

Anita KAMIŃSKA-PEKALA, Włodzimierz CIESIELCZYK

e-mail: akaminska@chemia.pk.edu.pl

Katedra Reaktorów Chemicznych i Kinetyki Ruchu Masy, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

Efektywna fluidyzacja materiałów z grupy D klasyfikacji Geldarta

Wprowadzenie

Stopniowe wyczerpywanie się tradycyjnych zasobów surowców energetycznych i rosnące wymogi prawne związane z wdrażaniem stosownych wytycznych Unii Europejskiej zmuszają do podjęcia działań związanych z kompleksowym zagospodarowaniem biomasy. Biomasa jest jednym z najstarszych i najczęściej wykorzystywanych odnawialnych źródeł energii [Mujumdar, 1995]. Biomasa drzewną pozyskiwaną z lasów, rolnictwa, przemysłu drzewnego lub celowych upraw energetycznych oraz z zakładów zieleni miejskiej można wykorzystać bezpośrednio na cele energetyczne przez spalanie lub zastosować jej uszlachetnienie w procesie granulacji (paletyzacji). Aby jednak proces spalania był ekonomicznie i energetycznie atrakcyjny należy biomasę surową przed spalaniem wysuszyć w celu zwiększenia jej wartości opałowej. Proces produkcji pelet także wymaga wysuszenia surowca [Kudra i Strumillo, 1998]. Odpady zrzębkowe mogą charakteryzować się dużą wilgotnością (rzędu 60%). Dlatego też ważnym etapem przy przetwarzaniu biomasy jest zaproponowanie odpowiedniej metody suszenia surowca przy minimalizacji kosztów tego procesu. Suszenie w układzie fluidalnym spełnia takie oczekiwanie [Kunii i Levenspiel, 1991]. Warunkiem koniecznym jest uzyskanie efektywnego stanu fluidalnego w odniesieniu do analizowanej biomasy drzewnej.

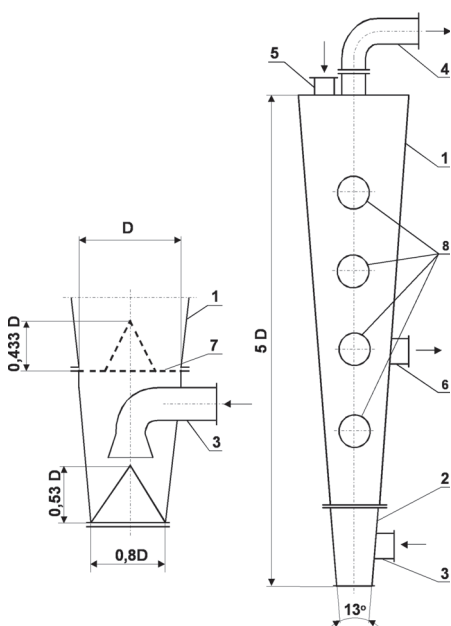
W Instytucie Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Krakowskiej realizowane są kompleksowe badania suszenia ciał stałych. Jednym z etapów tego projektu jest analiza możliwości suszenia fluidalnego zrzębków drzewnych.

W pracy zaprezentowano wyniki eksperymentów dotyczących uzyskania efektywnej fluidyzacji zrzębków klonu, sosny i dębu zaliczanych do grupy D klasyfikacji Geldarta.

Badania testowe

Instalacja doświadczalna

Badania możliwości fluidyzacji zrzębków klonu, sosny i dębu prowadzone były w instalacji doświadczalnej [Ciesielczyk i in., 2011], której zasadniczym elementem jest suszarka przedstawiona na rys. 1.



Rys. 1. Suszarka fluidyzacyjna do suszenia rozdrobnionej biomasy: 1 – komora suszenia, 2 – komora dystrybutora gazu, 3 – doprowadzenie powietrza, 4 – odprowadzenie powietrza, 5 – doprowadzenie materiału wilgotnego, 6 – odprowadzenie materiału wysuszonego, 7 – ruszt, 8 – wzierniki [Ciesielczyk i in., 2011]

Suszarka wykorzystywana w badaniach testowych ma postać kolumny o średnicy podstawy $D = 150$ mm, wysokości 1300 mm i kącie rozwarcia 13° . Istniała możliwość wymiany metalowego korpusu suszarki na element wykonany ze szkła organicznego dla umożliwienia obserwacji wizualnych.

Dystrybutor gazu

Oprządkowanie instalacji badawczej zapewnia otrzymanie danych niezbędnych do sporządzenia charakterystyk procesowych [Ciesielczyk, 2009]. Najistotniejszym zagadnieniem technicznym było opracowanie odpowiedniej geometrii dystrybutora gazu [Kamińska i Ciesielczyk, 2012].

W efekcie analizy teoretyczno-doświadczalnej zagadnienia [Ciesielczyk, 2009; Ciesielczyk i in., 2010; Ciesielczyk i in., 2011; Kamińska i Ciesielczyk, 2012] opracowano oryginalną konstrukcję dystrybutora gazu zapewniającą intensywne warunki w złożu. Idea rozwiązania przedstawiona jest na rys. 1 (przekrój komory dystrybutora), a szczegółowy opis znajduje się w charakterystyce wzoru użytkowego [Ciesielczyk i in., 2010]. Istota konstrukcji polega na zainstalowaniu na styku komory suszenia i komory dystrybutora specjalnego rusztu ze stożkiem. Pole powierzchni bocznej stożka rusztu równe jest połowie dolnej powierzchni przekroju poprzecznego komory suszenia. Stożek – podobnie jak powierzchnia pozioma rusztu – wykonany jest z blachy perforowanej. Przewód doprowadzający czynnik fluidyzujący umieszczony jest w komorze dystrybutora, w osi aparatu, w ten sposób, że otwór wylotowy zwrócony jest w kierunku podstawy suszarki ukształtowanej w formie stożka.

Materiały

Struktura ładunku fluidalnego rozdrobnionej biomasy i charakter jej zmian są istotne dla prawidłowej organizacji suszenia tych substancji. Badania eksperymentalne prowadzono ze zrzębkami klonu i dębu pozyskanymi z wiosennych przycinek kosmetycznych zieleni miejskiej oraz ze zrzębkami sosny zebranych w lasach na obrzeżu miasta. Początkowa zawartość wilgoci testowanych materiałów wynosiła: dla klonu 9,65%, dla dębu 10,9%, dla sosny 24,7%. Szczegółowej analizie eksperymentalnej poddano frakcje zrzębek o średnicach zastępczych zestawionych w tab. 1. Jednym z celów badań było określenie warunków procesowych zapewniających uzyskanie efektywnej fluidyzacji. W tym przypadku wyznaczano eksperymentalnie krzywe fluidyzacji dla różnych wysokości statycznych badanych materiałów prowadząc jednocześnie obserwacje wizualne układu.

Tab. 1. Średnice zastępcze badanych materiałów [Głęb, 2013]

| | Klon | Dąb | Sosna |
|--|--------|---------|--------|
| Średnica zastępcza – metoda geometryczna (suwmiarkowa) d_{e1} [mm] | 18,45 | 17,328 | 18,47 |
| Średnica zastępcza – metoda piknometryczna d_{e2} [mm] | 21,015 | 19,0599 | 19,027 |
| Uśredniona średnica zastępcza d_e [mm] | 19,733 | 18,194 | 18,749 |

Zachowanie się złoża fluidalnego jest różne w zależności od charakterystyki cząstek ciała stałego i strumienia fluidyzującego gazu. Istotnym problemem związanym z projektowaniem aparatów fluidyzacyjnych oraz modelowaniem matematycznym procesu jest określenie rodzaju i jakości fluidyzacji. Klasyfikację materiałów pod tym kątem, powiązaną z rozmiarem ziarna i jego gęstością opracował Geldart [Ciesielczyk, 2009; Mujumdar, 1995].

Klasyfikacja *Geldarta* była bazą do sporządzenia map warunków hydrodynamicznych, które pozwalają wstępnie ustalić rodzaj fluidyzacji dla analizowanego układu. W praktyce najczęściej występuje biomasa o dużym stopniu polidispersyjności i różnorodnym kształcie ziarnienia. Dotychczas większość badań dotyczących fluidyzacji w układzie gaz – ciało stałe koncentrowała się na systemach małych cząstek [Kunii i Levenspiel, 1991]. Ostatnio w związku z przetwórstwem biomasy rozszerza się te badania na fluidyzację cząstek większych. Zwykle cząstki duże odpowiadają typowi D według klasyfikacji *Geldarta*.

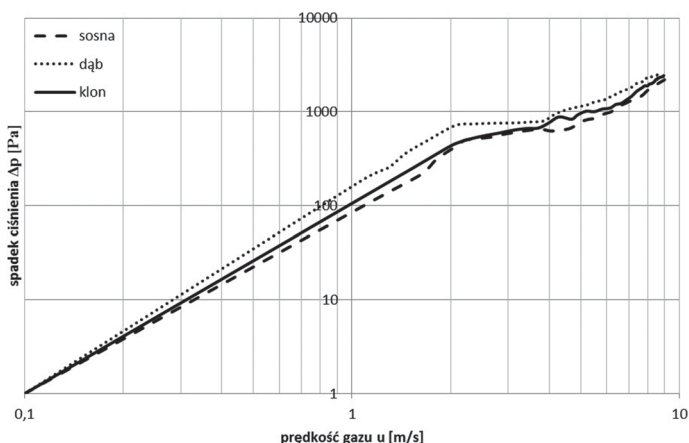
Wyniki badań

Wszystkie analizowane zrębki drzewne zaliczają się do grupy D klasyfikacji *Geldarta* [Kamińska i Ciesielczyk, 2012].

Stwierdzono, że wszystkie badane materiały mogą tworzyć złoża fluidalne. Dzięki zastosowanemu dystrybutorowi gazu uzyskano intensywne warunki hydrodynamiczne w badanych warstwach materiałów przy czym najlepsze wyniki uzyskuje się dla wysokości statycznej złoża równej średnicy podstawy komory suszenia ($H = D$) i wartości liczby fluidyzacji rzędu 2.

Krzywe fluidyzacji

Na rys. 2 zaprezentowano krzywe fluidyzacji badanych zrębków drzewnych przy wysokościach statycznych złożów H równych średnicy podstawy komory suszenia D .



Rys. 2. Krzywe fluidyzacji badanych zrębków drzewnych dla $H = D$ [Opracowanie własne]

Klasyfikacja rodzaju fluidyzacji

Dysponując odpowiednim zestawem danych z eksperymentu postanowiono także sprawdzić wytyczne wynikające z diagramu (Rys. 3), który pozwala określić rodzaj i jakość fluidyzacji. W tym celu należało obliczyć wartości bezwymiarowych parametrów d_s^* i u^* w danych warunkach ciśnienia i temperatury, zdefiniowanych jako [Kunii i Levenspiel, 1991]:

$$d_s^* = d_s \left[\frac{\rho_g(\rho - \rho_g)g}{\eta_g^2} \right]^{1/3} \quad (1)$$

$$u^* = u_0 \left[\frac{\rho_g^2}{\eta_g(\rho - \rho_g)g} \right]^{1/3} \quad (2)$$

gdzie:

$d_s = d_e$ – średnica zastępcza cząstek [mm]

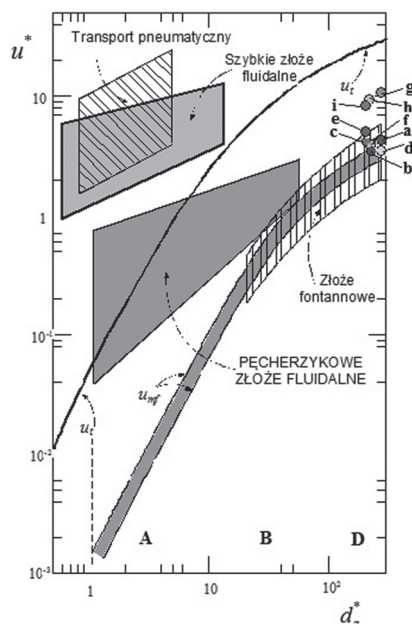
ρ_g – gęstość czynnika fluidyzującego [kg/m^3]

ρ – gęstość cząstek [kg/m^3]

η_g – współczynnik lepkości dynamicznej czynnika fluidyzującego [Pa·s]

u_0 – prędkość czynnika fluidyzującego [m/s]

g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2]



Rys. 3. Klasyfikacja rodzaju fluidyzacji z naniesionymi punktami wyznaczonymi na podstawie obliczonych wartości parametrów d_s^* i u^* : a) Klon, $H = 75$ mm b) Dąb $H = 75$ mm c) Sosna $H = 75$ mm d) Klon $H = 150$ mm e) Dąb $H = 150$ mm f) Sosna $H = 150$ mm g) Klon $H = 300$ mm h) Dąb $H = 300$ mm i) Sosna $H = 300$ mm. Modyfikacja własna za [Kunii i Levenspiel, 1991]

Na rys. 3 przedstawiono przykładowo punkty odpowiadające realizacji procesu fluidyzacji analizowanych zrębków dla różnych wysokości statycznej złożów. Usytuowanie tych punktów jest zgodne z wnioskami wynikającymi z obserwacji zachowania się badanych materiałów w trakcie trwania eksperymentów.

Wnioski

Realizacja procesu fluidyzacji i jego efektywność w znacznym stopniu uzależnione są od elementu rozdzielającego gaz. Zastosowanie oryginalnego rozwiązania konstrukcyjnego dystrybutora gazu zapewnia intensywne warunki hydrodynamiczne w złożu, uzyskanie warstwy materiału o właściwościach pośrednich pomiędzy klasycznym złożem fluidalnym, złożem fontannowym i wirowym, a tym samym skuteczną fluidyzację analizowanych rodzajów zrębków drzewnych zaliczanych do grupy D wg *Geldarta*.

Badania testowe są kontynuowane w szerokim zakresie zmian parametrów procesowych i badanych rodzajów biomasy.

LITERATURA

Ciesielczyk W., 2009. Novel gas distributor for fluidized bed drying of biomass. *Drying Tech.*, 27, nr 12, 1309-1315. DOI: 10.1080/073793090338612

Ciesielczyk W., Kamińska, A., Skoneczna J., 2010. *Suszarka fluidyzacyjna do suszenia materiałów polidispersyjnych, zwłaszcza rozdrobnionej biomasy, Wzór użytkowy nr 118761*

Ciesielczyk W., Kamińska, A., Skoneczna J., 2011. Badania procesu suszenia fluidalnego rozdrobnionej biomasy drzewnej *Inż. Ap. Chem.*, 50, nr 5, 26-27

Głęb K., 2013. *Sprawdzenie możliwości fluidyzacji wybranych rodzajów biomasy*. Praca inżynierska, Pol. Krakowska, Kraków

Kamińska A., Ciesielczyk W., 2012. Konstrukcja dystrybutora gazu, a efektywność suszenia fluidalnego wybranych rodzajów rozdrobnionej biomasy *Inż. Ap. Chem.*, 51, nr 6, 326-327

Kudra T., Strumiłło C., 1998. *Thermal processing of biomaterials*. Gordon & Breach Science Publisher, New York

Kunii D., Levenspiel O., 1991. *Fluidization Engineering*. Butterworth-Heinemann, Boston

Mujumdar A.S., 1995. *Handbook of industrial drying*, Marcel Dekker, New York 1995

Praca była finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy nr N N209 105739.