

Tomasz CZAPKA¹, Mateusz CHRZANOWSKI¹

Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny,
Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii (1)

Technologia wytwarzania ozonu z wykorzystaniem reaktora niskotemperaturowej plazmy

Streszczenie. *Przedmiotem pracy jest opis technologii wytwarzania ozonu z wykorzystaniem niskotemperaturowej plazmy. Proces tworzenia ozonu prowadzono w generatora pracującym przy ciśnieniu atmosferycznym powietrza. Ze względu na mały opór hydrauliczny urządzenia, może być ono wykorzystane do pracy ciągłej dla znacznych prędkości przepływu gazu roboczego. W konstrukcji reaktora wykorzystano barierę dielektryczną z ceramiki alundowo-cyrkonowej w celu uzyskania stabilnych w czasie i intensywnych elektrycznych wyładowań niezpełnych w przestrzeni roboczej generatora. Do zasilania generatora wykorzystano wysokie napięcie o modulowanej częstotliwości.*

Słowa kluczowe: niskotemperaturowa plazma, ozon, wyładowania elektryczne

Wstęp

Plazma niskotemperaturowa, nazywana także nietermiczną, zimną lub plazmą wyładowań elektrycznych, jest gazem zjonizowanym w stosunkowo niewielkim stopniu z dużą zawartością cząstek neutralnych. Efekt ten prowadzi do nierównowagowego charakteru takiej plazmy. Oznacza to, że energie elektronów mają znacznie większe wartości od energii pozostałych cząstek. Większość energii w plazmie niskotemperaturowej wykorzystywana jest do wytwarzania wysokoenergetycznych elektronów i kierowana na dysocjację wywołowaną zderzeniami z elektronami oraz dalszą jonizację gazu, a nie na podgrzewanie gazu roboczego [1]. Energie cząstek (elektronów) w plazmie niskotemperaturowej mieszczą się w zakresie 1-10 eV, co odpowiada temperaturom 10^4 - 10^5 K. Jony i cząstki obojętne gazu osiągają jedynie wartości nieznacznie wyższe do wartości temperatury pokojowej. Proces jonizacji prowadzi m.in. do wytwarzania wysokoenergetycznych elektronów i reaktywnych rodników, które wykorzystywane są w procesach plazmochemicznych, charakteryzujących się dużą efektywnością.

Obecnie zainteresowanie wytwarzaniem i wykorzystaniem plazmy nietermicznej stale rośnie, w szczególności w procesach związanych z niszczeniem grzybów, wirusów i bakterii, usuwaniem niebezpiecznych tlenków z gazów spalinowych, neutralizacją metali ciężkich oraz produkcją ozonu [2,3].

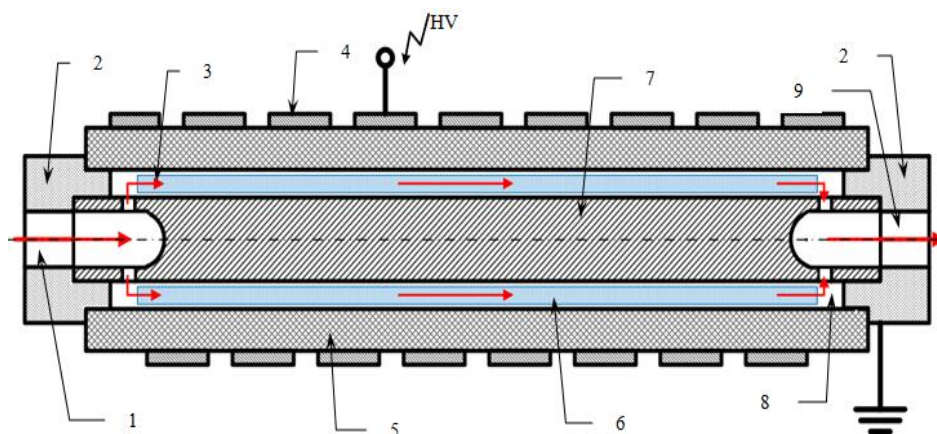
Spośród wszystkich zastosowań plazmy niskotemperaturowej w procesach powiązanych z szeroko pojętą ochroną środowiska najczęściej stosowaną obecnie technologią jest obróbka wody pitnej. Otrzymywany przy pomocy nietermicznej plazmy ozon doskonale nadaje się do usuwania zawartych w wodzie drobnoustrojów. Jego właściwości pozwalają także na utlenianie rozpuszczonych substancji nieorganicznych, żelaza czy manganu, nie powodując przy tym zmiany smaku i zapachu, co niestety występuje przy uzdatnianiu wody z wykorzystaniem chloru. W procesie traktowania obiektów biologicznie czynnych z wykorzystaniem niskotemperaturowej plazmy – trudno gąjących się ran, żywności, ziaren roślin [4,5], wysokoenergetyczne elektrony,

wchodzących w skład plazmy niskotemperaturowej, zapoczątkowują reakcje chemiczne, które wpływają na struktury biologiczne wirusów, grzybów i bakterii, ale co najważniejsze nie niszczą składników i komórek korzystnych dla funkcjonowania poddanego działaniu plazmy środowiska mikrobiologicznego [6].

Reaktor niskotemperaturowej plazmy

W badaniach opracowano model reaktora plazmowego z tzw. barierą dielektryczną (ang. dielectric barrier discharge, DBD) do badania procesu wytwarzania ozonu. W reaktorach tego typu ze względu na obecność bariery dielektrycznej (co najmniej jednej) między elektrodami, wymagane jest zastosowanie napięcia przemiennego lub o podwyższonej częstotliwości do zapoczątkowania wyładowania. Aby nastąpiło przebiecie gazu, w obszarze między elektrodami musi wystąpić wystarczająco wysokie pole elektryczne. Najczęściej dielektryczna ogranicza gęstość prądu w przestrzeni gazowej, co powoduje, że występują w niej jedynie równomiernie rozłożone wyładowania niezupełne w postaci tzw. mikrowyładowań. Najczęściej jako warstwy dielektryczne stosuje się szkło kwarcowe, ceramikę, szkliska lub materiały polimerowe. Przy bardzo wysokich częstotliwościach (powyżej GHz) ograniczenie przepływu przez warstwę dielektryczną staje się mniej efektywne. Z tego powodu do zasilania tego typów reaktorów stosuje się napięcia o częstotliwościach z zakresu częstotliwości przemysłowej do 10 MHz [7].

Generator ozonu zbudowano z wykorzystaniem cylindrycznego układu elektrod i zasilano wysokim napięciem o modulowanej częstotliwości – Rys. 1. Objętość czynna reaktora (objęta wyładowaniami barierowymi) wynosiła ok. 5,3 cm³. Amplituda i częstotliwość modulacji napięcia zasilającego wynosiły odpowiednio 17 kV i 500-1000 Hz.



Rys. 1. Schemat ideowy badanego generatora ozonu; 1 – wlot gazu roboczego (powietrza), 2 – mosiężne końcówki umożliwiające podłączenie gniazd wlotu i wylotu gazu, 3 – oznaczenie kierunku przepływu gazu roboczego przez komorę reaktora, 4 – elektroda wysokonapięciowa, 5 – rurka z ceramiki alundowo-cyrkonowej, 6 – obszar tworzenia się plazmy w szczeliny wyładowczej, 7 – elektroda uziemiona, 8 – szczelina wyładowcza, 9 – wylot gazu roboczego i ozonu.

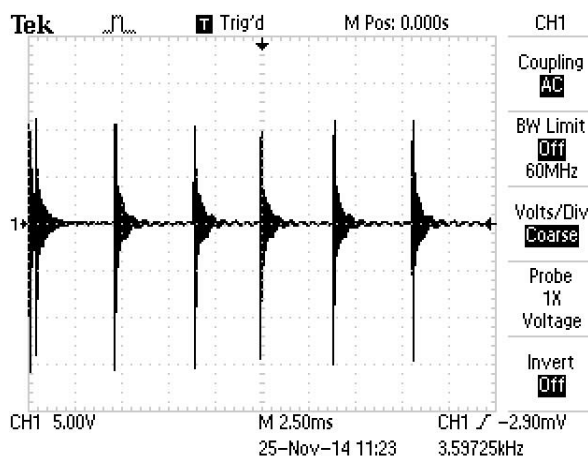
Przykładowy widok niskotemperaturowej plazmy, wytwarzanej w powietrzu przy ciśnieniu atmosferycznym w reaktorze z barierą dielektryczną przedstawiono na Rys. 2.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016



Rys. 2. Obraz wyładowań elektrycznych – plazmy niskotemperaturowej w komorze reaktora plazmowego z barierą dielektryczną.

Przykładowy przebieg napięcia zasilającego plazmowy reaktor pokazano na Rys. 3.



Rys. 3. Przykładowy przebieg napięcia zasilającego generator ozonu.

Podczas badań zmieniano częstotliwość modulacji napięcia zasilającego reaktor plazmowy, co w istotny sposób wpływało na wartości mocy rozpraszanej w reaktorze w procesie wytwarzania ozonu oraz na wartość stężenia ozonu w reaktorze.

Proces tworzenia ozonu

Podczas wyładowań barierowych w wyniku zderzeń elektronów z cząstkami tlenu, następuje ich dysocjacja na atomy:



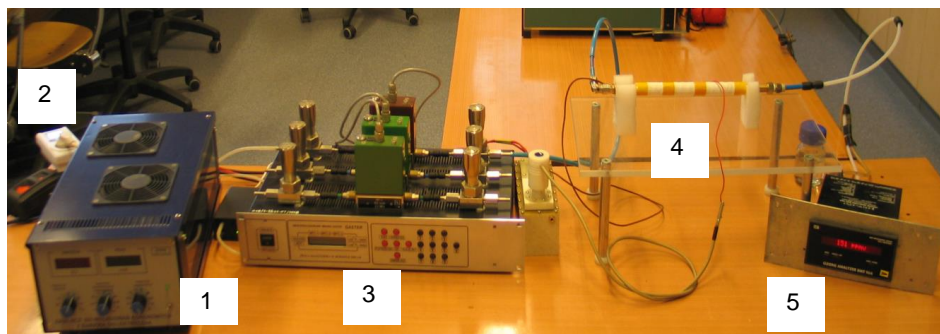
Kolejnym etapem na skutek kolizji atomów tlenu z cząsteczkami tlenu powstają cząsteczki ozonu:



Sumaryczną reakcję tworzenia ozonu można zapisać w postaci:



Proces wytwarzania ozonu prowadzony był w powietrzu przy ciśnieniu atmosferycznym w układzie pomiarowym przedstawionym na Rys. 4. W trakcie badań regulowano wartość mocy rozpraszanej w reaktorze (27-54 W) oraz wartość objętościowego natężenia przepływu powietrza (0,2-2 l/min). Dla ustalonych warunków zasilania (amplituda, częstotliwość modulacji) wyznaczono maksymalne wartości stężenia ozonu w reaktorze. Wyniki pomiarów stężenia ozonu dla różnych wartości objętościowego natężenia przepływu powietrza przy ustalonej wartości mocy rozpraszanej w reaktorze pokazano na Rys. 5.



Rys. 4. Widok laboratoryjnego układu do badania możliwości wytwarzania ozonu w reaktorze plazmowym: 1 – zasilacz wysokiego napięcia, 2 – miernik mocy czynnej pobieranej przez zasilacz WN, 3 – kontroler przepływu, 4 – reaktor plazmowy, 5 miernik ozonu.

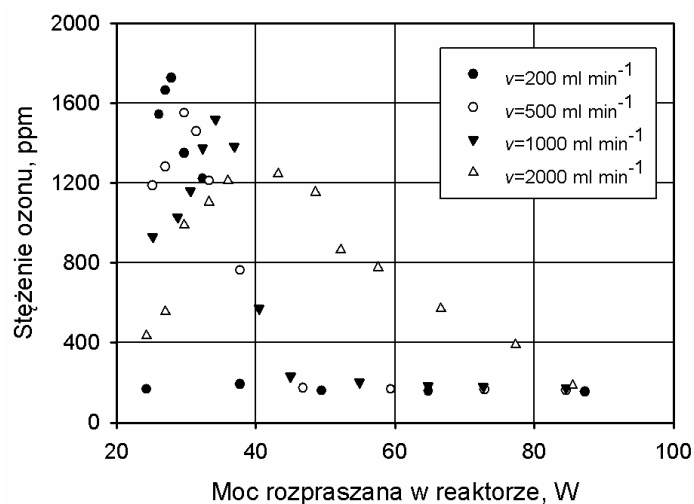
Ozon jest gazem nietrwały (pojawiający się problem z jego magazynowaniem), więc stąd jego potrzeba wytwarzania w miejscu jego bezpośredniego zastosowania. Już w temperaturze pokojowej ozon ulega rozkładowi. Wzrost temperatury otoczenia (a co za tym idzie gazu roboczego) prowadzi do intensyfikacji tego procesu. W badaniach sprawdzono wpływ wartości mocy rozpraszanej w reaktorze na temperaturę elektrody uziemionej urządzenia, będącej w bezpośrednim kontakcie z gazem roboczym. Temperatura ta bezpośrednio determinuje stabilność ozonu powstającego w reaktorze. Wyniki pomiarów temperatury elektrody uziemionej od mocy rozpraszanej w reaktorze przedstawiono na Rys. 6.

Analiza charakterystyk przedstawionych na Rys. 5 prowadzi do wniosku, że maksymalną wartość stężenia uzyskano dla objętościowego natężenia przepływu równego 200 ml/min – 1725 ppm. Dla pozostałych przepływów otrzymano niższe wartości stężeń ozonu: 500 ml/min – 1551 ppm, dla 1000 ml/min – 1520 ppm oraz dla 2000 ml/min – 1243 ppm. Przyczyną tego efektu może być skrócenie czasu przebywania gazu roboczego (powietrza) w komorze reaktora, w której następowała jego jonizacja.

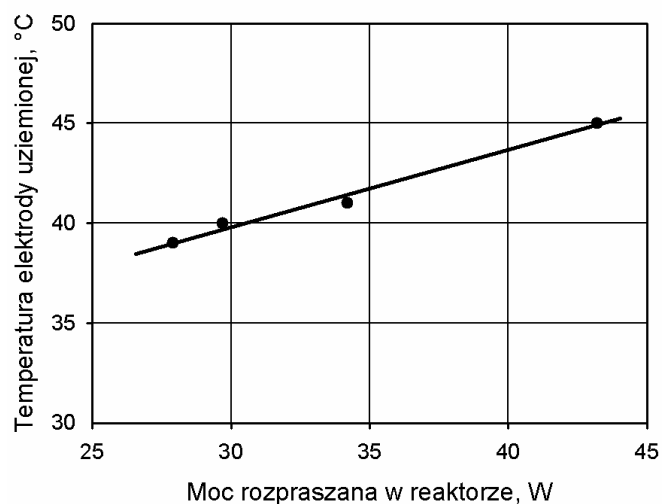
Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów (Rys. 6) można stwierdzić, że zależność temperatury elektrody uziemionej reaktora plazmowego T od wydzielonej w nim mocy

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

czynnej P , przy której występuje największa sprawność generacji ozonu, jest praktycznie liniowa.



Rys. 5. Zależność stężenia generowanego ozonu od mocy czynnej rozpraszanej w reaktorze dla różnych wartości objętościowego natężenia przepływu powietrza.



Rys. 6. Zależność temperatury elektrody uziemionej od mocy rozpraszanej w reaktorze podczas procesu tworzenia ozonu.

Wnioski

1. Zaproponowana technologia umożliwia wytworzenie ozonu o stężeniu w zakresie 1000-1700 ppm w zależności od wartości objętościowego natężenia przepływu powietrza.

2. Otrzymane wartości stężeń ozonu pozwalają na wykorzystanie zaproponowanej metody wytwarzania ozonu w wielu procesach technologicznych, w tym oczyszczania gazów z lotnych zanieczyszczeń oraz roztworów wodnych z zanieczyszczeń biologicznych.
3. Wzrost objętościowego natężenia przepływu powietrza prowadzi do obniżenia stężenia ozonu wytwarzanego w reaktorze i wymaga zwiększenia mocy czynnej rozpraszanej w jego komorze, dla której występuje maksymalna wartość stężenia ozonu – przesunięcie maksimum stężenia ozonu w stronę wyższych wartości mocy.
4. Wzrost mocy rozpraszanej w reaktorze prowadzi do wzrostu temperatury elektrod oraz komory reaktora, co powoduje obniżenie stężenia generowanego ozonu – obniżenie efektywności energetycznej procesu.

References

1. Tendero C., Tixier C., Tristant P., Desmaison J., Leprince P., *Atmospheric pressure plasmas: A review*, Spectrochim. Acta Part B 2006 № 61.
2. Goree J., Lin B., Drake D., Stoffels E., *Killing of S. mutants bacteria using a plasma needle at atmospheric pressure*, IEEE Trans. Plasma Sci. 2006 № 34.
3. Eliasson B., Hirth M., Kogelschatz U., *Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges*, J. Phys. D: Appl. Phys. 1987 № 20.
4. Misra, N. N., Tiwari, B. K., Raghavarao, K. S. M. S., Cullen, P. J., *Nonthermal plasma inactivation of food-borne pathogens*, Food Engineering Reviews 2011 № 3.
5. Fridman G., Friedman G., Gutsol A., Shekhter A. B., Vasilets V. N., Fridman A., *Applied plasma medicine*, Plasma Process. Polym. 2008 Vol. 5, № 6.
6. Stryczewska D., *Technologie Plazmowe w Energetyce i Inżynierii Środowiska*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009.
7. Kogelschatz U., *Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics and Industrial Applications*, Plasma Chem. Plasma Process. 2003 Vol. 23 № 1.

Autorzy: dr inż. Tomasz Czapka; Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wydział Elektryczny, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: tomasz.czapka@pwr.edu.pl, Mateusz Chrzanowski (student)