

# Ocena właściwości biomasy wykorzystywanej do celów energetycznych

Barbara JAGUSTYN, Nina BAŹTOREK-GIESA, Blanka WILK – Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2011, 65, 6, 557-563

## Wstęp

Konieczność przeciwdziałania zachodzącym zmianom klimatycznym wymusza podejmowanie działań zmierzających do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych [1]. Polska akceptując postanowienia zawarte w Protokole z Kioto, zobowiązała się do redukcji emisji gazów powodujących efekt cieplarniany. Jednym z rozwiązań jest zastępowanie kopalnych źródeł energii źródłami odnawialnymi, między innymi biomasa roślinną. Stopień wykorzystania biomasy jest uzależniony od wielkości zasobów oraz technologii przetwarzania.

W energetyce najczęściej stosowana jest biomasa drzewna w postaci zrębków, trocin, peletów i brykietów. Spalana jest również kora, słoma oraz rośliny z plantacji, np. wierzba energetyczna, miskant olbrzymi, słazowiec pensylwański, topinambur. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008 r. [2], z późniejszymi zmianami z dnia 23 lutego 2010 r. [3], narzuca obowiązek wprowadzania w całkowitej ilości biomasy współspalanej z paliwami konwencjonalnymi, ściśle określonego udziału biomasy pochodzącej z upraw energetycznych lub odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz przemysłu przetwarzającego jej produkty, a także części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji oraz ziaren zbóż niespełniających wymagań jakościowych dla zbóż w zakupie interwencyjnym i ziaren zbóż, które nie podlegają zakupowi interwencyjnemu, z wyłączeniem odpadów i pozostałości z produkcji leśnej, a także przemysłu przetwarzającego jej produkty. W przygotowanym projekcie Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dn. 17.02.2011 r. [4], udział biomasy, spoza leśnictwa i przemysłu przetwarzającego jego produkty, ma wynosić: 20% w roku 2011 i 50% (!) w roku 2020 r.

W związku z obowiązkiem wprowadzenia do procesu współspalania coraz większego udziału biomasy spoza leśnictwa, oraz brakiem możliwości zaspokojenia tych potrzeb z jednego lub kilku źródeł, wciąż wzrasta ilość nowych rodzajów biomasy spalanych i współspalanych w energetyce. Biomasa ta, pochodząca również z zagranicy, charakteryzuje się zróżnicowanymi właściwościami fizykochemicznymi. Duża różnorodność oferowanej przez dostawców biomasy, wymaga dokładnego poznania jej właściwości oraz określenia jej wpływu na proces oraz instalacje przy zastosowaniu w energetyce. Celowym jest więc prowadzenie ciągłej kontroli parametrów jakościowych biomasy. W Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrzu od wielu lat prowadzone są badania właściwości fizykochemicznych różnego rodzaju biomasy stosowanej w krajowej energetyce, z wykorzystaniem własnych procedur badawczych.

## Właściwości fizykochemiczne biomasy

Właściwości fizykochemiczne biomasy różnią się od właściwości węgla kamiennego, najczęściej spalanego w kotłach energetycznych (tab. 1). Różnice te występują w:

- podstawowych parametrach charakteryzujących przydatność paliwa do celów energetycznych, takich jak wartość opałowa, zawartość wilgoci, popiołu oraz węgla całkowitego
- zawartościach chloru, siarki całkowitej i azotu, które mają negatywny wpływ, zarówno na środowisko naturalne, jak i na stosowane w procesie spalania i współspalania instalacje technologiczne
- składzie chemicznym popiołów, a zwłaszcza w zawartości krzemu, wapnia, fosforu i potasu
- charakterystycznych temperaturach topliwości popiołów.

Tablica 1

Właściwości węgla oraz biomasy stałej

Parametr	Węgiel kamienny	Węgiel brunatny	Biomasa drzewna	Biomasa "agro"
$W_t^r$ , %	3,2 - 19,1	10,9 - 54,6	4,9 - 68,5	6,1 - 82,2
$A^d$ , %	3,5 - 27,9	7,8 - 20,3	0,3 - 6,9	0,5 - 44,4
$S_t^d$ , %	0,32 - 1,17	0,69 - 1,10	< 0,02 - 0,08	0,03 - 0,67
$Q_t^r$ , MJ/kg	21,1 - 27,7	7,8 - 18,4	4,4 - 18,4	1,1 - 24,5
$Cl^d$ , %	0,020 - 0,159	< 0,005 - 0,029	< 0,005 - 0,057	< 0,005 - 1,168
$C_t^d$ , %	49,7 - 78,4	41,7 - 56,8	45,2 - 51,7	27,2 - 59,1
$N^d$ , %	0,54 - 1,51	0,31 - 0,98	0,12 - 0,92	0,16 - 6,45

$W_t^r$  – zawartość wilgoci całkowitej w stanie roboczym,  $A^d$  – zawartość popiołu w stanie suchym,  $S_t^d$  – zawartość siarki całkowitej w stanie suchym,  $Q_t^r$  – wartość opałowa w stanie roboczym,  $Cl^d$  – zawartość chloru w stanie suchym,  $C_t^d$  – zawartość węgla całkowitego w stanie suchym,  $N^d$  – zawartość azotu w stanie suchym

W przemyśle energetycznym systematycznie wzrasta udział spalanej i współspalanej biomasy „agro”. Zmienność jej właściwości fizykochemicznych może być powodem zakłóceń w prawidłowej pracy urządzeń energetycznych. W tablicy 2 przedstawiono wartości podstawowych parametrów jakościowych dla przykładowych rodzajów biomasy pochodzącej z upraw energetycznych, z produkcji rolnej i z przetwórstwa produktów rolnych, analizowanej w Laboratorium Paliw i Węgla Aktywnych IChPW [5].

Tablica 2

Podstawowe parametry charakteryzujące przydatność paliwa do celów energetycznych

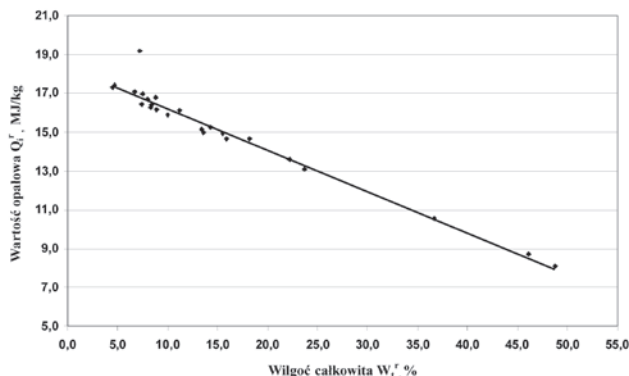
Rodzaj biomasy	Parametry			
	$W_t^r$ , %	$Q_t^r$ , MJ/kg	$A^d$ , %	$C_t^d$ , %
Wierzba energetyczna	4,5 - 52,9	7,0 - 19,2	0,3 - 10,8	49,0 - 53,8
Słazowiec pensylwański	6,9 - 13,6	14,5 - 16,1	2,2 - 4,5	47,8 - 49,9
Miskant	7,7 - 31,0	11,1 - 16,1	1,6 - 5,1	47,4 - 49,9
Sorgo	12,0 - 81,6	1,1 - 10,9	6,6 - 44,4	27,2 - 46,7
Palma olejowa	2,5 - 17,7	14,9 - 24,5	1,2 - 6,5	48,6 - 59,1
Kukurydza – kolby	9,1 - 45,5	6,9 - 17,0	1,9 - 21,2	40,5 - 49,5
Słoma rzepakowa	10,1 - 17,3	13,0 - 15,4	4,0 - 10,2	46,0 - 49,6
Łuski słonecznika	6,0 - 41,0	10,0 - 19,3	2,6 - 11,2	50,7 - 53,8
Susz owocowy	12,2 - 82,2	1,6 - 16,4	0,9 - 4,4	50,4 - 54,2
Wytloki z oliwek	5,1 - 53,8	8,5 - 17,4	3,2 - 12,4	49,1 - 52,1
Wysłodki buraczane	9,9 - 11,9	13,4 - 15,0	3,7 - 9,5	44,9
Łuski kakaowca	7,6 - 12,3	14,9 - 18,4	1,7 - 10,1	47,3 - 54,5
Łupiny kokosa	9,0 - 20,5	16,0 - 16,9	0,5 - 2,5	53,0 - 53,9
Nanercz zachodni	6,1	21,7	2,8	58,7

$W_t^r$  – zawartość wilgoci całkowitej w stanie roboczym,  $Q_t^r$  – wartość opałowa w stanie roboczym,  $A^d$  – zawartość popiołu w stanie suchym,  $C_t^d$  – zawartość węgla całkowitego w stanie suchym

## Wartość opałowa

Podstawowym parametrem oceny surowców energetycznych jest wartość opałowa. Zależy ona w dużej mierze od zawartości wilgoci całkowitej. Dla danego rodzaju paliwa, o nieziennej zawartości popiołu oraz składników palnych, wraz ze wzrostem zawartości wilgoci całkowitej obniża się jego wartość opałowa (przykładowo dla biomasy - rysunek 1).

Na podstawie prowadzonych w IChPW badań stwierdzono, że wartość opałowa biomasy drzewnej jest niższa niż biomasy „agro”, dla porównywalnej zawartości wilgoci całkowitej. Najwyższą wartością opałową charakteryzowały się próbki nanercza zachodniego oraz palmy olejowej (powyżej 21 MJ/kg).



Rys. 1. Zależność wartości opałowej biomasy od zawartości wilgoci

## Zawartość wilgoci całkowitej

Wilgotność biomasy jest istotnym problemem w procesie spalania i współspalania. Surowa biomasa stała charakteryzuje się wysokimi zawartościami wilgoci całkowitej. Zawartość wilgoci obniża wartość opałową paliwa, gdyż część generowanego ciepła jest tracona na ogrzanie i odparowanie wilgoci. Wzrost zawartości wilgoci z reguły obniża wydajność urządzeń stosowanych w operacjach jednostkowych; przykładem może być rozdrabnianie biomasy, gdzie duża zawartość wilgoci wpływa na pogorszenie dynamiki pracy młynów węglowych [6]. Zawartość wilgoci zależy między innymi od:

- części rośliny, z której pochodzi biomasa (np. kora, pień, łodygi, liście, bulwy, nasiona, owoce)
- pory ścięcia (większą zawartością wilgoci charakteryzuje się biomasa pozyskiwana wiosną i latem, mniejszą - jesienią i zimą)
- warunków transportu i przechowywania.

W celu obniżenia zawartości wilgoci całkowitej i podwyższenia wartości opałowej, biomasa może być poddawana peletyzacji lub brykietowaniu. Dzięki tym procesom poprawie ulega również jednorodność biomasy i następuje wzrost jej gęstości nasypowej [7].

Sucha biomasa przyspiesza i stabilizuje zapłon, wilgotna powoduje przesunięcie jądra płomienia do górnej części komory paleniskowej. Wpływa to na przejmowanie ciepła zarówno w komorze paleniskowej, jak i w ciągu konwekcyjnym kotła [6].

## Zawartość chloru, siarki i azotu

Chlor, siarka i azot są niepożądanymi składnikami paliwa ze względu na ich szkodliwe działanie na środowisko naturalne. Chlor i siarka dodatkowo wywołują korozję urządzeń technologicznych stosowanych w procesach spalania [6, 8, 9]. Zawartość chloru, siarki całkowitej i azotu w wybranych rodzajach biomasy przedstawiono w tabelicy 3.

Zawartość chloru w biomasy drzewnej wynosi od poniżej 0,005% do 0,057%, siarki całkowitej od poniżej 0,02% do 0,08%, natomiast azotu od 0,12% do 0,92%.

W przypadku roślin uprawnych, zawartość chloru może wynosić nawet do ponad 1,0%, siarki do 0,67%, azotu do 6,45%. Wartości te są wyższe niż w przypadku węgla kamiennego.

Wysoka zawartość chloru, w przypadku roślin uprawnych, jest związana między innymi z zastosowaniem potasowego środka nawożającego,

którym najczęściej jest chlorek potasu (KCl). Zastąpienie chlorku potasu siarczanem ( $K_2SO_4$ ) może spowodować niemal pięciokrotne obniżenie zawartości chloru w uprawianej biomasy. Świadczą o tym badania przeprowadzone na ślázowcu pensylwańskim [1].

Tablica 3

## Składniki biomasy działające szkodliwie na środowisko naturalne i instalacje technologiczne

Rodzaj biomasy	Parametry		
	Cl <sup>d</sup> , %	S <sub>t</sub> <sup>d</sup> , %	N <sup>d</sup> , %
Wierzba energetyczna	<0,005 - 0,148	<0,02 - 0,32	0,16 - 2,27
Ślázowiec pensylwański	0,019 - 0,166	0,03 - 0,08	0,24 - 0,64
Miskant	0,030 - 0,363	0,04 - 0,12	0,22 - 0,79
Sorgo	<0,005 - 0,380	0,06 - 0,21	0,54 - 1,43
Palma olejowa	<0,005 - 0,220	0,02 - 0,26	0,39 - 2,82
Kukurydza – kolby	0,045 - 0,352	0,04 - 0,19	0,51 - 1,70
Słoma rzepakowa	0,295 - 0,713	0,14 - 0,35	0,32 - 2,73
Łuski słonecznika	0,048 - 0,215	0,10 - 0,59	0,15 - 6,45
Susz owocowy	0,029 - 0,227	0,03 - 0,25	0,56 - 2,63
Wytłoki z oliwek	0,174 - 1,168	0,08 - 0,17	1,33 - 1,87
Wysłodki buraczane	<0,005 - 0,328	0,08 - 0,42	-
Łuski kakaowca	<0,005 - 0,130	0,03 - 0,19	0,44 - 2,31
Łupiny kokosa	0,038 - 0,102	<0,02 - 0,06	0,46
Nanercza zachodni	<0,005	0,11	1,24

Cl<sup>d</sup> – zawartość chloru w stanie suchym, S<sub>t</sub><sup>d</sup> – zawartość siarki całkowitej w stanie suchym, N<sup>d</sup> – zawartość azotu w stanie suchym

Współspalanie niektórych rodzajów biomasy (np. słoma, liście, kora drzew) może spowodować między innymi wzrost zagrożenia przegrzewaczy pary korozją chlorkową, związaną ze wzrostem udziału Cl w paliwie. Korozja ta jest nierozdzielnie związana z osadami popiołowymi pokrywającymi rury [6, 10]. Typ osadu, ich kształt i grubość zależą od stosunku S/Cl w paliwie. Przyjmuje się, że przy stosunku molowym S/Cl > 2,2 korozja chlorkowa przestaje być groźna (nie we wszystkich układach spalania warunek ten się sprawdza).

Zastosowanie w procesach spalania i współspalania biomasy o dużej zawartości azotu (np. łuski słonecznika), wpłynie na zwiększenie emisji NO<sub>x</sub> do środowiska.

## Popiół i jego skład chemiczny

Zawartość popiołu w paliwie niekorzystnie wpływa na wartość energetyczną paliwa oraz na przebieg procesu spalania. Zależy ona od rodzaju biomasy i wynosi zazwyczaj odpowiednio: dla biomasy drzewnej od 0,3% do 10%, natomiast dla biomasy „agro” jest wyższa i wynosi od 1,3% do 16,3% popiołu. Spośród przedstawionych w tabelicy 2 rodzajów biomasy, najwyższymi zawartościami popiołu charakteryzowały się sorgo (do ok. 44%) i kolby kukurydzy (do ok. 21%).

Niska zawartość popiołu w próbkach biomasy drzewnej jest czynnikiem obniżającym emisję pyłów. W procesach spalania i współspalania biomasy istotna jest nie tylko zawartość popiołu, lecz także jego skład chemiczny (tab. 4).

Popiół z biomasy stosowanej do celów energetycznych charakteryzuje wysoka zawartość wapnia, potasu i fosforu. Wynika to głównie ze struktury samej biomasy, rodzaju gleby, na jakiej jest uprawiana oraz rodzaju stosowanych nawozów podczas jej wzrostu. Na zachowanie się substancji mineralnej przy spalaniu biomasy ma wpływ obecność metali alkalicznych Na, K, Ca oraz chloru i siarki. Sód i potas w wysokich temperaturach spalania odparowują, a w wyższych partiach kotła wchodzi w reakcję z innymi składnikami spalin tworząc związki niskotopliwe, które osadzają się na powierzchniach przegrzewaczy. Proces ten nieco inaczej przebiega w złożu fluidalnym. Tworzenie się osadów w obecności siarczanów, a zwłaszcza związków chloru, znacznie przyspiesza korozję wysokotemperaturową.

Tablica 4

Charakterystyka popiołu z biomasy „agro”

Parametr	Wierzba energetyczna	Miskant	Sorgo	Łuski słonecznika	Zrębka kukurydziana	Susz owocowy	Nanercz zachodni	Ślázowiec pensylwański	Brykiet ze słomy
<b>Skład chemiczny popiołu, %</b>									
SiO <sub>2</sub>	12,51	56,14	45,79	17,49	32,65	16,81	16,53	2,37	32,99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,71	1,14	2,27	3,99	0,62	2,74	1,96	<0,01	2,78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,27	0,96	0,88	1,39	0,67	3,57	2,40	0,42	0,74
CaO	31,46	11,03	11,09	13,17	8,04	11,93	6,04	48,74	2,70
MgO	6,89	2,78	2,52	3,58	2,29	2,59	3,27	2,40	3,78
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	12,65	3,45	6,62	8,79	14,64	13,17	16,89	4,36	7,97
SO <sub>3</sub>	6,06	3,50	2,20	3,02	0,62	5,64	2,24	2,80	7,64
Mn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,72	0,23	0,06	0,10	0,14	0,12	0,30	0,09	0,27
TiO <sub>2</sub>	0,02	0,08	0,15	<0,01	0,06	0,23	0,18	0,04	0,08
SrO	0,07	0,02	0,02	0,03	0,02	0,06	0,03	0,09	0,03
Na <sub>2</sub> O	0,29	0,51	0,61	0,26	0,21	1,01	1,57	0,34	0,67
K <sub>2</sub> O	23,87	18,17	19,26	38,11	28,65	21,22	35,35	19,52	19,90
<b>Charakterystyczne temperatury topliwości popiołu, °C</b>									
<b>Atmosfera utleniająca (powietrze)</b>									
t <sub>s</sub>	770	730	700	730	700	930	-	760	730
t <sub>A</sub>	1180	790	920	890	840	1210	1130	1420	890
t <sub>B</sub>	1450	1060	1140	-	1090	1420	1210	1450	1120
t <sub>C</sub>	1550	1130	1230	-	1230	1490	1260	1480	1160
<b>Atmosfera półredukująca (mieszanka CO/CO<sub>2</sub> w stosunku objętościowym 3/2)</b>									
t <sub>s</sub>	730	730	790	660	720	730	-	740	690
t <sub>A</sub>	790	840	920	890	950	1150	970	800	860
t <sub>B</sub>	1540	1100	1150	-	1170	1250	1230	1540	1020
t <sub>C</sub>	1540	1370	1250	-	1200	1360	1270	1550	1170

t<sub>s</sub> – temperatura spiekania, t<sub>A</sub> – temperatura mięknięcia, t<sub>B</sub> – temperatura topnienia,

t<sub>C</sub> – temperatura płynięcia

Do ważnych kryteriów oceny paliwa w procesach spalania należą również wskaźniki charakteryzujące zachowanie się popiołu w wysokich temperaturach. Dotyczy to między innymi charakterystycznych temperatur topliwości popiołów. Zależą one od składu chemicznego popiołu oraz atmosfery, w której wykonywane jest oznaczanie. Należy zwrócić uwagę, że wyznaczone w warunkach laboratoryjnych temperatury topliwości popiołów nie uwzględniają konstrukcji kotła oraz warunków eksploatacji. Zjawisko topliwości popiołów ma inny przebieg w przypadku, gdy badane próbki są przez określony czas poddawane stałej temperaturze (np. utrzymywanie próbki w stanie równowagi termicznej przez okres jednej godziny). Wyznaczone w taki sposób temperatury topliwości są niższe [6].

Większość rodzajów biomasy „agro”, w porównaniu z węglem kamiennym i biomasą drzewną [10], charakteryzuje się niższymi temperaturami mięknięcia (t<sub>A</sub>) i topnienia popiołu (t<sub>B</sub>), zarówno w atmosferze utleniającej, jak i półredukującej. Do wyjątków należą: wierzba energetyczna i ślázowiec pensylwański, dla których stwierdzono wyższą temperaturę topnienia popiołu w obu atmosferach (>1400°C) oraz susz owocowy, dla którego temperatura ta jest wyższa tylko w atmosferze utleniającej.

**Podsumowanie**

Mając na uwadze wymogi legislacyjne, narzucające systematyczny wzrost udziału w całkowitej masie spalanej biomasy – biomasy pochodzenia „agro”, należy zwracać szczególną uwagę na jej odpowiedni dobór, zarówno ilościowy, jak i jakościowy.

Na podstawie przedstawionych wyników stwierdzono, że podstawowe różnice między paliwami kopalnymi a biomasą to:

- wyższa zawartość wilgoci w surowej biomasie, która wpływa negatywnie na efektywność procesu spalania oraz wzrost kosztów transportu
- niższa wartość opałowa biomasy
- zbliżony jakościowo skład pierwiastkowy, lecz różny pod względem ich zawartości. Dużą poprawę właściwości użytkowych biomasy pochodzącej z upraw energetycznych można osiągnąć poprzez jej peletyzację. W szczególności dotyczy to poprawy jej jednorodności, obniżenia zawartości wilgoci, a tym samym wzrostu kaloryczności oraz wzrostu gęstości nasypowej.

W związku z wprowadzeniem do procesu współspalania nowych rodzajów biomasy, zawierających znacznie większe ilości chloru, azotu, siarki całkowitej niż biomasa drzewna, celem jest systematyczne prowadzenie kontroli zawartości tych pierwiastków. Wiarygodna identyfikacja procesów spalania i współspalania, określenie składu chemicznego popiołu spalanej biomasy oraz wyznaczenie jego charakterystycznych temperatur topliwości umożliwi bezpieczną eksploatację kotłów energetycznych.

**Literatura**

1. Borkowska H., Lipieński W. 2007. *Zawartość wybranych pierwiastków w biomacie kilku gatunków roślin energetycznych*. Acta Agrophysica. 10, 2, 287-292.
2. Dziennik Ustaw nr 156, poz. 969, Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008 r., w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii.
3. Dziennik Ustaw nr 34, poz. 182, Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 23 lutego 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii.
4. Projekt z dn. 17.02.2011 r., wersja 2.6, Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008 roku, w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii.
5. Baza danych „Karbon”, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla.
6. Ściążko M., Zuwała J., Sobolewski A.: *Przewodnik Metodyczny Procedury bilansowania i rozliczania energii wytwarzanej w procesach półspalania*. Warszawa-Zabrze. 2007.
7. Winnicka G., Matuszek K., Wilk B.: *Rozdział 3.1 Badania właściwości energetycznych, emisyjnych i użytkowych biopaliw uzyskanych ze zbiorów doświadczalnych roślin energetycznych*, monografii pt.: „Nowoczesne technologie pozyskiwania i energetycznego wykorzystywania biomasy”, Instytut Energetyki Warszawa 2010, str. 145 – 158, ISBN 978-83-925924-6-4.
8. Bątopek-Giesa N., Jagustyn B.: *Zawartość chloru w biomasie stałej stosowanej do celów energetycznych*. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych 2009, 40, 396-401, ISSN:1230-783108-7.
9. Jenkins B. M., Baxter L. L., Miles Jr. T. R., Miles T. R.: *Combustion properties of biomass*. Fuel Processing Technology 1998, 54, 17-46.
10. Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M. 2007. *Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych w energetyce*. Wydawnictwo Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla i Politechniki Śląskiej, Zabrze-Gliwice.

Mgr inż. Barbara JAGUSTYN, mgr inż. Nina BĄTOREK - GIESA, mgr inż. Blanka WILK obecnie pracują w Laboratorium Paliw i Węgla Aktywnych Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze. Zainteresowania naukowe: analityka paliw stałych, biomasy, odpadów i paliw alternatywnych.