

PAWEŁ SOBIESZUK  
RYSZARD POHORECKI

Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

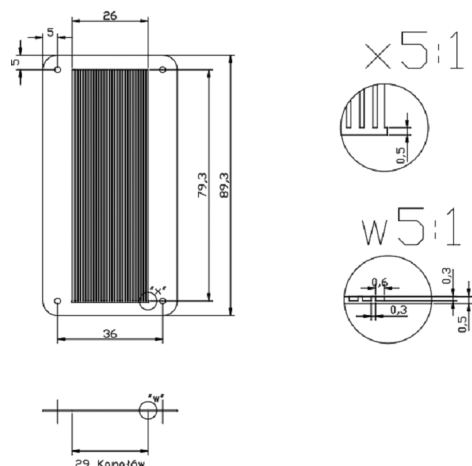
# Badanie wymiany masy w mikroreaktorze wielokanałowym ze spływającą warstwą cieczy

## Wprowadzenie

W badaniach wymiany masy w mikroreaktorach gaz–ciecz, prowadzonych w pojedynczych kanałach [1, 2], otrzymano bardzo korzystne parametry wymiany masy dla aparatów o rozmiarze charakterystycznym kanału poniżej 1 mm. Zastosowanie mikrostruktur na większą skalę opiera się koncepcji *numbering – up*, czyli zwiększaniu liczby kanałów. Aparatem tego typu jest mikroreaktor z mikrokanalami otwartymi, w których spływa ciecz, a nad nimi równolegle płynie gaz ( $\mu$ FFR – *micro Falling Film Reactor*). Problemy hydrodynamiki i dystrybucji mediów w takim aparacie badane były przez *Commence* i współpr. [3]. *Zanfir* i współpr. [4] badali stopień absorpcji dwutlenku węgla w roztworach NaOH w  $\mu$ FFR. W naszej pracy skupiliśmy się na badaniu szybkości absorpcji z reakcją chemiczną. Celem pracy było wyznaczenie współczynników wnikania masy z reakcją chemiczną po stronie cieczy. Wybrano układ CO<sub>2</sub> – wodne roztwory monoetanolaminy (MEA). Układ ten był już wykorzystywany do badania absorpcji z reakcją chemiczną [5]

## Cześć doświadczalna

Schemat zastosowanego aparatu, produkowanego przez *Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH* (Niemcy), przedstawiono na rys. 1. Aparat zawiera  $n = 29$  kanałów o szerokości  $d = 0,6 \cdot 10^{-3}$  m, głębokości  $s = 0,3 \cdot 10^{-3}$  m i długości  $L = 78,3 \cdot 10^{-3}$  m. Cieczą podawaną od góry aparatu były wodne roztwory MEA o stężeniu: 0,2M÷2,5M. Przepływ objętościowy cieczy wynosił (dla trzech serii pomiarowych)  $Q_L = 2,6 \cdot 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/s;  $3,8 \cdot 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/s;  $6,8 \cdot 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/s. Gaz, będący mieszaniną dwutlenku węgla i azotu, podawano również od góry. Strumień objętościowy gazu był stały i wynosił na wlocie  $Q_{G1} = 3,36 \cdot 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s. Zmieniano zawartość CO<sub>2</sub> w gazie i wynosiła ona odpowiednio: 23%,



Rys. 1. Schemat mikroreaktora ze spływającą warstwą cieczy

35%, 45% i 61% (obj.). Szybkość absorpcji określono przez pomiar ubytku dwutlenku węgla w gazie. Analizatorem był przepływowy detektor CO<sub>2</sub> firmy *SYL&ANT*, wykorzystujący promieniowanie podczerwone.

## Metody analizy uzyskanych wyników

Wyniki pomiarów stężenia objętościowego CO<sub>2</sub> w gazie wlotowym i wylotowym z aparatu pozwoliły obliczyć odpowiednie ciśnienia cząstkowe:  $p_1$  i  $p_2$ . Ciśnienie gazu było równe atmosferycznemu. Na tej podstawie obliczano molowe stężenie CO<sub>2</sub> w gazie na wlocie i wylocie z aparatu:

$$c_1 = \frac{p_1}{RT} \quad (1)$$

$$c_2 = \frac{p_2}{RT} \quad (2)$$

Szybkość absorpcji z reakcją chemiczną w całym reaktorze obliczono z zależności:

$$N^* = Q_{G1} c_1 - Q_{G2} c_2 \quad (3)$$

W badanym układzie fizykochemicznym można pominąć opory wnikania masy po stronie gazu, zatem wykorzystując prawo *Henry'ego* obliczono stężenia molowe CO<sub>2</sub> w cieczy na powierzchni międzyfazowej:

$$c_{i1} = p_1 H \quad (4)$$

$$c_{i2} = p_2 H \quad (5)$$

gdzie  $H$  jest stałą *Henry'ego* i  $H = 0,3688 \cdot 10^{-3}$  mol/m<sup>3</sup>·Pa. Średnią wartość stężenia molowego CO<sub>2</sub> w cieczy na powierzchni międzyfazowej obliczono jako średnią logarytmiczną:

$$c_{iav} = \frac{c_{i1} - c_{i2}}{\ln \frac{c_{i1}}{c_{i2}}} \quad (6)$$

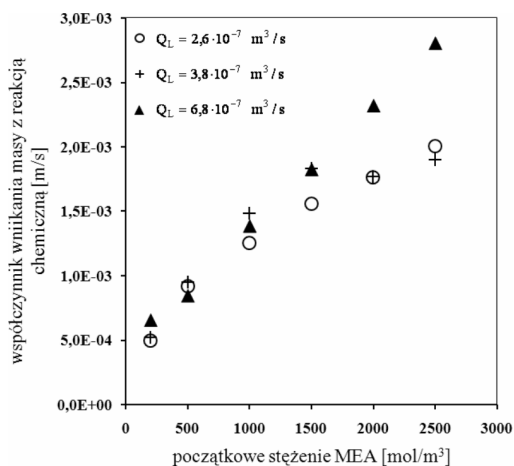
W absorpcji z reakcją chemiczną współczynnik wnikania masy po stronie cieczy z reakcją chemiczną jest definiowany równaniem:

$$N^* = k_L^* c_{iav} F \quad (7)$$

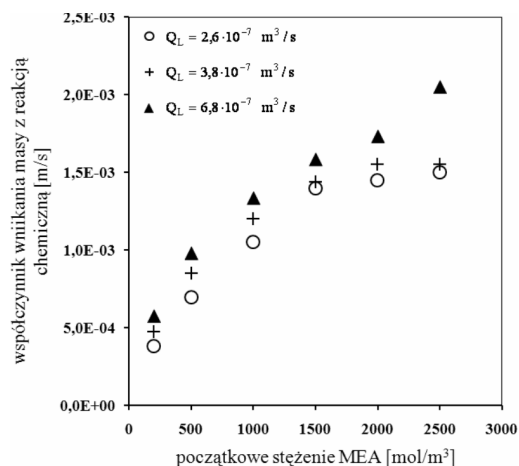
$F$  jest powierzchnią międzyfazową i w reaktorze  $\mu$ FFR wynika z konstrukcji aparatu:

$$F = Ldn \quad (8)$$

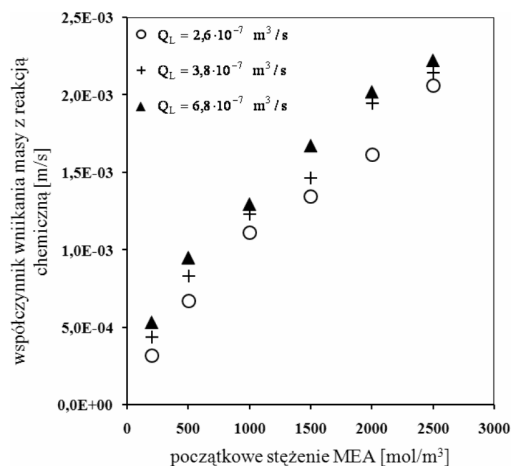
Z uzyskanych pomiarów szybkość absorpcji obliczano z równania (3), następnie równanie (7) pozwoliło obliczyć współczynnik  $k_L^*$ .



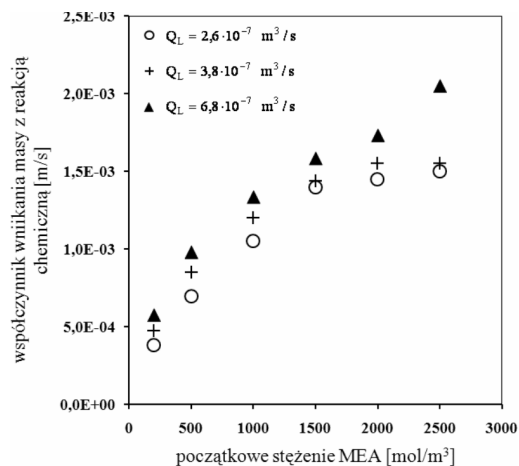
Rys. 2. Wartości  $k_L^*$ , wlotowe stężenie CO<sub>2</sub> w gazie 23% (obj.)



Rys. 4. Wartości  $k_L^*$ , wlotowe stężenie CO<sub>2</sub> w gazie 45% (obj.)



Rys. 3. Wartości  $k_L^*$ , wlotowe stężenie CO<sub>2</sub> w gazie 35% (obj.)



Rys. 5. Wartości  $k_L^*$ , wlotowe stężenie CO<sub>2</sub> w gazie 61% (obj.)

### Wyniki i wnioski

Rys. 2–5 przedstawiają wartości współczynników wnikania masy z reakcją chemiczną dla różnych przepływów cieczy i różnych stężeń początkowych MEA. Uzyskano wartości w przedziale  $2,9 \cdot 10^{-4}$ – $28 \cdot 10^{-4}$  m/s. Wartości współczynników rosły ze wzrostem stężenia aminy oraz ze wzrostem natężenia przepływu cieczy. Stwierdzono jednocześnie wpływ stężenia dwutlenku węgla w gazie wlotowym. Wartości współczynnika maleją  $k_L^*$  maleją ze wzrostem zawartości dwutlenku węgla. Prezentowane wyniki prac są wstępne i wyjaśnienie tego zjawiska wymaga dalszych badań.

### Oznaczenia

- $c$  – stężenie, [mol/m<sup>3</sup>],
- $d$  – szerokość mikrokanalu, [m],
- $F$  – powierzchnia wymiany masy, [m<sup>2</sup>],
- $H$  – stała Henry'ego, [mol/m<sup>3</sup>·Pa],
- $k_L^*$  – współczynnik wnikania masy z reakcją chemiczną po stronie cieczy, [m/s],
- $N^*$  – szybkość absorpcji z reakcją chemiczną, [mol/s],
- $p$  – ciśnienie cząstkowe, [Pa],
- $Q$  – przepływ objętościowy, [m<sup>3</sup>/s],

- $R$  – stała gazowa, [J/mol·K],
- $s$  – głębokość mikrokanalu, [m],
- $T$  – temperatura, [K].

### Indeksy dolne

- 1 – wlot,
- 2 – wylot,
- $av$  – średnia logarytmiczna,
- $G$  – gaz,
- $i$  – powierzchnia międzyfazowa,
- $L$  – ciecz.

### LITERATURA

1. P. Sobieszuk, P. Cygański, R. Pohorecki: *Chem. Proc. Eng.* **29**, 651 (2008).
2. J. Yue, G. Chen, Q. Yuan, L. Luo, Y. Gonthier: *Chem. Eng. Sci.* **62**, 2096 (2007).
3. J.M. Commenge, T. Obein, G. Genin, X. Framboisier, S. Rode, V. Schanen, P. Pitiot, M. Matlosz: *Chem. Eng. Sci.* **61**, 597 (2006).
4. M. Zanfir, A. Gavriliadis, Ch. Wille, V. Hessel: *Ind. Eng. Chem. Res.* **44**, 1742 (2005).
5. J. Buzek: *Konwekcja komórkowa podczas absorpcji z reakcją chemiczną*, Gliwice, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej (1979).