

Jolanta ZIAJA, Paweł MIREK

Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska
ul. J.H. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa
e-mail: jolanta.ziaja@gmail.com

Metody wyznaczania rozkładów ziarnowych wykorzystywanych w badaniach laboratoryjnych aerodynamiki cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej

Methods of Determination of Particle Size Distributions of Inert Materials used in Laboratory Studies of Circulating Fluidized Bed Boiler Hydrodynamics

The paper presents the results of investigations concerning the influence of the method of determination of particle size distributions on the modeling of aerodynamics of circulating fluidized bed in laboratory conditions. The advantages and disadvantages of the most commonly used sieve analysis and laser diffraction methods are presented, showing that these methods cannot always be used interchangeably. Based on the obtained results, a discussion on the influence of basic parameters of particle diameter distributions on key parameters characterizing the aerodynamics of the circulating fluidized bed.

Keywords: fluidization, aerodynamics of fluidized, fluidized bed boiler, sieve analysis, laser diffraction methods

Wstęp

Technologia fluidalna w przemyśle energetycznym wykorzystywana jest w procesach spalania paliw stałych, a w szczególności współspalania paliw kopalnych i biomasy. Spalanie paliw w kotłach z cyrkulacyjną warstwą fluidalną (CWF) charakteryzuje się szeregiem zalet. Między innymi pozwala uzyskiwać metodami pierwotnymi stosunkowo niską emisję tlenków azotu (NO_x) oraz siarki (SO_2) przy zachowaniu wysokiej sprawności kotła, choć nie bez konieczności stosowania dodatkowych instalacji neutralizujących te związki w spalinach. Zaawansowane metody teoretyczne, numeryczne i doświadczalne modelowania przepływów ciepła i masy w kotłach z CWF są kluczowym elementem projektowania nowych oraz modernizacji istniejących jednostek tego typu. Odgrywają one istotną rolę w związku z ciągłym zaostrzaniem przepisów dotyczących wielkości emisji towarzyszącej procesom spalania.

W latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia wraz z intensywnym rozwojem mocy obliczeniowej maszyn cyfrowych nastąpił znaczący rozwój metod obliczeniowych numerycznej mechaniki płynów (CFD - Computational Fluid Dynamics).

Jednak wykorzystanie dostępnych algorytmów w połączeniu z wysoką wydajnością istniejących klastrów obliczeniowych nadal nie gwarantuje uzyskania szybkich i wystarczająco dokładnych rezultatów obliczeń przepływów dwufazowych. Dotyczy to zwłaszcza obszaru dolnej części komory paleniskowej kotła fluidalnego, w której szczególnie trudno odzwierciedlić turbulentny przepływ mieszaniny typu ziarna-gaz z reakcjami chemicznymi [1, 2]. Z tego względu większość zagadnień związanych z modelowaniem zjawisk przepływowych w kotłach z CWF wymaga stosowania metod doświadczalnych [3-5]. W odniesieniu do tak złożonego procesu, jakim jest przepływ ziaren unoszonych w strumieniu gazu, poszukuje się także metod pozwalających na doświadczalne rozwiązanie matematycznych równań opisujących ten proces, które w postaci zaproponowanej przez Andersona i Jacksona [6] można napisać w następującej formie:

- równanie ruchu dla gazu:

$$\rho_f \varepsilon \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = \varepsilon \rho_f \bar{\mathbf{g}} - \varepsilon \nabla p - \mathbf{R} \quad (1)$$

- równanie ruchu dla ziaren:

$$\rho_s (1 - \varepsilon) \left[\frac{\partial \mathbf{v}_z}{\partial t} + (\mathbf{v}_z \cdot \nabla) \mathbf{v}_z \right] = (1 - \varepsilon) \rho_s \bar{\mathbf{g}} - (1 - \varepsilon) \nabla p + \mathbf{R} + \nabla \cdot \mathbf{P}_s \quad (2)$$

gdzie \mathbf{R} oznacza:

$$\mathbf{R} = \beta (\mathbf{u} - \mathbf{v}_z) + (1 - \varepsilon) M \rho_f \left[\frac{D(\mathbf{u} - \mathbf{v}_z)}{Dt} \right] \quad (3)$$

a współczynnik oporu gaz-ziarno β może być określony:

- dla jednorodnie rozrzedzonych zawiesin [7]:

$$\beta = (\rho_s - \rho_f) (1 - \varepsilon) g / u_T \varepsilon^{n-2} \quad (\varepsilon_{mf} \ll \varepsilon \leq 1) \quad (4)$$

- dla zawiesin w stanie fluidyzacji początkowej [7]:

$$\beta = (\rho_s - \rho_f) (1 - \varepsilon_{mf}) \varepsilon_{mf}^2 g / U_{mf} \quad (\varepsilon \cong \varepsilon_{mf}) \quad (5)$$

Równania (1) i (2) mogą zostać zapisane odpowiednio dla fazy gazowej i stałej w postaci następujących zależności bezwymiarowych [7]:

$$\frac{\rho_f}{\rho_s} \varepsilon \left[\frac{\partial \hat{\mathbf{u}}}{\partial \hat{t}} + (\hat{\mathbf{u}} \cdot \hat{\nabla}) \hat{\mathbf{u}} - \frac{\hat{\mathbf{g}} \mathbf{1}}{U_0^2} \right] + \varepsilon \hat{\nabla} \hat{p} + \frac{\beta \mathbf{1}}{\rho_s U_0} \left(\hat{\mathbf{u}} - \left(\frac{\mathbf{v}_0}{U_0} \right) \hat{\mathbf{v}} \right) = 0 \quad (6)$$

$$(1-\varepsilon) \left[\left(\frac{U_0}{v_0} \right) \frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{t}} + (\hat{v} \cdot \hat{\nabla}) \hat{v} + \left(\frac{U_0}{v_0} \right)^2 \left(-\frac{\bar{g}l}{U_0^2} + \hat{\nabla} \hat{p} \right) \right] +$$

$$-\frac{\beta l}{\rho_s U_0} \left(\frac{U_0}{v_0} \right)^2 \left(\hat{u} - \left(\frac{v_0}{U_0} \right) \hat{v} \right) - \hat{\nabla} \cdot \hat{P}_s = 0 \quad (7)$$

gdzie: $\hat{t} \equiv t/(l/U_0)$, $\hat{u} \equiv u/U_0$, $\hat{v} \equiv v_z/U_0$, $\hat{p} \equiv p/(\rho_s U_0^2)$, $\hat{P}_s \equiv P_s/(\rho_s U_0^2)$, $\hat{\nabla} \equiv l \nabla$.

W większości przypadków $\rho_f/\rho_s \ll 1$, dlatego równanie (6) może zostać uproszczone do następującej postaci [7]:

$$\varepsilon \hat{\nabla} \hat{p} + \frac{\beta l}{\rho_s U_0} (\hat{u} - \hat{v}) = 0 \quad (8)$$

Wyrażenie $\beta l/(\rho_s U_0)$ może zostać określone za pomocą równań (4) i (5), które po przekształceniu przyjmują postać [7]:

$$\frac{\beta l}{\rho_s U_0} \cong \frac{g l}{U_0^2} \frac{U_0}{u_T} (1-\varepsilon) \varepsilon^{2-n} \quad (\varepsilon_{mf} \ll \varepsilon \leq 1) \quad (9)$$

$$\frac{\beta l}{\rho_s U_0} = \frac{g l}{U_0^2} \frac{U_0}{U_{mf}} (1-\varepsilon_{mf}) \varepsilon_{mf}^2 \quad (\varepsilon \cong \varepsilon_{mf}) \quad (10)$$

Równania (6) i (7) występują w postaci bezwymiarowej i zawierają bezwymiarowe liczby kryterialne zbudowane na bazie najważniejszych parametrów aerodynamiki CWF. Zestawy tych parametrów pozwalają na określenie teoretycznych podstaw w celu przeniesienia procesu ze skali przemysłowej do skali laboratoryjnej i odwrotnie. Należy jednak spełnić podstawowy wymóg teorii podobieństwa dynamicznego przepływów, jakim jest konieczność zachowania podobieństwa geometrycznego pomiędzy modelem i prototypem kotła [7-9].

Liczba zastosowanych grup bezwymiarowych w modelowaniu aerodynamiki CWF decyduje o ilości parametrów zależnych i niezależnych, jakie można określić we wzajemnej relacji pomiędzy kotłem i jego modelem. Osiągnięcie makroskopowego obrazu przepływu w komorze paleniskowej kotła na stanowisku modelowym możliwe jest przy założeniu podobieństwa geometrycznego, podobieństwa rozkładów ziarnowych materiału sypkiego oraz równości przynajmniej trzech liczb kryterialnych. Bezwymiarowe formuły tworzące zestaw liczb kryterialnych pozwalają wraz z podstawowymi równaniami aerodynamiki CWF wyznaczyć najważniejsze parametry pracy stanowisk modelowych, w tym minimalną prędkość fluidyzacji U_{mf} określoną zależnością [10]:

$$U_{mf} = \frac{Ar \mu \varepsilon^3 \varphi_s^2}{150 d_{32} \rho_f (1-\varepsilon)} \quad (11)$$

jak również prędkość unoszenia ziaren w kotle, którą określa zależność [10]:

$$u_T = \left[\frac{4d_{32}(\rho_s - \rho_f)g}{3\rho_f C_d} \right]^{1/2} \quad (12)$$

gdzie współczynnik C_d [11] określony jest równaniem Nian-Sheng Chenga:

$$C_d = \frac{432}{d^{*3}} \left(1 + 0,022d^{*3} \right)^{0,54} + 0,47 \left(1 - e^{-0,15d^{*0,45}} \right) \quad (13)$$

Jak wynika z równań (11) i (12), zarówno minimalna prędkość fluidyzacji, jak i prędkość unoszenia ziaren w kotle zależą od średnicy zastępczej ziaren materiału sypkiego i decydują w znacznym stopniu o organizacji procesu fluidyzacji. Modelowanie tego procesu w skali laboratoryjnej będzie zatem w dużej mierze zależec od prawidłowego wyznaczenia średnicy zastępczej d_{32} . W tym zakresie istotną rolę odgrywają dwa elementy: miejsce poboru próbki materiału sypkiego z konturu cyrkulacyjnego kotła fluidalnego oraz metoda analizy jej rozkładu ziarnowego. Jak wynika z badań zaprezentowanych w pracy [12], próbka materiału sypkiego charakteryzująca się największym stopniem reprezentatywności powinna być pobierana w obszarze rozrzedzonym komory paleniskowej. Zagadnieniem otwartym pozostaje jednak nadal wybór metody analizy rozkładu ziarnowego.

Celem pracy jest przedstawienie wyników analizy rozkładu ziarnowego materiału sypkiego, pobranego z dwóch miejsc konturu cyrkulacyjnego kotła CFB 1300 o mocy 466 MW_e, pracującego w przedsiębiorstwie Tauron Wytwarzanie S.A. Oddział Elektrownia Łągisza, wykonanej dwoma najpowszechniej stosowanymi metodami badawczymi: analizą sitową oraz metodą dyfrakcji laserowej.

1. Metody analizy rozkładów ziarnowych wykorzystane w badaniach

Badania modelowe aerodynamiki CWF przeprowadzone w skali laboratoryjnej rozpoczyna się zazwyczaj od bardzo starannego wyznaczenia rozkładu ziarnowego materiału sypkiego cyrkulującego w kotle rzeczywistym. Najczęściej stosowaną metodą analizy wielkości ziarna jest przesiewanie próbki na sitach, czyli tzw. analiza sitowa. Metoda sitowa występuje w dwóch wariantach - na sucho i na mokro. Celem procesu przesiewania jest podział materiału uziarnionego na klasy ziarnowe o założonych granicach. Odbywa się to przez przesiewanie materiału na zestawie sit o ściśle określonych wielkościach otworów. Wielkością ograniczającą przejście ziarna przez sito jest średnica ziarna. Bardzo ważnym czynnikiem mającym wpływ na przesiewanie jest wilgotność materiału. Przesiewanie jest efektywne w dwóch skrajnych przypadkach: gdy ziarna są suche lub gdy są mokre w takim stopniu, że nadmiar wody grawitacyjnej ułatwia przesiewanie. Jeżeli ziarna są wilgotne,

efektywność metody drastycznie spada. Granice pomiędzy tymi trzema stanami są płynne i zależą od wielu czynników, choć w praktyce laboratoryjnej nie ma problemów z ich rozróżnieniem. Podczas procesu przesiewania zakłada się, że nie ma ucieczki ziaren poza sita oraz że wszystkie mniejsze ziarna zostały przesiane, a większe pozostały na sicie. W praktyce nigdy nie można w pełni spełnić tego założenia [13-15]. Metoda analizy sitowej jest wystarczająca do oceny składu granulometrycznego materiałów charakteryzujących się względnie dobrą jednorodnością, o niewielkiej zawartości drobnych frakcji. Jednak zastosowanie tej metody do oceny wielkości ziaren materiałów bardziej skomplikowanych pod względem jednorodności, kształtu oraz zawartości drobnej frakcji jest mniej wiarygodne. Wynika to z dwóch niekorzystnych zjawisk będących efektem jej stosowania:

- aglomeracji oraz sklejanie się drobnych frakcji w większe skupiska o wytrzymałości większej niż występująca siła ich dezintegracji podczas przesiewania wibracyjnego oraz
- adhezji drobnych frakcji do frakcji ziarnowych o większych średnicach.

Istotnym ograniczeniem metody jest również długotrwałość prowadzenia badania, a także degradacja materiału próbki wynikająca z mechanicznego oddziaływania. W efekcie źle dobrany czas przesiewania, jak również częstotliwość drgań aparatu mogą być przyczyną generowania nieprawdziwych wyników analizy. Pomijając wymienione wyżej ograniczenia, analiza sitowa jest stosunkowo tanią metodą pozwalającą na określenie z dużą dokładnością parametrów zbioru ziaren materiału polidispersyjnego. W przypadku większości zastosowań przemysłowych jest to metoda wystarczająca i dająca satysfakcjonujące rezultaty. Jednak w przypadku prac badawczych wymagających pomiaru szerokiego spektrum średnicy ziaren metoda ta może okazać się niewystarczająca.

W badaniach eksperymentalnych wykorzystano metodę sitową na sucho, w której użyto zestawu kalibrowanych sit analitycznych firmy Retsch o wielkościach oczek w mm: 0,04; 0,063; 0,08; 0,1; 0,125; 0,16; 0,2; 0,25; 0,315; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0; 12,0. Tak przygotowany zestaw sit pozwalał na analizę składu granulometrycznego próbki materiału sypkiego w granicach od 40 μm do 12 mm. Analiza polegała na przesiewaniu próbki 200 g materiału sypkiego na wytrząsarce (przy amplitudzie 1 mm) w kolumnie sit przez pół godziny. Czas przesiewania dobrany został eksperymentalnie, biorąc pod uwagę efektywność samego procesu oraz ścieralność próbki materiału. Analizę sitową wykonano zgodnie z normą PN-ISO 2591-1:2000.

Metoda dyfrakcji laserowej opiera się na dwóch fizycznych zjawiskach: dyfrakcji i interferencji fal świetlnych. Zjawisko dyfrakcji zachodzi, gdy fala świetlna przechodzi przez szczelinę lub omija obiekt, stając się źródłem promieniście rozchodzących się i interferujących fal świetlnych. W dyfraktometrach laserowych fale składowe mają identyczne amplitudy i w zależności od kąta przecięcia następuje ich naprzemienne całkowite wygaszanie oraz wzmacnianie, dając na czujniku położonym za obiektem naprzemienne jasne i ciemne prążki. Wynik otrzymany jest w procentach objętościowych. Graniczne średnice frakcji są to średnice zastępn-

cze - średnice kul, za pomocą których powstałby taki sam obraz dyfrakcyjny jak w przypadku badanych cząstek. Metoda jest łatwa i szybka (jeden pomiar trwa ok. 20 minut). Zakłada jednak, że wszystkie cząstki są kulami i układają się losowo w zawiesinie oraz że pomiędzy nimi nie zachodzą interakcje i nie ma miejsca zasłanianie mniejszych cząstek przez większe [16]. Analiza granulometryczna z wykorzystaniem metody dyfrakcji laserowej jest bardzo dokładnym narzędziem do określania wielkości ziaren materiałów sypkich. W porównaniu z analizą sitową jest to metoda pozwalająca na uzyskanie szerszego spektrum średnic w analizowanej zbiorowości ziaren. Pamiętać jednak należy, że, z uwagi na niewielką objętość materiału poddawanego badaniu i wynikającą z tego ograniczoną wiarygodność uzyskanego wyniku, pomiar należy przeprowadzić wielokrotnie z wykorzystaniem różnych próbek, a wynik końcowy uśrednić. W niektórych przypadkach stanowić to może istotne ograniczenie metody.

Analiza metodą dyfrakcji laserowej wykonywana w środowisku mokrym pozwala na wiarygodny pomiar drobnych frakcji pyłowych, które często przywierają do powierzchni ziaren większych i są poza zakresem pomiarowym metod tradycyjnych. W badaniach eksperymentalnych przeprowadzonych zgodnie z zaleceniami normy ISO 13320:2009 wykorzystano laserowy miernik średnicy ziaren Mastersizer 2000E firmy Malvern. Urządzenie wyposażone jest w laser He-Ne o mocy 4 mW i długości fali 633 nm. Obliczenia rozkładu uziarnienia wykonano z wykorzystaniem teorii Fraunhofera wg normy ISO 13320. Próbkę analizowano w wodzie demineralizowanej. Przed zasadniczym pomiarem dla uniknięcia powstania aglomeratów próbki poddawane były przez 5 min oddziaływaniu ultradźwięków. W celu uzyskania wiarygodnych wyników w każdej serii pomiarowej wykonano pięć oznaczeń, wykorzystując różne próbki materiału pobranego z tego samego obszaru kotła.

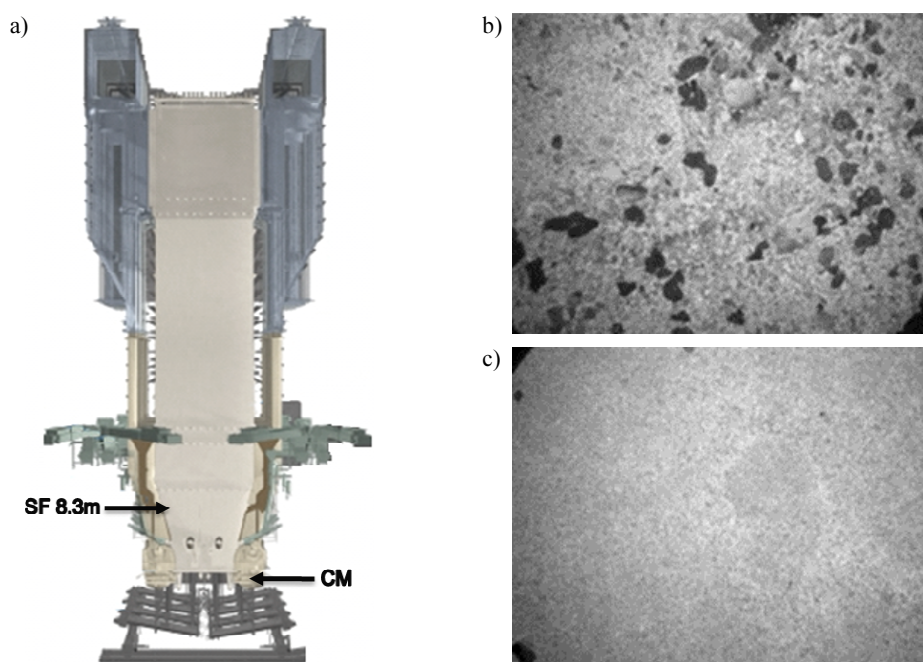
2. Materiały sypkie wykorzystywane w badaniach

W badaniach wykorzystano próbki materiału inertnego pobranego z dwóch miejsc konturu cyrkulacyjnego kotła CFB 1300:

- portu umieszczonego na wysokości 8,3 m (SF8,3) względem poziomego rusztu,
- portu do poboru próbek materiału recyrkulowanego (CM).

Na rysunku 1 pokazano miejsca poboru próbek w konturze cyrkulacyjnym kotła CFB 1300 (rys. 1a), fotografie materiału inertnego pobranego na wysokości 8,3 m (rys. 1b) oraz w układzie nawrotu (rys. 1c). Próbkę materiału pobrane zostały w stanie pełnego obciążenia cieplnego komory paleniskowej kotła. Podstawowe parametry eksploatacyjne kotła CFB 1300 przedstawiono w tabeli 1.

Kocioł wyposażony jest w osiem cyklonów umieszczonych symetrycznie na dwóch przeciwległych ścianach komory paleniskowej. Pole przekroju poprzecznego komory paleniskowej kotła na poziomie rusztu wynosi $27,6 \times 5,3 \text{ m}^2$, natomiast powyżej leja $27,6 \times 10,6 \text{ m}^2$. Paliwem dla kotła jest niskogatunkowy węgiel kamienny.



Rys. 1. Schemat kotła CFB 1300 z zaznaczeniem miejsc poboru próbek materiału sypkiego (a) oraz zdjęcia próbek materiału inertnego pobranego w komorze paleniskowej na wysokości 8,3 m względem poziomu dna dyszowego (b) i w układzie nawrotu (c)

Fig. 1. Distribution of inert material sampling points in the CFB 1300 boiler (a) and images of inert material taken from the combustion chamber at 8.3 m above the air distributor (b) and return leg (c)

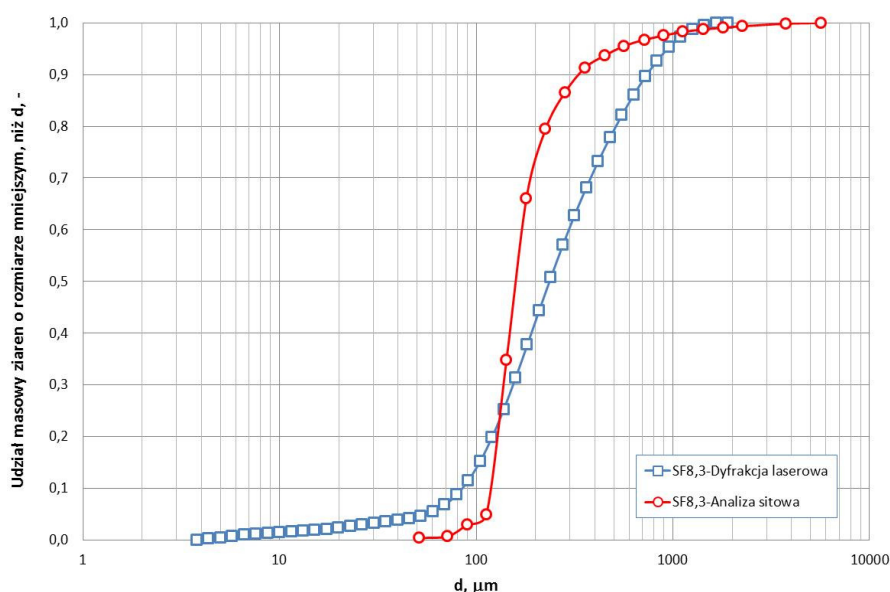
Tabela 1. Dane konstrukcyjne i eksploatacyjne kotła CFB 1300 o mocy 966 MW_{th} pracującego w Tauron Wytwarzanie S.A. Oddział Elektrowni Łagisza

Table 1. Design and operating data of the CFB 1300 boiler with the thermal capacity of 966 MW_{th}, operating at the Łagisza Power Plant

Wyszczególnienie	Jednostka	Wartość
Moc elektryczna	MW	460
Strumień masy pary świeżej/wtórnej	kg/s	361/305,7
Ciśnienie pary świeżej/wtórnej	MPa	27,5/5,48
Temperatura pary świeżej/wtórnej	K	833/853
Wysokość komory paleniskowej	m	48
Pole przekroju komory paleniskowej na poziomie rusztu	m ²	27,6 × 5,3
Pole przekroju komory paleniskowej powyżej leja	m ²	27,6 × 10,6
Wysokość dolnej części komory paleniskowej	m	8,95
Paliwo		węgiel kamienny mokry muł węglowy
Emisja dopuszczalna (przy O ₂ = 6%)		
NO _x	mg/m _n ³	200
SO _x	mg/m _n ³	200
CO	mg/m _n ³	200
Pył	mg/m _n ³	30

3. Rezultaty badań eksperymentalnych

Na rysunkach 2 i 3 pokazano dystrybuanty rozkładów wielkości ziaren materiału inertnego pobranego z komory paleniskowej kotła CFB 1300 odpowiednio na wysokości 8,3 m względem poziomu rusztu powietrznego oraz kanału nawrotu przy pełnym obciążeniu cieplnym bloku, wyznaczone metodą analizy sitowej oraz dyfrakcji laserowej.

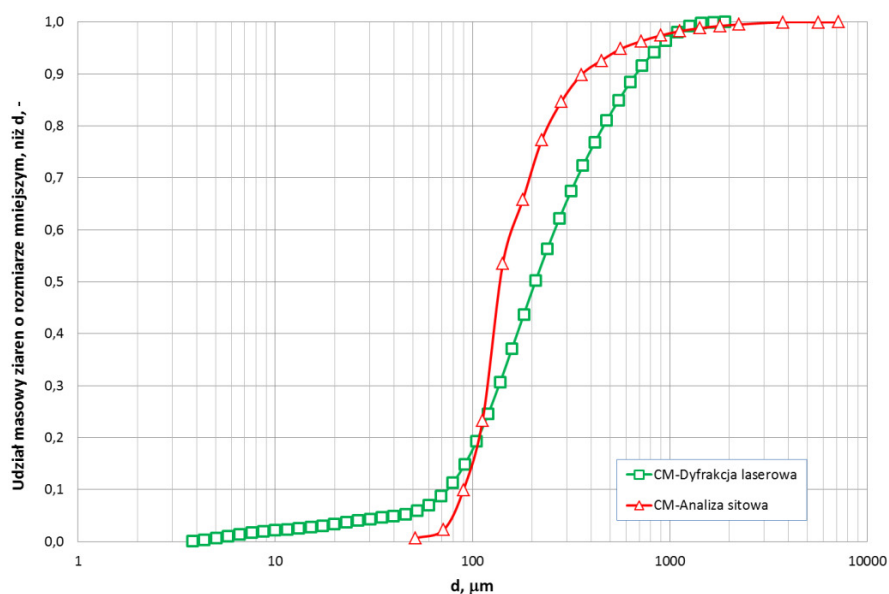


Rys. 2. Porównanie rozkładów wielkości ziaren otrzymanych metodami analizy sitowej oraz dyfrakcji laserowej dla materiału inertnego pobranego na wysokości 8,3 m względem dna dyszowego kotła CFB 1300 przy 100% MCR

Fig. 2. Comparison of particle size distribution obtained by sieve and laser diffraction methods for inert material taken at 8.3 m above the bottom of the air distributor of the CFB 1300 boiler at 100% MCR

Jak wynika z porównania danych przedstawionych na rysunkach 2 i 3, zastosowanie dwóch różnych metod wyznaczania składu granulometrycznego tej samej próbki materiału sypkiego pozwoliło na uzyskanie porównywalnych jakościowo, ale rozbieżnych ilościowo wyników analizy. Wprawdzie każda z metod z założenia charakteryzuje się innym zakresem wyznaczanych średnic ziaren, jednak w obszarze wspólnym należałoby się spodziewać porównywalnego kształtu krzywych. Dystrybuanty uzyskane metodą dyfrakcji laserowej charakteryzują się szerokim zakresem (od 3,802 do 1905 μm) oraz dużą rozdzielczością wyznaczonych średnic ziaren (46 punktów pomiarowych). Niestety, istotnym ograniczeniem metody jest górny zakres analizowanych średnic ziaren, który wynosił 1905 μm . W przypadku krzywej ziarnowej wyznaczonej metodą analizy sitowej sytuacja jest odwrotna. Stosunkowo szeroki zakres uzyskiwanych średnic (od 40 μm do 12 mm) charakteryzuje znacznie mniejszą rozdzielczość (23 punkty pomiarowe). Istotną zaletą

metody jest jednak możliwość wyznaczania średnic dużych frakcji, które obecne były zarówno w próbkach SF8,3, jak i CM.



Rys. 3. Porównanie rozkładów wielkości ziaren otrzymanych metodami analizy sitowej oraz dyfrakcji laserowej dla materiału inertnego pobranego z kanału nawrotu kotła CFB 1300 przy 100% MCR

Fig. 3. Comparison of particle size distribution obtained by sieve and laser diffraction methods for inert material from a recurrent channel of the CFB 1300 boiler at 100% MCR

Kształt krzywych ziarnowych odgrywa istotną rolę w wyznaczaniu średnicy zastępczej ziaren d_{32} . Stanowi ona punkt wyjścia do określenia podstawowych parametrów cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej w eksperymentach skalujących na stanowisku modelowym. W tabeli 2 przedstawiono porównanie średnic d_{32} oraz d_{50} uzyskanych dla próbek materiału sypkiego pobranych z konturu cyrkulacyjnego kotła CFB 1300 i analizowanych wybranymi metodami określania składu granulometrycznego.

Tabela 2. Porównanie średnic d_{32} oraz d_{50} uzyskanych dla próbek materiału sypkiego pobranych z wybranych miejsc konturu cyrkulacyjnego kotła CFB 1300 i analizowanych metodami analizy sitowej oraz dyfrakcji laserowej

Table 2. Comparison of diameters d_{32} and d_{50} obtained for inert material samples taken from selected circular contour locations of CFB 1300 boiler and analyzed by sieving and laser diffraction

Metoda analizy	Średnica ziarna μm	SF8,3	CM
Analiza sitowa	d_{32}	182	160
	d_{50}	161	139
Dyfrakcja laserowa	d_{32}	123	102
	d_{50}	235	208

Jak wynika z danych zaprezentowanych w tabeli 2, średnice zastępcze d_{32} uzyskane dla próbki materiału SF8,3 różnią się między sobą aż o 32%, natomiast średnice d_{50} o 31%. W przypadku próbki materiału recykulowanego różnice procentowe wynoszą odpowiednio 36 i 33%. Na podstawie uzyskanych wyników średnic Sautera oraz d_{50} wyznaczono prędkości U_{mf} i u_T , korzystając z zależności (11) i (12). Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie wybranych parametrów kotła CFB 1300 wyznaczonych na podstawie średnic d_{32} , d_{50} zawartych w tabeli 2

Table 3. List of selected parameters of the CFB 1300 boiler calculated based on d_{32} and d_{50} diameters presented in Table 2

	Próbka materiału	U_0	d_{32}	ρ_s	ρ_f	μ	T	u_T	Ar	U_{mf}
		m/s	μm	kg/m^3	kg/m^3	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	$^{\circ}\text{C}$	m/s	–	m/s
Metoda analizy sitowej	SF8,3	5,10	182	2700	0,3095	$4,456\cdot 10^{-5}$	1123	0,97	24,89	0,014
	CM	5,10	160	2700	0,3095	$4,456\cdot 10^{-5}$	1123	0,77	16,91	0,011
Metoda dyfrakcji laserowej	SF8,3	5,10	123	2700	0,3095	$4,456\cdot 10^{-5}$	1123	0,48	7,68	0,006
	CM	5,10	102	2700	0,3095	$4,456\cdot 10^{-5}$	1123	0,33	4,38	0,004

Jak wynika z tabeli 3, różnice w uzyskanych wartościach minimalnej prędkości fluidyzacji U_{mf} obliczonych dla próbki materiału SF8,3 w oparciu o średnicę Sautera wynoszą aż 57%, natomiast dla próbki materiału recykulowanego CM - 64%. W przypadku prędkości unoszenia ziaren u_T wartości te wynoszą odpowiednio 51 i 57%. Oznacza to, że metoda określania składu frakcyjnego ziaren materiału inertnego ma bardzo istotne znaczenie z punktu widzenia przygotowania i prowadzenia eksperymentów skalujących w skali laboratoryjnej. Dla próbek materiału sypkiego o szerokim składzie frakcyjnym pochodzących z kotła fluidalnego dobrym rozwiązaniem jest powiązanie obydwu metod analizy w taki sposób, aby dla ziaren o rozmiarach do 2000 μm stosować metodę dyfrakcji laserowej, natomiast dla frakcji grubszych metodę analizy sitowej.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- Dla próbek materiałów sypkich o bardzo szerokim składzie frakcyjnym pochodzących z obszaru gęstego kotła z CWF metoda wyznaczania krzywej kumulacyjnej rozkładu wielkości ziaren znacząco wpływa na wartość średnicy zastępczej ziarna d_{32} oraz średnicy d_{50} . W przypadku zastosowanych metod analizy średnice zastępcze d_{32} uzyskane dla próbki materiału SF8,3 różniły się między sobą aż o 32%, natomiast średnice d_{50} o 31%. W przypadku próbki materiału recykulowanego różnice procentowe wyniosły odpowiednio 36 i 33%.

- b) W trakcie oceny składu frakcyjnego próbki materiału sypkiego o rozmiarach ziaren zawartych w przedziale od 3,8 do 7150 μm pochodzącego z kotła fluidalnego metoda analizy sitowej na sucho nie może być stosowana zamiennie z metodą dyfrakcji laserowej. W odniesieniu do takich próbek metody te należy traktować komplementarnie.
- c) Właściwy wybór metody oceny rozkładu ziarnowego próbki materiału inertnego ma bardzo istotne znaczenie dla poprawnego wyznaczenia podstawowych parametrów aerodynamicznych cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej, do których należą minimalna prędkość fluidyzacji oraz prędkość unoszenia ziaren w kotle i stanowisku modelowym. W przypadku zastosowanych metod analizy różnice w uzyskanych wartościach minimalnej prędkości fluidyzacji U_{mf} obliczonych dla próbki materiału SF8,3 w oparciu o średnicę Sautera wyniosły 57%, natomiast dla próbki materiału recykulowanego CM - 64%. W przypadku prędkości unoszenia ziaren u_T wartości te wyniosły odpowiednio 51 i 57%.

Wykaz oznaczeń

- Ar - liczba Archimedes, $d_p^3 \rho_f(\rho_s - \rho_f)g/\mu^2$, –
- C_d - współczynnik oporu, –
- d_{32} - średnica Sautera, m c_v
- d_{50}^* - średnica medialna (mediana), m
- d^* - bezwymiarowa średnica ziarna, –
- d_p - średnica ziarna, m
- g - przyspieszenie ziemskie, m/s^2
- \vec{g} - wektor przyspieszenia ziemskiego, $(0,0,-g)$, m/s^2
- l - skala długości, m
- M - współczynnik wirtualnej masy, –
- n - stała w równaniu Richardsona-Zaki, –
- p - ciśnienie, Pa
- P_s - tensor naprężeń pomiędzy ziarnami, Pa
- R - wyrażenie określające oddziaływanie pomiędzy gazem i ziarnami, Pa/m
- t - czas, s
- u - prędkość gazu, m/s
- u_T - prędkość unoszenia ziaren, m/s
- U_0 - prędkość gazu w dolnej części komory paleniskowej, m/s
- U_{mf} - minimalna prędkość fluidyzacji, m/s
- v_z - prędkość ziaren, m/s
- v_0 - prędkość ziarna w dolnej części komory paleniskowej, G_s/ρ_p , m/s
- v - prędkość płynu, m/s
- β - współczynnik oporu ziarno-gaz, $\text{kg}/(\text{m}^3\text{s})$
- ε - porowatość, –
- ε_{mf} - porowatość warstwy przy minimalnej prędkości fluidyzacji, –
- ϕ - czynnik kształtu, –
- μ - lepkość płynu, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
- ρ_f - gęstość gazu, kg/m^3
- ρ_s - gęstość ziarna, kg/m^3

Indeksy dolne

s - materiał sypki

Indeksy górne

^ - wielkość bezwymiarowa

Podziękowania

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/N/ST8/02571.

Literatura

- [1] Adamczyk W., Kozołub P., Klimanek A., Białecki R., Andrzejczyk M., Klajny M., Numerical simulations of the industrial circulating fluidized bed boiler under air- and oxy-fuel combustion, *Applied Thermal Engineering* 2015, 87, 127-136.
- [2] Adamczyk W., Węcel G., Klajny M., Kozołub P., Klimanek A., Białecki R., Modeling of particle transport and combustion phenomena in a large-scale circulating fluidized bed boiler using a hybrid Euler - Lagrange approach, *Particuology* 2014, 16, 29-40.
- [3] Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R., *Mechanika płynów w inżynierii środowiska*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
- [4] Dziubiński M., Prywer J., *Mechanika płynów dwufazowych*, WNT, Warszawa 2009.
- [5] Jeżowiecka-Kabsch K., Szewczyk H., *Mechanika płynów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
- [6] Anderson T.B., Jackson R., A fluid mechanical description of fluidised beds, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* 1967, 6, 527-538.
- [7] Grace J.R., Knowlton T.M., Avidan A.A., *Circulating Fluidized Beds*, Blackie Academic and Professional, London 1996.
- [8] Glicksman, L.R., Hyre, M.R., Westphalen, D., Verification of scaling relations for circulating fluidized beds, *Proc. 12th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion*, 1993, 69-80.
- [9] Glicksman L.R., Yule T., Dymess A., Carson R., Scaling the hydrodynamics of fluidized bed combustors with cold models: experimental confirmation, *Proc. 9th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustors*, 1987, 511-514.
- [10] Kunii D., Levenspiel O., *Fluidization Engineering*, 2nd ed, Butterworth Henemann, 1991.
- [11] Nian-Sheng Cheng, Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles, *Powder Technol.* 2009, 189, 395-398, DOI: 10.1016/j.powtec. 2008.07.006.
- [12] Mirek P., Ziaja J., The influence of sampling point on solids suspension density applied in scaling of the hydrodynamics of a supercritical CFB boiler, *Chemical and Process Engineering* 2011, 32(4), 391-399.
- [13] Kasza I., Laserowa metoda określania składu granulometrycznego utworów gliniastych, pylistych i ilastych, *Przegląd Geologiczny* 1992, 5, 323-325.
- [14] Kordek J., Mikromerytyka - właściwości drobnych ziaren, *Materiały Ceramiczne* 2002, 4, 138-143.
- [15] Sztaba K., *Przesiewanie*, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1993.
- [16] Rawle A., *The Basic Principles of Particle Size Analysis*, Malvern Instruments Ltd.

Czestochowa University of Technology, Faculty of Infrastructure and Environment
ul. J.H. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa
e-mail: jolanta.ziaja@gmail.com

Streszczenie

W artykule omówiono rezultaty badań dotyczących wpływu metody określania rozkładów ziarnowych na modelowanie aerodynamiki cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej w warunkach laboratoryjnych. Przedstawiono wady i zalety najczęściej stosowanych metod analizy sitowej oraz dyfrakcji laserowej, wykazując, że metody te nie zawsze mogą być wykorzystywane zamiennie. Na podstawie otrzymanych wyników badań przeprowadzono dyskusję nad wpływem podstawowych parametrów rozkładów średnicy ziaren na kluczowe wielkości charakteryzujące aerodynamikę cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej.

Słowa kluczowe: fluidyzacja, aerodynamika cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej, kocioł fluidalny, analiza sitowa, dyfrakcja laserowa