



## PRĘDKOŚĆ KRYTYCZNA ODWRÓCONEJ FLUIDYZACJI WYBRANYCH WARZYW

Dariusz Góral\*, Franciszek Kluza, Katarzyna Kozłowicz

Katedra Chłodnictwa i Energetyki Przemysłu Spożywczego, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

\* Adres do korespondencji: ul. Doświadczalna 44, 20-280 Lublin, e-mail: [dariusz.goral@up.lublin.pl](mailto:dariusz.goral@up.lublin.pl)

### INFORMACJE O ARTYKULE

Historia artykułu:  
Wpłynął: listopad 2013  
Zrecenzowany: grudzień 2013  
Zaakceptowany: luty 2014

Słowa kluczowe:  
minimalna prędkość fluidyzacji  
odwrócona fluidyzacja  
zamrażanie  
warzywa

### STRESZCZENIE

*W pracy analizowano możliwość wykorzystania istniejących modeli wyznaczania minimalnej prędkości fluidyzacji podczas zamrażania owoców i warzyw metodą odwróconej fluidyzacji. Złoża poddawane zamrażaniu formowano z frytek ziemniaczanych, brukselki, różyczek brokułu, marchwi w postaci kostki o boku 1 cm i plastrów o wymiarach 3x3x0,5 cm. Wartości minimalnej prędkości fluidyzacji wyznaczano przy pomocy anemo-manometru. Wyniki z badań eksperymentalnych porównywano z wartościami uzyskanymi z 4 modeli obliczeń minimalnej prędkości fluidyzacji. Obliczone wartości obciążone były średnimi odchyleniami od wartości uzyskanych eksperymentalnie, od 24% w przypadku marchwi w kostce do 224% w przypadku złożów różyczek brokułu. Jednocześnie stwierdzono brak statystycznych różnic pomiędzy wynikami uzyskanymi wg badanych modeli.*

### Wykaz oznaczeń:

- $A$  – pole powierzchni, ( $m^2$ )
- $d$  – średnica cząstki, wymiar charakterystyczny produktu, (m)
- $F$  – siła parcia płynu, (N)
- $g$  – przyspieszenie ziemskie, ( $m \cdot s^{-2}$ )
- $G$  – siła ciężkości, (N)
- $L$  – długość, (m)
- $m$  – masa, (kg, g)
- $P, \Delta P$  – ciśnienie, różnica ciśnień, (Pa)
- $S, S_1, S_2$  – odstęp pomiędzy dyszami, (mm)
- $V$  – objętość, ( $m^3$ )
- $w$  – prędkość, ( $m \cdot s^{-1}$ )
- $\varepsilon$  – porowatość złoża
- $\mu$  – lepkość dynamiczna powietrza, (Pa·s)
- $\nu$  – lepkość kinematyczna powietrza, ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- $\rho$  – gęstość, ( $kg \cdot m^{-3}$ ).

**Indeksy:**

$f$  – płyn  
 $mf$  – minimalna fluidyzacji  
 $p$  – początkowy  
 $rz$  – rzeczywisty  
 $s$  – ciało stałe  
 $z$  – zastępcza

**Liczby kryterialne:**

$$Ar - \text{Archimedes}, Ar = \frac{g \cdot d^3 \cdot \rho_f (\rho_s - \rho_f)}{\mu_f^2}$$

$$Re - \text{Reynoldsa}, Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$$

**Wstęp**

Jedną z najważniejszych operacji jednostkowych stosowanych wspólnie w inżynierii rolniczej jest fluidyzacja. Zalety tego procesu spowodowały jego szerokie wykorzystanie w takich działach przemysłu, jak: energetyka, suszarnictwo, a od początku lat 60-tych również w chłodnictwie.

Generalnie, aby wystąpiło zjawisko fluidyzacji parcie płynu na powierzchnię złoża musi być równe wypadkowej sił ciężkości i wyporu (Kawamura i Suezawa, 1961). Siła ciężkości złoża jest równa:

$$G = (\rho_s - \rho_f) \cdot g \cdot V \cdot (1 - \varepsilon) \quad (1)$$

Siłę parcia płynu można obliczyć ze zmodyfikowanego równania Darcy-Weisbacha (Niven, 2002):

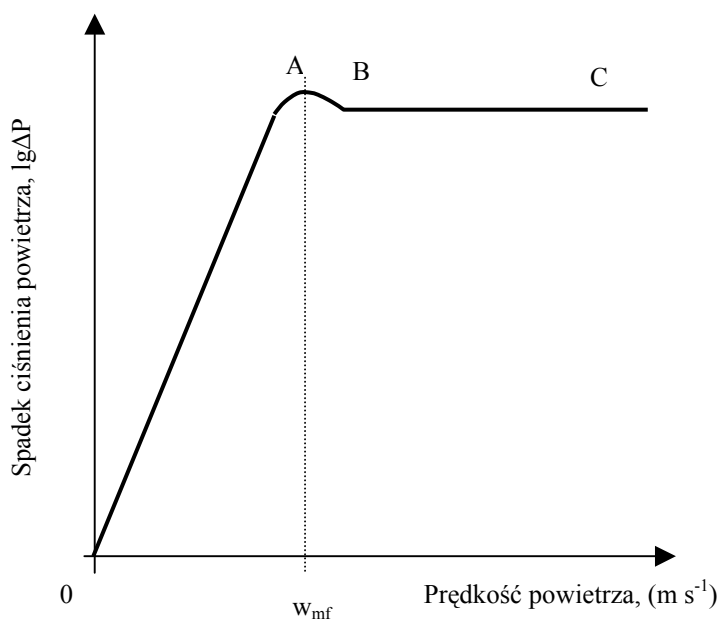
$$F_w = f \cdot \frac{V}{d_z} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot w_{mf}^2 \cdot \rho_f \quad (2)$$

W równaniu tym przez  $f$  oznaczony jest współczynnik oporu przepływu. Współczynnik ten niezależnie od rodzaju przepływu płynu wyznaczony został przez Erguna (1952) jako:

$$f = \frac{150 \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot \mu}{d_z \cdot \rho_f \cdot w} + 1,75 \quad (3)$$

Jeśli siła parcia płynu jest niższa od siły ciężkości złoża to wtedy płyn przepływa kanałkami pomiędzy nieruchomymi cząstkami. Spadek ciśnienia płynu jest proporcjonalny do jego prędkości (odcinek 0-A) (rys. 1). W momencie kiedy parcie płynu na powierzchnię

złoża jest równe ciśnieniu statycznemu (punkt A), złożo nieruchome przechodzi w stan fluidalny. Prędkość płynu w tym punkcie oznaczona  $w_{mf}$  nazywana jest prędkością minimum fluidyzacji. Podczas dalszego wzrostu prędkości parcie płynu na powierzchnię złoża przewyższa jego ciśnienie statyczne. Następuje ekspansja warstwy i wzrost porowatości złoża (odcinek B-C). Spadek ciśnienia jest stały w zakresie całej fluidyzacji. Związane jest to ze zrównoważeniem wzrostu porowatości złoża z jego zwiększoną turbulencją (Yang, 1998; Gruda i Postolski, 1999; Kmiec i in., 2007).

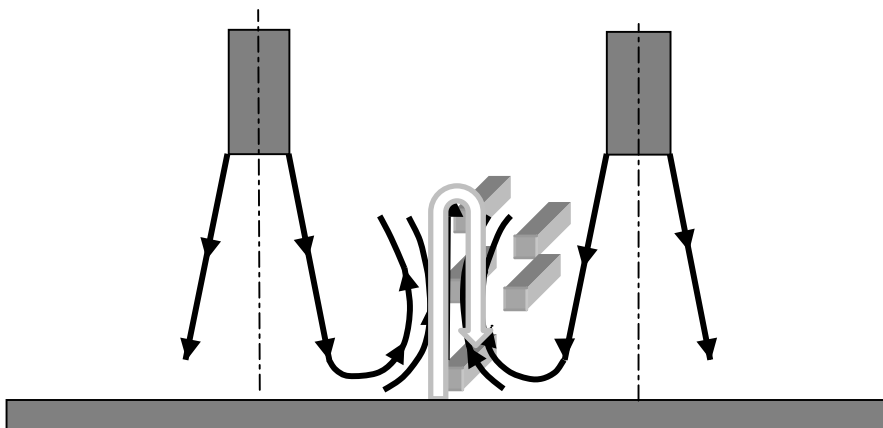


Rysunek 1. Zależność spadku ciśnienia od prędkości strumienia przepływającego przez złożo gazu

Figure 1. Dependence of pressure drop on the velocity of gas stream flowing through the bed

Warunkiem koniecznym zaistnienia fluidyzacji złoża produktu jest to, aby prędkość powietrza była równa lub wyższa od prędkości minimum fluidyzacji. Prędkość ta zależy m.in. od średnicy cząstki i porowatości złoża (Gruda i Postolski, 1999).

Specyficzną odmianą fluidyzacji jest fluidyzacja odwrócona. Jest to metoda, w której zjawisko impingement wykorzystane jest do wywołania fluidalnego wrzenia złoża produktu. W tej metodzie, z chwilą osiągnięcia prędkości minimum fluidyzacji siła wyporu powietrza przewyższa siłę ciężkości produktu i produkt jest unoszony w kierunku szczytu fontanny. Następnie, w wyniku wzajemnego oddziaływania sąsiednich cząstek produktu, pojedyncze cząstki przemieszczane są na brzeg szczytu fontanny i dostają się do strefy niższego ciśnienia powietrza lub też pod strumień powietrza wypływającego z dyszy. Powoduje to ich opadanie na dno komory roboczej urządzenia i rozpoczyna się ponowny cykl procesowy (rys. 2).



Rysunek 2. Ruch elementu złoża w warunkach w odwróconej fluidyzacji  
Figure 2. Motion of the bed particle under reverse fluidization

Istnieje wiele wzorów do wyznaczenia minimalnej prędkości fluidyzacji. Jednakże są one opracowane dla innych gałęzi przemysłu niż przemysł spożywczy i nie uwzględniają takich właściwości produktów rolniczych i żywności, jak np. nieregularność kształtu czy występowanie sił adhezji. W praktyce większość rozwiązań tego problemu wywodzi się z równania Erguna (3) (Ergun, 1952):

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{w \cdot \mu}{\phi^2 d^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{w^2 \rho}{\phi^2 d} \quad (4)$$

Gdzie  $\phi$  jest współczynnikiem kształtu cząstki złoża, a spadek ciśnienia na długości  $L$  ( $\frac{\Delta P}{L}$ ) można wyznaczyć jako:

$$\frac{\Delta P}{L} = (1-\varepsilon)(\rho_s - \rho_f)g \quad (5)$$

W celu uproszczenia równania (4) w wielu opracowaniach stosowane są przybliżenia Wen i Yu (Niven, 2002):

$$\frac{1-\varepsilon}{\phi^2 \cdot \varepsilon^3} \approx 11 \text{ oraz } \frac{1}{\phi \cdot \varepsilon^3} \approx 14 \quad (6)$$

Zastosowanie tych stałych prowadzi do uproszczenia równania Erguna (4) do postaci (Dechsiri, 2004):

$$Re_{mf} = \frac{d \cdot w \cdot \rho_f}{\mu} = \sqrt{33,7^2 + 0,0408 \frac{d^3 \cdot \rho_f \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{\mu^2}} - 33,7 \quad (7)$$

Wzór powyższy jest stosowany do przypadków fluidyzacji złożeń proszków. W odniesieniu do fluidującego złoża węgla w wysokich ciśnieniach powietrza. Chitester i in. (1984) zaproponowali modyfikację równania Erguna poprzez zastosowanie stałych 28,7 i 0,494:

$$Re_{mf} = \sqrt{28,7^2 + 0,494 \frac{d^3 \cdot \rho_f \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{\mu^2}} - 28,7 \quad (8)$$

W obliczeniach związanych z minimalną prędkością fluidyzacji w warunkach chłodzenia lub zamrażania produktów spożywczych wielu autorów zaleca stosowanie wzoru Todesa (Todes i Tsitovich, 1981):

$$Re_{mf} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad (9)$$

lub wzoru Kuni i Levenspiel (Gruda i Postolski 1999):

$$w_{mf} = \sqrt{\frac{d \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{24,5 \cdot \rho}} \quad (10)$$

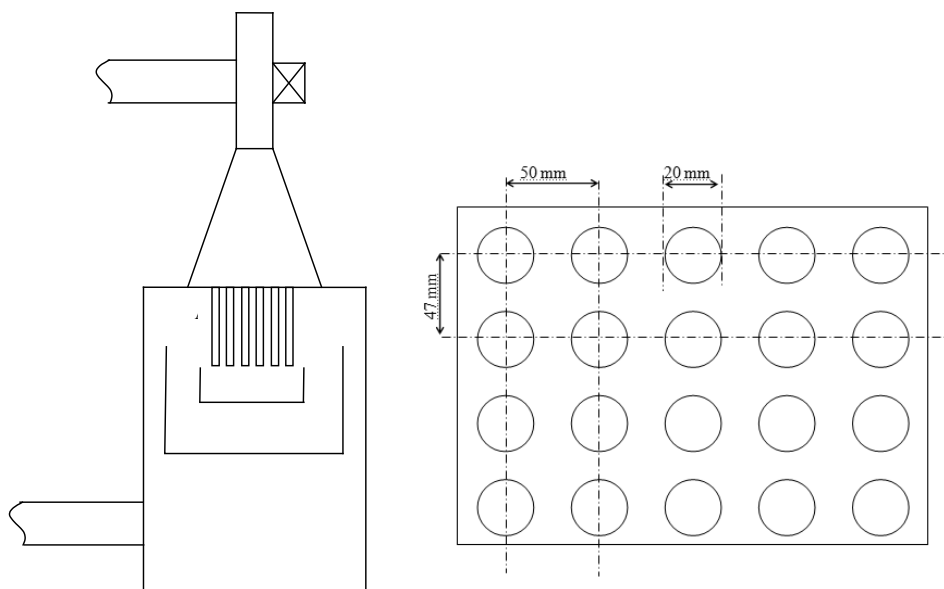
Wybór odpowiedniego równania do wyznaczenia minimalnej prędkości fluidyzacji produktów spożywczych nawet w przypadku klasycznej fluidyzacji nie jest łatwe ze względu na zróżnicowany kształt i wielkość produktów. Teoretyczne wyznaczenie prędkości minimum fluidyzacji w metodzie odwróconej fluidyzacji nie było do tej pory badane.

Stąd celem pracy jest wybranie rozwiązania, które umożliwi wyznaczenie minimalnej prędkości fluidyzacji warzyw podczas ich zamrażania metodą odwróconej fluidyzacji.

## Metodyka

Badania przeprowadzono na prototypowym urządzeniu laboratoryjnym umożliwiającym realizację procesów chłodniczych metodą odwróconej fluidyzacji. Komora robocza urządzenia była wyposażona w wymienną głowicę składającą się z dna sitowego z umieszczonymi w nim dyszami o długości 370 mm i średnicy wewnętrznej 18 mm (rys. 3). Liczba dysz w głowicy wynosiła 20 a ich rozstaw odpowiednio  $S_1 = 50$  mm i  $S_2 = 47$  mm. Głowicę tę wybrano w wyniku wcześniej przeprowadzonych badań optymalizacyjnych (Góral i Kluza, 2012).

Pomiary wykonywano w temperaturze środowiska  $-22^\circ\text{C}$  przy zakresie prędkości powietrza odbitego od  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Odległość od dna komory roboczej do dysz była stała i wynosiła 120 mm. Surowcem użytym do badań były frytki ziemniaczane o przekroju  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$  i różnej długości, marchew w kostkach o boku 1 cm i w plastrach  $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$  i grubości 0,5 cm, brukselka o średnicy od 2 cm do 3,5 cm oraz różyczki brokołu. Produkty były świeże, bez uszkodzeń mechanicznych i nieporażone przez choroby.



Rysunek 3. Schemat stanowiska badawczego wraz z przekrojem głowicy  
 Figure 3. Scheme of the test rigs with cross section of an operating head

Ponieważ badane produkty pochodziły z różnych grup klasyfikacyjnych, przebieg procesu ich przygotowania był zróżnicowany. Przygotowanie do badań generalnie polegało na usunięciu zewnętrznej okrywy, przemyciu w wodzie w celu pozbawienia pozostałości po obieraniu i następnie pokrojeniu w kostki, słupki lub plastry. Przed fluidyzacją surowce ważono na wadze elektronicznej oraz mierzono objętość surowca. Na tej podstawie wyznaczano gęstość surowca. Średnicę równoważną surowca policzono ze wzoru  $d_e = 1,24 \sqrt[3]{V}$  (Gruda i Postolski, 1999; Jaros i Pabis, 2006). Tak przygotowane próbki o masie ok. 0,5 kg każda poddawano fluidyzacji. Eksperymenty przeprowadzono w trzech powtórzeniach. W warunkach fluidyzacji w złożu mierzono prędkości powietrza odbitego od dna komory roboczej, jego temperaturę i wilgotność. Pomiary wykonano przy użyciu miernika KIMO Anemo-Manometr MP 120 z rurką Pitota typu L o średnicy zewnętrznej 6 mm. Pozostałe parametry powietrza wymagane do obliczeń przyjmowano z tablic powietrza wilgotnego (Pawilój i in., 1998). Teoretyczną minimalną prędkość fluidyzacji obliczano ze wzorów (7), (8), (9) i (10), a otrzymane wartości porównywano z wynikami uzyskanymi na drodze eksperymentalnej, używając pakietu statystycznego Statistica 10.0.

## Wyniki badań i ich dyskusja

Przeprowadzone badania eksperymentalne umożliwiły wyznaczenie prędkości krytycznej początku fluidyzacji wybranych warzyw (rys. 4). Najwyższą wartością minimalnej prędkości fluidyzacji podczas zamrażania metodą odwróconej fluidyzacji charakteryzowały

się róże brokołu ( $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Najmniejszą prędkość minimum fluidyzacji zmierzono podczas obróbki kostki marchwi ( $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Zgodnie z przewidywaniami prędkość ta zależała głównie od średnicy elementu złoża.

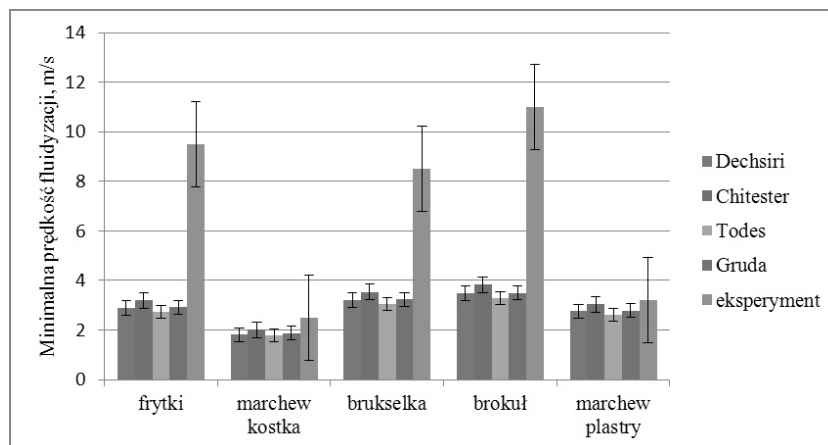


*Rysunek 4. Widok fluidującego złoża marchwi w kostce*  
*Figure 4. View of the bed of carrots cubes under fluidization*

Wartości minimalnej prędkości fluidyzacji frytek, brukselki i róż brokołu uzyskane poprzez obliczenia przy użyciu wzorów (7-10) znacznie odbiegały od wyników eksperymentalnych (rys. 5). Średnie wartości obliczone dla tych surowców wynosiły od 161% do 224% od wartości zmierzonych. Natomiast podczas porównania minimalnej prędkości fluidyzacji kostki i plastrów marchwi uzyskanej na drodze eksperymentalnej i wartości obliczonych, odchylenie nie przekraczało 30%.

Następnie zbadano statystyczną istotność różnic wartości uzyskanych wg poszczególnych modeli obliczeń. Najpierw przeprowadzono test Fischera w celu zbadania zmienności wariancji. Wyniki tego testu umieszczono w tabeli 1.

W każdym z analizowanych przypadków wartość  $p$  była większa od  $\alpha=0,05$ , więc zmienność wariancji nie była statystycznie istotna. Wobec tego możliwe było przeprowadzenie testu t-Studenta, zakładającego równe wariancje, w celu zbadania istotności różnic pomiędzy poszczególnymi wartościami uzyskanymi z obliczeń. Wartości uzyskane wg tego testu zamieszczono w tabeli 2.



Rysunek 5. Minimalna prędkość początku fluidyzacji wybranych warzyw wyznaczona przy użyciu czterech badanych modeli w porównaniu z wartościami uzyskanymi w pomiarach  
 Figure 5. The minimum fluidization velocity of the selected vegetables which were determined using four models in comparison with the experimental data

Tabela 1

Wartości p uzyskane w teście Fischera

Table 1

The p values which were obtained in Fischer's test

	Dechsiri	Chitester	Todes	Gruda
Dechsiri		0,44191	0,41279	0,34568
Chitester	0,44191		0,35739	0,29447
Todes	0,41279	0,35739		0,42936
Gruda	0,34568	0,29447	0,42936	

Tabela 2

Wartości p uzyskane w teście t-Studenta

Table 2

The p values which were obtained in t-Student's test

	Dechsiri	Chitester	Todes	Gruda
Dechsiri		0,70272	0,867159	0,710021
Chitester	0,70272		0,576874	0,943268
Todes	0,867159	0,576874		0,557300
Gruda	0,710021	0,943268	0,557300	



Analizując wyniki testu t-Studenta stwierdzono, że wartość  $p$  dla każdej z metod była wyższa od zakładanej  $\alpha=0,05$ , co świadczy o braku istotnych różnic pomiędzy wartościami obliczonymi wg każdej z metod.

Podsumowując, wartości minimalnej prędkości fluidyzacji obliczonej i wyznaczonej eksperymentalnie były najbardziej zbieżne dla złożów złożonych z marchwi w kostce i w plastrach. W przypadku obróbki frytek, róż brokołu i brukselki pomiary wartości tej prędkości mogą być obarczone dużym błędem. Związane jest to ze specyfiką tego surowca. Kształt frytek znacznie odbiega od przyjmowanego do obliczeń kształtu kuli. W związku z tym frytki wymagają znacznie większej prędkości powietrza do zapoczątkowania fluidyzacji. Natomiast złoż brokułu składało się z pojedynczych elementów o różnej wielkości. W obliczeniach minimalnej prędkości fluidyzacji za średnicę elementu złoża przyjmowano średnią średnicę brukselki. To z pewnością miało wpływ na rozbieżność pomiędzy wynikami obliczeń a wartościami zmierzonymi. Podobnie stwierdzono dużą rozbieżność pomiędzy wynikami obliczonymi i wyznaczonymi eksperymentalnie minimalnej prędkości fluidyzacji róż brokołu. Spowodowane to było nie tylko dużą zmiennością wielkości i kształtu, ale również istotną różnicą masy poszczególnych różyczek.

## Wnioski i stwierdzenia

Wartości minimalnej prędkości fluidyzacji wyznaczone eksperymentalnie wynosiły od  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  dla złoża marchwi w kostce do  $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  dla złoża różyczek brokołu.

Przeprowadzone obliczenia minimalnej prędkości fluidyzacji za pomocą czterech metod (Dechsiri, Chitester, Todes oraz Gruda) obarczone były średnimi odchyleniami od wartości uzyskanych eksperymentalnie od 24% w przypadku marchwi w kostce do 224% w przypadku złożów różyczek brokołu. Tak duże odchylenia najprawdopodobniej spowodowane były przybliżeniem kształtu frytki i brokołu do kuli, a w przypadku brukselki przyjmowaniem do obliczeń średniej średnicy produktu.

Analiza statystyczna wykonana testem t-Studenta, zakładającym równość wariancji, potwierdziła brak istotnych różnic pomiędzy wartościami minimalnej prędkości fluidyzacji obliczonej poszczególnymi metodami w każdym badanym przypadku fluidyzacji.

## Literatura

- Chitester, D. C.; Kornosky, R. M.; Fan, L.-S.; Danko, J. P. (1984). Characteristics of fluidization at high pressure. *Chemical Engineering Science*, 39(2), 253-261.
- Dechsiri, C. (2004). *Particle transport in fluidized beds – experiments and stochastic models*. PhD Dissertation, Rijksuniversiteit Groningen.
- Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, 48(2), 89.
- Góral, D.; Kluza, F. (2012). Heat transfer coefficient in impingement fluidization freezing of vegetables and its prediction. *International Journal of Refrigeration*, 35, 871-879.
- Gruda, Z.; Postolski, J. (1999). *Zamrażanie żywności*. Warszawa, PWN, ISBN 83-204-2332-5.
- Jaros, M.; Pabis, S. (2006). Theoretical models for fluid bed drying of cut vegetables. *Biosystems engineering*, 93(1) 45-55.

- Kawamura, S.; Suezawa, Y. (1961). Mechanism of gas flow in a fluidized bed at low pressure. *Kagaku Kogaku*, 25, 524.
- Kmieć, A.; Englart, S.; Ludwińska, A. (2007). *Teoria i technika fluidyzacji*. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej Nr 83, Seria: Monografie, Nr 48, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, ISSN 0084-2869.
- Niven, R. K. (2002). Physical insight into the Ergun and Wen & Yu equations for fluid flow in packed and fluidised beds. *Chemical Engineering Science*, 57(3), 527-534.
- Pawłojć, A.; Targański, W.; Bonca, Z. (1998). *Odzysk ciepła w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych*. MASTA Gdańsk, ISBN 83-907582-5-3.
- Strumiłło, Cz. (1983). *Podstawy teorii i techniki suszenia*. Warszawa, WNT, ISBN 83-204-0418-5
- Todes, O.M.; Tsitovich, O.B. (1981). *Fluidized granular bed apparatuses*. Leningrad, Khimijya.
- Yang, W.C. (1998). *Fluidization, Solids Handling, and Processing – Industrial Applications*. Noyes, William Andrew Publishing, ISBN: 9780815517238.

## **CRITICAL REVERSE FLUIDIZATION VELOCITY OF THE SELECTED VEGETABLES**

**Abstract.** The objective of this work was to study the possibility of using existing models for determination of the minimum fluidization velocity during freezing fruits and vegetables by reverse fluidization. The frozen material was formed from French fries, brussels sprouts, broccoli florets, carrot in the form of a cube with sides of 1 cm and slices with dimensions of 3x3x0.5 cm. The values of minimum fluidization velocity were measured by means of anemometer. The results of the calculation from the four models of calculation of the minimum fluidization velocity were compared with the values obtained experimentally. The calculated values were affected by the average errors of 24% in case of a carrot cube to 224% in case of broccoli florets. There was no statistical difference between the results obtained between the tested models.

**Key words:** minimum fluidization velocity, reverse fluidization, freezing, vegetables