

Krystyna Lech-Brzyk

Emisja wybranych zanieczyszczeń podczas spalania biomasy w kotłach o mocy 2÷4 MW

Współczesny trend do wytwarzania energii z biomasy może być powodem różnych problemów. Podstawowym jest przekonanie, że emisja CO₂ ze spalania biomasy nie ma wpływu na środowisko, a zwłaszcza na tzw. efekt cieplarniany, co opiera się na założeniu, że ilość CO₂ powstająca podczas jej spalania jest równoważna ilości CO₂ pobieranego z atmosfery w procesie fotosyntezy. Takie podejście budzi wątpliwości, ponieważ z jednej strony – zgodnie z metodą IPCC stosowaną w inwentaryzacji emisji gazów cieplarnianych – emisji CO₂ ze spalania biomasy nie wlicza się do sumy emisji ze spalania paliw, co jest równoważne stosowaniu zerowego wskaźnika emisji CO₂ w przypadku biomasy [1], zaś z drugiej strony to samo źródło podaje wartości wskaźników emisji CO₂ ze spalania różnych paliw – 109,76 kg/GJ w przypadku biomasy oraz 94,92 kg/GJ i 108,31 kg/GJ, odpowiednio podczas spalania węgla kamiennego i brunatnego. Wynika stąd, że emisja CO₂ towarzysząca wytworzeniu energii w ilości 1 MWh z biomasy jest większa niż emisja CO₂ podczas wytworzenia tej samej ilości energii z węgla.

Całkowita krajowa produkcja energii odnawialnej z biomasy w 2012 r wyniosła 295,574 PJ, co wiązało się z emisją 32,4 mln ton CO₂ [2]. Zatem wiązanie CO₂ przez roślinność (sektor 5 – Użytkowanie gruntów, zmiany użytkowania gruntów i leśnictwo – ujęty w wytycznych IPCC [1]) w ilości około 45,12 mln ton CO₂ w 2010 r. a w 2011 r. – 24,17 mln ton CO₂, nie równoważy obecnie ilości wyprodukowanego CO₂ ze spalania biomasy. Pochłanianie CO₂ przez tzw. sektor 5 w 2011 r. było znacznie mniejsze, w porównaniu z latami poprzednimi, co wynikało ze zwiększonej ilości pozyskanego drewna w 2011 r. [1]. Łącznie – wraz z tendencją do zwiększania ilości energii odnawialnej z biomasy – może to w najbliższych latach niezrównoważyć bilansu CO₂ powstającego podczas spalania biomasy.

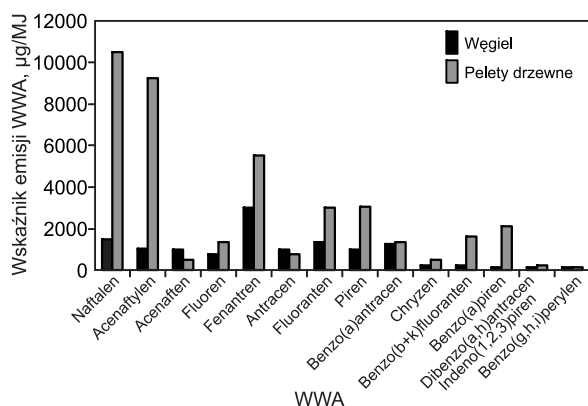
Przyjęcie zerowego wskaźnika emisji CO₂ w przypadku biomasy byłoby oczywiste, jeśli spalaniu określonej ilości biomasy towarzyszyłaby równoległa produkcja odpowiedniego arealu roślin energetycznych, mogących zasymilować wyemitowany CO₂ w kolejnym sezonie wegetacyjnym. W pracy [3] oszacowano, że 1 ha uprawy miskanta wiąże 780÷1130 kgC/ha (2,86÷4,14 tCO₂/ha), a wierzby energetycznej 550÷830 kgC/ha (2,02÷3,04 tCO₂/ha). Oznaczałoby to konieczność pozyskania biomasy z milionów hektarów plantacji celowych w ciągu roku. Tymczasem, według Instytutu Upraw, Nawożenia i Gleboznawstwa [3],

bez szkody w produkcji żywności polskie rolnictwo może przeznaczyć powierzchnię około 1 mln ha pod produkcję biomasy na potrzeby energetyki zawodowej, zwłaszcza że w strukturze wykorzystywanej biomasy energetycznej należy stopniowo zmieniać proporcje dendromasy i biomasy rolnej na rzecz większego wykorzystania surowców rolnych, zarówno z upraw celowych, jak i wszelkich produktów ubocznych i odpadowych. Dostępny roczny potencjał energetyczny z upraw wynosi 130,549 PJ [3], jednak areal plantacji wieloletnich, trwałych roślin energetycznych w Polsce w 2009 r. wynosił tylko około 10 200 ha (0,1% celowych upraw energetycznych) [4], który w kolejnych latach nie zwiększał się w związku ze zlikwidowaniem dopłat unijnych do ich zakładania.

Inne negatywne skutki spalania biomasy to emisja zanieczyszczeń do powietrza, w tym pyłu, sadzy, lotnych związków organicznych i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA). W literaturze niewiele jest doniesień o emisji zanieczyszczeń z kotłów o mocy większej niż 1 MW, gdyż badania najczęściej dotyczą domowych palenisk o małej mocy. Autorzy pracy [5] prowadzili w skali laboratoryjnej badania porównawcze emisji zanieczyszczeń ze spalania węgla i biomasy – w wielu przypadkach ilość ogólnego węgla organicznego ze spalania biomasy była większa niż ze spalania węgla; przewidywano też wzrost emisji dioksyn i furanów, jako wynik wysokotemperaturowej wtórnej syntezy związków organicznych z rodników organicznych obecnych w strefie spalania.

Znowelizowana norma PN-EN 303-5:2012 dopuszcza w przypadku kotłów o mocy ≤500 kW opalanych biopaliwami stałymi emisję CO w zakresie 500÷5000 mg/m³, pyłu – 40÷150 mg/m³ oraz węgla związanego organicznie (ÓGC – organically bound carbon) w zakresie 20÷150 mg/m³ – w przeliczeniu na zawartość O₂ w spalinach równą 10% [6]. Tymczasem nowe instalacje kotłowe o mocy ≤500 kW nie będą mogły emitować pyłu w ilości większej niż 50 mg/m³, a o mocy w zakresie 1÷50 MW w ilości powyżej 20 mg/m³ (13% O₂) [6].

Badania wykazały, że emisja wybranych WWA podczas spalania biomasy drzewnej w piecu stałopalnym była znacznie większa niż przy spalaniu węgla w porównywalnych warunkach (rys. 1) [6]. Autorzy pracy [7], badając emisję zanieczyszczeń z kotłów o mocy <35 kW opalanych drewnem wykazali, że emisja WWA odniesiona do energii wprowadzonej w paliwie wynosiła 180 µg/MJ i 66 µg/MJ, natomiast całkowity wskaźnik emisji, uwzględniający toksyczność poszczególnych WWA, wyniósł 0,21 µg/MJ i 0,56 µg/MJ, odpowiednio przy mniejszym i większym obciążeniu kotła, podczas którego emitowane były bardziej



Rys. 1. Profile wybranych WWA emitowanych podczas spalania węgla i biomasy drzewnej w piecu stałopalnym [6]

Fig. 1. Profiles of selected PAHs emitted on burning of coal and wooden biomass in steady-fire furnace [6]

toksyczne WWA. W pracy [8] badano emisję zanieczyszczeń podczas spalania drewna w formie peletów i zrębków z trzech kotłów o mocy 150÷500 kW z automatycznym zasilaniem paliwem i trójstopniowym podawaniem powietrza. Stwierdzono, że emisja WWA wynosiła 19,4÷92,8 µg/MJ, przy zawartości CO w spalinach w zakresie 107÷734 mg/MJ. Znacznie większą emisję WWA stwierdzono w pracy [9], w której badano kotły retortowe o mocy 50 kW spalające zrębki różnych gatunków drzew przy dwóch obciążeniach kotła – niskim (stan spoczynku) i wysokim. Zawartość WWA w spalinach i na cząstkach pyłu wynosiła 1,3÷1631,7 µg/m³, przy zawartości CO w spalinach w ilości 96÷6002 ppm (120÷7502,5 mg/m³ w warunkach normalnych) oraz NO – 28÷359 ppm (37,5÷481 mg/m³ w warunkach normalnych). Określono zależność między emisją CO i WWA oraz między emisją CO i WWA a wartością parametrów paliwa (zawartość wilgoci) i kotła (obciążenie). Wykazano, że maksymalna emisja WWA występowała przy małej zawartości NO i wysokiej zawartości CO i O₂ w spalinach. Emisję WWA i PCB podczas spalania peletów drzewnych w kotle retortowym o mocy 50 kW przy dwóch obciążeniach badano także w pracy [10]. Zawartość WWA w spalinach w tych warunkach wynosiła 6,4÷154 µg/m³. Stwierdzono, że emisja WWA zwiększała się proporcjonalnie wraz ze wzrostem ilości CO w spalinach, zaś PCB wraz ze wzrostem ilości WWA. Ponieważ emisja WWA zależy od sprawności kotła i maleje wraz z jej wzrostem, dlatego niskoemisyjne spalanie biomasy wymaga utrzymania optymalnego obciążenia kotła.

Ważnym elementem procesów spalania biomasy jest możliwość wykorzystania popiołu lotnego jako nawozu (np. uprawy leśne). Autor pracy [11] badał popioły lotne po spalaniu biomasy i stwierdził, że zawartość węgla organicznego w popiele osiągała nawet 40%, a WWA 91÷330 mg/kg. Po powtórnym spalaniu popiołu w elektrycznym piecu muflowym przez 2 h w temperaturze około 550°C (recykling) zawartość węgla organicznego zmniejszyła się do około 5%, a WWA do 0,24 mg/kg. Zawartość Ca wzrosła z 12% do 18%, K z 6,4% do 9%, Mg z 2,9% do 4,2%, przy czym wartość pH popiołów po recyklingu zmalała z 13,3 do 12,8. Zagrożenie środowiska emisją drobnych pyłów (PM 1) z małych pieców opalanych drewnem oraz z automatycznego kotła do spalania peletów badano w pracy [12]. Wykazano, że emisja tych pyłów była zależna od rodzaju paleniska i wynosiła od 50,7 mg/MJ do 19,7 mg/MJ (kocioł do spalania peletów), natomiast zawartość WWA wynosiła w nich odpowiednio od 90 µg/MJ do 0,12 µg/MJ.

Charakterystyka badanych obiektów

Celem badań była ocena emisji wybranych zanieczyszczeń z kotłów o mocy w zakresie 2÷4 MW, spalających biomasę niezanieczyszczoną chemicznie, o jednorodnym składzie, zabezpieczoną przed wpływem warunków atmosferycznych, w stanie powietrzno-suchym. Kierując się tymi przesłankami do badań wytypowano następujące paleniska i paliwa:

- kocioł z przedpaleniskiem fluidalnym typu ES-125 o mocy około 2,6 MW, przeznaczony do spalania drewna odpadowego w formie rozdrobnionej (ES-125 – sesja B),
- palenisko z rusztem schodkowym typu WCO-160 o mocy około 3,5 MW, przeznaczone do spalania słomy rozdrobnionej (WCO-160 – sesja A i sesja B),
- przedpalenisko ceramiczne VK 75 z rusztem dwuspadowym przystosowane do współpracy z kotłem ERM 3,3 o mocy około 2,3 MW z podajnikiem ślimakowym, spalające trociny i wióry (VK 75 – sesja A i sesja B),
- kocioł Polytechnik o mocy około 4 MW z paleniskiem podsuwowym USF, przeznaczony do spalania suchych trocin i wiórów (USF – sesja A i sesja B) [13].

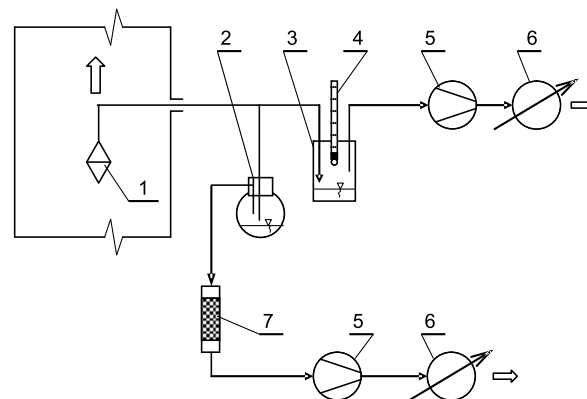
Wybrane paleniska są przeznaczone do spalania biomasy w różnej formie, podawanej w sposób ciągły, a więc gwarantują wysokosprawny i niskoemisyjny proces spalania.

Metody pomiarowe

Punkty pomiarowe zlokalizowano tuż za badanymi kotłami, przed cyklonami i wentylatorami ciągu. Układ do pomiaru unosu pyłu metodą grawimetryczną spełniał wymogi normy [14], a układ do pobierania i oznaczania nieorganicznych zanieczyszczeń gazowych w spalinach – wymogi rozporządzenia [15]. Układ ten składał się z następujących elementów:

- ogrzewana głowica z filtrem wstępnym,
- ogrzewana linia do poboru próbek gazów,
- kondycjoner PSS-5 z chłodnicą Peltiera, pompką zasysającą, filtrem wtórnym i separatorem skroplin,
- analizator PG-250 firmy HORIBA do pomiaru SO₂, NO_x, CO, CO₂ i O₂.

Schemat układu pomiarowego do poboru próbek spalin w celu oznaczenia zawartości WWA przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat układu poboru próbek spalin do oznaczenia WWA (1 – filtr szklany na pył i WWA, 2 – skropliny na WWA, 3 – odkraplacz, 4 – temperatura punktu rosy, 5 – pompa, 6 – przepływomierz i licznik gazowy, 7 – rurka sorbentu WWA)

Fig. 2. Schematic diagram of flue gas sampling for PAH determination (1 – glass filter for dust and PAHs, 2 – condensate for PAHs, 3 – mist eliminator, 4 – dew point, 5 – pump, 6 – flow meter and gas flow counter, 7 – PAH sorbent tube)

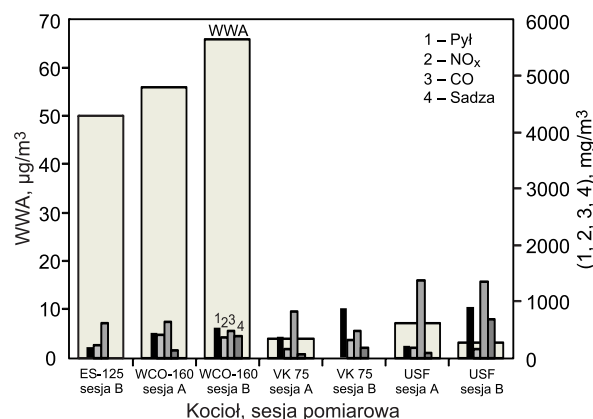
Metodyka oznaczania WWA, w tym benzo(a)pirenu, została opracowana w Politechnice Wrocławskiej w oparciu o normy i wytyczne Agencji Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (U.S. EPA) oraz niemieckiego Stowarzyszenia Nadzoru Technicznego (TÜV). Polega ona na tym, że zanieczyszczenia zaadsorbowane na drobnooporowatym filtrze (Whatmann) oraz węgla aktywnym o specjalnie dobranej granulacji, ekstrahuje się chlorkiem metylenu za pomocą ekstraktora ultradźwiękowego. Następnie próbkę zagęszcza się w atmosferze azotu i poddaje kilkusetapowemu oczyszczaniu z innych frakcji węglowodorów, aż do otrzymania chromatogramu o niskim tle zanieczyszczeń [13]. Oznaczenie benzo(a)pirenu wykonano z użyciem chromatografu Hewlett-Packard z detektorem FID i kolumną kapilarną HP-5 o długości 30m. Aparat współpracował z komputerowym programem do obróbki danych. Gazem palnym był wodór, a gazem nośnym – hel. W wyniku analizy otrzymano piki chromatograficzne, które następnie zidentyfikowano na podstawie podawanego wzorca. Do identyfikacji substancji wykrytych w badanych próbkach użyto wzorcowych chromatograficznych firmy Supelco zawierający 16 WWA. Dokładność analizy wynosiła 0,0001 µg substancji w badanej próbce, a błąd pomiaru ±10%. Równolegle pobierano próbki spalanej biomasy do analizy technicznej i analizy elementarnej oraz próbki popiołu w celu oznaczenia zawartości części palnych [13].

Analiza wyników pomiarów

W tabeli 1 przedstawiono wyniki analizy technicznej, a w tabeli 2 wyniki analizy elementarnej próbek biomasy. Z kolei w tabelach 3 i 4 zamieszczono wyniki pomiarów zawartości podstawowych zanieczyszczeń nieorganicznych oraz pyłu i sadzy, a także ogólnego węgla organicznego

(OWO) i poszczególnych WWA w spalinach z analizowanych kotłów. Ponadto w tabeli 4 zamieszczono obliczone wartości wskaźników tych zanieczyszczeń w odniesieniu do 1 MJ energii wprowadzonej w paliwie.

Na rysunku 3 porównano emisje WWA, pyłu, NO_x, CO i sadzy z poszczególnych palenisk.



Rys. 3. Porównanie emisji WWA, pyłu, NO_x, CO i sadzy z czterech kotłów opalanych biomasa

Fig. 3. PAH, dust, NO_x, CO and soot emission comparison from four biomass-fired boilers

Otrzymane w badaniach wartości wskaźników emisji WWA wynosiły od 0,7 µg/MJ do 28,4 µg/MJ przy zawartości CO w zakresie 0,13÷0,96 g/MJ. Były one mniejsze niż podane w pracy [8] w przypadku kotłów o mocy 150÷500 kW (19÷93 µg/MJ, przy zawartości CO w zakresie 107÷734 mg/MJ), a także niż podane w pracy [7] w przypadku kotłów o mocy <35 kW (66÷180 µg/MJ). Wskaźniki emisji obliczone z uwzględnieniem toksyczności poszczególnych WWA, wyrażone równoważnikami toksyczności

Tabela 1. Wyniki analizy technicznej biomasy
Table 1. Results of biomass technical analysis

Biomasa	Wilgoć* %	Popiół* %	Popiół** %	Części lotne* %	Części lotne*** %	Ciepło spalania* MJ/kg	Wartość opałowa* MJ/kg	Wartość opałowa*** MJ/kg
ES-125/B	5,89	0,72	0,76	79,81	85,46	18900	17472	18709
WCO-160/A	4,76	1,97	2,07	80,33	86,13	17796	16414	17598
WCO-160/B	7,37	3,52	3,80	72,38	80,99	17420	15965	18118
VK 75/A	8,03	0,42	0,46	76,52	83,55	17835	16340	18062
VK 75/B	7,77	2,35	2,55	74,56	82,78	17325	15860	17857
USF/A	6,58	0,34	0,36	77,02	82,72	18088	16589	17995
USF/B	9,86	0,23	0,26	57,84	64,32	16445	14873	16539

*stan analityczny, **stan suchy, ***stan suchy i bezpopiołowy

Tabela 2. Wyniki analizy elementarnej biomasy
Table 2. Results of biomass elementary analysis

Biomasa	Węgiel* %	Wodór* %	Azot* %	Siarka og.* %	Węgiel*** %	Wodór*** %	Azot*** %	Siarka og.*** %	Chlor* %
ES-125/B	47,92	5,88	0,10	0,05	51,31	6,30	0,11	0,05	0,02
WCO-160/A	45,27	5,80	0,40	0,14	48,54	6,22	0,43	0,15	0,22
WCO-160/B	44,25	5,84	0,74	0,14	49,66	6,55	0,83	0,16	0,20
VK 75/A	47,02	5,95	0,10	0,04	51,36	6,50	0,11	0,04	0,08
VK 75/B	38,50	5,84	0,17	0,04	42,83	6,50	0,19	0,04	0,04
USF/A	48,44	6,13	0,18	0,01	52,04	6,58	0,19	0,01	0,001
USF/B	38,99	3,86	0,14	0,00	43,36	4,29	0,16	0,00	0,008

*stan analityczny, **stan suchy, ***stan suchy i bezpopiołowy

Tabela 3. Emisja zanieczyszczeń z poszczególnych kotłów oraz wartości wskaźników emisji
Table 3. Pollution emission from individual boilers and emission index values

Kocioł	Pył*		Sadza*		OWO*		SO ₂ *		CO*		NO _x *		O ₂
	mg/m ³	g/MJ	mg/m ³	g/MJ	mg/m ³	g/MJ	mg/m ³	g/MJ	mg/m ³	g/MJ	mg/m ³	g/MJ	%
ES-125 sesja B	190,65	0,042	–	–	2,9719	0,0006	0,04	0,00003	608,80	0,130	217,61	0,069	16,67
WCO-160 sesja A	442,10	0,218	116,352	0,051	3,6138	0,0016	124,81	0,055	632,68	0,277	397,89	0,171	10,35
WCO-160 sesja B	536,22	0,230	381,865	0,165	51,728	0,023	177,53	0,079	482,51	0,209	360,65	0,155	9,30
VK 75 sesja A	358,77	0,069	48,116	0,009	20,851	0,004	8,23	0,002	814,61	0,158	157,61	0,030	16,86
VK 75 sesja B	876,43	0,348	161,985	0,064	4,743	0,002	3,95	0,002	460,06	0,183	298,91	0,119	13,04
USF sesja A	214,35	0,129	74,477	0,045	3,933	0,002	13,04	0,009	1358,84	0,820	170,39	0,101	14,81
USF sesja B	889,07	0,626	677,430	0,479	5,696	0,004	13,91	0,017	1350,44	0,956	155,27	0,108	13,84

*w warunkach normalnych przy zawartości O₂ w spalinach równej 6%

Tabela 4. Emisja WWA z poszczególnych kotłów oraz wartości wskaźników emisji
Table 4. PAH emission from individual boilers and emission index values

WWA, jednostka	ES-125 sesja B	WCO-160 sesja A	WCO-160 sesja B	VK 75 sesja A	VK 75 sesja B	USF sesja A	USF sesja B
Naftalen*, µg/m ³	5,3612	10,2878	33,3615	0,8063	nw.	2,4447	–
Acenaftylen*, µg/m ³	14,5192	23,0514	21,0025	0,2073	nw.	3,2546	3,0493
Acenaften*, µg/m ³	18,3568	3,7254	0,0054	0,4641	nw.	–	–
Fluoren*, µg/m ³	6,1122	2,8169	0,0072	1,5848	nw.	–	–
Fenantren*, µg/m ³	3,4015	3,4906	4,2235	0,693	nw.	0,9785	–
Antracen*, µg/m ³	–	0,4598	–	–	–	–	–
Fluoranten*, µg/m ³	2,2732	4,9169	2,9905	–	–	0,4912	–
Piren*, µg/m ³	–	7,2674	4,1849	–	–	–	–
Suma WWA*, µg/m ³	50,0241	56,0162	65,7755	3,7555	–	7,1690	3,0493
Suma WWA** jako b(a)p, µg/m ³	0,050	0,062	0,0568	0,0038	–	0,0072	0,0031
Wskaźnik emisji WWA, µg/MJ	10,6470	24,5571	28,4499	0,7251	–	4,3274	2,1639
Wskaźnik emisji WWA** jako b(a)p, µg/MJ	0,01065	0,0264	0,0285	0,0007	–	0,0043	0,0022

*w warunkach normalnych przy zawartości O₂ w spalinach równej 6%

**z uwzględnieniem toksyczności

nw. – nie wykryto

odniesionymi do energii wprowadzonej w paliwie, wyniosły od 0,0007 µg/MJ do 0,0285 µg/MJ i były znacznie mniejsze niż uzyskane w pracy [7] w przypadku kotłów o mocy <35 kW (0,21÷0,56 µg/MJ).

Zawartość oznaczanych WWA wynosiła od 0,005 µg/m³ do 33,362 µg/m³ przy zawartości CO i NO_x w zakresie 460÷1358 mg/m³ i 155÷398 mg/m³, odpowiednio w warunkach normalnych i w przeliczeniu na zawartość O₂ w spalinach równą 6%. W badaniach emisji z kotła o mocy 50 kW stwierdzono natomiast obecność WWA w spalinach w zakresie 1,3÷1631,7 µg/m³ przy zawartości CO w zakresie 120÷7502,5 mg/m³ oraz NO w zakresie 37,5÷481 mg/m³ (w odniesieniu do 10% O₂), przy czym wysokie wartości

uzyskano w stanie spoczynku kotła [9]. W innych badaniach, w przypadku kotła o mocy 50 kW, stwierdzono emisję WWA w zakresie 6,4÷154 µg/m³ [10].

Z tabeli 4 i rysunku 3 wynika, że największa emisja WWA miała miejsce podczas spalania słomy w kotle WCO-160 (zwłaszcza w sesji B) oraz w kotle ES-125 – były to wartości kilkakrotnie większe niż w przypadku pozostałych kotłów. Zawartość WWA w spalinach jest proporcjonalna do ilości CO [9], na co ma wpływ m.in. sposób podawania i spalania biomasy, sprawność paleniska oraz właściwości biomasy. Spalanie biomasy wilgotnej może być powodem kilkakrotnego wzrostu zawartości CO w spalinach. Istotny wpływ ma też sposób podawania paliwa oraz faza spalania

– na korzyść podawania ciągłego oraz spalania płomieniowego, a nie bezpłomieniowego tlenia.

Takie niekorzystne czynniki występowały w przypadku spalania słomy w kotle WCO-160, pomimo podawania ciętej słomy w sposób ciągły. Jej okresowe, powtarzające się, przesypanie z podajnika na ruszt pochyły powodowało gaszenie płomienia, ograniczenie dopływu powietrza do spalającego się na ruszcie paliwa i w konsekwencji jego tlenie. Wynikało to także z dużej bezwładności układu podawania powietrza do kotła. Przy spalaniu słomy w kotle WCO-160 zanotowano również największą zawartość tlenków azotu i siarki, gdyż słoma miała najwyższą zawartość azotu i siarki w porównaniu z innymi rodzajami biomasy (tab. 2). Znaczna zawartość NO_x w spalinach z paleniska USF wynikała natomiast z panujących w nim wysokich temperatur ($>1000^\circ\text{C}$).

Wnioski

♦ Wartości wskaźników emisji WWA podczas spalania biomasy w badanych kotłach o mocy 2÷4 MW, w odniesieniu do energii wprowadzonej w paliwie, były kilkakrotnie mniejsze niż zawarte w doniesieniach literaturowych dotyczących kotłów o małej mocy. Również wartości wskaźników uwzględniających współczynniki toksyczności poszczególnych WWA były wielokrotnie mniejsze niż dane literaturowe, co wynikało z dużej zawartości w spalinach przede wszystkim węglowodorów o niskiej toksyczności. Potwierdzają to badania [16], w których stwierdzono zmniejszenie emisji WWA oraz dominację węglowodorów dwu- i trójpierścieniowych w spalinach wraz ze wzrostem wydajności kotła.

♦ Największe wartości wskaźników emisji WWA miały miejsce podczas spalania słomy w kotle WCO-160 ($24,6 \mu\text{g}/\text{MJ}$ i $28,4 \mu\text{g}/\text{MJ}$, przy wartościach wskaźnika CO odpowiednio $0,277 \text{ g}/\text{MJ}$ i $0,209 \text{ g}/\text{MJ}$). Słoma okazała się paliwem trudnym do spalania (niejednorodnym, o dwukrotnie większej zawartości wilgoci i popiołu w serii B niż w serii A), co prawdopodobnie spowodowało większą zawartość pyłu i OWO w spalinach, a także ponad 3-krotnie większą zawartość sadzy, która jest nośnikiem WWA [17].

♦ Wskaźniki emisji WWA miały najmniejsze wartości podczas spalania trocin w kotle VK 75 (zero i $0,73 \mu\text{g}/\text{MJ}$, przy wartościach wskaźnika CO odpowiednio $0,183 \text{ g}/\text{MJ}$ i $0,158 \text{ g}/\text{MJ}$) oraz podczas spalania trocin i wiórów w kotle USF ($2,2 \mu\text{g}/\text{MJ}$ i $4,3 \mu\text{g}/\text{MJ}$, przy wartościach wskaźnika CO odpowiednio $0,956 \text{ g}/\text{MJ}$ i $0,820 \text{ g}/\text{MJ}$).

♦ Mimo że wszystkie konstrukcje badanych kotłów są zalecane do spalania biomasy, emisja zanieczyszczeń, w tym WWA, zmieniała się w dość szerokim zakresie. Miała na to wpływ zapewne forma spalanej biomasy, jej niewielka gęstość, przez to niejednorodność, a także temperatura w kotłach. Optymalna temperatura formowania WWA wynosi $700\text{--}900^\circ\text{C}$, a ich rozkład następuje w temperaturze $1000\text{--}1300^\circ\text{C}$, często przy wzroście ilości CO [10]. Podczas podawania biomasy w badanych kotłach obserwowano występowanie zjawiska pełnego spalania (płomień żółto-niebieski) i tlenia się paliwa, czyli warunków sprzyjających powstawaniu WWA.

♦ Z uwagi na znaczną emisję zanieczyszczeń w spalinach, biomasa w formie pociętej słomy, zrębków, trocin, bądź wiórów drzewnych, o niewielkiej gęstości nasypowej, podawana do palenisk w sposób ciągły, powinna być spalana w kotłach o większej mocy, a nie w paleniskach domowych.

LITERATURA

1. Praca zbiorowa: Krajowy Raport Inwentaryzacyjny 2013: Inwentaryzacja gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988–2011. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, IOŚ – PIB, Warszawa 2013.
2. Praca zbiorowa: Ochrona środowiska 2013. Informacje i Opracowania Statystyczne, GUS, Warszawa 2013.
3. W. GOSTOMCZYK: Rola i znaczenie biomasy energetycznej w rozwoju zrównoważonym. Mat. konf. „Wykorzystanie biomasy w energetyce – aspekty ekonomiczne i ekologiczne”, Politechnika Koszalińska, Koszalin 2011, ss. 83–105.
4. A. GRZYBEK: Biomasa w energetyce. *Czysta energia* 2011, vol. 43, nr 5, ss. 14–16.
5. G. WIELGOSIŃSKI, P. ŁECHTAŃSKA: Emisja zanieczyszczeń z procesu spalania biomasy. W: A. MUSIALIK-PLOTROWSKA, J.D. RUTKOWSKI [red.]: Współczesne osiągnięcia w ochronie powietrza atmosferycznego. PZITS Oddział Dolnośląski, Wrocław 2010, ss. 391–400.
6. K. KUBICA: Standardy emisyjne dla instalacji spalania o mocy do 500 kW (1 MW?). Spotkanie Grupy Roboczej ds. Ochrony Powietrza i Energetyki, Kraków 2012 (praca niepublikowana).
7. G. RIVA, E. FOPPA PEDRETTI, G. TOSCANO, D. DUCA, A. PIZZI: Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in domestic pellet stove emissions. *Biomass and Bioenergy* 2011, Vol. 35, No. 10, pp. 4261–4267.
8. S.R. CHANDRASEKARAN, J.R. LAING, T.M. HOLSEN, S. RAJA, P.K. HOPKE: Emission characterization and efficiency measurements of high-efficiency wood boilers. *Energy & Fuels* 2011, Vol. 25, No. 11, pp. 5015–5021.
9. K.L. BIGNAL, S. LANGRIDGE, J.L. ZHOU: Release of polycyclic aromatic hydrocarbons, carbon monoxide and particulate matter from biomass combustion in a wood-fired boiler under varying boiler conditions. *Atmospheric Environment* 2008, Vol. 42, No. 39, pp. 8863–8871.
10. A. ATKINS, K.L. BIGNAL, J.L. ZHOU, F. CAZIER: Profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls from the combustion of biomass pellets. *Chemosphere* 2010, Vol. 78, No. 11, pp. 1385–1392.
11. S. SARENBO: Wood ash dilemma-reduced quality due to poor combustion performance. *Biomass and Bioenergy* 2009, Vol. 33, No. 9, pp. 1212–1220.
12. H. LAMBERG, K. NUUTINEN, J. TISSARI, J. RUSUNEN, P.Y. PIRILA, O. SIPPULA, M. TAPANAINEN, P. JALAVA, U. MAKKONEN, K. TEINILA, K. SAARNIO, R. HILLAMO, M.-R. HIRVONEN, J. JOKINIEMI: Physicochemical characterization of fine particles from small-scale wood combustion. *Atmospheric Environment* 2011, Vol. 45, No. 40, pp. 7635–7643.
13. K. LECH-BRZYK, A. SIKORA: Badania zagrożenia środowiska zanieczyszczeniami powstającymi w wyniku spalania biomasy w świetle wytycznych UE. Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Raport SPR-19, Wrocław 2004 (praca niepublikowana).
14. PN-Z-04030-7:1994. Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości pyłu. Pomiar stężenia i strumienia masy pyłu w gazach odlotowych metodą grawimetryczną. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1994.
15. Rozporządzenie Ministra Środowiska z 4 listopada 2008 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobieranej wody. Dz. U. nr 206, poz. 1291.
16. A.B. ROSS, K.D. BARTLE, S. HALL, J.M. JONES, A. WILLIAMS, K. KUBICA, G. FYNES, A. OWEN: Formation and emission of polycyclic aromatic hydrocarbon soot precursors during coal combustion. *Journal of the Energy Institute* 2011, Vol. 84, No. 4, pp. 220–226.
17. J.A. KOZIŃSKI, R. SAADE: Effect of biomass burning on the formation of soot particles and heavy hydrocarbons. An experimental study. *Fuel* 1998, Vol. 77, No. 4, pp. 225–237.

Lech-Brzyk, K. Emission of Selected Pollutants from Biomass Combustion in 2–4 MW Boilers. *Ochrona Srodowiska* 2014, Vol. 36, No. 2, pp. 47–52.

Abstract: Flue gas emissions were investigated from four industrial boilers intended for combustion of continuously fed biomass (cut straw, chips, sawdust or wooden shavings). Pollutant emission was estimated on the basis of PAH but also dust, soot and TOC concentrations in flue gases. Also, pollution indicators were analyzed in reference to 1 MJ of heat fuel input. PAH emission index ranged from

0.7 $\mu\text{g}/\text{MJ}$ to 28.4 $\mu\text{g}/\text{MJ}$, while CO content in flue gases ranged from 0.13 to 0.956 g/MJ. Individual PAH content in the flue gases ranged from 0.005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 33.362 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at CO concentrations between 460 and 1358 mg/m^3 and NO_x ranging from 155 to 398 mg/m^3 , under normal conditions and with 6% O_2 content. PAH emission indexes determined were lower than the literature values (for low power boilers).

Keywords: Industrial power boilers, flue gases, air pollution, PAH emission.