

Wojciech LUDWIG, Janusz DZIAK

e-mail: wojciech.ludwig@pwr.edu.pl

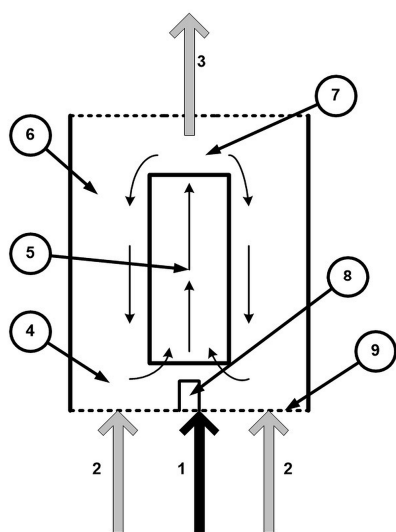
Zakład Inżynierii Chemicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Wroclawska, Wrocław

Modelowanie przepływu gazu w aparacie do suchego powlekania

Wstęp

Aparaty fontannowe spośród wielu znanych urządzeń stosowanych do powlekania uważa się za najlepiej nadające do tego celu [Teunou i Poncelet, 2002]. Zwłaszcza rozwiązanie konstrukcyjne z dyszą rozpylającą umieszczoną w dnie urządzenia posiada wiele zalet m.in. zwiększone prawdopodobieństwo zderzenia kropelek rozpylającego z cząstkami, krótki czas procesu oraz zmniejszenie strat substancji powlekającej. Jednak dysza rozpylająca znajduje się wówczas wewnątrz złoża, co powoduje możliwość łatwego jej zatkania. Poza tym ryzyko aglomeracji cząstek jest duże w związku z wysoką koncentracją mokrych rdzeni tuż nad rozpylaczem. Pewnym rozwiązaniem jest w tym przypadku zastosowanie układu fontannowo-fluidalnego z rurą wznoszącą – tzw. aparat Wurstera [Wurster i Lindlof, 1966; Wu i in., 2015] (Rys. 1). Użycie rury wznoszącej wymusza w tym przypadku regularną cyrkulację rdzeni i zwiększa ich prędkość, a dodatkowy strumień powietrza fluidyzacyjnego rozbija powstałe w strefie załadunku aglomeraty [Hampel i in., 2013]. W ramach wcześniejszych badań skonstruowano aparat, będący modyfikacją klasycznego urządzenia Wurstera, służący do suchego powlekania proszkowego i elektrostatycznego materiałów drobnocząstkowych [Szafran i in., 2012].

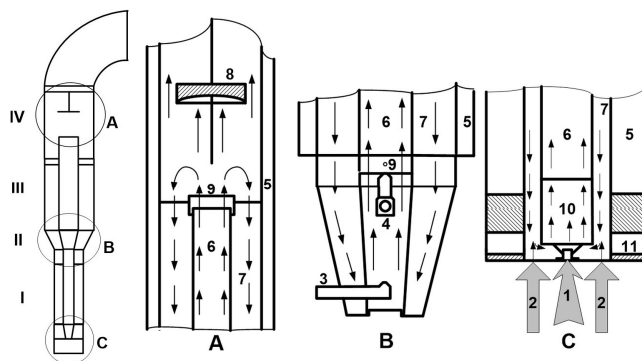
Celem prezentowanej pracy była wstępna optymalizacja metodami numerycznej mechaniki płynów CFD (*Computational Fluid Dynamics*) przepływu gazu w tym urządzeniu bez uwzględnienia obecności fazy rozdrobnionej (model jednofazowy). Metody CFD stanowią wygodną alternatywę wobec klasycznych metod modelowania, gdyż cechują się skalowalnością i uniwersalnością, a w przypadku przepływów jednofazowych także zadowalającą dokładnością [Jaworski, 2005]. Kryterium optymalizacji była wartość tzw. prędkości cyrkulacji gazu (masowego natężenia przepływu gazu w rurze wznoszącej), która wpływa bezpośrednio na prędkość cyrkulacji cząstek w czasie procesu powlekania. Opracowany model posłużył do jakościowego zbadania wpływu zmiennych hydrodynamicznych i konstrukcyjnych na badany parametr.



Rys. 1. Schemat klasycznego aparatu Wurstera: 1 – strumień powietrza fontannowego, 2 – strumień powietrza fluidyzującego, 3 – strumień powietrza wylotowego, 4 – strefa załadunku (zasysania cząstek), 5 – strefa rury wznoszącej, 6 – strefa pierścieniowa, 7 – strefa fontanny, 8 – dysza rozpylająca, 9 – siatka

Modelowany aparat

Główną część modelowanego urządzenia stanowi kolumna składająca się z trzech cylindrycznych segmentów I, III, IV, stożka II oraz dysz doprowadzających powietrze, plastyfikator, a także substancję powlekającą (Rys. 2). Nad oraz pod dolnym segmentem I znajdują się aluminiowe pierścienie – 11 z otworami służącymi do załadunku oraz odbioru cząstek (powlekanych rdzeni). Każdy z segmentów ma podwójną ścianę – 5, która umożliwia termostatowanie aparatu. Zewnętrzna powłoka wykonana została z poliwęglanu, wewnętrzna ze szkła. W osiach segmentów umieszczono rury wznoszące – 6, połączone ze sobą przez aluminiowe obejmy – 9. W osi stożka II łączącego segment dolny I ze środkowym III znajdują się dysze rozpylające plastyfikator – 4 oraz proszek powlekający rdzenie – 3 (nie były one modelowane w prezentowanych symulacjach) (Rys. 2B). Górny segment IV wyposażono w deflektor – 8, który ogranicza w trakcie powlekania wywiewanie cząstek poza instalację. W dolnej części aparatu umieszczono strumienicę – 10 głównego gazu fontannującego – 1 oraz dno sitowe, przez które podawane jest dodatkowe powietrze fluidyzujące – 2. Powietrze fontannujące przepływa przez rurę wznoszącą, jego część jest w strefie pod deflektorem zasysana do strefy pierścieniowej (Rys. 2A), a część przez filtr workowy opuszcza instalację. W dolnej strefie urządzenia strumienica gazu fontannującego zasysa strumień powietrza fluidyzującego do rury wznoszącej (Rys. 2C)



Rys. 2. Schemat modelowanego aparatu: (strzałki pokazują kierunek ruchu powietrza) I – dolny segment z strumienicą, II – stożek z dyszami, III – segment środkowy, IV – segment końcowy z deflektorem: 1 – strumień powietrza fontannującego, 2 – strumień powietrza fluidyzującego, 3 – dysza rozpylająca proszek powlekający, 4 – dysza rozpylająca plastyfikator, 5 – podwójna ściana, 6 – rury wznoszące, 7 – strefa pierścieniowa, 8 – deflektor, 9 – pierścienie łączące, 10 – strumienica, 11 – otwory do rozładunku cząstek

Aparat w stosunku do klasycznego rozwiązania ma znacznie wydłużoną strefę rury wznoszącej, która jest przedzielona przez stożek z dyszami ustawionymi współprądowo w stosunku do ruchu gazu i cząstek. Zastosowanie strumienicy do dystrybucji gazu fontannującego zapewnia znacznie szybszą cyrkulację cząstek. Dzięki temu czas procesu ulega wyraźnemu skróceniu.

Model CFD

Zastosowany model CFD opierał się na uniwersalnych równaniach transportu cieczy nieściśliwej (równanie ciągłości, równanie zachowania pędu) przy przepływie burzliwym. Wówczas po zastosowaniu metody RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) równanie Naviera-Stokesa dla procesu w stanie ustalonym przyjmuje postać zależności Reynoldsa [Jaworski, 2005]:

$$\text{div}(\rho \overline{u u} + \rho \overline{u' u'}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad } \overline{u}) - \text{div}(\overline{p I}) + \rho \overline{g} \quad (1)$$

gdzie: ρ - gęstość, [kg/m³], t - czas, [s], u - prędkość, [m/s], u' - prędkość pulsacyjna, [m/s], μ - kinematyczny współczynnik lepkości [m²/s], p - ciśnienie, [Pa], I - tensor jednostkowy, g - wypadkowy wektor sił masowych, [N/kg].

Równanie ciągłości ma postać:

$$\text{div}(\rho \overline{u}) = 0 \quad (2)$$

Aby rozwiązać równanie (1) należy wprowadzić zależności opisujące tensor naprężeń turbulentnych $T' = -[\rho \overline{u' u'}]$. W symulacjach zastosowano model turbulencji $k-\epsilon$ z modyfikacją *realizable*, jako najbardziej uniwersalny i najlepiej opisujący wypływ gazu z dysz [Shih i in., 1995]. Tak sformułowany model matematyczny (równania ciągłości, *Reynoldsa*, k i ϵ oraz strefy przyściennej) nie jest możliwy do rozwiązania w sposób analityczny. W związku z tym zastosowano metody numeryczne zaimplementowane w pakiecie *Ansys CFD 16.1*, który stanowi standard w dziedzinie tego rodzaju oprogramowania i jest od wielu lat z powodzeniem stosowany do modelowania różnorodnych procesów w wielu dziedzinach przemysłu [Ludwig i Dziak, 2009; Kurowski i Spielthoff, 2016]. Podstawowe parametry modułu rozwiązującego *solvera* podano w tab. 1.

Tab. 1 Parametry modelu CFD

Parametr	Wartość
Solver	ustalony, 3D, <i>pressure based</i>
Opis strefy przyściennej	Standardowa funkcja przyściennej
Warunek brzegowy na wlocie do kolumny powietrza fontannującego (dysza fontannująca Rys. 2C 1)	<i>Velocity inlet</i>
Warunek brzegowy na wlocie do kolumny powietrza fluidyzującego (dno aparatu, Rys. 2C 2)	<i>Velocity inlet</i>
Warunek brzegowy powietrza na wylocie z kolumny	<i>Pressure outlet</i>
Schemat dyskretyzacyjny	II rzędu pod prąd (<i>second order upwind</i>)

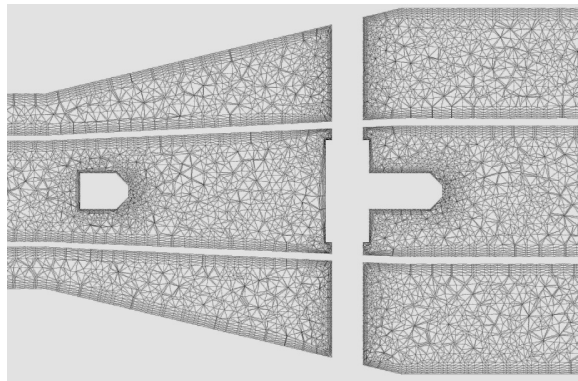
Prędkość głównego strumienia powietrza fontannującego na wlocie do aparatu zmieniała się w zakresie od 111 (0,0037 m³/s) do 359 m/s (0,0119 m³/s), natomiast strumienia powietrza fluidyzującego od 0,3 (0,0014 m³/s) do 3 m/s (0,014 m³/s). Wartości te ustalono na podstawie wcześniejszych badań (najmniejsza i największa prędkość gazu przy powlekanii cząstek). Własności fizyczne powietrza we wszystkich strumieniach i symulacjach były stałe: gęstość 1,225 kg/m³, lepkość 1,75·10⁻⁵ Pa·s. Obliczenia kontynuowano do momentu spadku wartości skalowalnych residuów poniżej 10⁻³ i ustalenia się na stałym poziomie wartości całek objętościowych prędkości, ciśnienia oraz k i ϵ (około 1500 iteracji). Przeprowadzono próby wpływu gęstości siatki na obliczane parametry. Na tej podstawie wybrano siatkę o optymalnej gęstości i budowie – siatka 3D składająca się w większości z komórek tetraedralnych o zagęszczonej strukturze w pobliżu ścian (w zależności od geometrii około 2 500 000 komórek) (Rys. 3).

Rozwiązanie modelu (pola prędkości i ciśnienia powietrza) (Rys. 4) umożliwiło wyznaczenie masowego natężenia przepływu gazu w rurze wznoszącej (prędkości cyrkulacji), które stanowiło kryterium optymalizacji urządzenia.

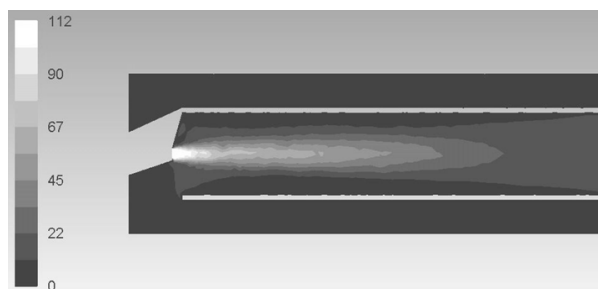
Wpływ zmiennych ruchowych na hydrodynamikę przepływu gazu w aparacie

Na wstępie sprawdzono jak zmiana prędkości głównego strumienia gazu fontannującego wpływa na masowe natężenie przepływu powietrza w rurze wznoszącej i strefie pierścieniowej (Rys. 5). Zarówno masowe natężenie przepływu w rurze centralnej jak

i w strefie pierścieniowej rosną liniowo wraz ze wzrostem prędkości (masowego natężenia przepływu) gazu fontannującego, przy czym wartość masowego natężenia przepływu w rurze wznoszącej jest około sześciokrotnie większa od tej w dyszy zasilającej. Strumienica zasilająca działa prawidłowo zasysając powietrze z części pierścieniowej, co powinno spowodować wzrost prędkości cząstek w tej strefie w czasie powlekania.

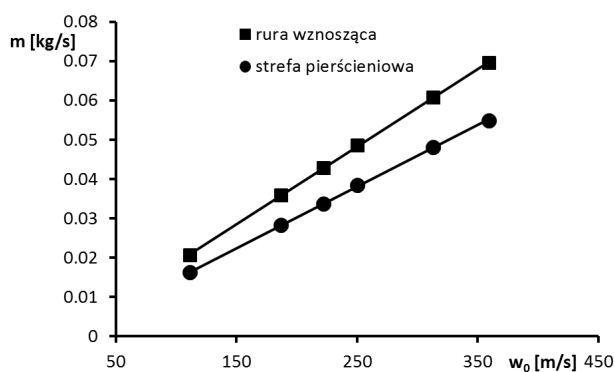


Rys. 3. Przekrój przez siatkę numeryczną w strefie dysz rozpylających

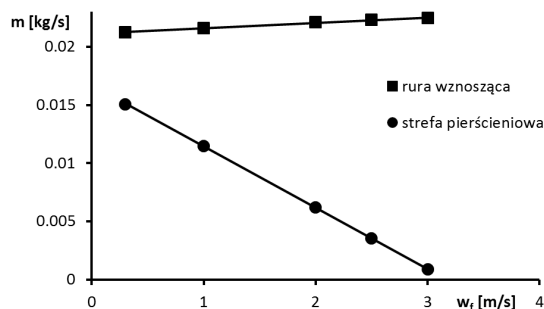


Rys. 4. Przykładowy rozkład prędkości gazu (m/s) w strefie załadunku aparatu (prędkość powietrza fontannującego $w_0 = 111$ m/s, brak strumienia fluidyzującego)

Następnie przeprowadzono symulacje wpływu prędkości gazu fluidyzującego na masowe natężenie przepływu gazu w rurze wznoszącej i strefie pierścieniowej (Rys. 6). Wraz ze wzrostem masowego natężenia przepływu powietrza fluidyzującego rośnie nieznacznie masowe natężenie przepływu powietrza w rurze wznoszącej (różnica pomiędzy wartością dla najmniejszej i największej prędkości gazu fluidyzującego wynosi 12%). Cały strumień dodatkowego powietrza jest zasysany przez strumienicę do rury wznoszącej. Natomiast masowe natężenie przepływu gazu w części pierścieniowej gwałtownie maleje, aż do wartości bliskich zeru, co może prawdopodobnie spowodować spadek prędkości cząstek w tej strefie i utrudnić ich cyrkulację w czasie powlekania.



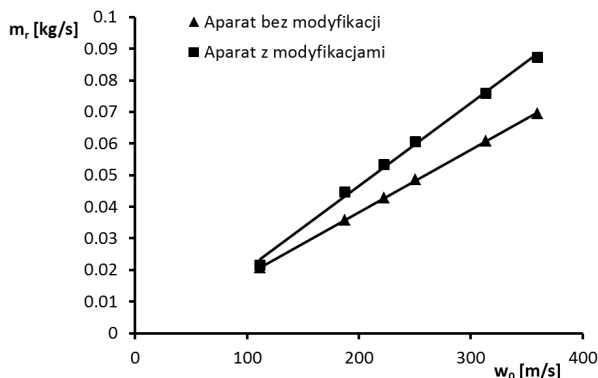
Rys. 5. Zależność masowego natężenia przepływu powietrza (m) w rurze wznoszącej i strefie pierścieniowej od prędkości powietrza w dyszy fontannującej (w_0) (brak strumienia fluidyzującego)



Rys. 6. Zależność masowego natężenia przepływu powietrza w rurze wznoszącej (m) i strefie pierścieniowej od prędkości powietrza fluidyzującego (w_f) (prędkość powietrza fontannującego $w_0=111$ m/s).

Wpływ konstrukcji aparatu na hydrodynamikę przepływu gazu

Następnym etapem badań było sprawdzenie wpływu konstrukcji aparatu na masowe natężenie przepływu powietrza w rurze wznoszącej. Skoncentrowano się na małych elementach urządzenia, które mogą znacząco wpłynąć na jego pracę tj. korpusie i podporach mocujących strumienicę (Rys. 2 C) oraz przewodach doprowadzających powietrze do dysz rozpylających plastyfikator i proszek powlekający (Rys. 2 B). Znajdują się one w kluczowych miejscach aparatu odpowiednio: strefie porywania cząstek i strefie powlekania. Związują przekrój przepływu cyrkulujących mediów. W związku z tym przeprowadzono symulacje dla aktualnej geometrii urządzenia i po usunięciu wymienionych wcześniej elementów, a następnie porównano masowe natężenia przepływu gazu w rurze wznoszącej i strefie pierścieniowej (Rys. 7 i 8). Usunięcie podpór strumienicy oraz jej korpusu (zwiększenie strefy załadunku) i przewodów doprowadzających media do dysz (zmniejszenie oporów w strefie powlekania) powoduje wzrost masowego natężenia przepływu powietrza w strefie pierścieniowej i rurze wznoszącej.

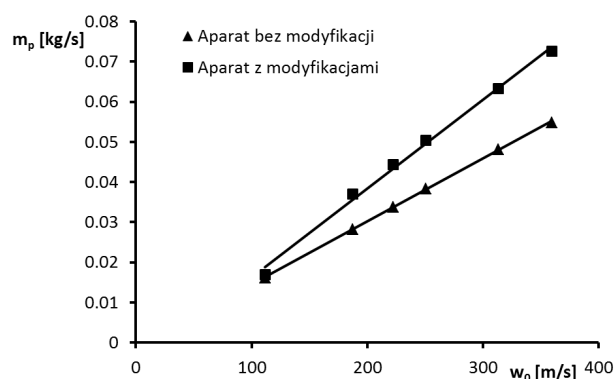


Rys. 7. Zależność masowego natężenia przepływu powietrza w rurze wznoszącej (m_r) od prędkości powietrza fontannującego (w_0) w aparacie standardowym i po modyfikacjach

Wpływ modyfikacji konstrukcyjnych na badany parametr różnie wraz z prędkością powietrza fontannującego. Różnica pomiędzy masowym natężeniem przepływu powietrza w rurze wznoszącej dla najmniejszej prędkości gazu wynosi 4 % a dla największej 25 %. W przypadku strefy pierścieniowej wartości te wynoszą: 5 % i 32 %.

Wnioski

W trakcie przeprowadzonych symulacji zbadano wpływ podstawowych zmiennych ruchowych (prędkość powietrza fontannującego i fluidyzującego) oraz konstrukcji aparatu na masowe natężenie przepływu powietrza w rurze wznoszącej oraz w strefie pierścieniowej. Ustalono, że aby uzyskać maksymalną wartość masowego natężenia powietrza w rurze wznoszącej należy prowadzić proces przy maksymalnej możliwej do uzyskania prędkości strumienia



Rys. 8. Zależność masowego natężenia przepływu powietrza w strefie pierścieniowej (m_p) od prędkości powietrza fontannującego (w_0) w aparacie standardowym i po modyfikacjach (brak strumienia fluidyzującego)

fontannującego. W przypadku obecności złoża w urządzeniu wartość ta powinna być mniejsza od prędkości wywiewania. Równocześnie prędkość strumienia fluidyzującego należy utrzymywać na minimalnym poziomie, tak aby w trakcie powlekania cząstek jednocześnie zapobiec ich zlepianiu i nie przeszkadzać w cyrkulacji.

W przyszłości należy rozważyć modyfikację dolnej części aparatu (usunięcie podpór strumienicy oraz jej korpusu i ewentualnie zmniejszenie przekroju przewodów doprowadzających media do dysz rozpylających – ze względów konstrukcyjnych całkowita ich eliminacja jest niemożliwa). Tego typu niewielkie zmiany mogą przyczynić się do podwyższenia prędkości cyrkulacji gazu a przez to prędkości cyrkulacji cząstek w czasie powlekania, a więc to do skrócenia trwania procesu. Jednoznaczne wnioski będzie można wyciągnąć po dokonaniu symulacji w układzie dwufazowym gaz-ciało stałe, które będą przedmiotem następnych badań.

LITERATURA

- Bose S., Bogner R. H., (2007). Solventless Pharmaceutical Coating Processes: A Review. *Pharmaceutical Development and Technology*, 12, 115-131. DOI: 10.1080/10837450701212479
- Hampel N., Bueck A., Peglow M., Tsotsas E., (2013). Continuous pellet coating in a Wurster fluidized bed process. *Chem. Eng. Sci.*, 86, 87-98. DOI:10.1016/j.ces.2012.05.034
- Jaworski Z., (2005). *Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej*, AOW Exit, Warszawa
- Kurowski M.P., Spliethoff H., (2016). Deposition and slagging in an entrained-flow gasifier with focus on heat transfer, reactor design and flow dynamics with SPH. *Fuel Proc. Technol.*, 152, 147-155. DOI:10.1016/j.fuproc.2016.06.029
- Ludwig W., Dziak W., (2009). CFD modelling of a laminar film flow. *Chem. Proc. Eng.*, 30, 417-430
- Shih T. H., Liou W. W., Shabbir A., Yang Z., Zhu. J., (1995). A new k-ε eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows - model development and validation. *Comp. Fluids*, 24, 227-238. DOI:10.1016/0045-7930(94)00032-T
- Szafran R.G., Ludwig W., Kmieć A., (2012). New spout-fluid bed apparatus for electrostatic coating of fine particles and encapsulation. *Pow. Technol.*, 225, 52-57. DOI:10.1016/j.powtec.2012.03.031
- Teunou E., Poncelet D., (2002). Batch and continuous bed coating- Review and state of the art. *J. Food Eng.*, 53, 325-340. DOI:10.1016/S0260-8774(01)00173-X
- Wu M., Guo Q., Xie H., Liu L., (2015). A new empirical equation for minimum spouting/spout-fluidization velocity in draft tube spout-fluid beds at elevated temperature. *Can. J. Chem. Eng.*, 93, 1819-1829. DOI: 10.1002/cjce.22264
- Wurster D. E., Lindlof J. A., 1966. *Particle Coating Apparatus*. Patent US 3241529

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki UMO-2013/09/B/ST8/00157.