

ANITA KAMIŃSKA, WŁODZIMIERZ CIESIELCZYK, JOANNA SKONECZNA<sup>1</sup>

## BADANIA MOŻLIWOŚCI SUSZENIA FLUIDALNEGO MATERIAŁÓW Z GRUPY D KLASYFIKACJI GELDARTA

### RESEARCH OF POTENTIAL FOR DRYING OF FLUIDIZED MATERIAL FROM GROUP D GELDART'S CLASSIFICATION

#### Streszczenie

Struktura ładunku fluidalnego rozdrobnionej biomasy i charakter jej zmian są istotne dla prawidłowej organizacji suszenia tych substancji. Fluidyzacja testowanych materiałów w klasycznych aparatach jest praktycznie niemożliwa. W pracy zaprezentowano oryginalne rozwiązanie konstrukcyjne dystrybutora gazu zapewniającego efektywną fluidyzację badanych rodzajów biomasy. Przedstawiono uzyskane doświadczalnie krzywe fluidyzacji biomasy o dużym zróżnicowaniu granulometrycznym i jakościowym. Określono warunki procesowe pozwalające na uzyskanie efektywnej fluidyzacji badanych materiałów zaliczanych do grupy D wg Geldarta.

*Słowa kluczowe: fluidyzacja, dystrybutor gazu, biomasa*

#### Abstract

The structure of fluidized bed load fragmented biomass and character of change are essential for proper organization of the drying of these substances. Fluidization of tested materials in the classic apparatus is impossible. The paper presents an innovation solution of gas distributor design for an efficient fluidization of tested types of bioproducts. Paper presents fluidization curves obtained experimentally with rich bio grain size and quality. Set out process conditions that can achieve effective fluidization of tested materials belonging to group D by Geldart's.

*Keywords: fluidization, gas distributor, biomass*

<sup>1</sup> Mgr inż. Anita Kamińska, dr hab. inż. Włodzimierz Ciesielczyk, prof. PK, mgr inż. Joanna Skoneczna, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Obowiązujące wytyczne dotyczące odnawialnych źródeł energii zmuszają do podjęcia działań w zakresie kompleksowego zagospodarowania biomasy. Jest to problem ważny zarówno z uwagi na zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego, ochronę środowiska oraz zapewnienie zrównoważonego rozwoju [1-15]. Ważnym etapem przy przetwarzaniu biomasy na cele energetyczne (np. peletyzacja, brykietowanie) jest suszenie surowca. Biorąc pod uwagę koszty produkcji należy poszukiwać metody stosunkowo taniej, minimalizującej zużycie energii. Suszenie w układzie fluidalnym charakteryzuje się korzystnymi wskaźnikami techniczno-ekonomicznymi i zapewnia uzyskanie oczekiwanej jakości produktów [2, 7].

Klasyczne złożo fluidalne stanowi układ dwufazowy i tworzy strukturę heterogeniczną. Granica faz, zmieniająca się w trakcie przebiegu procesu, oddziałuje na warunki hydrodynamiczne w złożu. Intensywny, nieuporządkowany ruch cząstek ciała stałego zapewnia dużą burzliwość układu. Środowisko złoża fluidalnego jest stosunkowo trudne do ujęcia ilościowego. W trakcie przebiegu procesu w układzie gaz – ciało stałe, kiedy często mamy do czynienia ze złożem polidispersyjnym i różnorodnym kształtem cząstek, mogą występować zjawiska aglomeracji, elektryzacji, intensywnego ścierania, pylenia, bądź pęknięcia cząstek materiału fluidyzującego. Zjawiska te powodują zmianę warunków hydrodynamicznych w układzie, zmianę powierzchni kontaktu międzyfazowego, a czasami wręcz uniemożliwiają realizację procesu. W przypadku biomasy uzyskanie warstwy fluidalnej przy klasycznym dystrybutorze gazu jest praktycznie niemożliwe.

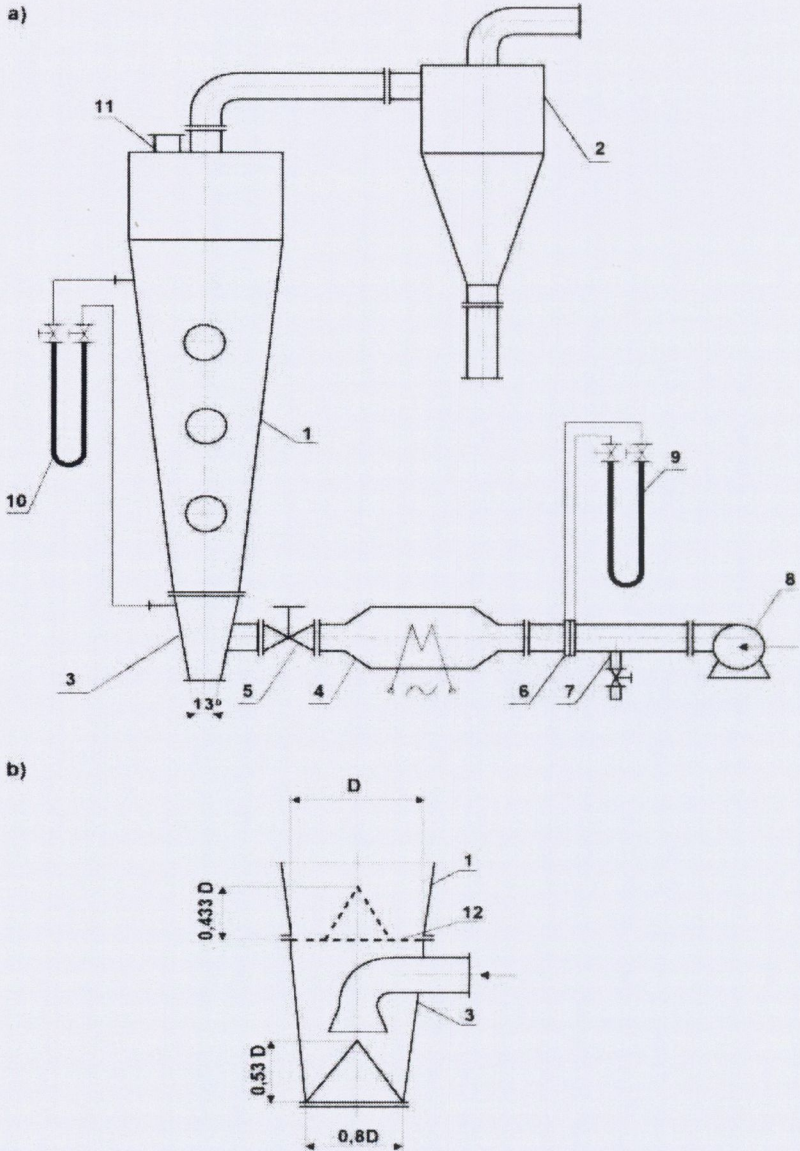
Zachowanie się złoża fluidalnego jest różne w zależności od charakterystyki cząstek ciała stałego i strumienia fluidyzującego gazu. Istotnym problemem związanym z projektowaniem aparatów fluidyzacyjnych oraz modelowaniem matematycznym procesu jest określenie rodzaju i jakości fluidyzacji. Klasyfikację materiałów pod tym kątem, powiązaną z rozmiarem ziarna i jego gęstością opracował Geldart [1, 11]. Klasyfikacja Geldarta była bazą do sporządzenia map warunków hydrodynamicznych, które pozwalają wstępnie ustalić rodzaj fluidyzacji dla analizowanego układu. W praktyce mamy najczęściej do czynienia z biomasą o dużym stopniu polidispersyjności i różnorodnym kształcie uziarnienia. Dotychczas większość badań dotyczących fluidyzacji w układzie gaz – ciało stałe koncentrowała się na systemach małych cząstek [1]. Ostatnio w związku z zainteresowaniem przetwórstwem biomasy rozszerza się te badania na fluidyzację cząstek większych. Przyjmuje się, że cząstki duże odpowiadają typowi D według klasyfikacji Geldarta. Dystrybutory gazu suszarek fluidyzacyjnych zasadniczo wpływają na sposób rozprowadzenia gazu, a tym samym na jego strukturę hydrodynamiczną w warstwie i jakość suszenia. Rosnące zapotrzebowanie na produkty o ściśle określonych i zdefiniowanych właściwościach przesunęło – w ostatnich latach – istotę planowania produkcji z projektowania procesu na projektowanie produktu. Brak obecnie jednoznacznych, uniwersalnych wytycznych odnośnie metody doboru odpowiedniego dystrybutora gazu dla konkretnego materiału suszonego zaliczanego do grupy D wg Geldarta. Skuteczna fluidyzacja powinna zapewnić uzyskanie łatwej do kontrolowania warstwy fluidalnej, wysoki współczynnik sprawności energetycznej przez efektywne wykorzystanie gazu oraz minimalizację pylenia i wszelkich zakłóceń procesu.

Dlatego też aktualne jest zagadnienie, będące przedmiotem niniejszego opracowania, poszukiwania rozwiązań zapewniających skuteczne warunki uzyskania efektywnej fluidyzacji biomasy drzewnej.

## 2. Materiały i metody badawcze

Badania możliwości fluidyzacji wybranych rodzajów rozdrobnionej biomasy prowadzi się na instalacji doświadczalnej, której schemat przedstawiono na rysunku 1. Powietrze będące czynnikiem fluidyzującym, tłoczone przez wentylator (8) przepływa przez nagrzewnicę elektryczną (4), komorę dystrybutora gazu (3) do kolumny (1) o średnicy podstawy  $D = 150$  mm, wysokości 1300 mm i kącie rozwarcia  $13^\circ$ , a następnie po przejściu przez złożę i cyklon (2) wydostaje się na zewnątrz. W trakcie badań dotyczących określenia warunków fluidyzacji badanych substancji wymieniano korpus suszarki na element wykonany ze szkła organicznego dla umożliwienia prowadzenia obserwacji wizualnych. Oprzyrządowanie stanowiska badawczego zapewnia otrzymanie danych niezbędnych do sporządzenia charakterystyk procesowych. Zestaw zwężek (6) wraz z zaworami (5), umożliwia płynną regulację i pomiar natężenia przepływu doprowadzanego gazu. Spadki ciśnienia mierzono dwuramiennymi manometrami cieczowymi (10) oraz przyrządem TESTO 452 (Firmy Testoterm GmbH & Co.) wyposażonym w odpowiednią przystawkę. W trakcie badań istniała możliwość określenia intensywności pylenia (wywiewania) przez pomiar wysokości warstwy materiału zebranego w odbieralniku cyklonu (2).

Najistotniejszym zagadnieniem technicznym było opracowanie odpowiedniej geometrii dystrybutora gazu. Bezsprawną sprawą cytowaną przez wielu autorów [1, 4] jest wpływ elementu rozdzielczego na charakter pracy warstwy. Nie wszyscy jednak potwierdzają w swoich eksperymentach istnienie określonego stosunku spadku ciśnienia w warstwie do spadku ciśnienia na ruszcie. Istnieją różne poglądy [2-8] dotyczące wielkości stosunku spadku ciśnienia na dystrybutorze do spadku ciśnienia w złożu, który zapewnia dobre warunki fluidyzacji. Niektórzy z autorów mówią o istnieniu krytycznej wartości oporu rusztu, zapewniającej intensywną pracę złoża. Udane konstrukcje przemysłowe [1] mają wartość omawianego stosunku nie mniejszą niż  $0,25 \div 0,5$ . Zwykle spadek ciśnienia na klasycznym dystrybutorze gazu jest rzędu 30 % [1, 13] spadku ciśnienia w całej warstwie fluidalnej. Należy jednak podkreślić, że dla charakterystyki pracy dystrybutora gazu suszarek fluidyzacyjnych nie wystarcza określenie wartości stosunku spadków ciśnień na dystrybutorze i złożu, istotą jest zapewnienie odpowiednich warunków hydrodynamicznych zapewniających efektywną fluidyzację. Na podstawie badań testowych [8-10] zastosowano rozwiązanie, którego istota polega na zainstalowaniu, na styku komory suszenia i komory dystrybutora (rys. 1b) specjalnego rusztu (12) 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 (3), w osi aparatu, w ten sposób, że otwór wylotowy zwrócony jest w kierunku podstawy suszarki ukształtowanej w formie stożka.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – suszarka, 2 – cyklon, 3 – dystrybutor gazu, 4 – nagrzewnica, 5 – zawór, 6 – zwężka, 7 – bocznik, 8 – wentylator, 9, 10 – manometry, 11 – zasyp, 12 – ruszt

Fig. 1. Schematic diagram of experimental equipment: 1 – dryer, 2 – cyclone, 3 – gas distributor, 4 – electric heater, 5 – control valve, 6 – pressure gauge, 7 – by-pass, 8 – air blower, 9, 10 – manometers, 11 – feed pipe, 12 – grate

Badania doświadczalne prowadzono z ziarnami o różnym kształcie, rozmiarach i wilgotności. W pierwszym etapie testowano, w ramach badań wstępnych, możliwości fluidyzacji ziół: kukurydzy, kawy i ciastek o kształtach igieł (zbliżonych do kształtów ścinków drzewnych). Celem tych badań było sprawdzenie możliwości fluidyzacji dużych cząstek o średnicy zastępczej powyżej 6 mm. Warstwy kukurydzy, kawy i ciastek traktowano jako monodispersyjne (wyniki analizy sitowej uzasadniały takie założenie). Następnie badano warstwy polidispersyjne: zrębków olchy, jabłoni i wierzby pozyskanych z przycinek pielęgnacyjnych w sadach i na terenach zielonych miast, a także mieszanych (drzewa iglaste i liściaste) odpadów otrzymywanych w tartaku. Zrębki biomasy (a w zasadzie ścinki) w praktyce stanowią mieszaninę różnych rodzajów odpadów drzewnych o zmiennym składzie jakościowym i ilościowym. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe właściwości fizykochemiczne badanych materiałów: gęstość  $\rho_p$ , porowatość warstwy w stanie stacjonarnym  $\epsilon_0$ , średnicę zastępczą  $d_z$ , współczynnik kształtu  $\Psi$  oraz zawartość wilgoci  $X$ . Porowatość złoża w stanie stacjonarnym  $\epsilon_0$  określano z gęstości ciała stałego i gęstości usypowej. Średnice zastępcze  $d_z$  cząstek poszczególnych frakcji badanych materiałów wyznaczano w oparciu o definicję średnicy objętościowej jako średnicę kuli o objętości badanej cząstki. Współczynnik kształtu  $\Psi$  obliczano z równania Leva [1] opierając się na rezultatach badania spadku ciśnienia przy przepływie powietrza przez złożę stacjonarne. Średnią średnicę cząstek warstw polidispersyjnych (zrębki drzewne) obliczano jako sumę iloczynów udziałów masowych i średnic zastępczych cząstek poszczególnych frakcji [1]. Zawartość wilgoci  $X$  w danym materiale wyznaczano metodą bezpośrednią, susząc próbki do stałej masy w suszarce laboratoryjnej. Wszystkie analizowane materiały można zaliczyć praktycznie do grupy  $D$  klasyfikacji Geldarta [11].

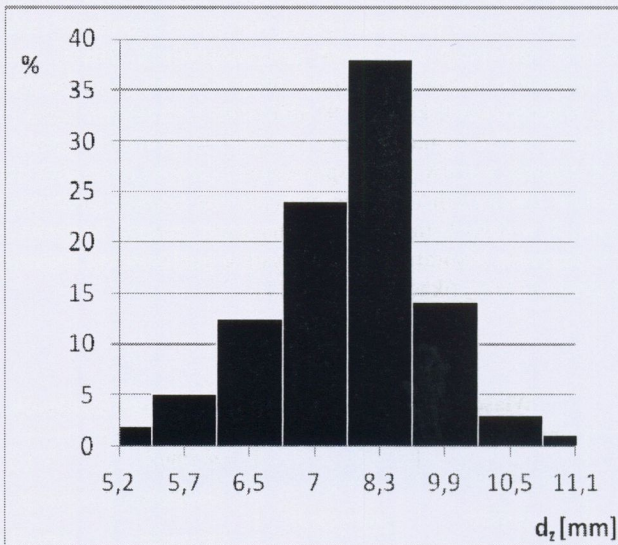
Tabela 1

### Właściwości fizykochemiczne testowanych substancji

| <i>Material</i>     | $\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]<br><i>gęstość</i> | $\epsilon_0$ [-]<br><i>porowatość</i> | $d_z$ [mm]<br><i>średnica</i><br><i>zastępcza</i> | $\Psi$ [-]<br><i>współczynnik</i><br><i>kształtku</i> | $X$ [%]<br><i>zawartość</i><br><i>wilgoci</i> |
|---------------------|---|---------------------------------------|---|---|---|
| Kukurydza           | 1300  | 0,376                                 | 6,691   | 1,343   | 4,5   |
| Kawa                | 432   | 0,618                                 | 7,919   | 1,452   | 3,7   |
| Ciastka             | 641   | 0,606                                 | 14,510  | 1,869   | 5,0   |
| Wierzba<br>(zrębki) | 1003  | 0,626                                 | 5,890   | 1,678   | 12,0  |
| Odpad z tartaku     | 845   | 0,487                                 | 6,980   | 1,598   | 38,0  |
| Olcha (zrębki)      | 790   | 0,588                                 | 9,190   | 1,784   | 11,0  |
| Jabłoń (zrębki)     | 695   | 0,600                                 | 6,950   | 1,792   | 15,0  |

### 3. Wyniki i dyskusja

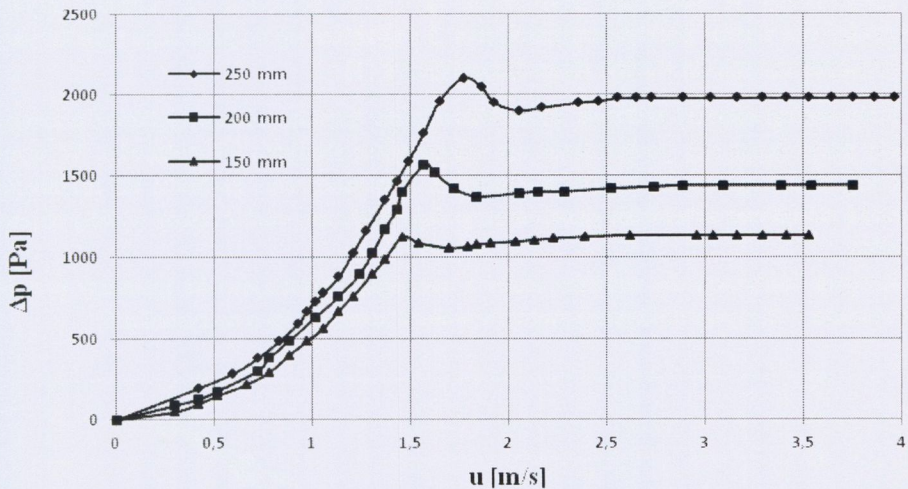
Testowana biomasa charakteryzowała się dużym zróżnicowaniem w zakresie granulacji cząstek. Na rysunku 2 zaprezentowano przykładowo wyniki analizy sitowej (zależność % udziału masowego od średnicy zastępczej) dla zrębków jabłoni. Badania doświadczalne przeprowadzone z ziarnami o różnym kształcie i rozmiarach, pozwalają na opisanie jakości procesu fluidyzacji. Zastosowany dystrybutor gazu generuje intensywne warunki hydrodynamiczne w badanych warstwach, zapobiegając klasycznemu zakłóceniu występującym przy fluidyzacji złożeń polidispersyjnych, tzn. tłokowaniu i kanałowaniu przez wymuszenie wirowania. Intensywnego pęcherzykowania nie zauważono.



Rys. 2. Wyniki analizy sitowej zrębków jabłoni

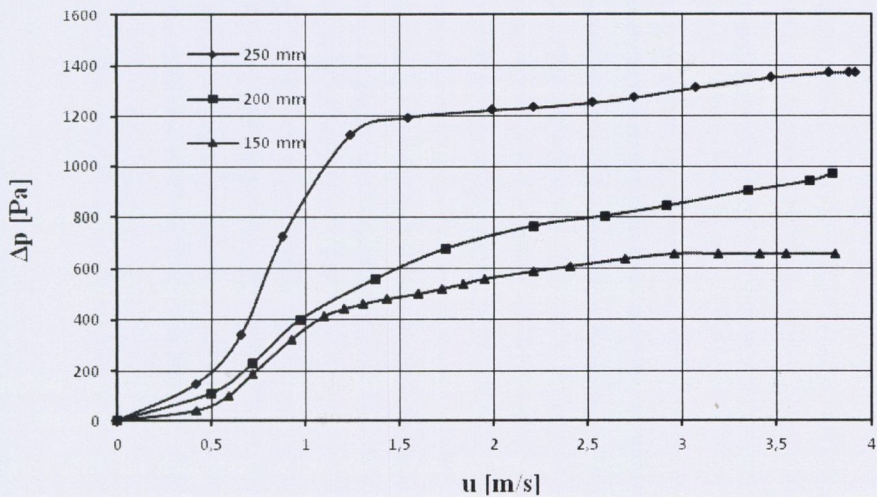
Fig. 2. Results of screen analysis of apple wood chips

Hydrodynamikę badanych układów określano wyznaczając krzywe fluidyzacji. Na rysunku 3 zaprezentowano krzywe fluidyzacji dla kukurydzy dla różnej początkowej wysokości ładunku, a na rysunku 4 przedstawiono wyniki fluidyzacji kawy.



Rys. 3. Krzywe fluidyzacji ziarna kukurydzy

Fig. 3. Fluidization curves for corn



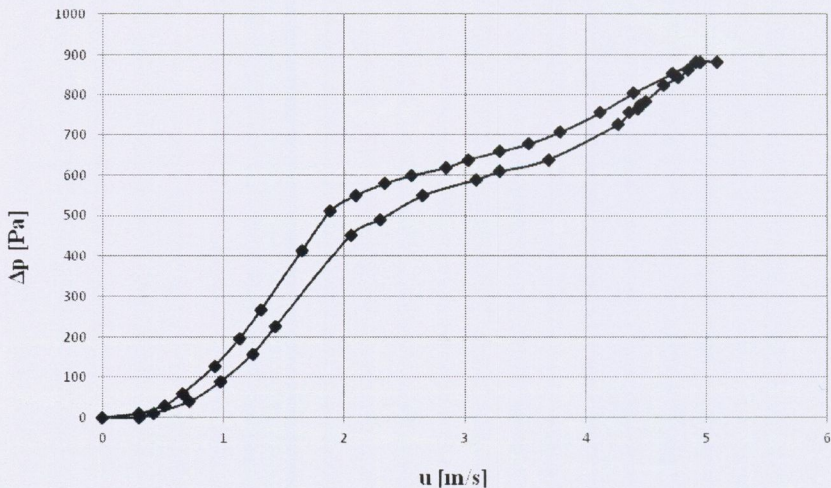
Rys. 4. Krzywe fluidyzacji ziarna kawy

Fig. 4. Fluidization curves for coffee beans

Zastosowany w badaniach dystrybutor gazu [10] powoduje, że kształt krzywych fluidyzacji dla warstw polidispersyjnych (rys. 5 i 6) zbliża się do przebiegu tych krzywych charakterystycznych dla warstw monodispersyjnych [1].

Najprawdopodobniej wskutek skomplikowanego kształtu ziaren zrębków drzewnych punkty przyłożenia siły podnoszenia nie odpowiadają środkom ich ciężkości. W wyniku elementy złoża wprawiane są w ruch obrotowy, a równocześnie zachodzi ich orientacja w kierunku przepływu strumienia gazu, co wywołuje cykliczny ruch cząstek w całej objętości ładunku.

Krzywą fluidyzacji dla zrębków olchy z uwzględnieniem zjawiska histerezy przedstawia rysunek 5. Krzywe fluidyzacji zrębków jabłoni zamieszczono na rysunku 6.



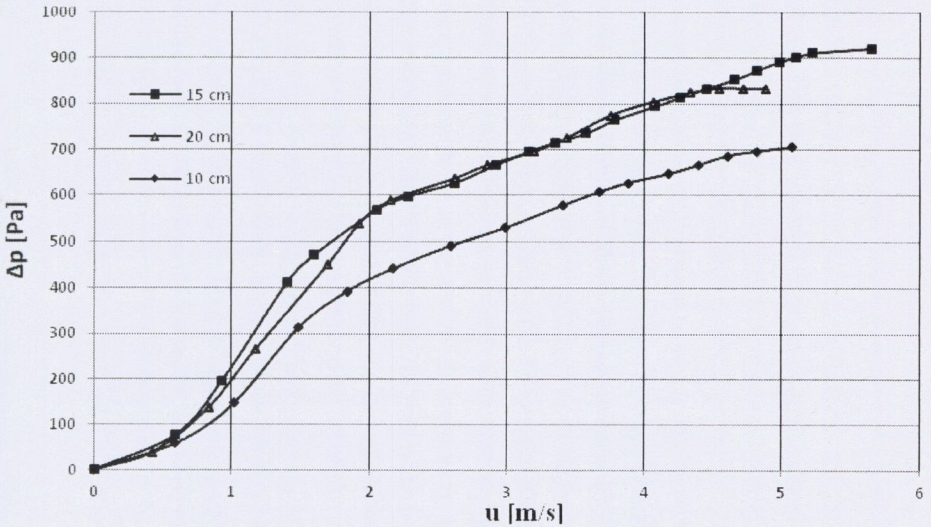
Rys. 5. Krzywa fluidyzacji dla zrębków olchy z uwzględnieniem zjawiska histerezy (początkowa wysokość ładunku 150 mm)

Fig. 5. Hysteresis during fluidization of alder chunks (static bed height 150 mm)

Stwierdzono możliwość uzyskania złoża fluidalnego dla wszystkich badanych materiałów. Jakość fluidyzacji jest zadowalająca, a pylenie ograniczone do minimum.

Zawartość wilgoci materiałów badanych zawierała się w granicach od 38% (odpady z tartaku) do 3,7% (kawa). Dla analizowanych zrębków drzewnych uzyskuje się zadowalającą jakość procesu przy liczbach fluidyzacji rzędu 2 ÷ 3.





Rys. 6. Krzywa fluidyzacji zrębów jabłoni

Fig. 6. Fluidization curve for apple chips

#### 4. Podsumowanie

- 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 efektywną fluidyzację analizowanych rodzajów bioproduktów.
- Jak stwierdzono w trakcie badań testowych korzyści techniczne wynikające z zastosowania proponowanego rozwiązania konstrukcyjnego to: intensyfikacja procesu fluidyzacji, ograniczenie pylenia (maksymalnie 4% masy złoża w przeliczeniu na materiał suchy) z jednoczesną możliwością zwiększenia natężenia przepływu czynnika fluidyzującego oraz duża uniwersalność zastosowania.
- Należy podkreślić, że stosunek spadków ciśnień na dystrybutorze i złożu wahał się (w zależności od właściwości badanego materiału) w zakresie od  $0,1 \div 0,2$ .

## Literatura

- [1] Mujumdar A.S.: *Handbook of industrial drying*, Marcel Dekker, New York 1995.
- [2] Mujumdar A.S.: *Innovation and globalization in drying R&D*. In CD-ROM Proceedings 15<sup>th</sup> International Drying Symposium IDS'2006, Budapest, Hungary, 20-23 August 2006.
- [3] Stolarski M., Szczukowski S.: *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 1, (2005), 13-22.
- [4] Strumiłło C., Jones P.L., Zylla R.: Energy aspects in drying. In *Handbook of Industrial Drying*, 2<sup>nd</sup> Ed. Mujumdar A.S., Marcel Dekker Inc., New York (1995), 1241-1298.
- [5] Strumiłło C.: *Drying Technology*, 24 (9), (2006), 1959-1968
- [6] Ściażko M., Kubica K.: *Karbo*, 11, (2002), 325-330.
- [7] Tytko R.: *Odnawialne źródła energii Wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo Deka, Kraków 2008.
- [8] Ciesielczyk W.: *Drying Technology*, 27(12), (2009), 1309-1315.
- [9] Ciesielczyk W., Kamińska A.: *Inż. Apar. Chem.* 48, 6, (2009), 36-37.
- [10] Ciesielczyk W., Kamińska A., Skoneczna J.: *Suszarka fluidyzacyjna do suszenia materiałów polidispersyjnych, zwłaszcza rozdrobnionej biomasy*. Wzór użytkowy W-118761, 2010
- [11] Geldart D.: *Powder Technology*, 7, (1973), 285-291.
- [12] Karwasz Z.: *Czysta Energia* 7-8, (2007), 16-17.
- [13] Kudra T., Strumiłło C.: *Thermal Processing of Biomaterials*, Gordon and Breach Science Publishers, New York 1998.
- [14] Lewandowski W. M.: *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. WNT, Warszawa 2007.
- [15] Majtkowski W.: *Aeroenergetyka*, 16(2), (2006), 28-32.

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