

Analiza efektów ekologicznych w procesie współspalania węgla i biomasy na przykładzie *Elektrowni Opole*

Współspalanie biomasy z węglem w kottach dużych bloków energetyki zawodowej postrzegane jest powszechnie jako szansa na spełnienie zobowiązań Polski co do osiągnięcia wskaźnikowego celu krajowego dotyczącego ilości energii elektrycznej wytwarzanej w źródłach energii odnawialnej (w relacji do zużycia energii elektrycznej brutto w roku 2010) na poziomie 7,5% [1].

W chwili obecnej w wielu elektrowniach prowadzi się prace badawczo-wdrożeniowe związane z dostosowaniem technologii do współspalania węgla i biomasy. Motywacją do tych działań było w dużej mierze wydanie szeregu aktów prawnych traktujących w szczególny sposób energię elektryczną wyprodukowaną w oparciu o źródła odnawialne. Wprowadzono obowiązek zakupu energii elektrycznej i ciepła pochodzących z odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz umożliwiono rozliczanie części energii wytworzonej w procesie współspalania jako energii pochodzącej z OZE [2]. Energia elektryczna pochodząca z OZE podlega zwolnieniu z podatku akcyzowego [3].

Biomasa jako paliwo energetyczne charakteryzuje się dwoma podstawowymi zaletami:

- jest paliwem odnawialnym (o ile bilans jej zużycia i produkcji z nasadzeń jest zamknięty),
- jej spalanie nie powoduje efektu cieplarnianego (zrównoważony bilans emisji CO₂).

W przypadku współspalania biomasy z paliwami kopalnymi (w polskich warunkach z węglem) można jednak zaobserwować pewne negatywne jej cechy, do których należy zaliczyć niską wartość opałową w stanie roboczym, spowodowaną głównie wysokim udziałem wilgoci (do 60%). Biorąc pod uwagę fakt, iż współspalanie ma być realizowane w dużych, wysokosprawnych jednostkach kotłowych powstaje pytanie: czy i w jakim stopniu stosowanie paliwa dodatkowego w postaci biomasy powoduje obniżenie sprawności kotła oraz sprawności całego procesu generacji energii elektrycznej?

Z termodynamicznego punktu widzenia istnieją następujące przesłanki, aby odpowiedzieć na nie twierdząco:

- wysoki udział wilgoci w biomase powoduje obniżenie temperatury w komorze spalania na skutek procesu odparowania wody,

- zmniejsza się obciążenie radiacyjnych powierzchni ogrzewanych w kotle,
- rośnie strumień i temperatura spalin na wylocie z kotła na skutek przeciążenia konwekcyjnych powierzchni ogrzewanych,
- zwiększenie strumienia ciepła przekazywanego w przegrzewaczach konwekcyjnych skutkuje wzrostem strumienia wody wtryskowej,
- rośnie zużycie energii elektrycznej używanej na potrzeby własne bloku na skutek zwiększenia obciążenia wentylatorów spalin i powietrza oraz wprowadzenia do ruchu dodatkowych urządzeń.

Spadek sprawności kotła prowadzi przy stałej jego wydajności do zwiększenia strumienia mieszanki paliwowej, a co za tym idzie strumienia spalanego węgla w stosunku do stanu, gdyby współspalanie było realizowane bez spadku sprawności. W ten sposób zmniejszają się korzystne efekty ekologiczne związane z wykorzystaniem biomasy.

Jeżeli zatem przyjąć, iż podczas współspalania mamy do czynienia z pewnym obniżeniem sprawności kotła oraz wzrostem zużycia energii na potrzeby własne w stosunku do pracy bloku na tym samym węglu, ale bez dodatku biomasy, to kolejne pytania, które muszą paść w takiej sytuacji brzmią:

- jak duży jest spadek sprawności bloku podczas współspalania i od czego on zależy?
- przy jakim spadku sprawności korzystne efekty ekologiczne nie występują?

Niniejszy artykuł poświęcony jest poszukiwaniu odpowiedzi na powyższe pytania, jak również wskazuje propozycję modyfikacji metody rozliczania jednostek realizujących współspalanie.

Określenie spadku sprawności przy współspalaniu węgla i biomasy

Wpływ domieszki biomasy o danym składzie na sprawność całego procesu produkcji energii elektrycznej lub ciepła zależy od rodzaju zastosowanej techniki spalania oraz konstrukcji urządzeń. Należy się spodziewać, że będzie on różny w przypadku kotłów fluidalnych i kotłów pyłowych. Przedstawione w niniejszej analizie wartości liczbowe dotyczą kotłów pyłowych. Stanowią one dane do przykładowych obliczeń

¹⁾ Pan mgr inż. Marcin Liszka jest doktorantem w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej,
Pan dr inż. Henryk Majchrzak jest Dyrektorem Technicznym w *Elektrowni Opole*

prezentowanych w dalszej części artykułu, co nie zmniejsza jednak możliwości zastosowania przedstawionych tam metod do oceny układów z kotłami fluidalnymi i rusztowymi.

Współspalanie w kotle pyłowym może być realizowane poprzez:

- mieszanie biomasy z węglem przed zespołami młynowymi,
- wprowadzanie biomasy bezpośrednio do komory paleniskowej kotła,
- wprowadzanie biomasy do paleniska wstępnego,
- wstępne zgazowanie biomasy (poza kotłem) i doprowadzenie do kotła gazu palnego.

Pierwszy z podanych sposobów jest najprostszy w realizacji i wymaga minimalnych nakładów inwestycyjnych, dlatego wiele polskich elektrowni i elektrociepłowni bierze go pod uwagę, czego wyrazem jest prowadzenie licznych testów w tym zakresie. Określenie spadku sprawności przy współspalaniu ograniczono zatem w niniejszym artykule do przypadku przygotowania mieszanki paliwowej przed zespołami młynowymi.

Istnieją zasadniczo dwa sposoby zbadania wpływu współspalania na sprawność kotła: metoda bezpośrednia (pomiarowa) oraz metoda symulacyjna oparta na modelu matematycznym kotła.

Pierwszy z nich, o ile został prawidłowo wykonany, charakteryzuje się zazwyczaj wyższą dokładnością, jednak dostarcza danych tylko dla analizowanych punktów pomiarowych. Wyniki badań pomiarowych kotła OP130 [4] wskazują na spadek sprawności kotła o 0,6 punktu procentowego na skutek domieszki biomasy w postaci zrębków drzewnych. Udział zrębków wynosił 2,9% wagowo w przeliczeniu na suchą biomase, zaś ich wilgotność 42,2% w stanie roboczym. Zaobserwowano równocześnie spadek zawartości części palnych w żużlu o 6 punktów procentowych, przy nie zmienionej zawartości części palnych w popiele lotnym. Wyniki innych badań dotyczących kotła OP 380 przedstawiono w [5]. Spadek sprawności wynosił 1,14 punktu procentowego przy stosowaniu trocin drzewnych o wilgotności 64,2% w stanie roboczym. Udział trocin w mieszance paliwowej wynosił 5%. Zaobserwowano wzrost zawartości części palnych w żużlu i popiele lotnym odpowiednio o 3,63 oraz 1,35 punktu procentowego. Widoczna jest wyraźna rozbieżność w powyższych wynikach odnośnie do tendencji do zmian zawartości części palnych w żużlu i popiele lotnym, co może być spowodowane różnym poziomem zdolności przystosowania badanych kotłów do paliw o własnościach znacznie odbiegających od projektowych.

Z punktu widzenia wpływu procesu współspalania na kocioł interesujące są nie tylko pojedyncze punkty pomiarowe, ale także pełne charakterystyki sprawności w funkcji takich parametrów, jak udział wagowy biomasy w paliwie oraz wartość opałowa biomasy. Sprawność kotła zależy od szeregu czynników nie związanych z biomasą (parametry węgla, stan powierzchni ogrzewanych itd.), dlatego wygenerowanie

pełnych charakterystyk pomiarowych zmienności sprawności w funkcji tylko parametrów związanych z biomasą jest trudne i wymaga specjalnych, długotrwałych procedur.

W celu generacji wspomnianych charakterystyk zbudowano model matematyczny kotła, który po przeprowadzeniu kalibracji w kilku punktach pomiarowych (bez stosowania domieszki biomasy) wydaje się dokładnym narzędziem oceny pracy kotła. Model dotyczy kotła typu BP 1150 współpracującego z blokiem o mocy znamionowej 370 MW w *Elektrowni Opole*. Uwzględnia on następujące zjawiska zachodzące w kotle podczas współspalania:

- zmiany strumienia paliwa i spalin,
- zmiany wydajności wentylatorów powietrza i spalin, a co za tym idzie zmiany zużycia energii na potrzeby własne kotła,
- zmianę temperatury spalin w komorze paleniskowej na skutek odparowania wilgoci w paliwie,
- zmiany konwekcyjnych współczynników wnikania ciepła na powierzchniach, gdzie konwekcja jest dominującą formą przekazywania ciepła,
- zmiany radiacyjnych warunków przekazywania ciepła na powierzchniach, gdzie promieniowanie jest dominującą formą przekazywania ciepła,
- zmiany ilości wody wtryskiwanej do pary pomiędzy poszczególnymi stopniami przegrzewaczy.

Model nie uwzględnia zmian związanych z procesem suszenia mieszanki paliwowej w młynach. Zawartość części palnych w żużlu i popiele lotnym założona była na stałym poziomie, równym wartościom uzyskiwanym dla spalania wyłącznie paliwa podstawowego. Obliczenia cieplne kotła pracującego w różnych warunkach zasilania paliwem wykonano dwuetapowo.

Pierwszy etap obejmował obliczenia projektowe (ang. *design*) kotła w znamionowym punkcie pracy, dla którego ustala się schemat przepływowy, wymagane znamionowe temperatury oraz ciśnienia czynnika roboczego, temperatury spalin pomiędzy poszczególnymi powierzchniami ogrzewalnymi itd. Wartości powyższych parametrów pochodzą z pomiaru kotła w punkcie znamionowym oraz z dostępnej dokumentacji (np. instrukcji eksploatacji kotła).

Wyniki obliczeń projektowych w postaci parametrów charakteryzujących poszczególne powierzchnie wymiany ciepła oraz komorę paleniskową stanowią dane do modelu kotła w zmiennych warunkach pracy (ang. *off-design*), stanowiącego drugi etap obliczeń.

Sposób obliczeń powierzchni ogrzewanych zależy w dużym stopniu od dominującej formy przekazywania ciepła. Przyjęto, iż w komorze paleniskowej (wraz ze ścianami parownika), przegrzewaczu naściennym pary świeżej, przegrzewaczu grodziowym pary świeżej oraz przegrzewaczu końcowym pary wtórnej, przekazywanie ciepła zachodzi poprzez konwekcję i promieniowanie. W pozostałych sekcjach wpływ promieniowania pominięto ze względu na niższe temperatury spalin.

Model powierzchni ogrzewanych kotła bazuje na bilansach substancji i energii oraz na równaniu przepływu ciepła w postaci (1) dla powierzchni czysto konwekcyjnych oraz (2) dla powierzchni radiacyjno-konwekcyjnych:

$$\dot{Q} = Ak\Delta T_m \tag{1}$$

gdzie:
 \dot{Q} – strumień przekazywanego ciepła, kW,
 A – pole powierzchni przepływu ciepła, m²,
 k – współczynnik przenikania ciepła, kW/m²K,
 ΔT_m – średnia logarytmiczna różnica temperatur, K,

$$\dot{Q} = A\varepsilon_z\sigma(T_{ge}^4 - T_{we}^4) \tag{2}$$

gdzie:
 ε_z – zastępcza emisyjność wzajemna układu gaz-ściana, uwzględniająca człon konwekcyjny,
 σ – stała Stefana-Boltzmanna, kW/m²K⁴,
 T_{ge}, T_{we} – temperatury efektywne odpowiednio: spalin, ścian powierzchni ogrzewanych, K.

Zmianę współczynnika przenikania ciepła k określa się z kolei na podstawie równania (3), jako funkcję bieżącego strumienia masowego spalin:

$$\frac{k}{k_{proj}} = \left(\frac{\dot{G}_g}{\dot{G}_{g\,proj}} \right)^a \tag{3}$$

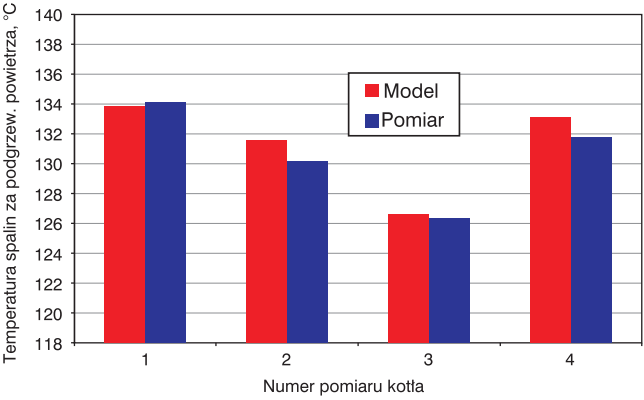
gdzie:
 \dot{G}_g – strumień spalin, kg/s,
 $k_{proj}, \dot{G}_{g\,proj}$ – wartości projektowe (obliczone w modelu design) współczynnika przenikania ciepła oraz strumienia spalin przepływającego przez daną powierzchnię,
 a – współczynnik empiryczny.

Opisane podejście modelowe wymaga poczynienia szeregu założeń odnośnie do doboru ciśnień i temperatur czynnika, parametrów równań opisujących przepływ ciepła i substancji itd. Weryfikacja powyższego doboru przebiega na podstawie wyników pomiarów charakterystycznych parametrów kotła w różnych stanach jego pracy. Jeżeli są one zgodne z wartościami obliczonymi w modelu (przy zgodności danych modelu z pozostałymi warunkami pomiaru), można mówić o prawidłowej kalibracji modelu.

Podczas kalibracji danymi wejściowymi do modelu były parametry podlegające regulacji (np. temperatura pary świeżej, udział tlenu w spalinach), jak również parametry paliwa i wynikające ze współpracy kotła z turbiną (np. strumień pary świeżej i wtórnie przegrzanej, ciśnienie pary świeżej i wtórnie przegrzanej).

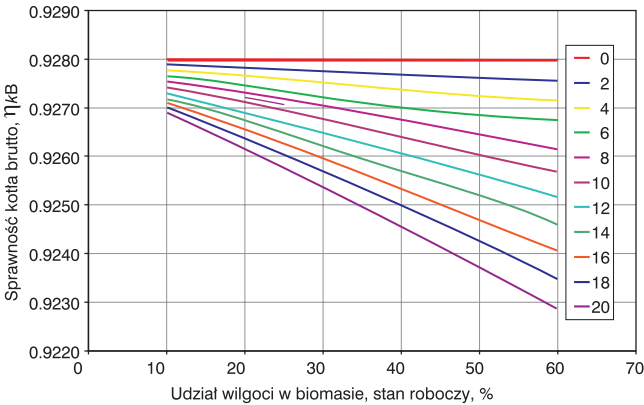
Analiza otrzymanych wartości strumienia, składu oraz temperatury spalin za kotłem, jak również mocy napędów wentylatorów powietrza i spalin świadczy o prawidłowej kalibracji modelu.

Przykładowe wyniki zamieszczono na rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowe wyniki kalibracji modelu kotła

Na rysunku 2 przedstawiono obliczone wartości sprawności kotła brutto przy stałej, znamionowej wydajności parowej kotła. Parametry spalnego węgla oraz parametry biomasy w stanie suchym, nie ulegające zmianie w całym zakresie obliczeń, przedstawiono w tabelach 1 i 2.



Rys. 2. Sprawność kotła brutto przy zmiennym udziale wagowym biomasy w paliwie (oznacz. % przy liniach wykresu) oraz wilgoci w biomase

Tabela 1
Skład węgla w stanie roboczym (udziały wagowe w procentach) – dane do obliczeń kotła

| Stan roboczy | |
|-----------------------|------|
| Wilgoć | 9,0 |
| Popiół | 22,0 |
| Części lotne | 25,0 |
| Substancja palna | 69,0 |
| Analiza pierwiastkowa | |
| C | 58,6 |
| H | 3,7 |
| O | 4,8 |
| N | 1,2 |
| S | 0,7 |

Tabela 2
Skład biomasy w stanie suchym
(udziały wagowe w procentach) – dane do obliczeń kotła

| Stan suchy | |
|-----------------------|------|
| Popiół | 4,8 |
| Części lotne | 76,2 |
| Substancja palna | 95,2 |
| Analiza pierwiastkowa | |
| C | 49,5 |
| H | 6,0 |
| O | 39,4 |
| N | 0,1 |
| S | 0,1 |

Drugim, obok spadku sprawności kotła, niekorzystnym efektem związanym ze współspalaniem jest wzrost zużycia energii elektrycznej na potrzeby własne bloku.

W prezentowanych obliczeniach uwzględniano zmiany mocy napędów wentylatorów spalin i powietrza, nie brano natomiast pod uwagę zmian mocy zespołów młynowych. Obniżenie sprawności kotła oraz wzrost potrzeb własnych wpływa na sprawność netto całego bloku, której wartości przedstawiono na rysunku 3. Zostały one obliczone na podstawie równania (4) po przyjęciu do obliczeń danych z tabeli 3:

$$\eta_{elN} = \frac{N_{elG} - N_{el\,pwk} - N_{el\,pwb}}{\dot{G}_{pal} \, W_{d\,pal}} = \eta_{elB} (1 - \beta) - \gamma \, \eta_{kB} \quad (4)$$

przy czym:

$$\eta_{elB} = \frac{N_{elG}}{\dot{G}_{pal} \, W_{d\,pal}} = \eta_{kB} \, \eta_r \, \frac{3600}{Q_{JP}} \quad (5)$$

$$N_{el\,pwk} = N_{WP} + N_{WS} + N_{PC} \quad (6)$$

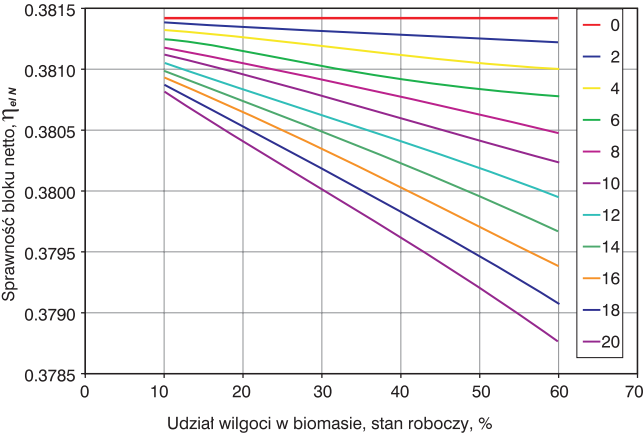
$$\gamma = \frac{N_{WP} + N_{WS} + N_{PC}}{\dot{Q}_{u\dot{z}\,k}} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{N_{el\,pwb}}{N_{elG}} \quad (8)$$

gdzie:

- N_{elG} – moc na zaciskach generatora, kW,
- \dot{G}_{pal} – strumień paliwa (mieszanki węgla i biomasy) kg/s,
- $W_{d\,pal}$ – wartość opałowa paliwa (mieszanki węgla i biomasy) w stanie roboczym, kJ/kg,
- η_{kB} – sprawność kotła brutto,
- η_r – sprawność rurociągów uwzględniająca straty ciepła i czynnika,
- Q_{JP} – jednostkowe zużycie ciepła przez turbozespół, kJ/kWh.

- $N_{el\,pwk}$ – moc zmiennej części potrzeb własnych kotła, kW,
- $N_{el\,pwb}$ – moc potrzeb własnych bloku pomniejszona o $N_{el\,pwk}$, kW,
- γ – wskaźnik potrzeb własnych kotła,
- β – wskaźnik stałej części potrzeb własnych bloku,
- $\dot{Q}_{u\dot{z}\,k}$ – ciepło użyteczne kotła, kW,
- N_{WP}, N_{WS}, N_{PC} – sumaryczna moc silników elektrycznych napędzających odpowiednio: wentylatory powietrza, wentylatory spalin, pompę cyrkulacyjną, kW.



Rys. 3. Sprawność bloku netto η_{elN} przy zmiennym udziale wagowym biomasy w paliwie (oznacz. % przy liniach wykresu) oraz wilgoci w biomase

Tabela 3
Dane – stałe do obliczeń sprawności bloku netto

| Parametr | Jednostka | Wartość |
|----------|-----------|---------|
| η_r | – | 0,9854 |
| Q_{JP} | kJ/kWh | 8100 |
| β | – | 0,0360 |

Jak wynika z rysunku 2 spadek sprawności kotła w wyniku stosowania 20% domieszki (wagowo) biomasy kształtuje się od ok. 0,1 punktu procentowego dla udziału wilgoci w biomase równego 10% (w stanie roboczym) do ok. 0,5 punktu procentowego dla udziału wilgoci 60%.

Z rysunku 3 wynika spadek sprawności bloku netto na poziomie 0,06 punktu procentowego (10% wilgoci) do 0,27 punktu procentowego (60 % wilgoci). Uzyskane charakterystyki zależności sprawności kotła i bloku od parametrów współspalanej biomasy mogą posłużyć do dalszych obliczeń związanych z oceną efektów ekologicznych.

Efekty ekologiczne związane ze współspalaniem węgla i biomasy

W przypadku współspalania głównym celem jest ograniczenie emisji CO₂ poprzez częściowe zastąpienie paliwa kopalnego (węgla) paliwem odnawialnym (zrównoważony bilans emisji CO₂).

W niniejszym artykule proponuje się, aby wskaźnikiem efektu ekologicznego (*WEE*) stosowania współspalania było zużycie energii chemicznej paliwa kopalnego (węgla) na jednostkę wyprodukowanej energii elektrycznej netto (w odniesieniu do danej jednostki wytwórczej):

$$WEE = \frac{\dot{G}_w W_{dw}}{N_{elN}} \quad (9)$$

gdzie:

\dot{G}_w – strumień paliwa kopalnego (węgla), kg/s,
 W_{dw} – wartość opałowa paliwa kopalnego, kJ/kg,
 N_{elN} – moc elektryczna jednostki wytwórczej netto, kW.

Cel ekologiczny stosowania współspalania, wyrażony poprzez wskaźnik *WEE*, polega zatem na minimalizacji wartości tego wskaźnika.

Jak wykazano, znaczny wpływ na sprawność instalacji współspalającej ma udział wagowy biomasy w mieszanke paliwowej oraz udział wilgoci w biomasie.

W celu wyrażenia *WEE* za pomocą tych wielkości, równanie (4) należy rozpisać do postaci:

$$\eta_{elN} = \frac{N_{elN}}{\dot{G}_w W_{dw} + \dot{G}_b W_{db}} \quad (10)$$

a następnie wprowadzić do niego równanie (9) oraz definicję udziału wagowego biomasy (11):

$$b = \frac{\dot{G}_b}{\dot{G}_b + \dot{G}_w} \quad (11)$$

gdzie:

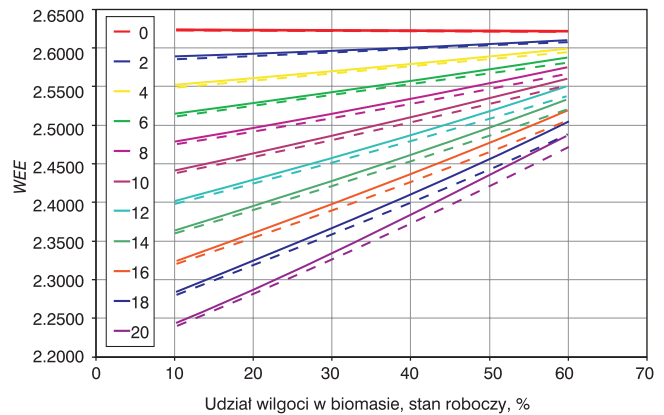
b – udział wagowy biomasy w mieszanke paliwowej,
 \dot{G}_b – strumień biomasy, kg/s

Po elementarnych przekształceniach otrzymuje się wzór:

$$WEE = \left[\eta_{elN} \left(1 + \frac{b}{1-b} \frac{W_{db}}{W_{dw}} \right) \right]^{-1} \quad (12)$$

Na rysunku 4 przedstawiono wartości *WEE* w funkcji udziału wagowego biomasy w mieszanke paliwowej oraz udział wilgoci w biomasie obliczone dla kotła BP 1150 i danych paliwowych zamieszczonych w tabelach 1 i 2.

Linie przerywane odpowiadają założeniu, że sprawność energetyczna bloku netto nie ulega zmianie, linie ciągłe odpowiadają natomiast zmianom sprawności bloku netto odpowiadającym wartościom z rysunku 3.



Rys. 4. Wskaźnik efektu ekologicznego przy zmiennym udziale wagowym biomasy w paliwie (oznacz. % przy liniach wykresu) oraz wilgoci w biomasie. Linie przerywane odpowiadają założeniu, że sprawność energetyczna bloku netto nie ulega zmianie, linie ciągłe odpowiadają natomiast zmianom sprawności bloku netto z rysunku 3

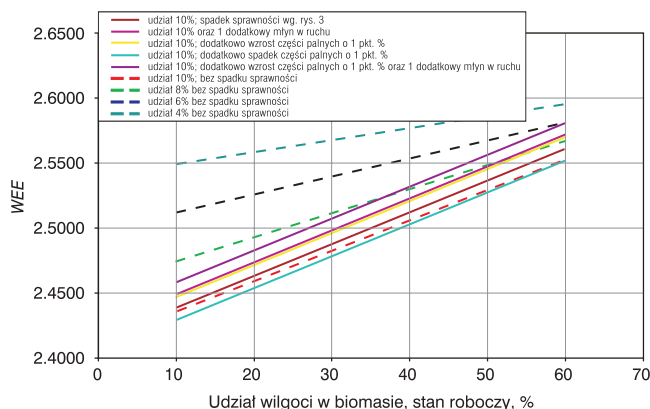
Jak należało się spodziewać wartości wskaźnika *WEE* są większe po uwzględnieniu spadku sprawności bloku. Efekt ten nasila się wraz ze zwiększaniem udziału wagowego biomasy w paliwie oraz wilgoci w biomasie.

Ze względu na to, że zmiany sprawności widoczne na rysunku 3 zostały uzyskane dla optymistycznych założeń o braku wpływu współspalania na pracę zespołów młynowych oraz na zawartość części palnych w żużlu i popiele lotnym, należy się spodziewać większych odchyłek rzeczywistego wskaźnika *WEE* od jego wartości przy stałej sprawności niż pokazano to na rysunku 4.

Przykładowo, przy udziale masowym biomasy rzędu 10%, może zachodzić konieczność wprowadzenia do ruchu dodatkowego zespołu młynowego (młyn, wentylator młynowy, podajniki), co wiąże się ze wzrostem mocy potrzeb własnych. W przypadku kotła BP 1150 wzrost ten wynosi ok. 1500 kW na jeden zespół młynowy. W przypadku zawartości części palnych w żużlu i popiele dane literaturowe nie określają jednoznacznie kierunku zmian tych parametrów podczas współspalania.

Na rysunku 5 przedstawiono przebieg wartości *WEE* dla udziału wagowego biomasy w mieszanke paliwowej równego 10% oraz dla różnych kombinacji wartości parametrów wpływających na sprawność bloku netto. Jak widać, włączenie do ruchu dodatkowego zespołu młynowego, jak również wzrost zawartości części palnych w żużlu i popiele o 1 punkt procentowy, powoduje wyraźny wzrost wskaźnika *WEE*. Na wykresie naniesiono dla porównania linie *WEE* dla udziału biomasy; 4, 6 oraz 8% bez spadku sprawności.

Można zaobserwować, iż efekt ekologiczny współspalania mieszanek o udziale biomasy 10%, któremu towarzyszy spadek sprawności bloku, może być równy efektowi ekologicznemu dla udziału 8, a nawet 6% bez spadku sprawności.



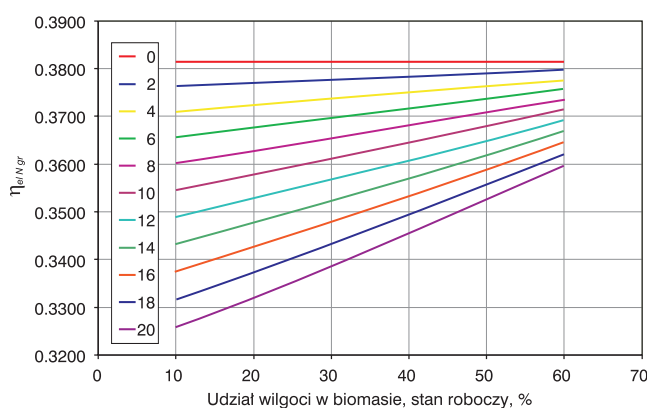
Rys. 5. Wskaźnik efektu ekologicznego przy różnych kombinacjach wartości parametrów wpływających na sprawność bloku netto. Udział oznacza udział wagowy biomasy w mieszance paliwowej

Określenie rzeczywistej sprawności netto jednostki wytwórczej współpalącej biomasę o określonych właściwościach jest więc zagadnieniem kluczowym do oceny procesu współpalania. Opracowanie charakterystyk jak na rysunku 3 wymaga jednak przeprowadzenia szeregu pomiarów bloku. W łatwy sposób można obliczyć graniczną sprawność bloku, której osiągnięcie spowoduje brak pozytywnego efektu ekologicznego współpalania. Jeżeli równanie (12) zapiszemy w postaci jawnej ze względu na sprawność oraz założymy: $WEE = WEE_0$, gdzie WEE_0 oznacza wartość wskaźnika dla przypadku bez współpalania, to otrzymujemy:

$$\eta_{elNgr} = \left[WEE_0 \left(1 + \frac{b}{1-b} \frac{W_{db}}{W_{dw}} \right) \right]^{-1} \quad (13)$$

gdzie η_{elNgr} jest właśnie graniczną sprawnością bloku netto, poniżej której współpalanie daje negatywny efekt ekologiczny przejawiający się wzrostem WEE powyżej WEE_0

Obliczone wartości η_{elNgr} dla $WEE_0 = 2,62$ (por. rys. 4) oraz danych z tabel 1 i 2 widoczne są na rysunku 6.



Rys. 6. Graniczna sprawność bloku netto przy zmiennym udziale wagowym biomasy w paliwie (oznacz. % przy liniach wykresu) oraz wilgoci w biomase

Porównanie charakterystyk sprawności widocznych na rysunkach 3 i 6 prowadzi do konkluzji, iż dla przyjętych założeń modelowych sprawność podczas

współpalania (dla wszystkich analizowanych wartości udziału wagowego biomasy) jest wyższa od sprawności granicznej.

Kwalifikacja energii elektrycznej wytworzonej podczas współpalania węgla i biomasy

Część energii elektrycznej wytworzonej podczas współpalania może być zakwalifikowana jako energia pochodząca z OZE, co wiąże się z jej uprzywilejowaniem na rynku. Korzystając z wprowadzonego pojęcia wskaźnika efektu ekologicznego (WEE) można przyjąć, iż z punktu widzenia ograniczenia emisji CO_2 , sposób rozliczania energii wyprodukowanej przy współpalaniu powinien nadawać tym większe uprzywilejowanie rynkowe jednostce (elektrowni), im niższy jest wskaźnik WEE produkowanej w niej energii.

Według obowiązujących aktów prawnych [2] ilość energii elektrycznej wytworzonej podczas współpalania i kwalifikowanej, jako pochodzącej z OZE, oblicza się według następującego wzoru:

$$E_{elOZE} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{bi} W_{dbi}}{\sum_{i=1}^n M_{bi} W_{dbi} + \sum_{i=1}^m M_{ki} W_{dki}} E_{elN} \quad (14)$$

gdzie [2]:

- E_{elOZE} – ilość energii elektrycznej lub ciepła zaliczonych do energii wytwarzanej z odnawialnych źródeł energii, MWh lub GJ,
- E_{elN} – ilość energii elektrycznej lub ciepła wytworzonych w jednostce wytwórczej, w której jest spalana biomasa lub biogaz wspólnie z innymi paliwami, MWh lub GJ,
- M_{bi} – masa spalanej w jednostce wytwórczej biomasy lub biogazu, Mg,
- M_{ki} – masa spalonych w jednostce wytwórczej innych rodzajów paliw, Mg,
- W_{dbi} – wartości opałowe biomasy lub biogazu spalonych w jednostce wytwórczej, obliczone w sposób określony w Polskich Normach, MJ/Mg,
- W_{dki} – wartości opałowe innych niż określone w symbolu W_{dbi} paliw spalonych w jednostce wytwórczej, obliczone w sposób określony w Polskich Normach, MJ/Mg,
- n – liczba rodzajów biomasy lub biogazu spalonych w jednostce wytwórczej,
- m – liczba rodzajów innych paliw spalonych w jednostce wytwórczej.

Rozpatrując postać równania (14) dla $n=1$ i $m=1$ w odniesieniu do okresu rozliczeniowego, w którym udział wagowy biomasy w mieszance paliwowej jest stały oraz wprowadzając do niego równanie (11) dochodzi się do formuły:

$$\frac{E_{elOZE}}{E_{elN}} = \frac{b W_{db}}{W_{dw} + b(W_{db} - W_{dw})} \quad (15)$$

Jak wynika z powyższego równania, udział energii kwalifikowanej jako pochodzącej z OZE w całkowitej produkcji netto zależy tylko od udziału wagowego biomasy oraz wartości opałowych obu paliw.

Wobec braku zależności $\frac{E_{elOZE}}{E_{elN}}$ od sprawności bloku netto, zmiany efektu ekologicznego (wskaźnika WEE) wywołane zmianą sprawności nie wpływają na ilość energii podlegającej uprzywilejowaniu rynkowemu, co skłania do poszukiwania innych formuł obliczeniowych.

Opierając się na zasadach rachunku kosztów unikniętych [6] proponuje się przeprowadzenie rozumowania przy następującym założeniu:

uprzywilejowaniu rynkowemu podlega taka ilość energii elektrycznej, która byłaby wytworzona poprzez spalanie paliwa kopalnego (nieodnawialnego), a której wytwarzania udało się uniknąć dzięki wprowadzeniu współspalania z paliwem odnawialnym.

Zakłada się przy tym stałą moc bloku netto ($N_{elN} = idem$).

Opracowanie odpowiedniego wzoru obliczeniowego dogodnie jest rozpocząć od określenia zmniejszenia wskaźnika efektu ekologicznego ΔWEE wywołanego stosowaniem współspalania:

$$\Delta WEE = WEE_0 - WEE \tag{16}$$

gdzie:
 WEE_0, WEE – wskaźniki efektu ekologicznego w przypadku odpowiednio: spalania tylko paliwa kopalnego, współspalania paliwa kopalnego z biomasą.

Zmniejszenie zużycia energii chemicznej paliwa kopalnego wynosi wówczas:

$$\Delta(\dot{G}_w W_{dw}) = \Delta WEE N_{elN} \tag{17}$$

Moc bloku netto, która byłaby generowana przez wyeliminowany (dzięki współspalaniu) strumień energii chemicznej paliwa kopalnego

$$N_{elOZE} = \frac{\Delta(\dot{G}_w W_{dw})}{WEE_0} \tag{18}$$

Dzieląc powyższe równanie stronami przez N_{elN} otrzymujemy

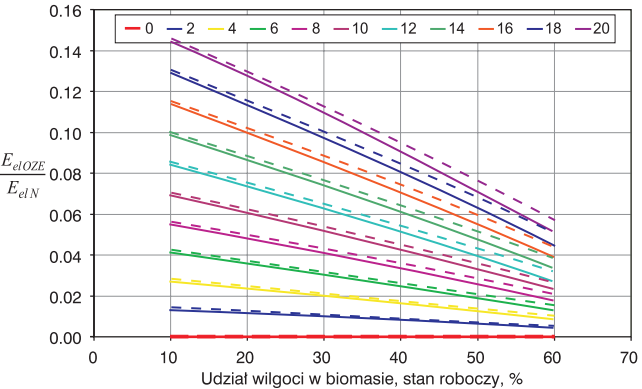
$$\frac{N_{elOZE}}{N_{elN}} = \frac{\Delta WEE}{WEE_0} = \frac{WEE_0 - WEE}{WEE_0} \tag{19}$$

Rozpatrując pracę bloku ze stałą mocą w danym okresie rozliczeniowym można zapisać:

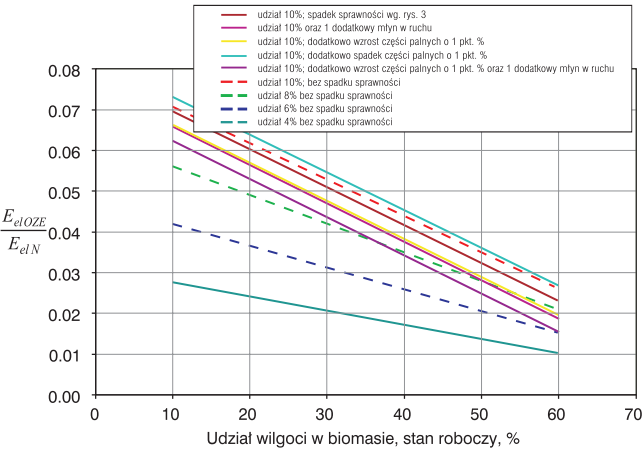
$$\frac{E_{elOZE}}{E_{elN}} = \frac{N_{elOZE}}{N_{elN}} = \frac{WEE_0 - WEE}{WEE_0} \tag{20}$$

Równanie (20) stanowi końcową interpretację matematyczną wspomnianego powyżej założenia. Udział energii kwalifikowanej jako pochodzącej z OZE w całkowitej produkcji netto zależy bezpośrednio od różnicy wskaźników efektu ekologicznego, a więc uwzględnia wpływ niekorzystnych czynników powodujących obniżenie sprawności podczas współspalania.

Na rysunku 7 przedstawiono wartości $\frac{E_{elOZE}}{E_{elN}}$ uzyskane dla wartości WEE z rysunku 4. Wyniki widoczne na rysunku 8 uzyskano natomiast dla danych o WEE z rysunku 5.



Rys. 7. Ułamek energii elektrycznej netto kwalifikowanej jako energia z OZE przy zmiennym udziale wagowym biomasy w paliwie (oznacz. % przy liniach wykresu) oraz wilgoci w biomasy. Obliczenia na podstawie równania (20); dane WEE z rysunku 4. Linie przerywane odpowiadają założeniu, że sprawność energetyczna bloku netto nie ulega zmianie, linie ciągłe odpowiadają natomiast zmianom sprawności bloku netto z rysunku 3



Rys. 8. Ułamek energii elektrycznej netto kwalifikowanej jako energia z OZE przy różnych kombinacjach wartości parametrów wpływających na sprawność bloku netto. Udział oznacza udział wagowy biomasy w mieszance paliwowej. Obliczenia na podstawie równania (20); dane WEE z rysunku 5

Porównując wyniki zamieszczone na rysunkach 4, 5, 7 oraz 8 można zauważyć wyraźną tendencję: im wyższe wartości WEE (dla danego udziału wagowego biomasy),

tym niższe wartości $\frac{E_{elOZE}}{E_{elN}}$.

Ważną cechą proponowanego sposobu rozliczania jest jego zgodność z metodą przyjętą w obowiązującym rozporządzeniu w przypadku, gdy spadek sprawności spowodowany współspalaniem nie występuje. Fakt ten znajduje następujące uzasadnienie matematyczne:

w przypadku braku spadku sprawności możemy zapisać:

$$WEE_0 = \frac{\dot{G}_b W_{db} + \dot{G}_w W_{dw}}{N_{elN}} \quad (21)$$

wprowadzając równania (9) i (21) do (20) otrzymujemy zależność (22), która jest tożsama z (14).

$$\frac{E_{elOZE}}{E_{elN}} = \frac{\dot{G}_b W_{db}}{\dot{G}_b W_{db} + \dot{G}_w W_{dw}} \quad (22)$$

Wnioski

Kryterium oceny efektów ekologicznych współspalania biomasy z paliwami kopalnymi powinno być oparte na zmianie zużycia tych ostatnich liczonej na jednostkową ilość produktu użytecznego danego procesu. W niniejszym artykule strumień paliwa kopalnego oraz biomasy określano w obrębie osłony bilansowej kotła, jednak w przypadku kompleksowej analizy efektów ekologicznych procesów współspalania powinno się uwzględnić wszystkie czynniki, na przykład koszty ekologiczne pozyskania i transportu obu paliw.

Uzyskane wyniki obliczeń symulacyjnych potwierdzają istnienie wpływu prowadzenia współspalania na sprawność energetyczną kotła i bloku. Wpływ ten może w skrajnych sytuacjach prowadzić do przypadku granicznego, w którym pomimo stosowania dodatku biomasy korzystne efekty ekologiczne nie występują. Dla założeń przyjętych w niniejszym artykule dla dużego bloku energetycznego występowanie przypadku granicznego nie jest prawdopodobne, a nadwyżka sprawności bloku ponad sprawność graniczną jest stosunkowo duża. Współspalanie biomasy w kotłach energetyki zawodowej jest więc w tych warunkach celowe z punktu widzenia zmniejszenia zużycia paliw kopalnych w krajowym systemie energetycznym. Należy jednak podkreślić lokalny charakter tego procesu oraz konieczność racjonalnego gospodarowania biomasa, której podaż w chwili obecnej kształtuje się znacznie poniżej potrzeb energetyki.

Zaproponowana w niniejszym artykule modyfikacja metody kwalifikacji energii wytworzonej podczas współspalania jako pochodzącej z OZE uwzględnia zmiany sprawności wywołane współspalaniem.

Jej praktyczna realizacja jest jednak skomplikowana ze względu na konieczność ustalenia wskaźnika WEE_0 , co sprowadza się do wyznaczenia sprawności netto jednostki wytwórczej pracującej tylko na paliwie kopalnym o tych samych parametrach jak przy współspalaniu. Ustalanie wskaźników WEE_0 (bez współspalania) oraz WEE (podczas współspalania) musi się ponadto odbywać przy założeniu, że wartości parametrów bloku niezwiązanych z prowadzeniem współspalania (np. obciążenie, parametry otoczenia, stan urządzeń) są takie same w obu przypadkach. Dotrzymanie tego założenia w praktyce, w warunkach normalnej eksploatacji, jest bardzo trudne. W tej sytuacji niezbędne byłoby opracowanie praktycznej metody, za pomocą której możliwe byłoby obliczenie wskaźnika WEE_0 dla warunków występujących podczas pomiaru wskaźnika WEE . Metoda ta powinna z jednej strony cechować się wysoką dokładnością, z drugiej zaś być przejrzystą i uniwersalną z powodu wymagań legislacyjnych.

Niezależnie od przedstawionych ograniczeń procesu współspalania węgla i biomasy w dużych jednostkach wytwarzania energii elektrycznej należy jednak podkreślić ewidentne korzyści środowiskowe i społeczne tego procesu. Decydują o nich niskie nakłady inwestycyjne na dostosowanie istniejących jednostek wytwórczych do procesu współspalania oraz relatywnie wysoka efektywność przetwarzania energii chemicznej paliw na energię użyteczną w obiektach energetyki zawodowej.

LITERATURA

- [1] Dyrektywa 2001/77/WE Parlamentu Europejskiego i Rady Europy z dnia 27 września 2001 w sprawie promocji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych na wewnętrznym rynku energii elektrycznej
- [2] Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 30 maja 2003 w sprawie szczegółowego zakresu obowiązku zakupu energii elektrycznej i ciepła z odnawialnych źródeł energii oraz energii elektrycznej wytwarzanej w skojarzeniu z wytwarzaniem ciepła. Dz. U. z 2003 nr 104, poz. 971
- [3] Ustawa o podatku akcyzowym z dnia 23 stycznia 2004. Dz. U. nr 29 poz. 257
- [4] Zawistowski J., Raińczyk J.: Doświadczenia IChPW z badań współspalania w różnych kotłach energetycznych. Materiały konferencji „Współspalanie biomasy i paliw wtórnych w kotłach energetycznych”, Zakopane, 13–14 maja 2004
- [5] Kasprzyk K., Golec T.: Kompleksowe badania współspalania biomasy w kotłach OP 380. Tamże.
- [6] Szargut J., Ziębiak A.: Podstawy energetyki cieplnej. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998

