

Joanna KARCZ, Marcelina BITENC, Marek DOMAŃSKI, Łukasz KACPERSKI

e-mail: joanna.karcz@zut.edu.pl

Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

Analiza numeryczna zawartości gazu w cieczy i rozkładu rozmiarów pęcherzyków gazu w kolumnie *air-lift*

Wstęp

Kolumny *air-lift*, ze względu na szereg zalet, znalazły zastosowanie m.in. w przemyśle chemicznym i fermentacyjnym [Kawalec-Pietrenko, 1992]. W napowietrzanych układach biotechnologicznych, szybkość wnikania tlenu stanowi czynnik limitujący wydajność bioprocessów, dlatego w praktyce projektowej tak ważna jest znajomość kluczowych parametrów przenoszenia masy, tj. udziału gazu zatrzymanego w cieczy i rozkładu wielkości pęcherzy gazowych [Dhanasekharan i in., 2005]. W układach ciecz – gaz, w populacji pęcherzy gazowych zachodzą zjawiska koalescencji i rozpadu, co wpływa na ewolucję rozmiarów elementów fazy rozproszonej w czasie i przestrzeni. Coraz częściej do opisu tych zjawisk wykorzystuje się równania bilansu populacji, rozwiązywane za pomocą zaawansowanych narzędzi numerycznych. Aktualnie, dostępne metody CFD umożliwiają kompleksową analizę przepływów wielofazowych, także z uwzględnieniem zjawisk w obrębie populacji cząstek rozproszonych [Silva i in., 2010].

Badania numeryczne

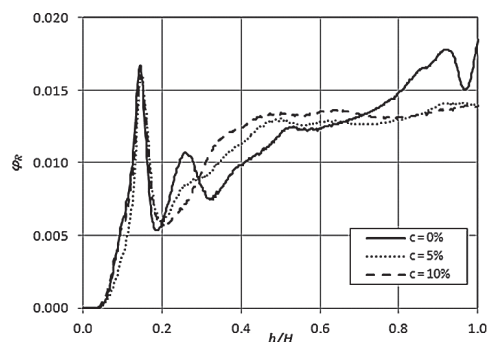
W tej pracy przedstawiono wyniki badań numerycznych, które umożliwiły określenie lokalnych rozkładów udziału gazu zatrzymanego w cieczy oraz analizę wielkości pęcherzy gazowych w kolumnie *air-lift* z zewnętrzną cyrkulacją płynu.

Średnica strefy wznoszenia wynosiła $D_R = 0,1056$ m, a jej wysokość $H_R = 1,932$ m. Wymiary strefy opadania były równe odpowiednio $D_D = 0,0464$ m i $H_D = 1,69$ m [Karcz i in., 2010]. Cieczami modelowymi w badanych układach była woda destylowana oraz wodne roztwory sacharozy spożywczej o stężeniu $c = 5$ i 10% mas. Powietrze doprowadzane było do układu przez dno sitowe z dwunastoma symetrycznie rozmieszczonymi otworami o średnicy $d_{otw} = 0,002$ m, ze stałym objętościowym natężeniem przepływu wynoszącym $V_g = 3,64 \cdot 10^{-5}$ m³/s.

Symulacje numeryczne przepływu niestabilnego w czasie przeprowadzono w środowisku *ANSYS Workbench*, korzystając z solvera *CFX 13*. Niestrukuralna siatka obliczeniowa składała się z ok. 880 tys. elementów czworokątnych. W badaniach uwzględniono siłę oporu międzyfazowego oraz dyspersji burzliwej. Burzliwość w fazie ciągłej modelowano za pomocą modelu *SST (Shear Stress Transport)*. Implementacja modelu *MUSIG (and. Multiple Size Group Model)* umożliwiła powiązanie symulacji przepływu z metodą bilansu populacji w celu analizy rozkładu wielkości pęcherzy gazowych [ANSYS Inc., 2010]. Założono obecność 10 równych klas wielkości elementów fazy rozproszonej zawartych w przedziale $d_b \in <0, 0,015>$ m. W obliczeniach uwzględniono zjawisko koalescencji pęcherzy gazowych opisane modelem *Prince Blancha* oraz ich rozpad, implementując model *Luo Svedensena*. Obliczenia prowadzono ze stałym krokiem czasowym $\Delta t = 0,01$ s zapewniającym zbieżność obliczeń na założonym znormalizowanym poziomie 10^{-4} , do osiągnięcia rzeczywistego czasu przepływu $t = 35$ s.

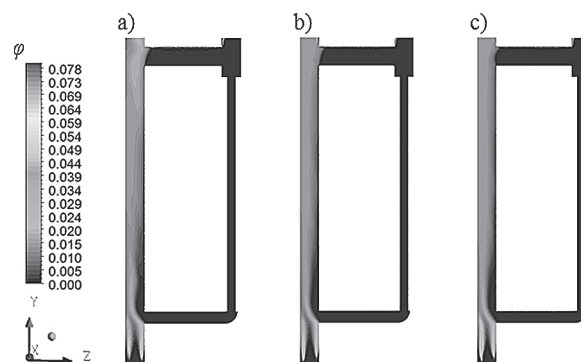
Wyniki badań

Symulacje numeryczne posłużyły do analizy udziału gazu zatrzymanego w cieczy oraz rozkładów wielkości pęcherzy gazowych w układzie. Analiza osiowych rozkładów udziału gazu zatrzymanego w cieczy w strefie wznoszenia ϕ_R na rys. 1 wykazała, że poza obszarem dystrybutora gazu, gdzie nie zaobserwowano istotnego wpływu stężenia cukru na udział gazu zatrzymanego w cieczy oraz strefy separacji, wzrost stężenia cukru powoduje nieznaczny wzrost ilości gazu zatrzymanego w układzie. W górnej części strefy wznoszenia udział gazu w układzie bez cukru był wyższy od pozostałych przypadków.



Rys. 1. Rozkłady udziału gazu zatrzymanego w cieczy ϕ_R w osi pionowej strefy wznoszenia, a) $c = 0\%$, b) $c = 5\%$, c) $c = 10\%$

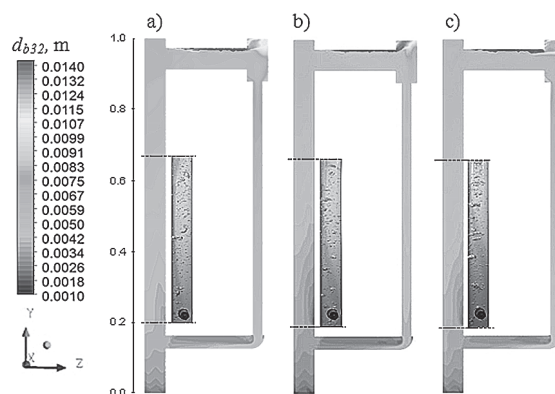
Kontury udziału gazu zatrzymanego w cieczy w przekroju osiowym całej kolumny zaprezentowano na rys. 2.



Rys. 2. Kontury udziału gazu zatrzymanego w cieczy ϕ w przekroju osiowym kolumny, a) $c = 0\%$, b) $c = 5\%$, c) $c = 10\%$

Recyrkulujący strumień płynu wpływający z dolnej rury poziomej do strefy wznoszenia powoduje niejednorodny rozkład gazu w przekroju osiowym kolumny, intensyfikując jednocześnie burzliwość w tej strefie. Jak zakłada model *Luo Svedensena*, zderzenia pęcherzy z wirami o odpowiedniej energii skutkują zjawiskiem rozpadu elementów fazy rozproszonej na mniejsze [Silva i in., 2010].

Na rys. 3 przedstawiono kontury rozkładu przeciętnej średnicy *Sautera* pęcherzy gazowych d_{b32} .

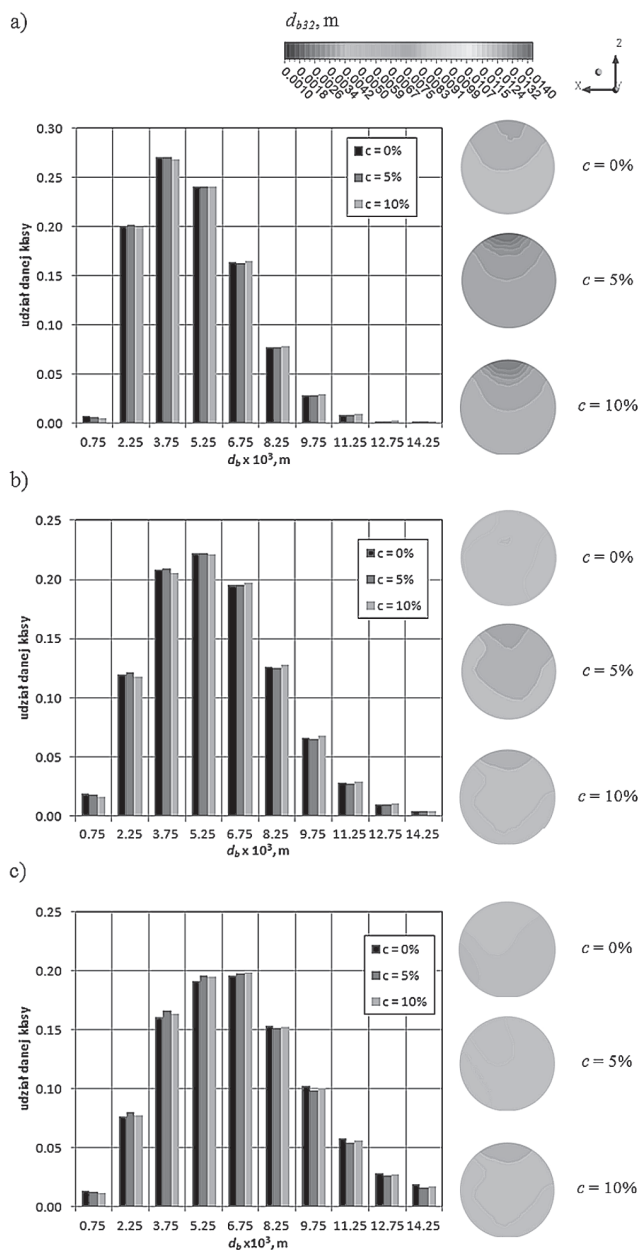


Rys. 3. Kontury rozkładów przeciętnej średnicy pęcherzy gazowych d_{b32} w przekroju osiowym kolumny, a) $c = 0\%$, b) $c = 5\%$, c) $c = 10\%$

Wyniki uzupełniono zdjęciami cyfrowymi przepływu ciecz – gaz w części strefy wznoszenia. Należy zaznaczyć, iż wartości średnic uży-

skane z obliczeń dla strefy opadania oraz dolnej rury poziomej kolumny, mają charakter jedynie poglądowy, gdyż, jak widać na rys. 2, w tych częściach aparatu zawartość gazu jest znikoma.

W celu ilościowej oceny wpływu stężenia sacharozy na średnicę pęcherzy gazowych, na rys. 4 przedstawiono histogramy wartości udziałów klas wielkości pęcherzy odczytanych w osi strefy wznoszenia, oraz kontury średnic d_{b32} w wybranych przekrojach tej strefy.

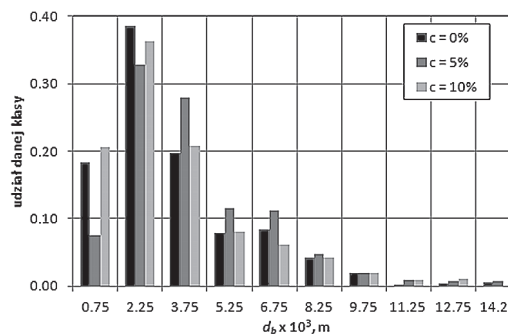


Rys. 4. Histogramy udziałów klas wielkości pęcherzy gazowych (strona lewa) oraz kontury rozkładów przeciętnej średnicy Sautera d_{b32} , (strona prawa); gdzie: a) $h/H = 0,2$, b) $h/H = 0,4$, c) $h/H = 0,6$

Wraz ze wzrostem bezwymiarowej współrzędnej osiowej strefy wznoszenia h/H , we wszystkich przypadkach rośnie średnica pęcherzy gazowych, zatem układy wykazują zdolność do koalescencji. Zjawisko to zachodzi w trzech głównych etapach. W pierwszym kroku, podczas kontaktu dwóch pęcherzy, zostaje uwięziona pomiędzy nimi pewna ilość cieczy. Następnie grubość filmu maleje, aż do osiągnięcia wartości krytycznej. Finalnie, warstewka cieczy pęka, a dwa pęcherze łączą się w jeden większy. Model *Prince Blanca* opisuje koalescencję w oparciu o szybkość zderzeń pęcherzy i ich efektywność w odniesieniu do czasu wymaganego do połączenia się dwóch cząstek [ANSYS Inc., 2010]. W obszarze najsilniejszego wpływu recyrkulującego strumienia płynu ($h/H = 0,2$), średnice pęcherzy obliczone dla układu bez cukru są wyższe w porównaniu z pozostałymi. Największy udział małych

pęcherzy zaobserwowano natomiast w przypadku roztworu o stężeniu $c = 5\%$. Jednocześnie, we wszystkich przypadkach można zauważyć tendencję do kumulowania się większych pęcherzy przy zewnętrznej ścianie strefy wznoszenia, gdzie jednocześnie obserwowane są wyższe wartości udziału gazu zatrzymanego w cieczy (Rys. 2). W wyższych partiach aparatu stopniowo maleje niejednorodność rozkładów średnic w przekrojach poprzecznych strefy wznoszenia. Na wysokości $h/H = 0,6$, jedynie w układzie o stężeniu $c = 10\%$ kontur d_{b32} jest wyraźnie niejednorodny.

Aby ocenić jakość obliczeń, podjęto próbę porównania wyników symulacji z doświadczalną analizą zdjęć dyspersji ciecz – gaz przedstawionych na rys. 3. Do pomiarów pęcherzy na zdjęciach zastosowano oprogramowanie *OptaView* przeznaczone do komputerowej analizy zdjęć mikroskopowych. Aby zminimalizować błąd paralaksy, zastosowano kalibrację obrazu na podstawie fotografii obiektu odniesienia. Na podstawie pomiarów ok. 500 obiektów dla każdego układu uzyskano histogram przedstawiony na rys. 5.



Rys. 5. Histogramy udziałów klas wielkości pęcherzy gazowych uzyskane na podstawie analizy zdjęć cyfrowych

Korzystając ze wzoru na objętościowo-powierzchniową średnicę *Sautera*, z pomiarów obiektów na zdjęciach uzyskano wartość średnicy $d_{b32} = 0,007 m$. Porównano także globalne wartości udziału gazu zatrzymanego w cieczy uzyskane na podstawie symulacji z danymi doświadczalnymi. Średni błąd względny wyniósł odpowiednio 13% dla układu bez cukru, 14% dla roztworu $c = 5\%$ mas. oraz 15% dla $c = 10\%$ mas. Biorąc pod uwagę 5% niepewność pomiarową doświadczenia zgodność wyników jest zadowalająca.

Wnioski

Metody CFD stanowią efektywne narzędzie umożliwiające szczegółową analizę zjawisk zachodzących w układach procesowych.

Powiązanie metody bilansu populacji z symulacjami przepływu ciecz – gaz w kolumnie *air-lift* umożliwiło wyznaczenie kluczowych parametrów wymiany masy, tj. udziału gazu zatrzymanego w cieczy oraz średnic pęcherzy gazowych w układzie.

Badania wykazały, iż w wodnych roztworach cukru zachodzi zjawisko koalescencji pęcherzy gazowych.

W zakresie przeprowadzonych badań, wykazano nieznaczny wpływ stężenia sacharozy na udział gazu zatrzymanego w cieczy oraz rozkłady średnic pęcherzy gazowych w układzie.

Zgodność z wynikami doświadczalnymi wskazuje na poprawny dobór modeli szczegółowych w symulacjach numerycznych.

LITERATURA

ANSYS® Inc., 2010 – Academic Research, Release 13.0. *Help System, CFX – Solver Theory Guide*. ANSYS
 Dhanasekharan M. K., Sanyal J., Jain A., Haidari A., 2005. A generalized approach to model oxygen transfer in bioreactors using population balances and computational fluid dynamics. *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 213–218. DOI: 10.1016/J.CES.2004.07.118
 Karz J., Bitenc M., Kacperski Ł., 2010. Badania hydrodynamiki w kolumnie *air-lift* z zewnętrzną cyrkulacją cieczy. *Inż. Ap. Chem.*, **49**, nr 1, 57-58
 Kawalec-Pietrenko B., 1992. Charakterystyka hydrodynamiczna i wymiana masy w trójfazowym reaktorze *air-lift* z cyrkulacją wewnętrzną. Rozprawa habilitacyjna. *Zesz. Nauk. Pol. Gdańskiej*, nr 494
 Silva K. M., d'Avila A. M., Mori M., 2010. CFD modelling of a bubble column with an external loop in the heterogeneous regime. *Can. J. Chem. Eng.*, **89**, nr 4, 671–681. DOI: 10.1002/CJCE.20417