

Paweł KAZIMIERSKI^{1,2}, Jacek KLUSKA¹, Mateusz OCHNIO^{1,3}, Paweł TIUTIURSKI¹, Dariusz KARDAŚ¹

e-mail: pkazimierski@imp.gda.pl

¹ Zakład Energii Odnawialnych, Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN, Gdańsk² Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska, Gdańsk³ Wydział Chemiczny, Politechnika Gdańska, Gdańsk

Charakterystyka porównawcza zgazowania drewna bukowego i RDF w reaktorze przeciwprądowym

Wstęp

W ostatnich latach można zauważyć duży wzrost produkcji odpadów komunalnych w przeliczeniu na mieszkańca. Może to stwarzać problemy wynikające z zapotrzebowania na powierzchnię potrzebną pod składowiska. Ponadto zmieniające się prawo i koszty wynikające z deponowania odpadów na składowiskach zachęcają do poszukiwania nowych metod zagospodarowania odpadów. W Polsce wytwarzanych jest około 10 mln ton odpadów komunalnych rocznie. W tej masie znaczącą część stanowią potencjalne paliwa, takie jak tworzywa sztuczne, makulatura czy tekstylia.

Obecnie jedyną w metodą utylizacji wyselekcjonowanych odpadów komunalnych jest ich termiczne przetwarzanie. Pod tym terminem kryje się proces pirolizy, zgazowania i spalania. Duża instalacja spalająca śmieci wiąże się z znacznymi kosztami inwestycyjnymi i wymaga dużej wydajności, przy czym jest w stanie przerabiać odpady z odległych wysypisk. Alternatywnym rozwiązaniem jest posiadanie własnej małoskalowej instalacji termicznego przetwarzania paliwa odpadowego opartego na procesie zgazowania.

Zgazowanie to proces konwersji paliwa stałego lub płynnego w gazowe [Taupe i in., 2016]. Ten proces zachodzi pod wpływem wysokiej temperatury w obecności czynnika zgazowującego [Bridgwater i in., 1999; Di Blasi i in., 2009]. Najczęściej stosowanymi czynnikami zgazowującymi są powietrze, tlen lub para wodna. Zgazowanie polega na częściowym utlenieniu paliwa, w stopniu zapewniającym autotermiczność procesu, tak że reakcje egzotermiczne dostarczają wystarczającą ilość energii dla reakcji endotermicznych [Kardaś i in., 2014].

Fracja RDF (*Refuse Derived Fuel*), czyli stałe paliwo wtórne – to wyselekcjonowane odpady palne. Składniki te nie zostały oddzielone jako surowce do recyklingu surowcowego lub materiałowego z powodu ich rozdrobnienia, zanieczyszczenia, czy wielomateriałowego charakteru, który utrudnia lub uniemożliwia ich separację ze względów technologicznych lub ekonomicznych [Mohan i in., 2006; Wei i in., 2006].

W pracy przedstawiono wyniki zgazowania frakcji RDF oraz zrębek bukowych jako metody odzysku energii z odpadów w układach rozproszonych. Podczas eksperymentów rejestrowano temperatury w poszczególnych strefach w reaktorze oraz prowadzono analizę gazu generatorowego jak również powstałych smół.

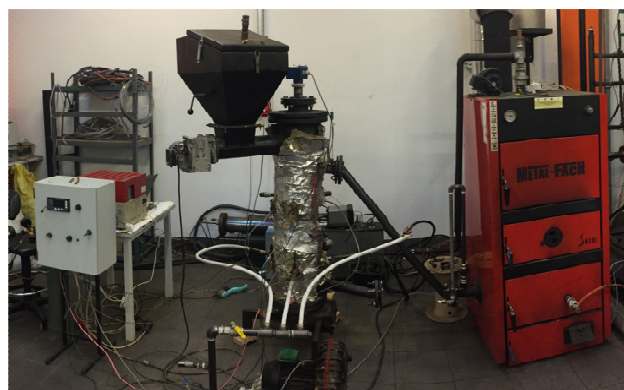
Badania doświadczalne

Zasadniczo zgazowanie można prowadzić w różnych konfiguracjach przepływu gazów i paliwa. W małej skali najbardziej popularne są układy współprądowe oraz przeciwprądowe. Opisywane w tej pracy eksperymenty prowadzono przeciwprądowo, co oznacza że paliwo poruszało się z góry w dół reaktora a powietrze i gazy z dołu do góry. Chociaż rozwiązania przeciwprądowe charakteryzują się większą ilością powstających smół to proces w tym układzie jest stabilniejszy, a złożo nie ulega zawieszaniu.

Aparatura

Badania procesu zgazowania prowadzono z wykorzystaniem instalacji doświadczalnej przedstawionej na rys.1, w której skład wchodziły:

- reaktor (zgazowarka),

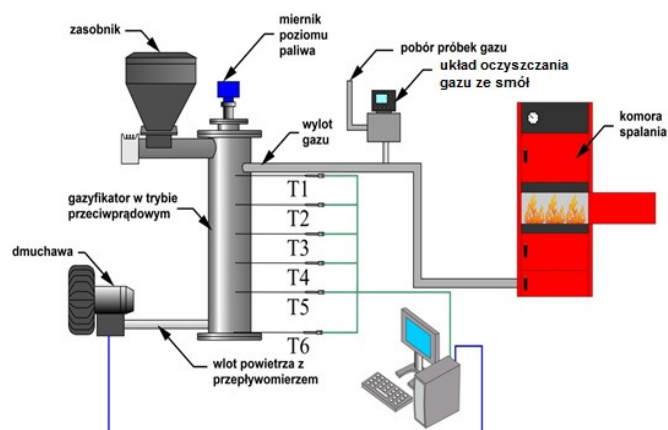


Rys. 1. Instalacja do zgazowania w układzie przeciwprądowym

- dmuchawa *Rootsa*,
- komora spalania,
- szafa sterująca,
- stanowisko poboru gazu i smół,
- urządzenia pomiarowe.

Reaktor. W eksperymentach zgazowania wykorzystano laboratoryjny reaktor INKA ze złożem stałym. Reaktor wyposażony był w zestaw termopar które umożliwiły kontrolę procesu. Czynnikiem zgazowującym, którym było powietrze, podawano za pomocą dmuchawy *Rootsa* przez 3 dysze. Paliwo w formie zrębek bukowych i RDF doprowadzano z zasobnika przenośnikiem ślimakowym, którego zakończenie umiejscowiono w ścianie reaktora. W rurze odbioru gazu generatorowego umieszczony był króciec z zaworem. Przez króciec pobierano gaz do analizy składu oraz analizy ilości smół w gazie generatorowym. Otrzymywany gaz kierowany był bezpośrednio do komory spalania. Instalację do zgazowania przedstawiono schematycznie na rys 2.

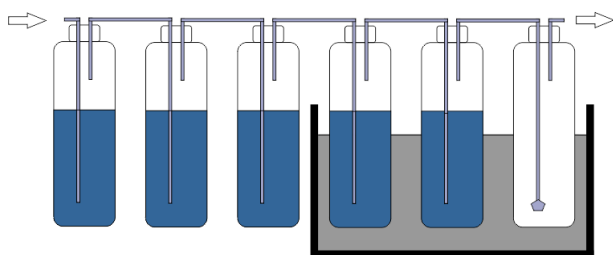
Zastosowanie szafy kontroli pomiarowej pozwoliło na rejestrację parametrów pracy instalacji. Ilość zadawanego powietrza nie zmieniała się w trakcie danej sesji pomiarowej. Podajnik paliwa



Rys. 2. Schemat instalacji w układzie przeciwprądowym

połączony był z czujnikiem poziomu paliwa w reaktorze, który automatycznie włączał podawanie paliwa utrzymując wysokość złoża na stałym poziomie.

Stanowisko poboru smół składało się z kriostatu, aspiratora oraz zestawu sześciu płuczek. Trzy płuczki znajdowały się w temperaturze pokojowej przed kriostatem i były wypełnione izopropanolem. Kolejne trzy płuczki umieszczono w kriostacie utrzymującym temperaturę -20°C , przy czym dwie płuczki wypełnione były izopropanolem, zaś ostatnia płuczka była pusta. Rurka dostarczająca gaz do ostatniej płuczki wyposażona była w spiek zapobiegający porywaniu kropeł izopropanolu przez strumień gazu. Układ poboru smół przedstawiono na rys. 3 (podobne układy można znaleźć np. w pracach T. Phuphuakrat).



Rys. 3. Układ płuczek do poboru smół z gazu generatorowego

Materiały

Do badań jako paliwo stosowano biomasę drzewną (odpadowe zrębki bukowe) oraz RDF, a czynnikiem zgazowującym było powietrze.

Zrębki odpadowe to powszechnie występujący produkt ubocznym gospodarki leśnej oraz przeróbki drewna. Odpady w postaci zrębek, wiórów, trocin i pyłu drzewnego powstają na każdym etapie obróbki drewna od momentu jego pozyskania i stanowią duże rozproszone źródło tego paliwa.

RDF (Refuse Derived Fuel) powstaje z wyselekcjonowania palnej frakcji odpadów nadsitowych w zakładach zagospodarowania odpadów. Skład frakcji RDF nie jest stały i może znacznie się różnić w zależności od punktu utylizacji odpadów komunalnych. Różny skład wynika z różnego stopnia recyklingu surowcowego odpadów w różnych zakładach, zależy od pory roku, czy charakterystyki regionu. Wyniki analizy technicznej i elementarnej biomasy oraz RDF przedstawiono w tab. 1. Zawartość tlenu obliczono po oznaczeniu C, H, N oraz popiołu jako pozostałą część masy.

Tab. 1. Analiza techniczna i elementarna zrębek bukowych oraz RDF

Parametr \ Paliwo	RDF	Drewno bukowe
Wartość opałowa [MJ/kg]	22,9	19,6
Zawartość wody [%]	11,7	8,4
Analiza techniczna [%]		
Części lotne[%]	62,8	77,9
Części stałe [%]	24,8	21,4
Popiół [%]	12,4	2,3
Analiza elementarna [%]		
C	58,1	45,0
H	6,5	6,4
O	31,4	47,3
N	2,6	1,3
S	0,6	-
Cl	0,8	-

Metodyka

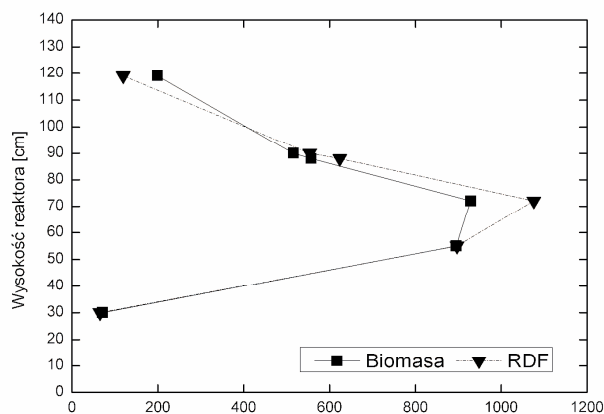
Gaz pobierany w trakcie eksperymentów analizowany był chromatograficznie za pomocą detektora GC-TCD (*Gas Chromatograph with Thermal Conductivity Detector*).

W trakcie prób mierzono ilość i określano skład chemiczny smół zawartych w gazie generatorowym. Oprócz smół lekkich oznaczano także smoly ciężkie w gazie generatorowym. Oznaczenie to polegało na odparowaniu izopropanolu, przez który przepuszczano znaną ilość gazu generatorowego. Analizowano je chromatograficznie za pomocą detektora masowego GC-MS (*Gas Chromatography – Mass Spectrometry*), a następnie przeliczano na wartość w g/Nm^3 gazu generatorowego.

Wyniki i dyskusja

Eksperymenty zgazowania prowadzone były przy stałym objętościowym natężeniu przepływu równym $12 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Zużycie paliwa wynosiło na poziomie $9,6 \text{ [kg/h]}$ dla biomasy oraz 5 kg/h dla RDF.

Rozkład temperatur w reaktorze przy zgazowaniu drewna bukowego i RDF w zależności od położenia w reaktorze zaprezentowano na Rys.3. Jako poziom 0 cm oznaczono popielnik, górna część złoża kończy się na wysokości 120 cm. W przypadku eksperymentów prowadzonych z RDF jako paliwem, temperatura w strefie spalania była wyższa niż dla drewna (Rys. 4).



Rys. 4. Rozkład temperatur w reaktorze w zależności od położenia dla biomasy i RDF

Otrzymano niższą temperaturę dla biomasy, co wynikało z niższego współczynnika ER wynoszącego dla biomasy 0,3 zaś 0,41 dla RDF. Wyższy ER dla RDF wynikał z mniejszej ilości tlenu w paliwie przy tej samej ilości tlenu dostarczanej w powietrzu. Paliwa te różniły się gęstością, która była wyższa w przypadku drewna bukowego. W porównaniu ze złożem RDF złożo drewna charakteryzowało się mniejszą porowatością, co także miało wpływ na rozkład temperatur w reaktorze.

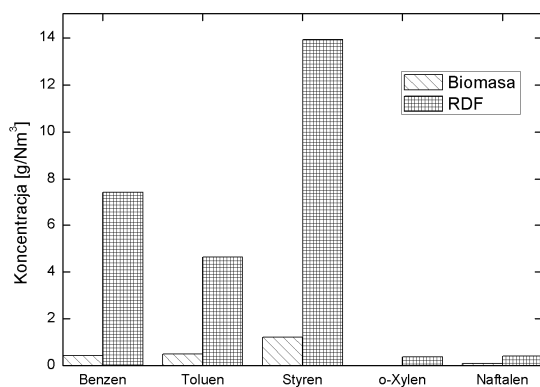
Skład gazu otrzymywanego podczas eksperymentu oraz jego kaloryczność przedstawiono w tab. 2. Próbkę gazu pobierano co 15 min, a wyniki zawarte w tab. 2 są uśrednionym składem z kilku pobranych próbek. Gaz generatorowy z biomasy charakteryzował się większą kalorycznością, na co miała wpływ większa zawartość CO. Gaz otrzymany z RDF zawierał więcej metanu oraz wodoru.

Tab.2 Wpływ rodzaju paliwa na skład gazu generatorowego oraz wartość opałową

Paliwo	Skład gazu generatorowego [%]				Wartość opałowa [MJ/Nm ³]	ER
	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄		
Biomasę	28,3	10,7	9,5	2,3	5,3	0,3
RDF	18,1	10,5	9,6	3,4	4,5	0,41

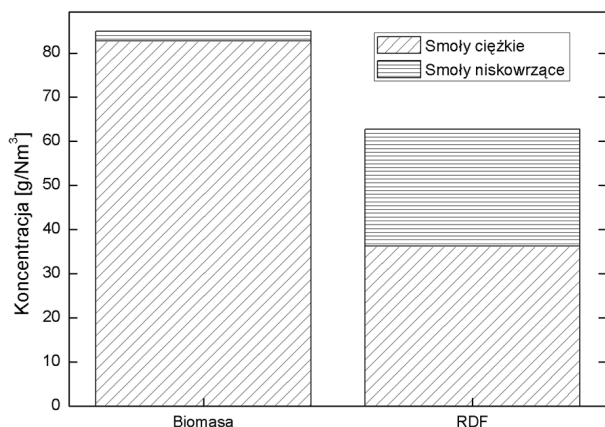
Mniejsza zawartość CO wynikała z małej ilości tlenu we wtórnym paliwie stałym.

Podczas eksperymentów pobierano próbki gazu które przepuszczano przez układ płuczek celem oznaczenia ilościowego i jakościowego zawieszonych w gazie smół. Rys. 5 prezentuje zawartość smół lekkich w gazie generatorowym. Zestawienie to zawiera BTEXy, styren, naftalen, fenol oraz sumę pozostałych niskowrzęcych smół, które udało się oznaczyć za pomocą GC-MS. Wyniki wskazują na wyższą zawartość smół niskowrzęcych w gazie generatorowym pochodzącym z RDF. Wynika to z dużej ilości polimerów zawierających pierścienie aromatyczne w swojej strukturze. Żadna z oznaczonych smół lekkich w gazie generatorowym z biomasy nie przekroczyła stężeń 1 g/Nm^3 . Natomiast ilość smół lekkich dla RDF była na poziomie: 14 g/Nm^3 styrenu, 4 g/Nm^3 toluenu i niespełna 8 g/Nm^3 benzenu. Oprócz smół lekkich oznaczono także smoły ciężkie w gazie generatorowym.



Rys. 5. Zawartość smół niskowrzęcych w gazie generatorowym powstałym ze zgazowania zrębek oraz RDF

Rys. 6 podaje zawartość smół w gazie generatorowym powstałym ze zgazowania zrębek oraz RDF. Ilości smół były duże, co wynikało z układu przeciwno-prądowego. W układzie tym smoły powstające w strefie pirolizy nie przechodzą przez złożo rozgrzanego karbonizatu, przez co ich ilość w gazie generatorowym jest wyższa w porównaniu ze współprądem. Ilość smół ciężkich była wyższa podczas zgazowania biomasy, co wynika z większej zawartości części lotnych w swojej strukturze, a w przypadku RDF następował rozkład termiczny do mniejszych molekuł. Smoły ciężkie stanowią duży problem w przypadku wykorzystania gazu generatorowego w silniku spalinowym. O ile smoły lekkie nie ulegają osadzeniu się w przewodach i silniku, to smoły ciężkie muszą być usuwane z gazu w celu wydłużenia żywotności silnika.



Rys. 6. Zawartość smół w gazie generatorowym powstałym ze zgazowania zrębek oraz RDF

dla RDF suma smół wynosiła ok. 63 g/Nm^3 . Około połowy smół Ponadto, zgazowanie drewno charakteryzowało się większym powstawaniem smół na poziomie około 83 g/Nm^3 gazu, podczas gdy otrzymanych z RDF to smoły lekkie, dla biomasy zaś smoły lekkie stanowiły poniżej 5% sumy smół.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone eksperymenty pokazały, że RDF jest dobrym paliwem do zgazowania. Podczas termicznego przetwarzania odpadów temperatura w strefie spalania była wyższa niż dla prób prowadzonych z drewnem bukowym. Dla obu paliw temperatury były stabilne co jest dobrym aspektem zgazowania w przeciwno-prądzie.

Gaz generatorowy uzyskany z biomasy charakteryzował się wyższą wartością opałową ($5,3 \text{ MJ/Nm}^3$) w porównaniu z gazem otrzymywanym z wtórnego paliwa stałego ($4,5 \text{ MJ/Nm}^3$). W obu przypadkach otrzymany gaz generatorowy miał wystarczającą wartość opałową, aby stabilnie spalał się w komorze spalania, co wskazuje, iż gaz ten może być stosowany do produkcji ciepła, np. na potrzeby wytwarzania pary technologicznej.

Ilości smół lekkich otrzymywanych z RDF były wielokrotnie większe, niż podczas eksperymentów prowadzonych z biomasa. Większa zawartość BTEX wynikała z dużej ilości polimerów zawierających pierścienie aromatyczne w swojej strukturze. Ilość smół ciężkich oraz suma smół były większe dla eksperymentów zgazowania drewna bukowego. Ilości smół były duże co wynikało z układu przeciwno-prądowego. W układzie tym smoły powstające w strefie pirolizy nie przechodzą przez złożo rozgrzanego karbonizatu, przez co ich rozkład termiczny jest niemożliwy, a ich ilość jest wyższa w porównaniu ze współprądem.

LITERATURA

- Bąk A., Podgórska W., (2012). Investigation of drop breakage and coalescence in the liquid-liquid system with nonionic surfactants Tween 20 and Tween 80. *Chem. Eng. Sci.*, 74, 181-191. DOI: 10.1016/j.ces.2012.02.021
- Bridgwater A.V., Meier D., Radlein D., (1999). An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry*, 30, 1479-1493, DOI: 10.1016/S0146-6380(99)00120-5
- Dalai A.K., Batta N., Eswaramoorthi I., Schoenau G.J., (2009). Gasification of refuse derived fuel in a fixed bed reactor for syngas production. *Waste Management*. 252-258. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.02.009
- Di Blasi C., (2009). Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35, 121-140, DOI: 10.1016/j.peccs.2008.08.001
- Kardaś D., Kluska J., Klein M., Kazimierski P., Heda Ł., (2014). *Teoretyczne i eksperymentalne aspekty pirolizy biomasy i odpadów*. Wyd. UWM, Olsztyn
- Mohan D., Pittman C.U., Steele P.H., (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy Fuel* 20, 848-889. DOI: 10.1021/ef0502397
- Taupe N.C., Lynch D., Wnetrzak R., Kwapińska M., Kwapiński W., Leahy, J.J. (2016). Updraft gasification of poultry litter at farm-scale – A case study. *Waste Manage.* 50, 324-333. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.02.036
- Wei L., Xu S., Zhang L., Zhang H., Liu C., Zhu H., Liu S., (2006). Characteristics of fast pyrolysis of biomass in a free fall reactor. *Fuel Process Technology*, 87, 863-871, DOI: 10.1016/j.fuproc.2006.06.002
- Zhang S., Yan Y., Li T., Ren Z., (2005). Upgrading of liquid fuel from the pyrolysis of biomass. *Bioresour. Technol.* 25, 235-255, DOI: 10.1016/j.biortech.2004.06.015

Praca została sfinansowana ze środków statutowych Zakładu Energii Odnawialnych Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku