

Piotr SARRÉ¹, Andrzej GIERCZYCKI²

e-mail: psarre@poczta.onet.pl

¹ RATech Sp. z o.o., Warszawa² Katedra Inżynierii Chemicznej i Projektowania Procesowego, Wydział Chemiczny Politechniki. Śląska, Gliwice

Wstępne badania hydrauliki współprądowego, półkowego absorbera z pianą dynamiczną

Wstęp

W trakcie badań realizowanych przez pierwszego z autorów pracy pojawiła się potrzeba zaprojektowania prostego, o niewielkich wymiarach, ale wydajnego układu absorber – desorber gazu. Powstała koncepcja wykorzystania rozwiązań patentu [Bistroń i in., 1976], którego autor był współtwórcą. Rozpoczęte badania takiego absorbera do absorpcji tlenków azotu i SO₃ zostały przerwane w 1982 roku.

Z obszernej literatury opisującej badania absorberów z wypełnieniem i absorberów półkowych wiadomo, że mają one graniczne obciążenia gazem i cieczą, po przekroczeniu których występuje wysoce niekorzystne zachłystywanie, uniemożliwiające normalną pracę [Hobler T., 1976; Paras et al., 2001]. Z tego powodu, gdy potrzebne są zarówno duże obciążenia cieczą jak i gazem, wykorzystanie tych aparatów nie jest możliwe. Trudności te można pokonać stosując kolumnę półkową pracującą w reżimie barbotażowym [Warych, 2004, Kawalec-Pietrenko i wsp., 2012].

Istotą wspomnianego wcześniej patentu była konstrukcja, w której zastosowano zbliżone do siebie półki sitowe bez przelewów. Pierwsza półka dystrybuująca gaz ma parametry eliminujące przecieki przy minimalnym planowanym obciążeniu gazem, kolejne są zbliżone do siebie i utrzymują parametry jedynie ograniczające opadanie cieczy. W przeprowadzonych badaniach własnych uzyskano wyniki wskazujące na przydatność takiego rozwiązania do realizacji procesu absorpcji. Absorber taki pracował bardzo stabilnie, gdyż wszelkie zaburzenia podlegały niezwykle szybkiej samoregulacji. Nawet skokowe zwiększenie o 100% obciążenia cieczą nie zaburzało pracy kolumny współprądowej na dłużej niż 2÷3 sekundy, co w układzie przeciwprądowym byłoby niemożliwe. Porównanie absorpcji ekwimolarniej mieszaniny NO + NO₂ w kolumnie przeciwprądowej i współprądowej, przy identycznym obciążeniu gazem i cieczą, wykazało większą wydajność w kolumnie współprądowej, przy redukcji objętości aparatu o ponad 40%. Zaobserwowano także, że przy absorpcji SO₃ w stężonym kwasie siarkowym, w układzie współprądowym nie powstaje aerozol, co mogłoby mieć duże znaczenie w instalacjach kwasu siarkowego pracujących z dwoma stopniami katalizatora.

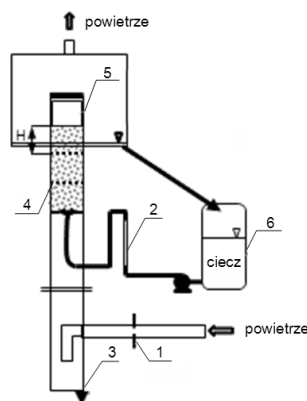
Do zaprojektowania układu współprądowy absorber – desorber pracującego bez udziału pomp cieczy, konieczne jest przede wszystkim dokładne zbadanie hydrauliki kolumny i ustalenie wielkości powierzchni międzyfazowej będącą funkcją wielu zmiennych. Uznanie, że najważniejszą drogą będzie wykonanie odpowiednich badań we współpracy i pod opieką Katedry Inżynierii Chemicznej i Projektowania Procesowego Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

W niniejszej pracy przedstawiono wstępne wyniki badania hydrauliki przepływu faz we współprądowej kolumnie pianowej z pianą dynamiczną i podano sposób obliczania powierzchni międzyfazowej.

Stanowisko badawcze

Na rys.1 pokazano stanowisko badawcze wyposażone w kolumnę o średnicy wewnętrznej 0,191 m, pozwalającą na zmianę liczby półek i odległości między nimi. Pompa podająca ciecz (wodny roztwór jodku potasu) zapewniała regulowane obciążenie półki od 50 do 225 m³/(m²·h). Pomiary prowadzono w kolumnie z jedną, dwiema lub trzema półkami (przy czym w większości badań stosowano dwie półki). Półka wyższa była położona na wysokości dolnej krawędzi okna przelewowego. Dolna półka, zapewniająca dystrybucję gazu bez zwrotnych przecieków, miała otwory o średnicy 2 mm, a ich sumaryczna powierzchnia swobodna stanowiła 7,7% powierzchni przekroju kolumny. Wyżej położone półki miały otwory

3 mm i powierzchnię swobodną 17,3%. Układ otworów na półkach był heksagonalny. Powietrze podawano odkurzaczem przemysłowym w regulowanej ilości, zapewniającej prędkość gazu na pustym przekroju kolumny w granicach od 1 do 3 m/s. Mierzono różnicę ciśnień między punktami pod pierwszą półką i w głowicy kolumny.



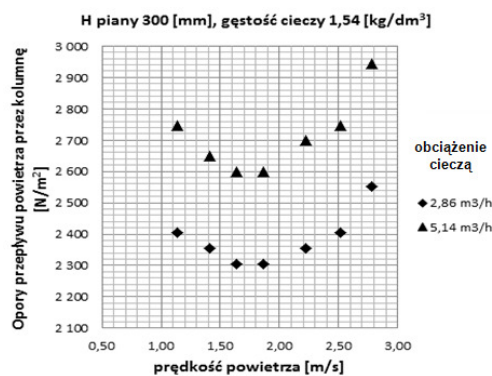
Rys.1. Stanowisko pomiarowe: 1 - kryza pomiarowa, 2 - rotametr, 3 - spust cieczy zatrzymanej, 4 - półki, 5 - okno przelewowe, 6 - zbiornik buforowy

Wyniki pomiarów i obliczenia wstępne

Po nastawieniu wstępnego przepływu gazu odpowiadającego prędkości w pustym przekroju założonej dla danego pomiaru, podawano zaplanowaną ilość cieczy. Następnie korygowano strumień gazu i wydatek cieczy. Po odczytaniu ustabilizowanych wskazań ciśnieniomierzy odcinano równocześnie dopływ obu faz i mierzono objętość cieczy zebraną na dole kolumny. Wyznaczano:

- $A_c = f(w_p)$ rozwiniętą powierzchnię międzyfazową w warstwie piany dynamicznej, [m²]
- $\Delta P = f(w_p)$ dla różnych odstępów półek, różnych obciążeń cieczą i różnych parametrów cieczy, [N/m²]
- $\tau_{r(p,c)} = f(w_p)$ rzeczywisty czas przebywania gazu i cieczy w obszarze piany dynamicznej, [s]

Zależność spadku ciśnienia gazu od prędkości jego przepływu w układzie dwufazowym również była przedmiotem wielu badań [Subrata i in., 2006; Dyga, 2009] i nie wymaga specjalnych komentarzy, z wyjątkiem nie przewidywanego wystąpienia minimum w przedziale prędkości gazu ok. 1,5÷1,8 m/s (Rys. 2). Wyjaśnienie i opisanie tego zjawiska będzie przedmiotem dalszych prac.



Rys.2. Zależność spadku ciśnienia gazu w kolumnie dla dwóch różnych wartości obciążenia kolumny cieczą.

Średni czas przebywania cieczy i gazu w obszarze piany dynamicznej (Rys. 3) wyznaczano na podstawie mierzonej ilości cieczy zatrzymanej:

$$\tau_{rc} = V_{cz}/V_c^* \quad (1)$$

$$\tau_{rp} = ((n-1)HF_k - V_{cz})/V_p^* \quad (2)$$

gdzie:

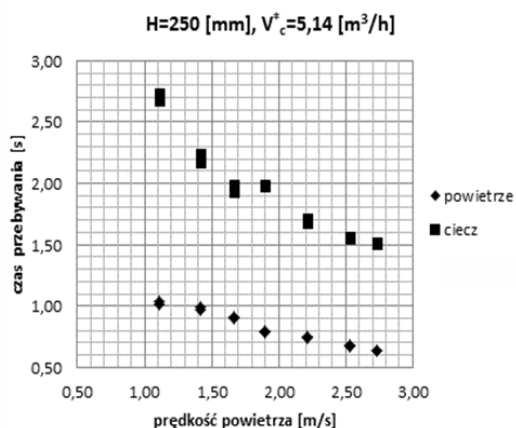
F_k – powierzchnia przekroju kolumny, [m²]

H – odstęp pomiędzy półkami, [m]

n – liczba półek

V_{cz}^* – objętość cieczy zatrzymanej, [m³],

V_c^* – objętościowe natężenie przepływu cieczy, [m³/s]



Rys.3. Średni czas przebywania cieczy i gazu w obszarze piany dynamicznej.

Po wyznaczeniu średnich czasów przebywania powietrza i cieczy w obszarze piany dynamicznej obliczono przybliżoną wielkość rozwinięcia powierzchni międzyfazowej za pomocą następujących zależności:

$$E_p = \Delta P V_p^* \tau_p \quad (3)$$

$$E_c = V_c^* \rho g H \tau_c \quad (4)$$

$$A_c = (E_p - E_c)/\sigma \quad (5)$$

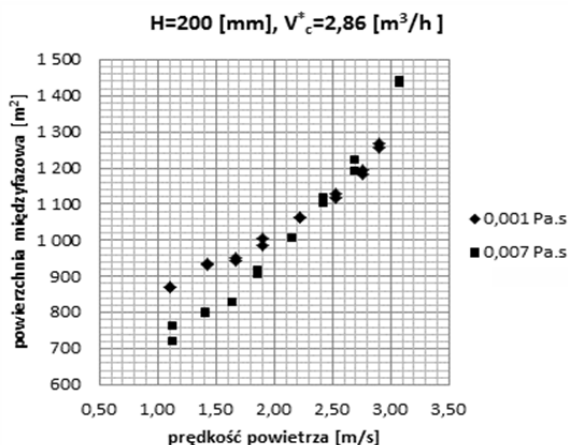
gdzie:

g – przyspieszenie ziemskie, [m/s²]

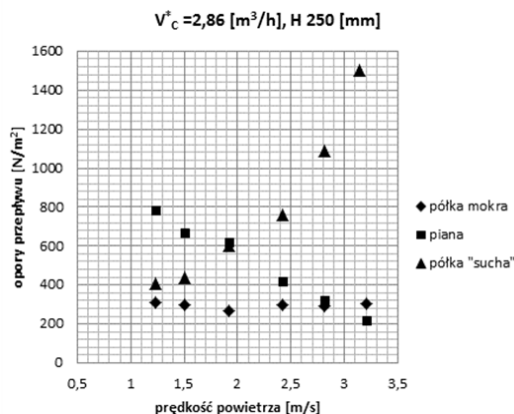
σ – napięcie powierzchniowe cieczy [J/m²]

ρ – gęstość cieczy [kg/m³]

Obliczenia nie uwzględniają strat energii spowodowanych tarcieniem lepkościowym w cieczy i strat na suchych przegrodach, przy czym te ostatnie są pomijalnie małe w stosunku do pozostałych. Różnice rozwinięcia powierzchni wynikające z lepkości cieczy pokazano na rys.4, przy czym wszystkie pozostałe parametry cieczy oraz obciążenie kolumny i jej geometria były identyczne.



Rys.4. Obliczona powierzchnia międzyfazowa.



Rys.5. Opory przepływu na półce suchej, mokrej oraz w warstwie piany.

Ponieważ w kolumnie współprądowej pomiędzy półkami występował w całej objętości przepływ dwufazowy, dokonano próby bezpośredniego pomiaru strat ciśnienia w mieszaninie dwufazowej.

Półka mokra usytuowana była na wysokości dolnej krawędzi okna przelewowego, a więc nad jej otworami nie było już żadnej warstwy cieczy ani piany. Do pomiaru w warstwie piany użyto otwartych jednostronnie do atmosfery U-rurek. Ramię U-rurki podłączone do kolumny miało odcinek skośny uniemożliwiający dopływ pęcherza powietrza. Zastosowano rurki o średnicy 10 mm, aby większa inercja masy wody tłumiała fluktuacje słupka cieczy wynikające z burzliwości w pianie.

Uzyskane wyniki są dość zaskakujące (Rys. 5). W porównaniu z poprzednimi mogą wskazywać, że zasadnicza praca rozwinięcia powierzchni międzyfazowej dokonuje się na bardzo małym odcinku nad półką dystrybuującą powietrze.

Wnioski

Wstępne badania przepływu faz we współprądowej kolumnie pianowej prowadzą do wniosku, że zbudowanie absorbera i desorbera z dwóch takich aparatów, w których ciecz i gaz płyną ku górze, a następnie ciecz spływa grawitacyjnie krzyżowo do sąsiedniej kolumny, może mieć znaczenie przemysłowe.

Obliczona duża powierzchnia międzyfazowa i możliwość znacznego obciążenia półek cieczą, przy niewielkich oporach przepływu oraz stosunkowo niedużych rozmiarach aparatu są wystarczającymi argumentami do kontynuowania i rozszerzenia badań. Wyniki tych badań pozwolą ustalić dane liczbowe niezbędne do projektowania rzeczywistych aparatów procesowych.

LITERATURA

- Bistroń S., Szymonik B., Bryła T., Masoń B., Sarré P., 1976. *Sposób prowadzenia pianowych procesów wymiany masy*. Patent PL 94179 B1
- Dyga R., 2009. Opór hydrauliczny przy przepływie gaz-ciecz, kanałem z wypełnieniem siatkowym. *Inż. Ap. Chem.*, 48, nr 6, 49-50
- Hobler T., 1976. *Dyfuzyjny ruch masy i absorbery*. WNT, Warszawa
- Kawalec-Pietrenko B., Kucharska K., Hołowacz I., 2012. Wpływ parametrów procesowych na wielkość powierzchni międzyfazowej generowanej w kolumnie do współprądowej flotacji białek serwatkowych. *Inż. Ap. Chem.*, 51, 6, 342-343
- Kantarcia N., Borak F., Ulgena K.O., 2005. Bubble column reactors. *Proc. Biochem.*, 40, 2263–2283. DOI:10.1016/j.procbio.2004.10.004
- Majumder S.K., Kundu G., Mukherjee D., 2006. Prediction of pressure drop in a modified gas-liquid downflow bubble column. *Chem. Eng. Sci.*, 61, 4060-4070. DOI: 10.1016/j.ces.2006.01.049
- Drosos E.I.P., Paras S.V., Karabelas A.J., 2006. Counter-current gas-liquid flow in a vertical narrow channel - Liquid film characteristics and flooding phenomena. *Int. J. Multiphase Flow*, DOI: 10.1016/j.ijmulti phaseflow.2005.07.005
- Warych J., 2004. *Aparatura chemiczna i procesowa*. Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa