

STERYLIZACJA ZA POMOCĄ
NISKOTEMPERATUROWEJ PLAZMY, GENEROWANEJ
W WARUNKACH CIŚNIENIA ATMOSFERYCZNEGOAnna Dzimitrowicz^{1*}, Piotr Jamróz¹, Piotr Nowak²¹Zakład Chemii Analitycznej i Metalurgii Chemicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Wroclawska²Zakład Chemii Fizycznej i Kwantowej, Wydział Chemiczny, Politechnika Wroclawska

Wpłynęło w lutym 2014 r.

1. Wprowadzenie. 2. Plazma jako czynnik sterylizujący. 3. Rodzaje źródeł plazmowych. 4. Mechanizm procesu sterylizacji. 5. Kontrola procesu. 6. Zastosowania. 7. Podsumowanie

Sterilization by low-temperature atmospheric-pressure plasma

Abstract: Plasma is an ionized and reactive gas, which is used for sterilization of many kinds of microorganisms (e.g. bacteria, fungi), which reside on the surface of materials (e.g. medical instruments). Plasma sterilization allows to obtain absolute microbiological purity. Plasma can be generated by dielectric barrier discharge, glow discharge (including corona discharge, plasma jets or microjets) and microwave induced plasma. This article summarises literature review on plasma sterilization methods of microorganisms by low-temperature plasma generated under the atmospheric pressure.

1. Introduction. 2. Plasma as a sterilizing agent. 3. Types of plasma sources. 4. Mechanism of plasma sterilization. 5. Process control. 6. Applications of plasma sterilization. 7. Summary

Słowa kluczowe: mikroorganizmy, plazma, sterylizacja**Key words:** microorganisms, plasma, sterilization

1. Wprowadzenie

Sterylizacja, nazywana również wyjąłaniem, jest metodą niszczenia wszystkich form mikroorganizmów, zarówno wegetatywnych, jak i przetrwalnych. Istnieje wiele tradycyjnych sposobów sterylizacji: wilgotnym ciepłem [38], suchym gorącym powietrzem [2], parą wodną pod ciśnieniem w autoklawie [4], z użyciem formaldehydu [17] czy tlenku etylenu [29]. Metody te opierają się na inaktywacji mikroorganizmów w wyniku spowolnienia ich metabolizmu bądź zniszczenia ich materiału genetycznego [30].

Sterylizacja plazmowa, w przeciwieństwie do konwencjonalnych metod, wykorzystuje synergiczny efekt oddziaływania zarówno promieniowania UV, jak i cząstek reaktywnych, elektronów i jonów, na mikroorganizmy. Do wyjąłania np. instrumentów metalowych czy narzędzi wykonanych z materiałów termowrażliwych najczęściej jest wykorzystywana niskotemperaturowa plazma, wytwarzana w warunkach ciśnienia atmosferycznego. Taki rodzaj plazmy cechuje brak równowagi termodynamicznej, co jest niezbędne w procesie wyjąłania materiałów, na których stwierdzono obecność drobnoustrojów.

W procesie sterylizacji wykorzystuje się bakteriobójcze właściwości różnego rodzaju wyładowań (bariero-

wych, koronowych, jarzeniowych czy mikrofalowych), a co jest z tym związane emisję reaktywnych cząstek, rodników, jonów czy fotonów, które w nieodwracalny sposób uszkadzają funkcje życiowe mikroorganizmów [5, 18, 35, 44]. Jest to podstawa procesu sterylizacji plazmowej.

2. Plazma jako czynnik sterylizujący

Plazma jest to zjonizowany, reaktywny gaz, bardzo często określany mianem „czwartego stanu skupienia materii”. Plazma najczęściej powstaje w warunkach ciśnienia atmosferycznego i jest generowana z różnych gazów m.in. szlachetnych (hel, argon) oraz reaktywnych (nadtlenek wodoru, tlen, azot) [9, 40].

Właściwości sterylizujące plazmy są określone przez reakcje pomiędzy tlenem, azotem, a także parą wodną, w wyniku czego tworzą się reaktywne formy tlenu i azotu (np. nadtlenek wodoru, rodniki OH, OH₂, NO tlen singletowy, ozon, kwas peroksoazotowy, aniony ponadtlenkowe), o bardzo silnym działaniu dezaktywującym mikroorganizmy wraz z ich formami przetrwalnymi [3, 16, 26, 39, 43]. Dodatkowo podczas generowania plazmy powstaje promieniowanie m.in. w zakresie UV, które też może mieć udział w procesach sterylizacji.

* Autor korespondencyjny: Zakład Chemii Analitycznej i Metalurgii Chemicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; Tel. 71 320 38 07; e-mail: anna.dzimitrowicz@pwr.edu.pl

Istnieje wiele sposobów klasyfikacji plazmy, ze względu na [9, 40]:

- Temperaturę – plazma zimna i gorąca;
- Ciśnienie – plazma niskociśnieniowa, atmosferyczna oraz wysokociśnieniowa;
- Skład gazu plazmotwórczego użytego do jej generowania – plazma jednoskładnikowa lub wieloskładnikowa.

Do wyjaławiania drobnoustrojów patogennych z powierzchni narzędzi medycznych, jak również z materiałów termolabilnych, najczęściej jest stosowana plazma niskotemperaturowa (tzw. zimna plazma) [23, 28], generowana w warunkach ciśnienia atmosferycznego [3, 30, 35], jednakże zdarzają się przypadki wyjaławiania materiałów z zastosowaniem zimnej plazmy, generowanej w warunkach obniżonego ciśnienia [31].

Ze względu na wspomnianą możliwość wyjaławiania substancji termolabilnych (tkanki, komórki, skóra, włókna, guma), proces z reguły przebiega w temperaturze poniżej 50°C [3, 30, 35].

3. Rodzaje źródeł plazmowych

Sterylizacja za pomocą zimnej plazmy jest jedną z najbardziej efektywnych metod dezaktywacji drobnoustrojów patogennych. Wysoką wydajność procesu wyjaławiania uzyskuje się stosując jako źródła plazmowe: wyładowania barierowe [19, 24, 25], wyładowania jarzeniowe [7, 27], w tym dżety plazmowe [21, 30, 42], wyładowania koronowe [20, 22], a także wyładowania mikrofalowe [13, 15].

3.1. Wyładowania barierowe

Wyładowanie barierowe (DBD – *dielectric barrier discharge*) zwane także cichym wyładowaniem, jest jednym z najczęściej stosowanych źródeł plazmowych. Proces sterylizacji mikroorganizmów pod wpływem wyładowań barierowych zachodzi pomiędzy aluminiowymi elektrodami. Na jedną z elektrod nanoszony jest dielektryk, np. kwarc w formie 100 × 1 mm, aby ochronić powstałe wyładowanie przed szybkim wygaszeniem, na drugą zaś szkło w formie 100 × 2 mm [24]. Układ elektrod wyładowczych jest zasilany przez generator wysokiego napięcia, o częstotliwości w zakresie od kilku Hz do kilkunastu MHz (najczęściej 100 Hz) [19, 24, 25]. W przestrzeni pomiędzy elektrodami generowana jest plazma, najczęściej nietermiczna i nierównowagowa [19, 24, 25].

Materiał przeznaczony do sterylizacji umieszcza się bezpośrednio na elektrodzie z izolatorem. Aby mogło zostać zainicjowane wyładowanie barierowe temperatura gazu nośnego może być równa temperaturze pokojowej (25°C) [24], w warunkach ciśnie-

nia atmosferycznego bądź niższego niż atmosferyczne [19, 24, 25].

Z powodu niskich wartości natężenia prądu, wyładowania barierowe stosowane są do generowania zimnej plazmy, która jest używana do wyjaławiania instrumentów medycznych z drobnoustrojów chorobotwórczych. Jako przykład można wyróżnić zastosowanie wyładowania barierowego do procesu sterylizacji substancji wrażliwych na temperaturę, skażonych bakteriami z rodzaju *Escherichia coli*, za pomocą powstałej w takich warunkach zimnej plazmy [24, 25].

Doświadczalnie wyznaczono, że największą wydajność procesu uzyskuje się, jeżeli układ zostanie zasilony prądem o częstotliwości 100 Hz, a minimalny czas sterylizacji mikroorganizmów będzie wynosił 5 minut [24]. Jest to związane z koniecznością rozpadu ściany komórkowej mikroorganizmów oraz dezaktywacją ich materiału genetycznego, co następuje po określonym czasie ekspozycji na plazmowy czynnik sterylizujący [19, 24, 25].

3.2. Wyładowania jarzeniowe

Wyładowanie jarzeniowe pod ciśnieniem atmosferycznym (APGD – *atmospheric pressure glow discharge*) jest wyładowaniem, które powstaje w gazach przy zastosowaniu wysokiego napięcia stałego lub pulsacyjnego, do 2 kV. Aby za pomocą wyładowania jarzeniowego wytworzyć plazmę, należy zastosować określone parametry procesu tj.:

- Strumień przepływu gazu plazmotwórczego powinien mieścić się w zakresie od 0,5 do 2 dm³/min [8];
- Moc wyładowania do około 150 W [12, 26].

W trakcie inicjacji wyładowania jarzeniowego powstają charakterystyczne strefy różniące się intensywnością promieniowania, w przestrzeni pomiędzy katodą a anodą.

Aby inaktywować mikroorganizmy za pomocą wyładowania jarzeniowego, należy utworzyć specjalny układ, który będzie zawierał wysokonapięciowy generator prądu stałego lub wysokiej częstotliwości, parę elektrod metalicznych, a także regulator przepływu gazów plazmotwórczych (najczęściej hel, argon, neon) [1, 45]. Należy jednak pamiętać, że gazy szlachetne nie są reaktywne i z tego względu do układu należy dostarczyć inny reaktywny gaz, najczęściej tlen i/lub azot, aby uzyskać zamierzone efekty sterylizacji w stosunkowo krótkim czasie. Dla bakterii z rodzaju *Staphylococcus aureus* czas wyjaławiania wynosi około 5 minut, zaś dla bakterii z rodzaju *E. coli* zaledwie 1 minutę [1].

Cechą charakterystyczną sterylizacji z użyciem wyładowań jarzeniowych jest brak możliwości kontroli temperatury czy skuteczności procesu. O prawidłowości jej przeprowadzania świadczyć mogą jedynie zmiany w morfologii komórki mikroorganizmów, iden-

tyfikowane zniszczeniem materiału genetycznego oraz aparatu do biosyntezy białek [1, 45].

Do specyficznych rodzajów wyładowań jarzeniowych zaliczamy także dżety, w tym mikro-dżety plazmowe (*plasma jet*, *plasma microjet*) oraz wyładowania koronowe.

Dżety plazmowe (*atmospheric pressure plasma jets*) najczęściej przyjmują kształt stożka plazmowego. Jeżeli wymiary dżetu są mniejsze niż 1 mm, dżet klasyfikowany jest jako mikro-dżet plazmowy. Plazma, która niezmiennie odgrywa rolę czynnika sterylizującego, jest generowana w przestrzeni za wyładowaniem, najczęściej w warunkach ciśnienia atmosferycznego [20, 21, 42].

Elementem aparatury do sterylizacji z udziałem dżetów plazmowych jest ceramiczna tuba o wymiarach ok. $1,5 \times 3,1 \times 200$ mm, która jest połączona z generatorem prądu o wysokiej częstotliwości (ok. 30 kHz) [21]. Temperaturę procesu dobiera się w zależności od rodzaju mikroorganizmu, który jest dezaktywowany. W przypadku bakterii z rodzaju *S. aureus* temperatura procesu wyjaławiania wynosi 35°C , zaś czas procesu sterylizacji jest dość krótki i wynosi 120 s [21]. Materiał przeznaczony do wyjaławiania jest preparowany na specjalnych, szklanych płytkach i mieszczonych w odległości 1 mm od źródła plazmy. W celu sprawdzenia wydajności procesu, materiał mikrobiologiczny poddaje się inkubacji w temperaturze 37°C , przez okres 36 godzin [21]. Jeżeli po inkubacji we wspomnianych warunkach nie wytworzone zostaną nowe kolonie mikroorganizmów to znaczy, że proces sterylizacji za pomocą plazmy, wygenerowanej w wyniku wyładowania jarzeniowego przebiegł w sposób prawidłowy [20, 21, 42].

Wyładowania koronowe (*corona discharge*) są także klasyfikowane jako wyładowania jarzeniowe, generowane przy ciśnieniu zbliżonym do atmosferycznego oraz przy zastosowaniu wysokiego napięcia. Wyładowania koronowe powstają w łatwiejszy sposób na elektrodach charakteryzujących się zakrzywioną powierzchnią części wyładowczej, co jest spowodowane większą szybkością inicjacji wyładowania [40].

Proces wyjaławiania materiałów pod wpływem wyładowań koronowych zachodzi w temperaturze poniżej 50°C [20], pod ciśnieniem atmosferycznym [22]. Układ sterylizacyjny składa się z palnika plazmowego, elektrody wyładowczej, źródła napięcia, miejsca wprowadzania gazu plazmowego oraz płytki, na którą umieszcza się poddawany wyjałowieniu materiał. Odległość pomiędzy sterylizowanym materiałem a elektrodą, na której zachodzi wyładowanie koronowe wynosi ok. 20 mm [30], zaś natężenia strumienia przepływu gazu plazmotwórczego około $40 \text{ dm}^3/\text{min}$ [20].

Aby przeprowadzić inaktywację bakterii z rodzaju *E. coli* lub jednokomórkowych grzybów z gatunku *Saccharomyces cerevisiae* należy umieścić mikroorganizmy na odpowiednio przygotowanym podłożu mikrobiolo-

gicznym, o wymiarach 20×100 mm [20] i wprowadzić do układu, który generuje plazmę [1, 8, 12, 13, 15, 22, 45]. Czas sterylizacji plazmowej, wykorzystującej wyładowanie koronowe wynosi od 0–5 s i zależy od miana bakterii jakie chcemy uzyskać po procesie wyjaławiania. Kolejno przeprowadza się kontrolę prawidłowości sterylizacji przez inkubację w temperaturze optymalnej dla danego szczepu mikroorganizmu (np. dla pałeczki okrężnicy temperatura wynosi 37°C) [30]. Jeżeli po inkubacji, przez czas minimum 15 godzin, nie pojawiły się kolonie bakterii, to sterylizacja została przeprowadzona w sposób prawidłowy. Oceny dokonuje się na podstawie obserwacji wizualnej, z wykorzystaniem mikroskopii optycznej [20, 22].

3.3. Wyładowania mikrofalowe

Plazma mikrofalowa jest zimną plazmą niskotemperaturową. Jej składnikami są głównie swobodne elektrony, cząsteczki dwuatomowe, atomy oraz jednododatnie jony. Moc dostarczana do generatorów zwykle mieści się w zakresie od 200 do 1000 W [37].

Do wytworzenia promieniowania mikrofalowego wykorzystuje się magnetron. Generatorem magnetronowym jest najczęściej dwuelektrodowa lampka elektronowa dużej mocy. Wytworzone w niej promieniowanie mikrofalowe kierowane jest do falowodu za pomocą zaworu ferrytowego, który uniemożliwia emisję promieniowania z komory wyładowczej. W plazmie mikrofalowej wykorzystuje się promieniowanie o częstotliwości 2,45 GHz [6].

Plazma mikrofalowa powstaje w wyniku oddziaływania promieniowania mikrofalowego na gaz plazmotwórczy (np. argon, hel) w rezonatorze, nazywaną również wnęką mikrofalową. Wnęka ta gwarantuje skuteczne wykorzystanie energii mikrofal oraz chroni przed wydostaniem się ich do otoczenia, co ma zasadnicze znaczenie dla bezpieczeństwa procesu, ponieważ mikrofały są szkodliwe dla organizmu człowieka. Do zainicjowania wyładowania potrzebne są np. elektrony wybite z metalu w mikrofalowym polu elektromagnetycznym lub iskra. Rozpędzone w tym polu elektrony zderzają się z atomami gazu inicjując ich jonizację, która w dalszych etapach postępuje łańcuchowo [43].

Wyładowania mikrofalowe prowadzą do powstania plazmy niskotemperaturowej, która jest stosowana do inaktywacji bakterii (np. *Bacillus subtilis*, *Geobacillus stearothermophilus*) oraz grzybów pleśniowych (np. *Aspergillus brasiliensis* czy *Alternaria alternata*). Moc generatora promieniowania mikrofalowego wynosi ok. 400 W, zaś natężenie strumienia przepływu gazu plazmotwórczego (np. argon) od 0,1 do $20 \text{ dm}^3/\text{min}$. Homogeniczny materiał, którego wymiary nie powinny przekraczać 10×10 cm, umieszcza się w odległości około 12 cm od źródła plazmy, a następnie poddaje

Tabela I
Rodzaje źródeł plazmowych stosowanych do sterylizacji mikroorganizmów [19, 20, 21, 22, 24, 30, 34, 40]

Rodzaj źródła plazmowego	Optymalne warunki procesu	Rodzaj inaktywowanych mikroorganizmów	Czas i wydajność sterylizacji z zastosowaniem odpowiedniego źródła plazmowego
Wyładowania barierowe	Ciśnienie: atmosferyczne Odległość między elektrodą a wyławanym materiałem: 30–50 mm Strumień natężenia przepływu gazu plazmotwórczego: 40 dm ³ /min Czas procesu: 5 min Temperatura: 25°C	<i>Escherichia coli</i>	5 min – 100%
Dżety plazmowe	Ciśnienie: atmosferyczne Odległość między elektrodą a wyławanym materiałem: 1 mm Strumień natężenia przepływu gazu plazmotwórczego: 0.3 dm ³ /min Czas procesu: 120 s Temperatura: 35°C	<i>Staphylococcus aureus</i>	120 s – 100%
Wyładowania koronowe	Ciśnienie: atmosferyczne Odległość między elektrodą a wyławanym materiałem: 20 mm Strumień natężenia przepływu gazu plazmotwórczego: 40 dm ³ /s Czas procesu: 0–5 s Temperatura: 50°C	<i>Escherichia coli</i> <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	1 s – 88% 5 s – 100%
Wyładowania mikrofalowe	Ciśnienie: atmosferyczne Odległość między elektrodą a wyławanym materiałem: 120 mm Strumień natężenia przepływu gazu plazmotwórczego: 0.1–20 dm ³ /min Czas procesu: 40 min Temperatura: 80°C	<i>Bacillus subtilis</i> <i>Geobacillus stearothermophilus</i> <i>Aspergillus brasiliensis</i> <i>Alternaria alternata</i>	300 s – 100%

się procesowi wyławaniania. Czas ekspozycji nie powinien być krótszy niż 180 s, ze względu na możliwość pozostania aktywnych kolonii bakterii, natomiast wydłużanie czasu powyżej 300 s jest nieekonomiczne. Inaktywacja mikroorganizmów zachodzi w wyniku zniszczenia ich materiału genetycznego przez strumień aktywnych cząstek generowanych w plazmie [34].

Zaletą sterylizacji z użyciem niskotemperaturowej plazmy mikrofalowej jest brak toksycznych produktów ubocznych, a także łatwość wykonania, szybkość procesu oraz wysoka skuteczność wyławaniania [34].

W tabeli I przedstawiono rodzaje źródeł plazmowych, optymalne warunki ich działania, wpływ na inaktywację różnych mikroorganizmów oraz skuteczność procesu sterylizacji plazmowej.

4. Mechanizm procesu sterylizacji za pomocą plazmy

Pod wpływem naświetlania promieniowaniem UV, powstającego w plazmie, następuje rozpad materiału genetycznego komórki. W konsekwencji mikroorganizm pozbawiony jest możliwości naprawy powstałych

uszkodzeń tj. rozpad kwasów nukleinowych, enzymów czy białek strukturalnych. Kluczową fazą degradacji komórki jest atak wolnych rodników (np. OH•, NO•), które utleniają związki organiczne, budujące mikroorganizmy. Produktami wspomnianych reakcji chemicznych są proste związki organiczne, a ostatecznie woda i dwutlenek węgla [26].

Istotny wpływ na wydajność procesu sterylizacji ma koncentracja cząstek reaktywnych w gazie wyładowczym. Skutecznym sposobem zwiększenia stężenia cząstek reaktywnych, przejawiającym się wzrostem efektywności wyławaniania, jest dodatek do gazu plazmotwórczego azotu bądź tlenu, które zdolne są do tworzenia wolnych rodników [26].

5. Kontrola procesu

W przypadku procesu sterylizacji bardzo ważnym etapem jest kontrola skuteczności i kompletności wyławaniania. Znaczenie tego faktu jest bezdyskusyjne, ponieważ nie jest dopuszczalne stosowanie narzędzi chirurgicznych czy dentystrycznych, bez pewności, że

nie zawierają one żadnych biologicznych zanieczyszczeń. Stosowane są dwa rodzaje kontroli procesu sterylizacji: kontrola wewnętrzna oraz kontrola zewnętrzna. Do zadań kontroli wewnętrznej, przeprowadzanej przez operatora procesu, zalicza się m.in. sprawdzenie parametrów procesu sterylizacji tj. temperatury, czasu, ciśnienia (kontrola fizyczna) [39], a także obserwacja zmiany zabarwienia specjalnych wskaźników m.in. jednoparametrowych, wieloparametrowych i zintegrowanych (kontrola chemiczna) [39]. W zakres tej kontroli wchodzi również metody wizualnej identyfikacji ewentualnie powstających nowych kolonii mikroorganizmów. Z kolei kontrolę zewnętrzną przeprowadzają uprawnione instytucje, a w tym Państwowa Inspekcja Sanitarna, która najczęściej dokonuje tylko kontroli biologicznej.

6. Zastosowania procesu

Metody sterylizacji plazmowej możemy zastosować do wyjaławiania szerokiej grupy przedmiotów, narzędzi i materiałów, a w tym termolabilnych, nieodpornych na działanie wysokiej temperatury. W praktyce metody sterylizacji plazmowej jest wykorzystywana do:

- W przypadku wyjaławiania narzędzi chirurgicznych oraz dentystycznych stosowane są nowoczesne technologie sterylizacji z wykorzystaniem plazmy niskotemperaturowej. Metoda daje pewność co do skuteczności procesu oraz jego bezpieczeństwa użycia, co wraz z istotnym ograniczeniem korozji narzędzi i akcesoriów medycznych, niską temperaturą procesu (ok. 50°C) oraz krótkim czasem procesu sterylizacji (do 75 minut) stanowi ogromną zaletę procesu. Wadą procesu jest niewielka efektywność wyjaławiania sprzętu porowatego [39, 41].
- Przyspieszenia gojenia się ran, leczenia schorzeń dziąseł, neutralizowania przykrego zapachu ciała, dezynfekcja ran itp. Wykorzystanie plazmy do celów medycznych jest możliwe ze względu na niską temperaturę plazmowego czynnika sterylizującego (zbliżoną do temperatury ciała ludzkiego) oraz powstawanie substancji o właściwościach odkażających, w wyniku reakcji pomiędzy tlenem, azotem oraz parą wodną [45, 46].
- Sterylizacja plazmowa może także być używana do sanitaryzacji żywności, gdyż nie powoduje denaturacji białek oraz zmian właściwości organoleptycznych poddawanego wyjaławianiu materiału. Jest to technologia ekologiczna. W przyszłości może zostać zastosowana do przygotowania zapasów pożywienia, przeznaczonych do długotrwałego przechowywania w misjach wojskowych, morskich lub kosmicznych [11, 33].

- Metody sterylizacji plazmowej można także stosować do oczyszczania wody słodkiej z zanieczyszczeń biologicznych, co jest coraz powszechniej wykorzystywane do uzdatniania wody przeznaczonej do celów gospodarskich i spożywczych [14, 16, 23].

7. Podsumowanie

Metoda sterylizacji z zastosowaniem zimnej plazmy, generowanej w warunkach ciśnienia atmosferycznego jest powszechnie stosowana do nieodwracalnego niszczenia mikroorganizmów, zarówno w postaci form wegetatywnych jak i przetrwalnych.

Ze względu na stosunkową łatwość generowania strumienia plazmy z wykorzystaniem różnych źródeł, niewielki koszt aparatury i jej montażu w warunkach użycia, wyjątkowo wysoką skuteczność wyjaławiania, a także brak szkodliwych produktów ubocznych oraz niskie koszty eksploatacyjne, metoda sterylizacji plazmowej jest coraz częściej stosowaną metodą, głównie w medycynie, inżynierii środowiska oraz w technologii żywności.

Istotnym ograniczeniem wszystkich metod sterylizacji plazmowej jest ich niewielka użyteczność do wyjaławiania materiałów porowatych (np. pumeks, celuloza, tkaniny itp.). należy jednak mieć nadzieję, że dynamiczny rozwój badań podstawowych i aplikacyjnych nad metodami sterylizacji plazmowej umożliwi szybkie wykorzystanie ich w znacznie szerszym zakresie.

Piśmiennictwo

1. Akitsu T., Ohkawa H., Tsuji M., Kimura H., Kogoma M.: Plasma sterilization using glow discharge at atmospheric pressure. *Surf. Coat. Tech.* **193**, 29–34 (2005)
2. Alavi S., Raji S., Ghorbani A.: Effects of steam and dry-heat sterilization on bending properties of NiTi wires. *Orthod. Waves*, **68**, 123–128 (2009)
3. Basaran P., Basaran-Akgul N., Oksuz L.: Elimination of *Aspergillus parasiticus* from nut surface with low pressure cold plasma (LPCP) treatment. *Food Microb.* **25**, 626–632 (2008)
4. Beaudet J., Weyers A., Solakyildirim K., Yang B., Takeddin M., Mousa S., Zhang F., Linhardt R.: Impact of Autoclave Sterilization on the Activity and Structure of Formulated Heparin. *J. Pharm. Sci.* **100**, 3396–3404 (2011)
5. Benterrouche L., Sahli S., Rebiai S., Benhamouda A., Sebihi F.Z.: Inactivation of *E. coli* bacteria by atmospheric dielectric barrier discharge. *Inter. J. Nanotech.* **10**, 543–552 (2013)
6. Cortazar O. D., Komppula J., Tarvainen O., Megia-Macias A., Vizcaino-De-Julian A., Koivisto H.: Experimental study of hydrogen plasma breakdown in a 2.45 GHz microwave discharge. *Plasma Sources Sci. T.* **22**, 1–9 (2013)
7. Cvelbar U., Vujosevic D., Vratnica Z., Mozetic M.: The influence of substrate material on bacteria sterilization in an oxygen plasma glow discharge. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39**, 3487–3493 (2006)

8. Czyżkowski D., Hrycak B., Jasiński M., Dors M., Mieczczyk J.: Atmospheric pressure microwave microplasmas microorganism deactivation. *Surf. Coat. Tech.* **294**, 114–119 (2013)
9. Fridman A.: Plasma Chemistry, Cambridge Univ. Pres, New York, 2008
10. Fridman G., Friedman G., Gustol A., Shekhter A.B., Vasilets V.N., Fridman A.: Applied plasma medicine. *Plasma Process. Polym.* **5**, 503–533 (2008)
11. Guillard V., Mauricio-Iglesias M., Gontarg N.: Effect of novel food processing methods on packaging: structure, composition and migration properties. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **50**, 969–988 (2010)
12. Hahnel M., Von Woedtke T., Weltmann K.-D.: Influence of the air humidity on the reduction of *Bacillus* spores in a defined environment at atmospheric pressure using a dielectric barrier surface discharge. *Plasma Process. Polym.* **7**, 244–249 (2010)
13. Hayashi N., Nakashima T., Yonesu A.: Sterilization of medical equipment using air torch plasma produced by microwave discharge. *IEEE T. Plasma Sci.* **39**, 2976–2977 (2011)
14. Hong Y.C., Park H.J., Lee B.J., Kang W.S., Uhm H.S.: Plasma formation using a capillary discharge in water and its applications to the sterilization of *E. coli*. *Phys. Plasmas*, **17**, 1–6 (2010)
15. Hueso J.L., Rico V.J., Frias J.E., Cotrino J., Gonzalez-Elise A.R.: Ar + NO microwave plasmas for *Escherichia coli* sterilization. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 2–4 (2008)
16. Jamroz P., Greda K., Pohl P., Zyrnicki W.: Atmospheric pressure glow discharges generated in contact with flowing liquid cathode: production of active species and application in waste water purification processes. *Plasma Chem. Plasma Process.* **34**, 25–37 (2014)
17. Kanemitsu K., Kaku M. i wsp.: Validation of low-temperature steam with formaldehyde sterilization for endoscopes, using validation devices. *Gastrointestinal Endosc.* **62**, 928–932 (2005)
18. Kikuchi Y., Miyamae M., Nagata M., Fukomoto N.: Effects of environmental humidity and temperature on sterilization efficiency of dielectric barrier discharge plasmas in atmospheric pressure air. *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 1–4 (2011)
19. Kowasaki T., Hoteksu S., Morisaki H., Sato K., Baba H., Umeda S., Nakagawa Y., Wakamatsu S., Sakai M.: Basic study on generation and sterilization of sheet type plasma jet-like DBD under atmospheric pressure. *Int. J. PEST.* **7**, 26–30 (2013)
20. Kuwahara T., Kuroki T., Yoshida K., Saeki N., Okubo M.: Development of sterilization device using air nonthermal plasma jet induced by atmospheric pressure corona discharge. *Thin Solid Films*, **523**, 2–5 (2012)
21. Liu X., Hong F., Guo Y., Zhang J.: Sterilization of *Staphylococcus aureus* by an Atmospheric Non-Thermal Plasma Jet. *Plasma Sci. Technol.* **15**, 439–442 (2013).
22. Masaoka S.: Plasma sterilization of polyethylene terephthalate bottles by pulsed corona discharge at atmospheric pressure. *Biocontrol Sci.* **12**, 59–63 (2007)
23. McCombs G.B., Darby M.L.: New discoveries and directions for medical, dental and dental hygiene research: low temperature atmospheric pressure plasma. *Intern. J. Dent. Hygiene*, **8**, 10–15 (2010)
24. Miao H., Yun G.: The effect of air plasma on sterilization of *Escherichia coli* in dielectric barrier discharge. *Plasma Sci. Technol.* **14**, 735–740 (2012)
25. Miao H., Yun G.: The sterilization of *Escherichia coli* by dielectric-barrier discharge plasma at atmospheric pressure. *Appl. Surf. Sci.* **257**, 7065–7070 (2011)
26. Moisan M., Barbeau J., Crevier M., Pelletier J., Philip N., Saoudi B.: Plasma sterilization. Methods and mechanism. *Pure Appl. Chem.* **74**, 349–358 (2002)
27. Montie T. C., Kelly-Wintenberg K., Reece Roth J.: An overview of research using the one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAugDP) for sterilization of surfaces and materials. *IEEE T. Plasma Sci.* **28**, 41–50 (2000)
28. Morris A.D., McCombs G. B., Akan T., Hynes W., Laroussi M., Tolle S. L.: Cold plasma technology: bactericidal effects on *Geobacillus stearothermophilus* and *Bacillus cereus* microorganism. *J. Dent. Hygiene*, **83**, 55–61 (2009)
29. Moser B., Rieder J.: High-Speed Ambient Air Monitoring of Ethylene Oxide in Sterilization Units. *J. Occup. Environ. Hyg.* **9**, 143–145 (2012)
30. Philip N., Saoudi B., Crevier M., Moisan M., Barbeau J., Pelletier J.: The respective roles of UV photons and oxygen atoms in plasma sterilization at reduced gas pressure: the case of N₂-O₂ mixtures. *IEEE T. Plasma Sci.* **30**, 1429–1436 (2002)
31. Rossi F., Kylian O., Hasiwa M., Gilliland D.: Low pressure plasma discharges for the sterilization and decontamination of surfaces. *New J. Phys.* **11**, 1–34 (2009)
32. Ryan T.P., Stalder H.R., Woloszko J.: Overview of plasma technology used in medicine. *Proc. SPIE*, **8584**, doi:10.1117/12.2007309 (2013)
33. Sastry S.K., Jun S., Somarat R., Samaranyake C., Yousef A., Panoli R.B.: Heating and sterilization technology for long duration space missions: Transport processes in a reusable package. *Ann. NY Acad. Sci.* **1161**, 562–569 (2009)
34. Sato T., Fujioka K., Ramasamy R., Urayama T., Fujii S.: Sterilization efficacy of a coaxial microwave plasma flow at atmospheric pressure. *IEEE Trans. Ind. Appl.* **42**, 399–404 (2006)
35. Shahidi S., Ghoranneviss M.: Sterilization of Cotton Fabrics Using Plasma Treatment *Plasma Sci. Technol.* **15**, 1031–1033 (2013)
36. Shimizu S., Barczyk S., Rottberg P., Shimizu T., Klaempfl T., Zimmermann J.L., Linsmeier C., Weber P., Morfill G.E., Thomas H.M.: Cold atmospheric plasma – A new technology for spacecraft component decontamination. *Plan. Space Sci.* **90**, 60–71 (2014)
37. Shimizu T., Morfill G.E i wsp.: Characterization of microwave plasma torch for decontamination. *Plasma Process. Polym.* **5**, 577–582 (2008)
38. Shintani H.: Validation study and routine control monitoring of moist heat sterilization procedures. *Biocontrol Sci.* **17**, 57–67 (2012)
39. Sokół-Leszczynska B., Sztark E., Leszczyński P., Młynarczyk G., Wróblewska M.: Przygotowanie instrumentarium medycznego do zabiegów chirurgicznych. Część II – sterylizacja i reprocowanie. *Post. Mikrobiol.* **51**, 315–321 (2012)
40. Stryczewska H.: Technologie plazmowe w energetyce i inżynierii środowiska, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2009, str. 26–60
41. Sung S., Huh J., Yun M., Myung B., Jeong C., Jeon Y.: Sterilization effect of atmospheric pressure non-thermal air plasma on dental instruments. *J. Adv. Prosthodont.* **5**, 2–8 (2013)
42. Uhm H., Choi E., Cho G.: Sterilization of microbes by using various plasma jets. *J. Korean Phys. Soc.* **60**, 897–902 (2012)
43. Wang C. H., Wu Y., Li G. F.: A multi-wire-to-cylindrical type packed-based plasma reactor for the inactivation of *M. aureginosa*. *J. Electrostat.* **66**, 71–78 (2008)
44. Williams S., Popovic S., Gupta M.: Microwave plasma generation and filtered transport of O₂. *Plasma Sources Sci. T.* **18**, 1–6 (2009)
45. Yang L., Chen J., Gao J.: Low temperature argon plasma sterilization effect on *Pseudomonas aureginosa* and its mechanisms. *J. Electrostat.* **67**, 646–651 (2009)
46. Yang L., Chen J., Gao J., Guo Y.: Plasma sterilization using the RF glow discharge. *Appl. Surf. Sci.* **255**, 8960–8964 (2009)