

Weronika KRUSZELNICKA, Patrycja BAŁDOWSKA, Józef FLIZIKOWSKI,
Andrzej TOMPOROWSKI, Robert KASNER

e-mail: weronika.kruszelnicka@gmail.com

Zakład Systemów Technicznych, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

Bilans energetyczny procesu spalania użytkowych tworzyw polimerowych

Wstęp

Efektywne wykorzystanie potencjału energetycznego materiałów energetycznych pozwoli na zachowanie stanu równowagi pomiędzy środowiskiem naturalnym, społeczeństwem, a oceną ekonomiczną. Tworzywa polimerowe stanowią podstawowy surowiec w branży opakowań i materiałów konstrukcyjnych. Odpady z tworzyw sztucznych stanowią około 14% masy odpadów komunalnych.

W tab. 1 przedstawiono udział tworzyw sztucznych w odpadach komunalnych wraz z ich wartością energetyczną i zawartością popiołu [Hryb, 2008; Wasilewski i Siudyga, 2013].

Tab. 1. Właściwości odpadów z tworzyw sztucznych w odpadach komunalnych [Wasilewski i Siudyga, 2013]

Tworzywo	Średni skład morfologiczny [% wag.]	Zawartość popiołu [% s.m.]	Wartość opałowa [MJ/kg]
PE	25	2,39	41,80
PP	15	2,93	30,90
PVC	40	7,94	13,69
PA	5	3,36	36,76
PS	5	1,38	38,97
PET	10	2,15	21,81

Część tworzyw polimerowych można przetworzyć i ponownie wykorzystać. Materiały polimerowe, które nie mogą zostać ponownie przetworzone mogą stanowić cenny surowiec energetyczny z uwagi na wysoką wartość opałową często powyżej 40 MJ/kg, podczas gdy wartość opałowa węgla wynosi 28 MJ/kg [Hryb, 2008; Wasilewski i Siudyga, 2013]. Głównym sposobem odzysku tworzyw polimerowych jest recykling materiałowy oraz odzysk energii.

Recykling energetyczny polega na pozyskaniu energii zawartej w strukturze polimerów najczęściej w procesie spalania. Odzyskana energia użyteczna może występować w postaci energii elektrycznej, ciepłej, stałych paliw wtórnych do współspalania wraz z węglem w piecach cementowych [Hopewell i in., 2009; Piasecka i in. 2016; Cichy i Sobczyk, 2017].

Praca miała na celu analizę i ocenę możliwości wykorzystania na cele energetyczne (spalenie) użytkowego polipropylenu w oparciu o uniwersalny wskaźnik oceny efektywności energetycznej.

Analiza i ocena energetyczna

Określenie efektywności energetycznej wykorzystania tworzyw polimerowych, na cele energetyczne możliwe będzie poprzez rozpoznanie korzyści i nakładów energetycznych na wykorzystanie tego surowca oraz opracowanie modelu matematycznego integrującego korzyści i nakłady.

W zbilansowanej analizie energetycznej uwzględniono następujące etapy cyklu życia analizowanego paliwa energetycznego: proces wytwarzania produktu, procesy transportu wyrobów użytkowych do miejsca przetworzenia, proces rozdrabniania do frakcji wielkości rzędu 3,5÷5 mm, proces wykorzystania surowca w elektrowni, zagospodarowanie odpadów stałych, w tym popiołu na składowisku. Analiza obejmowała zebranie danych i wyznaczenie wskaźników efektywności energetycznej oraz ocenę nakładów energetycznych na rozdrabnianie.

Korzyści energetyczne $U_p(m)$ zdefiniowano jako ilość energii pochodzącej ze spalania substancji w postaci ciepła spalania Q_{cp} .

Nakłady energetyczne $N_p(m)$ stanowią natomiast nakłady w pro-

cesie wytwarzania, przygotowania nośnika energii (transportu i rozdrabniania), wykorzystania nośnika (spalania) oraz zagospodarowania odpadów po spalaniu.

Wskaźnik efektywności wykorzystania wyrobów z polipropylenu na cele energetyczne zaproponowano w postaci zależności:

$$E_p(m) = \frac{U_p(m)}{N_p(m)} = \frac{Q_{cp} \cdot m}{(N_{pwj} + N_{ptj} + N_{prj} + N_{psj} + N_{pzj}) \cdot m} = \frac{Q_{cp}}{N_{pwj} + N_{ptj} + N_{prj} + N_{psj} + N_{pzj}} \quad (1)$$

gdzie:

Q_{cp} – ciepło spalania polipropylenu [MJ/kg],

m – masa nośnika energii [kg],

N_{pwj} – energetyczne nakłady jednostk. na wytworzenie wyrobu, [MJ/kg]

N_{ptj} – energetyczne nakłady jednostkowe na transport, [MJ/kg]

N_{prj} – energetyczne nakłady jednostkowe na rozdrabnianie, [MJ/kg]

N_{psj} – energetyczne nakłady jednostk. na spalanie nośnika energii, [MJ/kg]

N_{pzj} – energetyczne nakłady jednostkowe na zagospodarowanie odpadów, [MJ/kg].

Etapy postępowania badawczego:

- I – opracowanie modelu matematycznego umożliwiającego porównanie materiałów pod względem energetycznym,
- II – zebranie danych potrzebnych do wyznaczenia wskaźnika dla analizowanego materiału,
- III – wyznaczenie wskaźnika efektywności energetycznej wykorzystania polipropylenu na cele energetyczne,
- IV – analiza i ocena nakładów energetycznych na rozdrabnianie,
- V – sformułowanie wniosków i sprostowań oraz wskazówek i wytycznych do dalszych badań i analiz.

Założenia. Aby można było poprawnie rozpoznać zmienne zaproponowanych modeli oceny koniecznym było przyjęcie stałych, niezmiennych wartości modeli, parametrów procesu, warunków eksperymentu. Założono, że:

- energią użyteczną jest energia spalania nośnika energii w postaci ciepła spalania Q_s ,
- energia konieczna do pozyskania energii użytecznej z nośnika energii obejmuje energię na etapie wytworzenia nośnika energii, przygotowania, wykorzystania i zagospodarowania odpadów,
- spalana jest masa substancji $m = 3872198$ kg
- nośnik spalany jest w elektrowni o parametrach zawartych w tab. 2, przy założeniu stałego zużycia surowca,
- jednostkowa wartość energii koniecznej do wykorzystania nośnika energii jest stała i wynosi 5,39 MJ/kg,
- procesy przygotowania obejmują transport i rozdrabnianie,
- transport odbywa się tym samym środkiem transportu i na taką samą odległość, jednostkowe nakłady na transport wynoszą: 99,77 MJ/m³ przewożonego materiału,
- nakłady energetyczne na zagospodarowanie odpadów obejmują wywóz odpadów, wywóz odpadów pochłanianą następującą ilość oleju napędowego: 0,0012¹ l/kg odpadów.

Powyższe wartości zostały wyznaczone na podstawie studium przypadku i analizy LCA elektrowni przedstawionej w pracy Spath i in. [1999].

Tab. 2. Parametry elektrowni przyjętej jako odniesienie do analizy [Spath i in. 1999]

Parametr	Wartość
Moc, [MW]	360
Współczynnik wykorzystania mocy, [%]	60
Ładowność, [kg/dzień]	3872192
Sprawność elektrowni, [%]	32

Wyniki obliczeń

Wskaźnik efektywności energetycznej wyznaczono dla rozdrobnionych, użytkowych odpadów z polipropylenu otrzymanych w procesie polimeryzacji. Korzyści energetyczne $U_p(m)$ przedstawiające wartość 180 057 207 MJ [Dąbrowski, 2009] dotyczyły wykorzystania rozdrobnionych, zidentyfikowanych frakcji polipropylenu o ciepłe spalania Q_{cp} na poziomie 46,5 MJ/kg.

Szacunkowy nakład na transport surowca do elektrowni obliczono przyjmując $I_E = 99,7 \text{ MJ/m}^3$ oraz $I_m = 900 \text{ kg/m}^3$

$$N_{pij} = \frac{I_E}{I_m} = \frac{99,7}{900} = 0,1108 \quad (2)$$

gdzie:

I_E – indeks nakładów energ. na wytworzenie 1 MJ energii, [MJ/MJ]

I_m – indeks masy nośnika użytego do wytworzenia 1 MJ energii, [kg/MJ]

Nakłady na rozdrabnianie surowca przeanalizowano dla rozdrabniania wyprasek polipropylenowych młynem nożowym z zastosowaniem sita o oczkach 9 mm oraz prędkością obwodową noży 3 m/s. Jako produkt finalny otrzymano frakcje polipropylenu o średnich wymiarach w zakresie 3,5÷5 mm. Jako jednostkowe nakłady energetyczne na rozdrabnianie N_{pij} przyjęto jednostkowe zużycie energii podczas rozdrabniania wyprasek polipropylenu, które wynoszą 34 kJ/kg [Sykutera, 2013].

Dla analizowanego przypadku pozostałości po spalaniu, poszczególnych frakcji polipropylenu wynosiły 0,049 kg popiołu na kilogram spalonego wsadu, który należy zagospodarować [Czop i Baszczyk, 2015].

Energia wykorzystana do zagospodarowania odpadów obejmuje transport na składowisko, przy założeniu zużycia oleju napędowego na poziomie 0,0012 l na kg odpadów. Przyjęto wartość energetyczną ON równą 36 MJ/l [Rozporządzenie Prezesa RM, 2011]. Po przeliczeniu zużycia paliwa dało to 0,0432 MJ/kg odpadów. Energetyczne jednostkowe nakłady na zagospodarowanie odpadów po spalaniu poszczególnych frakcji polipropylenu są równe:

$$N_{B-j} = 0,049 \cdot 0,0432 = 0,0021168 \text{ [MJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3)$$

Na podstawie analizy nakładów energetycznych wyznaczono jednostkowe nakłady energetyczne dla przyjętej frakcji polipropylenu, niezbędne do wyznaczenia wartości wskaźnika efektywności wykorzystania na cele energetyczne. W tab. 3 zestawiono wartości nakładów jednostkowych z uwzględnieniem nakładów na rozdrabnianie. Nakłady na rozdrabnianie stanowią 0,04% wszystkich nakładów.

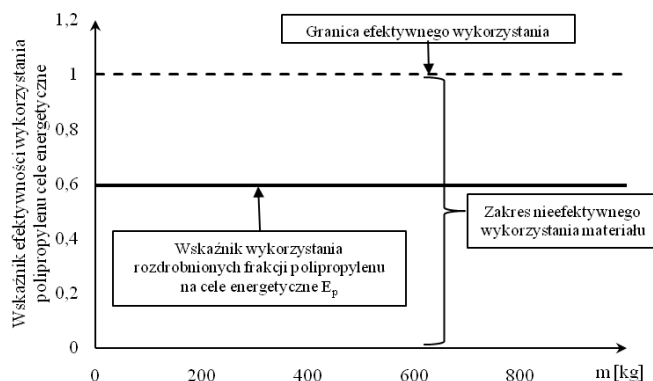
Tab. 3. Jednostkowe nakłady energetyczne dla frakcji polipropylenu

Jednostkowe nakłady energetyczne, [MJ/KG]				
Procesy wytwarzania	Procesy przygotowania		Procesy wykorzystania	Zagospodarowanie odpadów
Wytworzenie N_{pwj}	Transport N_{pij}	Rozdrabnianie N_{prj}	Spalanie w elektrowni N_{psj}	Składowanie N_{psj}
73,0000	0,1108	0,0340	5,2109	0,00212

Na podstawie powyższych danych wyznaczono wskaźnik efektywności energetycznej wykorzystania rozdrobnionego polipropylenu na cele energetyczne:

$$E_p = \frac{Q_{cp}}{N_{pwj} + N_{pij} + N_{prj} + N_{psj} + N_{psj}} = \frac{46,5}{73,0000 + 0,1108 + 0,0340 + 5,2109 + 0,00212} = 0,593 \quad (4)$$

Wartość wskaźnika jest mniejsza od 1, co świadczy o nieefektywnym wykorzystaniu frakcji polipropylenu (Rys. 1).



Rys. 1. Interpretacja graficzna wskaźnika efektywności wykorzystania frakcji polipropylenu na cele energetyczne

Wnioski

Przedstawiony wskaźnik efektywności energetycznej wykorzystania materiałów na cele energetyczne umożliwia ocenę energetyczną wykorzystania materiałów. Wartość wskaźnika efektywności zależy od nakładów energetycznych, które uzależnione są od stosowanej technologii wytwarzania, przetwarzania, wykorzystania i zagospodarowania odpadów. Wraz ze wzrostem korzyści energetycznych rośnie wartość wskaźnika efektywności energetycznej wykorzystania materiału.

Nakłady energetyczne poniesione na procesy przygotowawcze w tym na rozdrobnienie, transport, itp. przewyższają korzyści energetyczne uzyskane w procesie użytkowego spalania rozpatrywanego tworzywa. Warto jednak zwrócić uwagę na fakt, że przeprowadzony proces analityczno-badawczy dotyczył wyrobów użytkowych.

Z punktu widzenia bilansu obejmującego cały cykl życia wyrobu polipropylenowego kierując jego użytkowe odpady do spalania odzyskuje się prawie 60% całkowitej energii potrzebnej do wytworzenia i użytkowego przygotowania (w tym rozdrabniania) wyrobów. Mimo otrzymanej wartości wskaźnika efektywności wykorzystania na cele energetyczne analizowany proces energetycznego zagospodarowania użytkowych odpadów polipropylenowych jest zjawiskiem korzystnym.

LITERATURA

- Cichy, J., Sobczyk, W., (2014). Odpady z tworzyw sztucznych i ich recykling. *Edukacja-Technika-Informatyka*, 5(1), 348-353
- Czop, M., Błaszczyk, E. (2015). Określenie właściwości paliwowych wybranych odpadów opakowaniowych z sektora komunalnego. *Arch. Gosp. Odpad. Ochr. Środ.*, 17(2), 131-138
- Dąbrowski, A. (2009). *Podstawy techniki w przemyśle spożywczym*. WSiP, Warszawa
- Hopewell, J., Dvorak, R., Kosior, R. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 364(1526), 2115-2126. DOI: 10.1098/rstb.2008.0311
- Hryb, W. (2008). Polietylen odpadowy - Problematyczny odpad czy cenny surowiec energetyczny. *Arch. Gosp. Odpad. Ochr. Środ.*, 10, 55-64
- Piasecka, I., Kruszelnicka, W., Kasner, R. (2016). *Możliwości zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów i elementów instalacji energetyki wiatrowej* [w:] Mroziński R.A. (red.), IX Eko-Euro-Energia-Inżynieria Odnawialnych Źródeł Energii, GrafPol, Bydgoszcz, 79-99
- Rozporządzenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 10.05.2011 r. w sprawie innych niż cena obowiązkowych kryteriów oceny ofert w odniesieniu do niektórych rodzajów zamówień publicznych. Dz. U. z 2011 r. nr 96, poz. 559
- Spath, P. L., Mann, M., Kerr, D. R. (1999). *Life Cycle Assessment of coal-fired power production*. No. NREL/TP-570-25119. National Renewable Energy Lab., Golden, CO, USA
- Sykutera, D. (2013). *Badania procesów cięcia i podatności na rozdrabnianie poliolefin porowatych w aspekcie ich wtórnego przetwórstwa*. Wyd. UTP, Bydgoszcz
- Wasilewski, R., Siudyga, T. (2013). Odzysk energetyczny odpadowych tworzyw sztucznych. *Chemik*, 67(5), 435-445