



Otrzymano: 2 czerwca 2017  
Zaakceptowano: 17 lipca 2017  
Udostępniono online: 11 września 2017

# Recykling energetyczny odpadów komunalnych frakcji RDF metodą pirolizy ciągłej

## Energy recycling of RDF fraction of municipal solid waste by continuous pyrolysis

Artur MALINOWSKI,<sup>1,\*</sup> Wojciech CHWIAŁKOWSKI<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Metal Expert Spółka z o.o. Sp. J., ul. Słomińskiego 5/231, 00-195 Warszawa, Polska;

<sup>2</sup> Elbląski Park Technologiczny, ul. Stanisława Sulimy 1, 82-300 Elbląg, Polska

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki badań procesów pirolizy odpadów komunalnych frakcji RDF metodą pirolizy ciągłej. Badaniom poddano próbki RDF lekkiego (folie) oraz RDF ciężkiego (odpady opakowaniowe). Proces pirolizy ciągłej prowadzono w temperaturze 850°C, w pilotażowym reaktorze pirolitycznym wyposażonym w spiralę grzejną. Podczas badań określono skład gazu pirolitycznego oraz bilans masowy produktów pirolizy. Uzyskano gaz pirolityczny o wartości opałowej około 13 MJ/m<sup>3</sup> i zawartości CH<sub>4</sub> około 20%obj. oraz H<sub>2</sub> na poziomie ponad 16%obj. Wyniki badań wskazują na możliwość skojarzenia procesu pirolizy odpadów komunalnych z recyklingiem energetycznym i zastosowaniem gazu pirolitycznego jako alternatywnego źródła energii wykorzystywanego do produkcji energii elektrycznej. Uzyskany gaz pirolityczny może być alternatywnym paliwem do zasilania turbiny gazowej lub wykorzystany w kogeneracji zamiast gazu ziemnego.

**Słowa kluczowe:** piroliza, RDF, stałe odpady komunalne, gaz pirolityczny

**Abstract:** This paper presents results from continuous pyrolysis process of RDF fraction from municipal waste. Samples used in this research were light RDF (plastic films) and heavy RDF (packaging waste). Pyrolysis process was performed inside a pilot pyrolysis reactor equipped with a heating screw in temperature of 850°C. Experiment allowed to determine a chemical composition of pyrolysis gas and mass balance of pyrolysis products. Lower heating value of pyrolysis gas was about 13 MJ/m<sup>3</sup>, content of CH<sub>4</sub> was about 20%vol and H<sub>2</sub> was over 16%vol. Research results indicate possibility to combine the pyrolysis process of solid municipal waste with energy recycling and waste-to-energy system by using pyrolysis gas as renewable energy source for electricity production. Produced pyrolysis gas can be used, instead of natural gas, as an alternative fuel to power a gas turbine or cogeneration unit.

**Keywords:** pyrolysis, RDF, municipal solid waste, pyrolysis gas

### 1. Wstęp

W wyniku bytowania i działalności człowieka tworzone są olbrzymie ilości odpadów, szczególnie opakowaniowych, których głównym składnikiem są tworzywa sztuczne takie jak polipropylen, polietylen, politereftalan etylenu itp. Większość z tych materiałów można w łatwy sposób poddać sortowaniu i wyodrębnić z całego strumienia odpadów trafiających do zakładów utylizacji odpadów, a następnie ponownie wykorzystać jako surowiec w różnego rodzaju technologiach.

Istnieje wiele metod zagospodarowania odpadów tworzyw sztucznych [1, 2], wśród których należy wymienić recykling materiałowy, gdzie wykorzystuje się technologie mechaniczne (oczyszczanie, cięcie, mielenie, topienie, powtórne granulowanie), recykling źródłowy (chemiczny), w którym stosuje się technologie chemiczne (metanoliza, glikoliza, hydroliza) [2], recykling termiczny, w którym wykorzystuje się technologie energetyczne, takie jak piroliza [3–12], hydrokraking, zgazowanie oraz spalanie – odzysk energii.

Główną różnicą pomiędzy spalaniem, zgazowaniem oraz pirolizą jest poziom stężenia tlenu/powietrza dopuszczalnego podczas prowadzenia procesu. W celu przeprowadzenia reakcji spalania wymagane jest zastosowanie stosunku powietrza w zakresie 1.2–1.5, a w przypadku zgazowania 0.2–0.4 [11]. Proces pirolizy polega natomiast na termicznym rozkładzie materii bez dostępu powietrza.

W wyniku dekompozycji temperaturowej substancji w warunkach beztlenowych otrzymuje się pierwotne produkty pirolizy tj. gaz pirolityczny, frakcję ciekłą (olej pirolityczny) oraz frakcję stałą (karbonizat). Uzysk poszczególnych frakcji reakcji pirolizy można kontrolować za pomocą warunków procesu – między innymi temperaturą, szybkością nagrzewania wsadu jak również czasem jego przebywania w komorze reaktora pirolitycznego [7]. W wyniku pirolizy niskotemperaturowej odpadów komunalnych (do około 550°C) uzyskuje się większe ilości frakcji ciekłej i stałej, natomiast w wyniku reakcji w wyższych temperaturach (700–900°C) otrzymuje się większe ilości gazu kosztem oleju pirolitycznego i karbonizatu [7–10, 12, 13]. Ze względu na przyrost temperatury reakcyjnej rozróżnia się pirolizę szybką i wolną [12–14]. Pierwsza z nich charakteryzuje się bardzo szybkim wzrostem temperatury (od kilkunastu do kilkuset °C/s) i błyskawicznym odgazowaniem wsadu. Piroliza wolna (konwencjonalna) natomiast cechuje się powol-

\* Autor korespondencyjny.

Adres e-mail:

[artur.malinowski@metalexper.pl](mailto:artur.malinowski@metalexper.pl) (A. Malinowski);

[wojciech.chwialkowski@ept.umelblag.pl](mailto:wojciech.chwialkowski@ept.umelblag.pl) (W. Chwiałkowski).

nym wzrostem temperatury wsadu (do kilku °C/s), gdzie reakcje zachodzą znacznie wolniej. Efektem pirolizy szybkiej jest zmaksymalizowanie uzysku gazu pirolitycznego i zminimalizowanie produktów ciekłych i stałych. W przypadku pirolizy klasycznej, w zależności od zastosowanej temperatury, uzyskuje się większą ilość oleju pirolitycznego i karbonizatu kosztem frakcji gazowej.

Z punktu widzenia malejących na świecie zasobów źródeł energii chemicznej, a z drugiej strony ciągłego, wzrastającego na nią popytu zachodzi potrzeba poszukiwania nowych, alternatywnych metod pozyskiwania energii z odpadów lub energii odnawialnej. Jedną z jej postaci jest energia chemiczna zawarta w ogromnych ilościach odpadów deponowanych na składowiskach odpadów. Energia ta może być łatwo uwolniona w formie produktów pirolizy stałych odpadów komunalnych frakcji RDF. Pod pojęciem frakcji RDF (Refuse Derived Fuel) należy rozumieć część odpadów tak zwanej frakcji nadsitowej, która charakteryzuje się odpowiednim składem oraz stosunkowo wysoką wartością opałową oraz nie nadaje się do recyklingu materiałowego. Ze względu na skład, RDF można podzielić na RDF lekki (folie z tworzyw sztucznych) oraz RDF ciężki (PET, PP, PE, opakowania wielomateriałowe, tekstylia).

Frakcja RDF, ze względu na swoje właściwości, jest stosowana obecnie jako alternatywne paliwo w piecach cementowych oraz spalarniach odpadów. Ze względu na dodatkowy koszt oraz zanieczyszczenie środowiska związane z transportem RDF do punktów docelowej utylizacji, spalanie tej frakcji nie jest efektywne. Lepszym rozwiązaniem z punktu widzenia ekonomicznego oraz środowiskowego jest skojarzenie procesu pirolizy odpadów z wytwarzaniem energii elektrycznej na miejscu, w zakładzie przetwórczym. Rozwiązanie takie niesie za sobą pozytywne następstwa tj. z pewnością wykorzystanie paliwa na miejscu, w zakładach przetwórczych/sortowniach, jest bardziej efektywne. Z jednej strony nastąpi znaczna redukcja objętości składowanych odpadów a z drugiej wytworzona energia może zostać wykorzystana na własne potrzeby zakładu, w tym na prowadzenie procesu pirolizy. Ponadto, jak pisze Saffaradeh i współpracownicy [15], energia pozyskiwana w procesach opartych na pirolizie jest czystsza niż ta pochodząca z konwencjonalnych spalarni odpadów. Ze względu na obojętną atmosferę procesu podczas pirolizy wytwarzane są mniejsze ilości tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ) i tlenków siarki ( $\text{SO}_2$ ).

W artykule przedstawiono wyniki procesów pirolizy prowadzonych w ramach projektu badawczo-rozwojowego „Opracowanie innowacyjnej instalacji utylizacji odpadów z odzyskiem energii opartej o technologię niskoemisyjnego przetwarzania”, w warunkach laboratoryjnych z zastosowaniem technologii pirolizy. Procesy prowadzono w reaktorze o przepływie ciągłym, wyposażonym w spiralę grzejną umożliwiającą kontrolowany przepływ wsadu. Badania prowadzone były w Laboratorium Pirolizy firmy Metal Expert Sp. z o.o. Sp. J., zlokalizowanym w Elbląskim Parku Technologicznym.

## 2. Część eksperymentalna

### 2.1. Materiał badawczy

Do badań procesu pirolizy użyto próbek odpadu komunalnego frakcji RDF, 5 próbek RDF lekkiego oraz 5 próbek RDF ciężkiego. Materiał wsadowy, w celu zagęszczenia został poddany procesowi pelletowania, dzięki czemu otrzymano pellet w wymiarach 2 cm długości i średnicy 6 mm (Rysunek 1).



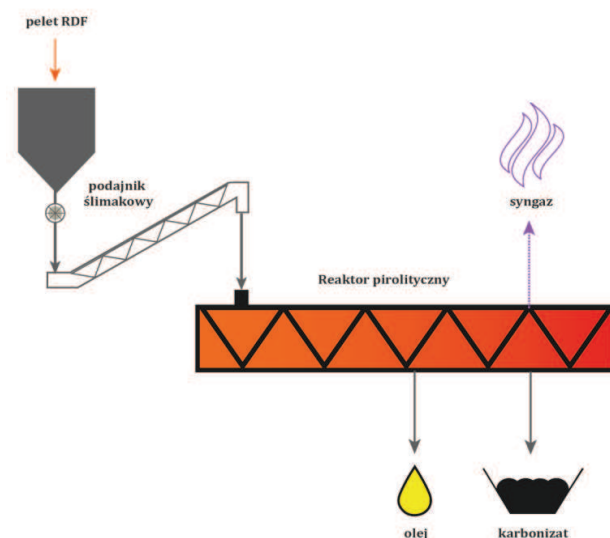
Rysunek 1. Materiał wsadowy (a) przed obróbką, (b) po obróbce wstępnej, źródło: materiały własne – Metal Expert Sp. z o.o. Sp. J.

W próbkach materiału wsadowego określono zawartość wilgotności metodą wagową z zastosowaniem wagosuszarki Radwag serii MAR, gęstość nasypową na podstawie normy PN-EN-15103-2010E [16], zawartość popiołu zgodnie z normą PN-EN-14775-2010E [17], zawartość węgla całkowitego (TC) z zastosowaniem analizatora całkowitego węgla organicznego TOC-LCPH/CPN z modułem do próbek stałych SSM-5000A firmy Shimadzu. Określono również ciepło spalania przy użyciu kalorymetru KL-1 w oparciu o normę PN-93/Z-15008/04 [18]. Dla wybranych próbek wykonano badania TG stosując aparat SDT Q600 firmy TA Instruments. Oznaczenia wykonano zgodnie z własną procedurą badawczą: szybkość nagrzewania 10°C/min do 750°C w przepływie azotu 100 ml/min. Odważano od 5 do 10 mg próbki.

Próbki po przygotowaniu zostały poddane procesowi pirolizy w warunkach laboratoryjnych.

### 2.2. Proces

Proces pirolizy przeprowadzono z zastosowaniem reaktora pirolitycznego o przepływie ciągłym, w temperaturze 850°C, w warunkach podciśnienia, w atmosferze gazu obojętnego (azot) oraz stężeniem tlenu na poziomie około 2%. Czas



Rysunek 2. Schemat ideowy procesu pirolizy z wykorzystaniem reaktora pirolitycznego ze spiralą grzejną, źródło: materiały własne – Metal Expert Sp. z o.o. Sp. J.



**Rysunek 3.** Zdjęcia: materiał wsadowy, frakcja olejowa oraz karbonizat uzyskane w wyniku procesu pirolizy frakcji RDF, źródło: materiały własne – Metal Expert Sp. z o.o. Sp. J.

przebywania wsadu w komorze reaktora wynosił 20 min. Materiał wsadowy dozowano w temperaturze pokojowej za pomocą zaworu celkowego. Stabilny proces w zależności od wsadu trwał od około 120 min do około 240 min, uzyskując wydajność w zakresie od 6 do 15 kg/h. W wyniku procesu pirolizy otrzymano fazę gazową, olejową oraz stałą (karbonizat). Wytworzony gaz procesowy, w celu oddzielenia od frakcji smołowej schładzany był w kondensatorze pionowym o budowie rurowej a następnie w celu doczyszczania z frakcji pyłowej przepuszczany był przez barboter. Karbonizat schładzany był do temperatury otoczenia a następnie odbierany po procesie w sposób ciągły za pomocą zaworu celkowego oraz podajnika ślimakowego. Faza ciekła odbierana była z kondensatora pionowego poprzez zawór kulowy. Schemat ideowy procesu przedstawiono na Rysunku 2.

Podczas doświadczenia prowadzono ciągły pomiar gazu pirolitycznego z zastosowaniem przenośnego analizatora gazu Gasborad 3100P o zakresie pomiarowym CO (0–30%), CO<sub>2</sub> (0–30%), CH<sub>4</sub> (0–25%), C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> (0–10%), O<sub>2</sub> (0–10%), H<sub>2</sub> (0–30%). Analizator wyposażony był również w funkcję odczytu chwilowego wartości opałowej (LHV). Wartość była szacowana na podstawie aktualnych składowych gazu. Na Rysunku 3 przedstawiono materiał wsadowy, frakcji olejowej oraz karbonizatu uzyskanego w wyniku procesu pirolizy frakcji RDF.

Po każdym procesie sporządzono bilans masowy produktów pirolizy, przy czym ilość gazu była szacowana masowo na podstawie różnicy pomiędzy ilością wsadu a ilością wytworzonego karbonizatu oraz frakcji olejowej.

### 3. Wyniki i dyskusja

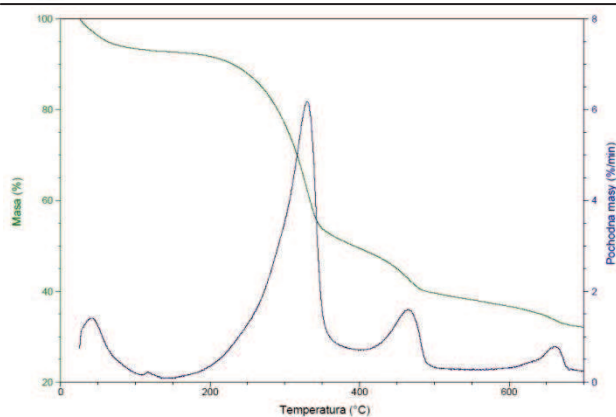
Właściwości materiału wsadowego zebrano w Tabeli 1. Krzywe TG przedstawiono na Rysunkach 4 i 5. Materiał wsadowy charakteryzował się średnią wilgotnością około 11% w przypadku RDF lekkiego oraz około 6% w przypadku RDF ciężkiego. Obydwie frakcje RDF zawierały zbliżone zawartości popiołów oraz pierwiastkowego węgla (TC), tj. w przypadku popiołów 23% i 18% oraz w przypadku TC – 41% i 48% odpowiednio dla RDF lekkiego oraz RDF ciężkiego. RDF frakcji ciężkiej charakteryzował się wyższą wartością ciepła spalania oraz niższą gęstością nasypową, odpowiednio 19.76 MJ/kg i 0.52 g/cm<sup>3</sup>. Ciepło spalania RDF frakcji lekkiej wynosiło 15.94 MJ/kg oraz 0.58 g/cm<sup>3</sup>.

Analiza TG-DTG dla frakcji RDF1 wykazała, że rozkład materiału wchodzącego w skład analizowanych próbek zachodzi w największym stopniu w przedziale 200–400°C oraz z dwoma pikami o mniejszej intensywności, przebiegającymi do temperatury 700°C (Rysunek 4). Natomiast dla frakcji

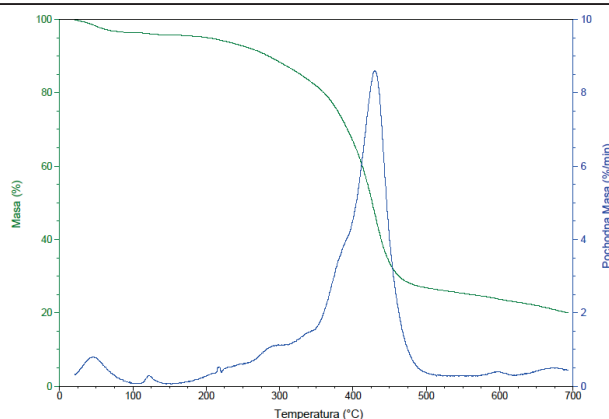
**Tabela 1.** Właściwości materiału wsadowego.

Parametry	Proces									
	RDFI1	RDFI2	RDFI3	RDFI4	RDFI5	RDFc1	RDFc2	RDFc3	RDFc4	RDFc5
Stan materiału	pellet									
Rozmiar cząsteczek	2 cm, Ø 6 mm									
Wilgotność %	12.34	12.35	15.11	4.84	11.63	5.30	5.80	6.23	4.24	6.42
Gęstość nasypowa g/cm <sup>3</sup>	0.546	0.598	0.575	0.608	0.572	0.512	0.491	0.510	0.559	0.524
Zawartość popiołów %	21.93	28.01	25.89	19.35	20.61	22.10	16.41	16.00	17.20	18.61
Zawartość TC %	39.22	33.64	39.83	50.91	40.58	35.50	52.60	49.80	52.10	49.46
Ciepło spalania HHV MJ/kg	15.60	14.1	14.2	21.21	14.59	21.2	18.6	18.9	19.71	20.4

Źródło: badania własne – Metal Expert Sp. z o.o. Sp. J.



**Rysunek 4.** Krzywa rozkładu TG-DTG dla frakcji RDFI, źródło: badania własne – Metal Expert Sp. z o.o. Sp. J.



**Rysunek 5.** Krzywa rozkładu TG-DTG dla frakcji RDFc, źródło: badania własne – Metal Expert Sp. z o.o. Sp. J.

**Tabela 2.** Bilans substratów i produktów procesów pirolizy.

Uzysk frakcji %	Proces									
	RDFI1	RDFI2	RDFI3	RDFI4	RDFI5	RDFc1	RDFc2	RDFc3	RDFc4	RDFc5
Gaz pirolityczny	42	53	52	68	61	67	71	57	57	61
Olej pirolityczny	20	13	12	6	9	2	2	4	11	10
Karbonizat	38	34	36	26	30	31	27	38	32	29

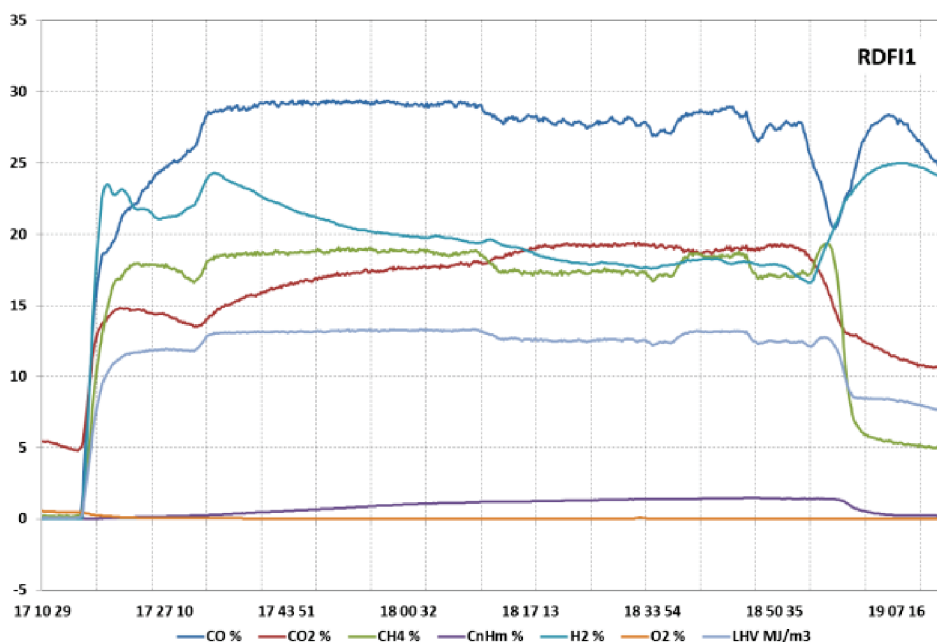
Źródło: badania własne – Metal Expert Sp. z o.o. Sp. J.

RDFc, w której skład w większości wchodziły tekstylia syntetyczne i naturalne, obserwowano najintensywniejszy rozkład w przedziale temperatur 300–500°C (Rysunek 5).

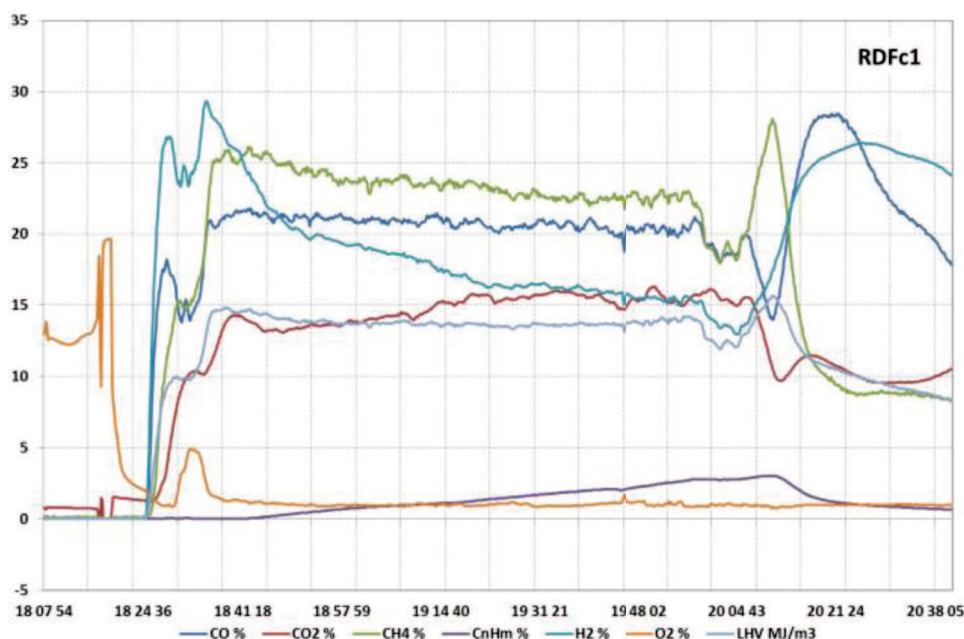
W Tabeli 2 zebrano wyniki bilansu masowego produktów pirolizy. Na Rysunkach 6 i 7 przedstawiono graficznie zmianę składu gazu w trakcie trwania procesów pirolizy frakcji RDF lekkiego i RDF ciężkiego.

Na podstawie krzywych zmiany składu gazu w trakcie procesów pirolizy (Rysunki 6 i 7), po ustabilizowaniu procesu oszacowano średnie wartości składników gazu oraz ciepło spalania. Wyniki zebrano w Tabeli 3.

W trakcie procesów uzyskano gaz pirolityczny o kaloryczności w zakresie 8.6–15.6 MJ/m<sup>3</sup> w zależności od zastosowanego wsadu. Dla wsadów RDF lekkiego uzyskano gaz był niższy



**Rysunek 6.** Zmiana składu gazu w trakcie procesu pirolizy frakcji RDF lekkiego (RDFI1), źródło: badania własne – Metal Expert Sp. z o.o. Sp. J.



**Rysunek 7.** Zmiana składu gazu w trakcie procesów pirolizy frakcji RDF ciężkiego (RDFc1), źródło: badania własne – Metal Expert Sp. z o.o. Sp. J.

(średnio 55%), ale o większej wartości LHV (średnio 13.5 MJ/m<sup>3</sup>). Dla wsadów RDF ciężkiego uzysk gazu wynosił średnio około 63% ale był mniej energetyczny (średnia wartość opałowa 12.8 MJ/m<sup>3</sup>).

Uzysk karbonizatu w obydwu przypadkach był na podobnym poziomie, około 30%. W przypadku frakcji ciężkiej RDF, średni uzysk frakcji olejowej był dwa razy mniejszy niż dla RDF lekkiego.

W obydwu seriach pirolizy uzyskano gaz o podobnym średnim składzie w zakresie zawartości metanu (około 20%), węglowodorów łańcuchowych niemietanowych C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> (około 2%). Nieznaczne różnice odnotowano w przypadku tlenu i dwutlenku węgla, tj. ponad 25% CO i około 16% CO<sub>2</sub> dla

procesów z RDF lekkim oraz około 18% CO i blisko 12% CO<sub>2</sub> dla procesów z RDF ciężkim. Średnia zawartość wodoru stanowiła około 18.7% i 16.7%, odpowiednio dla wsadów RDF lekkiego oraz RDF ciężkiego.

Na podstawie uzyskanych danych, w oparciu o Równanie 1, oszacowano wydajność energetyczną uzyskanego gazu oraz ilość energii, jaką można pozyskać w wyniku jego spalania.

$$E(\%) = \frac{m_{\text{gazu}} \cdot LHV_{\text{gazu}} \cdot \rho_{\text{gazu}}}{m_{\text{RDF}} \cdot HHV_{\text{RDF}}} \quad (1)$$

gdzie:  $E$  – wydajność energetyczna gazu, %;  $m_{\text{gazu}}$  – średnia masa uzyskanego gazu, kg;  $LHV_{\text{gazu}}$  – średnia wartość opałowa

**Tabela 3.** Wartość średnia składników gazu oraz wartość opałowa gazu uzyskanego w procesach pirolizy próbek RDFI i RDFc.

Parametr gazu	Proces									
	RDFI1	RDFI2	RDFI3	RDFI4	RDFI5	RDFc1	RDFc2	RDFc3	RDFc4	RDFc5
CO %	27.65	26.98	24.48	23.34	26.26	20.76	9.54	20.84	20.65	19.26
CO <sub>2</sub> %	17.46	20.20	16.98	11.37	13.46	14.66	5.82	14.20	12.43	11.48
CH <sub>4</sub> %	18.00	18.08	17.98	27.54	17.28	23.41	15.60	24.61	20.23	19.05
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ) %	0.97	2.08	3.22	0.36	2.41	1.26	1.47	3.51	1.12	2.69
H <sub>2</sub> %	19.78	14.40	16.39	23.46	19.65	18.41	7.85	15.00	18.38	23.66
O <sub>2</sub> %	0.01	0.40	1.52	0.27	0.43	1.05	2.05	0.45	0.66	0.37
Wartość opałowa LHV MJ/m <sup>3</sup>	12.71	12.78	13.38	15.59	13.18	13.81	8.59	15.33	12.56	13.55

Źródło: badania własne – Metal Expert Sp. z o.o. Sp. J.

wa uzyskanego gazu,  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ;  $\rho_{\text{gazu}}$  – gęstość gazu,  $\text{kg}/\text{Nm}^3$  (założenie  $\rho_{\text{gazu}} = 0.9 \text{ kg}/\text{Nm}^3$ );  $m_{\text{RDF}}$  – średnia masa wsadu RDF, kg;  $\text{HHV}_{\text{RDF}}$  – średnie ciepło spalania wsadu RDF,  $\text{MJ}/\text{kg}$ .

Wydajność energetyczna gazu  $E$  (Równanie 1) określa udział procentowy energii gazu uzyskanej z energii zawartej w 1 kg wsadu. Średnia wydajność energetyczna uzyskanego gazu, z założeniem, że jego gęstość wynosi  $0.9 \text{ kg}/\text{Nm}^3$  wynosi 43 i 36%, odpowiednio dla procesów z zastosowaniem RDF lekkiego oraz RDF ciężkiego. Wartości tego parametru zawierają się w zakresie 31–50% w przypadku RDF lekkiego oraz 29–39% w przypadku RDF ciężkiego.

W wytworzonej w danym procesie ilości fazy gazowej oszacowano porcję energii w nim zawartej. Wartość energii zostały odniesione do całkowitej ilości otrzymanego gazu pirolitycznego w danym procesie. W gazie pirolitycznym uzyskanym w wyniku procesów pirolizy RDF lekkiego zdeponowana jest energia od 34 do 75 kWh, co daje średnią wartość 58 kWh. W przypadku procesu z wykorzystaniem RDF ciężkiego szacowane wartości energii zawierają się od 42 do 64 kWh, dając średnią wartość 53 kWh.

Ze względu na ograniczenia zastosowanego analizatora gazu, skład gazu nie uwzględnia ciężkich związków organicznych i ich pochodnych (alifatycznych, cyklicznych) występujących w gazie pirolitycznym. W przypadku procesów z użyciem RDF lekkiego, związki te stanowią średnio około 20%, natomiast w przypadku procesów wykorzystujących RDF ciężki jest to wartość średnio około 30%. Związki te zdecydowanie podwyższają wartości energetyczne uzyskiwanego gazu.

W Tabeli 4 przedstawiono bilans energetyczny dla przykładowego procesu pirolizy RDF. Do obliczenia wydajności energetycznej każdego z uzyskanych produktów pirolizy (karbonizat, gaz, olej) zastosowano Równanie 2, które jest uogólnieniem Równania 1. W tym przypadku, wydajność energetyczna każdego z produktów określa udział procentowy energii zawartej w jednostce masy uzyskanego produktu pirolizy w odniesieniu do energii zawartej w jednostce masy materiału wsadowego.

$$W(\%) = \frac{m_i \cdot \text{HHV}_i}{m_{\text{RDF}} \cdot \text{HHV}_{\text{RDF}}} \quad (2)$$

gdzie:  $W$  – wydajność energetyczna, %;  $m_i$  – średnia masa uzyskanego produktu pirolizy, kg;  $\text{HHV}_i$  – ciepło spalania produktów (karbonizatu, oleju, gazu),  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ;  $m_{\text{RDF}}$  – masa wsadu RDF, kg;  $\text{HHV}_{\text{RDF}}$  – ciepło spalania wsadu RDF,  $\text{MJ}/\text{kg}$ .

**Tabela 4.** Wydajność energetyczna dla przykładowego procesu.

Produkty	HHV MJ/kg	Masa m %	Wydajność energetyczna W %
RDF	25	100	–
Karbonizat	13	26	14
Gaz	25	68	68
Olej	20	6	5
Straty / niedobór energii	–	–	13

Z danych w Tabeli 4 wynika, że energia zgromadzona w poszczególnych produktach procesu pirolizy RDF daje w efekcie praktycznie blisko 90% energii potrzebnej do przeprowadzenia reakcji rozkładu metodą pirolizy.

#### 4. Podsumowanie

Podsumowując, w wyniku przeprowadzonych badań można stwierdzić, że proces pirolizy jest efektywnym sposobem utylizacji odpadów komunalnych frakcji RDF, niezależnie czy jest to RDF ciężki czy też lekki. Ze względu na stosunkowo małą gęstość nasypową surowiec wymaga zastosowania dodatkowego etapu przygotowania mającego na celu zagęszczenie materiału.

W trakcie procesu z RDFI uzyskano gaz o stosunkowo wysokiej wartości opałowej, która mieściła się w zakresie  $12.71\text{--}15.59 \text{ MJ}/\text{m}^3$ . Jest to wąski zakres kaloryczności pozwalający przypuszczać, że z wsadu RDFI można wytwarzać paliwo gazowe o stabilnych parametrach energetycznych. W procesie z zastosowaniem RDFc uzyskano gaz o LHV w zakresie  $8.59\text{--}15.33 \text{ MJ}/\text{m}^3$ . Jest to dość szeroki zakres kaloryczności, który może wpływać na stabilność parametrów energetycznych paliwa gazowego. Wartość LHV nie uwzględnia energii zgromadzonej w związkach organicznych, które nie zostały zmierzone, a stanowią minimum 20% składu gazu (dla procesów z zastosowaniem RDFI) tj. wyższe węglowodory nasycone i nienasycone ( $\text{C}_5\text{--}\text{C}_{10}$ ), cykliczne związki organiczne (benzen, toluen). Dlatego też, można uznać, że wartość energetyczna uzyskiwanego gazu pirolitycznego jest wyższa. Frakcja RDFc, ze względu na dość duże wahania składu otrzymywanego gazu pirolitycznego, powinna stanowić dodatek do wsadu frakcji RDFI. Wydaje się, że dzięki takiemu zabiegowi można byłoby uzyskać zadowalającą stabilność uzyskiwanego gazu.

Z pewnością istnieje możliwość skojarzenia procesu pirolizy odpadów komunalnych z recyklingiem energetycznym i zastosowaniem gazu pirolitycznego jako odnawialnego źródła energii wykorzystywanego do produkcji energii elektrycznej, która mogłaby stanowić podstawowe źródło zasilania reaktora pirolitycznego. Cały proces recyklingu, zarówno materiałowego, jak i energetycznego może być prowadzony w zakładach zajmujących się zbiórką i sortowaniem odpadów komunalnych oraz surowców wtórnych. Uzyskany gaz, podobnie jak biogaz (tzw. gaz wysypiskowy) z powodzeniem mógłby zostać zastosowany jako alternatywne paliwo do zasilania turbiny gazowej lub wykorzystany w kogeneracji zamiast gazu ziemnego. Wszystkie takie działania przyczynią się do zmniejszenia oddziaływania bytowania ludzi na środowisko naturalne, jednocześnie efektywnie redukując ilość składowanych odpadów komunalnych, z zastosowaniem wygenerowanej na miejscu energii alternatywnej.

#### Podziękowania

Publikacja powstała w ramach projektu badawczo-rozwojowego pn. „Opracowanie innowacyjnej instalacji utylizacji odpadów z odzyskiem energii opartej o technologię niskoemisyjnego przetwarzania”, współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007-2013, Działanie 1.4 wsparcie projektów celowych. Umowa o dofinansowanie nr POIG.01.04.00-28-146/12 z dnia 22 listopada 2012 r.

## Literatura

- [1] B. Buczek, W. Chwiałkowski, *ZN UEK*, **2010**, *841*, 5–22.
- [2] A.K. Błędzki, *Recykling materiałów polimerowych*, WNT, Warszawa, **1997**.
- [3] K.S. Lin, H.P. Wang, S.H. Liu, N.B. Chang, Y.J. Huang, H.C. Wang, *Fuel Proc. Technol.*, **1999**, *60*, 103–110. doi: 10.1016/S0378-3820(99)00043-0.
- [4] W.K. Buah, A.M. Cunliffe, P.T. Williams, *Process Saf. Environ. Prot.*, **2007**, *85*, 450–457. doi: 10.1205/psep07024.
- [5] D. Chena, L. Yina, H. Wanga, P. Heb, *Waste Manag.*, **2015**, *37*, 116–136. doi: 10.1016/j.wasman.2015.01.022.
- [6] I.H. Hwang, J. Kobayashi, K. Kawamoto, *Waste Manag.*, **2014**, *34*, 402–410. doi: 10.1016/j.wasman.2013.10.009.
- [7] E.C. Efika, J.A. Onwudili, P.T. Williams, *J. Anal. Appl. Pyrol.*, **2015**, *112*, 14–22. doi: 10.1016/j.jaap.2015.01.004.
- [8] I. Velghe, R. Carleer, J. Yperman, S. Schreurs, *J. Anal. Appl. Pyrol.*, **2011**, *92*, 366–375. doi: 10.1016/j.jaap.2011.07.011.
- [9] A.N. Garcia, R. Font, A. Marcilla, *Energy Fuels*, **1995**, *9*, 648–658. doi: 10.1021/ef00052a012.
- [10] N. Miskolczi, F. Buyong, A. Angyal, P.T. Williams, L. Bartha, *Bioresour. Technol.*, **2010**, *101*, 8881–8890. doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.103.
- [11] M.L. de Souza-Santos, *Solid fuels combustion and gasification: Modeling, simulation, and equipment operations*, Marcel Dekker Inc., New York, **2004**.
- [12] D. Kardaś, J. Kluska, M. Klein, P. Kazimierski, Ł. Heda, *Modelowe kompleksy agroenergetyczne: Teoretyczne i eksperymentalne aspekty pirolizy drewna i odpadów*, Wydawnictwo UWM, Olsztyn, **2014**.
- [13] J. Kluska, M. Klein, P. Kazimierski, D. Kardaś, *Arch. Therm.*, **2014**, *35*, 141–152. doi: 10.2478/aoter-2014-0009.
- [14] S. Stelmach, *Termochemiczna konwersja biomasy i bioodpadów z wykorzystaniem procesów pirolizy i zgazowania*, [http://www.icimb.pl/opole/images/stories/PDF/Konf\\_E2BEBIS/Termochemiczna\\_konwersja\\_biomasy\\_i\\_bioodpadow\\_z\\_wykorzystaniem\\_procesow\\_pirolizy\\_i\\_zgazowania.ptx](http://www.icimb.pl/opole/images/stories/PDF/Konf_E2BEBIS/Termochemiczna_konwersja_biomasy_i_bioodpadow_z_wykorzystaniem_procesow_pirolizy_i_zgazowania.ptx) [odczyt: 16.04.2017].
- [15] A. Saffarzadeh, T. Shimaoka, Y. Motomura, K. Watanabe, *Waste Manag.*, **2006**, *26*, 1443–1452. doi: 10.1016/j.wasman.2005.12.005.
- [16] PN-EN-15103-2010E Biopaliwa stałe – Oznaczenie gęstości nasypowej.
- [17] PN-EN-14775-2010E Biopaliwa stałe – Oznaczenie zawartości popiołu.
- [18] PN-Z-15008-04:1993 Odpady komunalne stałe – Badania właściwości paliwowych – Oznaczenie ciepła spalania i obliczanie wartości opałowej.