



Jarosław ZUWAŁA*, Marcin KOPCZYŃSKI**, Jolanta ROBAK***

Ocena efektywności techniczno-ekonomicznej sprzężonego układu toryfikacja–peletyzacja–współspalanie biomasy

STRESZCZENIE. W ostatnich latach w Polsce obserwuje się szybki wzrost produkcji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii (OZE), głównie dzięki rozwojowi technologii współspalania biomasy z paliwami kopalnymi. Wprowadzenie biomasy do obiektów zaprojektowanych do spalania paliw kopalnych wiąże się jednak z występowaniem pewnych ograniczeń technologicznych. Spowodowało to szybki rozwój procesów wstępnego przygotowania (waloryzacji) biomasy przed jej energetycznym wykorzystaniem celem polepszenia jej właściwości. Obiecującą metodą waloryzacji biomasy wydaje się być proces toryfikacji, czyli termicznej konwersji w temperaturze rzędu 220–300°C w warunkach obojętnych. W porównaniu z biomasą surową toryfikat z niej wytworzony charakteryzuje się korzystniejszymi właściwościami fizyko-chemicznymi jako paliwo. Toryfikat jest materiałem jednorodnym, charakteryzuje się większą zdolnością przemiałową, wyższą wartością energii chemicznej na jednostkę objętości, a dzięki właściwościom hydrofobowym jest odporny na warunki atmosferyczne. Większa gęstość energetyczna biomasy toryfikowanej przyczynia się do oszczędności w łańcuchu dostaw paliwa w produkcji energii odnawialnej. W przeliczeniu na jednostkę energii szacunkowy koszt transportu toryfikatu jest o około 20–50% mniejszy.

SŁOWA KLUCZOWE: toryfikacja, biomasa, pelety

* Dr hab. inż., ** Mgr inż., *** Dr inż. – Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla Centrum Badań Strategicznych, Zabrze; e-mail: mkopczynski@ichpw.zabrze.pl

Wprowadzenie

W ostatnich latach w Polsce obserwuje się szybki wzrost produkcji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii (OZE), głównie dzięki elektrowniom wiatrowym oraz rozwojowi technologii współspalania z paliwami kopalnymi (URE 2013). Współspalanie uważane jest obecnie za najprostszy i najtańszy sposób zwiększenia produkcji energii elektrycznej z paliw odnawialnych w Polsce. Szybkiemu i stosunkowo tanemu wdrożeniu technologii współspalania sprzyja możliwość wykorzystania istniejących w obiektach energetycznych systemów przygotowania paliwa (Zuwała i Hrycko 2005).

W polskich elektrowniach i elektrociepłowniach biomasę powszechnie współspala się z węglem w kotłach pyłowych. Niestety wąskim gardłem tej technologii jest układ przygotowania paliwa, czyli młyny węglowe, których konstrukcja nie została przewidziana do mielenia mieszanki węgla i biomasy. Współmielenie biomasy nieprzetworzonej z węglem ma wpływ na pracę młyna i osiągane przez niego parametry, co z kolei przekłada się na pracę samego kotła. Ponadto wprowadzenie biomasy do układów kotłowych zaprojektowanych do spalania paliw kopalnych wiąże się z występowaniem pewnych ograniczeń technologicznych, które potęgują się wraz ze wzrostem udziału biomasy w strumieniu paliwa podawanego do kotła. Mogą one, zwłaszcza w systemach bezpośredniego współspalania, negatywnie wpływać na funkcjonowanie instalacji, szczególnie przy wykorzystaniu biomasy o niskiej jakości. Ograniczenia związane z energetycznym wykorzystaniem biomasy przyczyniły się do rozwoju nowych rozwiązań technologicznych w energetyce, jak na przykład dedykowane dla biomasy instalacje młynowe, palnikowe czy kotły opalane wyłącznie biomasą. Nastąpił także szybki rozwój procesów wstępnego przygotowania (waloryzacji) biomasy przed jej energetycznym wykorzystaniem, tj. suszenie, kompaktowanie, czy toryfikacja (Kopczyński i Zuwała 2013).

1. Ocena efektywności technologicznej procesu toryfikacji

Obiecującą metodą waloryzacji biomasy wydaje się być proces toryfikacji, czyli termicznej konwersji w temperaturze rzędu 220–300°C w warunkach obojętnych. Otrzymany w tym procesie produkt stały tzw. toryfikat stanowić może atrakcyjne paliwo dla energetyki. Można go stosować jako substytut biomasy nieprzetworzonej lub niskokalorycznych węgli energetycznych. Biomasa toryfikowana charakteryzuje się korzystniejszymi właściwościami fizykochemicznymi w porównaniu z biomasą surową i zbliżonymi bardziej do niskokalorycznych węgli niż do biomasy nieprzetworzonej (Bergman 2005; Kopczyński i Zuwała 2012). W porównaniu z biomasą surową toryfikat z niej wytworzony jest materiałem jednorodnym i charakteryzuje się większą zdolnością przemiałową (Arias i in. 2008). Zastąpienie biomasy surowej toryfikatem, który charakteryzuje się przemiałowością zbliżoną do paliwa podstawowego (węgla) nie powinno mieć wpływu na pracę młyna. Dzięki temu w technologii współspalania bezpośredniego proces współmielenia będzie mniej energochłonny.

Biomasa toryfikowana cechuje się także wyższą wartością energii chemicznej przypadającej na jednostkę objętości tzw. gęstością energii w porównaniu z biomasą nieprzetworzoną (Bridgeman i in. 2008). W następstwie tego do kotła można doprowadzić więcej energii z OZE przy zachowaniu identycznego strumienia paliwa. Zwiększenie gęstości energii chemicznej biomasy można uzyskać także poprzez jej peletyzację, jednak peletyzacja biomasy toryfikowanej spowoduje jeszcze większy wzrost gęstości energii paliwa. W przypadku poddania biomasy surowej procesowi peletyzacji uzyskano dwukrotny, a przypadku peletyzacji biomasy toryfikowanej – trzykrotny wzrost gęstości energii w porównaniu z biomasą nieprzetworzoną (Witt i in. 2012).

Przeprowadzone w Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla badania toryfikacji biomasy potwierdzają dane literaturowe (Bergman 2005; Bridgeman i in. 2008). W tabeli 1 przedstawiono parametry energetyczne surowej oraz toryfikowanej biomasy. Biomasę toryfikowaną otrzymano z wierzby energetycznej oraz wyłoków z oliwek. Badania przeprowadzono w reaktorze ze złożem stacjonarnym w temperaturach 220, 260, 300°C w atmosferze azotu.

TABELA 1. Parametry energetyczne biomasy surowej i toryfikowanej

TABLE 1. Energetic parameters of raw and torrefied biomass

Materiał	Ciepło spalania (Q_s^a), [kJ/kg]	Wartość opałowa (Q_i^a), [kJ/kg]
Wyłoki z oliwek (WzO)	18 659	17 345
Toryfikat z WzO otrzymany w temp. 220°C	20 971	19 821
Toryfikat z WzO otrzymany w temp. 260°C	22 552	21 383
Toryfikat z WzO otrzymany w temp. 300°C	24 937	23 904
Wierzba energetyczna (WE)	18 487	17 196
Toryfikat z WE otrzymany w temp. 220°C	19 414	18 216
Toryfikat z WE otrzymany w temp. 260°C	20 853	19 725
Toryfikat z WE otrzymany w temp. 300°C	23 388	22 348

Z przedstawionych w tabeli 1 danych wynika, że toryfikat otrzymany z biomasy surowej charakteryzuje się wyższymi wartościami ciepła spalania i wartością opałową. Dodatkowo stwierdzono, że wraz ze wzrostem temperatury procesu toryfikacji otrzymuje się toryfikat o wyższych parametrach energetycznych.

Bergman (2005) w procesie TOP Pellets (metoda jednoczesnej toryfikacji i peletyzacji biomasy opracowana w ECN) otrzymali pelety z biomasy toryfikowanej, które charakteryzowały się wartością gęstości energii w zakresie 14,0–15,5 GJ/m³. Natomiast gęstość energii dla peletów otrzymanych z tej samej biomasy lecz nieprzetworzonej w procesie toryfikacji wahała się w zakresie 7,8–10,5 GJ/m³. Można stwierdzić, że kumulacja energii chemicznej biomasy poddanej procesowi toryfikacji i następnie peletyzacji przyczynia się, poza możliwością zwiększenia produkcji energii z OZE w procesach współspalania, do obniżenia kosztów transportu w porównaniu z biomasą nieprzetworzoną, a także peletyzowaną.

Zapewnienie ciągłości w podawaniu paliwa do kotła wymaga jego rezerwy na składowisku. Biomasa podczas składowania ulega biodegradacji, a tworzące się mikroorganizmy tj. grzyby i bakterie stanowią bezpośrednie zagrożenie dla zdrowia obsługi pracującej w linii przygotowania paliw (Gołofit-Szymczak i Ławniczek-Wałczyk 2011). Zdaniem autorów (Bergman 2005; Bridgeman i in. 2008) badających proces toryfikacji, biomasa toryfikowana jest materiałem charakteryzującym się właściwościami hydrofobowymi i zwiększoną odpornością na czynniki biologiczne w porównaniu z biomasą nieprzetworzoną. Procesy biologiczne nie będą zachodzić w przypadku składowania biomasy toryfikowanej. Dlatego składowanie tego typu biomasy w mniejszym stopniu będzie stanowić zagrożenie biologiczne dla obsługi. Ponadto mniejsze zapotrzebowanie toryfikatu dla zapewnienia odpowiedniej ilości energii chemicznej w strumieniu paliwa podanym do kotła, w porównaniu z biomasą nieprzetworzoną, zminimalizuje konieczność składowania dużych ilości biomasy, a także skróci się czas jej składowania.

Biomasa poddana procesowi toryfikacji zawiera mniej prekursorów substancji smolistych. Dzięki temu zastosowanie toryfikatu jako surowca w procesie zgazowania zmniejsza problemy pojawiające się w przypadku stosowania biomasy nieprzetworzonej związane z oblepianiem i w następstwie zatykaniem rurociągów przez powstające smoły. Mniejszy stosunek pierwiastków O/C zawartych w toryfikacie w porównaniu z biomasą surową wpływa dodatkowo na zwiększenie sprawności procesu zgazowania (Prins i in. 2006).

Korzyści technologiczne z zastosowania procesu toryfikacji jako wstępnej przeróbki biomasy przed jej energetycznym wykorzystaniem są bezsprzeczne. Liczne badania zagraniczne, a także badania własne wskazują, że proces toryfikacji z powodzeniem może być stosowany do „uszlachetniania” biomasy. Szczególnie jako paliwo w procesach współspalania w instalacjach wyposażonych w konwencjonalne układy mielenia (np. młyny pierścieniowo-kulowe) lub w przypadku transportu na znaczne odległości.

2. Technologie toryfikacji biomasy

Pomimo że proces toryfikacji biomasy znany jest już od lat trzydziestych ubiegłego wieku, także obecnie uważany jest za obiecującą metodę waloryzacji biomasy dla wytwarzania z niej energii. Jednak jak dotąd toryfikacja nie została wykorzystana w tej dziedzinie komercyjnie na dużą skalę, powstało natomiast wiele instalacji pilotowych. Obecnie toryfikację w skali przemysłowej stosuje się przy obróbce drewna do celów innych niż energetyka, np.: budownictwo, produkcja mebli, podłóg itp. (Mectorrefaction, FinnForest).

W tabeli 2 przedstawiono typy reaktorów, w których prowadzono badania dotyczące toryfikacji biomasy. Różne typy reaktorów, które zostały opracowane dla innych aplikacji (głównie suszenia), zostały zmodyfikowane dla celów realizacji procesu toryfikacji. W zależności od typu reaktora różne technologie toryfikacji przystosowane są do przetwarzania biomasy o małych rozmiarach cząstek (np. trociny) lub dużych. Oznacza to, że wybór technologii zależy od właściwości surowca, lub alternatywnie, wsad musi być wstępnie przetwarzany (roz-

drobniony) przed procesem toryfikacji. Rozważania te wszystkie mają wpływ na koszt kapitału, jak również koszty eksploatacji zakładu toryfikacji. Te względy wpływają na nakłady inwestycyjne, jak również na koszty eksploatacji zakładu toryfikacji.

TABELA 2. Typy reaktorów, w których prowadzono badania toryfikacji biomasy

TABLE 2. Overview of torrefaction reactors under development

Typ reaktora	Firma (kraj)	Nazwa technologii	Planowana wydajność
Suszarka taśmowa	Agri-Tech producers LLC/RTF (US)	Torr-Tech	5 Mg/h
	4 EnergyInvesteAmelBiocoal (BE)	Stramproy	38 000 Mg/rok
	New Earth Eco Technology (US)	Eco-Pyrovac	2 Mg/h
	Stramproy Green Investment (NL)	Stramproy	45 000 Mg/rok
Rura obrotowa	Torr-Coal (NL)	Torr-coal	35 000 Mg/rok
	Andritz (AT)	ACB/ECN	50 000 Mg/rok
	Atmosclear (UK)/Airless (CH)	CDS (UK)	50 000 Mg/rok
	ETPC-Umea University (SWE)	BioEndev	30 000 Mg/rok
Podajnik ślimakowy	BioLake BV/ATO (NL)	BO2/ECN	30 000 Mg/rok
	BTG (NL)	BTG	5 Mg/h
	Foxcoal (NL)	–	35 000 Mg/rok
Piec półkowy	CMI-NESA (BE)	NESA	–
	Integro Earth Fuels LLC (US)	Wyssmont	50 000 Mg/rok
Złoże ruchome	Buhler (GER)	–	–
	ECN (NL)	BO2	5 Mg/h
	Thermya (FR)	Torspyd	20 000 Mg/rok
Torbed	Topell (NL)	Torbed	60 000 Mg/rok
Mikrofale	CanBiocoal (UK)	Rotawave	110 000 Mg/rok
Hybrydowy	Airex (CAN), Torrefaction Systems (US)	–	–
Fluidalny	River Basin Energy (US)	–	6 Mg/h
Inne	BioTorTech (NL), Alterna (CAN), Ecotech/Sea2Sky (US), Energex (CAN), Torrproc (US), New Earth Renewable Energy Fuels (US)		

Źródło: Kleinschmidt 2010; Melin 2011; Beekes i Cremers 2012; Koppejan i in. 2012; Nordin 2012, Thamer 2012.

3. Ocena efektywności ekonomicznej procesu toryfikacji

Czynnikiem decydującym o przemysłowej atrakcyjności technologii jest jej opłacalność, którą dla paliw rozpatrywać można w sensie ekonomicznym, energetycznym lub środowiskowym. Miarą opłacalności ekonomicznej jest porównanie kosztu wytwarzania produktu z możliwą do uzyskania ceną jego zbytu lub cenami funkcjonujących na rynku dóbr o tym samym przeznaczeniu. Miarą opłacalności energetycznej jest sprawność energetyczna, którą zdefiniować można jako stosunek energii użytecznej zawartej w przetworzonym nośniku energii do zużycia energii potrzebnego na jego przetworzenie. Miarą opłacalności środowiskowej jest uciążliwość ekologiczna wyrobu lub procesu, identyfikująca i kwantyfikująca związane z tym wyrobem lub procesem strumienie oddziaływania na środowisko.

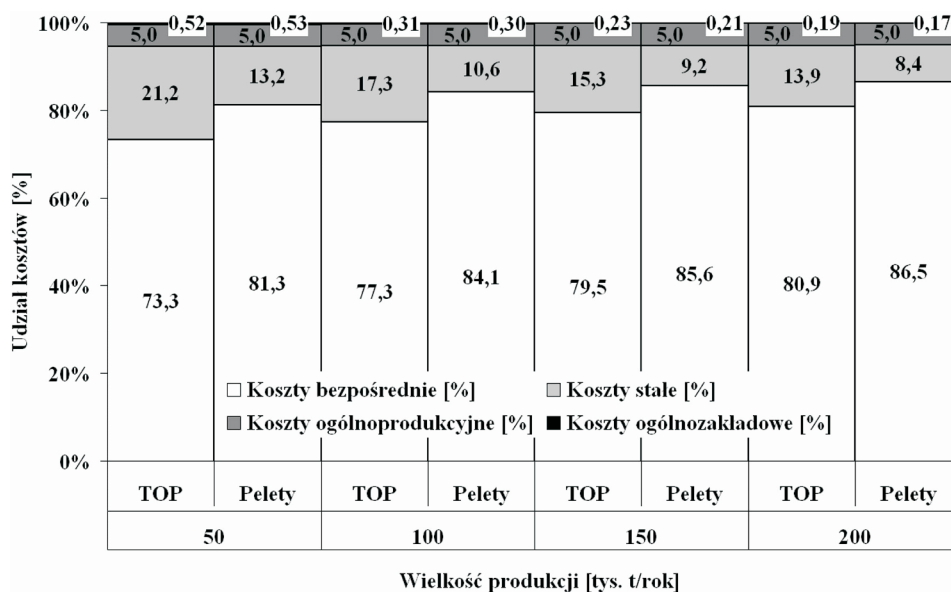
Niewątpliwie toryfikacja, w stosunkowo prosty sposób, ma unikalną możliwość poprawy właściwości fizykochemicznych biomasy, takich jak: przemiałowość, stabilność przechowywania oraz wzrost gęstości energii. Jednak wdrożenie nowej technologii może być uzasadnione tylko wtedy, gdy jego ogólna ekonomia jest konkurencyjna na rynku.

Stwierdzono, że toryfikacja może mieć znaczący, pozytywny wpływ na obniżenie kosztów transportu, logistykę i wykorzystanie. Usłu i inni (2008) przeprowadzili analizę techniczno-ekonomiczną różnych metod wstępnej obróbki biomasy przed jej energetycznym wykorzystaniem, tj.: peletyzację, toryfikację czy szybką pirolizę. Na podstawie ogólnej efektywności energetycznej stwierdzili, że toryfikacja w połączeniu z peletyzacją jest najwydajniejsza. W zależności od zastosowanej technologii toryfikacji w porównaniu z samą peletyzacją biomasy koszty transportu zmalały od około 4 do 16%. Zdaniem autorów koszt transportu dla peletów toryfikowanych według metody TOP wyniesie około 13,7 zł/GJ (304,87 zł/Mg) natomiast dla peletów konwencjonalnych około 16,2 zł/GJ (275,01 zł/Mg).

Koppejan i inni (2012) przeprowadzili analizę kosztów transportu peletów z biomasy surowej i toryfikowanej. Stwierdzili, że po uwzględnieniu kosztów transportu morskiego, transportu drogowego oraz przechowywania całkowity koszt transportu peletów z biomasy surowej wyniesie około 4,11 USD/GJ natomiast w przypadku peletów z biomasy toryfikowanej 2,40 USD/GJ. Bergman (2005) po analizie kilku możliwych rozwiązań technologicznych procesu toryfikacji stwierdził, że połączenie procesu toryfikacji biomasy i jej peletyzacji (technologia TOP Pellets według ECN) jest najbardziej efektywne ekonomicznie. Oszacowali oni, że koszty transportu peletów toryfikowanych z Republiki Południowej Afryki do północno-zachodniej Europy w porównaniu z peletami konwencjonalnymi w przeliczeniu na GJ będą o około 25% niższe.

Na podstawie wskaźników technicznych zestawionych w tabeli 3 oszacowano koszt realizacji procesu toryfikacji biomasy połączonej z peletyzacją metodą ECN (TOP Pellets) i peletyzacji konwencjonalnej w warunkach polskich (tab. 4). Oceny kosztów produkcji dokonano za pomocą metodologii UNIDO, przedstawionej w (Poradnik 1993). Na koszty te składają się koszty bezpośrednie, stałe, ogólnoprodukcyjne i ogólnozakładowe. Na rysunku 1 zaprezentowano w ujęciu graficznym strukturę kosztów dla różnych wielkości produkcji.

Przy ustalaniu ceny zakupu mediów oraz średnich stawek wynagrodzenia wykorzystano następujące materiały i informacje: dla energii elektrycznej i wody (Serwis informacyjny UM



Rys. 1. Struktura jednostkowego kosztu produkcji w warunkach polskich pelet z trocin drzewnych surowych i toryfikowanych według metody ECN TOP Proces

Fig. 1. Structure of the unit production cost of pellets from sawdust, raw and torrefied by the ECN TOP process, under Polish conditions

w Zabrze, lokalne koszty), dla gazu ziemnego (PGNiG), dla pary wodnej technologicznej (Elektrociepłownia Fortum Zabrze S.A.), dla kosztów wynagrodzenia (GUS. Praca, Dochody ludności, Przeciętne zatrudnienie i wynagrodzenie w sektorze przedsiębiorstw, średnia kwiecień 2014 r.). Do przeliczenia euro na PLN przyjęto kurs z dnia 18.07.2014 wynoszący 4,1479 zł. Przeprowadzony rachunek kosztów nie uwzględnia istotnego składnika, jakim jest koszt zakupu surowca. Wiąże się to z różną dostępnością biomasy i wynikających stąd znacznych różnic w koszcie jej pozyskania.

Przy określaniu nakładów inwestycyjnych opierano się na wielkościach podanych w cytowanej pracy (Bergman 2005) oraz na metodologii określania nakładów inwestycyjnych prezentowanej w (Peters i in. 1991). Koszty bezpośrednie obejmują między innymi: koszty zakupu surowców i mediów, robocizny bezpośredniej w produkcji, obsługi biurowej i laboratoryjnej, remontów, konserwacji i zakupu części zamiennych. W skład kategorii kosztów stałych wchodzi: amortyzacja, podatki lokalne i ubezpieczenia, renty i czynsze dzierżawne. W szacowaniu kosztów stałych nie uwzględniono kosztów finansowych, dotyczących odsetek od spłacanych kredytów. Koszty ogólnoprodukcyjne uwzględniają usługi socjalne, sprzątanie pomieszczeń, utrzymanie zaplecza socjalnego załogi, zabezpieczenie obiektów i ludzi, składy i magazynowanie, usługi zewnętrzne, ekspedycję i inne. W kosztach ogólnozakładowych ujęte zostały płace zarządu i personelu biurowego, opłaty prawnicze, czynsze, podatki majątkowe, wyposażenie biurowe, komunikacja i łączność.

Oszacowany według przytoczonych założeń koszt produkcji 1 Mg pelet toryfikowanych wynosi 344,18 zł, natomiast koszt wytworzenia 1 Mg pelet z trocin drzewnych metodą kon-

TABELA 3. Założenia techniczno-ekonomiczne dla oszacowania kosztów produkcji pelet z trocin drzewnych surowych i toryfikowanych (według metody ECN) w warunkach polskich

TABLE 3. Technical indicators and technical-economic assumptions to estimate the cost of production of pellets from raw and torrefied wood (produced by the ECN TOP process)

Wyszczególnienie		Jednostka	TOP proces	Peletyzacja konwencjonalna
Wskaźniki techniczne instalacji				
Zdolność przerobowa instalacji (surowiec)		Mg/rok	170 000	170 000
Wielkość produkcji		Mg/rok	56 000	80 000
Zużycie paliwa użytkowego		MW _{th}	3,9	10,4
Zużycie energii elektrycznej		MW _e	0,83	1,26
Zużycie pary wodnej		Mg/Mg prod	0	0,025
Zużycie wody chłodzącej		m ³ /Mg prod.	16,7	0
Założenia techniczno-ekonomiczne				
Całkowite nakłady inwestycyjne		zł	23 228 240	16 176 810
Cena	Surowca	zł	0	0
	Energii elektrycznej	zł/kWh	0,66	0,66
	Gazu ziemnego (39,5 MJ/kg)	zł/kWh	0,13	0,13
	Wody chłodzącej	zł/m ³	5,10	5,10
	Pary wodnej (p = 1,34 MPa, T = 410°C)	GJ	23,90	23,90
Obciążenie instalacji		3 zmiany/dobę; 365 dni w roku: 8 760 godz./rok		
Zatrudnienie bezpośrednie w produkcji		5 os/ dobę (3 976,80 zł/mies.)		
Nadzór i obsługa biurowa		1 mistrz/zmianę; 2 osoby obsługi biurowej 3 976,80 zł/mies.		
Amortyzacja		liniowa od całkowitego nakładu inwestycyjnego, okres 10 lat		

wencjonalną wynosi 295,43 zł. Wyższy koszt wytwarzania pelet toryfikowanych kompensowany jest wyższymi walorami energetycznymi tego produktu. Przeliczając koszt produkcji pelet toryfikowanych i konwencjonalnych w odniesieniu do jednostki energii, wynosi on odpowiednio 16,54 zł/GJ i 18,69 zł/GJ.

Przyjmuje się, że warunkiem opłacalności przedsięwzięcia jest udział kosztów stałych w całkowitym koszcie produkcji nieprzekraczający 30%. W przypadku przedmiotowych pelet toryfikowanych i konwencjonalnych, udział kosztów stałych dla wszystkich analizowanych wielkości produkcji jest niższy niż 30%, przy czym koszty stałe produkcji pelet konwencjonalnych stanowią około 60% kosztów stałych wytwarzania pelet toryfikowanych. Wyższe koszty stałe przy produkcji pelet toryfikowanych wiążą się głównie z wyższymi nakładami inwestycyjnymi dla uruchomienia procesu TOP, a tym samym z wyższymi kosztami wynikającymi bezpośrednio z nakładów inwestycyjnych, przede wszystkim amortyzacji. Ponieważ analizowany koszt produkcji nie zawiera elementu kosztu bezpośredniego, jakim jest koszt biomasy, po jego doliczeniu udział kosztów stałych będzie jeszcze niższy.

TABELA 4. Szacunkowy koszt produkcji pelet z trocin drzewnych surowych i toryfikowanych według metody ECN TOP Proces

TABLE 4. The estimated production cost of pellets from raw and torrefied wood (produced by the ECN TOP process, zł/Mg)

Pozycja kosztów		TOP proces [zł/Mg]	Peletyzacja konwencjonalna [zł/Mg]
I.	Koszty fabryczne	342,59	294,39
	<i>A. Koszty bezpośrednie</i>	<i>261,50</i>	<i>248,47</i>
	1. Media pomocnicze i energetyczne		
	a. Energia elektryczna	85,69	91,06
	b. Gaz ziemny	79,31	148,04
	c. Woda technologiczna	85,17	0
	d. Para wodna technologiczna	0	1,94
	2. Robocizna w produkcji	4,26	2,98
	3. Nadzór bezpośredni i personel biurowy	4,26	2,98
	4. Remonty bieżące i konserwacja	0,07	1,01
	5. Części zamienne	0,10	0,05
	6. Opłaty laboratoryjne	0,43	0,30
	7. Opłaty licencyjne	0,21	0,10
	<i>B. Koszty stałe</i>	<i>53,16</i>	<i>31,14</i>
	1. Amortyzacja	41,48	20,22
	2. Podatki lokalne	4,15	2,02
	3. Ubezpieczenia	1,66	0,81
	4. Renty, czynsze dzierżawne	16,59	8,09
	<i>C. Koszty ogólnoprodukcyjne</i>	<i>17,21</i>	<i>14,77</i>
II.	Koszty ogólnozakładowe	1,59	1,05
III.	Koszt produkcji (I + II)	344,18	295,43

Podsumowanie

Analiza literatury, a także wyniki badań własnych wyraźnie wskazują na efektywność techniczno-ekonomiczną sprzężonego układu toryfikacja–peletyzacja–współspalanie biomasy i paliw kopalnych. Stwierdzono, że biomasa toryfikowana może stanowić atrakcyjny substytut biomasy nieprzetworzonej, jako paliwo dla energetyki. Poczynając od transportu i magazynowania, poprzez przygotowanie i podanie do kotła, a na emisji w procesie spalania kończąc, biomasa toryfikowana charakteryzuje się właściwościami fizykochemicznymi korzystniejszymi w porównaniu do biomasy surowej.

Proces toryfikacji biomasy wpływa m.in. na: zwiększenie dostępności biomasy pod względem jej rodzaju i pochodzenia geograficznego, znaczne obniżenie kosztów transportu i przeładunku, wielowariantowość zastosowania, możliwość natychmiastowego (bezinwestycyjnego) zastosowania toryfikatu jako paliwa w procesach spalania i współspalania w istniejących obiektach energetycznych, eliminację zagrożeń biologicznych z uwagi na prawie zerową biodegradację toryfikatu.

Toryfikacja biomasy stanowi dodatkowy etap w łańcuchu produkcji energii z odnawialnych źródeł, wpływając na wzrost ceny paliwa. Wyższy koszt wytwarzania pelet toryfikowanych kompensowany jest jednak wyższymi walorami energetycznymi tego produktu. Przeliczając koszt produkcji pelet toryfikowanych według metody ECN TOP Pellets i konwencjonalnych w odniesieniu do jednostki energii wynosi on odpowiednio 16,54 zł/GJ i 18,69 zł/GJ. Ponadto większa gęstość energetyczna biomasy toryfikowanej przyczyni się do oszczędności w łańcuchu dostaw paliwa w produkcji energii odnawialnej.

Większy strumień energii przy tej samej objętości paliwa podawanego do kotła pozwoli na zwiększenie udziału masy biomasy w procesach współspalania i tym samym ułatwi producentom „zielonej” energii na dotrzymanie narzuconych przez Parlament Polski i Europejski udziałów energii wyprodukowanej w OZE.

Duża koncentracja energii oraz doskonałe właściwości przemiałowe pozwolą dodatkowo na zmniejszenie zużycia zarówno energii podczas mielenia paliwa w młynach, jak również elementów samego młyna. Będzie to miało bezpośredni wpływ na wydłużenie czasu pomiędzy remontami młynów, w których z węglem zamiast biomasy zastosuje się biomasę toryfikowaną. Przyczyniając się do oszczędności w jednostkach wytwarzających energię z odnawialnych, biomasowych źródeł energii.

Reasumując, można przyjąć, że proces toryfikacji z powodzeniem może być zastosowany do wstępnego uszlachetniania biomasy przed jej zastosowaniem w procesach współspalania.

Przedstawione w artykule wyniki zostały uzyskane w badaniach współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy SP/E/1/67484/10 – Strategiczny Program Badawczy – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin.

Literatura

- [1] ARIAS i in. 2008 – ARIAS, B., PEVIDA, C., FERMOSE, J., PLAZA, M.G., RUBIERA, F. i PIS, J.J. 2008. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. *Fuel Process Technol* 89(2), s. 169–175.
- [2] BEEKES, M. i CREMERS, M. 2012. Realising a co-firing dream. *Power Eng Int.* 20 (8), 64–70.
- [3] BERGMAN, P.C.A., 2005. Combined torrefaction and pelletisation – The TOP process, ECN publication, Report ECN-C-05-073, <https://www.ecn.nl>.
- [4] BRIDGEMAN i in. 2008 – BRIDGEMAN, T.G., JONES, J.M., SHIELD, I. i WILLIAMS, P.T. 2008. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties, *Fuel* 87, s. 844–856.

- [5] GOŁOFIT-SZYMCZAK, M. i ŁAWNICZEK-WAŁCZYK, A. 2011. Biomasa jako źródło zagrożeń biologicznych. *Bezpieczeństwo pracy* 12, s. 17–19.
- [6] Finforest, www.metsawood.com/us.
- [7] URE 2013. Biuletyn Urzędu Regulacji Energetyki <http://www.ure.gov.pl>.
- [8] USLU i in. 2008 – USLU, A., FAAL, A. i BERGMAN, P. 2008. Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy* 33, s. 1206–1223.
- [9] KLEINSCHMIDT, CP. 2010. Statusoverzicht en impactanalyse van torrefactie in Nederland, Arnhem: KEMA/Agentschap NL, p. 48.
- [10] KOPPEJAN i in. 2012 – KOPPEJAN, J., SOKHANSANI, S., MELIN, S. i MADRALI, S. 2012. Status overview of torrefaction technologies. *IEA Bioenergy Task 32 report*, Enschede.
- [11] KOPCZYŃSKI, M. i ZUWAŁA, J. 2012. Biomasa toryfikowana – nowe paliwo dla energetyki. *Chemik* t. 6, s. 540–551.
- [12] KOPCZYŃSKI, M. i ZUWAŁA, J., 2013. Toryfikacja biomasy drogą do eliminacji barier technologicznych wielkoskalowego jej współspalania. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16 z. 4, s. 271–284.
- [13] Mectorrefaction, www.mectorrefaction.com
- [14] MELIN, S. 2011. Torrefied wood – a new emerging energy carrier. Materiały konferencyjne, *Clean coal power coalition CCPC*, 9 Marzec.
- [15] NORDIN, A. 2012. *Torrefaction torrefiering av biomassa e teknik och utveckling*. C, Panndagarna Värme- och Kraftföreningens conference, 1 Luty, Panndagarna, Örnköldsvik.
- [16] PETERS, M.S. i TIMMERHAUS, K.D. 1991. *Plant design and economics for chemical engineers*, Mc Graw – Hill International Editions, Singapore.
- [17] *Poradnik przygotowania przemysłowych studiów Feasibility*, United Nations, Warszawa 1993.
- [18] PRINS i in. 2006 – PRINS, M.J., PTASINSKI, K.J. i JANSSEN, F.J.J.G., 2006. More efficient biomass gasification via torrefaction, *Energy* 31, s. 3458–3470.
- [19] THAMER, D. 2012. Torrefaction of biomass: ACB technology and overview of ANDRITZ activities. Materiały konferencyjne, *IEA clean coal centre/VGB Powertech: cofiring biomass with coal workshop*, 27–28 March, Copenhagen.
- [20] ZUWAŁA, J. i HRYCKO, P. 2005. Analiza efektów energetycznych i ekologicznych procesu współspalania węgla i biomasy w kotle pyłowym OP-230. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 8, z. spec.
- [21] WITT i in. 2012 – WITT, J., BIENERT, K. i SCHAUBACH, K. 2012. Production of pellets from torrefied wood and introduction to SECTOR project, BalBic Project Kick-Off-Workshop, 23th March 2012 Salaspils at LSFRI Silava library, www.dbfz.de.

Jarosław ZUWAŁA, Marcin KOPCZYŃSKI, Jolanta ROBAK

Coupled torrefaction-pelletization process for biomass co-firing, techno-economic issues

Abstract

In recent years, Poland has seen a rapid increase in electricity production from renewable energy sources (RES), mainly due to technological developments of biomass co-firing with fossil fuels. However, the introduction of biomass to facilities designed for combustion of fossil fuels is associated with the occurrence of certain technological limitations. This has resulted in the rapid development of biomass pre-treatment technologies (valorization) before use in power-plants in order to improve the biomass' properties. Torrefaction seems to be a promising approach to the valorization of biomass. Torrefaction is a thermochemical treatment of biomass at 200 to 320°C. It is carried out under atmospheric pressure and in the absence of oxygen. Compared with raw biomass, the solid product of torrefaction has much better physico-chemical properties as a fuel. Torrefied biomass is homogeneous, has a greater grindability, higher energy density, and a higher hydrophobic property (it is resistant to weather conditions). The higher energy density of torrefied biomass contributes to savings in the supply chain. When torrefied, biomass densified through pelletisation results in a more energy-dense product - so-called TOPs (torrefied pellets) which have properties similar to coal. The transportation cost of torrefied pellets per energy unit is about 20–50% less than raw biomass.

KEY WORDS: torrefaction, biomass, pellets