

doi:10.15199/48.2017.11.43

Ocena możliwości zastosowania plazmy niskotemperaturowej w celu higienizacji zmieszanych odpadów komunalnych służących do produkcji paliwa alternatywnego

Streszczenie. Higienizacja odpadów komunalnych mających stanowić surowiec do produkcji paliwa alternatywnego następcza wiele problemów. Dlatego w niniejszej pracy oceniono potencjał przeciwdrobnoustrojowy plazmy niskotemperaturowej w stosunku do wybranych grup mikroorganizmów zasiedlających odpady. Uzyskane wyniki są niezwykle obiecujące i skłaniają do prowadzenia dalszych badań mających na celu optymalizację zaproponowanego procesu higienizacji.

Abstract. Conditioning of municipal wastes for fuel production is troublesome process. This work describes antimicrobial potential of non thermal plasma against microbial contamination of wastes. However, achieved results are promising, there is a need to conduct further research and optimize proposed process. (**Evaluation of non thermal plasma application in conditioning of municipal wastes for fuel production**).

Słowa kluczowe: mikroorganizmy, plazma niskotemperaturowa, paliwo alternatywne.

Keywords: microorganisms, non thermal plasma, alternative fuel.

Wstęp

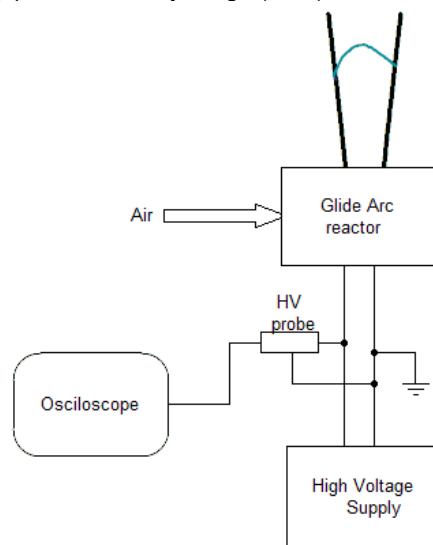
Plazma niskotemperaturowa może być wykorzystana do usuwania zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych w różnorodnych aplikacjach takich jak oczyszczanie gazów, wody, gleby, dekontaminacja powierzchni abiotycznych i biotycznych takich jak np. skóra [1–14]. Plazmę niskotemperaturową stosowano do modyfikacji powierzchni materiałów m.in. zmieniając kąt napięcia powierzchniowego, poprawiając właściwości cienkich powłok oraz zachowując i renowując obiekty archeologiczne [15–24]. Sterylizację przy pomocy plazmy niskotemperaturowej możemy z powodzeniem stosować wszędzie tam, gdzie użycie wysokiej temperatury nie jest wskazane, ze względu na termolabilność wyjaławianych materiałów. Przeciwdrobnoustrojowe właściwości plazmy niskotemperaturowej sprawiają, że sterylizacja przy jej pomocy jest obecnie stosowana w medycynie (jałowienie narzędzi chirurgicznych i dentystycznych, dezynfekcja i wspomaganie gojenia się ran) i przemyśle spożywczym (sanitaryzacja i konserwacja żywności, uzdatnienie wody) oraz w sytuacjach, kiedy pożądanym jest usunięcie, bądź eliminacja mikroorganizmów, zarówno w postaci form wegetatywnych jak i przetrwalnikowych [4,7,11,25–27].

Właściwości sterylizujące plazmy wynikają z reakcji pomiędzy tlenem, azotem i parą wodną, w wyniku których powstają reaktywne formy tlenu i azotu tj., nadtlenek wodoru, rodniki OH, OH₂, NO, O₃, o bardzo silnym działaniu przeciwdrobnoustrojowym. Dodatkowym czynnikiem działającym bójczo na mikroorganizmy jest powstające podczas generowania plazmy promieniowanie UV, które także przyczynia się do ich dezaktywacji [4,7,11,25–28]. Mechanizm działania plazmy na drobnoustroje jest kilkietapowy i polega głównie na trwałym uszkodzeniu ściany komórkowej, błony cytoplazmatycznej, a następnie struktur wewnątrzkomórkowych, materiału genetycznego oraz aparatu enzymatycznego [28].

Te szczególne właściwości przeciwdrobnoustrojowe plazmy sprawiły, że ciągle poszukuje się nowych obszarów jej zastosowania. Duże nadzieje wiązane są z zastosowaniem technologii plazmowych do unieszkodliwiania odpadów [29,30] oraz usuwania gazów odlotowych [31]. Dlatego już od kilku lat można zaobserwować próby zastosowania plazmy wysokotemperaturowej do destrukcji odpadów [32].

Obecnie na rynku są już firmy zajmujące się przetwarzaniem odpadów, które prowadzą badania nad wdrożeniem technologii plazmowych [29]. Jednakże badania te w dalszym ciągu dotyczą plazmy wysokotemperaturowej, bądź też prowadzone są w doświadczalnej, małej skali. Natomiast, zastosowanie plazmy niskotemperaturowej w zakładach przetwarzających odpady komunalne to nadal rozwijany, nowy pomysł. Na korzyść zastosowania plazmy niskotemperaturowej w utylizacji odpadów wg Winnickiego i Tużnik [33] przemawia fakt, iż jest to technologia emisyjnie „czysta”, ale też racjonalna pod względem ekonomicznym.

Dlatego niniejsze badania dotyczyły możliwości zastosowania niskotemperaturowej plazmy w celu higienizacji zmieszanych odpadów komunalnych. Ponadto, planowano określić czy proces obróbki plazmowej w skuteczny sposób ograniczy występowanie, bądź też wyeliminuje drobnoustroje zasiedlające surowce służące do produkcji paliwa alternatywnego (RDF).



Rys. 1. Schemat reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym [34]

Materiał i metody

Obróbka plazmą niskotemperaturową

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem reaktora typu mini Glide-arc na próbkach odpadów komunalnych służących do produkcji paliwa alternatywnego dostarczonych przez firmę „EKO-BIOMASA” Sp. z o.o.

Reaktor typu mini Glide-arc to jednofazowy, dwuelektrodowy reaktor ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym wraz z systemem dystrybucji gazu procesowego [35]. Schemat zaprojektowanego reaktora plazmowego przedstawiono na rysunku 1. W prowadzonych badaniach na podstawie wcześniejszych doświadczeń zaproponowano następujące parametry geometrii reaktora: elektrody miedziane o grubości 1,5 mm, długości 10,4 cm i 5 cm odległością między elektrodami w górnej ich części oraz 3 mm w dolnej części.

Funkcję zapłonu wyładowania i stabilną pracę reaktora plazmowego zapewnia zasilacz wysokiego napięcia. Cykl pracy reaktora jest okresowy. Jeden pełny cykl trwa od zapłonu wyładowania w pobliżu dyszy wlotowej gazu procesowego, aż do jego zgaśnięcia. Parametry układu zasilania po stronie pierwotnej i wtórnej zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry układu zasilania reaktora plazmowego

Moc pozorna pobierana z sieci	52 VA
Napięcie skuteczne po stronie pierwotnej	230 V
Napięcie skuteczne (RMS) po stronie wtórnej	612 V
Napięcie maksymalne po stronie wtórnej	3760 V
Częstotliwość (strona pierwotna i wtórna)	50 Hz

Przeprowadzenie testów polegających na poddaniu próbek odpadów komunalnych działaniu niskotemperaturowej plazmy

Odpady przesłane przez firmę „EKO-BIOMASA” Sp. z o.o. w opakowaniu zbiorczym zostały podzielone na porcje przy użyciu wagi laboratoryjnej. 15 g odpadów mieszanych umieszczono w zdezynfekowanej komorze szklanej, zaś nad ich powierzchnią umieszczono elektrody reaktora typu mini Glide-arc. Zgodnie z wcześniejszymi ustaleniami gazem procesowym było powietrze, jako najbardziej odpowiednie ze względów ekonomicznych. Przepływ powietrza wynosił 480 m³/h. Plazmą niskotemperaturową działano na odpady przez odpowiednio 5 i 15 min. Dla każdego przypadku wykonano 3 powtórzenia. Wykonano również próbkę kontrolną działającą na odpady samym powietrzem o zadanym przepływie bez udziału plazmy. Odpady nie były mieszane mechanicznie, delikatne przemieszanie frakcji lekkich było wynikiem przepływu gazu procesowego.

Temperaturę mierzono przy użyciu miernika temperatury DT-847U z termoparą typu K. Termoparę umieszczono wewnątrz próbki poddanej działaniu plazmy w odległości ok. 1,5 cm od powierzchni odpadów. Średnie temperatury próbek dla 5 min trwania eksperymentu nie przekraczały 60°C. Po zakończonym procesie obróbki plazmą, próbki zapakowano do sterylnych toreb, które po opisaniu (nr 1,2,3 – próbki testowe poddane obróbce plazmowej; nr 4 – próbka kontrolna) niezwłocznie przesłano do laboratorium mikrobiologicznego celem wykonania dalszych analiz.

Analizy mikrobiologiczne

Wszystkie próbki, na które działano plazmą niskotemperaturową (1,2,3) oraz próbkę kontrolną (4) poddano analizie mikrobiologicznej. Z każdej próbki odważano po 10 g badanego materiału celem wykonania izolacji mikroorganizmów. Izolację wykonano metodą seryjnych rozcieńczeń wg Kocha wykorzystując podłoża

mikrobiologiczne. Oznaczono następujące grupy drobnoustrojów: bakterie ogólne wegetatywne i spoczynkowe (agar MPA, BTL, hodowane 37°C, 24h), grzyby pleśniowe (agar maltozowy MEA, BTL, hodowane 28°C, 5 dni), promieniowce (agar Pochona, BTL, hodowane 28°C, 7 dni). Zbadano także występowanie bakterii potencjalnie chorobotwórczych: *Staphylococcus* spp. (agar Chapmana, BTL, hodowane 37°C, 24h), *Escherichia coli* (TBX agar, BTL, hodowane 44°C, 24h), *Salmonella* spp. i *Shigella* spp. (agar SS, BTL, hodowane 37°C, 24h), *Enterococcus faecalis* (podłoże Slanetz Bartley, BTL, hodowane 37°C, 48h), *Clostridium perfringens* (agar z siarczanem i cykloseryną SC, BTL, hodowane 37°C, 24h). Analizę seryjnych rozcieńczeń prowadzono w trzech powtórzeniach, zmierzono także odczyn próbek. Liczbę jednostek tworzących kolonie (jtk) drobnoustrojów oznaczano metodą posiewu rozcieńczeń, przeliczając wynik oznaczenia na jeden gram badanego surowca. W celu wstępnej identyfikacji mikroorganizmów wyizolowanych z próbek, sporządzono preparaty bakteriologiczne barwione przy pomocy metody Grama oraz preparaty przyżyciowe w płynie Lugola.

Analiza statystyczna uzyskanych wyników została przeprowadzona przy użyciu programu Statistica v. 12.5 (StatSoft). Obliczono średnią liczebność mikroorganizmów oraz wykonano jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA) w celu sprawdzenia istotności zróżnicowania liczebności wybranych grup mikroorganizmów w badanych próbkach.

Wyniki i dyskusja

Plazma niskotemperaturowa jest z powodzeniem stosowana do inaktywacji bakterii (*Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, *Geobacillus stearothermophilus*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella enteridis*) i grzybów (*Aspergillus brasiliensis* czy *Alternaria alternata*), a także ich toksycznych metabolitów [36–40]. Na podstawie analizy wyników badań własnych zawartych w tabeli 2 dotyczących oceny występowania wybranych grup drobnoustrojów w surowcach służących do produkcji RDF poddanych procesowi obróbki plazmowej, stwierdzono istnienie dużej mikrobiologicznej bioróżnorodności. Takie zjawisko powinno dziwić, ponieważ jak pokazują badania Fernández i in. [41] nt. dezaktywacji biofilmu, likwidacja mieszanych populacji drobnoustrojów jest niezwykle problematyczna. Czynnikiem ograniczającym działanie plazmy wg Fernández i in. [41], jest wielowarstwowe upakowanie drobnoustrojów, które sprawia, iż komórki dezaktywowane przez działanie plazmy stanowią swoistą barierę ochronną dla mikroorganizmów znajdujących się głębiej w sterylizowanym materiale. Na szczególną uwagę zasługuje obecność w analizowanym materiale drobnoustrojów patogennych (*Staphylococcus* spp., *E. coli*, *Salmonella* spp., *E. faecalis*), mogących stanowić zagrożenie z epidemiologicznego punktu widzenia (Tab. 2). Obecnie nie ma zgody, co do skali wpływu budowy ściany komórkowej na efektywność działania plazmy niskotemperaturowej. Natomiast według Ermolaeva i Gintsburg [42] skuteczność działania gorącej plazmy jest uzależniona od gatunku i źródła izolacji szczepu. W badaniach Ermolaeva i Gintsburg [42] testowane bakterie Gram-ujemne prezentowały zbliżoną wrażliwość na działanie plazmy, inaczej niż szczepy Gram-dodatnie, wśród których wyróżniono izolaty o obniżonej wrażliwości. Natomiast, Daeschlein i in. [43] uznali, iż to bakterie Gram-dodatnie są znacznie bardziej wrażliwe niż Gram-ujemne. Na podstawie analizy danych zawartych w tabeli 2 należy stwierdzić, że odczyn próbek zawierał się w przedziale 7,29-7,47 i oscylował w granicach obojętnego. Dlatego

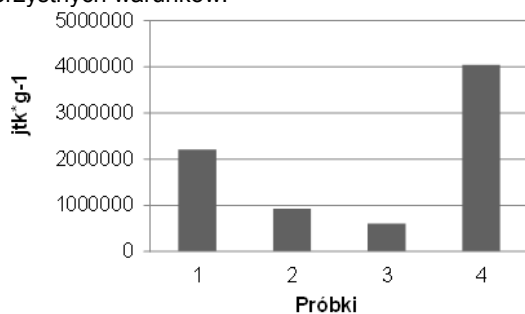
można uznać, że pH surowców do produkcji paliwa alternatywnego nie miało wpływu na zmiany liczebności badanych mikroorganizmów, ponieważ utrzymywało się na stałym poziomie. Wyników dotyczących liczebności bakterii z rodzaju *Shigella*, promieniowców oraz *C. perfringens* nie zamieszczono w tabeli, ponieważ mikroorganizmów tych

nie wykryto w żadnej z analizowanych próbek. Na podstawie analizy statystycznej uzyskanych wyników stwierdzono, że różnice w liczebności mikroorganizmów pomiędzy badanymi próbkami są istotne statystycznie (Tabela 2).

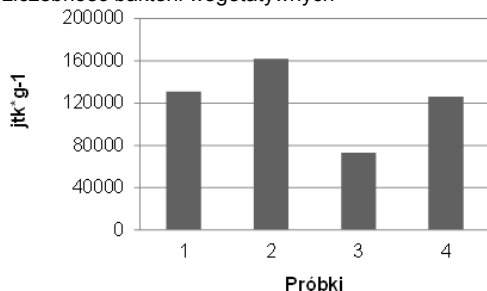
Tabela 2. Średnie liczebności mikroorganizmów (jtk·g⁻¹) i średnie pH badanych próbek surowca poddanego procesowi obróbki plazmowej oraz wyniki analizy wariancji dotyczącej zróżnicowania liczebności drobnoustrojów.

Mikroorganizmy	1.	2.	3.	4.	Wartość wsp. F (*wartości są istotne przy p<0,05)
Bakterie vegetatywne	2208930	929667	608082	4041872	4352,7*
Bakterie spoczynkowe	130939	161773	73124	125953	11,1*
Grzyby pleśniowe	403974	105983	90321	381978	36993,8*
<i>Staphylococcus</i> spp.	23142667	27111667	24874333	27644482	20,9*
<i>E. coli</i>	44844	48637	79729	179958	48757,8*
<i>Salmonella</i> spp.	8099	40	476	33101	113563,9*
<i>E. faecalis</i>	0	0	0	850	12,9*
pH	7,47	7,41	7,29	7,31	-

Liczebność bakterii vegetatywnych przewyższała liczebność bakterii spoczynkowych. Natomiast o ile rozkład liczebności bakterii vegetatywnych (rys. 2) w analizowanych próbkach wskazuje na silne tendencje malejące pod wpływem działania plazmy, to dla bakterii spoczynkowych (rys. 3) wyniki są niejednoznaczne. Powodem takiego zjawiska może być fakt, iż formy spoczynkowe bakterii są zdolne do wytwarzania struktur ochronnych (osłonki, otoczki) umożliwiających przetrwanie niekorzystnych warunków.



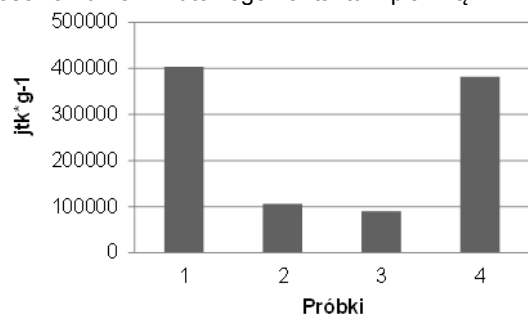
Rys. 2. Liczebność bakterii vegetatywnych



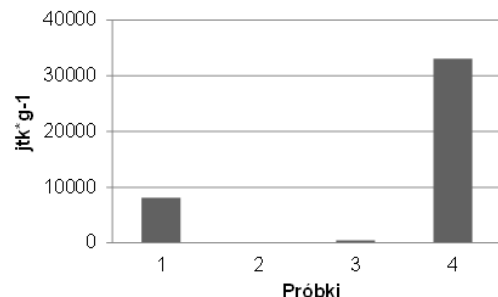
Rys. 3. Liczebność bakterii spoczynkowych

Liczebność grzybów pleśniowych (rys. 4) w 2 z 3 próbek testowych wyraźnie spadła w stosunku do kontroli. Natomiast w przypadku próbki nr 1 liczebność grzybów pleśniowych pozostała na bardzo wysokim poziomie, pomimo działania plazmy. Taki stan rzeczy mógł być spowodowany szerokimi zdolnościami adaptacyjnymi grzybów mikroskopowych do niekorzystnych warunków środowiska a także ich nierównomiernym rozmieszczeniem w odpadach poddanych obróbce plazmowej. W wyniku przeprowadzonej analizy mykologicznej oznaczono następujące rodzaje grzybów pleśniowych w tym toksynotwórczych: *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Rhizopus* oraz *Alternaria*. Mogą one stanowić zagrożenie dla zdrowia osób mających kontakt z surowcami służącymi

do produkcji paliwa alternatywnego, ponieważ produkują mykotoksyny i wywołują reakcje alergiczne [44]. Liczebność bakterii z rodzaju *Salmonella* (rys. 5) widocznie zmalała po zastosowaniu 15 minutowego kontaktu z plazmą.



Rys. 4. Liczebność grzybów pleśniowych



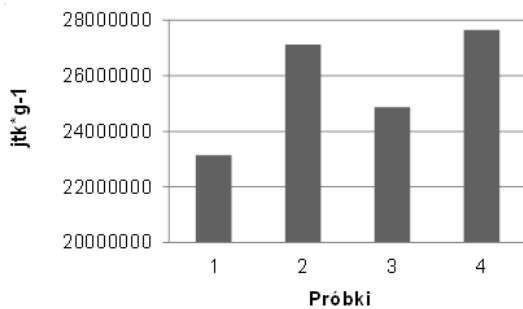
Rys. 5. Liczebność *Salmonella* spp.

Dla gronkowców (rys. 6) uzyskane wyniki nie wykazują silnych tendencji, natomiast we wszystkich analizowanych próbkach testowych zaobserwowano spadek liczebności *Staphylococcus* spp. w stosunku do kontroli.

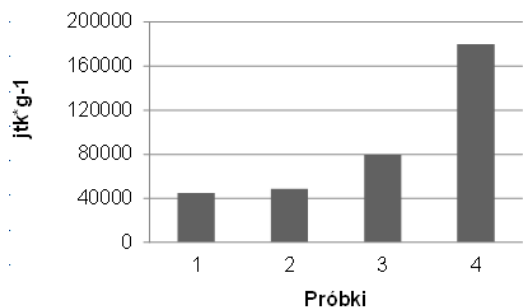
Liczebność *E. coli* (rys. 7) wyraźnie spadła po zastosowaniu 15 minutowego czasu działania plazmy. Analiza liczebności *E. faecalis* (Tab. 2) dowodzi wysoce bakteriobójczego działania plazmy niskotemperaturowej, ponieważ w próbkach poddanych jej działaniu mikroorganizmów tych nie stwierdzono, stąd wykresu obrazującego ten stan nie zamieszczono w pracy.

Należy pamiętać, że odpady są bardzo specyficznym surowcem z mikrobiologicznego punktu widzenia. Ze względu na swój skład, strukturę oraz zasobność w składniki pokarmowe są dla drobnoustrojów bardzo przyjaznym środowiskiem. Według Fernández i in. [41] skuteczność plazmy niskotemperaturowej zależy od poziomu zróżnicowania struktury powierzchni traktowanych

materiałów. Fernández i in. [41] stwierdzili, iż z owoców i warzyw o bardziej pofalowanej powierzchni trudniej usuwa się mikroorganizmy z użyciem plazmy. Taki stan rzeczy tłumaczyli zróżnicowaniem budowy powierzchni, ponieważ wykazali, że wszelkie pofalowania i nierówności stają się miejscem „chowania się” komórek bakterii i tym samym zmniejsza się ich ekspozycja na czynniki sterylizujące plazmy. Dlatego ograniczeniem sterylizacji przy pomocy technologii plazmowych jest ich niewielka efektywność w wyjaławianiu materiałów porowatych, a więc o strukturze podobnej do tej jaką posiadają zmieszane odpady komunalne [26,45].



Rys. 6. Liczebność *Staphylococcus* spp.



Rys. 7. Liczebność *E. coli*

Na podstawie badań własnych możemy uznać, iż liczebność niemal wszystkich drobnoustrojów (poza grzybami pleśniowymi w 1 i bakteriami spoczynkowymi w 2 próbkach) spadła (w niektórych przypadkach do zera) po zastosowaniu 15 minutowego kontaktu surowców z plazmą.

Podsumowanie

Odpady poddano działaniu plazmy niskotemperaturowej generowanej w reaktorze mini Glide-arc w celu ich higienizacji. Gazem procesowym ze względów praktycznych, uwzględniając też koszty eksploatacyjne potencjalnej instalacji było powietrze.

Na podstawie otrzymanych wyników należy stwierdzić, iż zastosowanie 15 minutowego czasu kontaktu surowców służących do produkcji paliwa alternatywnego z plazmą przyczyniło się do ich higienizacji. Zgromadzone wyniki są niezwykle obiecujące i pozwalają sądzić, że plazma niskotemperaturowa może być w przyszłości stosowana w procesie stabilizacji odpadów komunalnych. Natomiast należy pamiętać, iż surowce służące do produkcji paliwa alternatywnego stanowią mieszaninę wielu rodzajów odpadów, w tym także odpadów organicznych (zielonych, kuchennych, papieru i tektury, itp.), które są doskonałą pożywką dla drobnoustrojów a ich higienizacja nastęrcza wiele problemów. Odpady często odznaczają się wysoką wilgotnością, obojętnym pH a także są bogate w wiele składników pokarmowych potrzebnych do wzrostu i rozwoju mikroorganizmów chorobotwórczych. Dodatkowo, odpady posiadają nieregularną strukturę, niejednorodną morfologię a także dużą porowatość, a to są niewątpliwie czynniki

ułatwiające drobnoustrojom bytowanie na ich powierzchni. Ponadto, odpady zasiedlane są przez mieszane populacje drobnoustrojów odznaczające się dużą bioróżnorodnością, co w praktyce oznacza, iż bardzo trudno jest w skuteczny sposób je dezaktywować. Dlatego zasadnym jest prowadzenie dalszych badań mających na celu optymalizację parametrów technologicznych procesu obróbki plazmowej. Takie postępowanie może przyczynić się do wdrożenia technologii plazmy niskotemperaturowej w utylizacji odpadów komunalnych.

Podziękowania

Publikacja powstała przy wsparciu projektu „EkoRDF – innowacyjna technologia wytwarzania paliwa alternatywnego z odpadów komunalnych dla elektrowni i elektrociepłowni – kluczowym elementem systemu gospodarki odpadami w Polsce”, w ramach Programu GEKON (GEKON2/05/268002/17/2015).

Autorzy: Katarzyna Wolny-Koładka, Katedra Mikrobiologii, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, Polska, e-mail: katarzyna.wolny@urk.edu.pl. Joanna Pawłat, Piotr Terebun, Michał Kwiatkowski, Jarosław Diatczyk, Zakład Technologii Plazmowych i Energii Odnawialnej, Instytut Elektrotechniki i Elektrotechnologii Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, e-mail: askmik@hotmail.com.

LITERATURA

- [1] Pawłat J., Mizuno A., Yamabe C., Pollo I., Absorption and Decomposition of CH₃CHO in the Cylindrical Foaming System, *Journal Of Advanced Oxidation Technologies*, 7 (2004), 59–64
- [2] Lukes P., Dolezalova E., Sisrova I., Clupek M., Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: evidence for the formation of peroxyxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of H₂O₂ and HNO₂, *Plasma Sources Science and Technology*, 23 (2014), nr. 1, 015019
- [3] Mizeraczyk J., Dors M., Jasiński M., Hrycak B., Czyłkowski D., Atmospheric pressure low-power microwave microplasma source for deactivation of microorganisms, *European Physical Journal - Applied Physics*, 61 (2013), nr. 2, 24309
- [4] Pawłat J., Atmospheric pressure plasma jet for decontamination purposes, *European Physical Journal - Applied Physics*, 61 (2013), nr. 2, 24323
- [5] Fridman G., Peddinghaus M., Balasubramanian M., Ayan H., Fridman A., Gutsol A., Brooks A., Blood coagulation and living tissue sterilization by floating-electrode dielectric barrier discharge in air, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 26 (2006), nr. 4, 425–442
- [6] Krumpolec R., Zahoranova A., Černák M., Kováčik D., Chemical and physical evaluation of hydrophobic pp-HMDSO layers deposited by plasma polymerization at atmospheric pressure, *Chem. Listy*, 106 (2012), 1450–1454
- [7] Brisset J.-L., Pawłat J., Chemical Effects of Air Plasma Species on Aqueous Solutes in Direct and Delayed Exposure Modes: Discharge, Post-discharge and Plasma Activated Water, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 36 (2016), nr. 2, 355–381
- [8] Sahni M., Finney W.C., Locke B.R., Degradation of aqueous phase polychlorinated biphenyls (PCB) using pulsed corona discharges, *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 8 (2005), nr. 1, 105–111
- [9] Hensel K., Kučerová K., Tarabová B., Janda M., Machala Z., Sano K., Mihai C.T., Ciorpac M., Gorgan L.D., i in., Effects of air transient spark discharge and helium plasma jet on water, bacteria, cells, and biomolecules, *Biointerphases*, 10 (2015), nr. 2, 029515
- [10] Janda M., Martišovitéš V., Hensel K., Machala Z., Generation of antimicrobial NO_x by atmospheric air transient spark discharge, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 36 (2016), nr. 3, 767–781
- [11] Bruggeman P.J., Kushner M.J., Locke B.R., Gardeniers J.G.E., Graham W.G., Graves D.B., Hofman-Caris R., Maric D., Reid J.P., i in., Plasma–liquid interactions: a review and roadmap,

- Plasma sources science and technology*, 25 (2016), nr. 5, 053002
- [12] Krishna S., Ceriani E., Marotta E., Giardina A., Špatenka P., Paradisi C., Products and mechanism of verapamil removal in water by air non-thermal plasma treatment, *Chemical Engineering Journal*, 292 (2016), 35–41
- [13] Pawlat J., Ihara S., Removal of color caused by various chemical compounds using electrical discharges in a foaming column, *Plasma Processes and Polymers*, 4 (2007), nr. 7–8, 753–759
- [14] Vesel A., Junkar I., Cvelbar U., Kovac J., Mozetic M., Surface modification of polyester by oxygen-and nitrogen-plasma treatment, *Surface and interface analysis*, 40 (2008), nr. 11, 1444–1453
- [15] Krčma F., Blahová L., Fojtíková P., Graham W.G., Grossmannová H., Hlochová L., Horák J., Janová D., Kelsey C.P., i in., Application of low temperature plasmas for restoration/conservation of archaeological objects, *Journal of Physics: Conference Series*, 565 (2014), nr. 1, 1
- [16] Škoro N., Puač N., Lazović S., Cvelbar U., Kokkoris G., Gogolides E., Characterization and global modelling of low-pressure hydrogen-based RF plasmas suitable for surface cleaning processes, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46 (2013), nr. 47, 475206
- [17] Prysiashnyi V., Zaporojchenko V., Kersten H., Černák M., Influence of humidity on atmospheric pressure air plasma treatment of aluminium surfaces, *Applied Surface Science*, 258 (2012), nr. 14, 5467–5471
- [18] Kolacinski Z., Szymanski L., Raniszewski G., LTE plasma reactors for materials conversion, *The European Physical Journal Applied Physics*, 61 (2013), nr. 2, 24314
- [19] Favia P., Plasma deposited coatings for biomedical materials and devices: Fluorocarbon and PEO-like coatings, *Surface and Coatings Technology*, 211 (2012), 50–56
- [20] Dvořáková H., Čech J., Černák M., Štáhel P., Plasma surface activation of high density polyethylene at atmospheric pressure, *Composites*, 2 (2015), 3
- [21] Pawlat J., Terebun P., Kwiatkowski M., Diatczyk J., RF atmospheric plasma jet surface treatment of paper, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49 (2016), nr. 37, 374001
- [22] Pawlat J., Kwiatkowski M., Terebun P., Murakami T., RF-powered atmospheric-pressure plasma jet in surface treatment of high-impact polystyrene, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44 (2016), nr. 3, 314–320
- [23] Janča J., Czernichowski A., Wool treatment in the gas flow from gliding discharge plasma at atmospheric pressure, *Surface and Coatings Technology*, 98 (1998), nr. 1–3, 1112–1115
- [24] Kwiatkowski M., Terebun P., Krupski P., Diatczyk J., Pawlat J., Analiza kąta zwilżania materiałów polistyrenowych poddanych obróbce plazmą nietermiczną wytwarzaną w reaktorze typu dysza z wyładowaniem barierowym, *Przegląd elektrotechniczny*, 92 (2016), nr. 6, 131–133
- [25] Samoń R., Czapiński J., Grządziel J., Płonka M., Pawlat J., Diatczyk J., Ocena działania bakteriobójczego niskotemperaturowej plazmy nierównowagowej generowanej w reaktorze RF, *European Journal Of Medical Technologies*, (2014), nr. 2, 17–26
- [26] Dzimitrowicz A., Jamroz P., Nowak P., Sterylizacja za pomocą niskotemperaturowej plazmy, generowanej w warunkach ciśnienia atmosferycznego, *Postępy Mikrobiologii*, 54 (2015), nr. 2, 195–200
- [27] Laskowska M., Bogusławska-Was E., Kowal P., Holub M., Dabrowski W., Skuteczność wykorzystania niskotemperaturowej plazmy w mikrobiologii i medycynie, *Postępy Mikrobiologii*, 55 (2016), nr. 2, 172–181
- [28] Moisan M., Barbeau J., Crevier M.-C., Pelletier J., Philip N., Saoudi B., Plasma sterilization. Methods and mechanisms, *Pure & Applied Chemistry*, 74 (2002), nr. 3, 349
- [29] Wielgosiński G., Przegląd technologii termicznego przekształcania odpadów, *Nowa Energia*, 1 (2011), 55
- [30] Pawlat J., Inaba T., Study on atmospheric pressure plasma reactor for biphenyl decomposition, *IEEE Transactions on Power and Energy*, 123 (2003), nr. 7, 844–851
- [31] Pawlat J., Diatczyk J., Stryczewska H.D., Low-temperature plasma for exhaust gas purification from paint shop - a case study, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr. 1, 245–248
- [32] Gomez E., Rani D.A., Cheeseman C.R., Deegan D., Wise M., Boccaccini A.R., Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review, *Journal of Hazardous Materials*, 161 (2009), nr. 2–3, 614–626
- [33] Winnicki T., Tużnik P., Bezemisijne technologie przetwarzania stałych odpadów komunalnych – najkrótsza droga spełnienia trudnych wymogów unijnych, *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury*, 60 (2013), nr. 3, 223–237
- [34] Terebun P., Kwiatkowski M., Pawlat J., Diatczyk J., Krupski P., Janda M., Hensel K., Machala Z., Proc. 20th Symposium on Application of Plasma Processes, Tatranská Lomnica, Slovakia, (2015), 283-287
- [35] Dasan B., Onal-Ulusoy B., Pawlat J., Diatczyk J., Sen Y., Mutlu M., A New and Simple Approach for Decontamination of Food Contact Surfaces with Gliding Arc Discharge Atmospheric Non-Thermal Plasma, *Food & Bioprocess Technology*, 10 (2017), nr. 4, 650
- [36] Basaran P., Basaran-Akgul N., Oksuz L., Elimination of *Aspergillus parasiticus* from nut surface with low pressure cold plasma (LPCP) treatment, *Food Microbiology*, 25 (2008), nr. 4, 626–632
- [37] Ragni L., Berardinelli A., Vannini L., Montanari C., Sirri F., Guerzoni M.E., Guarnieri A., Non-thermal atmospheric gas plasma device for surface decontamination of shell eggs, *Journal of Food Engineering*, 100 (2010), nr. 1, 125–132
- [38] Sato T., Fujioka K., Ramasamy R., Urayama T., Fujii S., Sterilization efficacy of a coaxial microwave plasma flow at atmospheric pressure, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42 (2006), nr. 2, 399–404
- [39] Miao H., Yun G., The Effect of Air Plasma on Sterilization of *Escherichia coli* in Dielectric Barrier Discharge, *Plasma Science and Technology*, 14 (2012), nr. 8, 735
- [40] Xiaohu L., Feng H., Ying G., Jing Z., Jianjun S., Sterilization of *Staphylococcus Aureus* by an Atmospheric Non-Thermal Plasma Jet, *Plasma Science & Technology*, 15 (2013), nr. 5, 439
- [41] Fernández A., Noriega E., Thompson A., Inactivation of *Salmonella enterica* serovar Typhimurium on fresh produce by cold atmospheric gas plasma technology, *Food Microbiology*, 33 (2013), nr. 1, 24–29
- [42] Ermolaeva S.A., Varfolomeev A.F., Chernukha M.Y., Yurov D.S., Vasiliev M.M., Kaminskaya A.A., Moisenovich M.M., Romanova J.M., Murashev A.N., i in., Bactericidal effects of non-thermal argon plasma in vitro, in biofilms and in the animal model of infected wounds, *Journal of Medical Microbiology*, 60 (2011), nr. 1, 75–83
- [43] Daeschlein G., Napp M., von Podewils S., Lutze S., Emmert S., Lange A., Klare I., Haase H., Gumbel D., i in., In Vitro Susceptibility of Multidrug Resistant Skin and Wound Pathogens Against Low Temperature Atmospheric Pressure Plasma Jet (APPJ) and Dielectric Barrier Discharge Plasma (DBD), *Plasma Processes and Polymers*, 11 (2014), nr. 2, 175–183
- [44] Wolny-Koładka K., Malinowski M., Sikora A., Szymonik K., Pelczar G., Wawrzyniak-Turek K., Effect of the Intensive Aerobic Biostabilization Phase on Selected Microbiological and Physicochemical Parameters of Wastes, *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 4 (2016), nr. 1, 1099–1115
- [45] Sung S.-J., Huh J.-B., Yun M.-J., Chang B.M.W., Jeong C.-M., Jeon Y.-C., Sterilization effect of atmospheric pressure non-thermal air plasma on dental instruments, *The Journal of Advanced Prosthodontics*, 5 (2013), nr. 1, 2–8