

dr hab. inż. Halina Pawlak-Kruczek, prof. PWr., kierownik Zakładu Kotłów, Spalania i Procesów Energetycznych,  
Michał Czerep, Zakład Kotłów, Spalania i Procesów Energetycznych,  
Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

# Technologia termicznej waloryzacji paliw - toryfikacja w auto termicznym reaktorze

Do 2020 r. Polska zobowiązana jest do uzyskania 15% [1] udziału OZE w końcowym zużyciu energii brutto. W 2013 r. wskaźnik ten wyniósł 11,3% (URE 2013), a jego głównym źródłem są biopaliwa stałe w tym (drewno opałowe, odpady z leśnictwa, przemysłu drzewnego i papierniczego). Udział biomasy w produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych stanowił w 2013 r. około 47%, z czego zdecydowaną większość wytworzono w procesach jej współspalania z paliwami kopalnymi. W produkcji ciepła z OZE biopaliwa stałe stanowiły ok. 97%. Tak duży udział biomasy w produkcji energii oraz problemy z jej wykorzystaniem wynikające z dużego udziału wilgoci w biomasie, jej niskiej kaloryczności i niejednorodności oraz trudności z przemiałem razem z paliwami kopalnymi przyczyniły się do rozwoju nowych rozwiązań technologicznych - w tym waloryzacji biomasy do zastosowań w energetyce.

Nowe sposoby wstępnego przygotowania biomasy poprawiające jej właściwości energetyczne, tj. suszenie, zagęszczanie i toryfikacja są przedmiotem wielu prac badawczych. Toryfikacja jest najbardziej obiecującą i obecnie najszybciej rozwijającą się metodą waloryzacji biomasy. Właściwości biomasy po termicznej przeróbce zbliżone są bardziej do niskokalorycznych węgli. W porównaniu do surowej biomasy, toryfikat jest materiałem bardziej jednorodnym, hydrofobowym, w znacznym

stopniu pozbawionym wilgoci i charakteryzuje się przede wszystkim zwiększoną podatnością przemiałową i kalorycznością. Toryfikat można spalać w kottach pyłowych bez konieczności zmian układów nawęglania i układu paleniskowego kotła.

W 2013 r. udział Odnawialnych Źródeł Energii w końcowym zużyciu energii brutto wyniósł 11,3% (URE 2013). Jak wynika z danych GUS z ostatnich 10 lat zobrazowanych na rys. 1, najszybszy wzrost mocy instalowanych w

kraju wykazują elektrownie wiatrowe i elektrownie na biomasę. Dane zawarte na rys. 1 nie uwzględniają jednak udziału współspalanej biomasy stałej w elektrowniach i elektrociepłowniach. Na podstawie danych dla ostatnich 10 lat obliczono procentowy (rok/roku) wzrost mocy zainstalowanych dla elektrowni wiatrowych i na biomasę stałą pokazanych w tab. 1. Dynamiczny wzrost mocy instalowanych do 2009 r. następował dla elektrowni na biomasę i do 2012 r. dla elektrowni wiatrowych.

W ostatnich 3-5 latach nastąpiła już stabilizacja.

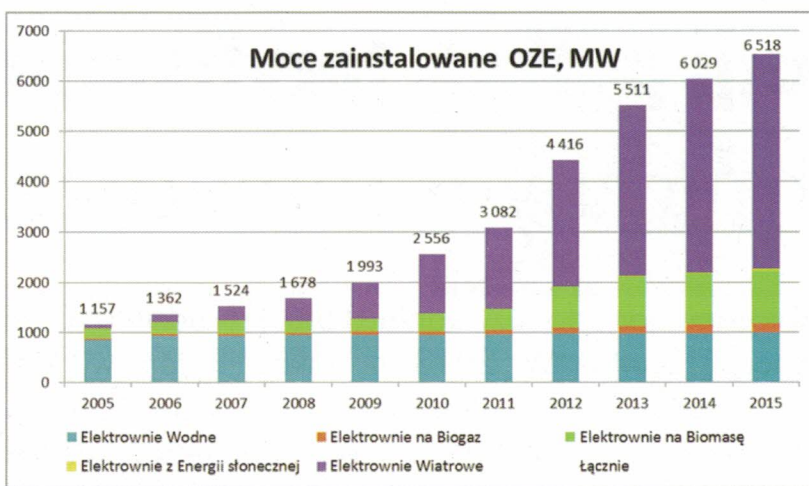
Z kolei jak wynika z danych zawartych na rys. 2 największy udział w produkcji energii elektrycznej z odnawialnych nośników energii w latach 2004-2013 w dalszym ciągu ma biomasa stała. Jej udział w 2013 r. stanowił 46,43% (GUS 2013), z czego do 2011 r. ok. 90-95% biomasy wykorzystywane

było przy współspalaniu. Kolejne lata wykazują spadek udziału współspalanej biomasy stałej. W 2013 r. jej udział wyniósł ok. 50%. Jest to bezpośrednio związane ze zmianami wprowadzonymi do dopłat do energii zielonej.

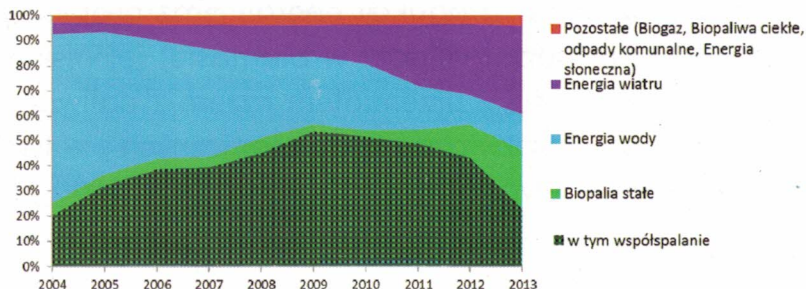
Z powodu różnego od węgla składu biomasy, spalanie jej stwarza wiele problemów spowodowanych głównie niską kalorycznością, dużą wilgotno-

ścią, obecnością metali alkalicznych oraz trudnościami związanymi z mieniem paliwa. Aby poradzić sobie z wymienionymi trudnościami surową biomasę poddaje się zabiegom wstępnej przeróbki termicznej zbliżającym biomasę do paliw kopalnych. Toryfikacja biomasy jest jedną z najbardziej obiecujących technologii tzw. energetycznego zagęszczania biomasy [2] [3] [4] i [5]. Dzięki prażeniu biomasy w obojętnej atmosferze - przy braku tlenu, uzyskuje się produkt jednorodny, o większej wartości opałowej, o własnościach hydrofobowych, ze znikomą zawartością wilgoci oraz dającą się łatwo mielić [6] i [7]. Zdolność resorpcji toryfikowanych biomas w tym także PKSu i zrębek opisano szerzej w [8] i [9]. Dzięki swoim właściwościom toryfikowaną biomasę często nazywa się bio-węglem [2]. Toryfikowana biomasa doskonale nadaje się do spalania i współspalania w kotłach pyłowych bez konieczności ingerencji zarówno w układ nawęglania, jak i układ paleniskowy kotła [10] oraz do produkcji wysokokalorycznych peletów.

Obecnie obserwuje się zmniejszenie wykorzystywania biomasy stałej w procesach współspalania, szczególnie przy wykorzystaniu biomasy o niskiej jakości. Wynika to głównie z problemów występujących w procesie spalania, jak np. skłonność do tworzenia zanieczyszczeń powierzchni ogrzewalnych kotłów. Biomasa współpalana w systemach bezpośrednich stwarza dodatkowe trudności z przemiałem w młynach razem z paliwami kopalnymi. Natomiast duża zawartość części lotnych w biomacie w porównaniu z paliwami kopalnymi zmienia warunki zapłonu i spalania mieszanki węgiel/biomasa w kotle. Biomasy stałe



Rys. 1. Moce zainstalowane z odnawialnych źródeł energii w Polsce w latach 2005-2015 (MW). Stan na 30.09.2015



Rys. 2. Udział w produkcji energii elektrycznej z odnawialnych nośników energii w latach 2004-2013

Tab. 1. Wzrost mocy zainstalowanych z wybranych źródeł OZE r/r,

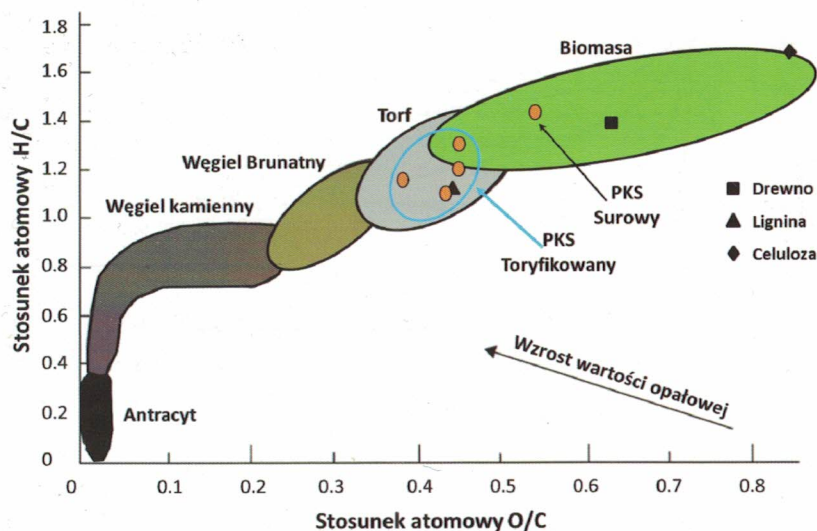
	Wzrost mocy zainstalowanych r/r, %									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Elektrownie Wiatrowe</b>	83,19%	88,72%	56,68%	60,65%	62,87%	36,95%	54,47%	35,76%	13,11%	10,96%
<b>Elektrownie na Biomase</b>	25,82%	6,95%	-9,16%	8,84%	41,07%	15,02%	100,33%	20,25%	2,17%	2,48%



znacznie różnią się między sobą składem i w zależności od rodzaju współspalanej biomasy mogą zawierać znaczne ilości np. chloru i potasu, mające znaczący wpływ na problem szlakowania kotłów współpalających biomasę. Problemy i bariery procesu współspalania biomasy surowej w kotłach występujących w procesie spalania, jak np. skłonność do tworzenia zanieczyszczeń powierzchni ogrzewalnych kotłów, opisują [11] [12] [13] i [14]. Współspalanie dużych ilości biomasy z węglem w kotłach pyłowych pozwoli osiągnąć cel 15% wykorzystania OZE w produkcji energii, stąd zachodzi konieczność rozwoju i wdrażania technologii przygotowania biomasy do procesów spalania i współspalania. Najbardziej obiecującą i obecnie najwięcej badaną technologią jest toryfikacja biomasy, która zmienia właściwości biomasy i minimalizuje problemy współspalania. Toryfikacja jak twierdzą autorzy [18] jest procesem, który umożliwi zwiększenie wykorzystania biomasy, która będzie przypominała węgiel jako paliwo bardziej jednolite w odniesieniu do jego właściwości. Otworzy to nowe możliwości w zakresie wykorzystania biomasy w kotłach przeznaczonych do węgla, bez konieczności większych zmian w instalacji.

### ■ Toryfikacja biomasy

Toryfikacja to niskotemperaturowy proces przeróbki biomasy. Jest to proces, który w literaturze czasami nazywany jest również wysokotemperaturowym suszeniem lub prażeniem, czy niskotemperaturową pirolizą. Toryfikacja to proces przetwarzania biomasy w temperaturze pomiędzy 200-300°C [5] bez dostępu tlenu pod ciśnieniem zbliżonym do ciśnienia atmosferycznego. Pod wpływem podwyższonej temperatury w biomacie dochodzi do rozkładu struktury głównych jej składników, tj. celulozy, hemicelulozy i ligniny co zmienia elementarny skład biomasy i zbliża ją do węgla. Na rys. 3 pokazany jest ten efekt dla PKSu i PKSu storyfikowanego w temperaturach 200°C, 250°C, 270°C i 300°C. Dodatkowo jak wykazują ba-



Rys. 3. Diagram Van Krevelen dla różnych paliw stałych

dania wymagania energii elektrycznej dla rozdrobnienia drewna poddanego toryfikacji są o ok. 50-85% mniejsze w porównaniu ze świeżym drewnem [15].

Toryfikacja zazwyczaj przebiega w zakresie temperatur 220-300°C, w obojętnej atmosferze w wyniku czego otrzymuje się trzy produkty:

- stały produkt o ciemnej barwie,
- kwasową fazę ciekłą
- gazy takie jak: CO, CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub> [2] i [6].

Kinetykę reakcji toryfikacji w zakresie temperatur 220-300°C można określić przyjmując model mechanizmu dwuetapowego. Pierwszym etapem jest model reprezentatywny dla rozkładu hemicelulozy, podczas gdy drugi etap stanowi rozkład celulozy przy jednoczesnym rozkładzie ligniny [16]. W temperaturze powyżej 300-320°C, następuje szybki kraking termiczny celulozy, co może powodować powstawanie smoły, dlatego zaleca się prażenie poniżej temperatury 300°C.

### ■ Badania laboratoryjne toryfikacji biomasy

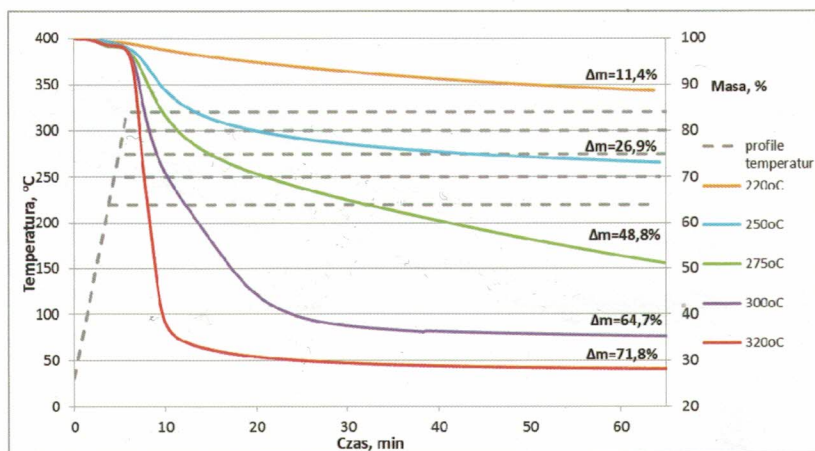
Dla oceny i doboru odpowiednich parametrów procesu toryfikacji do badań w skali pilotowej przeprowadzono

testy toryfikacji metodą termogravimetryczną biomasy drzewnej w atmosferze argonu w temperaturach 220°C, 250°C, 275°C, 300°C i 320°C dla czasu przebywania wynoszącego odpowiednio 60 min. Następnie przeprowadzono badania toryfikacji różnych biomas w temperaturze 300°C i czasie przebywania wynoszącym 60 min. Prędkość nagrzewu próbek w każdym przypadku wynosiła 50°C/min.

Rys. 4 ilustruje wpływ temperatury na końcowy ubytek masy w procesie toryfikacji. W temperaturze 220°C zaobserwowano niewielki ubytek masy. Znaczący wpływ na termiczny rozkład badanej biomasy miało zwiększanie temperatury. W kolejnych etapach podczas zwiększania temperatury toryfikacji do 300°C następował znaczny wzrost ubytku masy. Przy temperaturze końcowej toryfikacji zrębek wynoszącej 300°C odnotowano niemal 65% ubytku masy. Kolejne zwiększenie temperatury procesu do 320°C nie spowodowało już znaczącego ubytku masy. Znacznie jednak wzrosła szybkość ubytku masy w początkowej fazie toryfikacji. Dłuższe utrzymywanie próbki nie powodowało już znacznych zmian masy.

Na rys. 5 przedstawiono szybkości ubytku masy biomas po czasie, dla te-





Rys. 4. Ubytki masy podczas torfikacji zrębek dla różnych końcowych temperatur torfikacji

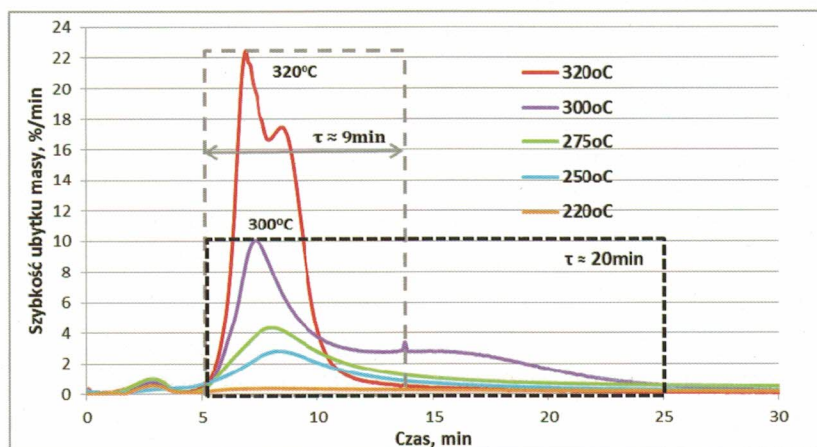
stów pokazanych na rys. 4. W temperaturze 220°C szybkość ubytku masy jest niewielka, co oznacza również wolny proces depolimeryzacji, tj. torfikacji biomasy - w związku z tym nie zaleca się torfikacji w tak niskich temperaturach. Kolejno w temperaturach 250°C, 275°C i 300°C następował wzrost szybkości ubytku masy, jednakże tylko w przypadku temperatury 300°C czas torfikacji można ograniczyć do ok. 20 min (rys. 4), w pozostałych dwóch przypadkach szybkość ubytku masy jest na stałym poziomie przez cały analizowany czas, tj. 60 min (rys. 4). Znaczący wzrost szybkości ubytku masy odnotowano w temperaturze torfikacji w 320°C. Jak wynika z badań termogravimetrycznych dla badanych zrębek po wygrzaniu się próbki do żądanej temperatury 320°C wystarczający czas do torfikacji to ok 9-10 min.

Rys. 6 przedstawia porównanie profili ubytków masowych w 300°C dla czterech różnych biomas: biomasy drzewnej, która często zawiera balast w postaci ponad 40% wilgoci, dwóch różnych biomas typu agro tj. słomy pszennej i śruty rzepakowej oraz łupin z ziaren palmowych (PKS), który z powodu zawartości pozostałości oleju palmowego, jak na biomasę ma dość wysoką wartość opałową, jednak jest biomasą o bardzo dużej twardości stwarzającej trudności przemiatowe.

Największe ubytki masy podczas prażenia w temperaturze 300°C uzyskano dla zrębek i słomy pszennej i wynoszą one ok. 65%. W torfikacji ze

Tab. 2. Analiza biomas, % suchej masy

Właściwości	Parametr	Śruta rzepakowa	Słoma pszenna	PKS	Zrębki
Fizyczne	Popiół (%)	11,2	2,7	7,5	0,4
	VM (%)	69,2	78,7	73,8	79,2
	FC (%)	19,6	18,6	18,7	20,4
Węglowodany strukturalne	Hemiceluloza (%)	4,8	26,9	25,9	18,6
	Celuloza (%)	12,6	32,0	7,1	45,8
	Lignina (%)	17,7	16,5	52,2	20,0
	Łącznie (%)	35,1	75,4	85,2	84,4



Rys. 5. Szybkość ubytku masy w czasie podczas torfikacji zrębek dla różnych końcowych temperatur torfikacji

śruty rzepakowej i PKSu otrzymano natomiast poniżej 50% ubytku masy. Różnice te mogą wynikać z różnej kompozycji paliw, tj. różnych zawartości części lotnych, popiołu i stałej masy palnej, wyniki analizy technicznej zestawiono w Tab. 2. Biomasa ze śruty rzepakowej i PKSu zawierają o ok 10% mniej części lotnych niż słoma i zrębki co może mieć bezpośredni wpływ na wielkość końcowego ubytku masy.

Na rys. 7 zestawione zostały szybkości ubytku masy w czasie dla badanych biomas. Najszybszy ubytek masy wykazuje słoma pszenna. W przypadku pozostałych paliw szybkość jest na podobnym poziomie. Różnice te mogą wynikać z różnych udziałów hemicelulozy, celulozy i ligniny w analizowanych paliwach (tab. 2). Słoma zawiera niewiele hemicelulozy i celulozy, które rozkładają się najszybciej i potrzebu-

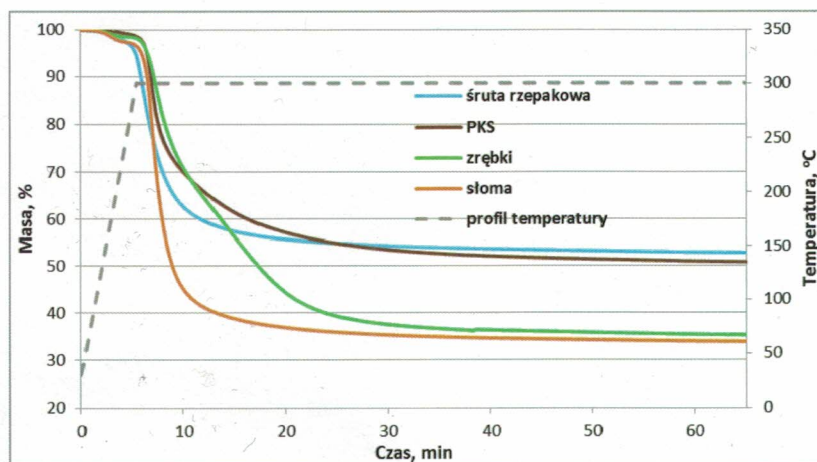
ją najniższej energii do rozkładu. Śruta rzepakowa zawiera najmniej celulozy, hemicelulozy i ligniny, łącznie tylko 35,1%, stąd najmniejszy ubytek masy, pozostałe biomasy zawierają łącznie od ok. 75 do 85%. Zrębki zawierają znacznie mniej hemicelulozy, stąd w pierwszym etapie szybkość ubytku masy mają najmniejszą, zawierają natomiast najwięcej celulozy - 45,8% i 20% ligniny, które rozkładają się nieco wolniej i maksymalny ubytek masy mają w wyższych temperaturach, stąd w późniejszym etapie prażenia zrębek szybkość ubytku masy utrzymuje się jeszcze na wyższym poziomie niż w przypadku pozostałych paliw (rys.7). PKS w swojej strukturze zawiera łącznie najwięcej celulozy, hemicelulozy i ligniny, ale największy udział stanowi lignina (ponad 50%), stąd tak niski ubytek masy w porównaniu ze zrębkami i słomą.

Z analizy wyników badań torfikacji metodą termogravimetryczną dla różnych biomas w temperaturze 300°C wynika, że proces torfikacji kończy się w czasie 25 min, co obrazuje rys. 7.

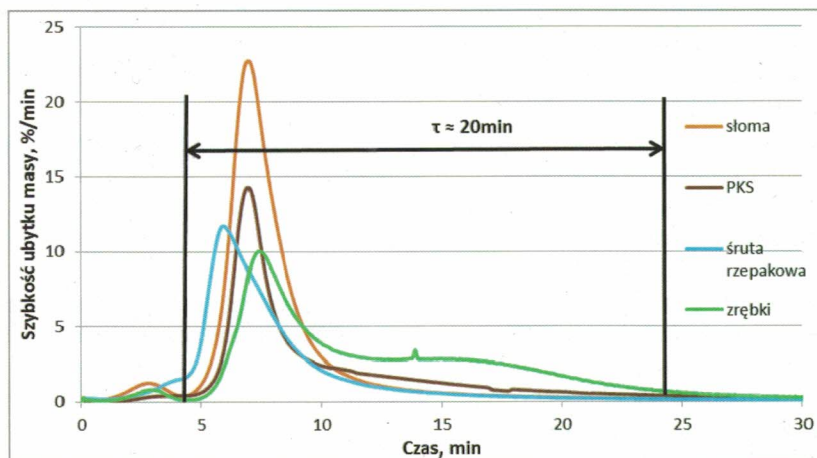
### ■ Auto termiczny reaktor do torfikacji biomasy

Obecnie znanych jest kilka technologii torfikacji jednakże aktualnym problemem pozostaje minimalizacja konsumpcji energii oraz optymalizacja parametrów gwarantujących właściwości hydrofobowych, przemiatowych i paliwowych torfikowanej biomasy. Stąd problem sposobu wykorzystania tor gazu, jak i odzysku ciepła z chłodzenia torfikatu jest ciągle w fazie badań i analiz.

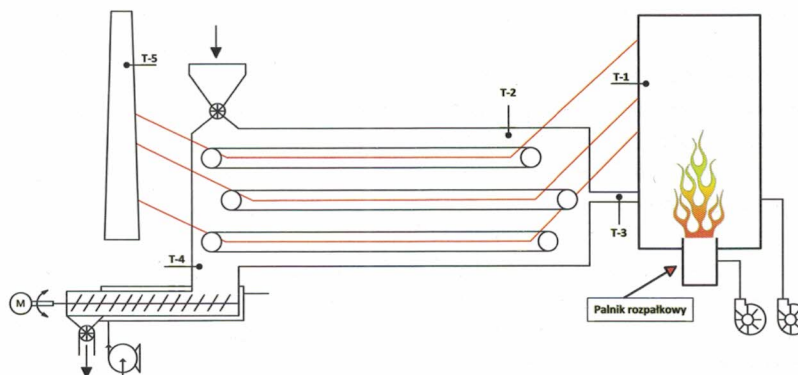
W oparciu o badania laboratoryjne opracowano i wykonano na Politechnice Wrocławskiej instalację do torfikacji w skali pilotowej, schemat której pokazano na rys. 8. Głównym elementem pilotowego stanowiska do waloryzacji paliw niskogatunkowych jest reaktor z układem wewnętrznych ruchomych taśmowych segmentów grzanych od wewnątrz recykulowanymi spalinami pochodzącymi ze spalania gazu pirolitycznego = tor gazu.



Rys. 6. Ubytki masy podczas torfikacji w temperaturze końcowej 300°C dla różnych biomas



Rys. 7. Szybkość ubytku masy w czasie podczas torfikacji w temperaturze końcowej 300°C dla różnych biomas



Rys. 8. Schemat reaktora do torfikacji



Instalacja została opracowana w oparciu o analizę wyników badań laboratoryjnych torfikacji różnych typów biomasy pod kątem doboru odpowiednich warunków procesowych. Istotnym nowatorskim rozwiązaniem w stanowisku jest odbiór torgazu z reaktora oraz jego spalanie w specjalnej dwustopniowej wirowej komorze zintegrowanej przepływowo i cieplnie z reaktorem. Taki układ pozwala na efektywne spalanie gazu o zmieniającym się składzie i zawartości substancji smolistych i pylistych w temperaturze względnie niskiej zbliżonej do wartości rzędu 900°C. Reaktor (rys. 9) zbudowany jest w postaci izolowanej cieplnie wieży o przekroju prostokąta. Wewnątrz reaktora znajdują się trzy segmenty z przenośnikami. Każdy poziom przenośników - segmentów transportuje paliwo w kierunku przeciwnym niż powyższy segment. Segmenty transportowe biomasy w reaktorze grzane są pośrednio spalinami ze spalania torgazu i ewentualnie dodatkowego paliwa. Przestrzeń kanałów spalinowych jest oddzielona od przestrzeni gazowej reaktora, dzięki czemu gaz pochodzący z torfikacji jest odbierany i transportowany do komory paleniskowej. Biomasa w ilości od 100 do 500 kg/godz jest podawana grawitacyjnie do górnej przestrzeni reaktora, poprzez podajniki celkowe. Paliwo, przechodząc przez reaktor ulega rozkładowi termicznemu i opuszcza go przez zsyp umiejscowiony w dolnej jego przestrzeni. Odbiór storfikowanej biomasy odbywa się przez przenośnik ślimakowy, który jest zewnętrznie chłodzony. Taśmociągi stanowiące zasadnicze elementy transportu biomasy w reaktorze posiadają regulację prędkości obrotowej, co umożliwia kontrolę czasu przebywania i wydajności masowej procesu dobieranej indywidualnie do rodzaju paliwa. Instalacja waloryzacji biomasy obecnie pracuje w zakresie temperatur 220-350°C. Rozruch ze stanu zimnego odbywa się za pomocą palnika olejowego. Po osiągnięciu w instalacji wymaganej temperatury załączone zostaje podawanie biomasy, po pewnym



Rys. 9. Reaktor do torfikacji biomasy

czasie palnik jest wyłączany i komora spalania zasilana jest torgazem z reaktora dla większości badanych biomas o ograniczonej zawartości wilgoci.

Temperatura w komorze spalania regulowana jest ilością podanego powietrza mieszającego i utrzymywana jest na poziomie nie przekraczającym 800°C.

Widok, prototypowej instalacji auto-termicznego reaktora w połączeniu z wirową komorą spalania torgazu przedstawia rys. 9. W pracy zawarto wyniki z torfikacji łupin ziaren palmowych (PKS). PKS z powodu zawartości pozostałości oleju palmowego ma nieco wyższą wartość opałową niż agro-biomasa czy biomasa drzewna. PKS jest dobrej jakości paliwem biomasowym o równomiernym rozkładzie wielkości i niskiej zawartości wilgoci. Zawartość wilgoci w PKSie jest w zakresie 10-15%. PKS jest biomasą o dominującym udziale ligniny [17], ale wadą tego biopaliwa jest jego niska zdolność przemiałowa. Prażenie ma na celu nie tylko poprawę wartości energetycznej, ale również poprawę zdolności przemiałowej po torfikacji.

Testy torfikacji PKS-u były prowadzone dla ustalonego czasu przebywania, ale w różnych temperaturach od

200°C, 250°C, 270°C i 300°C. Podczas testów mierzono skład torgazu i zaobserwowano, że głównymi składnikami gazów z torfikacji jest CO<sub>2</sub>, CO i CH<sub>4</sub>. Obserwowano również śladowe ilości wodoru i ciężkich węglowodorów co znacznie wpływa na kaloryczność torgazu i pozwala na spalanie, a tym samym dostarczanie ciepła do prażenia. Przykładowy skład gazu z procesu torfikacji w 250°C zamieszczono w tab. 3. Głównymi składnikami gazu jest dwutlenek i tlenek węgla, które stanowią ok. 90% oraz metan (4,678%) i wodoru (1,564%). Udział pozostałych składników jest poniżej 1%. Obliczeniowa wartość opałowa torgazu dla danych z tab. 3 wynosi prawie 7,5 MJ/m<sup>3</sup>.

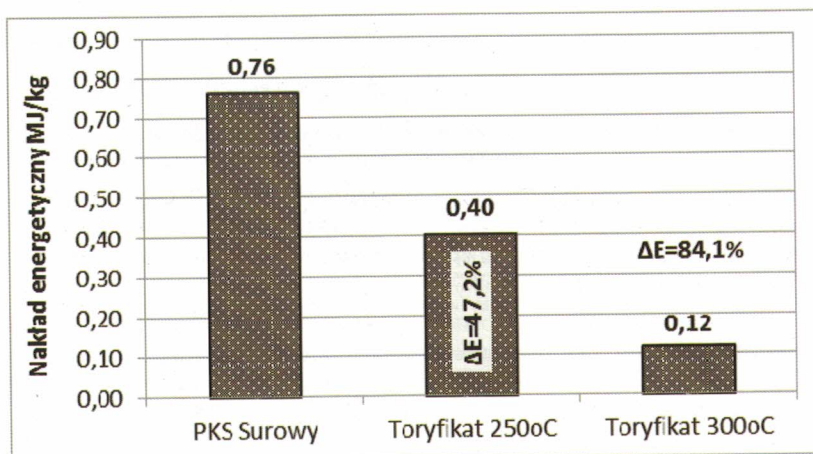
Z kolei głównymi składnikami smoły wytrąconej z oczyszczenia torgazu do analizy są związki aromatyczne, fenole, krezole i kwasy (np.: 2-metoksy-4-(1-propenyl) fenol, furfural, kwas oleinowy, kwas palmitynowy, 2-metoksy-4-proplofenol). Zidentyfikowane związki, które mają charakter fenolowy, ze względu na aromatyczność tych związków powodują, że proces torfikacji jest uciążliwy

Autorzy [6] jako produkty gazowe wykrywane podczas torfikacji termo-



Tab. 3. Skład gazu pirolitycznego z torfikacji PKSu w temp 25

GASS COMPOSITION acc. to PN-EN ISO 6975:2005 and ASTM D1946, GPA 2286, IP 345, determination GC-PE Autosystem XL-ARNEL M 2008	
Gaz z torfikacji PKS w temperaturze 250°C	
C7+ [mol. %]	0.450
DIMETHYL + ETHYLENE [mol. %]	0.573
PROPANE + PROPENE [mol. %]	0.462
I-BUTANE [mol. %]	0.228
N-BUTANE [mol. %]	0.157
I-PENTANE [mol. %]	0.001
N-PENTANE [mol. %]	0.222
2.2 DIMETHYLBUTANE [mol. %]	0.372
2 METHYLPENTANE [mol. %]	0.004
3-METHYLPENTANE [mol. %]	0.372
N-HEXANE [mol. %]	0.000
CO2 [mol. %]	62.563
OXYGEN [mol. %]	0.000
NITROGEN [mol. %]	0.992
METHANE [mol. %]	4.678
CARBON OXIDE [mol. %]	27.362
HYDROGEN [mol. %]	1.564
Values calculated acc. to PN-EN ISO-6976:2008	
HHV H <sub>0</sub> [MJ/m <sup>3</sup> ] (0°C, 101,335 kPa)	7.880
LHV H [MJ/m <sup>3</sup> ] (0°C, 101,335 kPa)	7.483
Density [kg/m <sup>3</sup> ] (0°C, 101,335 kPa)	1.674
Relative density (0°C, 101,335 kPa)	1.295
Gas Wobbe Index W [MJ/m <sup>3</sup> ]	6.925
Gas Wobbe Index W [MJ/m <sup>3</sup> ]	6.576



Rys. 8. Nakład energetyczny na zmielenie 1kg próbki biomasy surowej i po torfikacji

grawimetrycznej połączonej z analizą FTIR miazgi trzcinowatej podają: formaldehyd, aldehyd octowy, kwas octowy, kwas mrówkowy, aceton i metanol oraz śladowe ilości fenolu, furfuralu i amoniaku.

Zwiększanie temperatury torfikacji PKSu powodowało zwiększenie zawartości popiołu i zmniejszenie części lotnych w otrzymanych torfikatach. W zbadanych torfikatach obserwowano wzrost pierwiastka C i spadek zawartości tlenu co skutkowało podwyższeniem gęstości energetycznej biomasy (tab. 4).

Dokonano również oceny zużycia energii w trakcie mielenia PKSu surowego i po torfikacji w temperaturach 250°C i 300°C. Wyniki pokazano na rys.10. Zaobserwowano znaczny spadek zapotrzebowania energetycznego na mielenie. W przypadku torfikatu uzyskanego po prażeniu PKSu w 250°C uzyskano zmniejszenie wydatku energetycznego o 47,2%, a po prażeniu w 300°C wydatek energetyczny uległ zmniejszeniu aż o 84,1% w porównaniu do surowej biomasy. Uzyskane wyniki są zgodne z obserwacjami wykonanymi przez [2] i [15].

## Wnioski

Z przeprowadzonych badań torfikacji metodą termogravimetryczną dla różnych biomas i w reaktorze w skali pilotowej torfikacji PKSu, w temperaturze 300°C wynika, że odpowiedni czas torfikacji jest rzędu ok 20-30 min. Należy podkreślić, że torfikowany PKS zawierał jedynie 13% wilgoci. W przypadku torfikacji innych paliw, w tym np. zrębek, które mogą zawierać ponad 50% wilgoci konieczne jest wydłużenie czasu torfikacji potrzebnego do wstępnego podsuszenia biomasy. Usunięta jednak woda z paliwa wpływa znacząco na pogorszenie jakości tor-gazu. Aby tego uniknąć konieczne jest dodatkowe wcześniejsze zastosowanie suszarki i takie rozwiązania już istnieją lub wydzielone w torfikatorze osobnej strefy do podsuszenia biomasy. Takie rozwiązanie będzie przedmiotem kolejnych etapów modernizacji stanowi-



**Tab. 4. Analizy PKS-u surowego i po toryfikacji w różnych temperaturach, % suchej masy**

	Jednostka	PKS-raw	PKS 200	PKS 250	PKS 270	PKS 300
<b>Analiza techniczna</b>						
Wilgoć	%	13.0	6.0	5.1	4.7	5.0
Popiół <sup>d</sup>	%	4.4	5.5	6.8	8.0	8.7
VM <sup>d</sup>	%	76,0	72.5	64.5	59.7	57.1
FC <sup>d</sup>	%	19.6	22.0	28.7	32.3	34.2
LHV <sup>d</sup>	MJ/kg	16.52	19.65	20.27	19.83	20.57
<b>Analiza elementarna</b>						
C <sup>d</sup>	%	51.83	54.96	55.70	53.91	56.31
H <sup>d</sup>	%	6.28	5.93	5.10	5.37	5.56
O <sup>d</sup>	%	37.03	33.01	31.79	32.03	28.81
N <sup>d</sup>	%	0.44	0.50	0.50	0.59	0.76

ska pilotowego do auto termicznej walerizacji biomasy.

Z punktu widzenia bilansu energetycznego głębokie prażenie powyżej 320°C nie jest zalecane, ponieważ w temperaturze powyżej 300-320°C, następuje jednoczesny rozkład ligniny i celulozy, co może powodować powsta-

wanie smoły i trudności z transportem tor-gazu do palnika i kolejno niemożność peletyzacji bez lepszca. Ubytek ligniny pogarsza właściwości toryfikowanej biomasy w zakresie możliwości peletyzacji.

Toryfikacja powoduje usunięcie wilgoci, zmniejszenie zawartości części

lotnych i zwiększenie „kruchości” biomasy, stąd znaczny spadek konsumpcji energii na mielenie oraz wzrost gęstości energetycznej biomasy. W wyniku zmiany właściwości biomasy toryfikowanej w połączeniu z jej peletyzacją, toryfikacja może się w znacznym stopniu przyczynić do minimalizacji kosztów logistycznych i zwiększenia ekonomicznego zasięgu transportu biomasy do elektrowni.

Instalacja pokazana na rys. 9 umożliwia prowadzenie badań nad produkcją nowych, czystych jak i wysokokalorycznych paliw z niskogatunkowych paliw biomasowych, odpadowych i kopalnych wraz z doбором dodatków pozwalających na usunięcie np. związków metali alkalicznych i chloru [8].

Przedstawione wyniki uzyskano w ramach prowadzenia badań w projekcie:

- Biocoal For Power Generation, Akronim: BioPoGen
- Projekt finansowany ze środków: EIT Knowledge & Innovation Community KIC InnoEnergy □

## Bibliografia

- [1] DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY 2009/28/WE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywę 2001/77/WE oraz 2003/30/WE, z dnia 23 kwietnia 2009 r.
- [2] P. C. A. Bergman, A. R. Boersma, R. W. R. Zwart i J. H. A. Kiel, *Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations "BIOCOAL"*, 2005.
- [3] H. Pawlak-Kruczek, M. Czerep, J. Zgóra i P. Kruczek, *Torrefaction of biomass in special construction quasi-auto-thermal reactor*, "w *The Clearwater Clean Coal Conference: proceedings of the 39th International Technical Conference on Clean Coal & Fuel Systems, June 1 to 5, 2014, Clearwater, Florida, USA Coal Technologies Associates*, [2014]. s. 1-10.
- [4] J. Li, X. Zhang, H. Kruczek, W. Yang i P. Kruczek, *Process simulation of co-firing torrefied biomass in a 220 MWe coal-fired power plant*. *Energy Conversion and Management*. 2014, vol. 84, s. 503-511.
- [5] A. Uslu, A. P. C. Faaij i P. C. A. Bergman, *Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation*. *Energy* 33 (2008) 1206-1223.
- [6] T. G. Bridgeman, J. M. Jones, I. Shield i P. T. Williams, *Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties*, *Fuel* 87, p. 844-856, 2008.
- [7] K. Svoboda, M. Pohorely, M. Hartman i J. Martinec, *Pretreatment and feeding of biomass for pulverized entrained flow gasification*. *Fuel Process Technology* 2009; 90, 629-635.
- [8] H. Pawlak-Kruczek, J. Zgóra i K. Krochmalny, *Characterization of torrefied biomass depends on process condition*, "proceedings of the 40th International Technical Conference on Clean Coal & Fuel Systems, May 31 to June 4, 2015, Clearwater, Florida, USA.
- [9] T.-I. Ohm, J.-S. Chae i J.-K. Kim, *Study on the characteristics of biomass for co-combustion in coal power plant*, "w 1st 3R International Scientific Conference (3RINCS 2014).
- [10] M. Jakubiak i W. Kordylewski, *Toryfikacja Biomasy*. *Archiwum Spalania*, Vol. 10 (2010).
- [11] M. Kopczyński i J. Zuwała, *Toryfikacja biomasy drogą do eliminacji barier technologicznych wielkoskalowego jej współspalania*. *Polityka Energetyczna*, T. 16, z. 4, pp. 271-284, 2013.
- [12] D. Dekarz, *Jakość pracy instalacji młynowej a parametry pracy kotła*, "Energetyka Ciepła i Zawodowa t. 6, 20-25., 2012.
- [13] M. Kopczyński, K. Glód i J. Zuwała, *Analiza potencjalnych zagrożeń pożarowych podczas współmielenia biomasy i węgla dla procesów ich bezpośredniego współspalania*, *Chemik* t. 65, nr 6, 580-589., 2011.
- [14] H. Pawlak-Kruczek i J. Zuwała, *Utilization of biomass and waste for heat and power production in Poland*, "International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, Clearwater, Florida, USA, June 1-5, 2008.
- [15] P. C. A. Bergman, A. R. Boersma, J. H. A. Kiel, M. J. Prins, K. J. Ptasinski i F. J. J. G. Janssen, *Torrefaction for entrained flow gasification of biomass*. In: *Van Swaaij WPM, Fjällström T, Helm P, Grassi A, editors*. Second world biomass conference, Rome, Italy. ETA-Florence and WIP-Munich; 2004. p. 679-682.
- [16] M. Prins, K. Ptasinski i F. Janssen, *Torrefaction of wood. Part 1: Weight loss kinetics*, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, pp. 28-34, 2006.
- [17] S.-J. Kim, S.-H. Jung i J.-S. Kim, *Fast pyrolysis of palm kernel shells: Influence of operation parameters on the bio-oil yield and the yield of phenol and phenolic compounds*, *Bioresource Technology* 101 (2010) 9294-9300.
- [18] K. Mościcki, Ł. Niedźwiecki, P. Owczarek i M. Wnukowski, *Commoditization of biomass: dry torrefaction and pelletization—a review*. *Journal of Power Technologies* 94 (4) (2014) 233-249.