



Beata KŁOJZY-KARCZMARCZYK*, Jarosław STASZCZAK**

Szacowanie masy frakcji energetycznych w odpadach komunalnych wytwarzanych na obszarach o różnym charakterze zabudowy

STRESZCZENIE: Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 roku w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach (Dz.U. z 2015 r., poz. 1277) frakcje odpadów komunalnych o cieple spalania wyższym niż 6 MJ/kg nie mogą być składowane na składowiskach odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne. Istnieje zatem konieczność wydzielenia tych frakcji i skierowanie ich do przetwarzania innymi metodami. W pracy podjęto działania w celu oszacowania wskaźników liczbowych, które pozwoliłyby na obliczanie i prognozowanie masy odpadów komunalnych wytwarzanych przez mieszkańców a mogących stanowić paliwo alternatywne, jednocześnie zmniejszając masę odpadów kierowanych do składowania. Analizie poddano liczne dane literaturowe, które dotyczą wartości opałowych oraz ciepła spalania poszczególnych frakcji morfologicznych. Wielkość wytwarzania odpadów komunalnych przez mieszkańców oraz skład morfologiczny odpadów są zróżnicowane dla różnych obszarów. Przeanalizowano strumień odpadów komunalnych wytwarzanych i zbieranych w sposób selektywny, jak też w sposób zmieszany w podziale na duże miasto (powyżej 50 000 mieszkańców), małe miasto (poniżej 50 000 mieszkańców) oraz obszary wiejskie. Ze względu na zakaz składowania odpadów dla których ciepło spalania jest wyższe niż 6 MJ/kg, założono, że frakcje takie można uznać za energetyczne, chociaż literatura podaje, że odpady stosowane jako paliwa powinny wykazywać wartość opałową na minimalnym dwukrotnie wyższym poziomie. Obowiązujący Krajowy plan gospodarki odpadami 2022 (M.P. z 2016 r., poz. 784) pozwala na zrównanie wskaźnika wytwarzania odpadów komunalnych na obszarach o różnym charakterze zabudowy na prognozowanym

* Dr inż., ** Mgr inż. – Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków;
e-mail: beatakk@min-pan.krakow.pl; jaro@min-pan.krakow.pl

w 2025 roku poziomie 302–313 kg/mieszkańca/rok (kg/M/rok), jednak udziały poszczególnych frakcji morfologicznych są odmienne. Na podstawie przeprowadzonej szerokiej analizy danych literaturowych można stwierdzić, że poszczególne frakcje morfologiczne odpadów komunalnych charakteryzują się zdecydowaną zmiennością wartości opałowej. Najwyższą wartością opałową na poziomie 22–46 MJ/kg charakteryzują się tworzywa sztuczne. Wartość opałowa odpadów z tworzyw sztucznych jest wysoka, porównywalna do paliw kopalnych. Kolejne frakcje morfologiczne charakteryzują się wartością opałową, na niższym, ale również wysokim poziomie: papier i tektura 11–26 MJ/kg, tekstylia 15–16 MJ/kg, drewno 11–20 MJ/kg oraz odpady wielomateriałowe 16 MJ/kg. Wartość opałowa wymienionych powyżej odpadów generalnie przekracza 12 MJ/kg i spełnia minimalne wymagania stawiane odpadom, które mogą być stosowane jako paliwa. Pozostałe analizowane frakcje odpadowe charakteryzują się wartością opałową poniżej 6 MJ/kg. W strumieniu wytwarzanych odpadów komunalnych na poszczególnych obszarach frakcje energetyczne zajmują znaczący udział. Przy zrównanym wskaźniku wytwarzania największy udział frakcji energetycznych (powyżej 6 MJ/kg, a nawet 12 MJ/kg) obserwowany jest w odpadach generowanych przez mieszkańców dużego miasta i wynosi 39%, nieco niższy w odpadach generowanych przez mieszkańców małego miasta na poziomie 29%, a najniższy w odpadach generowanych przez mieszkańców obszarów wiejskich na poziomie 22%. Oszacowany wskaźnik wytwarzania frakcji energetycznych w strumieniu odpadów komunalnych zmienia się od 122 kg/M/rok dla obszaru dużego miasta do 67 kg/M/rok dla obszaru wiejskiego.

SŁOWA KLUCZOWE: odpady komunalne, frakcje energetyczne, wartość opałowa, wskaźnik wytwarzania

Wprowadzenie

Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 roku w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach (Dz.U. z 2015 r. poz. 1277) wprowadzono kryteria pozwalające lub nie pozwalające na składowanie odpadów w obiektach do tego przeznaczonych. Zgodnie z tym rozporządzeniem odpady komunalne zbierane oraz odpady powstające w wyniku przetwarzania odpadów komunalnych nie mogą być składowane na składowiskach odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne jeżeli ich ciepło spalania jest wyższe niż 6 MJ/kg. Odpady te mogą być jednak poddawane odzyskowi np. w procesie termicznego przekształcania. Frakcje odpadowe przeznaczone do odzysku mogą pochodzić zarówno z selektywnego zbierania w gospodarstwach domowych („u źródła”), jak też mogą zostać wydzielone w instalacjach mechaniczno-biologicznego przetwarzania (MBP) (Kłojzy-Karczmarczyk i in. 2015). Na podstawie badań SOCOTEC – Analiza wartości opałowej odpadów komunalnych, warunki dopuszczania odpadów do składowania mogą spełniać jedynie takie odpady jak: szkło, metale, odpady mineralne oraz 70% frakcji <10 mm (Szpadt 2008). Jednocześnie odpady stosowane jako paliwa muszą wykazywać odpowiednie parametry, z czego niezmiernie istotną cechą jest wartość opałowa, przyjmowana najczęściej na minimalnym poziomie 12 MJ/kg (Michalak i in. 2003).

W dostępnej literaturze brak jest głębszej analizy wskaźników obliczeniowych, które pozwoliłyby na szacowanie masy frakcji energetycznych odpadów komunalnych wytwarzanych przez mieszkańców na obszarach o różnym charakterze zabudowy. Autorzy pracy podjęli zatem próbę oszacowania wielkości wskaźników liczbowych, które pozwoliłyby na obliczanie i prognozowanie masy odpadów komunalnych wytwarzanych przez mieszkańców, a mogących stanowić paliwo alternatywne, jednocześnie zmniejszając masę odpadów kierowanych do składowania. Analizie poddano liczne dane literaturowe, które dotyczą wartości opałowych oraz ciepła spalania poszczególnych frakcji morfologicznych odpadów komunalnych. Należy podkreślić, że materiał poddany analizie został wybrany na podstawie dostępnej literatury, a każde kolejne materiały i analizy mogą dostarczać nowych, często odmiennych danych ze względu na zdecydowane zróżnicowanie materiału odpadowego wytwarzanego przez sektor komunalny.

1. Możliwości zagospodarowania frakcji energetycznych z odpadów komunalnych

Zakaz składowania frakcji energetycznej odpadów komunalnych, w połączeniu z hierarchią postępowania z odpadami, powoduje, że konieczną perspektywą może okazać się przekazanie tej frakcji do spalarni odpadów. Spalanie jest najczęściej stosowaną metodą recyklingu energetycznego. Procesowi temu można poddać każdy odpad, dodatkowo zmniejszając jego objętość o 90% (Kozłowski 1998).

Odbiorcami frakcji energetycznej są zatem często spalarnie odpadów oraz cementownie (Modrzejewski 2016). Jednym ze sposobów zagospodarowania odpadów komunalnych jest produkcja paliw alternatywnych (np. RDF – *Refuse Derived Fuel*) o odpowiednich parametrach fizykochemicznych, takich jak wysoka wartość opałowa, zawartość popiołu, wilgoci oraz części lotnych, a także odpowiedni skład chemiczny. Paliwa alternatywne wytwarzane są głównie z odpadów poprodukcyjnych i opakowaniowych oraz z palnych frakcji odpadów komunalnych (papier, tektura, tekstylia itp.), jak również z odpadów biomasy i osadów ściekowych i mogą być traktowane jak substytut paliw konwencjonalnych (Ulewicz i Maciejewski 2011). Paliwa wytwarzane z odpadów są znacznie tańsze na rynku niż paliwa pierwotne, i z tego powodu są chętnie wykorzystywane w energochłonnych gałęziach przemysłu (Rosik-Dulewska 2009).

Najprostsze technologie produkcji paliwa alternatywnego z odpadów komunalnych (stosowane nazwy paliw m.in. RDF, BRAM, PAKOM, SRF, EBS) ograniczają się głównie do mechanicznego sortowania i odzyskiwania części palnych, przy czym pozostałość jest deponowana na składowiskach (m.in. Wasilewski i Tora 2009). Natomiast bardziej rozwinięte technologie, jak np. ORFA umożliwiają przerób prawie 90 % odpadów, a oprócz produkcji paliwa (tzw. INBRE) odzyskiwanych jest wiele surowców i półproduktów (Ulewicz i Maciejewski 2011). Wysegregowane frakcje odpadów komunalnych lub ich mieszaniny mogą być paliwami alternatywnymi

w przemyśle cementowym, jako zamiennik paliw konwencjonalnych (m.in. Mokrzycki i Uliasz-Bocheńczyk 2002, 2009; Duczkowska-Kądział i Duda 2014). Proces produkcji cementu jest wysoko energochłonny i ze wzrostem kosztów energii pochodzącej ze źródeł tradycyjnych, istnieje konieczność obniżania kosztów produkcji. Jednym z działań, które mają na celu ich zmniejszenie jest obniżenie kosztów energii poprzez zastąpienie części paliw konwencjonalnych paliwami alternatywnymi (Mokrzycki i in. 2003; Mokrzycki i Uliasz-Bocheńczyk 2009).

Wykorzystanie odpadów komunalnych w celu produkcji energii niesie ze sobą wiele korzyści ekologicznych (zmniejszenie obciążenia środowiska w wyniku składowania odpadów) oraz korzyści wynikających z możliwości produkcji energii w zakładach termicznego przekształcania odpadów komunalnych (zmniejszenie zużycia paliw konwencjonalnych). W obliczu pakietu klimatycznego oraz coraz bardziej zaostrzonych wymogów ekologicznych i energetycznych można stwierdzić, że rozbudowywana infrastruktura odzysku energii z odpadów staje się ważnym elementem polskiej polityki energetycznej (Cyrancka i Jurczyk 2016).

2. Metodyka szacowania strumienia frakcji energetycznych w odpadach komunalnych

Wielkość wytwarzania odpadów komunalnych przez mieszkańców oraz skład morfologiczny odpadów są zróżnicowane dla różnych obszarów. Obowiązujący Krajowy plan gospodarki odpadami 2022 (Kpgo 2022; M.P. z 2016 r., poz. 784) pozwala na zrównanie wskaźnika wytwarzania odpadów komunalnych na obszarach o różnym charakterze zabudowy, jednak udziały poszczególnych frakcji morfologicznych są odmienne (tab. 1). Przeanalizowano strumień odpadów komunalnych wytwarzanych i zbieranych zarówno selektywnie, jak i w sposób zmieszany w podziale na: miasto duże (powyżej 50 000 mieszkańców), miasto małe (poniżej 50 000 mieszkańców) oraz obszary wiejskie. W procesie szacowania masy frakcji energetycznych w odpadach komunalnych nie wydzielano odpadów surowcowych lub innych zbieranych selektywnie „u źródła”, a strumień wytwarzanych odpadów komunalnych potraktowano całościowo. Ze względu na zakaz składowania odpadów dla których ciepło spalania jest wyższe niż 6 MJ/kg założono, że frakcje te można uznać za energetyczne, chociaż literatura podaje, że odpady stosowane jako paliwa powinny wykazywać wartość opałową na minimalnym poziomie 12 MJ/kg (Michalak i in. 2003).

Pozyskane informacje w materiałach publikowanych pozwoliły na określenie wartości opałowej poszczególnych frakcji morfologicznych a nie ciepła spalania. Z definicji poszczególnych parametrów wynika, że wartość ciepła spalania wykazuje wielkości wyższe od wartości opałowej, a różnica jest tym wyższa, im więcej ciepła można uzyskać dodatkowo ze skraplania pary wodnej zawartej w odpadach. Różnice wartości tych dwóch parametrów dla tych samych frakcji odpadowych pokazuje tabela 2 w części dotyczącej właściwości energetycznych frakcji balastu (Budzyń i Tora 2014).

TABELA 1. Morfologia wytwarzanych odpadów komunalnych wraz z udziałem procentowym

TABLE 1. The morphology of municipal waste production with the percentage share

Fracje morfologiczne odpadów komunalnych	Udział procentowy poszczególnych frakcji [%]		
	duże miasto >50 000	małe miasto <50 000	obszar wiejski
Papier i tektura	19	9,7	5
Szkło	10	10,2	10
Metale	2,6	1,5	2,3
Tworzywa sztuczne	15	11	10,3
Odpady wielomateriałowe	2,5	4	4,1
Odpady kuchenne i ogrodowe	28,9	36,7	33,1
Odpady mineralne	3,2	2,8	6
Fracja <10 mm	4,5	6,8	16,9
Tekstylia	2,3	4	2,1
Drewno	0,2	0,3	0,7
Opady niebezpieczne	0,8	0,6	0,8
Inne kategorie (4,9%)	3,2	4,5	4,9
Odpady wielkogabarytowe	2,5	2,6	1,3
Odpady z terenów zielonych	5,3	5,3	2,5
Wytwarzanie odpadów komunalnych ogółem przez jednego mieszkańca	Wytwarzanie w latach 2014-2030 [kg/M/rok]		
	2014 r.	2025 r.	2030 r.
	wg Kpgo 2014: 339 wg Kpgo 2022: 268–281	302–313 hipoteza niska – wysoka	314–330 hipoteza niska – wysoka

Pogrubieniem zaznaczono frakcje morfologiczne odpadów komunalnych, dla których wartość opałowa jest wyższa od 6 MJ/kg (na podstawie tab. 2).

Źródło danych: na podstawie Kpgo 2022, M.P. z 2016 r. poz. 784 oraz Jędrzak 2010.

3. Analiza wartości opałowej frakcji morfologicznych odpadów komunalnych

Na podstawie dostępnych danych literaturowych (m.in. Mokrzycki i Uliasz-Bocheńczyk 2005; Socotec 2008; Dąbrowski i Piecuch 2011; Sorek i in. 2012; Cichy i Sobczyk 2014;

TABELA 2. Porównanie wartości opałowych wybranych frakcji odpadów komunalnych na podstawie danych literaturowych

TABLE 2. Comparison of calorific values of selected municipal waste fractions on the basis of literature data

Źródło danych	Frakcja odpadowa i wartość opałowa lub ciepło spalania w MJ/kg	
Jenkins, Mather 1997; Lorber i in. 1999, cytowane w: Mokrzycki i Uliasz-Bocheńczyk 2005	Wartość opałowa: ♦ odpady drewna: 11–18 MJ/kg ♦ tworzywa sztuczne twarde: 39,4 MJ/kg ♦ papier: 14,1 MJ/kg ♦ tektura: 16,2 MJ/kg ♦ zużyte drewno: 16,8 MJ/kg ♦ tekstylia: 14,7 MJ/kg ♦ frakcje palne odpadów komunalnych przy zawartości wilgoci poniżej 10%: >22 MJ/kg	
Materiały SOCOTEC 2008	Wartość opałowa: ♦ frakcja 0-10: 5,264 MJ/kg ♦ papier/karton: 13,278 MJ/kg ♦ tekstylia: 14,944 MJ/kg ♦ tworzywa sztuczne: 24,189 MJ/kg ♦ odpady ulegające biodegradacji bez papieru, kartonu i drewna: 3,948 MJ/kg ♦ drewno: 15,282 MJ/kg	
Dąbrowski i Piecuch 2011	Wartość opałowa: ♦ tworzywa sztuczne: 23,11–42,02 MJ/kg (PET – politereftalan etylenu 23,11 MJ/kg, PCW – polichlorek winylu 25,76 MJ/kg, PP – polipropylen: 42,02 MJ/kg)	
Walendziewski i in. 2012, cytowane w: Sorek i in. 2012	Wartość opałowa: ♦ tworzywa sztuczne: 40–46 MJ/kg ♦ makulatura: około 11 MJ/kg ♦ zużyte drewno: około 18 MJ/kg ♦ odpady komunalne: 7–10 MJ/kg	
Kozera-Szałkowska 2013, cytowane w: Cichy i Sobczyk 2014	Wartość opałowa: ♦ papier: 16 MJ/kg ♦ tworzywa sztuczne: 45 MJ/kg ♦ drewno: 15 MJ/kg	
Piecuch i Dąbrowski 2014	Wartość opałowa: ♦ odpady papierowe i tektura: 12,4 MJ/kg; ♦ opakowania wielomateriałowe – kompozyty: 16,2 MJ/kg ♦ tworzywa sztuczne: 30,2 MJ/kg ♦ odpady spożywcze (organiczne): 10,6 MJ/kg ♦ odpady tekstylne: 12,8 MJ/kg ♦ drewno: 15,4 MJ/kg ♦ odpady komunalne regionu środkowopomorskiego: 10,8 MJ/kg	
Budzyń i Tora 2014 Właściwości energetyczne frakcji balastu	Wartość opałowa: ♦ makulatura: 13,687 MJ/kg ♦ tkaniny: 18,325 MJ/kg ♦ Tworzywa miękkie: 33,515 MJ/kg ♦ tworzywa twarde: 33,515 MJ/kg ♦ reszta >10 mm: 10,449 MJ/kg ♦ reszta <10 mm: 4,552 MJ/kg	Ciepło spalania: ♦ makulatura: 15,164 MJ/kg ♦ tkaniny: 20,081 MJ/kg ♦ tworzywa miękkie: 36,352 MJ/kg ♦ tworzywa twarde: 34,878 MJ/kg ♦ reszta >10 mm: 11,552 MJ/kg ♦ reszta <10 mm: 5,056 MJ/kg

TABELA 2. cd.

TABLE 2. cont.

Źródło danych	Frakcja odpadowa i wartość opałowa lub ciepło spalania w MJ/kg
Jaglarz i Generowicz 2015	<p>Wartość opałowa:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ przeciętna wartość opałowa odpadów w polskich aglomeracjach: > 9 MJ/kg ◆ przeciętna wartość opałowa odpadów w dużych miastach: 6–7 MJ/kg ◆ tworzywa sztuczne: 22–42 MJ/kg ◆ makulatura: 15–26 MJ/kg ◆ drewno: 18–20 MJ/kg ◆ tekstylia: ~16MJ/kg
Polska Norma PN-B-02852	<p>Ciepło spalania:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ papier: 16 MJ/kg ◆ tekstylia: 19 MJ/kg (bawełna: 17 MJ/kg; jedwab naturalny: 19 MJ/kg, jedwab sztuczny: 17 MJ/kg, len: 15 MJ/kg, wełna 21 MJ/kg) ◆ tworzywa sztuczne: 17–45 MJ/kg (celuloid: 17 MJ/kg; kauczuk: 45 MJ/kg, polichlorek – PCV wyroby plastyfikowane: 25 MJ/kg, polichlorek winylu: 21 MJ/kg, PE polietylen i wyroby: 42 MJ/kg, PP polipropylen: 43 MJ/kg, PS polistyren i wyrób: 42 MJ/kg, poliester: 31 MJ/kg, poliwęglany: 29 MJ/kg) ◆ drewno (zawartość wilgoci do 12%): 18 MJ/kg ◆ drewno (zawartość wilgoci powyżej 12%): 15 MJ/kg

TABELA 3. Uśrednione wielkości wartości opałowej dla wybranych frakcji morfologicznych odpadów komunalnych

TABLE 3. Average calorific values for selected morphological fractions of municipal waste

Frakcje morfologiczne odpadów komunalnych	Wartość opałowa [MJ/kg]	
	przedział wartości	wartość uśredniona
Papier i tektura	11,0–26,0	15,3
Tworzywa sztuczne	22,0–46,0	35,1
Odpady wielomateriałowe	16,2	16,2
Odpady kuchenne i ogrodowe	3,9	3,9
Frakcja <10 mm	4,5–5,3	4,9
Tekstylia	14,7–16,0	15,2
Drewno	11,0–20,0	16,3

Zestawione wartości na podstawie tabeli 2.

Piecuch i Dąbrowski 2014; Budzyń, Tora 2014; Jaglarz i Generowicz 2015) i przeprowadzonej szerokiej analizy można stwierdzić, że poszczególne frakcje morfologiczne odpadów komunalnych charakteryzują się zdecydowaną zmiennością wartości opałowej (tab. 2). Najwyższą wartością opałową charakteryzują się tworzywa sztuczne i jest ona porównywalna do wartości uzyskiwanych dla paliw kopalnych lub nawet wyższa (m.in. Cichy i Sobczyk 2014).

W tabeli 3 zestawiono przedziały wartości dla poszczególnych frakcji morfologicznych oraz ich wartości uśrednione. Poszczególne wartości pozyskano z materiałów źródłowych zgromadzonych w tabeli 2. Najwyższą wartością opałową na poziomie 22–46 MJ/kg odznaczają się tworzywa sztuczne. Kolejne frakcje morfologiczne odpadów komunalnych charakteryzują się wartością opałową nieco niższą ale też wysoką. Odpady papieru i tektury charakteryzują się wartością opałową na poziomie 11–26 MJ/kg, tekstylia 15–16 MJ/kg, drewno 11–20 MJ/kg, natomiast odpady wielomateriałowe na poziomie 16 MJ/kg. Wartość opałowa wymienionych powyżej odpadów zasadniczo przekracza 12 MJ/kg i spełnia minimalne wymagania stawiane odpadom, które mogą być stosowane jako paliwa. Uzyskane wielkości dla tworzyw sztucznych, papieru i tektury, tekstyliów, drewna oraz odpadów wielomateriałowych są porównywalne z wartościami opałowymi uzyskiwanymi dla szerokiego zakresu węgla kamiennych (m.in. Olkusiński 2012; Stala-Szlugaj 2011; Grudziński i Stala-Szlugaj 2016). Pozostałe analizowane frakcje odpadowe (tab. 2 i 3) charakteryzują się wartością opałową poniżej 6 MJ/kg i nie są materiałem interesującym dla procesu odzysku energii.

Biorąc pod uwagę wskaźniki wytwarzania odpadów komunalnych podawane w Kpgo 2022 (M.P. z 2016 r., poz. 784) oraz Kpgo 2014 (M.P. z 2010 r. Nr 101, poz. 1183) można określić masę odpadów o znaczeniu energetycznym (o wartości opałowej >12 MJ/kg) generowaną przez mieszkańca konkretnego obszaru. Kpgo 2014 podaje zróżnicowane wielkości wytwarzania ze względu na charakter obszaru. Dla dużego miasta wskaźnik wytwarzania odpadów komunalnych w 2008 r. wynosił 386 kg/mieszkańca/rok (kg/M/rok), dla małego miasta 346 kg/M/rok, natomiast dla obszaru wiejskiego 234 kg/M/rok. Biorąc pod uwagę te wartości masa potencjalnie generowanych odpadów frakcji energetycznych w strumieniu komunalnym wynosi dla dużego miasta 150 kg/M/rok, dla małego miasta 100 kg/M/rok, natomiast dla obszaru wiejskiego 52 kg/M/rok (tab. 4). Kpgo 2022 zakłada ujednoczenie wielkości wskaźnika wytwarzania odpadów komunalnych bez względu na charakter obszaru. Zakłada natomiast wzrost wskaźnika (tab. 1) w poszczególnych latach zgodnie z dwoma wariantami: hipotezą niską (roczny wzrost ilości wytwarzania odpadów komunalnych w przeliczeniu na 1 mieszkańca wynosił będzie 0,6%) i hipotezą wysoką (roczny wzrost wynosił będzie 1%). Przy założeniu wskaźników wytwarzania zgodnych z Kpgo 2022, masa wytwarzanych frakcji energetycznych w strumieniu odpadów komunalnych dla roku 2025, przy założeniu hipotezy wysokiej, kształtuje się na poziomie 122 kg/M/rok dla dużego miasta, 91 kg/M/rok dla małego miasta oraz 69 kg/M/rok dla obszaru wiejskiego. Prognozy dla roku 2030 wskazują, że nastąpi wzrost masy wytwarzanych frakcji energetycznych i w przypadku hipotezy wysokiej wynosić będzie około 129 kg/M/rok dla dużego miasta, 96 kg/M/rok dla małego miasta oraz 73 kg/M/rok dla obszaru wiejskiego (tab. 4).

TABELA 4. Szacowane wskaźniki wytwarzania frakcji energetycznych w odpadach komunalnych przez mieszkańców

TABLE 4. Estimated indicators for the generation of energy fractions in municipal waste by residents

Parametr	Duże miasto >50 000	Małe miasto <50 000	Obszar wiejski
Udział frakcji energetycznych (>12 MJ/kg) w strumieniu odpadów (papier i tektura, tworzywa sztuczne, odpady wielomateriałowe, tekstylia, drewno) [%]	39,0	29,0	22,2
Wskaźnik wytwarzania frakcji energetycznych wg Kpgo 2014 [kg/M/rok]	150,5	100,3	51,9
Wskaźnik wytwarzania frakcji energetycznych wg Kpgo 2022 [kg/M/rok] w 2025 r.	117,8–122,1	87,6–90,8	67,0–69,5
Wskaźnik wytwarzania frakcji energetycznych wg Kpgo 2022 [kg/M/rok] w 2030 r.	122,5–128,7	91,1–95,7	69,7–73,2

Podsumowanie i wnioski

Obowiązujący Krajowy plan gospodarki odpadami 2022 (M.P. z 2016 r., poz. 784) pozwala na zrównanie wskaźnika wytwarzania odpadów komunalnych na obszarach o różnym charakterze zabudowy na prognozowanym w roku 2025 poziomie 302–313 kg/M/rok, jednak udziały poszczególnych frakcji morfologicznych są odmienne. Na podstawie przeprowadzonej szerokiej analizy danych literaturowych można stwierdzić, że poszczególne frakcje morfologiczne odpadów komunalnych charakteryzują się zdecydowaną zmiennością wartości opałowej. Najwyższą wartością opałową charakteryzują się tworzywa sztuczne przekraczając nawet 40 MJ/kg.

W strumieniu wytwarzanych odpadów komunalnych, na obszarach szczególnie miejskich, frakcje energetyczne zajmują znaczący udział. Za takie frakcje pierwotnie uznano te, których wartość opałowa jest wyższa od 6 MJ/kg, ze względu na zakaz ich składowania. Wykazano, że odpady z tworzyw sztucznych, papieru i tektury, tekstyliów, drewna oraz wielomateriałowe można z powodzeniem uznać za frakcje energetyczne, gdyż ich wartość opałowa jest nawet wyższa od 12 MJ/kg, czyli wartości minimalnej stawianej paliwom. Największy udział frakcji energetycznych obserwowany jest w odpadach generowanych przez mieszkańców dużego miasta i wynosi 39%, nieco niższy w odpadach wytwarzanych przez mieszkańców małego miasta na poziomie 29%, a najniższy w odpadach generowanych przez mieszkańców obszarów wiejskich na poziomie 22%.

Najwyższe wskaźniki wytwarzania frakcji energetycznych przez 1 mieszkańca obszaru miejskiego wykazano w przypadku analizy w odniesieniu do wytwarzania odpadów komunalnych podawanych w Kpgo 2014, natomiast niższe na podstawie wartości wytwarzania podawanych w aktualnym planie gospodarki odpadami Kpgo 2022. W przypadku obszaru wiejskiego tendencja jest odwrotna, co wynika z przyjętej zmiany wielkości wytwarzania odpadów komunalnych ogółem na obszarach wiejskich, a podawanych w najnowszym dokumencie planistycznym.

Praca została wykonana w ramach prac statutowych Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk.

Literatura

- BUDZYŃ, S. i TORA, B. 2014. *Energetyczne i materiałowe wykorzystanie odpadów – wybrane technologie opracowane we współpracy Wydziału Energetyki i Paliw oraz Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie*. Wydawnictwo Naukowe Akapit, s. 9–24.
- CICHY, J. i SOBCZYK, W. 2014. Odpady z tworzyw sztucznych i ich recykling. *Edukacja–Technika–Informatyka* nr 1, s. 348–353.
- CYRANKA, M. i JURCZYK, M. 2016. Uwarunkowania energetyczne, ekonomiczne i prawne odzysku energii z odpadów komunalnych w ramach układów kogeneracji. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 19, z. 1, s. 99–116.
- DĄBROWSKI, J. i PIECUCH, T. 2011. Badania laboratoryjne nad możliwością współspalania wybranych grup odpadów tworzyw sztucznych wraz z osadami ściekowymi. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 14, z. 1, s. 213–236.
- DUCZKOWSKA-KĄDZIEL, A. i DUDA, J. 2014. Odpady komunalne i przemysłowe alternatywnymi surowcami i paliwami w procesie produkcji cementu. *Prace ICiMB* nr 18, s. 172–187.
- GRUDZIŃSKI, Z. i STALA-SZLUGAJ, K. 2016. Koszty środowiskowe a użytkowanie węgla kamiennego w obiektach o mocy do 50 MW. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)* t. 18, s. 579–596.
- JAGLARZ, G. i GENEROWICZ, A. 2015. Charakterystyki energetyczne odpadów komunalnych po procesach odzysku i recyklingu. *Ekonomia i środowisko* t. 2(53), s. 154–165.
- JENKINS, B.G. i MATHER, S.B. 1997. *Fuelling the demand for alternatives. The Cement Environmental Yearbook*, p. 90–97.
- JĘDRCZAK, A. 2010. *Analiza dotycząca ilości wytwarzanych oraz zagospodarowanych odpadów ulegających biodegradacji*. Zielona Góra.
- KŁOJZY-KARCZMARCZYK i in. 2015 – KŁOJZY-KARCZMARCZYK, B., MAKOUDI, S. i STASZCZAK, S. 2015. Szacowanie masy odpadów kierowanych do przetwarzania w części biologicznej instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania (MBP). *Rocznik Ochrony Środowiska (Annual Set The Environment Protection)* t. 17, s. 1162–1177.
- KOZERA-SZAŁKOWSKA, A. 2013. *Wartość do odzyskania „Cztery strony recyklingu – Tworzywa Sztuczne”*, nr 1, s. 348–353.
- KOZŁOWSKI, M. 1998. *Podstawy recyklingu tworzyw sztucznych*. Wrocław: Wyd. Politechniki Wrocławskiej.

- Kpgo 2014; Krajowy plan gospodarki odpadami 2014 (M.P z 2010, Nr 101, poz. 1183).
- Kpgo 2022; Krajowy plan gospodarki odpadami 2022 (M.P. z 2016, poz. 784).
- LORBER i in. 1999 – LORBER, K.E., NELLES, M., TESCH, H. i RAGOSSNIG, A. 1999. Energetische werwertung von abfall in verbrennungsanlagen. *Zeszyty naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej* nr 17, s. 57–83.
- Materiały SOCOTEC – Analiza wartości opałowej odpadów komunalnych. Studium Wykonalności dla Projektu: System zagospodarowania odpadów komunalnych w Olsztynie. Budowa Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów, Warszawa, sierpień 2008 r. Socotec Polska Sp. z o.o.
- MICHALAK R. i in. 2003. *Prawne i techniczne aspekty wytwarzania i stosowania paliw z odpadów przemysłowych* [W:] *Paliwa z odpadów*. Praca zbiorowa pod red. J.W. Wandrasza i J. Nadziakiewicz. Gliwice: Wyd. Helion, t. IV, s. 21–28.
- MODRZEJEWSKI, A. 2016. „Fracja energetyczna” pochodząca z odpadów komunalnych. *Przegląd Prawa Ochrony Środowiska* nr 1.
- MOKRZYCKI, E. i ULIASZ-BOCHEŃCZYK, A. 2002. Wykorzystanie paliw alternatywnych w przemyśle cementowym. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 5, z. 1, s. 53–69.
- MOKRZYCKI, E. i ULIASZ-BOCHEŃCZYK, A. 2005. Paliwa alternatywne z odpadów dla energetyki. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 8, s. 507–514.
- MOKRZYCKI, E. i ULIASZ-BOCHEŃCZYK, A. 2009. *Alternative fuels derived from waste for the cement industry*. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN, 128 s.
- MOKRZYCKI i in. 2003 – MOKRZYCKI, E., ULIASZ-BOCHEŃCZYK, A. i SARNA, M. 2003. Paliwa alternatywne z odpadów dla cementowni – doświadczenia Lafarge Cement Polska S.A. *Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej* nr 21, s. 309–316.
- OLKUSKI, T. 2012. Analiza produkcji węgla kamiennego i jego wykorzystanie w wytwarzaniu energii elektrycznej w Polsce. *Studia, Rozprawy Monografie* Nr 174. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN, 186 s.
- PIECUCH, T. i DĄBROWSKI, J. 2014. *Projekt koncepcyjno-technologiczny Zakładu Termicznego Przekształcania Odpadów Komunalnych dla Regionu Środkowopomorskiego*. Monografia nr 2. Koszalin: Wyd. Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Ochrony Środowiska, 136 s.
- Polska Norma PN-B-02852. Ochrona przeciwpożarowa budynków, Obliczanie gęstości obciążenia ogniowego oraz wyznaczanie względnego czasu trwania pożaru.
- ROSIK-DULEWSKA, C. 2009. Aktualny stan gospodarki odpadami w Polsce i perspektywa zmian [W:] *III Ogólnopolski Kongres Inżynierii Środowiska*, Lublin. s. 93–101.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 roku w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach (Dz.U. z 2015, poz. 1277).
- SOREK i in. 2012 – SOREK, A., BORECKI, M. i OSTROWSKA-POPIELSKA, P. 2012. Wybrane odpady tworzyw sztucznych jako źródła paliw alternatywnych w przemyśle metalurgicznym. *Prace IMŻ* 4, s. 47–57.
- STALA-SZLUGAJ, K. 2011. Spalanie węgla kamiennego w sektorze komunalno-bytowym – wpływ na wielkość „niskiej emisji”. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)* t. 13, s. 1877–1890.
- SZPADT, R. 2008. Wytyczne dotyczące wymagań dla procesów kompostowania, fermentacji i mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów (według stanu prawnego na dzień 15 grudnia 2008 r.), Ministerstwo Środowiska. [Online] Dostępne w: <http://www.mos.gov.pl> [Dostęp 1.04.2017].
- ULEWICZ, M. i MACIEJEWSKI, P. 2011. Ekologiczne korzyści ze spalania paliw alternatywnych. *Zeszyty Naukowe WSOWL* nr 2(160), s. 384–402.
- WALENDZIEWSKI i in. 2012 – WALENDZIEWSKI, J., KAŁUZYŃSKI, M. i SURMA, A. 2007. *Określenie potencjału odpadów i ich rodzaju do produkcji stałych paliw alternatywnych*. Sieć Naukowo-Gospodarcza „Energia”, projekt Z/2.02/II/2.6/06/05, Wrocław.
- WASILEWSKI, R. i TORA, B. 2009. Stałe paliwa wtórne. *Górnictwo i Geoinżynieria* rok 33, z. 4, s. 309–316.

Estimation of the mass of energy fractions in municipal waste produced in areas of different developmental character

Abstract

In accordance with the Ordinance of the Minister of Economy of 16 July 2015 on the acceptance of waste for storage in the landfills (Journal of Laws of 2015, item 1277), municipal waste fractions with a heat content higher than 6 MJ/kg cannot be stored on landfills other than hazardous and inert waste. It is therefore necessary to separate these fractions and direct them to another processing. Actions have been undertaken in this study to estimate the numerical indicators that would allow for the calculation and forecasting of the mass of municipal waste produced by residents and capable of constituting alternative fuels while reducing the amount of waste directed to landfills. A number of reference data on the calorific values and combustion heat values of individual morphological fractions was analyzed. The size of the generation of municipal waste by residents and the morphological composition of the waste are different for different areas. A stream of municipal waste produced and collected both selectively and as mixed waste was analyzed with division into large city (over 50 000 inhabitants), a small town (less than 50 000 inhabitants) and rural areas. Because of the ban on the storage of waste for which the combustion heat is higher than 6 MJ/kg, it is assumed that such fractions can be considered as energy-carrying, although the literature states that waste used as fuel should have a calorific value at least twice as high. The current National Waste Management Plan 2022 (Polish Monitor of 2016 item 784) allows for the equalization of the municipal waste generation ratio in areas of different developmental character at the level projected for 2025 of 302–313 kg/person/year (kg/M/year), although the shares of the different morphological fractions differ. Based on the extensive literature data analysis, it can be stated that individual morphological fractions of municipal waste are characterized by a marked variation in calorific value. The highest heating value at the level of 22–46 MJ/kg is characteristic for plastics. The calorific value of plastics waste is high, comparable to fossil fuels. Other morphological fractions are characterized by lower, but also relatively high heating value: paper and board 11–26 MJ/kg, textiles 15–16 MJ/kg, wood 11–20 MJ/kg and multi-material waste 16 MJ/kg. The calorific value of the above-mentioned waste exceeds generally 12 MJ/kg and meets the minimum requirements for waste that can be used as fuel. The remaining analyzed waste fractions are characterized by a calorific value of less than 6 MJ/kg. In the stream of municipal waste produced in particular areas, the energy fractions have a significant share. At the equalized generation ratio, the largest share of energy fractions (over 6 MJ/kg and even 12 MJ/kg) is recorded in the waste generated by the inhabitants of a large city and is 39%, slightly lower in the waste generated by the inhabitants of the small town at 29% and the lowest in waste generated by rural residents at the level of 22%. The estimated rate of generation of energy fractions in the municipal waste stream varies from 122 kg/M/year for the large city area to 67 kg/M/year for the rural area.

KEYWORDS: municipal waste, energy fractions, calorific value, generation ratio