

Badania właściwości biomasy stałej do celów energetycznych

Researches for solid biomass utilised in power and heat industry

Artykuł recenzował Tadeusz Chmielniak

Słowa kluczowe: badania, właściwości, biomasa, standaryzacja, procedury, energetyka
Keywords: researches, properties, biomass, standardisation, procedures, power production

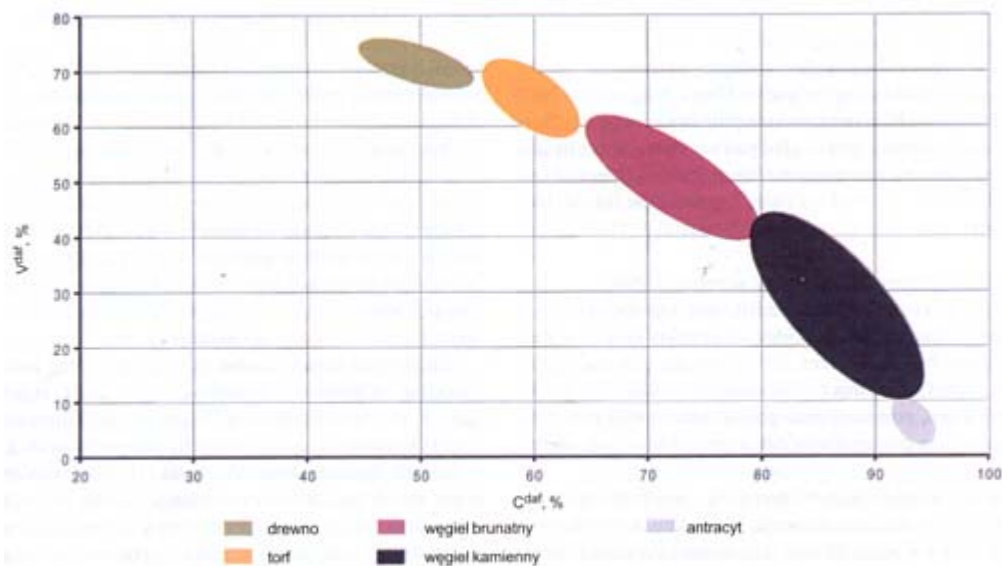
Wprowadzenie

W wielu krajach Unii Europejskiej, w efekcie przyjęcia dokumentów proekologicznych i rozwiązań prawnych, energetyka odnawialna weszła w okres dynamicznego rozwoju. Produkowane dotychczas w Polsce niewielkie ilości energii ze źródeł odnawialnych w około 98 % pochodzą z procesów opartych na spalaniu biomasy, która jako trzecie co do wielkości na świecie źródło energii odnawialnej (OZE) stanowić może znaczący energetycznie substytut paliw kopalnych, zwłaszcza węgla [1]. Biomasa może być pozyskiwana z obszarów leśnych, upraw roślin energetycznych i odzyskiwana wtórnie z odpadów pochodzenia przemysłowego i komunalnego.

Do oceny energetycznej biomasy obowiązują te same zasady, co do oceny tradycyjnych paliw stałych i płynnych.

Do najważniejszych kryteriów należą: wartość opałowa, zawartość wilgoci, popiołu i siarki, charakterystyczne temperatury topliwości popiołu, zawartość części lotnych i uziarnienie [2]. Porównując właściwości energetyczne węgla kamiennego i biomasy stwierdzono, że jakościowo podstawowy skład pierwiastkowy jest taki sam, natomiast różnice występują w składzie ilościowym. Biomasa drzewna zawiera średnio około czterokrotnie więcej tlenu, dwukrotnie mniej węgla oraz znacznie mniej siarki i azotu. Stopień metamorfizmu różnych paliw stałych, poczynając od biomasy drzewnej poprzez węgiel kamienny aż do antracytu zobrazowano na rysunku 1.

Bezdiskusyjną zaletę biomasy stanowi zerowy bilans emisji dwutlenku węgla, podczas procesu spalania. Zawiera ona mniejsze, w porównaniu z węglem, ilości popiołu i chloru. Niekorzystną natomiast cechą biomasy jest jej wysoka i zmienna, w zależności od jej rodzaju i okresu sezonowania, zawartość wilgoci, czego konsekwencją jest niska wartość opałowa. W porównaniu do węgla, biomasa charakteryzuje się dużo wyższą zawartością związków metali alkalicznych (zwłaszcza potasu), wapnia i fosforu, co może prowadzić do wzmożonej korozji oraz narastania agresywnych osadów w kotle podczas jej bezpośredniego spalania. Kolejną różnicą jest znacznie niższa gęstość nasypowa biomasy, co wymaga większych powierzchni składowisk, a także podwyższa koszty transportu [3].



Rys. 1. Stopień metamorfizmu biomasy drzewnej, torfu, węgla i antracytu

Fig. 1. Metamorphism stage of wood biomass, peat, coal and anthracite

Standaryzacja biopaliw stałych

W roku 2000 powołano Europejski Komitet Techniczny CEN/TC 335 Solid Biofuels, którego zadaniem jest prowadzenie prac normalizacyjnych w zakresie biopaliw stałych pochodzących z:

- produktów rolnictwa i leśnictwa,
- odpadów roślinnych z rolnictwa i leśnictwa,
- odpadów roślinnych z przemysłu spożywczego,

- odpadów drzewnych (za wyjątkiem odpadów drzewnych mogących zawierać halogenki organiczne lub metale ciężkie),
- odpadów korkowych.

W ramach tego Komitetu powołano następujące Grupy Robocze [4]:

WG 1 - Terminologia, definicje i określenia Grupie przewodniczą Niemcy. Opracowana i opublikowana w grudniu 2003 roku została Specyfikacja Techniczna CEN/TS 14588 „Biopaliwa stałe. Terminologia definicje, określenia”.

WG 2 — Specyfikacja paliw, rodzaje i zapewnienie jakości Grupie przewodniczą Finlandia i Dania. Na grudzień 2004 zaplanowane było opracowanie projektu końcowego Specyfikacji Technicznej - „Biopaliwa stałe. Specyfikacja paliw i klasy”, natomiast na lipiec 2005 - Specyfikacja Techniczna - „Biopaliwa stałe. Zapewnienie Jakości biopaliw.

WG 3 — Pobieranie próbek i pomniejszanie Grupie przewodniczą Wielka Brytania. Opracowywane są 4 specyfikacje techniczne, których projekty końcowe przewidziane były na styczeń 2005, dotyczą: pobierania próbek, metod pobierania próbek materiału dostarczonego ciężarówkami, pomniejszania próbek oraz metod przygotowania planu pobierania próbek i certyfikatów pobierania.

WG 4 - Metody badań fizycznych i mechanicznych Grupie przewodniczą Szwecja. W grudniu 2004 roku opublikowano 4 specyfikacje techniczne, dotyczące oznaczeń: zawartości wilgoci całkowitej metodą suszarkową część 1 i część 2, zawartości wilgoci w próbce analitycznej metodą suszarkową oraz zawartości popiołu. Na etapie projektów roboczych są specyfikacje, dotyczące metod oznaczania: ciepła spalania i obliczania wartości opałowej, zawartości części lotnych, składu ziarnowego, gęstości nasypowej, wytrzymałości brykietów i wytrzymałości peletów, których projekty końcowe powinny się ukazać do końca 2005 roku oraz specyfikacja dotycząca charakterystycznych temperatur topliwości popiołu, której projekt końcowy zaplanowany jest na rok 2006.

WG 5 — Metody badań chemicznych Grupie przewodniczą Holandia. Na etapie projektów roboczych jest 6 specyfikacji technicznych, dotyczących metod oznaczania zawartości: węgla, wodoru i azotu, siarki całkowitej i chloru, chloru rozpuszczonego w wodzie, podstawowych składników popiołu oraz pierwiastków śladowych, których projekty końcowe planowane są na rok 2005. Opracowanie projektu końcowego specyfikacji technicznej, dotyczącej przeliczania wartości oznaczeń na różne stany paliwa, planowane jest w roku 2006.

Współpracę z Komitetem Technicznym CEN/TC 335 podjął Komitet Techniczny nr 144 Polskiego Komitetu Normalizacyjnego ds. Koksu i Przetworzonych Paliw Stałych. Celem tej współpracy jest opiniowanie oraz implementacja do katalogu norm polskich, wszystkich nowych specyfikacji technicznych i norm europejskich, opracowywanych przez CEN/TC 335. W grudniu 2004 opracowano polską wersję Specyfikacji Technicznej CEN/TS 14588 „Biopaliwa stałe. Terminologia definicje, określenia”, którą przekazano do ustanowienia jako PKN-CEN/TS 14588.

Celem niniejszej publikacji jest przedstawienie wyników prac dotyczących badań właściwości biomasy stałej stosowanej do celów energetycznych, prowadzonych w Laboratorium Karbochemii Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla.

Opracowanie procedur badawczych

W Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla od 2001 roku prowadzone są prace dotyczące badań właściwości biomasy stałej, stosowanej do celów energetycznych. W okresie tym, nie było żadnych norm krajowych ani europejskich dotyczących metod badania właściwości biomasy. Potrzeba opracowania odpowiednich procedur wynikała z wdrożonych w kraju programów wykorzystywania biomasy, dla uzyskania świą-dectw pochodzenia energii z odnawialnych źródeł. W Akredytowanym Laboratorium Karbochemii do chwili obecnej opracowano 11 procedur badawczych, z których 9 ujętych jest w zakresie akredytacji [5, 6].

Pierwszym etapem badań było opracowanie założeń do procedur, na podstawie: krajowych norm dotyczących paliw stałych oraz bardzo skromnych danych literaturowych dotyczących badań biopaliw stałych, prowadzonych głównie w Stanach Zjednoczonych Ameryki [7]. W celu sprawdzenia poprawności tych założeń wykonano, zgodnie z nimi, badania właściwości różnych rodzajów biomasy. Uzyskane wyniki były podstawą do weryfikacji założeń i opracowania ostatecznej wersji procedur. Następnym etapem było przeprowadzenie walidacji opracowanych metod i włączenie ich do zakresu akredytacji. Potwierdzeniem tego jest załączony certyfikat akredytacji laboratorium badawczego Nr AB 081 nadany przez Polskie Centrum Akredytacji wraz z zakresem badań dotyczących biomasy do celów energetycznych (rys. 2).



TYP ANALIZY	PROCEDURA BADAWCZA
Przygotowanie próbek do badań	Q/ZK/P/15/04/A
Właściwości biomasy:	
Zawartość wilgoci całkowitej oraz w próbce analitycznej	Q/ZK/P/15/05/A
Zawartość popiołu	Q/ZK/P/15/06/A
Zawartość części lotnych	Q/ZK/P/15/07/A
Zawartość siarki całkowitej	Q/ZK/P/15/08/A
Zawartość siarki popiołowej	Q/ZK/P/15/10/A
Zawartość węgla, wodoru i azotu	Q/ZK/P/15/09/A
Ciepło spalania i wartość opałowa	Q/ZK/P/15/03/B
Charakterystyczne temperatury topliwości popiołu	Q/ZK/P/15/11/A

Rys. 2. Certyfikat Akredytacji wraz z zakresem badań dotyczących biomasy

Fig. 2. Accreditation Certificate with scope of biomass analysis

W roku 2004 opracowano, zwalidowano i wdrożono do praktyki laboratoryjnej Laboratorium Karbochemii dalsze 2 procedury badawcze, dotyczące metod oznaczania: tlenków disodu i dipotasu oraz składu chemicznego popiołu. Procedury te zostaną ujęte we wniosku o poszerzenie zakresu akredytacji, który zostanie przekazany do Polskiego Centrum Akredytacji, przed planowanym w październiku 2005 r. auditem w nadzorze.

Nowelizacja procedury dotyczącej oznaczania ciepła spalania i obliczania wartości opałowej

W roku 2004 postanowiono, że opracowane w IChPW procedury badawcze zostaną udostępnione laboratoriom przedsiębiorstw energetycznych, uczestnikom organizowanej przez Centrum Badań Akredytowanych Ogólnokrajowej Sieci Laboratoriów Nadzorowanych „LABIOMEN”. Równocześnie przeprowadzono nowelizację procedury dotyczącej oznaczania ciepła spalania i obliczania wartości opałowej. Biorąc pod uwagę możliwości techniczne laboratoriów przedsiębiorstw energetycznych, nie posiadających bardzo drogiego analizatorów służących do oznaczania zawartości wodoru, opracowano formułę pozwalającą na obliczenie zawartości wodoru w próbce biomasy, która to wartość jest niezbędna do wyznaczenia wartości opałowej. Na rysunku 3 przedstawiono porównanie wartości opałowych wyznaczonych z uwzględnieniem zawartości wodoru oznaczonej eksperymentalnie i obliczonej według opracowanej formuły:

$$H^{st} = \frac{100 - (W^{st} + A^{st})}{17}$$

Różnice w wartościach opałowych wahały się w granicach od -90 do +100 kJ/kg i nie przekraczały określonej w procedurze dopuszczalnej różnicy między dwoma oznaczeniami, która wynosi 200 kJ/kg.

Nowelizacja procedury dotyczącej oznaczania zawartości popiołu

Przy opracowaniu pierwszej wersji procedury, dotyczącej oznaczania zawartości popiołu w biomacie, wzięto pod uwagę wytyczne zawarte w następujących normach:

- ASTM D 1102-82 - Standard Test Method for Ash in Wood,
- PN-92/P-50092 - Surowce dla przemysłu papierniczego. Drewno. Analiza chemiczna,
- PN-80/G-04512 - Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości popiołu.

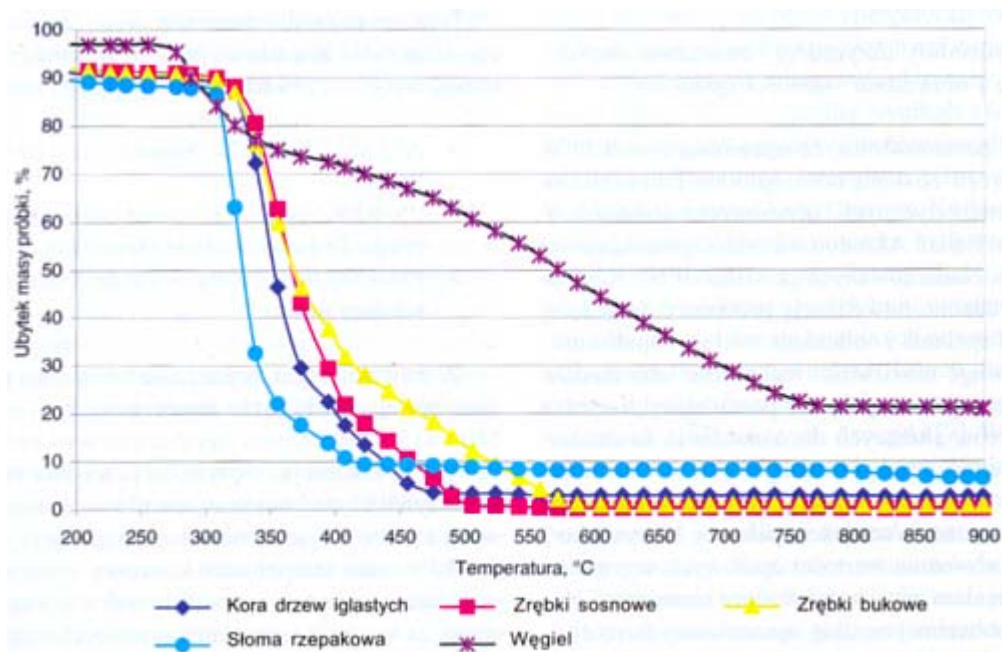
W związku z tym, oznaczanie zawartości popiołu wykonano stosując dwie różne temperatury końcowe oznaczania 580 i 815°C. Różnice w uzyskanych wynikach nie przekraczały 0,2 %. Kierując się tym, że procedura będzie dotyczyła nie tylko czystej biomasy, ale również mieszanek paliwowych z przeważającym udziałem węgla, przyjęto temperaturę 815°C jako temperaturę końcową oznaczania. Podczas oznaczania zawartości popiołu w tych warunkach zaobserwowano, że w czasie spopielenia niektórych rodzajów biomasy następuje topnienie powstającego popiołu i jego częściowe wtapienie się w naczynka pomiarowe. Zjawisko to nie miało istotnego wpływu na wyniki oznaczania zawartości popiołu, ale jego znaczenie zaobserwowano w chwili rozpoczęcia badań nad składem chemicznym popiołu z biomasy. Podjęto więc badania nad określeniem wpływu temperatury spopielenia próbki biomasy na skład chemiczny popiołu [8]. W pierwszym etapie badań spalanie próbek różnego rodzaju biomasy prowadzono w atmosferze tlenu, przy szybkości ogrzewania próbki 5°C/min, do temperatury końcowej 900°C, stosując analizator termogravimetryczny TGA-501 firmy LECO. Dla porównania wykonano również, w tych samych warunkach, analizę węgla energetycznego. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w formie wykresu, na rysunku 4.

Biorąc pod uwagę, że dla wszystkich analizowanych rodzajów biomasy powyżej temperatury 600°C nie następował ubytek masy, stwierdzono, że oznaczanie zawartości popiołu powinny być prowadzone w tej temperaturze.



Rys. 3. Porównanie wartości opałowej obliczonej z uwzględnieniem zawartości wodoru oznaczonej eksperymentalnie i obliczonej według opracowanego wzoru

Fig. 3. Comparison between net calorific value calculated with hydrogen content experimentally determined and calculated according to elaborated formula



Rys. 4. Ubytki masy w procesie spopielenia różnych rodzajów biomasy

Fig. 4. Mass loss of various biomass in incineration process

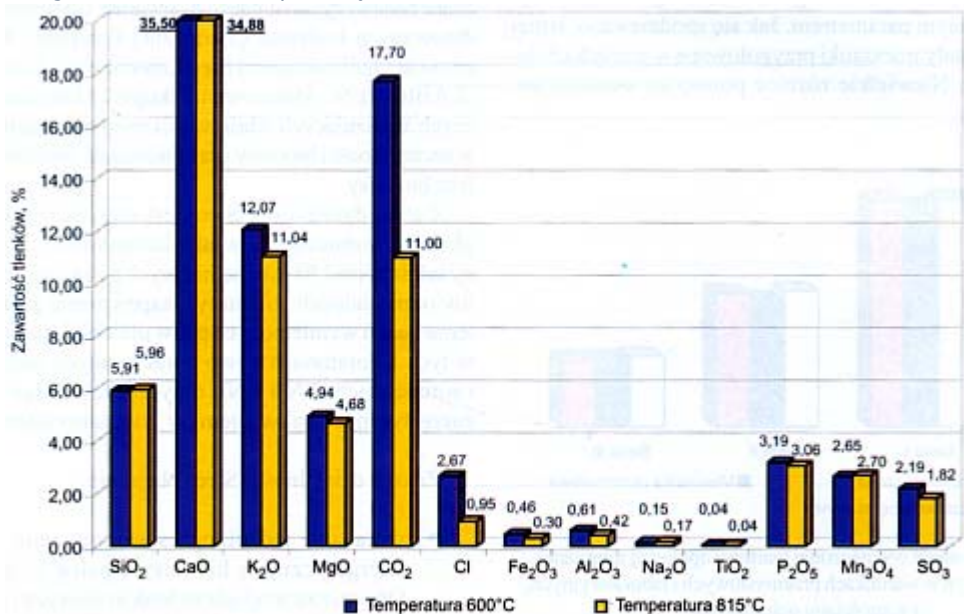
W celu potwierdzenia wyników badań wykonano porównawcze oznaczenia zawartości popiołu w temperaturach 600 i 815°C, przy czym pozostałe warunki oznaczania były zgodne z opisanymi w procedurze. Należy zaznaczyć, że w trakcie spopielenia próbek biomasy w temperaturze 600°C nie zaobserwowano zjawiska topnienia popiołu.

Na rysunku 5 przedstawiono różnice w składzie chemicznym popiołów uzyskanych z biomasy drzewnej, w temperaturach 600 i 815°C. Wyniki oznaczania zawartości popiołu w tych temperaturach oraz analizy ich składu chemicznego wskazują, że:

- w temperaturze 600°C następuje całkowite spopielenie biomasy, o czym świadczy brak węgla organicznego w popiele uzyskanym w tych warunkach,
- podwyższanie temperatury spopielenia do 815°C powoduje dalszy ubytek masy rzędu 10 do 30 %, spowodowany rozkładem substancji mineralnej, czego rezultatem są różnice w składzie chemicznym popiołów.

Konsekwencją tych badań jest wprowadzenie następującej zmiany w procedurze dotyczącej oznaczania zawartości popiołu: w przypadku badania biomasy należy stosować temperaturę końcową oznaczania 600°C, a przypadku

mieszanek węgiel-biomasa nadal temperaturę 815°C.



Rys. 5. Porównanie składu chemicznego popiołów z biomasy uzyskanych w temperaturach 600 i 815°C

Fig. 5. Comparison between chemical composition of ash from biomass obtained in temperature 600 and 815°C

Addytywność parametrów jakościowych mieszanek paliwowych węgiel-biomasa

W Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla przeprowadzono również badania, których celem było sprawdzenie czy wybrane parametry jakościowe mieszanek paliwowych węgiel/biomasa podlegają prawu addytywności [9].

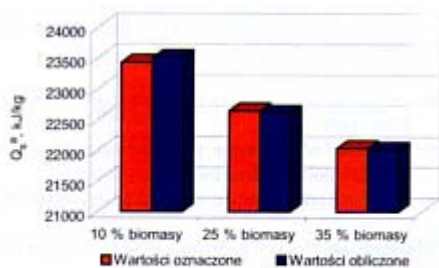
Przedmiotem badań były mieszanki paliwowe węgiel-biomasa oraz ich komponenty. Ocenie jakościowej poddano następujące mieszanki paliwowe:

- mieszanki laboratoryjne, przygotowane z próbek analitycznych,
- mieszanki laboratoryjne, przygotowane bezpośrednio z próbek pobranych ze zwałów,
- mieszanki przygotowane w warunkach przemysłowych.

Dla oceny jakości komponentów i mieszanek wykonano następujące oznaczenia:

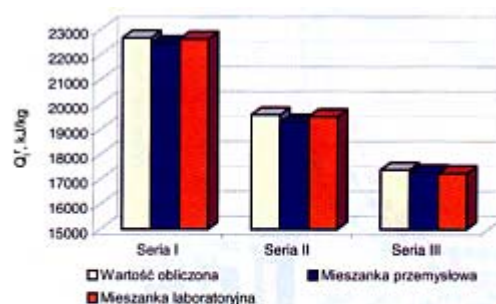
- zawartość wilgoci całkowitej oraz w próbce analitycznej,
- zawartość popiołu,
- zawartość części lotnych,
- ciepło spalania oraz obliczanie wartości opałowej,
- zawartość siarki całkowitej,
- zawartość węgla, wodoru i azotu.

Pierwszym etapem pracy była ocena addytywności wybranych parametrów jakościowych mieszanek węgiel-biomasa, w oparciu o badania właściwości komponentów i mieszanek przygotowanych z próbek analitycznych. Analizowano właściwości mieszanek o różnym udziale biomasy drzewnej w postaci zrębków i trocin. Porównując wartości uzyskanych eksperymentalnie parametrów jakościowych mieszanek, z obliczonymi na podstawie udziału poszczególnych komponentów, stwierdzono że różnice tych wartości mieszczą się w granicach dopuszczalnych wartości, określonych dla poszczególnych oznaczeń. Jest to potwierdzeniem tezy, że parametry te podlegają prawu addytywności. Na rysunku 6 przedstawiono porównanie wartości opałowych wyznaczonych eksperymentalnie dla mieszanek przygotowanych z próbek analitycznych z obliczonymi przy założeniu, że właściwości te podlegają prawu addytywności.



Rys. 6. Wyniki oznaczenia ciepła spalania w mieszanekach o różnym udziale biomasy przygotowanych z próbek analitycznych

Fig. 6. Gross calorific value of blends with different share of biomass prepared from analytical samples



Rys. 7. Porównanie wyznaczonej wartości opałowej mieszanek przygotowanych w warunkach przemysłowych i laboratoryjnych, z wartościami obliczonymi

Fig. 7. Calculated net calorific value in comparison to determined net calorific value for blends prepared in industrial and laboratory conditions

Następnym etapem pracy była ocena jakości mieszanek przygotowanych w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych. Wykonano 3 serie badań dla różnych dostaw węgla i biomasy oraz przygotowanych mieszanek z ich udziałem. Porównanie wartości opałowych wyznaczonych doświadczalnie dla mieszanek przygotowanych w skali przemysłowej i laboratoryjnej z obliczonymi przy założeniu, że właściwości te podlegają prawu addytywności, przedstawiono w formie graficznej na rysunku 7.

Na podstawie uzyskanych wyników należy stwierdzić, że różnice pomiędzy obliczonymi wartościami parametrów jakościowych a oznaczonymi doświadczalnie są większe niż w przypadku mieszanek przygotowanych z próbek analitycznych. Jest to wynikiem gorszej homogenizacji mieszanek, związanej z większym uziarnieniem komponentów mieszanki oraz wpływu zawartości wilgoci całkowitej, która jest najbardziej zmiennym parametrem. Jak się spodziewano, lepiej uśrednione zostały mieszanki przygotowane w warunkach laboratoryjnych. Niewielkie różnice pomiędzy wartościami parametrów jakościowych mieszanki przemysłowej a wartościami obliczonymi i oznaczonymi dla mieszanki laboratoryjnej z pierwszej serii badań, wskazują, że w warunkach przemysłowych można przygotować mieszankę paliwową węgiel-biomasa o ustalonym udziale biomasy. Warunkiem uzyskania mieszanki o prognozowanej, na podstawie wyników badań węgla i biomasy, i stabilnej jakości jest również stosowanie odpowiedniej technologii jej przygotowania, pozwalającej na dokładną homogenizację.

Na tej podstawie przyjęto tezę, że dla celów bilansowania energii odnawialnej, pochodzącej z procesów współspalania węgla i biomasy, należy stosować metody obliczeniowe wykorzystujące zasadę addytywności [10].

Zaznaczyć należy, że nie wszystkie właściwości składników mieszanki węgiel-biomasa podlegają prawu addytywności. Należą do nich, między innymi, charakterystyczne temperatury topliwości popiołu. W tym zakresie, nie jest łatwe do przewidzenia zachowanie się mieszanek w procesie spalania, ponieważ szereg składników mineralnych tworzy eutektyki.

Ogólnokrajowa Sieć Laboratoriów Nadzorowanych „LABIOMEN”

Procedury dotyczące metod oznaczania właściwości biomasy są szczególnie ważne nie tylko z uwagi na kontrolę jakości paliwa, ale również z uwagi na ich podstawowe znaczenie w algorytmie rozliczania energii ze źródeł odnawialnych, a także w procedurach określania „uniknionej” emisji CO₂ (wyznaczana wartość opałowa jest daną wejściową do algorytmów obliczeniowych). W celu uzyskania wiarygodności bilansowania i rozliczania ilości wyprodukowanej energii odnawialnej oraz porównywalności wyników badań właściwości biomasy pomiędzy jej dostawcami i producentami energii, niezbędne jest wprowadzenie ujednoczonych procedur badawczych. Mając to na uwadze, Centrum Badań Akredytowanych Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla zorganizowało Ogólnokrajową Sieć Laboratoriów Nadzorowanych „LABIOMEN”, która obecnie skupia 15 laboratoriów badawczych analizujących właściwości energetyczne paliw stałych, w szczególności biomasy oraz mieszanek paliwowych z udziałem biomasy.

Celem działalności Sieci jest utrzymanie wysokiej biegłości uczestniczących w niej laboratoriów w zakresie oceny właściwości fizykochemicznych paliw stałych, w tym paliw odnawialnych (biomasy), zapewnienie jednolitego systemu badań wymienionych paliw oraz bieżąca implementacja w tych laboratoriach nowo opracowanych norm krajowych i europejskich (PN i EN), dotyczących badań właściwości energetycznych paliw, biomasy oraz paliw alternatywnych.

Zakres działalności Sieci obejmuje:

- wdrażanie jednolitego systemu oceny właściwości energetycznych biomasy i paliw z jej udziałem. Obecnie ze względu na brak krajowych i europejskich norm dotyczących badań biomasy, uczestnicy Sieci stosują ujednoczone procedury badawcze opracowane w IChPW i ujęte w zakresie akredytacji;
- doskonalenie systemu badań właściwości energetycznych paliw stałych, szczególnie biomasy i paliw z udziałem biomasy;
- badania międzylaboratoryjne dla oceny biegłości laboratorium w zakresie badań biomasy i paliw konwencjonalnych;
- wdrażanie nowych technik analitycznych, w tym ustanawianych w najbliższej przyszłości specyfikacji technicznych i norm europejskich w dziedzinie badań biomasy;
- organizację seminariów i szkoleń dla wymiany doświadczeń oraz przedstawiania nowych rozwiązań w analityce paliw stałych i biomasy.

W ramach działalności Sieci, przedstawiciele IChPW przeprowadzają audyty, których celem jest potwierdzenie kompetencji technicznych laboratoriów, w zakresie badań właściwości biomasy. Najważniejszym elementem wykazania

kompetencji technicznych laboratorium, w myśl normy PN-EN ISO/IEC 17025:2001 oraz „Polityki Polskiego Centrum Akredytacji dotyczącej wykorzystywania badań biegłości/porównań między laboratoryjnych w procesach akredytacji i nadzoru laboratorium”, jest uczestnictwo w badaniach międzylaboratoryjnych. Organizacja takich badań jest jednym z podstawowych elementów działalności Sieci.

Jak wynika z merytorycznego programu działalności Sieci „LABIOMEN”, realizuje ona podstawowe, określone normą PN-EN ISO/IEC 17025:2001/Ap.1:2003 wymagania, których spełnienie jest warunkiem uznania kompetencji technicznych laboratorium. Obecnie członkami Sieci są laboratoria analityczne, związane organizacyjnie lub też świadczące stałe usługi dla przedsiębiorstw energetycznych, które stosują technologię spalania lub współspalania biomasy.

Na zebraniu przedstawicieli uczestników Sieci, we wrześniu 2004 roku, powołano: sześciuosobową Radę Sieci, w skład której wchodzi przedstawiciele Uczestników Sieci oraz trzyosobowy Zespół Koordynacyjny, w skład którego wchodzi przedstawiciele IChPW. Zatwierdzono Regulamin Sieci i plan działalności Sieci w okresie najbliższego półroczia.

Pod koniec ubiegłego roku rozpoczęto również wydawanie „@-biuletynu”, przekazywanego drogą elektroniczną Uczestnikom Sieci. Tematyka biuletynu obejmuje zagadnienia związane z bieżącą działalnością Sieci oraz analityką i standaryzacją biomasy stosowanej do celów energetycznych.

Literatura

1. Hycnar J.J. i in., Uwarunkowania współspalania węgla i biomasy. Polityka Energetyczna, 2003, t.6, Zeszyt specjalny, s.309.
2. Zawistowski J., Współspalanie biomasy drzewnej z węglem - szybszy rozwój energetyki odnawialnej. Ekologia Praktyczna, 2003, nr 7/8, s. 8.
3. Kubica K. i in., Współspalanie biomasy z węglem. Polityka Energetyczna, 2003, t. 6, zeszyt specjalny, s. 297.
4. Hein M. i in., International Conference „Standardisation of Solid Biofuels”, materiały konferencyjne, Lipsk, 2004.
5. Kubica K. i in., Nowe metody energetycznego wykorzystania biomasy. Prace IChPW - niepublikowane, 2002.
6. Tramer A. i in., Badania przedstandaryzacyjne dla ujednoczenia krajowego systemu standaryzacji biopaliw z UE. Prace IChPW - niepublikowane, 2003.
7. Wood Handbook, Wood and an Engineering materiał, 1999,
8. Jagustyn B. i in., Opracowanie nowych procedur analitycznych dla oceny biomasy. Prace IChPW - niepublikowane, 2004
9. Winnicka G. i in., Określenie addytywności parametrów jakościowych mieszanek paliwowych węgiel-biomasa. Prace IChPW - niepublikowane, 2003.
10. Zespół autorów pod kierunkiem M. Ściążko: „Propozycje procedur rozliczania energii ze źródeł odnawialnych”. Praca IChPW i Komitetu Technicznego Towarzystwa Gospodarczego Polskie Elekrownie.