

Wpływ współspalania biomasy z paliwami konwencjonalnymi na parametry eksploatacyjne pracy bloków energetycznych

Autor: Dr inż. Jarosław Zuwała - Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla¹⁾

(„Energetyka” – luty 2010)

Wprowadzenie do współspalania z paliwami konwencjonalnymi nowego paliwa, jakim jest biomasa, charakteryzującego się odmiennymi właściwościami fizykochemicznymi pociąga za sobą nie tylko zmianę istniejącej struktury technologicznej z uwagi na konieczność wprowadzenia nowych urządzeń, ale także związane jest ze zmianą warunków eksploatacyjnych urządzeń istniejących.

Dotychczasowe doświadczenia eksploatacyjne związane ze współspalaniem biomasy (m.in. [1-2]) wykazały, że wielkość zużycia energii elektrycznej przez urządzenia pomocnicze jednostki wytwórczej, szczególnie wrażliwe na zmianę rodzaju paliwa (młyny węglowe, wentylatory powietrza czy wentylatory spalin) ulega zmianie w zależności od rodzaju biomasy i jej udziału w spalanej mieszance. Wzrost poboru mocy elektrycznej na potrzeby własne zależy ponadto od stopnia skomplikowania instalacji współspalania i jej konfiguracji (liczba urządzeń rozdrabniających, długość przenośników, liczebność urządzeń pomiarowo-rozliczeniowych etc). Ponadto, funkcjonowanie dodatkowych instalacji (np. urządzeń do podsuszania biomasy przed jej wprowadzeniem do komory paleniskowej) może dodatkowo wpływać na wzrost zużycia napędowej energii elektrycznej czy ciepła technologicznego w postaci pary.

Jak wykazano w [3], korzystnym efektem współspalania biomasy w kotle energetycznym elektrociepłowni jest oprócz wytworzenia energii odnawialnej również oszczędność energii chemicznej paliwa kopalnego. Na skutek jednakże wspomnianej zmiany wielkości potrzeb własnych i zmiany sprawności energetycznej całego obiegu cieplnego, spadek zużycia energii chemicznej paliwa kopalnego nie wynika wprost z zastąpienia części energii chemicznej węgla energią chemiczną biomasy.

Współspalanie biomasy, która zwłaszcza w formie nieprzetworzonej cechuje się często dużą zawartością wilgoci, wpływa na zmianę sprawności energetycznej kotła. Jest to efekt obserwowany również w eksploatowanych w energetyce przemysłowej kotłach węglowo—gazowych, w których spalane są niskokaloryczne paliwa gazowe (np. gaz wielkopieczowy [4]). Równocześnie obserwuje się zmiany w wielkości wskaźnika elektrycznych potrzeb własnych siłowni ze względu na zwiększenie zapotrzebowania energii elektrycznej, głównie w układach młynowych kotłów. W przypadku podsuszania biomasy za pomocą pary ulega zwiększeniu także wskaźnik zużycia ciepła dla potrzeb własnych.

Również praca instalacji współspalania biomasy związana jest z dodatkowym zużyciem energii na potrzeby m.in. napędu silników w układzie transportu biomasy (mieszanki węgiel - biomasa), układów pomiarowo-rozliczeniowych i rejestrujących ilość zużywanej biomasy (wagi, próbobiernie) czy układów rozdrabniania bądź sortowania.

Ocena zmienności warunków pracy urządzeń energetycznych

Współspalanie biomasy wpływa nie tylko na zmianę sprawności energetycznej kotła, ale

również na zmianę wskaźnika potrzeb własnych - głównie elektrycznych, a w niektórych przypadkach także cieplnych (np. gdy do celów podsuszania biomasy loco elektrownia wykorzystuje się parę). Wskaźnik potrzeb własnych stanowi (wraz ze sprawnością obiegu i sprawnością elektromechaniczną turboszespołu) czynnik wpływający na sprawność energetyczną netto bloku zgodnie z zależnościami (1), (2) obowiązującymi odpowiednio:

- dla spalania samego węgla:

$$\eta_{EN0} = (1 - \varepsilon_{el0}) \cdot \eta_{EK0} \cdot \eta_{tob} \cdot \eta_{me} \quad (1)$$

- dla współspalania biomasy:

$$\eta_{EN} = (1 - \varepsilon_{el}) \cdot \eta_{EK} \cdot \eta_{tob} \cdot \eta_{me} \quad (2)$$

gdzie:

η_{EN0} , η_{EN} - sprawność energetyczna netto bloku opalanego odpowiednio: wyłącznie węglem kamiennym i mieszanką węgiel - biomasa,

ε_{el0} , ε_{el} - wskaźnik elektrycznych potrzeb własnych bloku energetycznego w przypadku opalania odpowiednio węglem kamiennym i mieszanką węgiel - biomasa,

η_{EK0} , η_{EK} - sprawność energetyczna kotła opalanego odpowiednio węglem kamiennym i mieszanką węgiel biomasa.

W zależnościach (1), (2) czynniki η_{tob} (sprawność cieplna obiegu) i η_{me} (sprawność elektromechaniczna turboszespołu) nie zależą od udziału biomasy w mieszance. Uwzględniając to oraz dzieląc równania stronami otrzymuje się:

$$\frac{\eta_{EN}}{\eta_{EN0}} = \frac{(1 - \varepsilon_{el}) \cdot \eta_{EK}}{(1 - \varepsilon_{el0}) \cdot \eta_{EK0}} \quad (3)$$

Zależności empiryczne ujmujące wpływ współspalania biomasy można wyprowadzić na podstawie znajomości parametrów charakteryzujących pracę kotła energetycznego w warunkach współspalania biomasy (z odniesieniem do spalania samego paliwa podstawowego) oraz parametrów pracy instalacji pomocniczych (układu paliwo - powietrze - spaliny).

Z uwagi na możliwość współspalania biomasy z węglem kamiennym i węglem brunatnym analizie poddano oba warianty. W obu przypadkach wykorzystano głównie własny obszerny materiał badawczy, odnosząc uzyskane wyniki do dostępnych informacji literaturowych.

Metodyka wyznaczenia wartości liczbowej stosunków $\frac{\eta_{EK}}{\eta_{EK0}}$ oraz $\frac{(1 - \varepsilon_{el})}{(1 - \varepsilon_{el0})}$ w funkcji udziału biomasy w mieszance będzie zaprezentowana poniżej.

Współspalanie biomasy z węglem kamiennym

Wykorzystując wyniki własnych prac naukowo-badawczych i wdrożeniowych wybrano należący do jednej z krajowych elektrowni systemowych kocioł - reprezentant (OP-650), na którym Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla zrealizował program badawczy w zakresie analizy parametrów energetycznych i emisyjnych towarzyszących procesowi współspalania biomasy. Zakres tego programu, obejmujący najszerszy z danego zbioru eksperymentów

przedział zmienności rodzajów biomasy, jej parametrów fizykochemicznych udziału energetycznego pozwolił na potraktowanie opisanego w tej pracy kotła jako reprezentatywnego, a wyprowadzonym charakterystykom nadał uniwersalność zastosowania.

W omawianym kotle współspalaniu poddano m.in. paliwa scharakteryzowane w tabeli 1.

Tabela 1

Zakres zmienności rodzajów i parametrów biomasy wykorzystanej w testach badawczych w reprezentatywnym kotle wybranej elektrowni

Rodzaj biomasy	Wartość opałowa biomasy, kJ/kg	Wartość opałowa mieszanki, kJ/kg	Udział masowy biomasy, %	Udział energetyczny biomasy, %
Trociny drzewne (brykiet)	13 353,00	18 378,00	30	21,8
Słoma rzepakowa (brykiet)	15 021,00	19 177,00	30	23,5
Susz owocowy	20 168,00	24 004,00	30	25,2
Kora	9 247,00	21 140,00	30	13,1
Wierzba energetyczna	7 672,00	19 207,00	20	8,0

Zawarte w [5] wyniki obliczeń pozwoliły na wyprowadzenie zależności ilustrującej wpływ współspalania biomasy na zmianę sprawności kotła energetycznego. Poprzez regresję liniową punktów obrazujących wyniki pomiarów uzyskano zależność, dla której współczynnik korelacji wynosi R^2 wynosi 0,84.

Równanie tej prostej to:

$$\frac{\eta_{EK}}{\eta_{EK0}} = 1 - 0.1515b \quad (4)$$

gdzie η_{EK} oznacza sprawność energetyczną kotła, w którym realizowane jest współspalanie biomasy, a η_{EK0} - sprawność energetyczną kotła opalanego wyłącznie węglem kamiennym; b - oznacza udział energii chemicznej biomasy w sumarycznej energii chemicznej spalanej mieszanki.

Wyprowadzoną zależność (4) odnieść można do informacji dostępnych w literaturze krajowej i zagranicznej. I tak, w pozycji [6] określono wpływ udziału biomasy (b) na różnicę pomiędzy wartościami sprawności η_{EK} (współspalanie biomasy) a η_{EK0} (spalanie węgla). Zależność ta ma następującą postać:

$$\eta_{EK0} - \eta_{EK} = 0,0044b^2 + 0,0055b \quad (5)$$

Parametr b w tym przypadku oznacza jednakże udział masowy, a opisana analiza prowadzona była dla jednego rodzaju biomasy (drewno). Charakter zależności (spadek sprawności energetycznej kotła wraz ze zwiększającym się udziałem biomasy w mieszance) potwierdza jednak przebieg wyznaczonej metodą regresji liniowej charakterystyki (4).

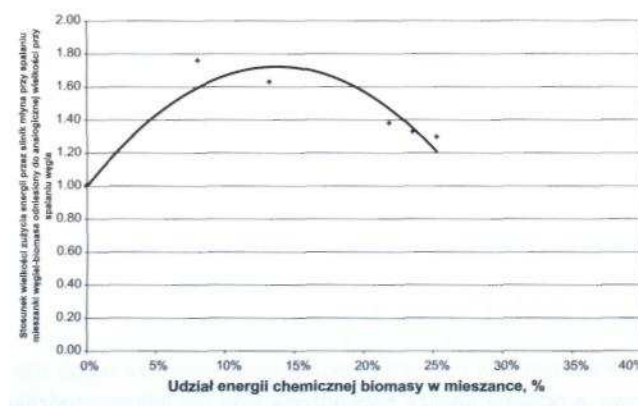
Potwierdzenie wpływu dodatku biomasy na zmianę sprawności kotła można również znaleźć w pracach innych krajowych autorów (np. [7-8]). Należy jednak podkreślić, że znaczna część prezentowanych w literaturze wyników badań ma charakter modelowy a nie empiryczny (np. w pracy [8] analizę symulacyjną pracy bloku energetycznego ze współspalaniem biomasy

prowadzono z wykorzystaniem modelu nieuwzględniającego zmian zawartości części palnych w żużlu i popiele w procesie współspalania).

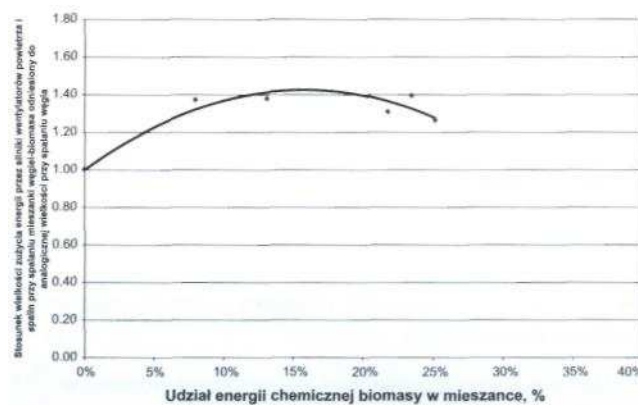
Wykorzystując wyniki uzyskane w trakcie realizacji wspomnianego na początku programu badawczego na kotle OP-650, można określić wpływ współspalania biomasy na zużycie energii przez urządzenia układu nawęglania. W analizie uwzględniono:

- zmianę mocy elektrycznej silników zespołów młynowych,
- zmianę mocy elektrycznej silników wentylatorów powietrza,
- zmianę mocy elektrycznej silników wentylatorów spalin.

Na wykresach zaznaczono wpływ udziału energii chemicznej paliwa na zapotrzebowanie mocy elektrycznej przez silniki pracujących młynów węglowych (rys. 1) oraz przez silniki napędzające wentylatory powietrza i spalin (rys. 2).



Rys. 1. Wpływ udziału energii chemicznej biomasy na zużycie energii elektrycznej przez młyny węglowe



Rys. 2. Wpływ udziału energii chemicznej biomasy na zużycie energii elektrycznej przez silniki wentylatorów powietrza i spalin

W obu przypadkach odnotować można występowanie lokalnych ekstremów, towarzyszących wartości $b \approx 15\%$.

Wy tłumaczenie przebiegu stosunków $\left(\frac{E_{el}}{E_{el0}}\right)_M$ oraz $\left(\frac{E_{el}}{E_{el0}}\right)_{WP-S}$ wymaga szczegółowej analizy technicznej pracy młynów węglowych w warunkach współspalania biomasy. Analizy takie prowadzone były m.in. w trakcie realizacji prac, których wyniki zamieszczono w [5] i [9-10].

W procesie rozdrabniania paliwa w młynach pierścieniowo--kulowych wykorzystywane jest zjawisko miażdżenia i ścierania materiału. W zależności od właściwości podawanego do mielenia materiału (szczególnie od podatności przemiałowej określanej jako „ścieralność” bądź „kruszość” materiału, zawartości wilgoci czy substancji oleistych), przebieg procesu mielenia zachodzi mniej lub bardziej efektywnie. Biomasa stanowi paliwo o słabych właściwościach przemiałowych, stanowiąc materiał bardziej plastyczny niż kruchy. Ponadto, materiały organiczne znajdujące się w biomase zawierają związki, które powodują zlepianie się materiału (tworzenie tzw. aglomeratów) oraz ich odkładanie na powierzchniach komory przemiałowej oraz powstanie osadów wewnątrz młyna. Substancje te są wytłaczane z mielonego materiału bądź wydzielają się z niego pod wpływem temperatury.

Opisane właściwości biomasy skutkują w trakcie jej współmielenia z węglem kamiennym większą liczbą cyrkulacji materiału (tzw. mieliwa) w młynie. Konsekwencją zaś tego jest podwyższenie grubości warstwy mieliwa pod kulami zespołu mielącego, co powoduje spadek zdolności przemiałowej młyna. Wraz ze wzrostem liczby cyrkulacji rosną także opory przepływu młyna, co wymaga zastosowania wyższego ciśnienia przed młynem.

Znajomość specyfiki procesu współmielenia węgla i biomasy umożliwia interpretację wykresów zamieszczonych na rysunkach 1 i 2. Przy udziale energetycznym biomasy przewyższającym 15%, następuje spadek wydajności młyna (w rozważanym przypadku wartość ta wynosiła ok. 10% dla suszu owocowego oraz ok. 25% dla kory), jak również spadek temperatury mieszanki za młynem oraz spadki wartości strumieni powietrza przed młynem i gazu za młynem.

Wielkość zużycia energii spada, przez co wartość stosunków $\left(\frac{\epsilon_{el}}{\epsilon_{el0}}\right)_M$ oraz $\left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{el0}}\right)_{WP_S}$

Analogicznie jak dla przypadku sprawności energetycznej kotła, dokonane pomiary pozwoliły na wyprowadzenie zależności ilustrującej wpływ współspalania biomasy na zmianę poboru mocy przez wymienione urządzenia. Za pomocą analizy regresji uzyskano następujące zależności:

$$\left(\frac{\epsilon_{el}}{\epsilon_{el0}}\right)_M = -38,788 b^2 + 10,588b + 1 \quad (6)$$

$$\left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{el0}}\right)_{WP_S} = -9,2465b^2 + 3,5235b + 1 \quad (7)$$

Współczynniki korelacji wynoszą odpowiednio: $R^2 = 0,86$ (6) oraz $R^2 = 0,84$ (7).

W przypadku łącznego potraktowania zużycia energii na potrzeby własne (suma wielkości zużycia energii przez wentylatory powietrza i spalin oraz młyny węglowe) można wprowadzić zależność jak poniżej:

$$\left(\frac{\epsilon_{el}}{\epsilon_{el0}}\right)_{WPW} = -17,049 b^2 + 5,3895b + 1 \quad (8)$$

Współczynnik korelacji dla tej zależności wynosi: $R^2 = 0,89$.

Podane powyżej zależności pozwalają na określenie wielkości potrzeb własnych w funkcji udziału energii chemicznej biomasy w energii chemicznej paliwa. Zgodnie z przyjętym wcześniej założeniem, rozważania ograniczono do analizy pracy układu paliwo - powietrze - spaliny. W rzeczywistości, wprowadzenie współspalania biomasy pociąga za sobą konieczność dobudowy instalacji umożliwiających gospodarkę tym paliwem na terenie obiektu energetycznego. Liczba i rodzaj instalacji zależne są od rodzaju i formy współspalanej biomasy (zrębki, pelety), charakteru pracy instalacji (czy przewidziano węzeł rozdrabniania biomasy; czy instalacja przyjmuje wyłącznie biomasę już przygotowaną do określonej granulacji) i stopnia jej skomplikowania. Do najpopularniejszych elementów instalacji podawania i przygotowania paliwa można zaliczyć:

- urządzenia transportowe: przenośniki taśmowe, zgrzeblowe, ruchome podłogi, wygarniacze w układzie wielkoobjętościowego magazynowania (silosy);
- urządzenia pomocnicze: separatory zanieczyszczeń ferromagnetycznych, przesiewacze;
- urządzenia kontrolno - pomiarowe: wagi, próbobiernie;
- urządzenia rozdrabniające: młyny.

Funkcjonowanie tych urządzeń wiąże się również z poborem energii (np. silniki do napędu przenośników). Określenie wskaźnikowe wielkości tego zużycia jest problematyczne z uwagi na brak udokumentowanych i dostępnych powszechnie informacji w zakresie doświadczeń poszczególnych obiektów w tym zakresie. Tego rodzaju zużycie nie jest rejestrowane i archiwizowane w sposób umożliwiający wydzielenie i określenie odpowiedniego zużycia energii.

Dla przykładu, w pozycji [11] przyjęto, że z punktu widzenia analizy LCA, instalacja współspalania biomasy o udziale energetycznym do 5% wywiera pomijalnie mały wpływ z punktu widzenia obciążenia środowiska (zakłada się, że w takich przypadkach wykorzystanie istniejącej infrastruktury będzie dominowało). Wyższe udziały energetyczne biomasy wymagają już dedykowanych urządzeń i określenia wielkości zużycia przez nie energii napędowej. Natomiast w pozycji [12] wykazano, że nieuwzględnienie w obliczeniach wskaźników skumulowanej energochłonności i emisyjności materiałów i urządzeń koniecznych do budowy instalacji współspalania ma wpływ mniejszy niż 1%.

Współspalanie biomasy z węglem brunatnym

Wykorzystanie węgla brunatnego do celów wytwarzania energii elektrycznej realizowane jest w Polsce prawie wyłącznie w dużych elektrowniach systemowych (elektrownie *Turów*, *Bełchatów*, *Pątnów*, *Adamów* i *Konin*). Wyjątek stanowi *PGE Elektrociepłownia Boruta* w Zgierz, posiadająca możliwość spalania zarówno węgla kamiennego, jak i brunatnego oraz współspalania biomasy i paliw pochodzenia odpadowego.

Ze względu na istniejące, udokumentowane wyniki badań w zakresie współspalania biomasy również w układach węgla brunatnego, analizie poddano wpływ wprowadzenia współspalania biomasy z węglem brunatnym na sprawność współspalającego biomasę kotła energetycznego oraz na wielkość potrzeb własnych jednostki wytwórczej (elektrowni).

Autor pracy zrealizował szereg testów badawczych współspalania biomasy z węglem brunatnym (m.in. prace [13-16]). Prowadzone badania dotyczyły współspalania z węglem brunatnym biomasy w następującej postaci: trocin drzewnych (luźne i pelety), pelety z łuski

słonecznika, pelety ze słomy, pelety z wierzby energetycznej oraz brykiety z ligninocelulozy pohydrolitycznej. Badania prowadzone były głównie na kotłach pyłowych ([13-14], [16]) z uwagi na ich dominację technologiczną w przypadku spalania węgla brunatnego w Polsce oraz w kotle fluidalnym [15]. Udział energetyczny biomasy w zależności od jej rodzaju i typu kotła zmieniał się w zakresie od 7 do 26%.

W przypadku analiz prowadzonych dla węgla kamiennego, zdecydowano, aby jako dane reprezentatywne dla stworzenia charakterystyk obrazujących zmienność sprawności energetycznej kotła przyjąć wyniki uzyskiwane dla jednego kotła, przy jak najszerzej zmienności w zakresie udziałów energetycznych współspalanej biomasy. Identycznie proponuje się postąpić w przypadku węgla brunatnego. Dlatego do dalszych analiz przyjęto dane liczbowe zamieszczone w opracowaniach [16-17]. Zawierały one wyniki testów badawczych przeprowadzonych na węglu brunatnym (tzw. tło) oraz testów współspalania biomasy (brykiety z trocin, brykiety ze słomy, ligninoceluloza pohydrolityczna) o udziale energetycznym w zakresie od 20 do 33%. Parametry paliw wykorzystanych w czasie testów przedstawiono w tabeli 2.

Wybrane parametry paliw wykorzystywanych w czasie badań współspalania

Tabela 2

Parametr	Jednostka	Węgiel brunatny 1 [17]	Mieszanka węgla brunatnego 1 i brykietów drzewnych ¹ [17]	Węgiel brunatny 2 [17]	Mieszanka węgla brunatnego 2 i brykietów ze słomy ² [17]	Węgiel brunatny [16]	Mieszanka węgla brunatnego i brykietów z ligninocelulozy [16]
Wartość opałowa,	MJ/kg	7,86	9,96	8,11	9,11	7,83	8,94
Zawartość popiołu	%	11,0	7,6	9,7	7,2	6,9	6,1
Zawartość wilgoci	%	52,5	44,5	53,6	50,6	55,6	50,9
Zawartość części lotnych	%	19,9 ³	29,6 ⁴	b.d.	24,7 ⁵	39,6 ⁶	42,8 ⁶

¹ 20% udział masowy/33,7% udział energetyczny,

² 10% udział masowy/16,4% udział energetyczny,

³ 16% udział masowy/25,6% udział energetyczny,

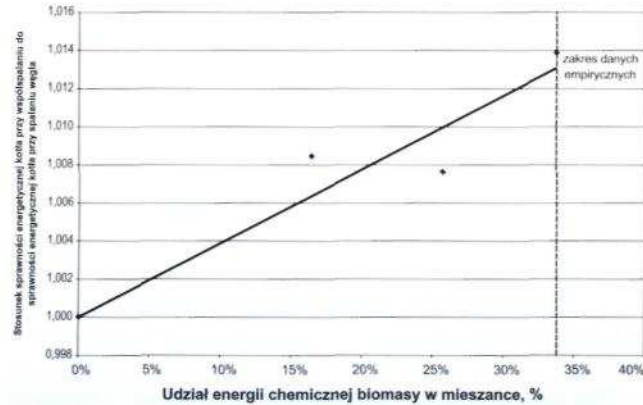
^{4,6} wartość w stanie roboczym/analitycznym.

Oba badane rodzaje biomasy stanowiły paliwo o lepszych właściwościach fizykochemicznych w porównaniu ze spalaniem węglem brunatnym. Dzięki dodatkowi biomasy spadała zawartość wilgoci w spalanej mieszance, wzrastała również jej wartość opałowa. Taki wynik pozwala przypuszczać, że efekty spalania mieszanki biomasy (szczególnie przetworzonej, o postaci peletów czy brykietów o wysokiej energii chemicznej) z węglem brunatnym będą odmienne niż dla przypadku jej współspalania z węglem kamiennym.

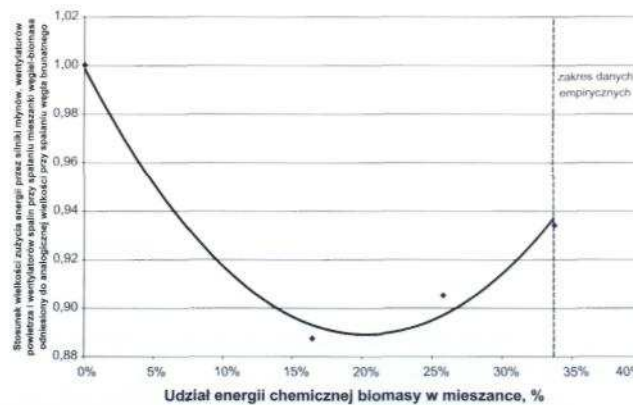
W przeprowadzonych badaniach wykazano, że podczas spalania mieszanek paliwowych, w skład których wchodziła biomasa, kocioł energetyczny pracował z wyższą sprawnością w stosunku do pomiarów bazowych przy spalaniu węgla brunatnego. Najwyższą sprawność odnotowano podczas prób współspalania brykietów drzewnych. Wówczas oscylowała ona na poziomie 90%. Nieco niższe wartości uzyskano podczas spalania mieszanki węgla i brykietów ze słomy, kiedy to sprawność wynosiła od 89,65 do 89,68%. Zdecydowanie najniższą sprawność odnotowano podczas wszystkich pomiarów bazowych przy spalaniu węgla, wówczas uzyskano wyniki na poziomie od 88,65 do 88,90%.

Na wykresach (rys. 3 i 4) zobrazowano wpływ dodatku biomasy na sprawność energetyczną współspalającego biomasę kotła oraz na zużycie energii przez urządzenia pomocnicze bloku energetycznego. Przebiegi wyprowadzono na podstawie wyników pomiarów zawartych w

opracowaniach [16-17]. Sposób przedstawienia danych obrazujących zmienność parametrów pracy urządzeń układów paliwo-powietrze-spaliny w tych opracowaniach był odmienny, co narzuciło konieczność ich odpowiedniej obróbki i uspoźnienia.



Rys. 3. Wpływ udziału energii chemicznej biomasy na sprawność współpalącego biomasę kotła



Rys. 4. Wpływ udziału energii chemicznej biomasy na zużycie energii elektrycznej przez urządzenia układu paliwo-powietrze-spaliny (z dodatkowym uwzględnieniem wpływu rodzaju paliwa na moc zużywaną przez silniki napędów podajników węglowych)

Analogicznie jak dla węgla kamiennego za pomocą analizy regresji uzyskano następujące zależności empiryczne:

$$\frac{\eta_{Ek}}{\eta_{Ek0}} = 1 + 0,0388 \cdot b \quad (9)$$

$$\frac{\varepsilon_{el}}{\varepsilon_{el0}} = 1 - 1,0836 \cdot b + 2,6726 \cdot b^2 \quad (10)$$

gdzie oznaczenia symboli analogicznie jak dla zależności (1) i (2).

Współczynniki korelacji dla zależności (9) i (10) wyniosły odpowiednio $R^2 = 0,89$ i $R^2 = 0,99$.

Oczekiwaną tendencję zmienności parametrów eksploatacyjnych dla współspalania biomasy z węglem brunatnym potwierdzają charakterystyki opracowane dla kotła fluidalnego w pracy [15]. W tym przypadku, spalany węgiel brunatny pochodził z innej odkrywki i cechował się wyższą wartością opałową niż w przypadku elektrowni analizowanej w opracowaniach [16-17]. W tabeli 3 zestawiono parametry wykorzystanych do współspalania w tym kotle paliw.

Tabela 3

Wybrane parametry fizykochemiczne paliw użytych do eksperymentów w kotle fluidalnym [15]

Parametr	Jednostka	Węgiel brunatny	Węgiel +pelety z łusek słonecznika	Węgiel + pelety z trocin	Węgiel + pelety ze słomy	Węgiel + zrębki wierzby energetycznej
Wartość opałowa	kJ/kg	11 281	12 175	11 315	11 385	12 077
Zawartość popiołu	%	11,2	8,1	12,9	12,4	8,9
Zawartość wilgoci	%	43	42,2	39,6	39,8	41,0

W konsekwencji, właściwości mieszanek nie odbiegały znacząco od spalnego węgla brunatnego, jednakże odnotowano również pozytywny wpływ współspalania biomasy, wyrażający się wzrostem sprawności energetycznej kotła spalającego mieszanekę, a także zmniejszeniem zużycia energii na potrzeby własne (tabela 4).

Tabela 4

Wyniki bilansu energetycznego oraz obciążenie prądowe urządzeń kotłowych przy spalaniu węgla oraz mieszanek węgla i biomasy (moc bloku 157 MW) [15]

Parametr	Jednostka	Węgiel	Węgiel +pelety z łusek słonecznika	Węgiel + pelety z trocin	Węgiel + pelety ze słomy	Węgiel + zrębki wierzby energet.	
Udział energii chemicznej biomasy w mieszance	%	–	8,22	10,14	9,22	7,77	
Wydajność kotła	t/h	417,6	417,3	417	416	418	
Moc cieplna kotła	MW	346,2	346,18	345,6	345,06	346,7	
Średni strumień paliwa	t/h	122,02	111,9	121	119,37	113,8	
Strumień biomasy	t/h	–	6,81	8,08	8,34	7,13	
Strumień energii chemicznej paliwa	MW	382,37	378,45	381,59	378,7	381,9	
T	wylotowa fizyczna spalin	MW	25,31	23,79	25,6	24,25	25,98
		%	6,62	6,29	6,71	6,40	6,8
T	niespalonego CO w spalinach	MW	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
		%	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
T	entalpii i zawartości części palnych w popiele lotnym i zużłu		4,27	1,86	3,53	2,78	2,64
			1,12	0,49	0,93	0,73	0,69
T	do otoczenia (promieniowania i konwekcji)	MW	6,61	6,61	6,60	6,59	6,61
		%	1,73	1,75	1,73	1,74	1,73
Sprawność energetyczna kotła (brutto) /niepewność	%	90,5 ±1,05	91,47 ±1,03	90,59 ±1,05	91,09 1,04±	90,78 ±1,04	
Moc sumaryczna wentylatorów powietrza pierwotnego i wtórnego	kW	3661,51	3592,03	3658,77	3583,07	3790,88	
Moc wentylatorów ciągu 1 i 2	kW	2137,85	2142,02	2155,38	2123,43	2194,37	
Moc dmuchaw wysokociśnieniowych ciągu 1 i 2	kW	411,19	206,8	203,03	204,75	404,37	

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wyniki analizy wpływu dodatku biomasy do paliwa konwencjonalnego (węgla kamiennego bądź brunatnego) na zmianę warunków pracy bloków elektrowni i elektrociepłowni. Ocenie poddano parametry pracy instalacji związanych z układem paliwo - powietrze - spaliny, takich jak wentylatory powietrza, wentylatory spalin oraz młyny węglowe. Zmianę zużycia energii po wprowadzeniu współspalania biomasy określono każdorazowo na podstawie parametrów obejmujących m.in. wielkość poboru mocy przez silniki napędzające wymienione urządzenia, które były rejestrowane w systemach akwizycji danych współspalających biomasę obiektów energetycznych.

Analizie poddano także zmienność sprawności energetycznej współspalającego biomasę kotła w odniesieniu do stanu bazowego spalania samego węgla. Sprawność energetyczną wyznaczano metodą pośrednią, poprzez wyznaczenie poszczególnych strat, zgodnie z normą PN-EN 12952-15 „Kotły wodnorurowe i urządzenia pomocnicze. Badania odbiorowe”. W obliczeniach uwzględniono m.in. zmianę parametrów termicznych i kalorycznych spalin oraz ich składu (m.in. CO) i zmianę zawartości części palnych w ubocznych produktach spalania (żużel, popiół lotny).

Analizując uzyskane wyniki wyprowadzono równania ujmujące wpływ udziału energii chemicznej biomasy w spalanej mieszance na sprawność energetyczną kotła ze współspalaniem biomasy oraz wskaźnik elektrycznych potrzeb własnych. Analizę prowadzono w zakresie zmienności udziału energetycznego biomasy w mieszance do 25%, co jest zgodne z praktyką przemysłową.

Współspalanie biomasy o udziale mieszczącym się w opisanym zakresie jest realizowane w Polsce od roku 2005, co pozwoliło na pozyskanie dużej liczby danych wejściowych do opracowania charakterystyk. Pomimo iż obecnie uruchamiane są w kraju instalacje pozwalające na współspalanie biomasy z wyższym niż opisany udział energetyczny biomasy (np. elektrociepłownie *Wrocław* i *Kraków*, elektrownia *Rybnik*), w pełni wiarygodna informacja o wpływie dodatku biomasy na pracę poszczególnych urządzeń będzie znana nie wcześniej niż przed upływem 2-3 lat, po wcześniejszym dokonaniu niezbędnych optymalizacji przy zakresie zmienności rodzajów spalanej biomasy szerszym niż paliwo gwarantowane (obejmujące najczęściej 1-2 rodzaje biomasy). Ponadto, możliwość współspalania tak dużego udziału biomasy wiąże się najczęściej z całkowitą zmianą konstrukcji samego kotła wraz z towarzyszącym układem paliwo - powietrze - spaliny.

Przeprowadzone analizy wykazały, że w przypadku dodatku biomasy do węgla kamiennego odnotowano niekorzystny wpływ właściwości fizykochemicznych biomasy na właściwości mieszanki, objawiające się m.in. gorszą przemialowością i wyższą zawartością wilgoci, co uwidoczniło się w spadku sprawności energetycznej współspalającego kotła oraz zwiększeniu potrzeb własnych obiektu energetycznego. Natomiast w przypadku węgla brunatnego, w odniesieniu, do którego biomasę jest najczęściej paliwem o korzystniejszych właściwościach energetycznych, odnotowano zmniejszenie zużycia energii na potrzeby własne oraz wzrost sprawności energetycznej kotła. W opracowaniu [18] wykazano, że uwzględnienie zmiany warunków pracy obiektu energetycznego przy współspalaniu biomasy jest niezbędne do prawidłowej oceny efektów energetyczno-ekologicznych tego procesu. Nieuwzględnienie tych efektów prowadzi m.in. do uzyskania błędnych wartości wskaźników skumulowanego zużycia energii na wytwarzanie elektryczności i ciepła, co również wykazano w tej pracy.

PRZYPISY

¹⁾ Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, ul. Zamkowa 1, 41-803 Zabrze. Praca współfinansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt badawczy typu POL-POSTDOC III (nr PBZ/MNiSW/07/2006/55) w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach. Niniejszym autor składa podziękowania Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za dofinansowanie badań.

LITERATURA

[1] Głód K., Zuwała J.: Zmiana parametrów pracy zespołów młynowych przy współmieleniu różnych rodzajów biomas w energetyce zawodowej. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Kontrola, sterowanie i automatyzacja procesów spalania w kotłach energetycznych”. Szczyrk, 4-6 czerwca 2007

[2] Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M.: „Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych w energetyce”. ISBN 978-83-913434-3-2. Wydawnictwo IChPW i Politechniki Śląskiej w Gliwicach

[3] Ziębik A., Zuwała J., Ściążko M.: Energy and ecological effectiveness of biomass co-firing in CHP plants. *Archives of Thermodynamics* Vol. 30 (2009), No. 2, 29-44

[4] Szargut J., Ziębik A.: Przemysłowa energia odpadowa. Zasady wykorzystania. Urządzenia. Wydawnictwo WNT, Warszawa 1993

[5] Głód K., Kopczyński M., Zuwała J.: Przeprowadzenie testu współspalania węgla i biomasy dla wytypowanego kotła energetycznego EP-650 oraz opracowanie charakterystyk energetyczno-emisyjnych na podstawie wykonanych testów oraz określenie wpływu wybranego gatunku biomasy na proces mielenia, parametry mieszanki pyłopowietrznej. Sprawozdanie IChPW Nr 3285/2006, Zabrze 2006

[6] Tillman D.A.: Biomass co-firing: the technology, the experience, the combustion consequences. *Biomass and Bioenergy* 19 (2000) 365-384

[7] Szymanowicz R.: Wytwarzanie energii odnawialnej w procesie wspólnego spalania biomasy i węgla. Warunki pracy kotłów w świetle wyników badań. *Energetyka* 2007, nr 12

[8] Liszka M., Majchrzak H.: Analiza efektów ekologicznych w procesie współspalania węgla i biomasy na przykładzie *BOT Elektrowni Opole S.A.* [w:] Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M.: Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych w energetyce. ISBN 978-83-913434-3-2. Wydawnictwo IChPW i Politechniki Śląskiej w Gliwicach

[9] Głód K., Hrycko P., Kopczyński M., Zuwała J.: Opracowanie charakterystyk energetyczno-emisyjnych pracy kotła OP-230 przy współspalaniu węgla i biomasy w *Elektrociepłowni Gdańskiej*. Sprawozdanie IChPW Nr 28/2007, Zabrze 2007

[10] Głód K., Kopczyński M., Zuwała J.: Opracowanie charakterystyk energetyczno - emisyjnych pracy kotła OP-230 przy współspalaniu węgla i biomasy. Sprawozdanie IChPW

Nr 88/2008, Zabrze 2008

[11] Mann, M.K., Spath P.L.: A Life Cycle Assessment of Biomass Co-Firing in a Coal-Fired Power Plant. *Clean Production Processes*, 3 (2001), p. 81-91, 2001

[12] Spath P.L., Mann M.K., Kerr D.R.: Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production. National Renewable Energy Laboratory. DOE, June 1999

[13] Zuwała J., Hrycko P. Głód K.: Wykonanie pomiarów eksploatacyjnych kotła OP-380b w *Elektrowni Adamów*. Sprawozdanie IChPW 3429/2/2006, Zabrze 2006

[14] Zuwała J., Hrycko P. Głód K.: Wykonanie pomiarów eksploatacyjnych kotła OP-650b w *Elektrowni Pątnów*. Sprawozdanie IChPW Nr 3429/1/2006, Zabrze 2006

[15] Kopczyński M., Zuwała J., Głód K.: Dokumentacja uwierzytelniająca - Instalacja oraz procedury rozliczeń energii ze źródeł odnawialnych w układzie bezpośrednim spalania biomasy i paliw podstawowych w *PGE Elektrownia Turów S.A.* Sprawozdanie IChPW Nr 140/2008, Zabrze 2008

[16] Głód K., Kopczyński M., Zuwała J.: Przeprowadzenia testów współspalania węgla brunatnego i ligninocelulozy pohydroli-tycznej w kotle BB-1150 nr 2 w *PGE Elektrowni Bełchatów S.A.* Sprawozdanie IChPW Nr 24/2009, Zabrze 2009

[17] Dokumentacja Uwierzytelniająca - Instalacja do produkcji oraz procedury rozliczeń energii ze źródeł odnawialnych w *BOT Elektrownia Bełchatów S.A.* Bełchatów 2006. Opracowanie firmy *Energopomiar Gliwice S.A.*

[18] Zuwała J.: Wpływ współspalania wierzby energetycznej na wartość wskaźników skumulowanego zużycia energii na wytworzenie nośników energii w elektrociepłowni. *Karbo* 2009, nr 3