

**INSTYTUT INŻYNIERII CHEMICZNEJ  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

**mgr inż. Marcin Piątek**

**OPIS MORFOLOGII ORAZ WYZNACZENIE  
WSPÓLCZYNNIKÓW TRANSPORTU PĘDU,  
CIEPŁA I MASY DLA PIAN STAŁYCH**

**ROZPRAWA DOKTORSKA – AUTOREFERAT**

Promotor

**Prof. dr hab. inż. Andrzej Kołodziej**

Promotor pomocniczy

**Dr hab. inż. Anna Gancarczyk**

**GLIWICE 2020**

## Spis treści

I.	WPROWADZENIE .....	3
II.	CEL I ZAKRES PRACY .....	3
III.	MORFOLOGIA PIAN STAŁYCH.....	3
IV.	OPORY PRZEPIYWU .....	6
V.	MECHANIZM PRZEPIYWU PRZEZ PIANY STAŁE .....	7
VI.	TRANSPORT CIEPŁA I MASY W PIANACH STAŁYCH.....	9
VII.	RÓWNANIE LÉVÊQUE’A ORAZ WERYFIKACJA MECHANIZMU PRZEPIYWU DLA PIAN STAŁYCH.....	11
VIII.	WNIOSKI.....	13
	OZNACZENIA .....	14
	LITERATURA CYTOWANA .....	15
	WYKAZ DOROBKU NAUKOWEGO DOKTORANTA .....	15

## I. WPROWADZENIE

Piany stałe o otwartej strukturze porów reprezentują stosunkowo młodą generację materiałów porowatych, które od wielu lat wzbudzają duże zainteresowanie. Spowodowane to jest ich specyficznymi właściwościami, takimi jak:

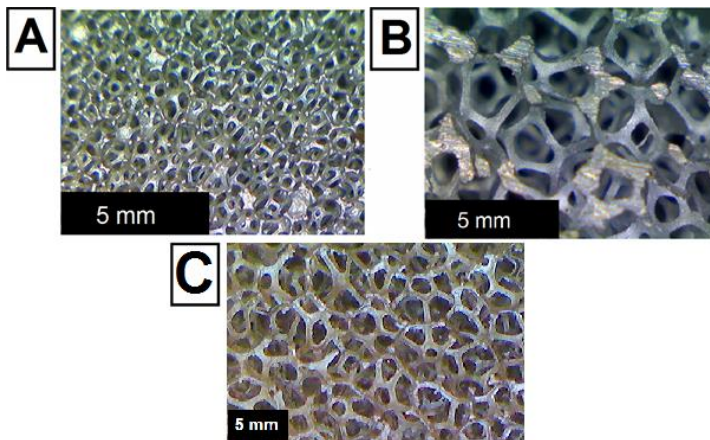
- znaczna wolna objętość (porowatość), dochodząca do 97% [1, 2],
- duża powierzchnia geometryczna [3, 4],
- intensywny transport ciepła i masy pomiędzy przepływającym płynem a szkieletem piany [5],
- niewielki ciężar właściwy [6], będący następstwem dużej porowatości.

Właściwości te sprawiają, że piany stałe mogą znaleźć szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu (m.in. wymienniki ciepła, elektrody) i w procesach ochrony środowiska (strukturalne reaktory chemiczne).

## II. CEL I ZAKRES PRACY

Celem badań było doświadczalne wyznaczenie parametrów morfologicznych, oporów przepływu i współczynników transportu ciepła (masy) dla wybranych pian metalowych o otwartej strukturze porów. Istotnym elementem rozprawy była identyfikacja mechanizmu przepływu płynu przez piany.

Badania przeprowadzono dla jednofazowego przepływu gazu przez złożę pian stałych. Jako wypełnienie stosowane były 3 rodzaje pian metalowych (aluminiowe, chromoniklowe i niklowe) o otwartej strukturze komórek. Każda z pian występowała w trzech różnych gęstościach porów: dla chromoniklowej i niklowej wynosiła ona, wg danych producenta, 6÷10, 27÷33, 47÷53 porów na cal (ang. *pores per inch*, PPI), natomiast dla aluminiowej 10, 20 i 40 PPI. Zdjęcia wybranych pian pokazano na rys. 1.



Rys. 1 Zdjęcia badanych pian: NC 2733 (A), Al-20 (B), Ni 0610 (C).

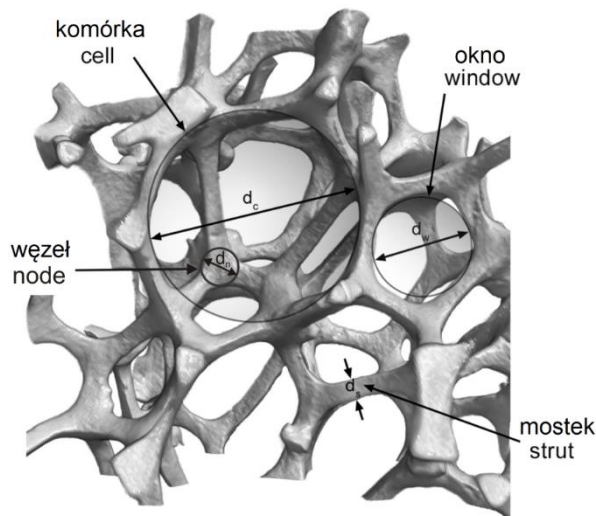
W pracy założono następujące tezy:

1. *Właściwości przepływowe i transportowe pian stałych są zdefiniowane przez ich morfologię.*
2. *W złożonej strukturze piany stałej występują zjawiska zarówno rozwijające się przepływu laminarnego przez krótką kapilarę, jak i opływu ciała stałego.*

## III. MORFOLOGIA PIAN STAŁYCH

Piana stała to trójwymiarowa struktura przestrzenna (rys. 2), składająca się z mostków (ang. *struts*) o średnicy (grubości)  $d_s$ . Miejsca połączeń mostków nazywane są węzłami (ang. *nodes*). Mostki dzielą przestrzeń piany na komórki (ang. *cells*), w przybliżeniu sferyczne lub elipsoidalne przestrzenie o średnicy  $d_c$ . Komórki są połączone ze sobą poprzez okna (ang. *windows*) o średnicy  $d_w$ . Komórki i okna, bez ich rozróżniania,

określane są terminem „pory” (ang. *pores*). Parametrem, który służy do charakteryzowania i klasyfikowania pian, stosowanym przede wszystkim przez ich producentów, jest liczba porów na cal długości (ang. *pore per inch*, PPI), określająca gęstość porów.



Rys. 2 Komputerowa rekonstrukcja obrazu z mikrotomografii komputerowej piany NC 2733.

Do parametrów morfologicznych charakteryzujących piany stałe zalicza się również powierzchnię geometryczną,  $S_v$  (ang. *specific surface area*), która jest powierzchnią dostępną dla osadzenia warstwy aktywnej katalitycznie, oraz porowatość  $\varepsilon$ .

W pracy, do wyznaczenia parametrów morfologicznych pian stałych, zastosowano tomografię komputerową (TK) wspomaganą oprogramowaniem iMorph, mikroskopię optyczną (MO). Metodę MO można uznać za nieskomplikowaną i prostą do stosowania, dzięki niej otrzymano parametry  $d_w$  i  $d_c$  niemożliwe do uzyskania przy wykorzystaniu innych technik (TK nie jest właściwie w stanie rozróżnić tych średnic). W przypadku metody dużo bardziej złożonej, jak metoda TK, należy wypracować najlepszą metodę pomiaru. Dla technik rentgenowskich, do jakich zaliczana jest tomografia, w literaturze istnieje wiele opisanych modeli binaryzacji (proces oddzielenia obiektu od tła). W praktyce stosowane są przede wszystkim dwie metody progowania: globalne oraz lokalne. Obie metody zostały sprawdzone w pracy i po wnikliwej analizie stwierdzono, że metoda progowania lokalnego jest niewłaściwa dla pian stałych, ponieważ generuje ona artefakty i zaniżała wyniki kluczowych parametrów morfologicznych – przede wszystkim dla pian Al. Okazało się również, że część pian (piany NC i Ni) rzeczywiście posiadają wewnętrzne pory w strukturze, co wynika bezpośrednio z ich metod produkcji (metoda replikacji piany polimerowej). Ponieważ w pracy piany stałe rozpatrywane są jako potencjalny nośnik warstwy katalitycznej, a w konsekwencji interesuje nas szczególnie zewnętrzna, dostępna dla katalizatora warstwa piany, surowe obrazy generowane przez TK zostały poddane obróbce cyfrowej w programie iMorph. Obrazy poddano progowaniu globalnemu, a następnie przeprowadzono tzw. procesy dylatacji i erozji morfologicznej, które zamknęły otwory i zatoki we wnętrzu szkieletu przy jednoczesnym pozostawieniu rzeczywistych wymiarów zewnętrznych. W pracy wykorzystano również piknometrię helową w celu sprawdzenia wyników porowatości otrzymanych z wykorzystaniem TK. Na podstawie przeprowadzonych badań zdecydowano, że w pracy konsekwentnie stosowano:

- przeciętną średnicę porów  $d_p$  wyznaczoną w oparciu o badanie TK,
- przeciętną średnicę mostków  $d_s$  wyznaczoną w oparciu o MO,
- przeciętną średnicę okien  $d_w$  wyznaczoną w oparciu o MO,
- przeciętną średnicę komórek  $d_c$  wyznaczoną w oparciu o MO,
- porowatość  $\varepsilon$  obliczoną w programie iMorph w oparciu o badanie TK,
- powierzchnię geometryczną  $S_v$  obliczoną w programie iMorph w oparciu o badanie TK.

Wartości parametrów morfologicznych dla testowanych pian stałych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry morfologiczne pian stałych.

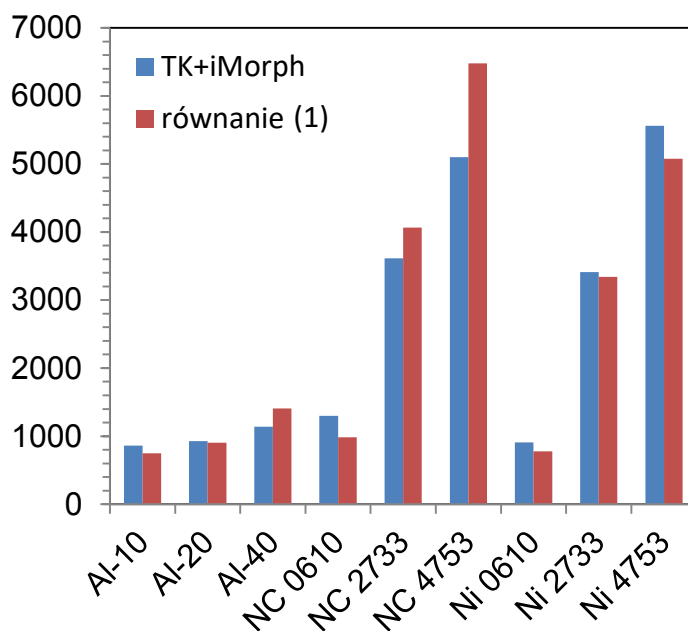
Piana	$d_p$ [mm]	$d_c$ [mm]	$d_w$ [mm]	$d_s$ [mm]	$E$	$S_v$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
Al-10	2,48	4,73	1,90	0,45	0,90	861
Al-20	2,02	4,04	1,74	0,37	0,91	926
Al-40	1,70	2,58	0,92	0,30	0,90	1140
NC 0610	1,89	3,60	1,06	0,53	0,92	1298
NC 2733	0,68	0,86	0,29	0,13	0,88	3616
NC 4753	0,45	0,53	0,20	0,08	0,93	5101
Ni 0610	1,92	4,73	1,57	0,47	0,92	909
Ni 2733	0,68	1,06	0,36	0,14	0,91	3411
Ni 4753	0,42	0,69	0,24	0,12	0,89	5563

Parametry morfologiczne pian stałych, takie jak powierzchnia geometryczna, porowatość czy średnica mostków, można wyznaczyć w oparciu o modele geometryczne [7]. Spośród wielu istniejących trójwymiarowych figur geometrycznych tylko niektóre mogą stworzyć złożoną strukturę trójwymiarową, wypełniającą całkowicie przestrzeń poprzez składanie i dodawanie pojedynczych figur. Z tego powodu do opisu struktury przestrzennej pian stałych stosowanych jest zaledwie kilka modeli, które, dla lepszego oddania rzeczywistej struktury pian, uzupełniane są o różne modyfikacje uwzględniające np. kształt mostków czy węzłów. Autorzy podkreślają jednak, że jest to znaczne uproszczenie, bowiem piana jest ciałem anizotropowym, a poszczególne jej elementy nie są identyczne: komórki i okna mają różne rozmiary, mostki są różnej długości i kształtów.

Analizując dostępne modele literaturowe, stwierdzono, że model zaproponowany przez Richardsona i wsp. [5] jest modelem prostym i łatwym w użyciu. Jeśli zamiast średnicy okna, zaproponowanej przez autorów [5], zastosujemy średnicę komórki jako wymiar charakterystyczny:

$$S_v = \frac{4\varepsilon}{d_c} \quad (1)$$

wówczas równanie to przybliży eksperymentalnie wyznaczone powierzchnie geometryczne wszystkich badanych w niniejszej pracy pian, ze średnim błędem ok. 14% (rys. 3).

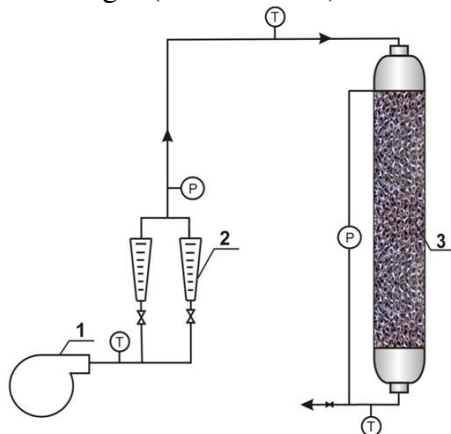


Rys. 3 Porównanie wyników obliczeń powierzchni geometrycznych wg równania (1) z wynikami eksperymentalnymi.

#### IV. OPORY PRZEPLYWU

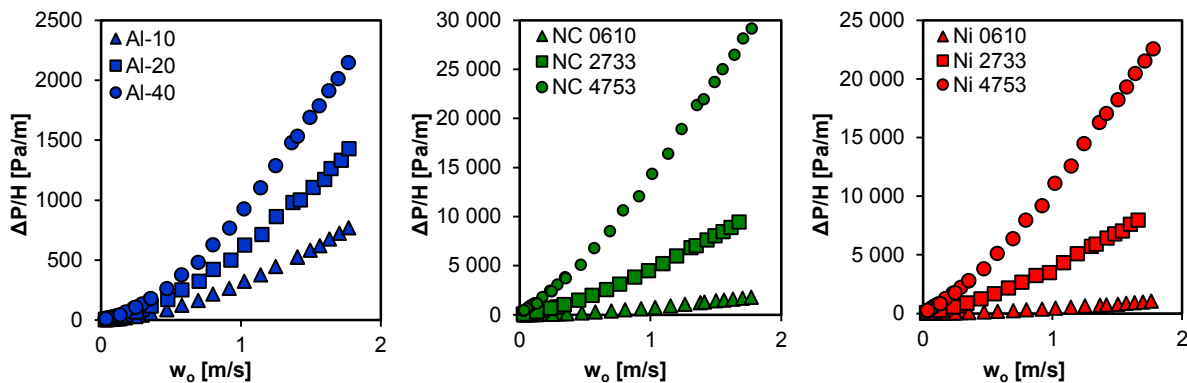
Badania doświadczalne oporów przepływu prowadzono w aparaturze przedstawionej na rys. 4. Głównym elementem instalacji była przezroczysta kolumna o średnicy 0,057 m wykonana z polichlorku winylu. Podczas badań, w kolumnie umieszczano stos krążków pian o średnicy ok. 0,054 m. W celu uniknięcia zafałszowania pomiaru w wyniku przepływu części powietrza pomiędzy złożem piany a ścianą kolumny, piany umieszczono w szczelnie przylegającej do nich koszulce termokurczliwej, co zapewniało dokładne dopasowanie stosu pian do średnicy kolumny. Takie przygotowanie złoża dawało pewność, że cały strumień powietrza przepływał wyłącznie przez piany stałe.

Fazę gazową stanowiło powietrze, które poprzez układ kalibrowanych rotametrów, tłoczone było do reaktora przy pomocy dmuchawy. W zależności od gęstości piany stosowano prędkości gazu w granicach  $0,03 \div 1,8 \text{ ms}^{-1}$ . Na wlocie i wylocie z reaktora umieszczono po 2 termopary typu K, a komputerowy system pomiarowy służył do mierzenia temperatury w sposób ciągły w trakcie badań. Do pomiaru różnicy ciśnień stosowano mikromanometr Recknagla ( $\Delta P < 850 \text{ Pa}$ ) oraz manometr hydrostatyczny ( $\Delta P \geq 850 \text{ Pa}$ ).



Rys. 4. Schemat aparatury do badania oporów przepływu:  
 1 – dmuchawa,  
 2 – rotametry,  
 3 – kolumna z wypełnieniem,  
 T – termopary,  
 P – manometr (mikromanometr Recknagla lub U-rurka).

Wyniki jednostkowych spadków ciśnienia ( $\Delta P/H$ ) dla pian Al, NC i Ni przedstawiono na rys.5.



Rys. 5 Opory przepływu przez piany Al, NC i Ni.

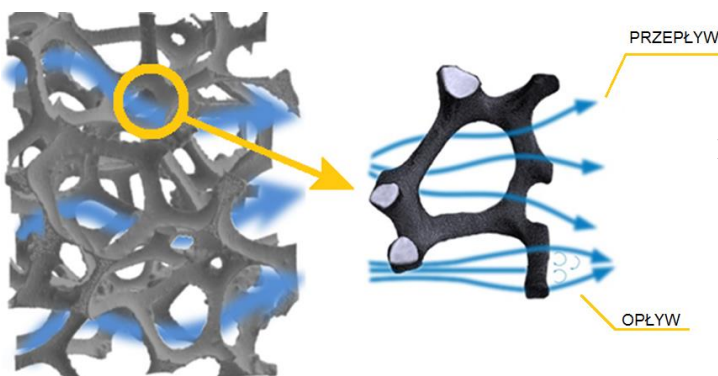
Jak można zauważyć, opory przepływu rosną ze wzrostem prędkości gazu oraz ze wzrostem gęstości porów (a zatem ze zmniejszaniem się średnicy porów).

*Potwierdza to postawioną tezę nr 1, że morfologia pian stałych ma istotny wpływ na charakterystyki hydrodynamiczne tych struktur.*

## V. MECHANIZM PRZEPIYU PRZEZ PIANY STAŁE

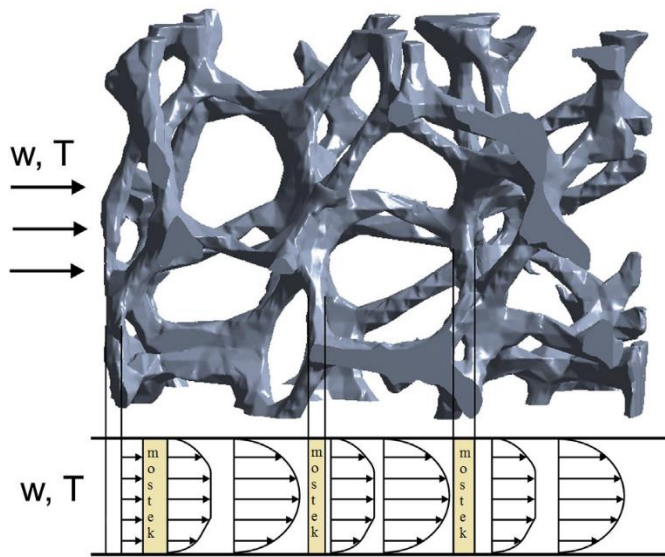
Pomimo wielu badań przedstawionych w literaturze, do tej pory problem mechanizmu przepływu przez piany stałe nie był poruszany. Tymczasem jego zrozumienie wydaje się być fundamentalną kwestią dla poprawnego opisu transportu pędu, ciepła i masy, a tym samym zaawansowanego modelowania, np. procesów katalitycznych prowadzonych na pianach stałych, jako strukturalnych nośnikach warstwy aktywnej.

Szkielet piany składa się z wielu małych mostków, które, połączone węzłami, tworzą przestrzenną, trójwymiarową strukturę. Sugerować może to opływ ciała stałego (tj. mostków i węzłów). Z drugiej jednak strony, mostki dzielą przestrzeń piany na komórki połączone za pośrednictwem okien, które można traktować jako bardzo krótkie kapilary. Wizualizację przepływu płynu przez piany przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6 Wizualizacje rozważanych mechanizmów przepływu przez piany: przepływu przez krótką kapilarę oraz opływu ciała stałego.

Biorąc pod uwagę strukturę pian stałych, można założyć, że mamy do czynienia ze stale rozwijającym się przepływem laminarnym, co przedstawiono schematycznie na rys. 7. Wydaje się, że powyższe założenie jest zgodne z naturą przepływu płynu w pianach: profile prędkości,  $w$ , i temperatury,  $T$ , są stale zakłócone przez mostki, więc profile te nieustannie muszą się rozwijać.



Rys. 7 Rozwijające się profile prędkości i temperatury w pianach stałych.

Dlatego do wyznaczenia współczynników oporu hydraulicznego Fanninga,  $f$ , zastosowano rozwiązanie teoretyczne Shaha [8] dla kanału okrągłego dla rozwijającego się przepływu laminarnego:

$$f = \frac{3,44}{Re(L^+)^{1/2}} + \frac{16 + 1,25/(4L^+) - 3,44(L^+)^{-1/2}}{Re(1 + 0,00021(L^+)^{-2})} \quad (2)$$

Bezwymiarową długość kanału  $L^+$  zdefiniowano jako:

$$L^+ = \frac{L}{ReD} \quad (3)$$

Liczba Reynoldsa jest zdefiniowana:

$$Re = \frac{w_0 D \rho}{\varepsilon \eta} \quad (4)$$

Przeanalizowano kilka wariantów średnic i długości kanału. Możliwe są cztery warianty średnicy kanału  $D$ : średnica hydrauliczna (zdefiniowana jako  $D_h = 4\varepsilon/S_v$ ), średnica komórki  $d_c$ , średnica okna  $d_w$ , średnica pora  $d_p$ . Jako długość modelowego kanału  $L$  wzięto pod uwagę: średnicę komórki  $d_c$ , średnicę pora  $d_p$ , średnicę mostka  $d_s$ .

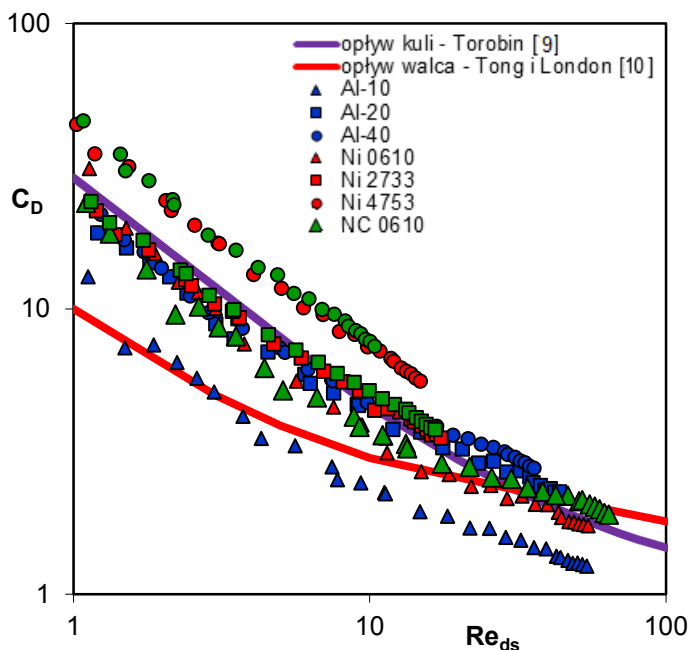
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń, stwierdzono, że najlepszą zgodność z wynikami eksperymentalnymi otrzymano dla średnicy komórki,  $d_c$ , jako średnicy modelowego kanału oraz średnicy mostka,  $d_s$ , jako długości kanału (patrz tabela 2).

$e_{y,śr} [\%], (\sigma)$				
$D \backslash L$	$D_h$	$d_w$	$d_p$	$d_c$
$d_c$	67,21 (6,20)	68,35 (661,80)	36,45 (37,15)	68,09 (3,94)
$d_s$	33,74 (51,83)	155,20 (298,96)	53,41 (130,30)	31,56 (51,36)
$d_p$	60,09 (11,96)	78,57 (547,77)	32,06 (39,04)	62,11 (6,60)

Tabela 2. Błąd średni  $e_{y,śr}$  i odchylenie standardowe  $\sigma$  dla wariantów rozwijającego się przepływu laminarnego w kanale kołowym porównanych z eksperymentalnymi współczynnikami oporów hydraulicznych Fanninga dla wszystkich badanych pian.



Drugim rozpatrywanym mechanizmem był opływ ciała stałego, tj. opływ kuli oraz opływ nieskończenie długiego walca. Patrząc na strukturę piany stałej (rys. 2), opływ wokół walca wydaje się, intuicyjnie, właściwym podejściem charakteryzującym opływ wokół mostków piany. Z kolei opływ wokół kuli może reprezentować opływ węzła piany. Wymiary węzłów są trudne do zdefiniowania, jednak są one niewątpliwie proporcjonalne do średnicy mostka. Zatem w obu przypadkach (przepływ wokół walca i kuli) przyjęto średnicę mostka jako charakterystyczny wymiar, co jest świadomym uproszczeniem. Wyniki przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8 Model mechanizmu opływu wokół ciała stałego: eksperymentalny współczynnik oporu  $C_D$  w funkcji liczby Reynoldsa w porównaniu ze współczynnikiem oporu opływu wokół kuli [9] i walca [10].

Zaobserwowano dobrą zgodność wyników eksperymentalnych współczynnika oporu czołowego,  $C_D$ , dla sześciu pian: Al-20, Al-40, Ni 0610, Ni 2733, NC 0610, NC 2733 z wartościami obliczonymi dla kuli; średni błąd liczony dla tej grupy pian wyniósł poniżej 13%. Natomiast dla piany Al-10 dane eksperymentalne są bliskie wynikom dla walca w zakresie niskich wartości liczby Reynoldsa ( $Re_{ds} < 5$ ) i znacznie mniejsze dla wyższych wartości  $Re_{ds}$ . Z kolei współczynniki oporu  $C_D$  dla pian o najmniejszych średnicach porów (Ni 4753, NC 4753) są większe od wartości właściwych dla walca i kuli.

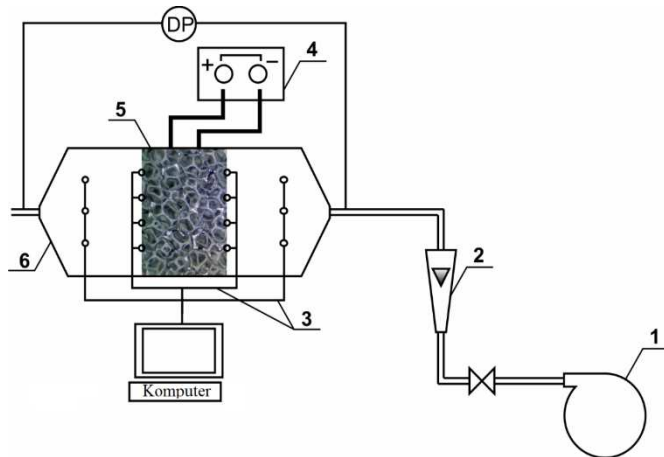
Można zatem stwierdzić, że jeśli dla jednej piany właściwym mechanizmem wydaje się być opływ kuli (NC 2733 i Ni 2733), to dla innej - przepływ przez krótką kapilarę (Al-10). Biorąc pod uwagę wszystkie piany, oba podejścia, mianowicie opływ wokół ciała stałego i przepływ przez krótką kapilarę, odzwierciedlają z podobną dokładnością eksperymentalne współczynniki oporu Fanninga oraz oporu czołowego. Oznacza to, że na podstawie analizy wyłącznie oporów przepływu trudno jednoznacznie wskazać, który z rozważanych mechanizmów przepływu jest mechanizmem dominującym dla pian stałych. Należy podkreślić, że mechanizm ten powinien wyjaśniać zarówno zjawiska transportu masy, ciepła i pędu oraz dostarczać ich ilościowego opisu.

## VI. TRANSPORT CIEPŁA I MASY W PIANACH STAŁYCH

Badania eksperymentalne transportu ciepła prowadzono w laboratoryjnym reaktorze o przekroju prostokątnym, o wymiarach 45x30 mm. Przez reaktor przepływało powietrze, tłoczone za pomocą dmuchawy. Prędkość płynącego gazu zmieniana była w zakresie  $0,07 \div 11,4 \text{ ms}^{-1}$ . W centralnej części reaktora umieszczano badaną pianę metalową w kształcie prostopadłościanu wypełniającego w pełni przekrój poprzeczny reaktora, wymiar

próbki w kierunku przepływu powietrza wynosił 5 lub 10 mm, w zależności od badanej piany. Próbkki metalowych pian ogrzewane były płynącym bezpośrednio przez nie prądem elektrycznym o natężeniu do 150 A. Temperatury przepływającego powietrza oraz powierzchni piany mierzono przy pomocy 14 termopar typu K: po 3 szt. na wlocie i wylocie z reaktora oraz po 4 szt. na wlotowej i wylotowej stronie badanej próbki. Termopary przyklejono do powierzchni piany za pomocą specjalnego kleju, który zapewniał doskonałą izolację elektryczną i dobre przewodnictwo cieplne. Właściwości fizyczne powietrza obliczane były dla średniej temperatury przepływającego gazu.

Schemat instalacji badawczej przedstawiono na rys. 9.



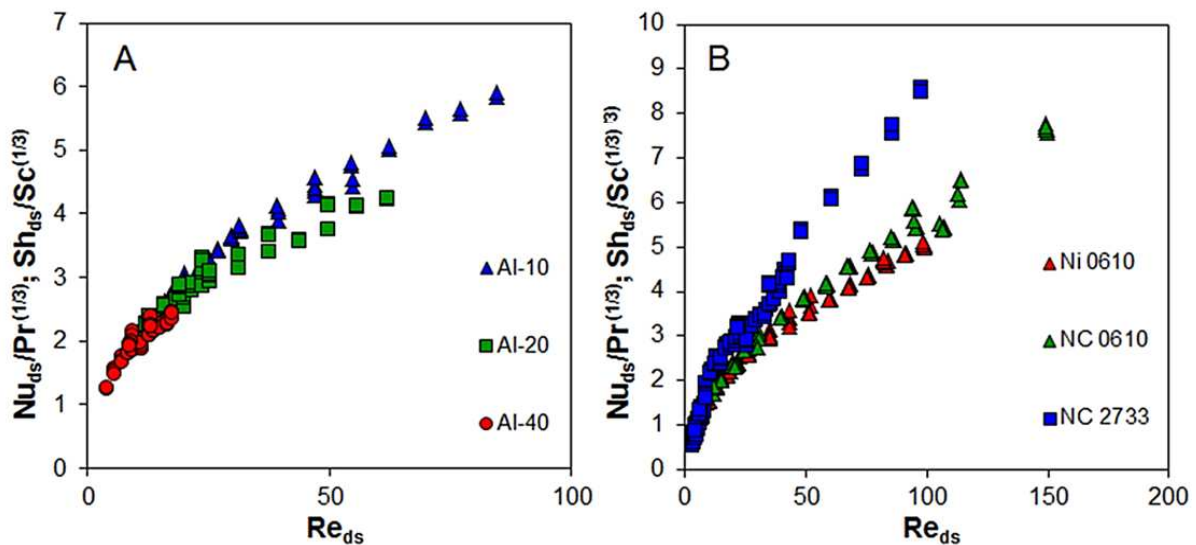
Rys. 9 Schemat instalacji badawczej:  
 DP – pomiar spadku ciśnienia;  
 1 – dmuchawa;  
 2 – rotametr;  
 3 – termopary;  
 4 – źródło prądu elektrycznego;  
 5 – badana piana;  
 6 – reaktor.

Badania transportu ciepła przeprowadzono dla pian Al-10, Al-20, Al-40, Ni 0610, NC 0610 i NC 2733. Dla pozostałych pian, tj. Ni 2733, Ni 4753 i NC 4753, ze względu na ograniczenia aparaturowe nie uzyskano wyników doświadczalnych.

W niniejszej pracy wykonywano wyłącznie badania doświadczalne transportu ciepła, natomiast opis transportu masy uzyskano stosując analogię Chiltona - Colburna. Na podstawie tej analogii można zapisać:

$$Nu/Pr^{1/3} = Sh/Sc^{1/3} = f(Re) \quad (5)$$

Wyniki badań transportu ciepła i masy dla wszystkich badanych pian przedstawiono w postaci zależności  $(Nu_{ds}/Pr^{1/3}; Sh_{ds}/Sc^{1/3}) = f(Re_{ds})$  na rys. 10.



Rys. 10 Wnikanie ciepła i masy dla metalowych pian stałych: piany aluminiowe (A), piany NC i Ni (B). Liczby kryterialne zdefiniowano stosując średnicę  $d_s$  jako wymiar poprzeczny.

Jak można zauważyć, wartości  $(Nu_{ds}/Pr^{1/3})$  i  $(Sh_{ds}/Sc^{1/3})$  rosną ze wzrostem  $Re_{ds}$ . Zależność pomiędzy transportem ciepła a gęstością porów (PPI) można zaobserwować przede wszystkim w przypadku pian NC, gdzie wyraźnie widać wzrost wartości wnikania ciepła wraz ze wzrostem gęstości porów piany. Można zatem stwierdzić, że parametry morfologiczne badanych pian wpływają na transport ciepła.

*Potwierdza to postawioną tezę nr 1, że morfologia pian stałych ma istotny wpływ na charakterystyki transportowe tych struktur.*

## VII. RÓWNANIE LÉVÊQUE'A ORAZ WERYFIKACJA MECHANIZMU PRZEPLYWU DLA PIAN STAŁYCH

Uogólnione równanie Lévêque'a (ang. *Generalized Lévêque Equation*, GLE) można stosować zarówno dla przypadku opływu wokół ciała stałego (kuli lub walca), jak również dla przepływu przez krótką kapilarę. Dlatego, podobnie jak w przypadku określania mechanizmu przepływu, przeanalizowano oba przypadki, które, jak wcześniej stwierdzono, dla pian stałych są równie prawdopodobne.

Przy rozpatrywaniu przypadków opływu wokół ciała stałego wykorzystano zaproponowane przez Martina [11] równanie opisujące współczynnik oporu lepkiego dla kuli  $C_{F,sph}$ :

$$C_{F,sph} = \frac{16}{Re_{ds}} + \frac{3,73}{\sqrt{Re_{ds}}} + 0,03 \quad (6)$$

natomiast dla walca Martin [11] zaproponował równanie:

$$C_{F,cyl} = \frac{3,4}{Re_{ds}^{0,89}} + \frac{1,96}{\sqrt{Re_{ds}}} + 0,03 \quad (7)$$

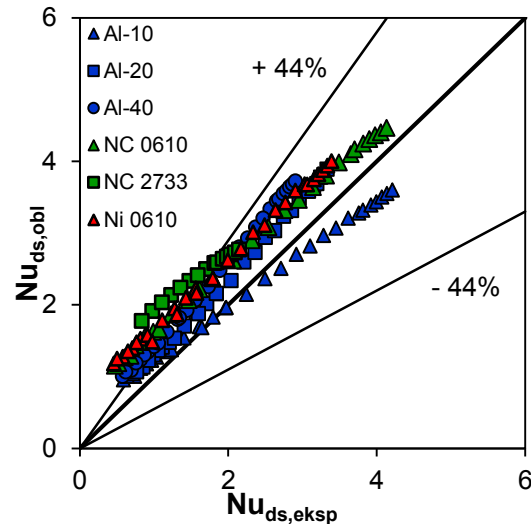
Biorąc pod uwagę złożoną strukturę piany stałej, dla modelowania opływu wokół walca (mostka) konieczne jest przyjęcie pewnych uproszczeń. Zakładając jednokierunkowy przepływ płynu przez trójwymiarową strukturę piany stałej (rys. 11) (wektor prędkości gazu jest równoległy do osi x, a prostopadły do y i z), można przyjąć, że wektor prędkości jest prostopadły do 2/3 statystycznej liczby mostków i równoległy do 1/3 ich liczby, co schematycznie przedstawiono na rys. 11. Oznacza to, że tylko 2/3 liczby wszystkich mostków bierze efektywny udział w transporcie ciepła, stąd w równaniu GLE dla opływu wokół walca uwzględniono tylko 2/3 wartości  $C_F$ , otrzymując:

$$Nu_{ds} = 0,4038 \left( \frac{2}{3} C_F Re_{ds}^2 Pr \frac{4A_C}{A} \right)^{1/3} + Nu_0 \quad (8)$$

Model opływu walca w sposób zadowalający przybliżył dane eksperymentalne (błąd średni  $e_{y,śr} = 44,82\%$ ), zwłaszcza dla większych wartości liczb Reynoldsa (rys. 12). Model opływu wokół kuli dał nieakceptowalnie wysoki błąd i znaczną rozbieżność wyników eksperymentalnych od modelu (błąd średni  $e_{y,śr} = 203,09\%$ ).



Rys. 11 Wizualizacja rozkładu porów w przestrzennym układzie współrzędnych



Rys. 12 Porównanie liczb Nusselta obliczonych przy użyciu równania Lévêque'a (walec) z wynikami eksperymentalnymi.

Drugim modelem, który poddano analizie, jest laminarny przepływ rozwijający się w krótkim kanale kapilarnym. Również w tym przypadku zostały przyjęte pewne założenia. Rzutując statystyczne pory piany na trójwymiarowy układ współrzędnych (rys. 13) i zakładając, podobnie jak dla opływu wokół walca, że wektory prędkości gazu są równoległe do osi x, a prostopadłe do osi y i z, można przyjąć, że tylko 1/3 liczby statystycznych porów bierze czynny udział w procesie transportu ciepła. Udział w transporcie ciepła pozostałych 2/3 liczby porów wydaje się być mniejszy, bowiem płyn tylko „ślizga” się po ich powierzchni. Dlatego, do równania GLE wprowadzony został współczynnik 1/3. Podejście to jest podobne do statystycznego rozkładu przestrzennego wektorów pędu cząstek, co zastosowano do wprowadzenia równania Clapeyrona.

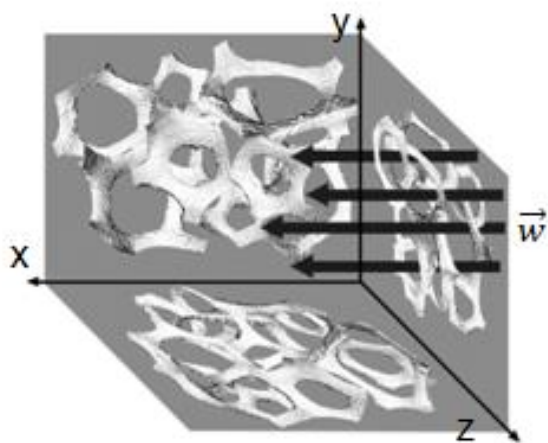
Dla modelu przepływu przez kapilarę, wprowadzając równanie Hawthorne'a [12]:

$$(fRe) = (f_d Re) \left( 1 + \frac{0,045 D Re}{L} \right)^{0,5} \quad (9)$$

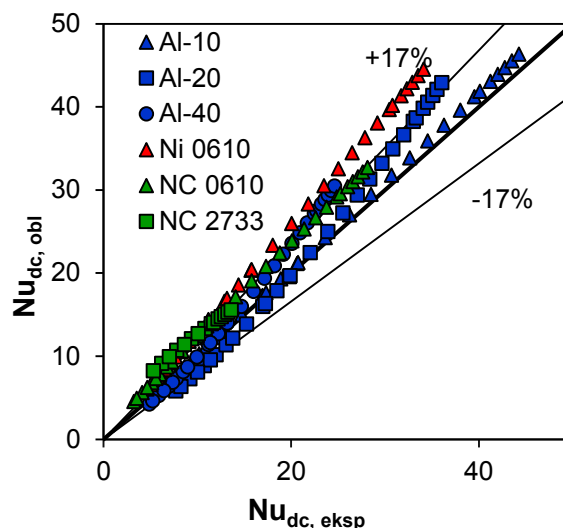
gdzie wartość współczynnika oporu Fanninga dla laminarnego przepływu rozwiniętego wynosi  $(f_d) = 16/Re$ , równanie GLE zyskało postać:

$$\begin{aligned} \frac{Nu}{Pr^{1/3}} = \frac{Sh}{Sc^{1/3}} &= 0,4038 \left[ \frac{1}{3} 4(fRe) Re \frac{D}{L} \right]^{1/3} \\ &= 0,4038 \left[ 21,33 Re \frac{D}{L} \left( 1 + \frac{0,045 D Re}{L} \right)^{0,5} \right]^{1/3} \end{aligned} \quad (10)$$

Satysfakcjonującą zgodność pomiędzy wartościami eksperymentalnymi i obliczonymi uzyskano dla przepływu przez modelową kapilarę o długości równej średnicy (grubości) mostka, co pokazano na **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** Średnica modelowego kanału nie ma istotnego znaczenia, jeśli ta sama średnica stosowana jest w każdym przypadku (liczba  $Re$ ,  $Nu$ ,  $Sh$ , oraz współczynnik Fanninga,  $f$ ).



Rys. 13 Wizualizacja rozkładu porów w przestrzennym układzie współrzędnych.



Rys. 14 Porównanie wyników eksperymentalnych z równaniem L ev eque'a; modelowa średnica kanału  $D = d_c$ , modelowa średnica kanału  $L = d_s$ .

Należy podkre sić, że wsp oczynniki transportu ciepła (masy) dla pian stałych można z dobrą dokładnością opisać równaniem (10), w kt orym zastosowano wyłacznie uogólnione korelacje literaturowe oraz parametry morfologiczne rozważanej piany. Brak jest natomiast jakiegokolwiek dopasowania na podstawie danych eksperymentalnych. Świadczy to o ogólności zaproponowanego rozwi azania, co jest istotnym osiągnięciem tej pracy.

Otrzymane wyniki pozwoliły również zweryfikować wnioski dotyczące mechanizmu przepływu płynu przez złoże pian stałych. Poprawnie określony mechanizm powinien wyjaśniać zjawiska transportu masy, ciepła i p ędu oraz dostarczyć ilościowego opisu tych zjawisk. Warunki te spe ni l mechanizm przepływu przez krótką kapilarę o długości równej średnicy mostka i średnicy równej średnicy komórki lub średnicy hydraulicznej.

*Pozwala to doprecyzować postawioną te z  nr 2:  e w złożonej strukturze piany stałej dominują zjawiska rozwijające się przepływu laminarnego przez krótką kapilarę o długości równej średnicy (grubości) mostka.*

## VIII. WNIOSKI

W pracy przedstawiono obszerne badania morfologii dla dziewięciu pian metalowych (tabela 1), stosując tomografi  komputerową z użyciem progowania globalnego, uzupe lnion  zaawansowanym oprogramowaniem iMorph. Ponadto dla identyfikacji parametrów morfologicznych pian zastosowano mikroskopi  optyczną oraz piknometri  helową.

Dla wszystkich testowanych pian przeprowadzono badania doświadczone oporów przepływu dla fazy gazowej (powietrze). Na podstawie uzyskanych wyników podjęto próbę identyfikacji mechanizmu przepływu przez piany. Rozważano opływ ciała stałego (walca i kuli) oraz laminarny przepływ rozwijający się przez krótką kapilarę (pory piany stałej), lecz uzyskane wyniki były niejednoznaczne.

Dla siedmiu badanych pian wyznaczono doświadczone wsp oczynniki transportu ciepła w fazie gazowej. Natomiast wsp oczynniki transportu masy wyznaczono, stosując analogi  Chiltona - Colburna.

Stosując uogólnione równanie L ev eque'a (GLE), podjęto próbę określenia  cznie mechanizmu przepływu i transportu ciepła (masy) dla pian stałych. Rozważono opływ kuli

i walca oraz przepływ przez krótką kapilarę, stwierdzając, że ten ostatni mechanizm najlepiej opisuje wyniki doświadczalne.

Na podstawie uzyskanych rezultatów wyprowadzono następujące wnioski:

1. Badanie struktury morfologicznej pian z użyciem rentgenowskiej tomografii komputerowej może powodować problemy. Niewłaściwa procedura progowania może powodować powstanie artefaktów – fałszywych porów wewnątrz szkieletu piany – zniekształcając takie parametry morfologiczne, jak porowatość, powierzchnia geometryczna czy średnica mostka. Progowanie globalne jest właściwą metodą progowania dla badania pian stałych metodą TK.
2. W wielu pianach, zależnie od stosowanej technologii produkcji, istnieją rzeczywiste pory wewnątrz szkieletu. W standardowej obróbce obrazów tomograficznych powodują one niedokładne określenie zewnętrznych wymiarów szkieletu piany. Do właściwego opracowania obrazów TK niezbędne są operacje dylatacji (wypełnienie wewnętrznych pustek w szkielecie piany) i erozji (w celu przywrócenia rzeczywistych wymiarów zewnętrznych).
3. Tomografia nie rozróżnia dwóch zasadniczych rodzajów porów pian: komórek i okien. Dla ich identyfikacji konieczna jest ocena wizualna, np. stosując mikroskopię optyczną.
4. Opory przepływu i współczynniki transportu rosną z gęstością porów (PPI) i powierzchnią geometryczną pian, maleją natomiast ze wzrostem średnicy porów, co potwierdza tezę nr 1: właściwości przepływowe i transportowe pian stałych zależą od ich morfologii.
5. Próba identyfikacji mechanizmu przepływu przez piany, przeprowadzona wyłącznie na podstawie badań oporów przepływu, nie przyniosła jednoznacznych wyników wskazujących, który z rozważanych mechanizmów:
  - przepływ przez krótką kapilarę o średnicy  $d_s$ ,
  - opływ walca o średnicy  $d_s$ , lub
  - opływ kuli o średnicy  $d_s$

jest dominujący.

Dokładność poszczególnych modeli była zbliżona, nie pozwalając na jednoznaczne określenie mechanizmu. W przypadku przepływu przez kapilarę, analiza nie uwzględniała oporów inercyjnych, pod uwagę brane były wyłącznie opory lepkie, stąd prawdopodobnie gorsza dokładność.

6. Równoczesny opis zjawisk transportu pędu i ciepła (masy) przy pomocy uogólnionego równania Lévéque'a (GLE) przyniósł jednoznaczną odpowiedź: dla wszystkich badanych pian mechanizmem przepływu i transportu jest rozwijający się przepływ laminarny w krótkim kanale. Długość modelowego kanału bez wątpliwości jest równa średnicy mostka piany. Średnica kanału ma mniejsze znaczenie, może być równa średnicy hydraulicznej  $D_h$ , komórki  $d_c$ , okna piany  $d_w$ . Jest to pierwsza w literaturze próba identyfikacji mechanizmu przepływu przez piany oraz potwierdzenie, a zarazem uściślenie tezy nr 2: w strukturze piany występują zjawiska przepływu przez krótką kapilarę.

## OZNACZENIA

$A$	– pole powierzchni, $m^2$
$A_c$	– pole przekroju poprzecznego przepływu, $m^2$
$D$	– średnica, = $d_c, d_w, d_p, D_h$ , m
$H$	– wysokość złoża, m
$L$	– długość, m
$Nu$	– liczba Nusselta, = $\alpha D \lambda^{-1}$ , -
$\Delta P$	– spadek ciśnienia, Pa
$Pr$	– liczba Prandtla, = $c_p \eta \lambda^{-1}$ , -

$Sc$	– liczba Schmidta, $= \eta \rho^{-1} D_A^{-1}$ , -
$Sh$	– liczba Sherwooda, $= k_c D D_A^{-1}$ , -
$w_0$	– prędkość średnia płynu (na przekrój pustego reaktora), $m s^{-1}$

#### Litery greckie

$\alpha$	– współczynnik wnikania ciepła, $W m^{-2} K^{-1}$
$\eta$	– dynamiczny współczynnik lepkości, $Pa s$
$\lambda$	– współczynnik przewodzenia ciepła, $W m^{-1} K^{-1}$
$\rho$	– gęstość, $kg m^{-3}$
$\sigma$	– odchylenie standardowe, -

#### Indeksy dolne

$cyl$	– odnosi się do walca refers to the cylinder
$d_s$	– odnosi się do średnicy mostka jako wymiaru charakterystycznego liczb kryterialnych
$eksp$	– wartość eksperymentalna
$sph$	– odnosi się do kuli
$obl$	– obliczone z równania

## LITERATURA CYTOWANA

- [1] Hwang, J.-J., et al., *Measurement of Interstitial Convective Heat Transfer and Frictional Drag for Flow Across Metal Foams*. Journal of Heat Transfer, 2002. **124**: p. 120-129.
- [2]. Mancin, S., et al., *Heat transfer during air flow in aluminum foams*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010. **53**(21-22): p. 4976-4984.
- [3] Lefebvre, L.P., J. Banhart, and D.C. Dunand, *Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments*. Advanced Engineering Materials, 2008. **10**(9): p. 775-787.
- [4] Dietrich, B., *Pressure drop correlation for ceramic and metal sponges*. Chemical Engineering Science, 2012. **74**: p. 192-199.
- [5] Richardson, J.T., D. Remue, and J.K. Hung, *Properties of ceramic foam catalyst supports: mass and heat transfer*. Applied Catalysis a-General, 2003. **250**(2): p. 319-329.
- [6] Lacroix, M., et al., *Pressure drop measurements and modeling on SiC foams*. Chemical Engineering Science, 2007. **62**: p. 3259-3267.
- [7] Gibson, L.J. and M. Ashby, F., *Cellular Solids: Structure and Properties*. 1987: Pergamon press.
- [8] Shah, R.K., *A Correlation for Laminar Hydrodynamic Entry Length Solutions for Circular and Noncircular Ducts*. Journal of Fluids Engineering, 1978. **100**: p. 177-179.
- [9] Torobin, L.B. and W.H. Gauvin, *Fundamental aspects of solids-gas flow: Part I: Introductory concepts and idealised sphere motion in viscous regime*. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1959. **37**: p. 129-141.
- [10] Tong, L.S. and A.L. London, *Heat-Transfer and Flow-Friction Characteristics of Woven-Screen and Crossed-Rod Matrixes*. Transactions of the ASME, 1957. **57**: p. 1558-1570.
- [11] Martin, H., *The Lévêque-analogy or how to predict heat and mass transfer from fluid friction, in 4th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, HEFAT2005*. 2005: Cairo, Egypt. p. Paper number: K2.
- [12] Hawthorne, R.D., *Afterburner catalysis – effects of heat and mass transfer between gas and catalyst surface*. AIChE Symposium Series, 1974. **70**: p. 428-438.

## WYKAZ DOROBKU NAUKOWEGO DOKTORANTA

### Publikacje recenzowane w czasopismach z tzw. „listy filadelfijskiej” umieszczonych na liście czasopism

1. J.Ochońska-Kryca, M.Iwaniszyn, **M.Piątek**, P.J.Jodłowski, J.Thomas, A.Kołodziej, J.Łojewska, *Mass transport and kinetics in structured steel foam reactor with Cu-ZSM-5 catalyst for SCR of NO<sub>x</sub> with ammonia*. Catalysis Today, 216, 135-141 (2013). IF=3,309.
2. M.Iwaniszyn, J.Kryca, P.J.Jodłowski, **M.Piątek**, A.Gancarczyk, J.Łojewska, A.Kołodziej,

- Novel intense metallic monolith for automotive applications: Experimental versus numerical studies. Comptes Rendus Chimie*, **18**, 1030-1035 (2015). IF=1,798.
3. J.Kryca, **M.Piątek**, A.Gancarczyk, M.Iwaniszyn, P.Jodłowski, J.Łojewska, A.Kołodziej, *Selektywna katalityczna redukcja tlenków azotu na katalizatorze zeolitowym osadzonym na pianie metalowej. Przemysł Chemiczny*, **9**, 1602-1604 (2015). IF=0,367.
  4. A.Gancarczyk, **M.Piątek**, M.Iwaniszyn, J.Kryca, B.Leszczyński, J.Łojewska, A.Kołodziej: Struktura, wytwarzanie i zastosowanie pian stałych. *Przemysł Chemiczny*, **10**, 1821-1824 (2015). IF=0,367.
  5. R.Dyga, S.Witczak, A.Gancarczyk, **M.Piątek**, M.Jaroszyński, J.Łojewska, A.Kołodziej: Piany metalowe jako alternatywny nośnik katalizatora w silnie egzotermicznych procesach utleniania katalitycznego. *Przemysł Chemiczny*, **10**, 1825-1827 (2015). IF=0,367.
  6. B.Leszczyński, A.Gancarczyk, A.Wróbel, **M.Piątek**, J.Łojewska, A.Kołodziej, R.Pędrys: Global and Local Thresholding Methods Applied to X-ray Microtomographic Analysis of Metallic Foams, *Journal of Nondestructive Evaluation* 35:35 (2016). IF=1,504.
  7. J. Kryca, M. Iwaniszyn, **M. Piątek**, P. J. Jodłowski, R. Jędrzejczyk, R. Pędrys, A. Wróbel, J. Łojewska, A. Kołodziej: Structured Foam Reactor with CuSSZ-13 Catalyst for SCR of NOx with Ammonia, *Topics in Catalysis* **59**, 887–894 (2016). IF=2.486.
  8. M. Iwaniszyn, **M. Piątek**, A. Gancarczyk, P.J. Jodłowski, J. Łojewska, A. Kołodziej, Flow resistance and heat transfer in short channels of metallic monoliths: Experiments versus CFD, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 778–785 (2017). IF=3,458.
  9. **M. Piątek**, A. Gancarczyk, M. Iwaniszyn, P.J. Jodłowski, J. Łojewska, A. Kołodziej, Gas-Phase Flow Resistance of Metal Foams: Experiments and Modeling, *AIChE Journal*, 63, 1799-1803 (2017). IF=3,326.
  10. A. Gancarczyk, **M. Piątek**, M. Iwaniszyn, P. J. Jodłowski, J. Łojewska, J. Kowalska, A. Kołodziej, In Search of Governing Gas Flow Mechanism through Metal Solid Foams, *Catalysts*, 7, 124 (2017). IF=3,465.
  11. A.Gancarczyk, M.Iwaniszyn, **M.Piątek**, K.Sindera, M.Korpyś, P.J.Jodłowski, J.Łojewska, A.Kołodziej: Interfacial heat and momentum transfer relations for porous media. *International Journal of Thermal Sciences*, **132**, 42-51 (2018). IF=3,361.
  12. A.Gancarczyk, M.Iwaniszyn, **M.Piątek**, M.Korpyś, K.Sindera, P.J.Jodłowski, J.Łojewska, A.Kołodziej: Catalytic combustion of low-concentration methane on structured catalyst supports. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **57**, 10281-10291 (2018). IF=3,141.
  13. A. Gancarczyk, K. Sindera, M. Iwaniszyn, **M. Piątek**, W. Macek, P.J. Jodłowski, S. Wroński, M. Sitarz, J. Łojewska, A. Kołodziej: Metal Foams as Novel Catalyst Support in Environmental Processes. *Catalysts*, 9, 587 (2019). IF=3,52.
- A. Gancarczyk, M. Iwaniszyn, P.J. Jodłowski, **M. Piątek**, M. Korpyś, K. Sindera, A. Kołodziej: Heat and Momentum Transfer Analogies in Laminar Flow. *Journal of Heat Transfer*, 141 (2): 024502 (2019). IF=1,602.

Sumaryczny Impact Factor: 31,751  
 index h = 6  
 cytowania: 60