale mikrofalowe mieszczą się w spektrum fal elektromagnetycznych. Charakteryzują się częstotliwością w przedziale od 300 MHz do 300 GHz, co odpowiada długości fali od 1 m do 1 mm. Taki rodzaj niejonizującego promieniowania elektromagnetycznego absorbowany jest na poziomie molekularnym, co skutkuje w zmianach energii oscylacyjnej cząsteczek oraz podniesieniem temperatury danego układu [5]. Fale mikrofalowe używane są jako źródło ciepła już od lat czterdziestych XX wieku. Ich zastosowanie ma bardzo szeroki zakres: od technologii polimerów i przemysłu ceramicznego, poprzez medycynę, aż po przemysł spożywczy będący największym „konsumentem” energii mikrofalowej, która znajduje zastosowanie w: blanszowaniu, gotowaniu, rozmrażaniu, pasteryzacji, sterylizacji, pieczeniu, odgrzewaniu i wytapianiu tłuszczów [6].

Celem pracy było określenie przydatności skoncentrowanego pola mikrofalowego jako jednej z niekonwencjonalnych metod utrwalania płynnych produktów spożywczych w ramach „teorii płotkowej”.

Nietermiczne skutki oddziaływania fal mikrofalowych

Zdefiniowanie biologicznych efektów działania mikrofal sprawia wiele trudności i prowadzi często do różnych wniosków. Stosunkowo nieduża jest ilość informacji na temat zachodzących reakcji i interakcji pomiędzy

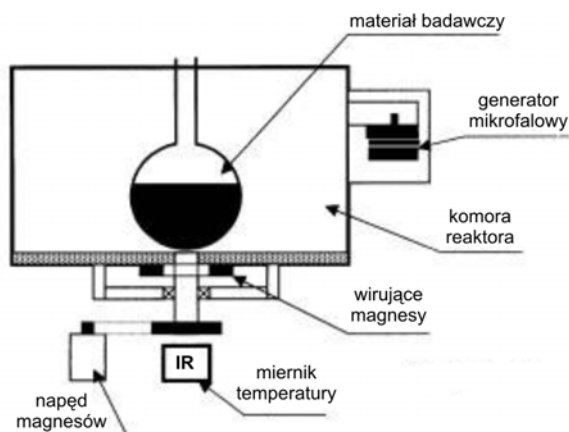
mikrofalami a ustrojem biologicznym. Przyjmowało się dotąd pogląd, że promieniowanie mikrofalowe nie jest w stanie indukować zmian biochemicznych inaczej niż przez wzrost temperatury. Z biegiem czasu znaleziono dowody na nietermiczne efekty oddziaływania mikrofal. Prowadzone badania dostarczają coraz więcej dowodów na oddziaływanie mikrofal na biologiczne struktury komórki. Stwierdzono na przykład, że o charakterze interakcji decyduje natężenie pola, jego częstotliwość, rodzaj fal, modulacja oraz czas ekspozycji. Zmiany te początkowo przypisywane były i odczytywane jako skutki pojawienia się czynnika termicznego, niemniej jednak na podstawie przeprowadzonych dotąd doświadczeń nad wpływem promieniowania mikrofalowego na funkcjonowanie komórki stwierdzono, że może ono wywoływać uszkodzenie chromosomów oraz wpływać na czynności życiowe komórki [5]. Z tego też względu można stwierdzić, że utrwalanie płynnych produktów spożywczych ma miejsce nie tylko ze względu na efekt termiczny, ale również ze względu na inne pozatermiczne czynniki prowadzące do inaktywacji drobnoustrojów.

Reaktor mikrofalowy do generowania skoncentrowanego pola mikrofalowego (CMF)

Reaktor mikrofalowy RM2001 firmy Plazmatronika, będący na wyposażeniu Katedry Technologii Surowców Zwierzęcych i Zarządzania Jakością Wydziału Nauk o Żywności Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, zasilany jest jednofazowo prądem o napięciu 230V i częstotliwości 50 Hz, zaś maksymalna moc mikrofalowa urządzenia wynosi 800 W. Urządzenie może być wykorzystywane do syntezy organicznej oraz w selektywnej preparatyce rozmaitych substancji organicznych, niemniej jednak w serii naszych badań służyło jako generator skoncentrowanego pola mikrofalowego CMF (concentrated microwave field), które skierowane było na naczynie reakcyjne z badanym płynnym produktem spożywczym takim jak np. masa jajowa lub białko jaja kurzego. Urządzenie umożliwia również realizowanie następujących funkcji:

- mieszanie cieczy z granulatami za pomocą opatentowanego mieszadła magnetycznego,
- sterowanie urządzeniem za pomocą komputera,

- zwiększanie koncentracji pola mikrofalowego za pomocą obracających się skrzydełek ulokowanych u spodu naczynia,
- precyzyjny pomiar temperatury możliwy dzięki zastosowaniu bezkontaktowego termometru podczerwieni ulokowanego pod dnem naczynia.



Rys. 1. Uproszczony schemat reaktora mikrofalowego CMF

Elementem odróżniającym reaktor od typowej kucharki mikrofalowej jest wirujący magnes pełniący funkcje mieszadła magnetycznego, mieszacza i koncentratora pola mikrofalowego, który dzięki toroidalnemu kształtowi pozwala przesłać wzdłuż swojej osi promieniowanie podczerwone w celu umożliwienia bezkontaktowego pomiaru temperatury w naczyniu reakcyjnym. W reaktorze zastosowano także płynną, tak zwaną nie-pulsacyjną regulację i stabilizację poziomu mocy mikrofalowej a cały system połączono z komputerem, w celu umożliwienia kontroli procesu i jego monitoringu. Pozostałe elementy konstrukcyjne takie jak magnetron, wnęka mikrofalowa, drzwi, niczym nie różnią się od tych spotykanych w typowych kuchenkach mikrofalowych.



Rys. 2. Reaktor mikrofalowy wraz z przystawką jednomodową jako stanowisko badawcze do generowania skoncentrowanego pola mikrofalowego CMF

Reaktor mikrofalowy RM2001 posiada możliwość pracy w dwóch trybach: impulsowym i ciągłym. Dzięki oprogramowaniu komputerowemu możliwy jest dobór odpowiednich parametrów dla każdego trybu w danym układzie doświadczalnym.

Zmienne parametry trybu impulsowego:

- ilość paczek (maks.10 impulsów)
- ilość impulsów w paczce (maks.10)
- odstęp pomiędzy paczkami [s]

- szerokość impulsów [x 10 ms]
- odstęp pomiędzy impulsami [x 100 ms]
- ilość wygenerowanych impulsów
- moc

Zmienne parametry trybu ciągłego:

- czas procesu [minuty: sekundy]
- szerokość impulsu [x 10 ms]
- odstęp pomiędzy impulsami [x 100 ms]
- ilość wygenerowanych impulsów
- moc



Rys. 3. Widok na przystawkę jednomodową służącą „zagęszczeniu” pola mikrofalowego w tzw. skoncentrowane pole mikrofalowe CMF

Urządzenie posiada również przystawkę jednomodową umożliwiającą uzyskanie wysokiego natężenia pola mikrofalowego w wybranym miejscu wnęki, czyli tam gdzie przewidziane jest umieszczenie próbki badawczej. Działanie przystawki polega na ukierunkowaniu mikrofal na pewien zdefiniowany obszar wokół naczynia reakcyjnego.

Skuteczność utrwalania białka jaja oraz masy jajowej z wykorzystaniem CMF

Badania skuteczności utrwalania przeprowadzono na masie jajowej oraz białku jaja kurzego, badając stopień redukcji bakterii z grupy *coli* po oddziaływaniach CMF w trybie impulsowym (odstęp pomiędzy impulsami wynosił 2 [s], zaś pomiędzy wiązkami 10 [s]) gdzie zastosowano różne dawki energii całkowitej oraz różne ilości cykli procesu.

W badaniach wykorzystano jaja kurze od niosek 30-50 tygodniowych Leghorn Brown. Skorupa jaj przed wybicciem przemywana była denaturatem w celu usunięcia mikroflory. Następnie jaja poddawano wybiciu. Do badań pobierano część białkową jaja oraz masę jajową (w stosunku wagowym 2 części białka : 1 część żółtka). Materiał homogenizowano w homogenizatorze „Buchi Mikser B – 400” przez czas ok. 1s. Wszystkie elementy urządzenia wcześniej myto i dokładnie suszono, zaś 100 cm³ tak przygotowanej próby przenoszono do wysterylizowanej zlewki i przykrywano szczelną folią aluminiową.

Zawiesinę bakterii testowych przygotowano po zaszczepieniu bakteriami *Escherichia coli* podłoża (zbuforowana woda peptonowa) i inkubacji w 37°C prowadzonej do uzyskania stężenia komórek bakteryjnych na poziomie 10⁸ [jtk/cm³]. Tak sporządzoną zawiesinę wykorzystywano do zaszczepiania białka jaja oraz masy jajowej. Oznaczenie liczby bakterii z grupy *coli* przeprowadzono wg PN-93/A-86508.

Redukcję liczby mikroorganizmów obliczono wg wzoru:

$$R = \log N/N_0$$

gdzie: N – ilość komórek, zdolna do wytworzenia kolonii, znajdująca się w 1 ml próbki kontrolnej, No – ilość komórek, zdolna do wytworzenia kolonii, znajdująca się w 1 ml próbki utrwalonej metodą CMF. Wielkość redukcji odpowiadająca 1 rzędowi redukcji (1D) równa jest 90% inaktywacji drobnoustrojów w odniesieniu do próby kontrolnej.

Na podstawie wcześniejszych badań ustalono, że utrwalany produkt (masa jajowa lub białko) poddany będzie w eksperymencie w jednym cyklu trzem różnym dawkom energii całkowitej na poziomie: 5 [kJ] – 70 impulsów CMF, 5,75 [kJ] – 80 impulsów lub 6,5 [kJ] – 90 impulsów w cyklu. Równoległym drugim czynnikiem zmienności była ilość cykli (powtórzeń oddziaływania CMF): 1, 3 lub 6, dlatego w eksperymencie było ostatecznie 9 wariantów badawczych (Tab. 1).

Tabela 1. Układ badawczy: 9 wariantów oddziaływań CMF o różnej ilości energii całkowitej, której poddany był produkt

warianty	5 [kJ]	5,75 [kJ]	6,5 [kJ]
6 cykli	30 [kJ]	34,5 [kJ]	39 [kJ]
3 cykle	15 [kJ]	17,25 [kJ]	19,5 [kJ]
1 cykl	5 [kJ]	5,75 [kJ]	6,5 [kJ]

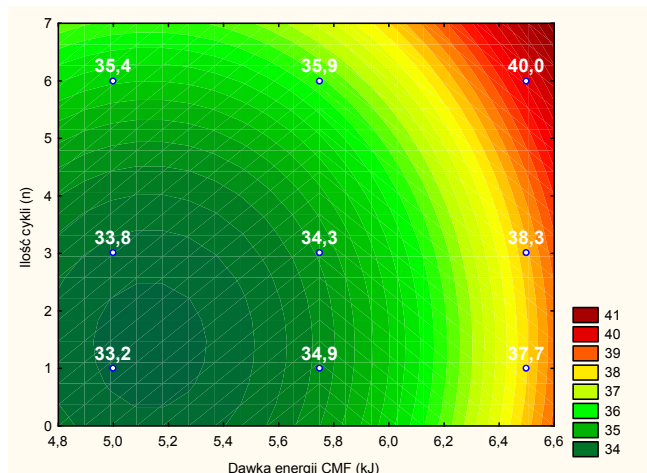
Materiał do badań z użyciem CMF umieszczano we wcześniej wysterylizowanych próbkach. Naczynia umieszczono w naczyniu wypełnionym lodem łuskowym w celu schłodzenia płynnego produktu do temperatury ok. 8°C. Jeśli doświadczenie wykonywano w 3 lub 6 cyklach każdorazowo chłodzono próbkę po cyklu działania CMF ponownie do 8°C.

Uzyskane wyniki poddane były obliczeniom statystycznym z wykorzystaniem m.in. metody „krzywych odpowiedzi” (*Response Surface Methodology*) w pakiecie programu Statistica 10.0.

Zależność temperatury końcowej białka jaja od wariantu badawczego CMF (gdzie całkowita dawka energii wynosiła od 5 [kJ] do 39 [kJ]) przedstawiona została w Tab. 2 oraz na rys.4.

Tabela 2. Temperatura końcowa białka jaja kurzego po oddziaływaniach CMF w zależności od ilości energii w jednym cyklu oraz ilości cykli

warianty	5 [kJ]	5,75 [kJ]	6,5 [kJ]
6 cykli	35,4 [°C]	35,9 [°C]	40,0 [°C]
3 cykle	33,8 [°C]	34,3 [°C]	38,3 [°C]
1 cykl	33,2 [°C]	34,9 [°C]	37,7 [°C]



Rys. 4. „Krzywa odpowiedzi” (*Response Surface Methodology*) oparta o wyniki z Tab. 2, ukazująca temperaturę końcową białka jaja kurzego po oddziaływaniach CMF w zależności od ilości energii [kJ] oraz cykli [-]

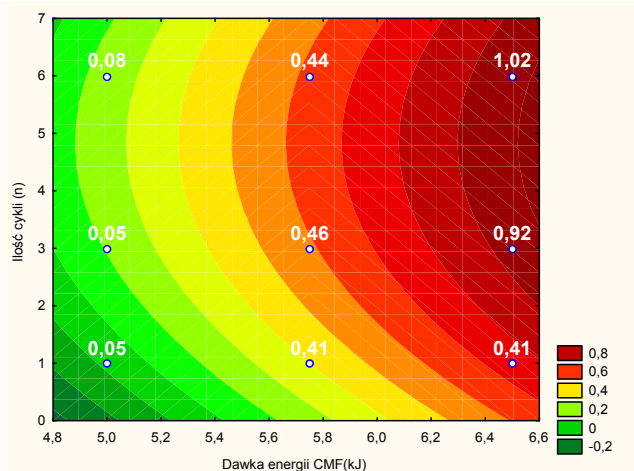
Zastosowanie 1 cyklu działania CMF o najniższej energii 5 [kJ] spowodowało wzrost temperatury białka do 33,2°C, zaś oddziaływanie sześcioma cyklami przy najwyższej

dawce energii całkowitej 39 [kJ] spowodowało przyrost temperatury do 40°C. Zaobserwować można było większą zależność temperatury końcowej produktu od zmiennej „dawka energii” (maksymalna różnica wynosi 4,6°C dla 6 cykli) w porównaniu do zmiennej „ilość cykli” oddziaływań CMF gdzie zaobserwowany przyrost temperatury (w ramach danej dawki energii) był nie większy niż o 2,3°C (dla E=6,5 [kJ]).

Stopień redukcji bakterii *Escherichia coli* w zaszczepionym do poziomu 10^8 jtk/cm³ białku jaja kurzego po oddziaływaniach CMF przedstawiono w Tab. 3 oraz na Rys. 5.

Tabela 3. Stopień redukcji bakterii *Escherichia coli* w białku jaja kurzego po oddziaływaniach CMF w zależności od ilości energii w jednym cyklu oraz ilości cykli

warianty	5 [kJ]	5,75 [kJ]	6,5 [kJ]
6 cykli	0,08	0,44	1,02
3 cykle	0,05	0,46	0,92
1 cykl	0,05	0,41	0,41



Rys. 5. „Krzywa odpowiedzi” (*Response Surface Methodology*) oparta o wyniki z Tab. 3, ukazująca stopień redukcji *Escherichia coli* w białku jaja kurzego po oddziaływaniach CMF w zależności od ilości energii [kJ] oraz cykli [-]

Zastosowanie nawet maksymalnej liczby cykli oddziaływań CMF (tj. 6) przy niskiej dawce energii 5 [kJ] nie prowadziło do istotnej redukcji bakterii *E. coli*. Dopiero działanie 90 impulsami CMF, co odpowiadało ilości energii 6,5 [kJ] w każdym z 6 cykli (łącznie 540 impulsów stanowiących równowartość 39 [kJ] energii) powodowało redukcję drobnoustrojów o ponad 1 rząd logarytmiczny (Tab. 3 oraz Rys. 5). Na podstawie Rys. 5 można stwierdzić, że stopień redukcji *Escherichia coli* uzależniony był przede wszystkim od zmiennej „dawka energii”, co wywnioskować można z dominującego „południkowego” przebiegu krzywych oraz analizy wartości stopnia redukcji *E.coli*: 0,61 dla E=6,5 [kJ] oraz 0,94 dla 6 cykli.

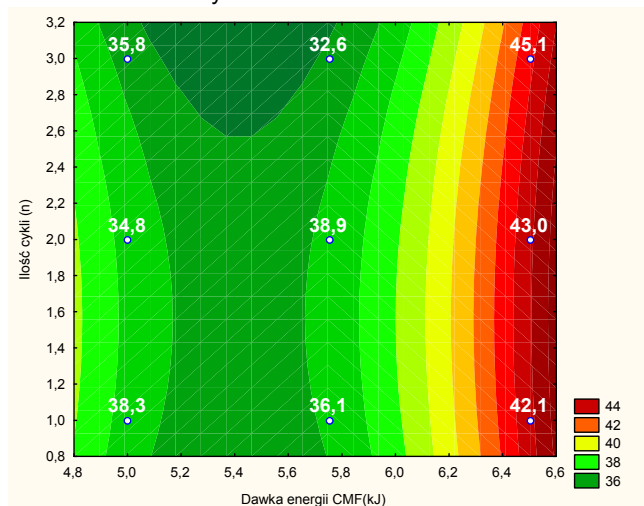
W drugiej części eksperymentu przeanalizowano temperaturę końcową masy jajowej po oddziaływaniach CMF oraz skuteczność tej metody w inaktywacji *Escherichia coli*, tak jak to miało miejsce w odniesieniu do białka jaja kurzego.

Tabela 4. Temperatura końcowa masy jajowej po oddziaływaniach CMF w zależności od ilości energii w jednym cyklu oraz ilości cykli

warianty	5 [kJ]	5,75 [kJ]	6,5 [kJ]
6 cykli	35,8 [°C]	32,6 [°C]	45,1 [°C]
3 cykle	34,8 [°C]	38,9 [°C]	43,0 [°C]
1 cykl	38,3 [°C]	36,1 [°C]	42,1 [°C]

Temperatura końcowa po oddziaływaniach CMF w masie jajowej była generalnie wyższa w porównaniu do białka, co można tłumaczyć wyższą zawartością suchej

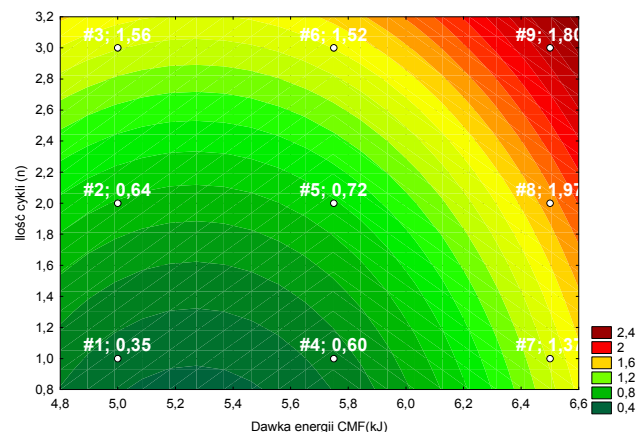
substancji masy jajowej. Wartość końcowa temperatury w zależności od wariantu badawczego przedstawiona została w Tab. 4 oraz na Rys. 6.



Rys. 6. „Krzywa odpowiedzi” (Response Surface Methodology) oparta o wyniki z Tab. 4, ukazująca temperaturę końcową masy jajowej po oddziaływaniach CMF w zależności od ilości energii [kJ] oraz cykli [-]

Najwyższą wartość temperatury masy jajowej po oddziaływaniach CMF wynoszącą 45,1°C stwierdzono dla wariantu 6 cykli przy E=6,5 [kJ]. Trudno jednoznacznie wskazać przyczynę, dla której najniższą temperaturę końcową wynoszącą 32,6°C uzyskano dla 3 cykli przy E=5,75 [kJ]. Natomiast na podstawie uzyskanych wartości temperatury końcowej i charakteru krzywych na Rys. 6 można stwierdzić, że głównym czynnikiem zmienności był parametr „dawka energii”, a nie „ilość cykli”.

W przypadku analizy stopnia redukcji bakterii *E. coli* w masie jajowej (Rys. 7, Tab. 5) można stwierdzić, że najlepszy efekt utrwalający osiągnięto przy zastosowaniu maksymalnej dawki energii 6,5 [kJ], zwłaszcza dla 3 i 6 cykli, gdzie najwyższa skuteczność bliska była 2 rzędem logarytmicznym (tj. 1,97 dla 3 cykli i 1,80 dla 6 cykli).



Rys. 7. „Krzywa odpowiedzi” (Response Surface Methodology) oparta o wyniki z Tab. 5, ukazująca stopień redukcji *Escherichia coli* w masie jajowej po oddziaływaniach CMF w zależności od ilości energii [kJ] oraz cykli [-]

W przypadku inaktywacji *E. coli* oddziaływaniem CMF na podstawie analizy wartości w Tab. 5 oraz kształtu krzywych na Rys. 7 można stwierdzić, że obydwa czynniki zmienności, tj. „dawka energii” oraz „ilość cykli” miały porównywalny i istotny wpływ na skuteczność utrwalania masy jajowej.

Tabela 5. Stopień redukcji bakterii *Escherichia coli* w masie jajowej po oddziaływaniach CMF w zależności od ilości energii w jednym cyklu oraz ilości cykli

warianty	5 [kJ]	5,75 [kJ]	6,5 [kJ]
6 cykli	1,56	1,52	1,80
3 cykle	0,64	0,72	1,97
1 cykl	0,35	0,60	1,37

Podsumowanie

Skoncentrowane pole mikrofalowe (CMF) jest jedną z nietermicznych metod utrwalania płynnych produktów spożywczych, takich jak masa jajowa czy płynne białko kurze. Skuteczność metody udowodniona została w niniejszej pracy na przykładzie *Escherichia coli*, aczkolwiek jeszcze niepublikowane badania członków zespołu wskazują na jej skuteczność w odniesieniu również do innych drobnoustrojów, co czyni skoncentrowane pole mikrofalowe CMF szczególnie atrakcyjne w ramach kombinowanej „metody płótkowej”, tzn. równoległego zastosowania różnych niekonwencjonalnych metod utrwalania żywności celem osiągnięcia należącego poziomu bezpieczeństwa mikrobiologicznego produktu [7]. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że metoda CMF ma potencjał wykorzystania jej w praktyce przemysłowej, ale w przypadku równoległego zastosowania jej razem z innymi, stosunkowo łagodnymi metodami utrwalania płynnych produktów żywnościowych.

Autorzy: dr inż. Maciej Oziębłowski i dr inż. Łukasz Bobak, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Nauk o Żywności, ul. Chelmońskiego 37, 51-630 Wrocław, E-mail: Maciej.Oziembowski@up.wroc.pl oraz Lukasz.Bobak@up.wroc.pl; dr inż. Tomasz Drózd, dr inż. Krzysztof Nęcka, dr inż. Stanisław Lis, dr inż. Piotr Nawara, dr inż. Paulina Wrona, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: Tomasz.Drozd@ur.krakow.pl; Krzysztof.Necka@ur.krakow.pl; Stanislaw.Lis@ur.krakow.pl; rtawara@cyf-kr.edu.pl; Paulina.Wrona@ur.krakow.pl.

LITERATURA

- [1] Devlieghere F., Vermeiren L., Debevere J.: New preservation technologies: Possibilities and limitations. *International Dairy Journal*, 2004, 14, 273–285.
- [2] Knorr D.: Technology aspects related to microorganism in functional foods. *Trends in Food Science & Technology*, 1998, 9, 295-306.
- [3] Sitzmann V.: High voltage pulse techniques for food preservation. Ed. Gould G.W. *New methods for food preservation*, Blackie Academic and Professional, London, 1995, 236-252.
- [4] Oziębłowski M., Drózd T., Wrona P.: Oddziaływanie Pulsacyjnych Pól Elektrycznych (PEF) na mikroorganizmy w kontekście technologii żywności. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2013, 12(89), 222-225.
- [5] Banik S., Bandyopadhyay S., Ganguly S.: Bioeffects of microwave – a brief review. *Bioresource Technology*, 2003, 87, 155 – 159.
- [6] Dolińska R., Warchlewski J. R.: Przyszłościowe technologie żywności z udziałem mikrofal i ich wpływ na składniki żywności. *Przemysł Spożywczy*, 2003, 11: 2-6.
- [7] Leistner, L.: Food preservation by combined methods. *Food Res. Int.*, 1992, 25, 151–158.