

MIKOŁAJ SUWAK*, ANNA GANCARCZYK, MATEUSZ KORPYŚ,
MIRZOKHID ABDIRAKHIMOV, TADEUSZ KLESZCZ

OBLICZANIE RADIALNEGO WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODZENIA CIEPŁA W REAKTORACH HETEROGENICZNYCH O ZŁOŻU STAŁYM

Instytut Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk, ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice

*mikolaj.suwak@iich.gliwice.pl

Procesy chemiczne prowadzone w wąskich oknach temperaturowych (np. reakcja PROX lub Sabatiera) wymagają stosowania wypełnień katalitycznych, cechujących się nie tylko dużą liczbą łatwo dostępnych centrów aktywnych, ale także dobrymi parametrami transportu ciepła. W niniejszym artykule dokonano zarówno przeglądu nowych typów wypełnień reaktorów o intensywnym współczynniku radialnego przewodzenia ciepła jak i zaproponowano algorytm mający na celu wyznaczenie tego parametru.

Słowa kluczowe: transport ciepła, reaktory katalityczne, wypełnienia reaktorów

1. WPROWADZENIE

Nieustanny rozwój przemysłu skutkuje intensywnym poszukiwaniem coraz bardziej efektywnych i mniej energochłonnych rozwiązań. Dotyczy to również procesów chemicznych, w których pożądaną są nowe aktywne katalizatory i nośniki zapewniające zmniejszenie zużycia energii przy jednocześnie zwiększonej wydajności procesu. Szacuje się, że większość reakcji chemicznych realizowanych na skalę przemysłową to procesy katalityczne. Rolą wypełnienia reaktora chemicznego jest zapewnienie

możliwie dużej powierzchni kontaktu pomiędzy fazą aktywną katalitycznie i reagentami, przy możliwie najmniejszej objętości aparatu i niewielkich oporach przepływu.

Procesy katalityczne są zazwyczaj realizowane z użyciem katalizatorów w postaci złoża usypanego, przeważnie o wymiarach ziaren od jednego do dziesięciu milimetrów. Ten rodzaj wypełnienia wykazuje jednak wiele wad. Ze względu na swój stochastyczny charakter, może powodować nierównomierny przepływ płynu, powstawania wirów, przepływów wstecznych, itp. zjawisk, co może z kolei prowadzić do tworzenia się tzw. gorących punktów (ang. hot spots) i miejscowych dezaktywacji warstwy aktywnej. Czynniki te niekorzystnie wpływają na konwersję i selektywność procesu. Dodatkowym problemem są procesy, których poprawne prowadzenie wymaga ściśle określonych warunków temperaturowych, jak na przykład proces selektywnego utleniania n-butanu do bezwodnika maleinowego, proces metanizacji CO_2 (reakcja Sabatiera) lub reakcja preferencyjnego utleniania tlenku węgla (PROX). Ich wydajność, selektywność, oraz czas pracy katalizatora są często limitowane przez niewystarczający transport ciepła i masy. W celu przewyciężenia problemu nierównomiernego rozkładu temperatur w złożu oraz zbyt słabego transportu ciepła, proponowanych jest wiele różnych rozwiązań. Jednym z nich jest zastosowanie nośników metalowych, które charakteryzują się znacznie lepszymi właściwościami transportu ciepła niż tradycyjnie stosowane nośniki ceramiczne (tlenek glinu, zeolity, itp.), jak na przykład metalowych płyt [1], folii [2, 3], filców [4], monolitów [5, 6] czy pian stałych [7, 8]. Jednak pomimo dużego potencjału nośników metalowych, na powierzchni których naniesiona została warstwa katalityczna, również i te wypełnienia nie są pozbawione wad. Przede wszystkim ilość katalizatora (dostępnych centrów aktywnych) jest znacznie mniejsza w porównaniu do tradycyjnego złoża usypanego. W przypadku procesów ograniczonych wewnętrznym transportem masy, jak np. w procesie parowego reformingu metanu, konieczne jest zachowanie kompromisu pomiędzy obciążeniem katalizatora a wydajnością procesu. W reaktorach ze złożem usypanym

zwykle stosuje się katalizatory typu egg-shell, w których warstwa aktywna naniesiona jest na powierzchnię zewnętrzną ziarna nośnika ceramicznego postaci cienkiego filmu, co pozwala zmaksymalizować efektywność przy stałej ilości substancji czynnej. Rozwiązanie to umożliwia dostosowanie grubości warstwy aktywnej do wymogów procesu. W przypadku nośników metalowych, np. pian stałych, grubość warstwy katalitycznej uzależniona jest od geometrii piany, przy czym nałożenie warstwy katalitycznej wymaga opanowania odpowiedniej technologii. Problemy związane z umieszczeniem wypełnienia strukturalnego z warstwą katalityczną w reaktorze, jego uszczelnienie oraz usunięcie z reaktora także istotnie różnią się od metod stosowanych w reaktorach ze złożem usypanym [9]. Ponadto uzyskanie odpowiedniej przyczepności ceramicznej warstwy katalitycznej do podłoża metalowego oznacza konieczność zarówno optymalizacji metod przygotowania [10, 11], jak i ostrożnego obchodzenia się z otrzymanym wypełnieniem. Krytycznym momentem w procesie chemicznym jest regeneracja lub wymiana zużytej fazy aktywnej, jak dotąd, dla tego typu wypełnień brak jest opracowanej technologii umożliwiającej przeprowadzenie tego typu operacji [9].

2. STRUKTURY WYPEŁNIONE – WYPEŁNIENIA O INTENSYWNYM RADIALNYM TRANSPORCIE CIEPŁA

Rozwiązaniem łączącym zalety wypełnienia metalowego (duże współczynniki transportu ciepła) oraz wypełnienia ceramicznego, są wypełnienia typu „struktury wypełnione”, w których złożę drobnych ziaren katalizatora usypane jest w pustych przestrzeniach struktury metalowej. Wypełnienie tego typu o przepływie krzyżowym, zaproponowane w pracy [8], może zapewnić o 25% większą wydajność C_{5+} w procesie Fishera-Tropscha w porównaniu do tradycyjnego wypełnienia usypanego. Lepsza wydajność, jak wskazują autorzy, wynika ze zwiększonej efektywności katalizatora w połączeniu z lepszą kontrolą temperatury, niezbędną do

utrzymania odpowiedniej selektywności [12]. Przedstawiono również inne koncepcje wypełnienia strukturalnego takie jak, monolit [13], piany stałe [14-16] lub wypełnienia typu POCS (otwartokomórkowe struktury periodyczne, Periodic Open Cellular Structures)[17-18]. Rozwiązania te zostały przetestowane eksperymentalnie w procesach egzotermicznych (synteza Fishera-Tropscha [19] oraz endotermicznych (reforming parowy metanu [18]), zapewniając wyższą wydajność i bardziej równomierne rozkłady temperatur w złożu w porównaniu do konwencjonalnego złoża usypanego. Problemami dla tego typu wypełnień są z kolei gęstość upakowania struktury metalowej ziarnami katalizatora oraz opory przepływu. Stwierdzono, że dla wypełnienia typu „wypełniona piana” gęstość upakowania jest funkcją stosunku średnicy komórki piany do średnicy ziarna i wyraźnie spada dla wartości mniejszych niż 1,5, a dla wartości poniżej 1,3 mogą występować lokalne kanały i puste przestrzenie. Biorąc pod uwagę komercyjnie dostępne piany, wypełnienia tego typu mogą zostać zastosowane w procesach, w których wymiar ziarna katalizatora nie przekracza 2 mm [15]. Jest to duże ograniczenie biorąc pod uwagę, że wiele procesów przemysłowych prowadzonych jest z wykorzystaniem ziaren znacznie większych niż 2 mm. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie struktury POCS o odpowiednio zdefiniowanej geometrii dostosowanej do wymogów procesu (wielkości ziaren) i wytworzonej metodą druku 3D. Wypełnienie tego typu („wypełniony POCS”) charakteryzuje się korzystniejszymi właściwościami przepływowymi w porównaniu do złoża usypanego [17].

Jednym z podstawowych wymogów w przypadku wypełnień o intensywnym radialnym transporcie ciepła, a zatem wypełnień typu „upakowanego”, jest zapewnienie odpowiedniego kontaktu pomiędzy strukturą metalową a ścianą reaktora; jest to parametr decydujący o profilach temperatury w złożu reaktora. Jak wykazano w pracy [20], już niewielki udział styku pomiędzy tymi dwoma powierzchniami (rzędu 10 – 20%) zapewnia wystarczającą wymianę ciepła pomiędzy pianą a ścianą reaktora, dalsze zwiększanie powierzchni styku przynosi jedynie niewielką

poprawę tego parametru. W przypadku POCS możliwe jest takie zaprojektowanie i wytworzenie struktury, by składała się ze struktury komórkowej otoczonej pierścieniem litym, tzw. „skórką”, co powinno poprawić kontakt struktury ze ścianą reaktora. Jak zauważyli autorzy w pracy [18], dla tego typu wypełnienia można wyznaczyć wartość progową szczeliny pomiędzy ścianą reaktora a strukturą, poniżej której parametr ten nie wpływa na wydajność procesu. W procesie Fishera-Tropscha prowadzonym w reaktorze wykonanym ze stali AISI 316 przy użyciu POCS wydrukowanego z aluminium w temperaturze 180 – 225 °C, graniczna wartość szczeliny wyniosła 40 – 50 μm.

3. DWUWYMIAROWY BILANS CIEPŁA

Transport ciepła w reaktorze rurowym z wypełnieniem (w założeniu również katalitycznym, na którym przebiega reakcja chemiczna, powodująca efekt cieplny) opisywany jest zwykle dwuwymiarowym modelem we współrzędnych radialnych (z , r). Obejmuje on, w ogólnym przypadku, wzdłużny transport ciepła przez konwekcję, osiowe i radialne przewodzenie ciepła i transport ciepła pomiędzy wypełnieniem katalitycznym a płynem [21]. Jednak często przyjmowanym uproszczeniem jest zaniedbanie dyspersji osiowej płynu i osiowego przewodzenia ciepła, co jest uzasadnione dla reaktorów o długości przekraczającej 50 średnic ziarna katalizatora.

W stosowanym w prezentowanej pracy modelu przepływu ciepła dla stanu ustalonego, równanie (1), uwzględniono zatem: konwekcyjny transport ciepła z przepływającym płynem (pierwszy człon), radialny transport ciepła pomiędzy płynem a wewnętrzną ścianką reaktora (drugi człon) i transport pomiędzy płynem a wypełnieniem katalitycznym (trzeci człon):

$$(\rho c_p)_F w_m \frac{\partial T_F}{\partial z} = \frac{\lambda_{er}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_F}{\partial r} \right) + s_v \alpha_{FS} (T_Z - T_F). \quad (1)$$

Warunki brzegowe:

na wlocie reaktora, dla $z = 0$, $0 \leq r \leq R$,

$$T_F = T_{F0}, \quad (2)$$

w osi reaktora, dla $r = 0$, $0 \leq z \leq L$

$$\frac{\partial T_F}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

wnikanie ciepła do ścianki wewnętrznej reaktora rurowego, dla $r = R$,
 $0 \leq z \leq L$

$$-\lambda_{er} \frac{\partial T_F}{\partial r} = \alpha_W (T_F - T_W). \quad (4)$$

Dodatkowo, jeśli nie występuje reakcja chemiczna, względne efekty cieplne tej reakcji są zanedbywalnie małe. Można wówczas przyjąć, że temperatura płynu (T_F) jest równa temperaturze katalizatora (T_Z), wyrażenie $s_v \alpha_{FS} (T_Z - T_F) = 0$, a równanie (1) przyjmie postać:

$$(\rho c_p)_F w_m \frac{\partial T_F}{\partial z} = \lambda_{er} \left(\frac{\partial^2 T_F}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_F}{\partial r} \right). \quad (5)$$

Równanie (5) można rozwiązać analitycznie lub numerycznie. Pierwsza metoda polega na znalezieniu dokładnego, jawnego wzoru funkcji za pomocą na przykład rachunku różniczkowego, trygonometrii lub algebry. Otrzymany wzór jest precyzyjny i można go rozwiązać formalnie. Rozważając bardziej skomplikowane równania, sposób ten jest jednak trudny i czasochłonny. W literaturze niewiele jest prac, w których λ_{er} wyznaczono z zastosowaniem metody analitycznej. Jednym z nielicznych przykładów jest praca E. I. Smirnov i wsp. [22], którzy dla złoża usypanego zaproponowali rozwiązanie postaci:

$$T(r, z) = T_W + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_n r) \mu_n^2}{J_0(\mu_n)^2 (\mu_n^2 + Bi^2)} e^{(a \mu_n^2 z)} \cdot \int_0^1 r (f(r) - T_W) J_0(\mu_n r) dr, \quad (6)$$

gdzie, $a = \lambda_{er}/(\rho c_p)_{FW_m} R$, $Bi = \alpha_w R/\lambda_{er}$ oraz μ_n jest n -tym pozytywnym pierwiastkiem równania: $\mu J_1(\mu) = Bi J_0(\mu)$. Aby wyznaczyć radialny współczynnik przewodzenia ciepła, λ_{er} należy, w oparciu o dane eksperymentalne, wyestymować wartości współczynnika a oraz liczby Biota, a zatem stosując na przykład metodę najmniejszych kwadratów. Jak wskazują autorzy, rozwiązanie to dobrze opisuje profile temperatur w rdzeniu złoża, jednak im bliżej ścianki tym większe rozbieżności pomiędzy wartościami eksperymentalnymi a obliczonymi. Dlatego autorzy wyróżnili dwa obszary:

$$\lambda_{er}(r) = \begin{cases} \lambda_{er,core} & \text{dla } 0 \leq r \leq R - \delta \\ \lambda_{er,\delta(r)} & \text{dla } R - \delta \leq r < R \end{cases} \quad (7)$$

Rozwiązaniem modelu (7) jest prosta zależność między liczbą Nusselta ściany a efektywnym radialnym przewodnictwem ciepła w rdzeniu złoża (przy założeniu liniowej zmienności λ_{er} w otoczeniu ściany)

$$Nu_w = \frac{\alpha_w \delta}{\lambda_F} = \frac{\alpha_w d_{eqv}}{\lambda_F} \quad (8)$$

Autorzy otrzymali dobrą zgodność pomiędzy wynikami eksperymentalnymi a obliczonymi.

Drugim sposobem rozwiązania równania (5) jest metoda numeryczna zastosowana na przykład w pracy [19]. Efektywny radialny współczynnik przewodnictwa ciepła w wypełnieniu wykonanym z metalowych pian stałych oraz współczynnik przewodzenia ciepła przez ścianę wyestymowane zostały za pomocą nieliniowej regresji eksperymentalnie wyznaczonych profili temperatury. Dla każdej iteracji regresji równanie różniczkowe cząstkowe modelu rozwiązywano metodą kolokacji ortogonalnej. Ponieważ autorzy równocześnie przeprowadzali kilka operacji numerycznych (generowanie siatki dla złożonych struktur pian stałych, równoczesne wyznaczanie radialnego i osiowego współczynnika transportu ciepła), dlatego korzystali z klastra komputerowego o dużej wydajności obliczeniowej. Na podstawie otrzymanych wyników autorzy

stwierdzili, że poprzez wybór materiału z którego wykonana jest piana metalowa i jej porowatości można dopasować parametry transportowe wypełnienia do wymagań procesu w zakresie równomiernego rozkładu, kontroli lub obniżenia/podwyższenia temperatury w rdzeniu złoża.

Rozwiązanie równania (5) metodami numerycznymi można przeprowadzić również z wykorzystaniem programu MATLAB będącego równocześnie językiem programowania oraz środowiskiem programistycznym. Wykorzystując funkcję *pdepe* programu MATLAB można rozwiązać równanie (5) w dużo prostszy sposób niż w przypadku metody analitycznej. W tym celu należy najpierw przekształcić równanie (5) do postaci odpowiedniej dla tego programu, wówczas przyjmie ono postać

$$c\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \frac{\partial u}{\partial t} = x^{-m} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^m f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) + s\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \right), \quad (9)$$

gdzie zmienna x jest współrzędną promieniową, t jest współrzędną osiową, natomiast u jest temperaturą. Stałe c , f oraz s opisane są zależnościami:

$$c\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) = \frac{(\rho c_p)_F w_m}{\lambda_{er}}, \quad (10)$$

$$f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (11)$$

$$s\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) = 0. \quad (12)$$

oraz $m = 1$. Żeby rozwiązać równanie należy określić warunki brzegowe (3) i (4) za pomocą funkcji rozumianej przez program oraz przyjąć warunek początkowy jako:

$$\text{dla } z = 0, 0 \leq r \leq R,$$

$$T = f(r). \quad (13)$$

Na podstawie profili temperatur wyznaczonych eksperymentalnie, metodą najmniejszych kwadratów prowadząc serię iteracji należy wyznaczyć efektywny radialny współczynnika przewodzenia ciepła.

4. POMIAR TEMPERATURY

Niezależnie od zastosowanej metody rozwiązywania równania (5), analitycznej czy numerycznej, konieczne jest eksperymentalne wyznaczenie radialnego rozkładu temperatury w złożu. Od dokładności pomiaru temperatury zależy dokładność, z jaką wyznaczona zostanie wartość współczynników równania (5) i warunku brzegowego (4), tzn. λ_{er} i α_w .

Drugim istotnym wyzwaniem jest zapewnienie stałej temperatury zewnętrznej ściany reaktora. Proponowane są różne realizacje tego warunku, na przykład zastosowanie łaźni wodnej [22], zapewniającej różnicę temperatur ściany na całym odcinku pomiarowym mniejszą niż 0,5°C przy prędkości gazu w zakresie 0,2 – 2,0 m/s i temperaturze 90 – 100°C. Inne rozwiązanie zaproponowano w pracy [23]. W tym przypadku reaktor umieszczono w piecu termostatowanym z recyrkulacją powietrza. W tym podejściu zewnętrzna temperatura ściany reaktora zmienia się w zależności od warunków prowadzenia procesu.

Jeśli w pierwszym podejściu, w którym temperaturę ściany reaktora można przyjąć za stałą, wyznaczenie współczynnika λ_{er} może być nieco łatwiejsze i obarczone mniejszym błędem, to ograniczeniem jest możliwość zastosowania tego rozwiązania tylko w skali laboratoryjnej. Podejście drugie – zastosowanie płaszcza powietrznego - jest zapewne prostsze w warunkach przemysłowych.

Dla wyznaczenia wartości λ_{er} i α_w jest rekomendowana metoda, zapewniająca stałą temperaturę ściany poprzez zastosowanie łaźni wodnej

wypełnionej wodą lodową. Jest to metoda prostsza, obarczona mniejszymi błędami, związanymi z temperaturą ściany reaktora.

WNIOSKI

- Dokonano przeglądu nowych typów wypełnień reaktorów o intensywnym radialnym transporcie ciepła, wskazując na duży potencjał tzw. „wypełnień upakowanych”.
- Wskazano wady i zalety różnych typów wypełnień ceramiczno-metalowych.
- Zaproponowano algorytm możliwy do zaimplementowania w programie Matlab do wyznaczenia radialnego współczynnika transportu ciepła.
- Wskazano wady i zalety metodyki prowadzenia eksperymentów rekomendując metodę z łąznią wodną (woda lodowa) jako odpowiednią do badań w skali laboratoryjnej.

OZNACZENIA – SYMBOLS

Bi	liczba Biota, $Bi = \alpha_w R / \lambda_{er}$ Biot nuber
c_p	ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ specific heat at constant pressure
d_{eqv}	średnica hydrauliczna złoża usypanego equivalent hydraulic diameter of the packed bed
J_0	funkcja Bessela zerowego rzędu, pierwszego rodzaju zero-order Bessel function of the first kind
J_1	funkcja Bessela pierwszego rzędu, pierwszego rodzaju Bessel function of the first order, first kind
Nu_w	Liczba Nusselta Nusselt number
R	średnica reaktora, m reactor diameter
r	współrzędna w kierunku promieniowym reaktora, m

	radial co-ordinate
s_v	powierzchnia właściwa, m^2/m^3 specific surface
T_F	temperatura płynu, K fluid temperature
T_{F0}	temperatura płynu na wlocie do reaktora, K fluid temperature
T_W	temperatura ścianki reaktora, K wall temperature
T_Z	temperatura ciała stałego, K solid temperature
w_m	prędkość płynu, m/s fluid velocity
z	współrzędna w kierunku wzdłużnym reaktora, m axial co-ordinate
α_{FS}	współczynnik wnikania ciepła (płyn - ciało stałe), $W/(m^2 \cdot K)$ fluid-solid heat transfer coefficient
α_w	współczynnik wnikania ciepła przy ścianie reaktora (płyn - ciało stałe), $W/(m^2 \cdot K)$ wall heat transfer coefficient
δ	grubość obszaru przy ścianie reaktora przy założeniu niskiego mieszania płynu, m thickness of the wall-region with low fluid mixing
λ_{er}	efektywny współczynnik przewodzenia ciepła w kierunku promieniowym, $W/(m \cdot K)$ effective radial thermal conductivity of the bed
λ_f	współczynnik przewodzenia ciepła płynu, $W/(m \cdot K)$ effective radial thermal conductivity of the fluid
ρ	gęstość płynu, kg/m^3 fluid density

PIŚMIENNICTWO CYTOWANE – REFERENCES

- [1] Z. Liu, B. Chu, X. Zhai, Y. Jin, Y. Cheng, *Fuel* 95 (2012) 599–605.
- [2] R. Zapf, K. Becker-Willinger, H. Berresheim, H. Bolz, V. Gnaser, G. Hessel, P. Lob, A.-K. Pannwitt, A. Ziogas, *Trans IChemE* 81 (2003) 721–729.
- [3] O. Görke, P. Pfeifer, K. Schubert, *Catal. Today* 110 (2005) 132–139.
- [4] J. Hu, K.P. Brooks, J.D. Holladay, D.T. Howe, T.M. Simon, *Catal. Today* 125 (2007) 103–110.
- [5] Groppi, G., and Tronconi, E., 2001, "Simulation of structured catalytic reactors with enhanced thermal conductivity for selective oxidation reactions," *Catal. Today*, 69(1-4), pp. 63-73.

-
- [6] C. Janke, M. Duyar, M. Hoskins, R. Farrauto, *Appl. Catal. B Environ.* 152–153 (2014) 184–191.
- [7] C.Y. Zhao, *J. Int. Heat Mass Transf.* 55 (2012) 3618–3632.
- [8] M. Frey, D. Édouard, A.-C. Roger, *Comptes Rendus Chim.* 18 (2015) 283–292.
- [9] C.G. Visconti, G. Groppi, E. Tronconi, Highly conductive “packed foams”: a new concept for the intensification of strongly endo- and exo-thermic catalytic processes in compact tubular reactors, *Catal. Today* 273 (2015) 178–186, <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.02.060>.
- [10] V. Meille, *App. Catal. A: Gen.* 315 (2006) 1–17.
- [11] A. Montebelli, C.G. Visconti, G. Groppi, E. Tronconi, C. Cristiani, C. Ferreira, S. Kohler, *Catal. Sci. Technol.* 4 (2014) 2846–2870.
- [12] D. Vervloet, F. Kapteijn, J. Nijenhuis, J.R. van Ommen, *Catal. Today* 216 (2013) 111–116.
- [13] G. Groppi, E. Tronconi, C. G. Visconti, A. Tasso, R. Zennaro, Packed-bed tubular reactor for exothermic or endothermic catalytic chemical reactions. WO2015033266-A1; IT1419359-B; EP3041602-A1; US2016208175-A1; US9890333-B2, 2015.
- [14] C. G. Visconti, G. Groppi, E. Tronconi, Highly conductive “packed foams”: A new concept for the intensification of strongly endo- and exo-thermic catalytic processes in compact tubular reactors. *Catal. Today* 2016, 273, 178–186.
- [15] M. Ambrosetti, M. Bracconi, M. Maestri, G. Groppi, E. Tronconi, Packed foams for the intensification of catalytic processes: Assessment of packing efficiency and pressure drop using a combined experimental and numerical approach. *Chem. Eng. J.* 2020, 382, 122801.
- [16] R. Balzarotti, A. Beretta, G. Groppi, E. Tronconi, A comparison between washcoated and packed copper foams for the intensification of methane steam reforming. *React. Chem. Eng.* 2019.
- [17] M. Ambrosetti, G. Groppi, W. Schwieger, E. Tronconi, H. Freund, Packed periodic open cellular structures – an option for the intensification of non-adiabatic catalytic processes. *Chem. Eng. Process.* 2020, 155, 108057.
- [18] M. Panzeri, C. G. Visconti, G. Groppi, E. Tronconi, Process intensification of the fischer-tropsch synthesis using conductive packed pocs with skin: The role of the pocs design parameters. *Chem. Eng. J.* 2025, 521, 166359.
- [19] E. Bianchi, T. Heidig, C. G. Visconti, G. Groppi, H. Freund, E. Tronconi, An appraisal of the heat transfer properties of metallic open-cell foams for strongly exo-/endo-thermic catalytic processes in tubular reactors. *Chem. Eng. J.* 2012, 198, 512–528.
- [20] S. Razza, T. Heidig, E. Bianchi, G. Groppi, W. Schwieger, E. Tronconi, H. Freund, Heat transfer performance of structured catalytic reactors packed with metal foam supports: Influence of wall coupling. *Catal. Today* 2016, 273, 187–195.
- [21] Burghardt A., Bartelmus G., *Inżynieria Reaktorów Chemicznych TOM II Reaktory dla układów heterogenicznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2001.
- [22] E. I. Smirnov, A. V. Muzykantov, V. A. Kuzmin, A. E. Kronberg, I. A. Zolotarskii, Radial heat transfer in packed beds of spheres, cylinder and Rashig rings. Verification of model with a linear

variation of λ_{er} in the vicinity of the wall. Chem. Eng. Journal, 2003, 91, 243-248. DOI: 10.1016/S1385-8947(02)00160-2

- [23] E. Bianchi, T. Heidig, C. G. Visconti, G. Groppi, H. Freund, E. Tronconi, Heat transfer properties of metal foam supports for structured catalysts: Wall heat transfer coefficient. *Catal. Today* 2013, 216, 121-134.

MIKOŁAJ SUWAK, ANNA GANCARCZYK, MATEUSZ KORPYŚ, MIRZOKHID ABDIRAKHIMOV, TADEUSZ KLESZCZ

CALCULATION OF RADIAL HEAT CONDUCTION COEFFICIENT IN HETEROGENEOUS FIXED BED REACTORS

The constant development of industry results in an intensive search for increasingly efficient and less energy-intensive solutions. This also applies to chemical processes, where new active catalysts and carriers are desirable, ensuring reduced energy consumption while simultaneously increasing process efficiency. It is estimated that the majority of chemical reactions carried out on an industrial scale are catalytic processes. Catalytic processes are typically carried out using catalysts in a packed bed. However, this type of packing has numerous drawbacks. Due to its stochastic nature, it can cause uneven fluid flow, vortex formation, reverse flow, and other phenomena, which can in turn lead to the formation of so-called hot spots and local deactivation of the active layer. These factors adversely affect the conversion and selectivity of the process. An additional challenge is the need for processes that require strictly defined temperature conditions to be properly conducted. To overcome the problem of uneven temperature distribution within the bed and insufficient heat transfer, many different solutions have been proposed. One of these is the use of metal supports, which have significantly better heat transfer properties than traditionally used ceramic supports. However, despite the high potential of metal supports with a catalytic layer applied to their surface, these supports are not without their drawbacks. First and foremost, the amount of catalyst (available active sites) is significantly smaller compared to a traditional bulk bed.

A solution that combines the advantages of metal packing (high heat transfer coefficients) with ceramic packing is a "packed structure" type of packing, in which a bed of fine catalyst grains is placed within the voids of the metal structure. Such metal structures

can be, for example, monoliths, solid foams, or POCS-type packings. These solutions have been experimentally tested in exothermic and endothermic processes ensuring higher efficiency and more uniform temperature distributions within the bed compared to a conventional packed bed. Problems with this type of packing, in turn, include the packing density of the metal structure with catalyst grains and flow resistance. However, a solution to this problem could be the use of a POCS structure with a properly defined geometry adapted to the process requirements (grain size) and manufactured using 3D printing. This type of filling ("filled POCS") is characterized by more favorable flow properties compared to a packed bed. It's also worth noting that one of the fundamental requirements for packings with intense radial heat transfer is ensuring adequate contact between the metal structure and the reactor wall. This is a parameter that determines the temperature profiles in the reactor bed. Even a small amount of contact between these two surfaces (on the order of 10–20%) ensures sufficient heat exchange between the foam and the reactor wall; further increases in contact area yield only minor improvements in this parameter.

This article reviews new types of packing for reactors with intensive radial heat transfer, highlighting the significant potential of so-called "packed packing." Furthermore, the advantages and disadvantages of various types of ceramic-metal packing are identified. Additionally, an algorithm for determining the radial heat transfer coefficient, implementable in Matlab, is proposed. The advantages and disadvantages of the experimental methodology were indicated, recommending the water bath method (ice water) as suitable for laboratory-scale research.

Keywords: heat transport, catalytic reactors, reactor fillings

Received: 15.10.2025

Accepted: 21.11.2025