

ARTUR WIKTOR, MAGDALENA ŚLEDŹ, MAŁGORZATA NOWACKA,
DOROTA WITROWA-RAJCHERT

MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA NISKOTEMPERATUROWEJ PLAZMY W TECHNOLOGII ŻYWNOŚCI

Streszczenie

Celem pracy było opisanie możliwości zastosowania niskotemperaturowej (zimnej) plazmy w badaniach żywności. Technologia ta należy do nowych, nietermicznych technik. Jej potencjalne wykorzystanie w przemyśle spożywczym wiąże się przede wszystkim z utrwalaniem żywności. Możliwości jej praktycznego zastosowania należy upatrywać w bardzo reaktywnych cząsteczkach chemicznych, z których jest złożona. Wolne rodniki, tlen atomowy oraz inne cząsteczki czy jony wykazują inaktywacyjne właściwości w stosunku do wielu mikroorganizmów. Skład chemiczny plazmy różni się w zależności od rodzaju gazu użytego do jej wytworzenia. Mieszanki gazów, najbardziej letalne w stosunku do drobnoustrojów, zawierają tlen cząsteczkowy lub powietrze. Możliwość zastosowania niskotemperaturowej plazmy w przemyśle spożywczym jest obecnie na etapie badań laboratoryjnych. W literaturze tematu podawane są przykłady możliwości jej zastosowania w celu dekontaminacji powierzchni ziaren i nasion, mięsa czy materiałów opakowaniowych. Rosnące zapotrzebowanie rynku na produkty mało przetworzone oraz potrzeba ochrony środowiska uzasadniają konieczność dalszych badań nad technologią niskotemperaturowej plazmy.

Słowa kluczowe: niskotemperaturowa plazma, sterylizacja, dekontaminacja, żywność

Wprowadzenie

Konkurencja na rynku, wzrastający poziom wiedzy żywieniowej konsumentów czy zmieniające się przepisy prawne wymuszają na producentach poszukiwanie nowych rozwiązań technologicznych, możliwych do zastosowania w przetwórstwie spożywczym. Ważnym czynnikiem rozwoju nowych technologii są zagrożenia wynikające ze zmieniających się cech mikroorganizmów patogennych, zmian środowiska naturalnego oraz ciągłego wzrostu „ruchu żywności” na globalnym rynku. To wszystko sprawia, że istnieje potrzeba stałego rozwoju metod przetwarzania i utrwalania żywności. Wśród nowoczesnych technik tego typu należy wymienić zastosowanie m.in. ultra-

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

dźwięków (US), wysokich ciśnień (HHP), pulsacyjnego pola elektrycznego (PEF) czy pulsacyjnego światła [3, 5, 11, 17, 20]. Należą one do tzw. metod nietermicznych, niegrzewczych (ang. *non thermal methods*). Oznacza to, że ich zastosowanie nie wiąże się ze wzrostem temperatury produktu i jest skuteczne w temperaturze otoczenia. Technologia, która spełnia wymagania metod nietermicznych i znajduje się w sferze zainteresowania naukowców jest niskotemperaturowa (zimna) plazma [10].

Definicja i rodzaje plazmy

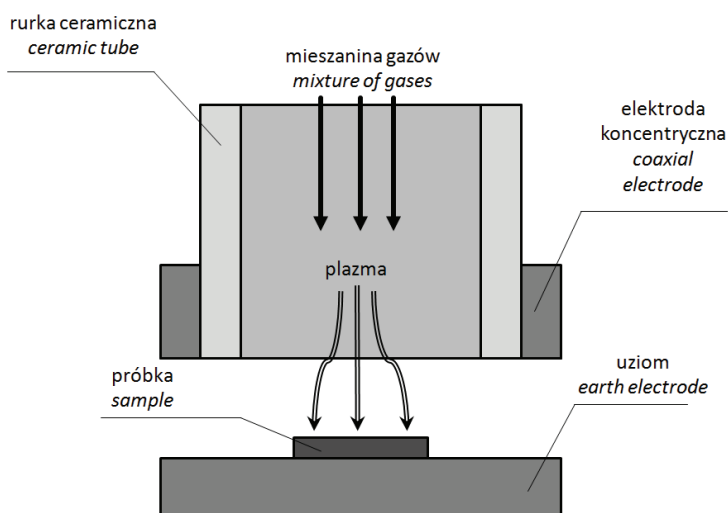
Plazma postrzegana jest jako czwarty, podobny do gazu, stan skupienia. Aby wytworzyć plazmę, należy dostarczyć odpowiednią ilość energii, która umożliwi najpierw przekształcenie substancji z ciała stałego w ciekłe, następnie w gaz i na końcu w plazmę. Energia niezbędna do przekształcenia gazu neutralnego w plazmę związana jest ze zjawiskiem jonizacji oraz dysocjacji gazu. Plazma, ze względu na szeroki zakres warunków ciśnienia i temperatury, w których może powstawać, jest najpowszechniej występującym stanem skupienia we Wszechświecie. Tym niemniej, w warunkach panujących na naszej planecie stan plazmy występuje rzadko i najczęściej obserwowany jest w postaci zorzy polarnej [2].

W zależności od rodzaju, plazma może składać się wyłącznie z cząsteczek zjonizowanych oraz wolnych elektronów (jak w przypadku plazmy wysokotemperaturowej, będącej składnikiem gwiazd czy powstającej podczas wybuchu bomby wodorowej), a może także składać się z mieszaniny zarówno zjonizowanych, jak i niezjonizowanych cząsteczek, atomów w stanie podstawowym i wzbudzonych, wolnych rodników oraz elektronów. Ten rodzaj plazmy powstaje w znacznie niższych temperaturach i nosi nazwę zimnej lub niskotemperaturowej plazmy (ang. *cold plasma lub non-thermal plasma*) [12].

Specyficzną oraz podstawową właściwością plazmy jest obojętność elektryczna, która wiąże się z identyczną liczbą dodatnie i ujemnie naładowanych cząsteczek. Warto podkreślić, że w plazmie możliwe jest występowanie pewnych zakłóceń obojętności elektrycznej, przez co mówi się o jej quasi-neutralności [2]. Z kolei obecność w jej składzie bardzo aktywnych chemicznie cząsteczek, np. rodników hydroksylowych czy tlenu atomowego, który jest uznawany za najbardziej letalny w odniesieniu do drobnoustrojów [9, 15], nadaje plazmie szczególne dekontaminujące właściwości. Inne właściwości wiążą się z tym, że plazma może zawierać w swoim składzie atomy w stanie wzbudzonym. Powrót do stanu podstawowego wiąże się z uwolnieniem pewnej ilości energii. Może to nastąpić na skutek emisji kwantu energii w postaci fotonu albo w wyniku zderzenia z inną cząsteczką chemiczną. Zarówno jedno, jak i drugie zjawisko może wzbudzić reakcję chemiczną korzystną z uwagi na możliwość dekontaminacji żywności czy innej materii [6, 13].

Wytwarzanie plazmy

W zależności od rodzaju plazmę można wytworzyć różnymi metodami. Aby mogła powstać plazma gorąca, niezbędne jest bardzo wysokie ciśnienie i równowaga termodynamiczna pomiędzy elektronami i cięższymi cząsteczkami chemicznymi. Warunkiem jest także istnienie ośrodka, z którego plazma może powstać (powietrze, tlen, hel itp.). Wymagania te wiążą się z koniecznością zastosowania specyficznej aparatury i sprzętu. Do generowania niskotemperaturowej plazmy nie potrzeba aż tak ekstremalnych warunków. Do niedawna wytworzenie i zastosowanie niskotemperaturowej plazmy mogło nastąpić jedynie w warunkach obniżonego ciśnienia. W ostatnim czasie naukowcy i inżynierowie opracowali metody wytwarzania nietermicznej plazmy w warunkach ciśnienia atmosferycznego. Doprowadziło to do obniżenia kosztów procesu i skrócenia jego czasu, przez co zwiększyły się możliwości przemysłowych zastosowań. Większość urządzeń wytwarzających nisko temperaturową plazmę (w skali laboratoryjnej) przeznaczona jest jednak do aplikacji biomedycznych, w związku z czym zastosowanie ich do celów związanych z obróbką żywności wymaga odpowiedniej adaptacji [12]. Wiele zespołów badawczych konstruuje samodzielnie generatory niskotemperaturowej plazmy. Prototypowy zestaw urządzeń (rys. 1) do wytwarzania plazmy w warunkach laboratoryjnych pod ciśnieniem atmosferycznym składa się z rurki ceramicznej, przez którą doprowadzana jest odpowiednia mieszanina gazów, zespołu elektrod oraz generatora wysokiego napięcia.



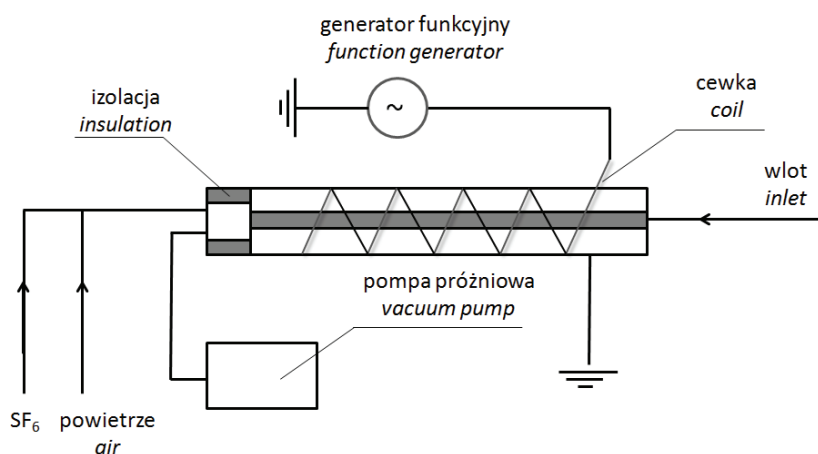
Rys. 1. Schemat urządzenia do wytwarzania niskotemperaturowej plazmy CAP-pen.

Fig. 1. Scheme of CAP-pen low-temperature (cold) plasma generator.

Źródło: / Source: Opracowanie własne na podstawie [14] / the authors' own study based on [14].

Rurka otoczona jest miedzianą elektrodą koncentryczną podłączoną do generatora wysokiego napięcia (6,5 - 16 kV, 23 - 38,5 kHz). Z kolei druga elektroda (uziom) umieszczona jest w takiej odległości od końca ceramicznej rurki, aby umożliwić przepływ wytworzonej plazmy i stworzyć miejsce umieszczenia próbki. Wytworzona w ten sposób plazma w otoczeniu powietrza ukazuje się jako jasnopurpurowa chmura, która nosi nazwę CAP-pen (ang. *cold atmospheric plasma pen*) [14].

Inne urządzenie do wytwarzania plazmy pod obniżonym ciśnieniem składa się z wyposażonej w cewkę antenową rury kwarcowej otaczającej komorę obróbki plazmowej, w której umieszcza się próbki (rys. 2). Zestaw przyłączony jest do wzmacniacza i generatora wysokiego napięcia za pomocą elektrody (20 kV, 1 kHz). Urządzenie wyposażone jest również w pompę próżniową, która służy do obniżania ciśnienia w układzie [16].



Rys. 2. Prototypowe urządzenie do wytwarzania niskotemperaturowej plazmy.

Fig. 2. Prototype low-temperature (cold) plasma generator.

Źródło: / Source: Opracowanie własne na podstawie [16] / the authors' own study based on [16].

W obydwu rozwiązaniach energię niezbędną do przeprowadzenia gazu w stan plazmy (lub mieszaniny gazów) dostarcza się przy użyciu generatorów wysokiego napięcia. Niezbędną energię dostarczyć można także przez naświetlanie światłem nadfioletowym ($\lambda = 180 - 300 \text{ nm}$) lub aplikacją mikrofal.

Konstrukcje wyposażone w generatory mikrofalowe są obecnie najlepiej dostosowane do użycia w procesach przemysłowych. Zupełnie inne podejście do utrwalania żywności przy użyciu plazmy polega na wykorzystaniu zjawiska wyładowania barierowego DBD (ang. *dielectric-barrier discharge*). Przykładowo, plazma wytwarzana jest wewnątrz opakowania, do którego za pomocą elektrod podłączony jest generator

wysokiego napięcia. Zaletą tego typu rozwiązania jest niewielkie zużycie energii elektrycznej.

Przemysłowe konstrukcje powinny uwzględniać przede wszystkim bezpieczeństwo użytkownika oraz sposób prowadzenia procesu. Na przykład w operacjach typu ciągłego plazma powinna być aplikowana w czasie, gdy produkt znajduje się na przenośniku, tak aby nie wydłużać procesu technologicznego. Innym rozwiązaniem, odpowiednim w przypadku operacji okresowych, jest konstrukcja podobna do opisanej wcześniej CAP-pen. W tym przypadku strumień zjonizowanego gazu jest skierowany bezpośrednio na przetwarzany materiał [12].

Mechanizm działania plazmy na drobnoustroje

Mechanizm działania plazmy (podobnie jak pulsacyjnego pola elektrycznego) na mikroorganizmy nie został jeszcze dokładnie poznany. Jak już wcześniej wspomniano, niskotemperaturowa plazma zawiera szereg różnych cząsteczek chemicznych, które charakteryzują się wysoką reaktywnością – również w kontakcie z materiałem biologicznym. Szczególnie podatne na reakcje chemiczne są cząsteczki pochodzące z tlenu lub azotu: O, O₂, O₃, OH[•], NO[•], i NO₂, przy czym najbardziej letalne działanie wykazuje tlen atomowy i rodnik hydroksylowy [19]. Najprawdopodobniej molekuły te prowadzą do zmian natury oksydacyjnej w lipidach i proteinach plazmolemmy. W związku z tym intensywne bombardowanie komórki bardzo reaktywnymi składnikami plazmy prowadzi do poważnych, niedających się szybko naprawić uszkodzeń błony komórkowej i w konsekwencji do jej przerwania. Zjawisko to przez niektórych określane jest „wytrawianiem”. Przyczyn tego zjawiska upatruje się także w gromadzeniu ładunków elektrycznych na zewnętrznej powierzchni błony membranowej. Innym wytłumaczeniem przerwania ciągłości plazmolemmy jest teoria elektroporacji (elektropermeabilizacji), tłumacząca zmiany zachodzące w mikroorganizmach pod wpływem pulsacyjnego pola elektrycznego. Zjawisko elektroporacji polega na elektrycznie indukowanym powstawaniu nowych mikroporów komórkowych oraz wzroście już istniejących. Wytłumaczenie to zdaje się sensownie uzupełniać pozostałe teorie, ze względu na wiele analogii pomiędzy pulsacyjnym polem elektrycznym a obróbką żywności za pomocą plazmy. Działanie plazmy, ze względu na zawarte w niej fotony światła nadfioletowego, prowadzi także do degradacji DNA. Badania wskazują jednak, że dużo większą rolę w inaktywacji mikroorganizmów odgrywają wspomniane wcześniej rodniki i tlen atomowy. Jednak, aby jednoznacznie odpowiedzieć na pytania dotyczące mechanizmu inaktywacji drobnoustrojów przy użyciu plazmy, niezbędne jest prowadzenie dalszych badań [12].

Zastosowanie plazmy do utrwalania żywności

Mimo że badania nad zastosowaniem plazmy w celu inaktywacji drobnoustrojów trwają od drugiej połowy lat 90. ubiegłego wieku, to studia nad zastosowaniem tych rozwiązań do celów związanych z utrwalaniem żywności rozpoczęły się niedawno. Obecnie niskotemperaturowa plazma w technologii żywności określana jest mianem technologii pierwszej generacji, co oznacza, że jest w początkowym okresie rozwoju [1].

Dekontaminacja ziaren zbóż oraz nasion roślin strączkowych jest ważna zarówno ze względu na ich przydatność technologiczną, jak i bezpieczeństwo konsumenta. Pleśnie (*Aspergillus* i *Penicillium*) rozwijające się na tych surowcach w czasie przechowywania mogą doprowadzić do zniszczenia zarodka, pogorszenia cech sensorycznych oraz skażenia mikotoksynami. Wyjaławianie surowców zbożowych czy strączkowych przy użyciu plazmy może być alternatywą dla innych metod, w których najczęściej stosuje się obróbkę termiczną lub chemiczną. W przypadku ziaren pszenicy 20-minutowa aplikacja plazmy wytworzonej z heksafluorku siarki (SF_6) pozwoliła zmniejszyć populację *Penicillium* o ponad 3 cykle logarytmiczne. Przy zastosowaniu plazmy wytworzonej z powietrza osiągnięto jeszcze lepsze rezultaty. Efektywność działania plazmy zależała w dużym stopniu nie tylko od rodzaju mikroflory czy gazu użytego do wytworzenia plazmy, ale także od powierzchni, na której mikroflora się znajdowała. Przykładowo, 15-minutowe potraktowanie ziaren pszenicy plazmą wytworzoną z SF_6 zmniejszyło populację pleśni *Aspergillus* do $1,2 \cdot 10^4$ jtk/g, w przypadku ciecierzycy do $1,67 \cdot 10^6$ jtk/g, w porównaniu z próbkami kontrolnymi zawierającymi $5 \cdot 10^6$ jtk/g w przypadku obu próbek. Należy podkreślić, że podobną sytuację obserwowano w przypadku przechowywania ziaren i nasion potraktowanych i niepotraktowanych plazmą. Próbki wyjałowione wstępnie plazmą, charakteryzujące się populacją mniejszą o 4 cykle log niż próbka kontrolna, po 10 dniach przechowywania wykazywały ciągle mniejszą populację mikroorganizmów. Istotne jest także, że potraktowanie tych produktów plazmą nie wpłynęło istotnie na ich wartość technologiczną [16].

Niskotemperaturowa plazma może być także zastosowana jako metoda dekontaminacji powierzchni mięsa oraz skóry kurcząt zawierających *Listeria innocua*. Bakteria ta jest surogatem, niepatogenicznym odpowiednikiem *Listeria monocytogenes*. Redukcja liczby drobnoustrojów zależała zarówno od czasu aplikacji plazmy, jak i od składu mieszaniny gazów użytych do jej wytworzenia. Przykładowo, zastosowanie niskotemperaturowej plazmy przez 10 s przyczyniło się do ograniczenia populacji mikroorganizmów na filtrze membranowym o 0,27 i 3,27 cykli logarytmicznych, w przypadku gdy gazem był odpowiednio: wyłącznie hel i mieszanina hel - tlen (1 : 5). Próba dekontaminacji skóry kurcząt przy użyciu tej technologii nie wpłynęła na otrzymanie tak dobrych wyników, jak w przypadku badań prowadzonych na filtrach membranowych. Przy zastosowaniu tej metody zmniejszenie ogólnej liczby drobnoustrojów po

8 min ekspozycji skóry na działanie niskotemperaturowej plazmy wynosiło od 0,01 do 0,91 cykli logarytmicznych. W odniesieniu do *Listeria* redukcja wynosiła od 0,18 do 0,94 cykli logarytmicznych, w zależności od parametrów plazmy i pracy urządzenia. Wiąże się to z różnymi właściwościami dielektrycznymi tych dwóch materiałów, skóry kurczęcia oraz filtra membranowego. Inaktywacja *L. innocua* w tkance mięśni piersiowych kurczaka wynosiła od 0,06 do 3,30 cykli logarytmicznych w zależności od składu mieszaniny gazów, parametrów pracy urządzenia oraz techniki inokulacji, przy czym większe wartości redukcji zaobserwowano, gdy w mieszance gazowej dominował tlen. Wyniki te, mimo że nie spełniają wymagań dotyczących wyjaławiania żywności, świadczą o potencjale użycia niskotemperaturowej plazmy w celu dekontaminacji mięsa. Kolejnym dowodem mogą być wyniki badań nad działaniem plazmy na zawieszone w roztworze wodnym bakterie, mogące powodować zatrucia pokarmowe: *E. coli*, *S. aureus*, *S. enteritidis* i *B. cereus*. Rola tych drobnoustrojów jest bardzo ważna, gdyż konsumenci coraz chętniej sięgają po żywność minimalnie przetworzoną [7]. Aplikacja niskotemperaturowej plazmy spowodowała znaczącą redukcję (4 cykle logarytmiczne jtk/ml) w populacji wymienionych mikroorganizmów. Warto zauważyć, że plazma powstała z powietrza pozwoliła osiągnąć lepsze rezultaty niż wytworzona z azotu cząsteczkowego czy ditlenku węgla, co można wytłumaczyć obecnością m.in. tlenu atomowego [10].

Oprócz wegetatywnych form drobnoustrojów problemem w technologii żywności są także ich przetrwalnikowe formy. Działanie niskotemperaturową plazmą na niektóre przetrwalniki obecne na podłożu agarowym pozwala osiągnąć lepsze rezultaty sterylizacyjne niż gotowanie. Przykładowo, czas dziesięciokrotnej redukcji liczby sporów *D. subtilis* wynosił 3,46 i 10-14 min, w przypadku, odpowiednio, inaktywacji plazmowej i poprzez gotowanie. Należy jednak podkreślić, że przetrwalniki niektórych bakterii lepiej znosiły działanie niskotemperaturowej plazmy niż sterylizację w autoklawie [18].

Zastosowanie plazmy do dekontaminacji opakowań

Jedną z możliwości zastosowania zimnej plazmy jest dekontaminacja materiałów opakowaniowych. Nieodpowiednio przechowywane mogą bowiem stać się źródłem zanieczyszczenia żywności, co prowadzi do niespełnienia przez nie swej podstawowej funkcji. Butelki polimerowe przed napełnieniem są najczęściej sterylizowane chemicznie przy użyciu nadtlenu wodoru lub kwasu nadoctowego. Pomimo wysokiej efektywności, metody te generują duże ilości ścieków, co z kolei wpływa na koszt produktu [12]. Kolejną wadą tego typu rozwiązań jest ich negatywny wpływ na środowisko naturalne, a więc brak cech odpowiadających technologiom czystym, zrównoważonym. Zastosowanie technologii innej niż chemiczna jest zatem uzasadnione. Obecnie technologia niskotemperaturowej plazmy jest używana głównie do modyfikacji niektó-

rych właściwości materiałów opakowaniowych, np. zmniejszenia przepuszczalności tlenu czy ditlenku węgla. Zimna (niskotemperaturowa) plazma umożliwia także niemal całkowitą sterylizację powierzchni folii PET w przeciągu mniej niż 4 s. Należy jednak podkreślić, że trwająca 90 - 120 s obróbka papierowych kubków i folii aluminiowej doprowadziła jedynie do zmniejszenia populacji drobnoustrojów o 3 cykle logarytmiczne [12]. Aspekty, które powinny być rozważone przy wyborze odpowiednich parametrów pracy generatora plazmy, oprócz oczekiwań związanych z wyjaławianiem powierzchni, muszą także uwzględniać możliwe zmiany właściwości materiału opakowaniowego, np. wytrzymałości. Przykładowo, analiza pojedynczych włókien PET wykazała, że niskotemperaturowa plazma wytworzona z tlenu lub tlenu/tetrafluorometanu, działająca na polimer przez 200 s, zmniejsza wytrzymałość mechaniczną materiału o ok. 20 % [4]. Z innej publikacji wynika, że zastosowanie niskotemperaturowej plazmy zmniejsza przepuszczalność gazów materiału opakowaniowego (PET) dzięki czemu produkt pozostaje dłużej świeży [8].

Podsumowanie

Wiedza na temat niskotemperaturowej plazmy skłania do stwierdzenia, że technologia ta może znaleźć zastosowanie w przetwórstwie żywności. Do największych zalet należy jej nietermiczny charakter, korzystny zwłaszcza w technologii żywności minimalnie przetworzonej. Jednak właściwość plazmy, z której wynika ta zaleta, jest także jedną z największych wad tej technologii. Ze względu na specyficzny skład plazmy i samą naturę procesu, użycie jej może budzić pewne obawy konsumentów, co będzie wpływać na proces wdrożenia tej technologii. Kolejne problemy związane z tą techniką dotyczą głównie wpływu plazmy na składniki odżywcze żywności. Przeprowadzenie odpowiednich badań, uwzględniających ten aspekt, umożliwi kontynuowanie prac nad przemysłowym wdrożeniem techniki zimnej plazmy.

Literatura

- [1] Bermudez-Aguirre D., Barbosa-Canovas G.V.: Recent Advances in Emerging Nonthermal Technologies. Food Eng. Series, 2011, **2**, 285-323.
- [2] Celiński Z.: Plazma. PWN, Warszawa 1980.
- [3] Fernandes A.N.F., Linhares Jr. F.E., Rodrigues S.: Ultrasound as pre-treatment of pineapple. Ultra. Sonochem., 2008, **15**, 1049-1054.
- [4] Ferrante D., Iannace S., Monetta T.: Mechanical strength of cold plasma treated fibers. J. Mater. Sci., 1999, **34**, 175-179.
- [5] Gemma O., Martin-Belloso O., Soliva-Fortuny R.: Pulsed light treatment for food preservation. A review. Food Bioprocess Technol., 2010, **3**, 13-23.
- [6] Kelly-Wintenberg K., Montie T.C., Brickman C., Roth J.R., Carr A.K., Sorge K., Wadsworth L.C., Tsai P.P.Y.: Room temperature sterilization of surfaces and fabrics with a one atmosphere uniform glow discharge plasma. JIMB, 1998, **20**, 69-74.

- [7] Kowalska H.: Żywność minimalnie przetworzona – owoce i warzywa. *Przem. Spoż.*, 2006, **4 (60)**, 24-27.
- [8] Kryża K., Szczepanik G.: Zastosowanie techniki zimnej plazmy jako nowoczesna technologia zabezpieczania surowców żywnościowych. [online] [dostęp: 03-06-2013]. Dostępna w Internecie: http://www.food.rsi.org.pl/dane/Artyku_Plasma_Kry_a_Szczepanik.pdf
- [9] Laroussi M., Leipold F.: Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure. *Int. J. Mass Spectrometry*, 2004, **233**, 81-86.
- [10] Marsili L., Esphe S., Anderson J.G., MacGregor S.J.: Plasma inactivation of food-related microorganisms in liquids. *Radiat. Phys. Chem.*, 2002, **65**, 507-513.
- [11] Martin-Belloso O., Sobrino-Lopez A.: Combination of pulsed electric fields with other preservation techniques. *Food Bioprocess Technol.*, 2011, **4**, 954-968.
- [12] Misra N.N., Tiwari B.K., Raghavarao K.S.M.S., Cullen P.J.: Nonthermal plasma inactivation of food-borne pathogens. *Food Eng. Rev.*, 2011, **3**, 159-170.
- [13] Moisan M., Barbeau J., Moreau S., Pelletier J., Tabrizian M., Yahia L.H.: Low-temperature sterilization using gas plasmas: a review of the experiments and an analysis of the inactivation mechanisms. *Int. J. Pharmacol.*, 2001, **226**, 1-21.
- [14] Noriega E., Gilbert S., Laca A., Diaz M., Kong M.G.: Cold atmospheric gas plasma disinfection of chicken meat and chicken skin contaminated with *Listeria innocua*. *Food Microbiol.*, 2011, **28**, 1293-1300.
- [15] Perni S., Shama G., Kong M.G.: Cold atmospheric plasma disinfection of cut fruit surfaces contaminated with migrating microorganisms. *J. Food Protect.*, 2008, **71 (8)**, 1619-1625.
- [16] Selcuk M., Oksuz L., Basaran P.: Decontamination of grains and legumes infected with *Aspergillus* spp. and *Penicillium* spp. by cold plasma treatment. *Bioresource Technol.*, 2008, **99**, 5104-5109.
- [17] Shin J.K., Lee S.J., Cho H.Y., Pyun Y.R., Lee J.H., Chung M.S.: Germination and subsequent inactivation of *Bacillus subtilis* by pulsed electric field treatment. *J. Food Process. Preserv.*, 2010, **43**, 43-54.
- [18] Tseng S., Abramzon N., Jackson J.O., Lin W.: Gas discharge plasmas are effective in inactivating *Bacillus* and *Clostridium* spores, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2011, DOI 10.1007/s00253-011-3661-0.
- [19] Yu H., Perni S., Shi J.J., Wang D.Z., Kong M.G., Shama G.: Effects of cell surface loading and phase of growth in cold atmospheric gas plasma inactivation of *Escherichia coli* K12. *J. Appl. Microbiol.*, 2006, **101**, 1323-1330.
- [20] Yucel U., Alpas H., Bayindirli A.: Evaluation of high pressure treatment for enhancing the drying rates of carrot, apple and green bean. *J. Food Eng.*, 2010, **98**, 266-272.

POSSIBLE APPLICATIONS OF LOW-TEMPERATURE (COLD) PLASMA IN FOOD TECHNOLOGY

S u m m a r y

The objective of the study was to describe the possibility of applying low temperature (cold) plasma to food technology development. This technology is a novel, non-thermal technique. In the food industry, it could be potentially used to preserve food. The possibility of using this technique in practice is based on the highly reactive chemical compounds, which make up the plasma. Free radicals, atomic oxygen, and other compounds or ions show properties that enable the inactivation of many micro-organisms. The chemical composition of plasma differs depending on the gas used to make it. The mixtures of gases that

appear to be the most lethal to micro-organisms contain atomic oxygen or air. Presently, the possibility of using low-temperature (cold) plasma in the food industry is analyzed in laboratories. The reference literature contains examples of applying plasma to decontaminate surfaces of grain and seeds, meat or packaging materials. The continuous increase in the consumer demand for low-processed products and the necessity to protect the environment are two key reasons to justify the indispensability to further search into the low-temperature (cold) plasma technology.

Key words: cold plasma, sterilization, decontamination, food ☒