



Treatment of waste biomass using plasma technology

Tadeusz MACZKA¹, Ryszard MILLER², Włodzimierz KORDYLEWSKI³, Ewa ŚLIWKA⁴

^{1,2,3} Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wyb. Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: tadeusz.maczka@pwr.wroc.pl

⁴ Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny, Wyb. Stanisława Wyspiańskiego 27 50-370, Wrocław

Abstract

The paper presents the idea of obtaining fuels in a process of plasma treatment of organic materials, including biomass. It introduces the concept of plasma treatment of organic matter and shows the prototype installation developed for the purpose of plasma gasification/pyrolysis. A general principle of plasma gasification/pyrolysis installation operation and the role of its particular elements in the gasification process were described. The basic parameters of the installation operation determined during the works on start-up system were given. There were also presented courses of further investigations on optimization of this installation in order to develop more effective technology of gaining liquid fuels by gasification/pyrolysis of organic wastes including organic compounds qualified as hazardous wastes.

Keywords: biomass, plasma, waste, gasification, pyrolysis.

Streszczenie

Plazmowe przetwarzanie biomasy odpadowej

W pracy opisano ideę metody pozyskiwania paliw w procesie plazmowego przetwarzania odpadów, w tym biomasy roślinnej. Podano koncepcję plazmowego przetwarzania materiałów organicznych i przedstawiono opracowaną na tej podstawie prototypową instalację do plazmowego zgazowania/pirolizy. Opisano ogólną zasadę działania plazmowej instalacji zgazowującej i rolę jej poszczególnych elementów w procesie przetwarzania. Podano podstawowe parametry pracy instalacji wyznaczone w trakcie prac nad jej rozruchem. Podano również kierunki dalszych prac nad optymalizacją działania powstałej instalacji, mających na celu opracowanie efektywnej technologii pozyskiwania paliw płynnych ze zgazowania/pirolizy odpadów organicznych, w tym zawierających związki organiczne zakwalifikowane jako odpady niebezpieczne.

Słowa kluczowe: biomasa, plazma, odpady, zgazowanie, piroliza.

1. Wstęp

Plazma, będąca w większym lub mniejszym stopniu zjonizowanym gazem, bywa uważana za czwarty stan materii. W technologiach plazmowych plazmę dzieli się na trzy typy, mianowicie: plazmę wysokotemperaturową (ang. high temperature plasma, equilibrium plasma), plazmę niskotemperaturową (ang. thermal plasma, quasi-equilibrium plasma) i plazmę występującą pod nazwami nietermiczna, zimna (ang. non-thermal plasma, non-equilibrium plasma, cold plasma). Plazma jest już stosowana w technice od ponad stu lat, ale nadal prowadzone są badania podstawowe oraz aplikacyjne nad jej wykorzystaniem i stale napływają informacje o nowych obszarach jej zastosowań [1-3].

Ostatnio duże zainteresowanie skupia się na wykorzystaniu plazmy termicznej w procesie utylizacji odpadów komunalnych, w tym szpitalnych i odpadów przemysłowych, zwłaszcza niebezpiecznych organicznych związków chemicznych (fenol, chlorowane bifenyle i dioksyny – PCBs, PCDDs) [2-6]. Na szczególną uwagę zasługują badania nad wykorzystaniem plazmy termicznej w procesie spalania i gazyfikacji organicznych materiałów stałych (biomasa i tworzywa sztuczne) [2, 5-7].

Wpływ na rozwój badań nad wykorzystaniem techniki plazmowej do utylizacji odpadów ma promowana polityka proekologiczna krajów wysokorozwiniętych, zwłaszcza członków Wspólnoty Europejskiej. Wyniki

pilotażowych badań wskazują, że zastosowanie techniki plazmowej do pozyskiwania paliw płynnych z biomasy i odpadów komunalnych może okazać się efektywne, jak również bezpieczne dla środowiska [7].

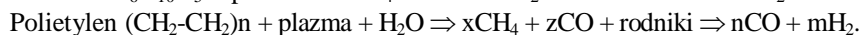
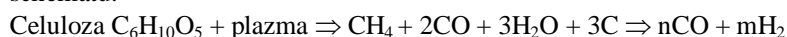
Również światowy wzrost ceny ropy naftowej spowodował zainteresowanie systemami pozyskiwania paliw ze zgazowania węgla i alternatywnych paliw, takich jak odpady tworzywa sztuczne, biomasa, osady ściekowe i odpady organiczne [7-10]. Istotny jest także fakt pozyskiwania w procesie zgazowania biomasy znacznych ilości wodoru uważanego za paliwo przyszłości [11].

2. Koncepcja wykorzystaniem techniki plazmowej do termicznego przetwarzania materiałów organicznych

Wykorzystanie plazmy do termicznego przetwarzania materiałów organicznych może przyczynić się do rozwiązania poważnego problemu związanego z utylizacją odpadów (komunalnych, szpitalnych, recyklingu itp.) skażonych zarówno bakteriologicznie, jak i chemicznie – zwłaszcza związkami węglowodorowymi.

Plazma stanowi wysokotemperaturowy, silnie zjonizowany ośrodek w którym następuje szybki rozkład termiczny substancji organicznej. Po schłodzeniu produktów odgazowania wydzielają się z nich składniki gazowe (np. CO, CO₂, CH₄, C₂H₆, N₂), ciekłe (kondensujące, jak: woda, alkohole, kwasy i aldehydy, smoła) i stałe (pozostałość koksowa). Plazma czyni przetwarzaną mieszkankę bardziej reaktywną w wyniku dysocjacji termicznej wielu produktów gazowych z wytworzeniem rodników (C, S, CN, OH, NH, CH, CH₃...). Występuje ponadto jonizacja produktów rozpadu z tworzeniem się jonów dodatnich (C⁺, H⁺, N⁺, CO⁺, O⁺, Si⁺, K⁺ i inne) oraz ujemnych (O⁻, H⁻, N⁻ i inne), co ułatwia przebieg procesu zgazowania/pirolizy [5].

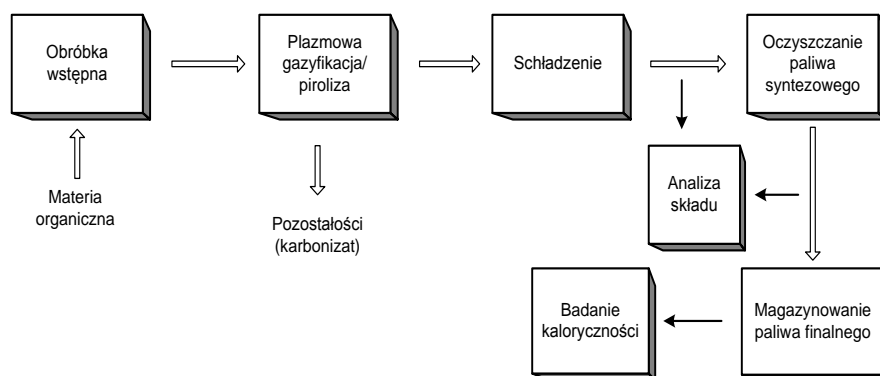
Przykładowo podczas plazmowego zgazowania odpadów (szpitalnych) zawierających celulozę (papier), polietylen (plastik) i wodę reakcje zgazowania można przedstawić w sposób uproszczony wg poniższego schematu:



Według wyników badań zawartych w pracy [12] do zgazowania 1 kg odpadów szpitalnych o składzie wagowym 60% papieru, 30% tworzywa sztucznego i 10% wody zużywa się ok. 1 kWh energii elektrycznej, a z powstającego gazu syntezowego (CO i H₂) można uzyskać, po uwzględnieniu konwersji do energii elektrycznej, ponad 3 kWh – są to przesłanki świadczące o opłacalności przedsięwzięcia. Duża zawartość wodoru w gazie syntezowym dodatkowo przemawia za atrakcyjnością plazmowego zgazowania odpadów uznawanych za paliwa alternatywne. Obecnie standardową i najtańszą metodą produkcji wodoru na skalę przemysłową jest katalityczny reforming parowy węglowodorów. Jednak takie wytwarzanie wodoru jest na tyle technologiczne skomplikowane, że jest to produkcja scentralizowana, prowadzona na dużą skalę, zatem przypisana do konkretnego miejsca. Do tzw. produkcji rozproszonej przydatna może okazać się metoda plazmowego zgazowania związków organicznych. Przemawia za tym fakt, że zgazowanie plazmowe jest efektywne zarówno w dużej, jak i małej skali. Ponadto plazmowa produkcja gazu o dużej zawartości wodoru jest stosunkowo prosta i wydajna w porównaniu do katalitycznego parowego reformingu, a wynika to z faktu, że sama plazma wykazuje właściwości katalityczne.

3. Instalacja do plazmowego przetwarzania materiałów organicznych

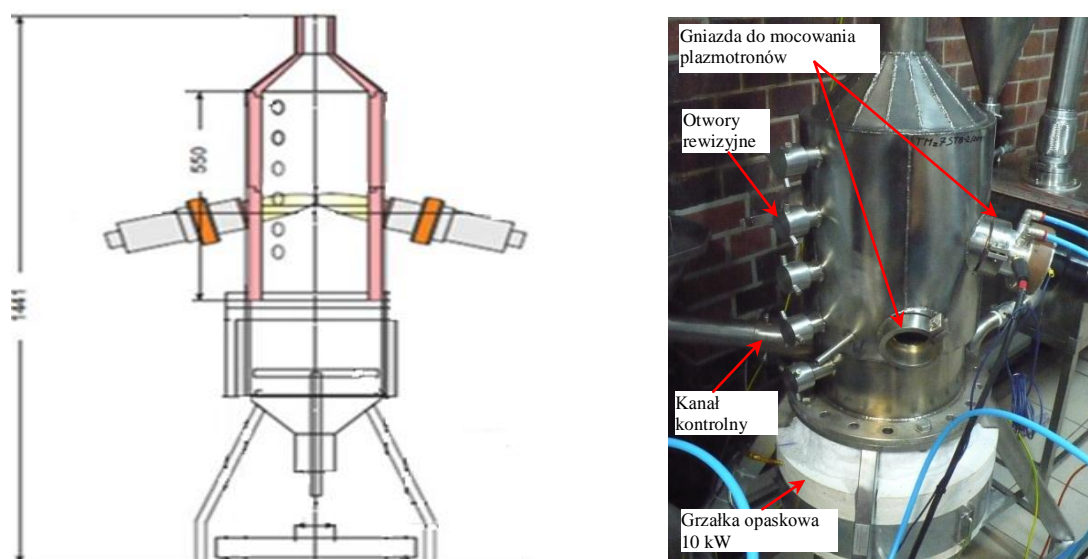
Przedstawiona w pracy pilotażowa instalacja do plazmowego przetwarzania materiałów organicznych (docelowo odpadowych tworzyw sztucznych i odpadowej biomasy) w paliwa płynne opiera się na szybkiej pirolizie. Zawiera ona następujące elementy funkcjonalne: węzeł przygotowania surowca stałego do reaktora plazmowego (rozdrobienie lub stopienie), człon obróbki termicznej (zgazowanie plazmowe), układ szybkiego schładzania gazów, instalację oczyszczania paliwa syntezowego (docelowo), układy pomiarowe, zbiorniki na pozyskane paliwo – co schematycznie zilustrowano na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Schemat instalacji do plazmowego zgazowania materiałów organicznych

W reaktorze zgazowującym, jako źródło plazmy zastosowano plazmotron wężkowy, bazujący na wyładowaniu łukowym w stałym polu elektrycznym DC [13-16]. Kanał plazmowy w plazmotronie wężkowym cechuje się dużą gęstością energii i wysoką temperaturą sięgającą kilku tysięcy K, a w samym jądrze kanału plazmowego temperaturę szacuje się na kilkanaście tysięcy K. Ze względu na wysokie temperatury w kanale plazmowym, elektrody w plazmotronach są zwykle chłodzone wodą. Doświadczenia własne wykazały, że średni czas życia elektrod miedzianych z chłodzeniem wodnym zawiera się w przedziale 50-150 h w środowisku utleniającym i do 300 h przy zastosowaniu gazu ochronnego [14-15]. Czas życia elektrod uzależniony jest również od materiału elektrod [2].

Zasadniczym elementem instalacji jest blok plazmowego zgazowania. Stanowi go reaktor zgazowujący wraz z plazmotronami, widoczne na rysunku 3.2.



Rys. 3.2. Reaktor do plazmowego zgazowania materiałów organicznych

W przeprowadzonych wstępnych pracach nad plazmowym zgazowaniem materiałów organicznych w celu pozyskiwania paliw płynnych, jako czynnik plazmotwórczy wykorzystywano azot. W zakresie badań przewidziane jest również wykorzystanie pary wodnej, jako plazmotwórczego czynnika zgazowującego. W plazmotronach łukowych czynnikiem plazmotwórczym najczęściej są takie gazy jak: argon, azot, CO_2 , para wodna lub ich mieszaniny [1-5, 7, 8].

Podczas prób rozdrobniony materiał (przechodzący przez sito o oczku $630\ \mu\text{m}$) podawano do reaktora plazmowego podajnikiem pneumatycznym przez górny otwór rewizyjny znajdujący się nad strefą płomienia plazmowego (widoczny na rysunku 3.2).

Ważnym elementem instalacji jest chłodnica do szybkiego schładzania produktów powstałych podczas plazmowego przetwarzania. Właściwa szybkość schładzania produktów zgazowania jest bardzo istotna dla największego uzysku frakcji płynnych. To chyba najtrudniejszy etap w technologii szybkiej pirolizy wytwarzania paliw płynnych. Przy założeniu pozyskiwania w procesie plazmowego zgazowania ciekłych frakcji paliwowych, w tym smolistych, zdecydowano się na wykonanie chłodnicy, jako wymiennika płytowego (rysunek 3.3), w którym czynnikiem chłodniczym jest woda sieciowa. Zastosowana autorska konstrukcja chłodnicy umożliwia szybkie schładzanie gazów procesowych dzięki stosunkowo dużej powierzchni wymiany jak i spowolnieniu prędkości ich przepływu. Umożliwia ona również bezpośredni odbiór skroplonej frakcji ciekłej (do analizy lub magazynowania) przez otwory spustowe znajdujące się dolnej części chłodnicy.



Rys. 3.3. Elementy konstrukcyjne chłodnicy gazów procesowych

Otwory robocze i rewizyjne chłodnicy umożliwiają również podłączenie analizatorów gazów do oznaczania składu produktów powstających podczas zgazowania w czasie rzeczywistym celem dobrania optymalnych parametrów procesu.

Widok zasadniczych elementów pilotażowej instalacji do plazmowego zgazowania przedstawiono na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Widok zasadniczych elementów instalacji do plazmowego zgazowania

Do analizy w czasie rzeczywistym składu gazów procesowych powstałych podczas plazmowego przetwarzania wykorzystano stacjonarny analizator gazów procesowych GAS 3000R z detektorami NDIR na cztery gazy, takie jak: (CO : 0-50%, CO_2 : 0-25%, CH_4 : 0-10%, H_2 : 0-25%), którego pozostałe parametry dostępne są na stronie dostawcy [17].

Informacje na temat szczegółów konstrukcyjnych opracowanej instalacji do plazmowego przetwarzania materiałów organicznych podano również w opracowaniach [18, 20].

4. Wstępne wyniki badań plazmowego przetwarzania biomasy

4.1. Materiał do badań

Do badań nad możliwością plazmowego przetwarzania biomasy w przedmiotowej instalacji w celu pozyskiwania paliw płynnych wybrano pyły trzech materiałów:

- wytloki z buraka cukrowego,
- miskantus olbrzymi,
- wierzba konopianka.

Wytypowane materiały biomasy roślinnej przed właściwym procesem zgazowania zostały wstępnie rozdrobnione, a następnie zmielone w młynie firmy Retsch typu SM100 i przesiane przez kalibrowane sита laboratoryjne do uzyskania frakcji pyłu < 630 μm . W celu określenia jakości rozdrobnienia materiałów poddawanych plazmowemu przetwarzaniu wykonano analizę sitową, której wyniki przedstawiono w tabeli 4.1.1.

Tabela 4.1.1. Analiza sitowa badanych próbek biomasy

Rozmiar sita, μm	Udział frakcji pyłu przechodzącego przez sito, %/m		
	Wierzba konopianka	Miskantus olbrzymi	Wytłoki z buraków cukrowych
≤ 630	100,00	100,00	100,00
≤ 500	92,11	83,96	79,26
≤ 315	49,65	51,33	28,86
≤ 250	30,79	43,82	16,26
≤ 200	22,28	22,48	15,77
≤ 100	20,14	21,29	11,21
≤ 71	10,04	5,65	5,53

W tabeli 4.1.2 podano wyniki analizy technicznej, a w tabeli 4.1.3 wyniki analizy elementarnej materiałów wykorzystanych w procesie (analizy wykonało Laboratorium Analiz Elementarnych Wydziału Chemicznego Uniwersytetu Wrocławskiego).

Tabela 4.1.2. Analiza techniczna badanych próbek biomasy

Biomasa	Wartość opałowa	Zawartość popiołu	Zawartość części lotnych	Zawartość wilgoci
	Q_i^a , MJ/kg	A^a , %	V^a , %	W^a , %
Wytłoki z buraków	15,98	3,94	67,22	7,6
Miskantus olbrzymi	17,02	3,03	66,29	8,73
Wierzba konopianka	17,19	1,63	63,49	9,8

Tabela 4.1.3. Analiza elementarna badanych próbek biomasy

Biomasa	Skład pierwiastkowy				
	C, %	H, %	N, %	S, %	O, %
Wytłoki z buraków	40,38	6,65	1,28	0,03	40,12
Miskantus olbrzymi	47,00	5,71	0,22	0,04	35,27
Wierzba konopianka	46,90	5,64	0,66	0,05	35,20

Przeprowadzona analiza techniczna i elementarna wskazuje na duże podobieństwo składu chemicznego badanych surowców biomasy roślinnej. Istotnym parametrem dla procesu zgazowania jest zawartość części lotnych. Wszystkie poddane procesowi plazmowego przetwarzania rodzaje biomasy cechują się zawartością części lotnych powyżej 60%.

4.2. Przebieg plazmowego przetwarzania

Eksperyment przebiegał dwuetapowo. Pierwszy to etap przygotowawczy: komora reaktora była wygrzewana grzałką elektryczną do temperatury rzędu 500-600°C w celu uniknięcia zniszczenia obmurza reaktora. Ten etap obejmował również przygotowanie i uruchomienie wszystkich układów i instalacji pomocniczych, niezbędnych do przeprowadzenia procesu pirolizy. Drugi etap to właściwy proces pirolizy wybranego surowca biomasy. Badania wstępne plazmowej pirolizy biomasy wykonano przy wykorzystaniu jednego plazmotronu. Po uruchomieniu plazmotronu instalacja pracowała na biegu jałowym przez około 5 minut, aż do momentu ustabilizowania cieplnych warunków procesu, po czym następowało podawanie biomasy ze stałym ustalonym wydatkiem. We wszystkich próbach strumień czynnika zgazowującego (N₂) wynosił około 15 m³/h. Pył biomasy podawano bezpośrednio nad obszar oddziaływania plazmy. Dzięki stycznemu wprowadzeniu plazmy do reaktora materiał przyjmował wirowy kierunek ruchu postępujący w stronę wylotu z reaktora. Za reaktorem znajduje się cyklon odpylający, który usuwał z otrzymanego gazu procesowego stałą pozostałość (karbonizat). Następnie gaz trafiał do chłodnicy płytowej, gdzie zachodziło jego wychłodzenie. W trakcie badań rejestrowane były podstawowe parametry techniczne procesu, które dla wybranych prób przedstawiono zbiorczo w tabeli 4.2.1. Dokonano kilkunastu prób pirolizy dla wybranych materiałów zmieniając ich wydatek w zakresie od 1 do 4 kg/h. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem wydatku podawanego paliwa temperatura procesu pirolizy ulega zmniejszeniu. Najprawdopodobniej jest to związane z faktem, iż większa ilość podawanej biomasy absorbuje więcej energii cieplnej dostarczanej do reaktora na reakcje przemiany (pirolizy).

Tabela 4.2.1. Parametry techniczne procesu plazmowego przetwarzania biomasy

Biomasa	Wydatek	Moc plazmy	Strumień czynnika plazmowego	Temperatura w reaktorze	Temperatura za reaktorem plazmowym	Temperatura gazów wylotowych
	kg/h	kW	Nm ³ /h	°C	°C	°C
Wytłoki z buraków cukrowych	2,0	14-16	13-14	580	510	20
	3,0			570	495	
	4,0			560	480	
Miskantus olbrzymi	1,5			600	540	
	2,0			565	490	
	3,0			520	450	
Wierzba konopianka	2,0			570	500	
	3,0			560	480	

4.3. Analiza produktów powstałych podczas prób plazmowego przetwarzania biomasy

W celu oceny jakości procesu plazmowego przetwarzania badanych surowców biomasy wykonano analizy podstawowych składników gazu procesowego. Analizator gazów dokonywał bieżącej (w czasie rzeczywistym) rejestracji stężenia H₂, CO, CH₄ i CO₂. Dodatkowo po zakończeniu każdego cyklu prób do dalszej analizy pobierano pozostałość stałą (karbonizat) i pozostałość ciekłą/bezpostaciową. Tabela 4.3.1 zawiera udziały podstawowych gazów uzyskanych podczas procesu plazmowej pirolizy wybranych surowców biomasy. Produktem stałym uzyskiwanym podczas plazmowego przetwarzania biomasy był karbonizat który posłużył do określenia skuteczności odgazowania materiału wejściowego. Skuteczność procesu plazmowego przetwarzania wyznaczano z zależności (4.3.1):

$$\xi = \left(1 - \frac{\theta^k}{\theta^a}\right) \cdot 100, \% \quad (4.3.1)$$

gdzie: θ^k – zawartość części lotnych w karbonizacie, θ^a – zawartość części lotnych w biomacie nieprzetworzonej. (Oznaczenie zawartości części lotnych wykonano zgodnie z PN 98 G-04516).

Tabela 4.3.1 Wybrane składniki produktów gazowych z plazmowego przetwarzania biomasy

Biomasa	Wydatek kg/h	Skład gazu procesowego				Wartość opałowa MJ/Nm ³
		CO, % _{obj}	CO ₂ , % _{obj}	CH ₄ , % _{obj}	H ₂ , % _{obj}	
Wytłoki z burak ów cukrowch	2,0	3,45	0,52	1,09	0,71	0,86
	3,0	3,90	0,81	0,85	0,95	0,86
	4,0	5,43	1,24	1,78	1,18	1,39
Miskantus olbrzymi	1,5	1,69	0,17	0,49	0,35	0,41
	2,0	3,34	0,43	0,90	0,67	0,78
	3,0	4,58	0,72	1,32	0,88	1,09
Wierzba konopianka	2,0	3,13	0,50	0,67	0,60	0,66
	3,0	4,71	0,94	1,26	0,98	1,10

Wyniki oszacowania skuteczności plazmowego przetwarzania biomasy dla przeprowadzonych prób podano w tabeli 4.3.2.

Tabela 4.3.2. Oszacowanie skuteczności ξ plazmowego przetwarzania biomasy na podstawie zawartości części lotnych w biomacie θ^a i karbonizacie θ^k

Biomasa	Wydatek kg/h	θ^a	θ^k	ξ
		%	%	%
Wytłoki z buraków cukrowch	2,0	67,22	24,52	62,52
	3,0		26,33	60,83
	4,0		28,86	57,06
Miskantus olbrzymi	1,5	66,29	18,01	72,83
	2,0		19,87	70,02
	3,0		28,46	57,07
Wierzba konopianka	2,0	63,49	28,78	54,67
	3,0		31,76	49,97

Obok produktów gazowych i pozostałości stałej (karbonizatu), w procesie plazmowego przetwarzania biomasy otrzymano niewielką ilość frakcji ciekłej i smół osadzających się na ściankach chłodnicy. Materiał ciekły do analizy pobrano z komór chłodnicy płytowej (przez specjalne króćce umożliwiające odbiór wykroplonej cieczy widoczne na rysunku 3.3). Badaniom poddano ciecz pochodząca ze zgazowania zmielonej wierzby konopianki. Charakterystykę fizykochemiczną tej frakcji podano w tabeli 4.3.3.

Tabela 4.3.3. Charakterystyka frakcji ciekłej pochodzącej z przetwarzania plazmowego wierzby konopianki (energetycznej)

Właściwości fizykochemiczne, jednostki	Wartość
Gęstość, g/cm ³	1,0959
Zawartość wody + składniki lotne, %m/m	83,43
Popiół, %m/m	0,433
Zawartość frakcji węglowodorowej, %m/m	10,1
Liczba kwasowa LK, mgKOH/g	162,2
Główne indywidua chemiczne: aceton, kwas propionowy, fenol, metylofenole, dimetoksyfenol, 1,4:3,6 dianhydro-alpha glukopiranoza (C ₆ H ₈ O ₄), 1,6-anhydro-, beta- D-glukopiranoza (lewoglukoza - C ₆ H ₁₀ O ₅), 3,5 -dimetoksy, 4-hydroksy benzaldehyd (C ₉ H ₁₀ O ₂)	

Informacje na temat metod badawczych i sposobu identyfikacji składników w produkcie ciekłym z plazmowej pirolizy podano w pracach [19, 20].

Reasumując, z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że jakość (wartość opałowa) otrzymanych produktów gazowych (paliw) rośnie wraz ze wzrostem wydatku podawanej biomasy. Najlepszy gaz uzyskano zgazowując wyłoki z buraków cukrowych. Dla wydatku 4 kg/h uzyskano gaz o kaloryczności około 1,4 MJ/Nm³. Należy jednak zaznaczyć, że dla porównywalnych wydatków kaloryczność otrzymanych gazów jest zbliżona. I tak dla wydatku 3 kg/h wartość opałowa gazu pirolitycznego otrzymanego z przemiany trzech różnych surowców biomasy wahała się w granicach 1 MJ/Nm³. Otrzymany gaz jest na granicy palności. Oszacowana skuteczność plazmowego przetwarzania dla wszystkich przebadanych rodzajów biomasy i prób świadczy o zbyt niskiej sprawności procesu.

5. Podsumowanie i propozycje dalszych prac badawczych

Reasumując, wstępne prace wykazały, że w prezentowanej prototypowej instalacji jest możliwe plazmowe przetwarzanie materiałów organicznych z uzyskaniem płynnych frakcji paliwowych.

Oceniając skuteczność plazmowego przetwarzania stwierdza się, że dobrane parametry procesu pirolizy nie powodują całkowitego przekształcenia badanego materiału na oczekiwane wysokokaloryczne płynne frakcje paliwowe (gaz syntezowy i ciekłe frakcje paliwowe). Wynika to m.in. z budowy chemicznej biomasy roślinnej, która nie jest korzystnym substratem/składnikiem odpadów do uzyskiwania paliw płynnych w procesie przetwarzania plazmowego.

Zaznaczyć jednak należy, że zaproponowana w niniejszej pracy nowatorska metoda plazmowego przetwarzania biomasy odpadowej może okazać się alternatywą do obecnie stosowanych klasycznych metod zgazowania i pirolizy. Przemawia za tym stosunkowo nieskomplikowana budowa instalacji, jej modułowy charakter oraz krótki czas rozruchu i wyłączenia z eksploatacji. Dlatego celowym wydaje się prowadzenie dalszych prac nad udoskonaleniem zaproponowanej metody.

W pierwszej kolejności, aby usprawnić proces plazmowego przetwarzania, należy podnieść temperaturę w reaktorze plazmowym (moc palników plazmowych), co będzie miało najprawdopodobniej wymierny wpływ na:

- zwiększenie stopnia odgazowania,
- skuteczniejszy rozkład związków smolistych,
- zwiększenie udziału frakcji ciekłych,
- podniesienie kaloryczności otrzymanych frakcji paliwowych.

W toku dalszych prac badawczych mających na celu opracowanie efektywnej plazmowej technologii pozyskiwania paliw płynnych w oparciu o zbudowaną pilotażową instalację przewiduje się wykonanie następujących czynności i prac optymalizacyjnych:

- Dobór i charakterystyka materiału wyjściowego do badań w tym:
 - źródło pochodzenia, morfologia (granulacja, skład frakcyjny),
 - analiza techniczna (wilgoć, zawartość popiołu, udział części palnych, w tym lotnych),
 - analiza elementarna.
- Optymalizacja warunków plazmowego przetwarzania:
 - dobór optymalnych parametrów plazmy dla pozyskanie frakcji ciekłej/gazowej,
 - wpływ sposobu podawania i wielkości strumienia masy,
 - wpływ dodatków lub katalizatorów (np. pary wodnej) na efektywność procesu,
 - prowadzenie procesu od pirolizy w kierunku zgazowania.
- Analiza składu pozyskanych paliw płynnych i pozostałości po zgazowaniu.
- Prace modernizacyjne (poprawa aerodynamiki i rozkładu temperatur w reaktorze).
- Dobranie odpowiednich metod oczyszczania gazu syntezowego, jak i opracowanie metody obróbki pozostałości po zgazowaniu i sposobu jej zagospodarowania.

Przewiduje się, że realizacja powyższych działań może zaowocować w niedalekiej przyszłości wdrożeniem na skalę półtechniczną zaproponowanej technologii plazmowego przetwarzania materiałów organicznych, w tym niebezpiecznych, w paliwowe frakcje płynne (paliwa alternatywne).

Literatura

1. C. Tendero, Chr. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison, P. Leprince, *Atmospheric pressure plasmas: A review*, Spectrochimica Acta Part B 61 (2006) 2 – 30.
2. H. Huang, L. Tang, Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology, Energy Conversion and Management 48 (2007) 1331–1337.
3. G. Bonizzoni, E. Vassallo, *Plasma physics and technology; industrial applications*, Vacuum 64 (2002) 327–336.
4. Seok-Wan Kima, Hyun-Seo Parkb, Hyung-Jin Kim, *100kW steam plasma process for treatment of PCBs (polychlorinated biphenyls) waste*, Vacuum 70 (2003) 59–66.
5. [5] Hiroshi Nishikawa, Masaaki Ibe, Manabu Tanaka, Tadashi Takemoto, Masao Ushio, *Effect of DC steam plasma on gasifying carbonized waste*, Vacuum 80 (2006) 1311–1315.
6. G. Herdrich, M. Auweter-Kurtz, *Inductively heated plasma sources for technical applications*, Vacuum 80 (2006) 1138–1143.
7. G. Van Oost, M. Hrabovsky, V. Kopecky, M. Konrad, M. Hlina, T. Kavka, *Pyrolysis/gasification of biomass for synthetic fuel production using a hybrid gas–water stabilized plasma torch*, Vacuum 83 (2009) 209–212.
8. M. Tendler, P. Rutberg, G. Oost, *Plasma based waste treatment and energy production*, Plasma Phys. Control. Fusion 47, (2005) A219-A230.
9. P. Jones, *London's waste to get the plasma treatment*, Modern Power System, June 2009.
10. K. Prawat, Swain, L.M. Das, S.N. Naik, *Biomass to liquid: A prospective challenge and development in 21 st century*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 4917-4933.
11. Alex C.C. Chang, Hsin-Fu Chang, Fon-Jou Lin, Kuo-Hsin Lin, Chi-Hung Chen, *Biomass gasification for hydrogen production*, international Journal of Hydrogen Energy 36 (2011) 14252-14260.
12. M. Borysenko, M. Lelyukh, S. Petrov, V. Zhovtyansky, O. Chernets, V. Korzhyk, G. Marynsky, S. Kostash, Valeriy Popov, *The plasma technology for the processing of carbon containing row materials*, Prace Instytutu Nafty i Gazu nr 162, Wydanie konferencyjne -Efektywność Energetyczna 2009, Instytut Nafty i Węgla, Kraków 2009.
13. P. Kobel, W. Kordylewski, T. Mączka: *Zastosowanie plazmotronu wnekowego do zapłonu mufłowego palnika pyłowego*, Efektywność energetyczna 2009, Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Kraków, 21-23 września 2009, Kraków: Instytut Nafty i Gazu, 2009. s. 187-190.
14. W. Kordylewski, T. Mączka, R. Kordas, *Urządzenia rozruchowe plazmotronu dużej mocy*. Przegląd Elektrotechniczny (2009), R. 85, nr 10, 116-119.
15. P. Kobel, W. Kordylewski, T. Mączka, R. Kordas, M. Milewicz, K. Modrzejewski, *Zastosowanie plazmotronu wnekowego w muflonowym palniku pyłowym do rozruchu kotła energetycznego*, Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów: Jubileuszowa Konferencja Kotłowa 2009 z okazji 60-lecia Fabryki Kotłów RAFAKO SA w Raciborzu, Szczyrk, 13-15 października 2009, Prace Naukowe, Monografie, Konferencje - Politechnika Śląska. Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych; z. 23, 2009. s. 33-46.
16. P. Bukowski, P. Kobel, W. Kordylewski, T. Mączka, *Use of cavity plasmatron in pulverized coal muffle burner for start-up of a boiler*, Rynek Energii (2010), nr 1, 132-136.
17. Oferta handlowa, Atut Spółka z o.o., ul. Ziółkowskiego 26, 20-834 Lublin, http://www.atut.lublin.pl/plk/gas3000r_biomasa_pl_09v1.pdf, stan na styczeń 2012
18. W. Kordylewski, T. Mączka, *Pilotażowa instalacja do plazmowego zagazowania odpadowych tworzyw sztucznych*, Nowa Energia (2012), nr 2, 203-204
19. W. Kordylewski, T. Mączka, E. Śliwka, *Opracowanie metody badawczej do oznaczenia składu otrzymanych produktów zagazowania*, Raporty Inst. Tech. Ciepł. Ser. PRE nr 5, Politechnika Wrocławska 2012.

20. P. Ziętek, *Plazmowe zgazowanie odpadów organicznych*, Praca dyplomowa stopnia magisterskiego, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska 2012.

Opisana w niniejszej pracy instalacja została zbudowana w ramach realizacji Projektu Rozwojowego pt. „Technologia plazmowego zgazowania biomasy i odpadów dla wytwarzania paliw płynnych” finansowanego przez Narodowe Centrum badań i Rozwoju zgodnie z umową nr NR06 -0003-10/2010.
