

Ireneusz GRUBECKI

e-mail: ireneusz.grubecki@utp.edu.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej i Bioprosesowej, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

Badania eksperymentalne spadku ciśnienia w złożu biofiltracyjnym

Wstęp

Substancje złozone (odory) wydzielające się podczas intensywnej produkcji zwierzęcej pogarszają komfort życia ludzi mieszkających w pobliżu farm. Jedną z metod dezodoryzacji uciążliwych gazów jest metoda biofiltracji, polegająca na biodegradacji zanieczyszczeń z udziałem mikroorganizmów, w wyniku czego powstają związki nietoksyczne i nieuciążliwe dla środowiska. Taki sposób usuwania zanieczyszczeń gazowych jest szeroko rozpowszechniony ze względu na niski koszt, proste sterowanie procesem, niskie zapotrzebowanie energetyczne oraz wysoką efektywność oczyszczania gazów w porównaniu z innymi metodami.

Dobór odpowiedniego wypełnienia stanowiącego biofiltr nie jest prosty i stanowi najważniejsze zadanie decydujące o efektywności jego pracy przy minimalnych kosztach operacyjnych [Chen i Hoff, 2012]. Wskazana jest zatem wiedza dotycząca spadku ciśnienia na złożu oraz zasadne jest stosowanie tanich i lokalnie dostępnych mediów, takich jak zrębki drewna czy kora.

Celem pracy było przeprowadzenie pomiarów spadku ciśnienia powietrza na złożu biofiltracyjnym o różnej zawartości wilgoci, a następnie na ich podstawie wykonanie obliczeń mających na celu określenie wpływu stałych Blake'a-Kozeny'ego-Carmana (BKC) i Burke'a-Plummera (BP) występujących w równaniu Erguna na wartość powierzchni właściwej, która obok zawartości wilgoci jest najważniejszych parametrem charakteryzującym złoża biofiltracyjne.

Badania eksperymentalne

Materiały i metody

Pozyskane złoża biofiltracyjne będące mieszaniną bukowo-dębowych zrębków drewnianych i kory sosny jest stosowane do usuwania substancji złozone z powietrza. Gęstość badanej mieszaniny ρ_s oraz gęstość usypowu złoża ρ_U określono metodą opisaną przez Grubeckiego [2015]. Na tej podstawie obliczono (Tab. 1) porowatość złoża według wzoru

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_U}{\rho_s} \quad (1)$$

Tab. 1. Porowatość złoża biofiltracyjnego ε przy różnej zawartości wilgoci w

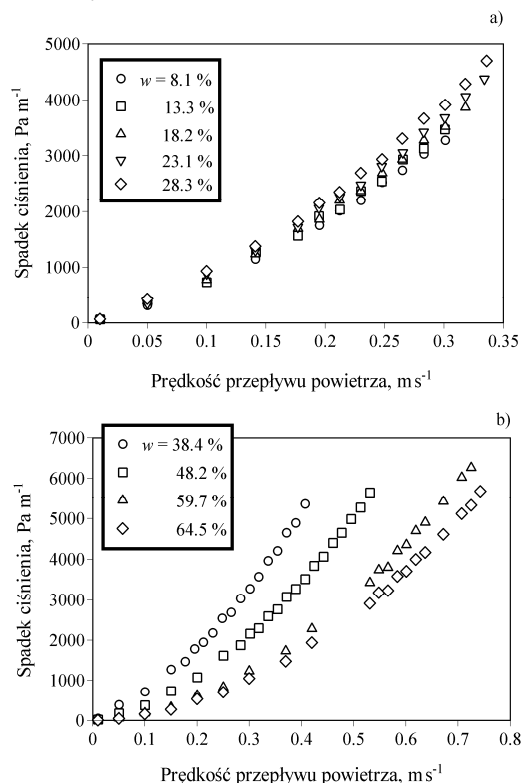
Wilgotność w , % mas.	Gęstość ρ_s , kg m ⁻³	Porowatość ε , %
8,1	813,1	62,7
13,3	829,8	62,4
18,2	847,2	62,0
23,1	855,8	61,0
28,3	876,3	58,9
38,4	910,3	56,6
48,2	945,2	52,3
59,7	980,3	45,3
64,5	1046,0	43,4

Pomiar spadku ciśnienia na złożu o różnej wilgotności

Pomiar spadku ciśnienia na badanym złożu mierzono w aparaturze, której zasadniczym elementem była szklana kolumna o średnicy $D_K = 0,1$ m i wysokości $H_K = 1,5$ m, w której umieszczono przygotowaną uprzednio masę biofiltracyjną o wilgotności od 8,1 do 64,5 % mas. (Tab. 1). W każdym eksperymencie wysokość usypanego złoża wynosiła $H_S = 0,25$ m. Króćce znajdujące się pod badanym złożem oraz bezpośrednio nad nim połączono z ramionami wodnego manometru różnicowego, który mierzył spadek ciśnienia powietrza na złożu. Kolumna pracowała w temperaturze otoczenia $t = 22^\circ\text{C}$, przy ciśnieniu atmosferycznym.

Wyniki

Pomiary przeprowadzono przy wzrastającej prędkości przepływu powietrza $U_S = 0 \div 0,8$ m/s oraz powtarzano dla każdej wilgotności złoża w i dla każdej z nich wyznaczano zależność $(\Delta P/H_S)_i = f(U_{S,i})$ dla $i = 1 \dots N$ – rys. 1.

Rys. 1. Zależność spadku ciśnienia $(\Delta P/H_S)$ od prędkości przepływu powietrza i zawartości wilgoci w złożu biofiltracyjnym dla: a) $w \leq 28,3\%$; b) $w \geq 38,4\%$

Parametryzacja równania Erguna

Istnieje wiele równań empirycznych opisujących związek między spadkiem ciśnienia na złożu $(\Delta P/H_S)$ i prędkością przepływu gazu U_S [Allen i in., 2013]. Jednym z nich jest równanie Erguna

$$\Delta P/H_S = \beta_1 U_S + \beta_2 U_S^2 \quad (2)$$

$$\beta_1 = A \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\eta}{d_s^2} \quad (3a)$$

$$\beta_2 = B \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho}{d_s} \quad (3b)$$

gdzie: $\Delta P/H_S$ – spadek ciśnienia na jednostkę wysokości złoża, Pa·m⁻¹; U_S – prędkość przepływu powietrza, m·s⁻¹; d_s – średnica Sautera, m; ε – porowatość złoża, η – współczynnik lepkości dynamicznej, Pa·s; ρ – gęstość powietrza, kg·m⁻³; A i B – stałe zależne od kształtu cząstek, zwane odpowiednio stałą BKC i stałą BP.

Zostało ono otrzymane przez dodanie prawych stron równań (BKC) i (BP) [Nemec i Levec, 2005] i zazwyczaj jest stosowane przy przewidywaniu spadku ciśnienia podczas przepływu płynów przez złoża złożone z nieregularnych cząstek. Im bardziej cząstki złoża są niesferyczne, tym wyższe wartości przyjmują stałe A i B . Pierwotnie

przyporządkowano im wartości odpowiednio 150 i 1,75.

Równ. (2) dopasowano do danych eksperymentalnych posługując się metodą regresji nieliniowej. W efekcie uzyskano wartości ocen parametrów β_1 i β_2 , które podano w tab. 2. Zamieszczono w niej również podstawowe parametry statystyczne potwierdzające dokładność dopasowania: współczynnik determinacji (R^2) i sumę kwadratów odchyłań (SSE)

$$SSE = \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\Delta P}{H_S} \right)_{\text{exp},i} - \left(\frac{\Delta P}{H_S} \right)_{\text{odp},i} \right]^2 \quad (4)$$

oraz błąd średniokwadratowy (RMSE)

$$RMSE = \frac{SSE}{(N-2)} \quad (5)$$

przy czym N oznacza liczbę punktów pomiarowych.

Tab. 2. Wartości parametrów występujących w równaniu Erguna dla różnych poziomów wilgotności złoża w

$w, \%$	Współczynniki		R^2	SSE	RMSE
	β_1	β_2			
8,2	5684 ± 345	17583 ± 1390	0,9995	48,3	22,0
13,3	6072 ± 835	18484 ± 3358	0,9998	282,8	53,2
18,2	6100 ± 545	18973 ± 2066	0,9998	122,9	35,1
23,1	6384 ± 496	19913 ± 1792	0,9994	142,4	36,0
28,3	6769 ± 528	21235 ± 1899	0,9991	162,6	38,5
38,4	5211 ± 415	19286 ± 1263	0,9999	383,0	48,9
48,2	2468 ± 185	15341 ± 431	0,9997	165,4	29,5
59,7	708,5 ± 236	10975 ± 382	0,9995	359,6	46,0
64,5	546,5 ± 202	9442 ± 324	0,9996	312,8	41,7

Znając wartości współczynników β_1 i β_2 można scharakteryzować złożo biofiltracyjne określając jego podstawowe właściwości fizyczne i na tej podstawie stwierdzić jego przydatność w określonych warunkach operacyjnych.

Dyskusja

Zależność spadku ciśnienia od prędkości przepływu powietrza może zostać wykorzystana do oszacowania powierzchni właściwej złoża, która jest jednym z parametrów decydujących o efektywności działania biofiltru. Wiarygodność uzyskanych rezultatów uzależniona jest od poprawnego doboru współczynników BKC i BP w równaniu Erguna. W jego klasycznej postaci, jak wcześniej wspomniano, wartości tych współczynników dla złożo z cząstkami nieznacznie odbiegających od sferycznych wynoszą odpowiednio 150 i 1,75.

Problem jest bardziej skomplikowany, gdy złożo składa się z nieregularnych cząstek niesferycznych. Jedną z propozycji [Macdonald i in., 1979] dopuszcza stosowanie równania Erguna z uniwersalnymi wartościami stałych A i B równymi odpowiednio 180 i 1,8.

Oprócz kształtu cząstek dodatkowy wpływ na spadek ciśnienia wywiera szorstkość złoża biofiltracyjnego, szczególnie podczas burzliwego przepływu gazu. W takim przepływie dominuje składnik, w którym występuje kwadrat prędkości przepływu. W związku z tym zaproponowano [Macdonald i in., 1979] wartość stałej $B = 1,8$ dla złożo o cząstkach gładkich oraz $B = 4,0$ dla złożo o cząstkach szorstkich. Poza wymienionymi czynnikami na wartość współczynników A i B ma wpływ również struktura upakowania złoża [Jiang i in., 2000].

Najwłaściwszym zatem sposobem jest określenie wartości współczynników A i B na podstawie badań eksperymentalnych oddzielnie dla każdego medium biofiltracyjnego. Dla złożo analizowanego w niniejszej pracy można posłużyć się wartościami $A = 554$ i $B = 4,2$ wyznaczonymi w oparciu o badania eksperymentalne spadku ciśnienia powietrza na złożo nieregularnego kształtu cząstek drewna [Mayerhofer i in., 2011].

Wpływ wartości omawianych współczynników można zobrazować na przykładzie wartości powierzchni właściwej odniesionej do analizowanego złożo biofiltracyjnego. Jej wartość można wyznaczyć analitycznie stosując metodę regresji nieliniowej, która po uprzednim wprowadzeniu ilorazu $k = \beta_2/\beta_1$ oraz wyrażenia łączącego średnicę

Sautera d_s i powierzchnię właściwą a

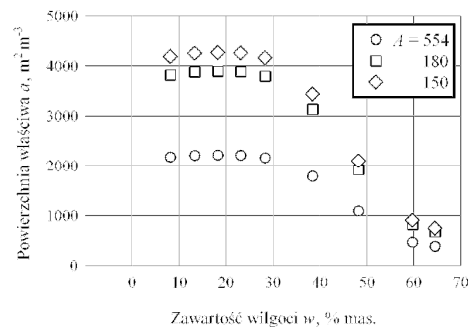
$$d_s = 6(1 - \varepsilon)a^{-1} \quad (6)$$

prowadzi do następującej zależności:

$$a = C \left\{ \varepsilon^3 \sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta P}{H_S} \right)_i U_{S,i} (1 + kU_{S,i}) \cdot \left[\sum_{i=1}^N U_{S,i}^2 (1 + kU_{S,i})^2 \right]^{-1} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

gdzie: $C = 6(A\eta)^{-0,5}$.

Na rys. 2 przedstawiono wpływ zawartości wilgoci w złożo (w) na wartość powierzchni właściwej (równ. (7)) dla różnych wartości stałych A i B .



Rys. 2. Zależność powierzchni właściwej a od wartości współczynników A i B oraz zawartości wilgoci w złożo biofiltracyjnym.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzono badania mające na celu określenie spadku ciśnienia w złożo będącym mieszaniną zrębków drewnianych i kory sosny. Dokonując parametryzacji równania Erguna oszacowano powierzchnię właściwą analizowanego złożo dla różnych jego wilgotności w zależności od wartości stałych A i B .

Na tej podstawie stwierdzono, że do pewnego poziomu wilgotności (ok. 30 % mas.) złożo wykazuje niezmienną wartość powierzchni właściwej. Po jej przekroczeniu, do osiągnięcia wilgotności równej ok. 64,5 % mas., zauważa się drastyczną redukcję powierzchni właściwej odpowiadającą względnemu stopniu redukcji równemu ok. 80%.

Ponadto, na podstawie obliczeń wykazano, że dla $A = 180$ uzyskuje się o 75,4% (a dla $A = 150$ o 92,2%) większą powierzchnię aniżeli uzyskana w przypadku stałej $A = 554$ wyznaczonej eksperymentalnie, której wartość można uważać za najbardziej zbliżoną do rzeczywistej [Mayerhofer i in., 2011].

LITERATURA

- Allen K.G., von Backstorn T.W., Kroger D.G., 2013. Packed bed pressure drops dependence on particle shape, size distribution, packing arrangement and roughness. *Powder Technol.*, **246**, 590-600. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.06.022
- Chen, L., Hoff, S. J., 2012. A two-stage wood chip-based biofilter system to mitigate odors from a deep-pit swine building. *Appl. Eng. Agric.*, **28**, 893-901. (09-2015) http://lib.dr.iastate.edu/abe_eng_pubs/362
- Grubecki I., 2015. Airflow versus pressure drop for a mixture of bulk wood chips and bark at different moisture contents. *Biosyst. Eng.* (in press). DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.08.008
- Jiang, Y., Khadiikar, M. R., Al-Dahhan, M. H., Dudukovic, M. P., 2000. Single phase flow modeling in packed beds: discrete cell approach revisited. *Chem. Eng. Sci.*, **55**(10), 1829-1844. DOI: 10.1016/S0009-2509(99)00453-4
- Macdonald, I. F., El-Sayed, M. S., Mow, K., Dullien, F. A. L., 1979. Flow through Porous Media-the Ergun Equation Revisited. *Ind. Eng. Chem. Fund.*, **18**, 199-208. DOI: 10.1021/i160071a001
- Mayerhofer, M., Govaerts, J., Parmentier, N., Jeanmart, H., Helsen, L., 2011. Experimental investigation of pressure drop in packed beds of irregular shaped wood particles. *Powder Technol.*, **205**(1-3), 30-35. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.08.006
- Nemec, D., Levec, J., 2005. Flow through packed bed reactors: 1. Single-phase flow. *Chem. Eng. Sci.*, **60**(24), 6947-6957. DOI: 10.1016/j.ces.2005.05.068