

dr inż. Agnieszka Bala-Litwiniak

E-mail: a.bala-litwiniak@pcz.pl; nr ORCID: 0000-0003-2859-849X

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów,
Katedra Zarządzania Produkcją

Możliwości zagospodarowania wybranych rodzajów biomasy do celów energetycznych

Possibilities of using selected types of biomass for energy purposes

W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania czterech rodzajów biomasy jako paliwa w domowym kotle grzewczym. Analizie poddano trociny sosnowe, świerkowe, łuskę słonecznika i słomę kukurydzianą. Materiały poddano procesowi pelletyzacji. Określono ich wybrane właściwości fizykochemiczne i skład elementarny. Dokonano również analizy ekonomicznej dla uzyskanych pelletów. Wykazano, że analizowane rodzaje biomasy — ze względu na konkurencyjną cenę, wysoką kaloryczność i skład elementarny — mogą być z powodzeniem stosowane jako paliwo w domowych kotłach grzewczych.

Słowa kluczowe:

biomasa, pellet, domowy kocioł grzewczy, paliwo odnawialne

In this study a possibility of using four types of biomass as a fuel in a domestic heating boiler has been investigated. Pine and spruce sawdust, sunflower husk and corn straw were analyzed. Analyzed materials were pelletized. Selected physicochemical properties as well as the elemental composition of the obtained pellets was determined. An economic analysis was also carried out. The experimental results show that the analyzed types of biomass, due to their competitive price, high calorific value and appropriate elemental composition, can be successfully used as fuel in domestic heating boilers.

Key words:

biomass, pellet, domestic boiler, renewable fuel

Wprowadzenie

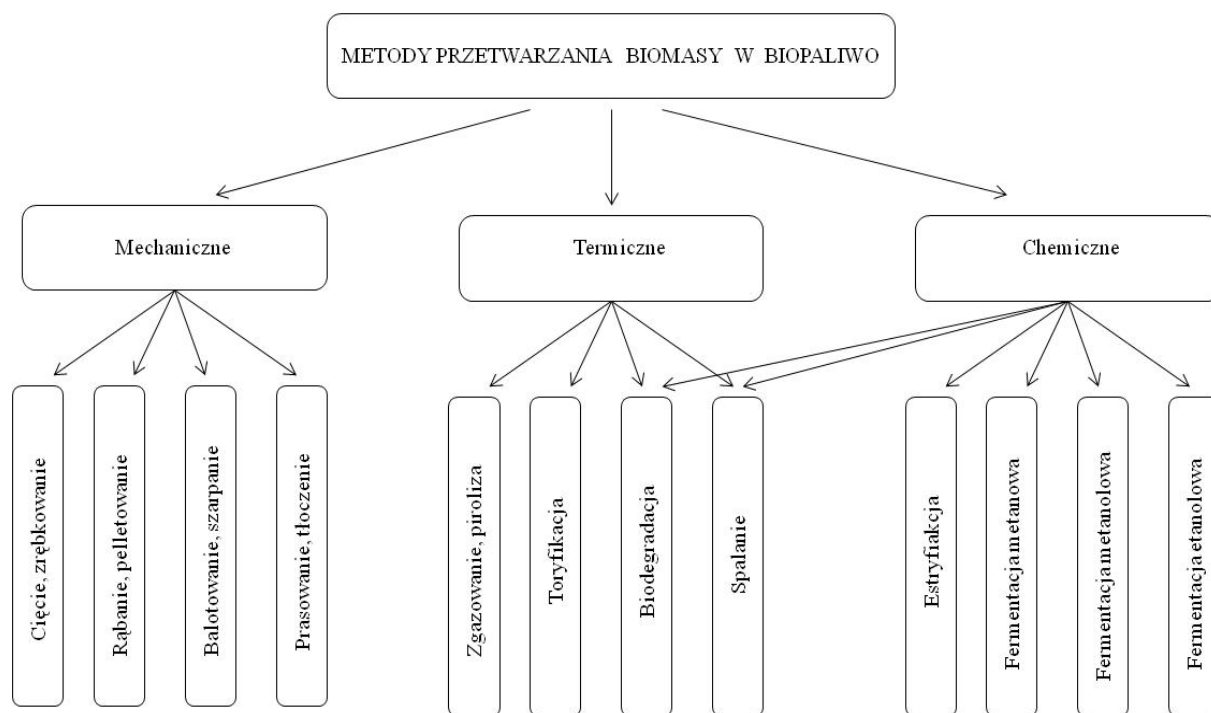
W większości krajów Unii Europejskiej energia cieplna pozyskiwana jest z paliw kopalnych. Spalanie takich paliw jak węgiel, ropa naftowa i gaz ziemny powoduje znaczną emisję m.in. CO₂, co ze względu na coraz wyższe standardy środowiskowe wymaga ciągłych ograniczeń (Radomiak i in., 2017). Zgodnie ze strategią energetyczną Komisji Europejskiej na lata 2020-2030, priorytetem jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych o 40%, zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii do co najmniej 27%, ciągle zwiększanie wydajności energetycznej oraz zapewnienie konkurencyjnej, niedrogiej i bezpiecznej energii. Wykorzystanie biomasy jest jednym z kluczowych rozwiązań, które proponuje Komisja Europejska w celu zmniejszenia zależności od importowanej ropy naftowej i produktów naftowych, a tym samym poprawy bezpieczeństwa dostaw energii w perspektywie długoterminowej (European Biofuels Technology Platform Strategic Research Agenda & Strategy Deployment Document, 2008).

Podstawową zaletą biomasy jest jej wytwarzanie w procesie fotosyntezy, w którym węglowodany niezbędne do wzrostu pozyskiwane są z CO₂ i H₂O. W ten sposób CO₂ uzyskany podczas spalania jest równoważny ilości niezbędnej do produkcji biomasy, co powoduje zerową emisję dwutlenku węgla podczas spalania biomasy (Cherubini i in., 2011). Zastąpienie paliw kopalnych biomasą jest zatem jednym z najlepszych rozwiązań ograniczających emisję gazów cieplarnianych, jak również SO₂ i NO_x (Obaidullah i in., 2012). W porównaniu do paliw kopalnych biomasa jest przy tym szeroko dostępna, tania i łatwiejsza w przygotowaniu do bezpośredniego użycia jej w charakterze paliwa (Radomiak i in., 2017; Roy, Corscadden, 2012).

Pochodzenie biomasy jest bardzo różnorodne, począwszy od polowej produkcji roślinnej, przez odpady występujące w rolnictwie, przemyśle rolno-spożywczym, jak i w gospodarce komunalnej (Bala-Litwiniak, Radomiak, 2019; Williams i in., 2016). Biomasa może pochodzić także z odpadów drzewnych w leśnictwie, przemyśle drzewnym i celulozowo-papierniczym.

Rysunek 1

Metody przetwarzania biomasy w biopaliwo



Źródło: opracowanie na podstawie: Klugmann-Radziemska, 2011, s. 30; rysunek 16.

iczym (Wisł, Mawiejew, 2010). Nie można też zapomnieć o roślinach hodowanych typowo na cele energetyczne. Rośliny takie cechuje wysoka wartość opałowa, duży przyrost suchej masy w okresie wegetacyjnym, a zarazem niskie wymagania glebowe i klimatyczne. Nad wyselekcjonowaniem tego typu roślin od wielu lat prowadzone są intensywne badania (McKendry, 2002). Do grupy roślin energetycznych nadających się do wytwarzania energii cieplnej poprzez spalanie zalicza się m.in.: wierzbę wiciową, ślazier pensylwański, trawę chińską, słonecznik bulwiasty i trzcinę pospolitą (Bridgeman i in., 2008; Lewandowski i in., 2000; Rosenqvist i in., 2000; Szczukowski, Budny, 2003).

W zależności od rodzaju biomasy stosowane są różne technologie jej przetwarzania. Wiele rodzajów biomasy może być wykorzystanych na cele energetyczne w wyniku bezpośredniego procesu spalania (drewno w formie zrębków, słoma w balotach, granulata z osadów ściekowych, pellety z trocin) lub współspalania z tradycyjnymi nośnikami energii (węgiel, olej opałowy, gaz ziemny). Biomasa może być również przetwarzana na paliwa ciekłe (bioetanol, estry oleju rzepakowego) i gazowe (biogaz z gnojowicy, gaz wysypiskowy) (Pomykała, Łyko, 2013; Sami, Annamalai, Wooldridge, 2001). Metody przetwarzania biomasy w biopaliwo przedstawiono schematycznie na rysunku 1.

Biomasa staje się biopaliwem w wyniku mechanicznego, termicznego lub chemicznego jej przetworzenia. W zależności od rodzaju otrzymanego paliwa może ono znaleźć zastosowanie w energetyce, komunikacji, budownictwie, rolnictwie czy przemyśle. Właściwości biomasy są zmienne i wpływają w znacznej mierze na produkowane z niej biopaliwa. Dlatego też właściwości fizykochemiczne biopaliw zależą w dużym stopniu od składu chemicznego biomasy, czyli zarówno od zawartości części palnych, mineralnych, jak i zawartości części lotnych oraz popiołu i jego składu. Zestawienie niektórych właściwości biomasy, jak również ich porównanie z klasycznymi paliwami kopalnymi podano w tabeli 1 (Vassilev i in., 2010).

Przy porównaniu właściwości energetycznych biomasy i paliw kopalnych można dostrzec, że pod względem jakościowym podstawowy skład pierwiastkowy jest podobny. Różnice występują pod względem ilościowym: w udziałach pierwiastków i związków chemicznych. Skład pierwiastkowy biomasy odpowiada uproszczonej formule: $\text{CH}_{1,45}\text{O}_{0,61}$ różni się od typowego składu węgla kamiennego: $\text{CH}_{0,8}\text{O}_{0,08}$ (Grudziński, 2013). Kilkakrotnie wyższa zawartość tlenu oraz dwukrotnie niższa zawartość węgla w biomacie powodują, iż posiada ona wyższą zawartość części lotnych, jest bardziej reaktywna, ale posiada też niższą wartość opałową w porównaniu do węgla kamiennego. Biomasa cechuje się też wyższą aniżeli

Tabela 1

Porównanie zawartości wilgoci i popiołu, a także składu elementarnego dla wybranych rodzajów biomasy (w %)

Material palny	Wilgoć	Popiół	C	H	N	S	Cl	O ₂
Kora brzozy	8,4	1,9	57,0	6,7	0,5	0,10	0,01	35,7
Kora świerku	8,4	2,9	53,6	5,2	0,1	0,10	0,01	40,0
Łupina orzecha laskowego	7,2	1,4	51,5	5,5	1,4	0,04	0,20	41,6
Łupina orzecha włoskiego	6,8	2,6	49,9	6,2	1,4	0,09	0,15	42,4
Łuska słonecznika	9,1	2,8	50,4	5,5	1,1	0,03	0,10	43,0
Słoma owsa	8,2	5,4	48,8	6,0	0,5	0,08	0,09	44,6
Słoma rzepakowa	8,7	4,3	48,5	6,4	0,5	0,10	0,03	44,5
Trociny dębowe	11,5	0,3	50,1	5,9	0,1	0,01	0,01	43,9
Trociny olchy	52,6	2,0	53,2	6,1	0,5	0,04	0,02	40,2
Trociny sosnowe	15,3	0,1	51,0	6,0	0,1	0,10	0,03	42,9
Węgiel brunatny	10,5	31,0	64,0	5,5	1,0	5,80	0,01	23,7
Węgiel kamienny	5,5	19,8	78,2	5,2	1,3	1,70	0,01	13,6
Torf	14,6	3,3	56,3	5,8	1,5	0,20	0,04	36,2

Źródło: opracowanie na podstawie: Vassilev, 2010, s. 816; tabela 5.

węgiel kamienny zawartością wilgoci, która zależy od jej rodzaju, sposobu oraz okresu składowania. Jak już wspomniano wcześniej, niezmiernie ważnym aspektem jest ograniczanie szkodliwych związków, jakie powstają podczas spalania. Jednymi z bardziej niepożądanych i przyczyniających się do takich niekorzystnych zjawisk jak smog czy kwaśne deszcze są tlenki azotu i siarki. Widać, iż biomasa wykazuje się znacznie mniejszą zawartością siarki i azotu w porównaniu do paliw kopalnych (tabela 1). Niektóre rodzaje biomasy mogą mieć w swoim składzie większą zawartość chloru w porównaniu do paliw kopalnych, co może przyczynić się do wzmożonej korozji elementów stalowych kotłów grzewczych. Jednak, jak wynika z tabeli 1, dla większości rodzajów biomasy zawartość chloru jest znikoma i porównywalna do zawartości chloru w paliwach kopalnych.

Dlatego w ostatnich latach coraz bardziej popularną i przyjazną dla środowiska metodą ogrzewania jest stosowanie instalacji kotłów na biomase, w tym w formie pelletów drzewnych. W warunkach polskich do produkcji pelletów zwykle stosuje się trociny z drewna, jednakże duże zapotrzebowanie biomasy drzewnej w różnych sektorach przemysłowych skłania do poszukiwania innych, powszechnie dostępnych surowców do produkcji pelletów (Bala-Litwiniak, Radomiak, 2019; Rabaçal, Fernandes, Costa, 2013).

Rozsądnym rozwiązaniem może być wykorzystanie odpadów pochodzących z rolnictwa, jednakże skład chemiczny i właściwości fizykochemiczne tego rodzaju odpadów mogą mieć niekorzystny wpływ na skład spalin, a także na eksploatację i konserwację kotła (Vassilev i in., 2010; Zamorano i in., 2011).

W niniejszej pracy poddano analizie surowce powszechnie dostępne w Polsce: trociny sosnowe

i świerkowe, łuskę słonecznika, a także słomę kukurydzianą. Oba rodzaje trocin są szeroko dostępnymi odpadami z przemysłu drzewnego i meblarskiego. Nasiona słonecznika są stosowane w dużych ilościach w przemyśle olejowym i piekarniczym, który wytwarza duże ilości łuski, a słoma jest powszechnie występującym odpadem rolniczym. Z analizowanych surowców wytworzono pellety i określono ich wybrane właściwości fizykochemiczne pod kątem przydatności ich w charakterze paliwa.

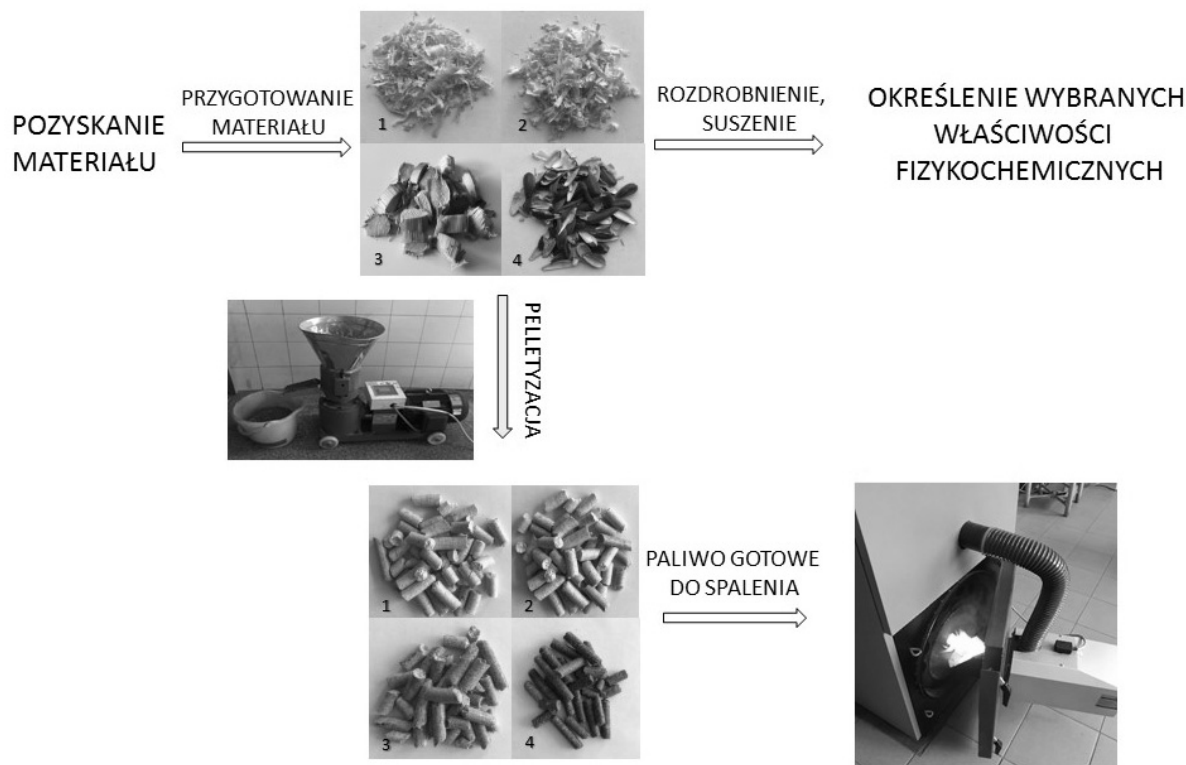
Materiały i metodyka

Badaniom poddano cztery rodzaje biomasy: trociny świerkowe, trociny sosnowe, łuskę słonecznika i słomę z kukurydzy. Wstępnie osuszone, oczyszczone i rozdrobnione materiały poddano procesowi pelletyzacji, używając w tym celu pelletearki KL. ZLSP o mocy 7,5 kW. Sposób zagospodarowania wybranych rodzajów biomasy przedstawiono na rysunku 2.

Dla otrzymanych pelletów określono wybrane właściwości fizykochemiczne (wilgoć, zawartość popiołu, wartość opałową, gęstość nasypową), w tym celu próbki rozdrobiono w młynie nożowym przy użyciu matrycy sitowej o średnicy 1 mm. Zawartość wilgoci określono na podstawie masy utraconej próbki 1,00 g po wysuszeniu w temperaturze $105 \pm 5^\circ \text{C}$. Zawartość popiołu określono poprzez spalanie 1 g próbki wszystkich badanych paliw z biomasy w piecu muflowym w $250 \pm 10^\circ \text{C}$ przez 50 min, a następnie w $550 \pm 10^\circ \text{C}$ przez 4 h. Wartości opałowe analizowanych paliw określono za pomocą kalorymetru KL-12Mn, PRECYZJA-BIT.

Rysunek 2

Schemat przetwarzania wybranych rodzajów biomasy w paliwo ciepłownicze, gdzie: 1 — sosna, 2 — świerk, 3 — słoma kukurydziana, 4 — łuska słonecznika



Źródło: opracowanie własne.

Dla każdego rodzaju paliwa zawartość węgla [C], wodoru [H] i azotu [N] określono za pomocą analizatora elementarnego Truspec CHN628 LECO. Zawartość analizowanych pierwiastków oznaczana jest za pomocą detektora podczerwieni (C i H) oraz detektora przewodności cieplnej (N).

Wyniki badań

Charakterystykę fizykochemiczną i analizę elementarną badanych paliw z biomasy przedstawiono w tabeli 2.

Wytworzone ze wszystkich czterech surowców pellety spełniają normę EN-ISO-17225-2:2014 pod względem gęstości nasypowej, wymiarów i zawartości wilgoci. Tylko pellet ze słomy w bardzo nieznaczny sposób odbiega od normy, jeśli chodzi o wartość opałową i zawartość popiołu. Wartości wilgoci dla wszystkich analizowanych pelletów nie przekraczają normy. Na podstawie tabeli 1 i literatury (Demirbas, 2005; Theis i in., 2006; Vassilev i in., 2010) zaobserwowano, iż zawartość chloru w trocinach sosnowych i świerkowych nie przekracza 0,01%, a w łusce słonecznika i słomie 0,1%. Zawartość siarki dla wszyst-

kich analizowanych rodzajów biomasy nie przekracza 0,1%. Dlatego przyjęto, iż pod względem zawartości tych pierwiastków analizowane pellety również są zgodne z normą EN-ISO-17225-2:2014.

Analizowane pellety porównano także z paliwami opałowymi najczęściej stosowanymi w Polsce pod względem ceny jednostkowej (C_1) i wartości opałowej (W_D), uwzględniając sprawności kotła (η), w jakim dane paliwo jest spalane. Na podstawie tych danych obliczono koszt wytworzenia 1 GJ ciepła (K_C) zgodnie ze wzorem:

$$K_C = \frac{C_1}{\eta \cdot W_D}, \frac{\text{zł}}{\text{GJ}}$$

Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Na polskim rynku najmniej opłacalne jest wykorzystanie oleju opałowego do celów grzewczych (88,6 zł/GJ). Z ekonomicznego punktu widzenia najtańszym paliwem jest węgiel (38,5 zł/GJ). Jak wiadomo, cele strategii energetycznej przewidują ograniczenie emisji gazów cieplarnianych o 40% poprzez zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii do co najmniej 27% (Bilandzija i in., 2017). Ponadto zasoby paliw

Tabela 2

Porównanie wybranych właściwości fizykochemicznych zawartych w normie PN-EN-ISO-17225-2:2014 z wytworzonymi pelletami z sosny, świerku, słomy i łuski słonecznika

Właściwości fizykochemiczne	Norma	Pellet sosnowy	Pellet ze świerku	Pellet ze słomy	Pellet z łuski słonecznika
Gęstość nasypowa, kg/m ³	≤ 600	665	680	625	652
Długość, mm	3,15–40	5–30	5–30	5–30	5–30
Średnica, mm	6±1	6	6	6	6
Wartość opałowa, MJ/kg	≤ 16,5	17,16	18,45	16,25	17,04
Popiół, %	≤ 2	0,45	0,70	2,23	1,94
Wilgoć, %	≤ 10	4,52	4,87	6,75	5,56
C, %	—	45,92	49,59	43,28	44,85
H, %	—	6,30	6,84	6,25	6,32
N, %	≤ 1	0,92	0,97	0,73	0,67
O ₂ , % (obliczony)	—	41,89	37,03	40,76	40,66

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 3

Porównanie wytworzonych pelletów z biomasy z wybranymi paliwami kopalnymi pod kątem ekonomicznym

Paliwo	CJ, zł/t; zł/m ³ *	WD, MJ/kg; MJ/m ³ *	η%	KC, zł/GJ
Pellet sosnowy	700	17,16	85	48,0
Pellet świerkowy	760	18,45	85	48,5
Pellet ze słomy	550	16,25	85	39,8
Pellet z łuski słonecznika	600	17,04	85	41,4
Węgiel kamienny	800	26,00	80	38,5
Olej opałowy lekki	2735*	42,00	95	88,6
Gaz ziemny	2,2*	34,40*	95	67,3

Źródło: opracowanie własne.

kopalnych są ograniczone, a ich ceny wzrosną w nadchodzących latach (Agencja Rynku Energii, 2009). Rozsądne zatem wydaje się zastąpienie paliw kopalnych biomasą. Ceny kotłów przystosowanych do spalania pelletów są porównywalne do cen kotłów węglowych, a jak wynika z tabeli — koszt wytworzenia GJ ciepła jest nieznacznie wyższy. Spalając pellety ze słomy, zapłacimy 1,3 zł więcej w porównaniu do węgla. Zatem niezmiernie ważne jest poszukiwanie nowych, szeroko dostępnych surowców biomasy, z których można by było wyprodukować tanie i wysoko kaloryczne paliwo.

Podsumowanie

Wytworzone z sosny, świerku, łuski słonecznika i słomy kukurydzianej pellety są zgodne z normą EN-ISO-17225-2:2014 pod względem gęstości nasypowej, wymiarów i zawartości wilgoci. Pellety ze słomy w niewielkim stopniu odbiegają od normy pod względem

wartości opałowej i zawartości popiołu, są jednak najtańsze, a koszt wytworzenia 1 GJ ciepła podczas ich spalania jest najniższy. Koszt wytworzenia ciepła przez pellet z sosny i świerku jest nieco wyższy niż dla pozostałych uzyskanych pelletów, co wynika z wyższej stawki VAT dla paliw drzewnych wynoszącej 23%, podczas gdy zgodnie z PKWiU dla pelletów ze słomy i łuski słonecznika podatek VAT wynosi 8%. Porównując analizowane biopaliwa z paliwami konwencjonalnymi, pod względem ekonomicznym lepszym paliwem jest tylko węgiel kamienny. Jak widać, cena za tonę węgla jest najwyższa spośród pozostałych analizowanych w tabeli 3 paliw stałych, jednakże wysoka wartość opałowa węgla sprawia, że jest ono najbardziej opłacalne. Należy pamiętać, że zasoby węgla są ograniczone, a co za tym idzie — jego cena na przestrzeni lat będzie wzrastać. Dlatego też należy się spodziewać, że w niedługim czasie paliwa wytworzone z biomasy — zwłaszcza nieдрzewnej — staną się korzystniejsze nie tylko pod kątem niższej emisji szkodliwych związków do atmosfery, ale też będą jednym z tańszych materiałów wykorzystywanych do wytwarzania ciepła.

Bibliografia

- Agencja Rynku Energii (2009). *Prognoza zapotrzebowania na paliwa i energię do 2030 roku*. Warszawa: Agencja Rynku Energii.
- Bala-Litwiniak, A., Radomiak, H. (2019). Possibility of the Utilization of Waste Glycerol as an Addition to Wood Pellets. *Waste and Biomass Valorization*, 10(8), 2193–2199. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0260-7>.
- Bilandzija, N., Jurisic, V., Voca, N., Leto, J., Matin, A., Sito, S., Kricka, T. (2017). Combustion properties of Miscanthus x giganteus biomass — Optimization of harvest time. *Journal of the Energy Institute*, 90(4), 528–533. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.05.009>.
- Bridgeman, T. G., Jones, J. M., Shield, I., Williams, P. T. (2008). Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. *Fuel*, 87(6), 844–856. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.041>.
- Cherubini, F., Peters, G. P., Berntsen, T., Stromman, A. H., Hertwich, E. (2011). CO₂ emissions from biomass combustion for bioenergy: Atmospheric decay and contribution to global warming. *GCB Bioenergy*, 3(5), 413–426. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01102.x>.
- Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(2), 171–192. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.02.002>.
- European Biofuels Technology Platform Strategic Research Agenda & Strategy Deployment Document. (2008).
- Grudziński, Z. (2013). Koszty środowiskowe wynikające z użytkowania węgla kamiennego w energetyce zawodowej. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 15(1), 2249–2266.
- Klugmann-Radziemska, E. (2011). *Możliwości szerokiego wykorzystania biopaliw w transporcie drogowym na terenie miasta Gdańsk*. Gdańsk.
- Lewandowski, I., Clifton-Brown, J. C., Scurlock, J. M. O., Huisman, W. (2000). Miscanthus: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*, 19(4), 209–227. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00032-5).
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, (83), 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3).
- Obaidullah, M., Bram, S., Verma, V., De Ruyck, J. (2012). A review on particle emissions from small scale biomass combustion. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2(1), 147–159.
- Pomykała, R., Łyko, P. (2013). Biogaz z odpadów (bio) paliwem dla transportu — bariery i perspektywy. *Chemik*, 67(5), 454–461.
- Rabaçal, M., Fernandes, U., Costa, M. (2013). Combustion and emission characteristics of a domestic boiler fired with pellets of pine, industrial wood wastes and peach stones. *Renewable Energy*, (51), 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.09.020>.
- Radomiak, H., Bala-Litwiniak, A., Zajemska, M., Musiał, D. (2017). Numerical prediction of the chemical composition of gas products at biomass combustion and co-combustion in a domestic boiler. *Energy and Fuels 2016*, (14), 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171402043>.
- Rosenqvist, H., Roos, A., Ling, E., Hektor, B. (2000). Willow growers in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 18(2), 137–145. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00081-1).
- Roy, M. M., Corscadden, K. W. (2012). An experimental study of combustion and emissions of biomass briquettes in a domestic wood stove. *Applied Energy*, (99), 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.003>.
- Sami, M., Annamalai, K., Wooldridge, M. (2001). Co-firing of coal and biomass fuel blends. *Progress in Energy and Combustion Science*, 27(2), 171–214. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(00\)00020-4](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(00)00020-4).
- Szczukowski, S., Budny, J. (2003). *Wierzba krzewiasta — roślina energetyczna*. https://www.bip.wfosigw.olsztyn.pl/res/serwisy/bip-wfosigwolsztyn/komunikaty/_016_003_001_64954.pdf (19.11.2019).
- Theis, M., Skrifvars, B. -J., Zevenhoven, M., Hupa, M., Tran, H. (2006). Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 2: Deposit chemistry. *Fuel*, 85(14–15), 1992–2001. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.03.015>.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>.
- Williams, C. L., Westover, T. L., Emerson, R. M., Tumuluru, J. S., Li, C. (2016). Sources of Biomass Feedstock Variability and the Potential Impact on Biofuels Production. *Bioenergy Research*, 9(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9694-y>.
- Wisł, J., Mawiejew, A. (2010). *Biomasa — badania w laboratorium w aspekcie przydatności do energetycznego spalania*. https://www.cire.pl/pokaz-pdf-%252Fpliki%252F2%252Fbiomasa_badania.pdf.
- Zamorano, M., Popov, V., Rodríguez, M. L., García-Maraver, A. (2011). A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry lopping residues. *Renewable Energy*, 36(11), 3133–3140. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.020>.

Księgarnia internetowa Polskiego Wydawnictwa Ekonomicznego
zaprasza na zakupy z rabatem 15%

www.pwe.com.pl

