

Tadeusz KOMOROWICZ, Krzysztof KUPIEC, Aneta GLUSZEK, Monika RODAK

e-mail: agluszek@pk.edu.pl

Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

## Analiza porównawcza hydrauliki kolumn wypełnionych

### Wstęp

Szereg operacji wymiany masy jest realizowanych w kolumnach z wypełnieniem. Dążenie do intensyfikacji procesów wymusza doskonalenie konstrukcji wypełnień celem uzyskania jak największej powierzchni właściwej przy jak najmniejszych oporach przepływu gazu. Cel ten można osiągnąć m.in. poprzez ażurową konstrukcję pobocznic pierścieni, czego przykładem są pierścienie *Palla*.

W przypadku wypełnień pierścieniowo-strukturalnych, np. wypełnienia pierścieniowo-strukturalnego listkowego (PSL) [Bednarski i Komorowicz, 1995] dodatkowe zwiększenie powierzchni właściwej uzyskuje się wskutek upakowania większej liczby pierścieni w jednostce objętości. Osiove ustawienie pierścieni w strukturze powoduje zmniejszenie oporów przepływu gazu w stosunku do wypełnienia usypanego. Z uwagi na cienkościennosc elementów wypełnienia listkowe nie może być stosowane w formie usypanej w postaci wysokich warstw, stąd brak badań porównawczych hydrauliki tego wypełnienia.

W ramach pracy dokonano analizy hydrauliki usypanych pierścieni *Palla* o różnych średnicach i wypełnienia pierścieniowo-strukturalnego listkowego o średnicach elementów 25 i 50 mm.

Przeprowadzone porównanie wskazuje, jak struktura wypełnienia przy podobnej budowie elementów wpływa na hydraulikę kolumny.

### Parametry porównywanych wypełnień

Dane techniczne usypanych pierścieni *Palla* oraz wypełnienia pierścieniowo-strukturalnego listkowego zamieszczono w tab. 1 i 2.

Tab. 1. Dane techniczne usypanych pierścieni *Palla* [Katalog VFF, 2012]

Rozmiar pierścienia [mm]	Gęstość usypowa [kg/m <sup>3</sup> ]	Liczba sztuk [1/m <sup>3</sup> ]	Powierzchnia właściwa $\alpha$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	Porowatość $\varepsilon$ [%]
15×15×0,4	510	220000	360	93
25×25×0,6	460	50000	215	94
35×35×0,8	450	18000	145	95
50×50×1,0	400	6000	105	95
80×80×1,5	385	1600	78	96

Tab. 2. Dane techniczne wypełnienia pierścieniowo-strukturalnego listkowego (PSL) [Bednarski i Komorowicz, 1995]

Rozmiar elementów [mm]	Liczba sztuk [1/m <sup>3</sup> ]	Powierzchnia właściwa $\alpha$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	Porowatość $\varepsilon$ [%]
25×25×0,25	76000	332	96,0
50×50×0,50	8800	170	96,5



### Spadek ciśnienia na wypełnieniu suchym

Wg *Hoblera* [1976] główną przyczyną spadku ciśnienia przy przepływie gazu przez elementy wypełniające jest zmiana prędkości przepływającego gazu i związana z tym ekspansja. *Jaroszyński i in.* [2000] i *Maćkowiak* [2010] do wyprowadzenia równań opisujących spadek ciśnienia przy przepływie jednofazowym przez warstwę wypełnienia stacjonarnego przyjmują najczęściej model kanałowy, traktujący warstwę wypełnienia jako zbiór równych i równoległych kanałów z założeniem izotermiczności przepływu gazu. Można wtedy do opisu spadku ciśnienia na wypełnieniu suchym zastosować równanie *Darcy'ego-Weisbacha*, które po odpowiedniej modyfikacji przyjmuje postać [Maćkowiak, 2010]

$$\frac{\Delta P}{H} = \psi \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^2} \frac{1}{K} \frac{u_{og}^2 \rho_g}{d_z} \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta P$  – spadek ciśnienia [Pa]

$H$  – wysokość wypełnienia [m]

$\psi = \lambda \lambda$  – współczynnik oporu przepływu zależny od liczby *Reynoldsa* [–]

$\varepsilon$  – porowatość wypełnienia [–]

$K$  – współczynnik uwzględniający wpływ ściany kolumny [–]

$u_{og}$  – prędkość przepływu gazu odniesiona do całkowitego przekroju kolumny [m/s]

$\rho_g$  – gęstość gazu [kg/m<sup>3</sup>]

$d_z$  – średnica zastępcza elementu wypełnienia [m]

Współczynnik  $K$  zdefiniowany jest zależnością

$$K = \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \frac{d_z}{D_k}} \quad (2)$$

gdzie:

$D_k$  – średnica kolumny [m]

Średnicę zastępczą elementu wypełnienia oblicza się z równania:

$$d_z = 6 \frac{V}{A} \quad (3)$$

gdzie:

$V$  – objętość elementu wypełnienia [m<sup>3</sup>]

$A$  – powierzchnia elementu wypełnienia [m<sup>2</sup>]

Liczba *Reynoldsa* jest zdefiniowana następująco:

$$Re_g = K \frac{1}{1 - \varepsilon} \frac{u_{og} d_z}{v_g} \quad (4)$$

gdzie:

$v_g$  – kinematyczny współczynnik lepkości gazu [m<sup>2</sup>/s]

Zależność opisująca relację pomiędzy współczynnikiem oporu przepływu  $\psi$  a liczbą *Reynoldsa*  $Re_g$  ma postać

$$\psi = C Re_g^b \quad (5)$$

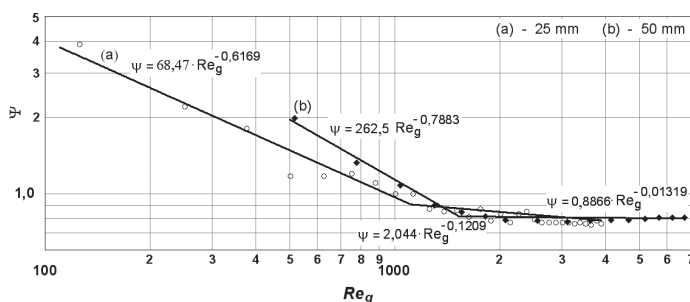
gdzie:

$C, b$  – stałe zależne od rodzaju i rozmiaru pierścieni oraz  $Re_g$  [–]

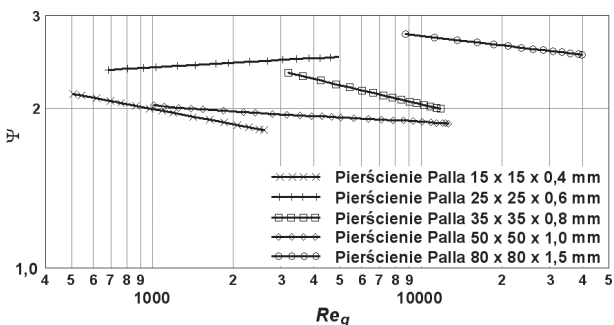
Obszar wykresu dla modelu *Maćkowiaka* [2010] należy podzielić na dwie części oddzielone punktem charakterystycznym wyznaczającym zmianę charakteru przepływu gazu.

Model *Jaroszyńskiego i in.* [2000] ma ujęcie podobne, z inną definicją średnicy hydraulicznej, współczynnika  $K$  i liczby *Reynoldsa*.

W przypadku wypełnienia PSL o średnicach elementów 25 i 50 mm zauważa się zarówno zakres laminarny (w zakresie  $Re_g$  do 1200 lub 1600) jak i burzliwy (Rys. 1), natomiast w przypadku usypanych pierścieni *Palla* obserwuje się tylko zakres burzliwy (Rys. 2), nawet porównując pierścienie o średnicach 25 i 50 mm przy podobnym zakresie  $Re_g$  jak dla wypełnienia PSL. Ruch laminarny, jeśli występuje w przypadku pierścieni *Palla*, ma miejsce w zakresie znacznie mniejszych liczb *Reynoldsa* niż w przypadku wypełnienia PSL. Struktura pierścieni sprzyja więc bardziej przepływowi laminarnemu niż wypełnienie usypowe.



Rys. 1. Zależność  $\psi = f(Re_g)$  dla wypełnienia PSL 25 i 50 mm [źródło własne]



Rys. 2. Zależność  $\psi = f(Re_g)$  dla różnych rozmiarów pierścieni Palla [źródło własne]

### Spadek ciśnienia na wypełnieniu zraszonym

W przyjętym modelu [Maćkowiak, 2010] zależność stosunku spadku ciśnienia na wypełnieniu zraszonym do spadku ciśnienia na wypełnieniu suchym, przedstawiono w postaci wzoru

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P} = f(K_p) \quad (6)$$

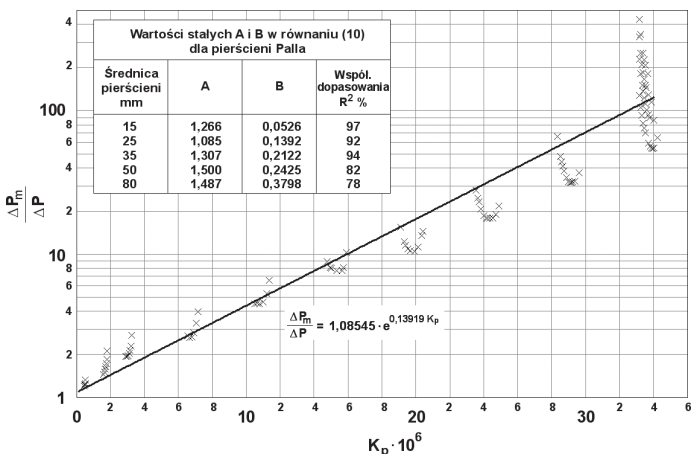
gdzie:  $K_p = Fr_c Re_c^{-0,8} (1 + 5 \cdot 10^{-5} Re_g)$  (7)

$$Fr_c = \frac{u_{oc}^2 (1 - \epsilon)}{gd_z} \frac{1}{K}, \quad Re_{c,g} = \frac{u_{oc,og} d_z}{\nu_{c,g} (1 - \epsilon)} K \quad (8), (9)$$

Zależność (6) opisana jest równaniem

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P} = A \exp(BK_p) \quad (10)$$

którego ilustracją graficzną dla pierścieni Palla 25 mm przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Zależność  $\Delta P_m/\Delta P = f(K_p)$  dla pierścieni Palla 25 mm [źródło własne]

Równ. (10) sprawdza się też w przypadku wypełnienia PSL. Wartości stałej A i wykładnika B dla wypełnienia o średnicy elementów 50 mm są zamieszczone w pracy [Bednarski i Komorowicz, 1995].

Dla dokładnego opisu przebiegu procesu w kolumnie wypełnionej istotne jest znalezienie zależności funkcyjnej między prędkością gazu i cieczy na linii przecięcia ( $u_{ogp}$  i  $u_{ocp}$ ) oraz na linii zalewania ( $u_{ogz}$  i  $u_{ocz}$ ). Dla wszystkich rozmiarów pierścieni Palla zależności te opisano równaniami:

$$u_{ogp} = a_p \exp(c_p u_{ocp}) \quad (11)$$

$$u_{ogz} = \exp\left(\frac{u_{ocz} - c_z}{a_z}\right) \quad (12)$$

W tab. 3 podano wartości parametrów  $a_p, c_p, a_z, c_z$  w równ. (11) i (12). Zależność między prędkością gazu i cieczy na linii przecięcia dla pierścieni Palla można opisać równaniem Becka [Maćkowiak, 2010], którego dokładność jest jednak mniejsza niż równ. (11) i z tego powodu nie zostało ono tutaj przytoczone.

Z kolei równaniem Mersmanna-Brauera [Maćkowiak, 2010] można opisać linię zalewania łącznie dla wszystkich rozmiarów pierścieni Palla ze średnią dokładnością  $\pm 35\%$ .

Tab. 3. Wartości parametrów  $a_p, c_p, a_z, c_z$  w równ. (11) i (12)

Rozmiar pierścieni [mm]	$a_p$	$c_p$	$R^2$ [%]	$a_z$	$c_z$	$R^2$ [%]	Zakres $u_{og}$ [m/s]	Zakres $u_{oc} \cdot 10^3$ [ $m^3/(m^2 \cdot s)$ ]
15	2,118	-43,24	99	-0,02306	0,02012	99,4	0,1118 ÷ 2,125	2,727 ÷ 40,63
25	2,297	-32,61	99	-0,03259	0,03065	99,5	0,1109 ÷ 2,783	1,358 ÷ 81,54
35	3,307	-30,99	98	-0,03664	0,04623	98,7	0,1138 ÷ 3,036	6,790 ÷ 95,17
50	3,638	-22,20	99	-0,05064	0,06642	99,6	0,1138 ÷ 3,531	6,790 ÷ 88,49
80	3,536	-15,12	98	-0,06153	0,08368	99,5	0,6831 ÷ 3,506	6,790 ÷ 40,63

Zestawienie prędkości przecięcia i zachłystywania dla wypełnienia PSL i usypanych pierścieni Palla o średnicach elementów 25 mm podano w tab. 4. Prędkość przecięcia dla wypełnienia PSL ma praktycznie stałą wartość w przedstawionym zakresie prędkości cieczy. Z porównania widać, że struktura tego wypełnienia pozwala na szerszy zakres pracy niż struktura wypełnienia usypanego.

Tab. 4. Porównanie prędkości zachłystywania dla wypełnienia PSL i usypanych pierścieni Palla o średnicach elementów 25 mm

Prędkość cieczy [ $m^3/(m^2 \cdot s)$ ]	Prędkość przecięcia $u_{ogp}$ [m/s]		Prędkość zachłystywania $u_{ogz}$ [m/s]	
	wypełnienie PSL	pierścienie Palla	wypełnienie PSL	pierścienie Palla
$2,778 \cdot 10^{-3}$	1,0	2,10	3,0	2,35
$5,556 \cdot 10^{-3}$	1,0	1,92	2,6	2,16
$8,333 \cdot 10^{-3}$	1,0	1,75	2,2	1,98

### Wnioski

W przypadku przepływu gazu przez suche wypełnienie strukturalne można zaobserwować zarówno laminarny jak i burzliwy charakter przepływu. Dla usypanych pierścieni Palla nie zaobserwowano laminarnego charakteru ruchu dla tych samych zakresów liczb Reynoldsa jak w przypadku wypełnień strukturalnych. Ruch laminarny, jeśli tam wystąpi, będzie w zakresie mniejszych liczb  $Re_g$ . Struktura wypełnienia ma więc tendencję do zmniejszania burzliwości przepływu.

Górna granica dla zakresu laminarnego przesuwają się w stronę większych liczb  $Re$  wraz ze zwiększeniem średnicy pierścieni.

Przyjęty model [Maćkowiak, 2010] dobrze opisuje spadek ciśnienia na wypełnieniu zraszonym zarówno w przypadku wypełnienia PSL jak i usypanych pierścieni Palla. Dokładność modelu maleje wraz ze wzrostem średnicy pierścieni. Można ją zwiększyć zawężając zakres np. do linii przecięcia, obszaru pod linią przecięcia czy obszaru między linią przecięcia a linią zalewania.

Podane w pracy zależności, oparte na badaniach producenta pierścieni Palla, pozwalają na określenie z dużą dokładnością prędkości przecięcia i zalewania w kolumnach wypełnionych pierścieniami o określonych rozmiarach.

Wypełnienie PSL ma szerszy zakres pracy niż wypełnienie w postaci usypanych pierścieni Palla, na co wskazują wyższe prędkości zachłystywania przy tych samych obciążeniach cieczą.

### LITERATURA

Bednarski S., Komorowicz T., 1995. Przepustowość, zdolność rozdzielcza i zastosowania nowoczesnych wypełnień pierścieniowo-strukturalnych. *Wybrane prace z zakresu inżynierii chemicznej i procesowej, Pol. Krakowska*, **1**, nr 2, 117-126

Hobler T., 1976. *Dyfuzyjny ruch masy i absorbery*. WNT, Warszawa

Jaroszyński M., Kołodziej A., Bylica I., Smolec W., 2000. Hydrodynamika kolumn ze strukturalnym wypełnieniem reaktywnym. *Inż. Chem. Proc.*, **21**, nr 4, 691-705

Katalog VFF, 2012. Vereinigte Füllkörper-Fabriken GmbH & Co. KG, (03. 2012): <http://www.vff.com>

Maćkowiak J., 2010. *Fluid dynamics of packed columns, principles of the fluid dynamic design of columns for gas/liquid and liquid/liquid systems*. Springer Verlag, Berlin-Heisenberg