

EMISJA CZĄSTEK PYŁU PODCZAS SPALANIA RÓŻNYCH GATUNKÓW BIOMASY W KOTLE MAŁEJ MOCY

Krystyna LECH-BRZYK¹, Jarosław NIEWCZAS²

¹Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Zakład Ekologii,
Pl. Grunwaldzki 9, 50-370 Wrocław, krystyna.lech-brzyk@pwr.wroc.pl

²Politechnika Wrocławska, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów, ul. Wybrzeże
Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

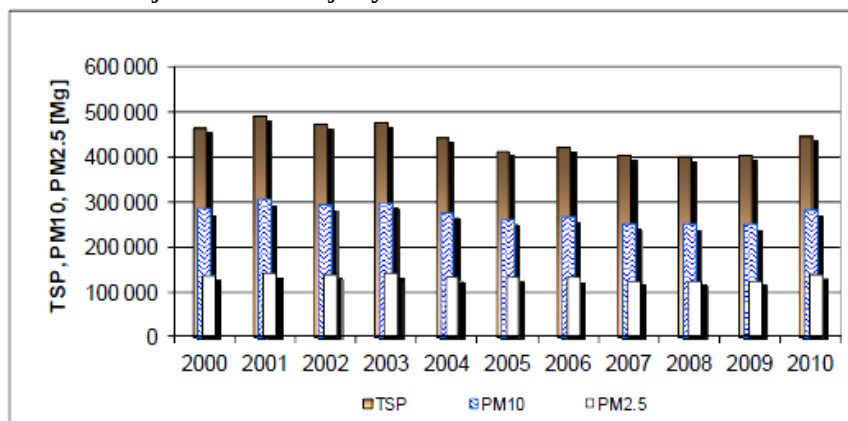
STRESZCZENIE

Przeprowadzono analizę doniesień literaturowych na temat źródeł i mechanizmów tworzenia się cząstek pyłu podczas spalania biomasy. Przedstawiono wyniki własnych badań emisji pyłu podczas spalania różnych form i gatunków biomas: ziarna zbóż, peletu ze słomy oraz miskanta olbrzymiego i topinamburu w formie siewki – zrębków – w automatycznym kotle REFO 50 o mocy nominalnej 50 kW. Jest to kocioł z żeliwnym palnikiem w kształcie rury, z rurową komorą spalania gazu, ze ślimakowym podajnikiem paliwa. Scharakteryzowano stanowisko badawcze oraz przedstawiono analizę techniczną i elementarną badanych biomas. Przeanalizowano wpływ parametrów spalania i paliwa na wielkość emitowanych cząstek pyłu. Analizę emisji cząstek pyłu wykonano w oparciu o następujące jego parametry: stężenie pyłu całkowitego w spalinach, udziały ilościowe poszczególnych frakcji w emitowanym pyłu. Wyniki porównano z doniesieniami literaturowymi.

1. Wstęp

Pyły mają istotny udział w ogólnym ładunku emisji zanieczyszczeń do powietrza emitowanym z kotłów małej mocy (palenisk domowych). Wyniki badań składu frakcyjnego pyłu emitowanego z tych palenisk wskazują na znaczny udział w nim frakcji drobnych pyłu zawieszonego – przy spalaniu węgla od około 55% do 85%, w tym średnio 75% pyłu PM10 w ogólnej masie pyłu w zależności od rodzaju paleniska oraz sposobu jego użytkowania [1].

Zgodnie z danymi Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami [2] emisja TSP obliczona za rok 2010 jest wyższa o około 10,3 % w stosunku do roku 2009, emisja pyłu PM10 o ok. 12,4 %, a emisja pyłu PM2,5 o ok. 11,0 %. Za wzrost ten odpowiada w przeważającej mierze sektor *Procesy spalania poza przemysłem* i spowodowany był większym zużyciem węgla kamiennego w gospodarstwach domowych (klasyfikacja SNAP 0202). Trend zmian emisji TSP obrazuje rys. 1.



Rys. 1. Trend zmian emisji cząstek pyłu

Niezinwentaryzowany udział w emisji pyłu TSP stanowi emisja ze spalania biomasy w paleniskach domowych. O tym, że jest on znaczny świadczą wskaźniki emisji przytoczone w [2] dla sektora SNAP 0202, odpowiednio dla TSP, PM10 i PM2,5:

- spalanie drewna i odpadów drzewnych: 0,2 0,19 0,18 Mg/TJ
- spalanie węgla kamiennego: 0,5 0,375 0,125 Mg/TJ.

Wprawdzie wskaźniki te są wyższe dla TSP i PM10 przy spalaniu węgla, ale spalanie drewna powoduje o 30% większą emisję frakcji PM2,5 niż spalanie węgla.

W dużej mierze emisja pyłu TSP, PM10 i PM2,5 zależy od technologii spalania oraz ściśle zależnych od niej – rodzaju i właściwości fizyko-chemicznych spalanej biomasy.

Wyróżnia się 2 główne źródła emisji cząstek stałych podczas spalania biomasy:

- cząstki z niezupełnego spalania paliwa, w tym sadzę, smołę i niespalony węgiel,
- cząstki pochodzące z nieorganicznego materiału w popiele w paliwie [3].

Pył formowany jest głównie z parujących składników nieorganicznych, takich jak KCl, które w obecności SO₂ poddawane są dalszym chemicznym transformacjom np. do K₂SO₄. W składzie emitowanych nieorganicznych submikronowych cząstek stałych występują głównie: potas, chlor, siarka i tlen, a sposób uwalniania metali alkalicznych podczas spalania biomasy zależy od wzajemnego stosunku zawartości chloru i metali alkalicznych, a także obecności siarki i azotu w paliwie [3, 4].

Kocioł REFO przeznaczony jest do spalania zrębków drzewnych, peletów drzewnych i ziarna. Badania miały na celu stwierdzenie możliwości spalania w kotle REFO biomas w różnej formie oraz ocenę emisji pyłu.

2. Część badawcza

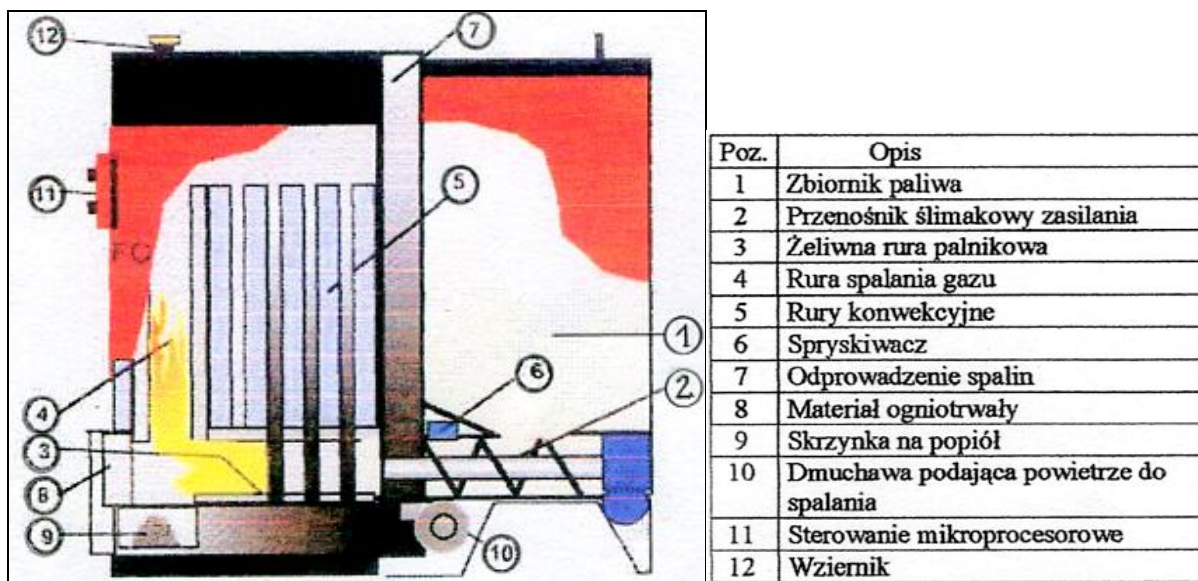
2.1. Charakterystyka stanowiska badawczego

Badania przeprowadzono na kotle REFO 50 o mocy nominalnej 50 kW. Jest to kocioł z żeliwnym, poziomym, cylindrycznym palnikiem i ceramiczną, pionową komorą dopalania gazu w kształcie rury. Paliwo zgromadzone w zbiorniku paliwa z mieszaczem doprowadzane jest do palnika w sposób ciągły za pomocą przenośnika ślimakowego. Palnik posiada na obwodzie otwory, którymi podawane jest wentylatorem powietrze do spalania. Dopalenie produktów spalania następuje w pionowej komorze ceramicznej. Odbiór ciepła ze spalin następuje w pionowych rurach kotłowych; spaliny płyną w nich z góry w dół, zapobiegając osadzaniu się produktów spalania.

Kocioł wyposażony jest w układ sterowania, umożliwiający automatyczną zmianę sygnału zadanej zawartości tlenu w zależności od obciążenia kotła, co przekłada się na automatyczną zmianę stosunku F/a – ilości podawanego paliwa w zależności od ilości tlenu w spalinach. Równolegle mierzone są temperatury wody i spalin oraz zawartość tlenu w spalinach. Możliwe jest ręczne ustawianie stosunku F/a.

Badania testowe wykazały, że biomasa o większych frakcjach (uzyskanych po zrębkowaniu na rębaku) skutecznie była podawana do kotła, ale kocioł uzyskiwał niewielką moc. Spalano więc w nim paliwa rozdrobnione przy pomocy sieczkarni, a także ziarno, zrębki i pelety. Przed badaniami kocioł próbnie monitorowano.

Schemat kotła REFO przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat kotła REFO

2.2. Charakterystyka badanych biomas

Badania przeprowadzono dla 4 rodzajów biomas:

- ziarna zbóż **R5** (mieszanina owsa, pszenicy i jęczmienia),
- topinamburu **R6** w formie siewki,
- miskanta olbrzymiego **R7** w formie siewki,
- pelletu ze słomy **R8**.

Biomasy różniły się pod względem fizycznym i chemicznym. Rzutowało to na proces ich podawania do kotła, spalania oraz produkty spalania.

W tabeli 1 przedstawiono analizę techniczną, a w tabeli 2 analizę elementarną biomas.

Tabela 1. Analiza techniczna biomas

	W^r	W^a	A^a	A^d	VM^a	VM^{daf}	Q_s^a	Q_i^a	Q_i^{daf}
	%	%	%	%	%	%	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
R5	14,24	10,92	2,13	2,40	72,13	82,96	16322	14610	17110
R6	16,75	8,49	2,02	2,20	73,80	82,47	16285	14787	16756
R7	21,17	10,83	4,11	4,60	69,74	81,98	17158	15529	18566
R8	10,95	8,21	4,04	4,40	70,21	80,01	16977	15400	17777

Tabela 2. Analiza elementarna biomas

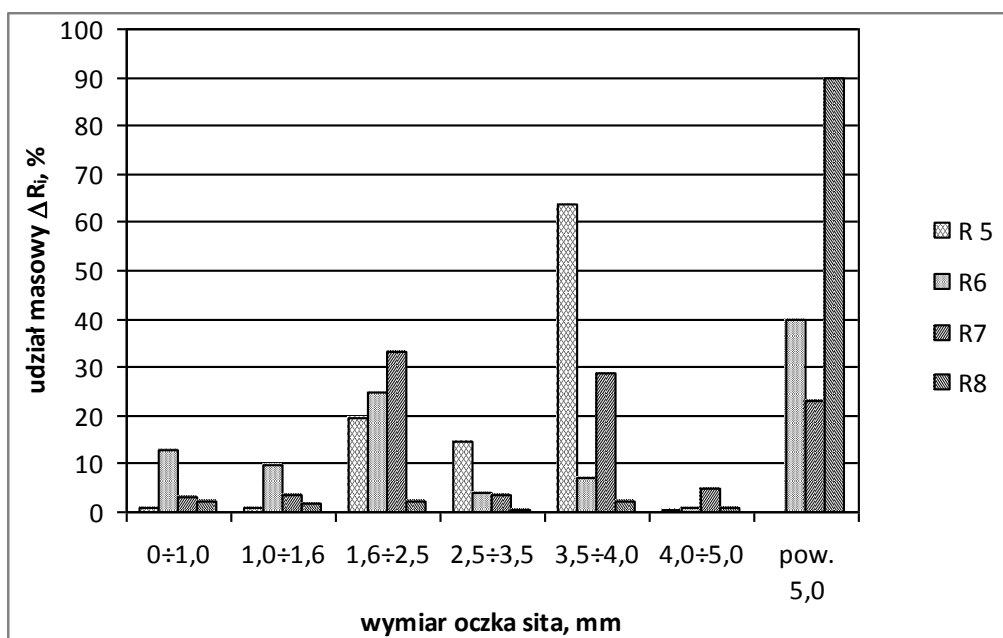
	C^a	H^a	N^a	S^a	C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S^{daf}	Cl^a
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
R5	45,35	6,62	2,68	0,20	52,16	7,61	3,09	0,24	0,10
R6	45,40	5,91	0,55	0,04	50,73	6,60	0,61	0,04	0,10
R7	46,60	6,25	0,28	0,08	54,78	7,35	0,33	0,10	0,26
R8	46,55	6,31	0,62	0,16	53,05	7,18	0,70	0,19	0,26

W tabeli 3 podano udziały masowe frakcji biomas i gęstość nasypową biomas, a na rys. 3 przedstawiono skład ziarnowy (masowy) biomas. Topinambur (R6) stanowiły zrębki uzyskane rębakiem, a miskant olbrzymi (R7) – sieczkę uzyskaną sieczkarnią.

Tabela 3. Udziały masowe frakcji i gęstość nasypowa biomas

Próbka	R 5		R 6		R 7		R 8	
d, mm	ΔR_i , %	R_i , %	ΔR_i , %	R_i , %	ΔR_i , %	R_i , %	ΔR_i , %	R_i , %
0 - 1,0	0,9	0,9	13,0	13,0	3,2	3,2	2,3	2,3
1,0 - 1,6	0,7	1,6	9,8	22,8	3,6	6,7	1,9	4,1
1,6 - 2,5	19,6	21,2	25,0	47,8	33,3	40,1	2,3	6,4
2,5 - 3,5	14,7	36,0	4,1	51,8	3,3	43,4	0,7	7,1
3,5 - 4,0	63,6	99,6	7,2	59,1	28,7	72,1	2,1	9,2
4,0 - 5,0	0,4	100,0	1,0	60,1	5,0	77,1	1,0	10,1
Pow. 5,0	0,0	100,0	39,9	100,0	22,9	100,0	89,9	100,0
Gęstość nasypowa, kg/m³	474,85		85,63		86,15		504,52	

gdzie: d – średnica ziarna pyłu, mm,
 ΔR_i – udział (masowy) frakcji z zakresu wielkości, %,
 R_i – udział sumaryczny, %.



Rys. 3. Udział masowy frakcji biomas

Skład ziarnowy i gęstość nasypowa biomas miały istotny wpływ na pracę układu podawania paliwa do kotła. Podczas spalania biomas R6 i R7, o gęstościach nasypowych kilkakrotnie niższych niż R5 i R8 i największej ilości drobnych frakcji, przenośnik ślimakowy

pracował z maksymalną wydajnością i niemożliwe było osiągnięcie wyższych mocy kotła.

2.3. Metodyka badawcza

Badania prowadzono dla każdej z biomas w ustalonych warunkach pracy kotła przy trzech nastawach parametrów spalania, wyrażonych zawartością tlenu w spalinach. Przy spalaniu ziarna R5 osiągnięto moce kotła 21-28 kW (przy sprawności kotła 75-85%), przy spalaniu topinamburu R6 – 13-30 kW (przy sprawności kotła 74-89%), przy spalaniu miskanta R7 – 12-26 kW (przy sprawności kotła 72-85%), a przy spalaniu peletu słomy R8 – 12-24 kW (przy sprawności kotła 75-85%).

Pobrano próbki biomas, spalin i popiołów po ich spaleniu i poddano je badaniom fizyko-chemicznym, zgodnie z obowiązującymi normami.

Pomiar *on-line* rozkładu frakcyjnego emitowanego pyłu przeprowadzono bezpośrednio w kanale spalin za kotłem za pomocą analizatora firmy Kamika Instruments. Analizator IPS w wersji K jest urządzeniem *on-line* służącym do pomiaru pyłu PM10 w spalinach lub kanałach powietrznych, niezależnie od właściwości fizycznych i chemicznych pyłu. Składa się on ze zmodernizowanego analizatora IPS CR do pomiaru czystości powietrza i sondy pomiarowej firmy Emiotest. Zasada działania analizatora IPS polega na pomiarze zmian strumienia promieniowania podczerwonego, który jest rozpraszany przez poruszające się w strefie pomiaru cząstki. Zmiany strumienia promieniowania po obróbce elektronicznej rejestrowane są przez komputer. Po zakończeniu pomiaru danej próbki wyniki przedstawiane są za pomocą statystycznych parametrów zbioru, jak również rozkładów różnych właściwości cząstek.

Pomiary wykonano dla zakresu wielkości cząstek 0,5-315 μm .

3. Wyniki badań i dyskusja

W pyle emitowanym podczas spalania badanych biomas stwierdzono zawartość pyłu PM 2,5; PM 10 oraz pyłu całkowitego w ilościach przedstawionych w tabeli 4.

Tabela 4. Udziały PM 2,5 i PM 10 w emitowanym pyle i stężenia pyłu w spalinach

Lp	Rodzaj biomasy	PM 2,5	PM 10	C _{pyłu}
		%	%	mg/m ³ _{nss6%O₂}
1	R5 – mieszanina ziarna zbóż	17,88	61,98	124 - 906
2	R6 – topinambur	16,10	19,12	103 – 370
3	R7 – mискant	4,10	19,75	136 – 237
4	R8 – pelet słomy	13,25	39,36	124 - 277

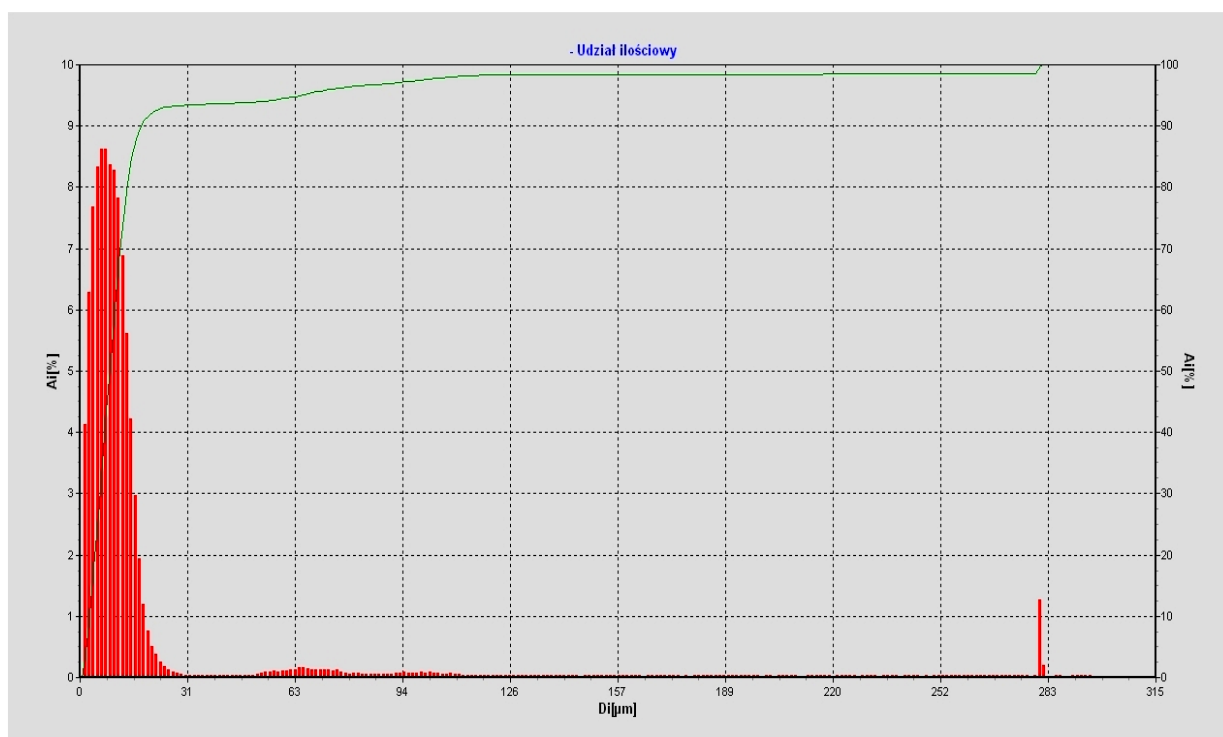
Spalanie mieszaniny ziaren zbóż (R5) oraz peletu ze słomy (R8) spowodowało emisję pyłu PM10 kilkakrotnie wyższą niż spalanie topinamburu (R6) i miskanta olbrzymiego (R7). Najmniej pyłu PM2,5 emitowane było podczas spalania miskanta (R7).

Widoczna jest odwrotnie proporcjonalna zależność ilości pyłu PM10 od gęstości nasypowej biomas. Wprawdzie pelet słomy R8 posiadał najwyższą gęstość nasypową, a jego spalanie powodowało o ponad 35% mniejszą zawartość frakcji PM 10 w emitowanym pyle w porównaniu ze spalaniem mieszaniny ziarna R5, jednak wynika to ze struktury obu biomas – zboże R5 to paliwo nieprzetworzone o zwartej budowie ziaren i dużej gęstości, a pelet słomy R8 swą swą zwartą strukturę zawdzięcza ciśnieniowej obróbce i ma skłonność do rozpadu na drobniejsze frakcje wyjściowe, łatwiej mieszające się z powietrzem i łatwiej ulegające

spaleniu. Jest to zgodne z doświadczeniami Johanssona [4], który stwierdził, że paliwo o małej gęstości rozpada się łatwiej, co powoduje, że strefa spalania przemieszcza się współprądowo w złożu paliwa i może to skutkować zwiększoną emisją pyłu oraz części niespalonych.

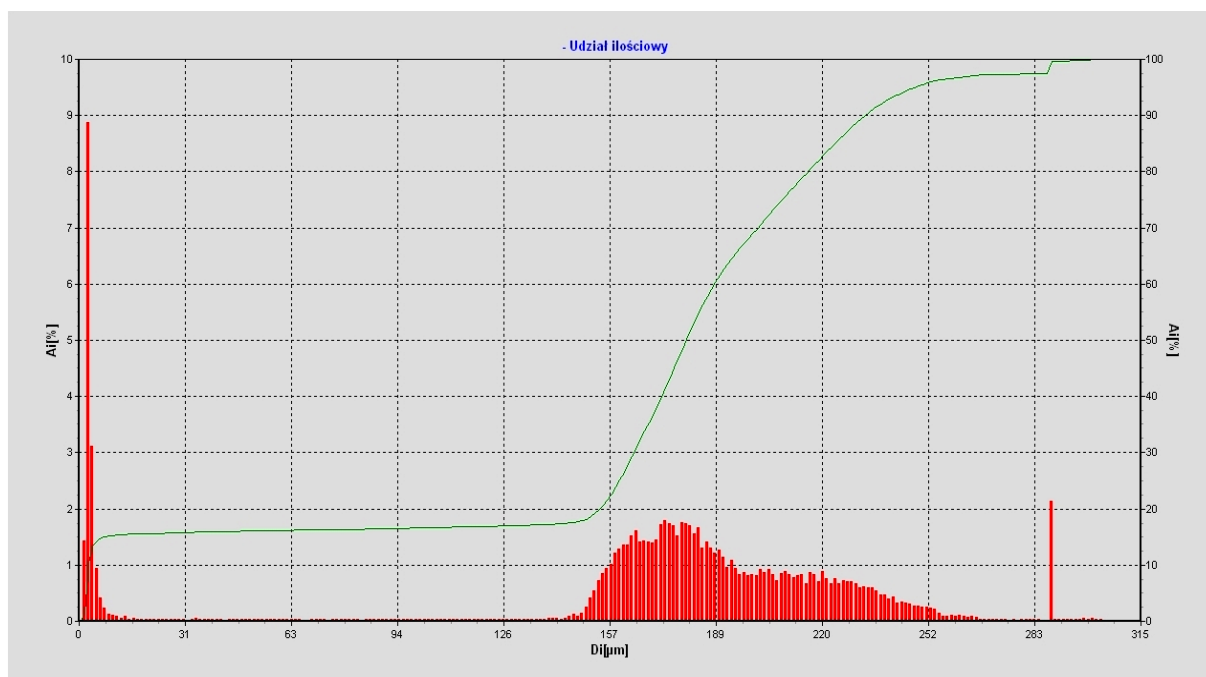
Spalanie ziarna R5 skutkowało jednak najwyższymi stężeniami pyłu całkowitego w emitowanym gazie (średnio $307 \text{ mg/m}^3_{\text{ns6}\% \text{O}_2}$), co może świadczyć o zbyt krótkim czasie przebywania cząstek paliwa w strefie spalania (udział części palnych w popiele – 12-23%).

Charakterystyczne zależności udziałów ilościowych poszczególnych frakcji pyłu (w zakresie frakcji $0,5\text{-}315 \text{ }\mu\text{m}$) uzyskane dla mieszaniny ziaren zbóż (R5) przedstawiono na rys. 4, topinamburu (R6) – na rys. 5, dla miskanta (R7) – na rys. 6, a dla peletu ze słomy (R8) – na rys. 7.



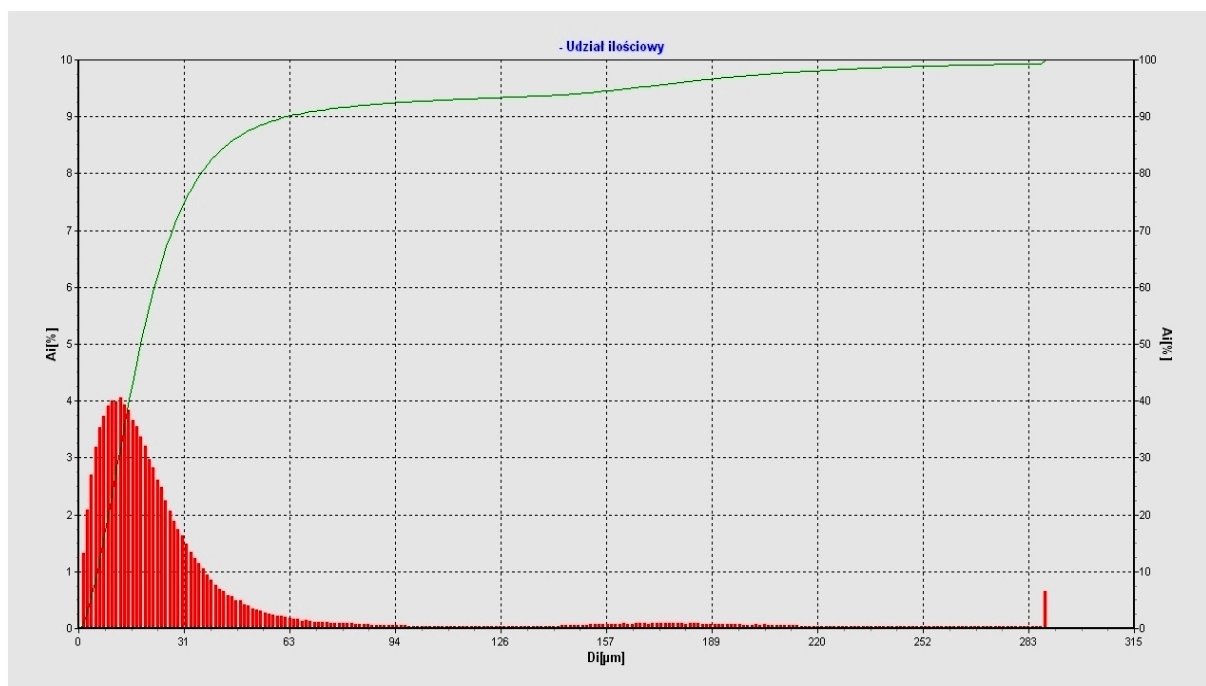
Rys. 4. Skład ziarnowy pyłu emitowanego po spalaniu biomasy R5 ($\text{O}_2 = 7,1\%$, $\eta = 85,4\%$)

Większość pyłu po spalaniu R5 stanowią frakcje w zakresie $0,5\text{-}18 \text{ }\mu\text{m}$, w tym frakcje PM10 – ponad 60%.



Rys. 5. Skład ziarnowy pyłu emitowanego po spalaniu biomasy R6 ($O_2 = 7,2\%$, $\eta = 87,6\%$)

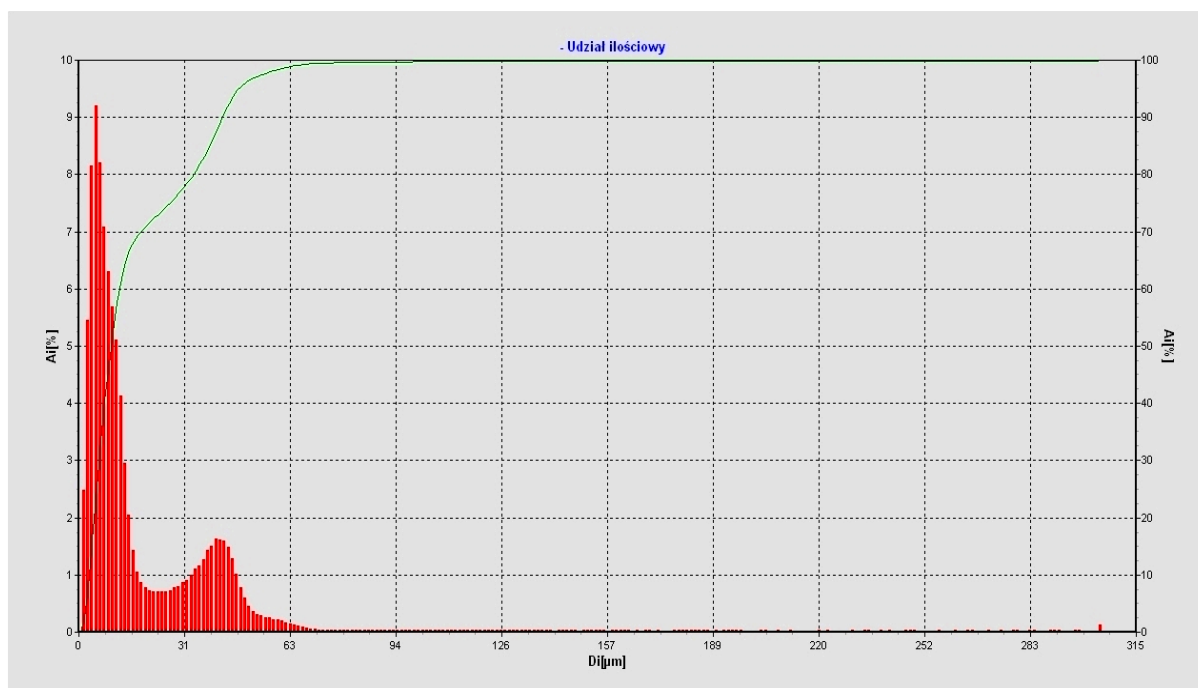
W emitowanym pyłe (R6) przeważają frakcje w zakresie średnic 150-280 μm , w tym frakcje PM10 stanowią ok. 20%.



Rys. 6. Skład ziarnowy pyłu emitowanego po spalaniu biomasy R7 ($O_2 = 9,1\%$, $\eta = 81,4\%$)

W emitowanym pyłe (R7) przeważają frakcje w zakresie średnic 0,5 – 60 μm , frakcje PM10 stanowią ok. 20%.

Spalaniu R8 towarzyszy zróżnicowany rozkład frakcyjny emitowanego pyłu, najczęściej z dwoma maksimami – w zakresie wielkości cząstek 0-10 μm i 30-60 μm (rys. 7).



Rys. 7. Skład ziarnowy pyłu emitowanego po spalaniu biomasy R8 ($O_2 = 6,4\%$, $\eta = 82,5\%$)

Spalanie badanych biomas z niewielkim nadmiarem powietrza (zawartość O_2 ok. 5-6%) powodowało zmniejszenie zawartości drobnych frakcji emitowanego pyłu w spalinach, ale w popiele występowała wtedy wysoka zawartość części palnych (ponad 20%). Zwiększenie ilości podawanego do spalania powietrza (zawartość O_2 powyżej 12-13%) skutkowało zmniejszeniem zawartości frakcji PM_{2,5} i PM₁₀ w pyłe, ale miało negatywne konsekwencje w postaci obniżenia sprawności kotła średnio o ok. 10% dla wszystkich badanych biomas oraz rzutowało na rodzaj emitowanych zanieczyszczeń gazowych.

Nie stwierdzono ścisłej zależności ilości pyłu w spalinach od zawartości popiołu w paliwie. Wysoka ilość cząstek drobnych PM_{2,5} i PM₁₀ w spalinach po spalaniu R5 wynikała prawdopodobnie z dużej zawartości siarki i azotu w paliwie, które biorą udział w tworzeniu cząstek pyłu [3, 4].

Doniesienia literaturowe mówią o zdominowaniu emisji pyłu przez cząstki submikronowe o średnicach 80-300 nm [3], bądź poniżej 0,5 μm [5] w badanych zakresach średnic frakcji 0,01-10 μm .

4. Wnioski

Badane biomasy różniły się znacznie właściwościami fizyko-chemicznymi, co rzutowało na pracę układu podawania ich do kotła i proces spalania w kotle, osiągame wydajności, a w konsekwencji na skład emitowanych spalin.

Spalanie biomas o małych gęstościach nasypowych (R6 i R7), dobrze wymieszanych z powietrzem i szybko spalanych w palniku, skutkowało najmniejszą ilością frakcji PM₁₀ w spalinach, a biomasy R7 – najmniejszą ilością frakcji PM_{2,5} i PM₁₀ oraz najmniejszym stężeniem pyłu całkowitego w spalinach. Spalanie ziarna R5 o dużej gęstości spowodowało obecność w spalinach ponad 60% frakcji PM₁₀ i ponad 17% PM_{2,5}.

Badania przeprowadzono dla zakresu średnic cząstek pyłu 0,5-315 μm , nie mogły więc potwierdzić doniesień literaturowych o zdominowaniu pyłu w spalinach przez cząstki submikronowe.

Literatura

1. Hławiczka S. i in.: Nowe podejście do oceny niskiej emisji z ogrzewania mieszkań w kształtowaniu stężeń pyłu na obszarze gminy. I. inwentaryzacja źródeł emisji i modelowanie emisji. Ochr. Środ. i Zasobów Naturalnych, 2011, nr 47, 22-46
2. Raport: Krajowy bilans emisji SO_2 , NO_x , CO, NMLZO, NH_3 , pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 2009-2010 w układzie klasyfikacji SNAP i NFR. KOBIZE, Warszawa 2012
3. Johansson L.S. i in.: Particle emissions from biomass combustion in small combustors. Biomass&Bioenergy, 2003, Vol. 25, 435-446
4. Demirbas A.: Hazardous Emissions from Combustion of Biomass. Energy Sources, Part A, 2008, Vol. 30, 170-178
5. Heidenreich R.: Emisje powstające podczas termicznego wykorzystania biomasy w małych kotłach oraz możliwości ich ograniczenia. Mat. Konf. Zrównoważony rozwój Ekoregionu Czech-Saksonia-Dolny Śląsk, Wrocławska Rada FSNT NOT i PWr, Wrocław, 2002, 49-60