

Weronika KRUSZELNICKA, Patrycja BAŁDOWSKA, Andrzej TOMPOROWSKI,  
Izabela PIASECKA, Adam MROZIŃSKI

e-mail: weronika.kruszelnicka@gmail.com

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

## Analiza korzyści energetycznych rozdrabniania nośników energii

### Wstęp

Wykorzystanie materiałów energetycznych takich jak biomasa i tworzywa sztuczne w procesach spalania i współspalania należy do przedsięwzięć proekologicznych, w których zastosowanie znajdują zintegrowane wskaźniki oceny [Wasilewski i in. 2015; Kruszelnicka i in. 2017; Toklu, 2017; Suzuki i in. 2017]. Do najczęściej wykorzystywanych wskaźników oceny zalicza się wskaźniki efektywności ekonomicznej, ekologicznej i energetycznej omawiane w literaturze [Snyder i Kaiser, 2009; Roszkowski, 2013; Zuwała i in. 2015; Dzi-kuć i Piwowar, 2016]. Efektywność jest definiowana jako miara efektu (skuteczność, sprawność) wykorzystania nakładów w stosunku do uzyskanych korzyści [Kasner, 2016].

Celem pracy jest identyfikacja i analiza korzyści oraz nakładów rozdrabnianych materiałów: węgla, zrębków drzewnych oraz polipropylenu na podstawie autorskiego wskaźnika efektywności energetycznej.

### Metodyka oceny energetycznej

W celu oceny porównawczej materiałów energetycznych zaproponowano wskaźnik efektywności energetycznej. Został on przedstawiony w pracy [Kruszelnicka i in. 2017]. Jako korzyści płynące z wykorzystania materiałów energetycznych przyjęto energię uzyskaną w procesie spalania, natomiast jako nakłady – energię na wytworzenie, transport, rozdrobnienie, spalanie nośnika energii oraz zagospodarowanie odpadów po spalaniu.

Dla analizowanych materiałów takich jak: węgiel, zrębki drzewne i odpady z polipropylenu wskaźnik efektywności przyjmuje postać:

$$E(m) = \frac{Q_c m}{N_{wj} m + N_{ij} m + N_{rj} m + N_{sj} m + N_{cj} m} \quad (1)$$

$m$  – masa nośnika energii, [kg]

$N_{wj}$  – jednostkowe nakłady energii na wytworzenie, [MJ/kg]

$N_{ij}$  – jednostkowe nakłady energii na transport, [MJ/kg]

$N_{rj}$  – jednostkowe nakłady energii na rozdrabnianie, [MJ/kg]

$N_{sj}$  – jednostkowe nakłady energii na spalanie surowca, [MJ/kg]

$N_{cj}$  – jednostkowe nakłady energii na składowanie odpadów, [MJ/kg]

$Q_c$  – ciepło spalania nośnika energii, [MJ/kg].

Do przeliczania jednostkowych nakładów energetycznych  $N_{ij}$  wykorzystano zależność:

$$N_{ij} = \frac{I_E}{I_m} \quad (2)$$

gdzie:

$I_E$  – indeks nakładów energii na uzyskanie 1 kWh energii, [MJ/kWh]

$I_m$  – indeks masy nośnika do wytworzenia 1 kWh energii, [kg/kWh]

$N_{ij}$  – jednostkowy nakład energetyczny, [MJ/kg].

Założono, że materiały o takiej samej masie  $m = 3872192$  kg/dzień będą spalane w elektrowni. Energię wykorzystaną podczas transportu na składowisko wyznaczano przy założeniu zużycia oleju napędowego (ON) na poziomie 0,0012 l na kg odpadów. Przyjęto wartość energetyczną ON jako równą 36 MJ/l [Rozp. Prezesa RM, 2011].

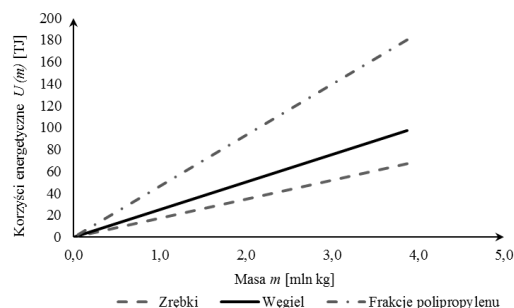
### Wyniki analizy

Analizie porównawczej poddano trzy materiały energetyczne: węgiel, zrębki drzewne oraz tworzywa polipropylenowe. Porównania dokonano na podstawie korzyści i nakładów energetycznych oraz wartości wskaźnika efektywności. Jednostkowe korzyści energetyczne dla każdego z materiałów przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Korzyści energetyczne wykorzystania frakcji badanych materiałów [Chen, 2009; Soltiński i Gawlik, 2012; Kruszelnicka i in., 2017]

Korzyści energetyczne spalania materiałów rozdrobnionych		
Materiał	$U(m)=Q_c \cdot m$ [MJ]	$Q_c$ [MJ/kg]
Węgiel	97 269 613,76	25,12
Zrębki	66 989 025,40	17,3
Odpady polipropylenowe	180 057 207,00	46,5

Całkowite największe korzyści  $U(m)$  ze spalania masy  $m = 3 872 198$  kg odnotowano dla rozdrobnionych wyrobów z polipropylenu (180 057 207,00 MJ), prawie dwukrotnie większe niż w przypadku węgla, a prawie trzykrotnie większe niż w przypadku zrębków drzewnych. Porównawczą interpretację graficzną zmian wartości korzyści całkowitych  $U(m)$  od masy  $m$  dla analizowanych materiałów przedstawiono na rys. 1. Przebiegi korzyści energetycznych w funkcji masy mają charakter liniowy, gdzie współczynnikiem kierunkowym  $a$  każdej prostej jest wartość ciepła spalania  $Q_c$ .



Rys. 1. Interpretacja graficzna korzyści energetycznych spalania analizowanych materiałów w zależności od masy spalanego nośnika

W tab. 2 przedstawiono nakłady energetyczne wyznaczone za pomocą metody LCA podczas spalania węgla kamiennego w elektrowni [Spath i in., 1999].

Tab. 2. Zapotrzebowanie energetyczne spalania węgla w elektrowni [Spath i in. 1999]

Zużycie całkowite [MJ·kWh <sup>-1</sup> ]	Wydobycie węgla [% zużycia całk.]	Transport [% zużycia całk.]	Produkcja energii [% zużycia całk.]
12,5747	1,43	1,85	96,72

Jako jednostkowe nakłady energetyczne na rozdrabnianie  $N_{rj}$  przyjęto jednostkowe zużycie energii podczas rozdrabniania węgla kamiennego za pomocą młyna kulowego równe 19 kWh/t [Drying and grinding of coal, 2011].

Po spalaniu węgla pozostałością jest popiół oraz odpady stałe, które należy zutilizować w ilości: 25 693 kg popiołu na 1 GWh energii wyprodukowanej, 64 722 kg odpadów stałych na 1 GWh energii wyprodukowanej.

Energia potrzebna do zagospodarowania odpadów obejmuje transport, gdzie po przeliczeniu zużycia paliwa zgodnie z założeniami daje to 0,0432 MJ/kg odpadów.

Dla nakładów jednostkowych przyjęto przelicznik dla węgla: uzyskanie 1 kWh wymaga spalania 2,33 kg węgla,  $I_m = 2,33$  kg/kWh. Odnosząc ten przelicznik do wyników analizy LCA, której wyniki podano w MJ/kWh, otrzymano nakłady jednostkowe na 1 kg materiału

Tab. 3. Jednostkowe nakłady energii wyznaczone dla rozpatrywanych materiałów

Jednostkowe nakłady energetyczne [MJ/KG]			
Materiał	Wytworzenie $N_{wj}$	Transport $N_{tj}$	Rozdrabnianie $N_{rj}$
Węgiel	0,0770	0,0996	0,0680
Zrębki	2,2848	0,2493	Cięcie: 2,1972 Rozdrabnianie: 0,2353 Razem: 2,4326
Odpady z polipropylenu	73,0000	0,1108	0,0340

Jednostkowe nakłady energetyczne [MJ/KG]		
Materiał	Spalanie $N_{sj}$	Składowanie $N_{sj}$
Węgiel	5,2109	0,0017
Zrębki	5,2109	0,0013
Odpady z polipropylenu	5,2109	0,00212

obliczone wg wzoru (2) wynoszące 0,017 MJ/kg. Nakłady na transport surowca do elektrowni obliczono na podstawie zależności (2), przyjmując  $I_E = 99,7 \text{ MJ/m}^3$  oraz  $I_m = 1000 \text{ kg/m}^3$  (Tab. 3).

Dla zrębków drzewnych nakłady energetyczne opisane na podstawie analizy LCA stanowią sumę energii zużytej w trakcie 8 etapów uprawy drzew: przygotowania sadzonek, przygotowania gruntu pod uprawę, sadzenia, pielęgnacji, przerywki, nawożenia, wycinki i załadunku [Chen, 2009]. W procesie wytwarzania zrębków wykorzystuje się energię elektryczną, olej napędowy, benzynę oraz naftę.

Przelicznik nakładów jednostkowych dla zrębków drzewnych: 1000 MJ energii wymaga spalania 57,8 kg zrębków,  $I_m = 0,0578 \text{ kg/MJ}$ . W tab. 4. przedstawiono składowe nakładów energetycznych na wytworzenie drewna do produkcji zrębków.

Tab. 4. Składowe nakładów energetycznych na pozyskanie drewna i cięcie bali na zrębki. [Chen, 2009]

Proces	Indeks nakładów $I_E$	Indeks masy $I_m$	Nakład jednostkowy $N_{Bwj}$
Pozyskanie drewna	0,13206	0,2312	2,284775
Cięcie bali	0,127	0,2312	2,197232

Nakłady jednostkowe na rozdrabnianie i transport surowca obliczono ze wzoru (2), przyjmując  $I_E = 99,7 \text{ MJ/m}^3$  oraz  $I_m = 400 \text{ kg/m}^3$ . Indeks nakładów  $I_E$  zaczerpnięto z pracy [Chen, 2009]. Nakłady jednostkowe na rozdrabnianie właściwe wynoszące 0,2353 MJ/kg (dla młyna bijakowego firmy POR ECOMEC model C120) przyjęto za [Frączek i in., 2010].

Po spalaniu zrębków pozostałością jest popiół, który należy zagospodarować. Pozostałości po spalaniu zrębków wynoszą 0,031 kg popiołu/kg zrębków. Zużycie paliwa zgodnie z założeniami daje 0,0432 MJ/kg odpadów. Energetyczne jednostkowe nakłady na zagospodarowanie odpadów po spalaniu zrębków wynoszą:

$$N_{Bsj} = 0,031 \cdot 0,0432 = 0,0013392 \text{ [MJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3)$$

Analiza korzyści i nakładów dla polipropylenu została omówiona w pracy [Kruszelnicka i in., 2017].

Największe jednostkowe nakłady energetyczne w procesie wytwarzania wystąpiły w przypadku polipropylenu (73MJ/kg), najniższe zaś dla węgla (0,0770 MJ/kg) (Tab. 3).

Procesy transportu okazały się najbardziej energochłonne w przypadku zrębków (0,2493 MJ/kg), co związane jest z ich niewielką gęstością nasypową. Aby przewieźć 25 ton zrębków wymagana jest większa objętość transportowa niż w przypadku węgla, tj. 25 ton węgla można przetransportować na 1 samochodzie ciężarowym z naczepą o ładowności 25 ton, natomiast transport zrębków wymaga użycia aż 3 samochodów. Najmniej energii na przewiezienie surowców odnotowano dla węgla – 0,0996 MJ/kg (Tab. 3).

W przypadku energetycznych nakładów jednostkowych na rozdrabnianie najwyższe okazały się nakłady dla zrębków drzewnych (2,4326 MJ/kg), najniższe dla polipropylenu (0,0340 MJ/kg) (Tab. 3). Energetyczne nakłady jednostkowe na spalanie przyjęto

takie same dla wszystkich analizowanych materiałów. Najwyższe energetyczne nakłady jednostkowe na zagospodarowanie popiołu i odpadów stałych po spalaniu wystąpiły dla polipropylenu 0,00212 MJ/kg, a najniższe dla zrębków – 0,0013 MJ/kg (Tab. 3).

Najwyższą wartość wskaźnika efektywności energetycznego wykorzystania odnotowano dla węgla – 4,603, a najniższą dla polipropylenu – 0,593. Wartość wskaźnika efektywności dla zrębków zawierała się w przedziale od 1,700 do 1,731 w zależności od wymiaru zrębków.

## Wnioski

Przeprowadzone badania i otrzymane wyniki wykazały, że najlepszym materiałem pod względem energetycznym jest węgiel z uwagi na najkorzystniejszy stosunek korzyści do nakładów. Dla zrębków wartość wskaźnika efektywności energetycznej wykorzystania także jest korzystna, znajduje się w obszarze efektywnego wykorzystania materiałów ( $E(m) > 1$ ), jest jednak mniejsza niż dla węgla. Pomimo, że najwięcej energii można pozyskać z rozdrobnionych odpadów polipropylenowych, wartość wskaźnika efektywności wykorzystania dla tego materiału okazała się najniższa, co wynika z dużych nakładów na jego przetworzenie.

Wskaźnikowe podejście do oceny materiałów umożliwia realne odzwierciedlenie bilansu energetycznego materiałów i stwierdzenie, które procesy wytwarzania i przetwarzania surowca są najbardziej energochłonne i jak zmiany parametrów tych procesów wpływają na wartość bilansu całkowitego.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że zwiększanie nakładów energii na pozyskanie i przetwarzanie surowców obniża ich efektywność energetyczną, wpływając negatywnie na całkowity bilans energetyczny. W celu poprawy wartości wskaźników efektywności energetycznej należałoby obniżyć nakłady np. poprzez projektowanie procesów wytwórczych i przetwórczych o możliwie niskiej energochłonności.

## LITERATURA

- Chen, S., (2009). *Life Cycle Assessment of wood pellet*. Master Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden
- Drying and grinding of coal (2011). (05.2017) <https://pl.scribd.com/doc/56656371/Coal-Drying-and-Grinding>
- Dziuk M., Piwowar A., (2016). Ecological and economic aspects of electric energy production using the biomass co-firing method: The case of Poland. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 55, 856–862
- Frączek, J., Mudryk, K., Wróbel, M., (2010). Nakłady energetyczne w procesie mielenia zrębków wierzby salix viminalis L. *Inż. Rohn.* 122(4), 43-49
- Kasner R., (2016). *Ocena korzyści i nakładów cyklu życia elektrowni wiatrowej*. Praca doktorska, Pol. Poznańska, Poznań
- Kruszelnicka W., Baldowska-Witos P., Flizikowski J., Tomporowski A., Kasner R., (2017). Bilans energetyczny procesu spalania użytkowych tworzyw polimerowych. *Inż. Ap. Chem.*, 56(6), 364-369
- Roszkowski A., (2013): Energia z biomasy - efektywność, sprawność i przydatność energetyczna. *Cz. 1. Probl. Inż. Rohn.*, 79(1), 97-124
- Snyder B., Kaiser M. J., (2009): Ecological and economic cost-benefit analysis of offshore wind energy. *Renewable energy.* 34 (6), 1567-1578.
- Soliński, J., Gawlik, L. (2012). Rys historyczny, rozwój i stan obecny światowego i polskiego sektora energii. *Energetyka*, nr 3-4, str. 142-149
- 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. 2011, 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
- Suzuki K., Tsuji N., Shirai Y., Hassan M.A., Osaki M., (2017). Evaluation of biomass energy potential towards achieving sustainability in biomass energy utilization in Sabah, Malaysia. *Biomass Bioenergy.* 97, 149–154
- Toklu E., (2017). Biomass energy potential and utilization in Turkey, *Renew. Energy.* 107, 235-244
- Wasilewski R., Stelmach S., Piotrowski O., (2015). Analiza porównawcza węgla i odpadów dla produkcji ciepła i/lub energii elektrycznej. *Arch. Gosp. Ochr. Środ.*, 17(3), 115-122
- Zuwała J., Kopczyński M., Robak J. (2014). Ocena efektywności techniczno-ekonomicznej sprzężonego układu toryfikacja-peletyzacja-współspalanie biomasy. *Polityka energetyczna*, 17 (4), 147-158