

INSTYTUT INŻYNIERII CHEMICZNEJ  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Rozprawa doktorska

**Opis morfologii oraz wyznaczenie  
współczynników transportu pędu, ciepła i masy  
dla pian stałych**

mgr inż. Marcin Piątek

Promotor:

dr hab. inż. Andrzej Kołodziej

Promotor pomocniczy:

dr inż. Anna Gancarczyk

**GLIWICE 2019**

Pragnę serdecznie podziękować

Promotorom, Panu dr. hab. inż. Andrzejowi Kołodziejowi oraz Pani dr inż. Annie Gancarczyk za wprowadzenie w tematykę pian stałych, cenne wskazówki oraz pomoc i cierpliwość w trakcie tworzenia rozprawy.

Dziękuję także

Pani dr inż. Marzenie Iwaniszyn za okazaną pomoc w realizacji badań eksperymentalnych i wszelkie wsparcie jakiego udzieliła mi w czasie naszej współpracy.

Wszystkim koleżankom i kolegom z Instytutu oraz wszystkim tym którzy przyczynili się do powstania niniejszej pracy.

Szczególne słowa podziękowania składam mojej żonie Alinie za wyrozumiałość i olbrzymie wsparcie.

## Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań morfologii, oporów przepływu, współczynników transportu ciepła i masy dla dziewięciu metalowych pian stałych o otwartej strukturze porów, co było celem niniejszej pracy. Parametry te są niezbędne w przypadku zastosowania pian stałych w roli strukturalnego nośnika katalizatorów: Morfologię pian - w tym ich powierzchnię geometryczną, porowatość, wymiary porów (komórek i okien) i mostków - określono na podstawie badań mikrotomografią rentgenowską, uzupełnionych mikroskopią optyczną i porozymetrią helową. Rozwiązano istotny problem wewnętrznych porów w szkielecie piany – zarówno rzeczywistych, jak też artefaktów produkowanych przez procedurę tomograficzną. Przeprowadzono badania doświadczalne oporów przepływu powietrza w warunkach otoczenia; wyniki porównano z pracami innych badaczy, rekomendując do ich opisu teoretyczne równanie Inayata i wsp. [74]. Współczynniki wnikania ciepła zmierzono, ogrzewając piany prądem elektrycznym o dużym natężeniu (do 150 A), przepływającym bezpośrednio przez szkielec piany; temperatury przepływającego powietrza i powierzchni piany mierzono miniaturowymi termoparami. Wyniki porównano z dostępną literaturą i opisano równaniem korelacyjnym, stosując średnicę mostka piany jako wymiar poprzeczny w liczbach kryterialnych. Opis transportu masy uzyskano, stosując analogię Chiltona-Colburna. Wyniki potwierdziły wysuniętą tezę, że przepływowe i transportowe charakterystyki pian stałych zależą od ich morfologii. W celu określenia mechanizmu przepływu gazu i transportu ciepła (masy) dla pian rozważono przypadki opływu ciała stałego (kuli i walca) reprezentującego szkielec piany, a także rozwijający się przepływ laminarny przez krótki kanał kapilarny (model porów piany – komórek i okien). Rozważenie wyłącznie oporów przepływu nie przyniosło jednoznacznej odpowiedzi, który mechanizm jest właściwy. Wykorzystując uogólnione równanie L  v  que'a (GLE) rozważono oba mechanizmy („przepływ” i „opływ”), określając współczynniki oporu przepływu na podstawie zależności teoretycznych. Stwierdzono, że zarówno opory przepływu, jak i transport ciepła (masy) dla pian stałych mogą być opisane z zadowalającą dokładnością przy pomocy modelu rozwijającego się przepływu laminarnego w krótkim kanale kapilarnym – o średnicy równej średnicy komórki piany  $d_c$  oraz długości równej średnicy mostka piany  $d_s$ . Jest to pierwsze w literaturze określenie mechanizmów przepływu i transportu dla pian stałych.

## **Abstract**

The results of morphology, flow resistance, heat and mass transport coefficients for nine solid metal foams with an open pore structure were presented, which was the purpose of this work. These parameters are necessary for using solid foams as a structured catalyst carriers: Foams morphology - including their geometric surface area, porosity, pores (cells and windows) and struts dimensions - were determined using X-ray computer microtomography. Optical microscopy and helium porosimetry were also used to determine morphological parameters. An important problem of internal pores in the foam skeleton - both real and artifacts produced by the tomographic procedure - has been solved. Experimental studies of air flow resistance in ambient conditions were performed; the results were compared with the work of other researchers, recommending the theoretical equation of Inayat et al. [74] for description the pressure drop in solid foams. The heat transfer coefficients were measured by heating the foams with high intensity electric current (up to 150 A) flowing directly through the foam skeleton; air and foam surface temperatures were measured with miniature thermocouples. The results were compared with the available literature and described by a correlation equation, using the foam strut diameter as the transverse dimension in characteristic numbers. Description of mass transport was obtained using the Chilton-Colburn analogy. The results confirmed the advanced thesis that flow and transport characteristics of solid foams depend on their morphology. In order to determine the mechanism of gas flow and heat (mass) transport for foams, the flow around a submerged objects (a sphere or a cylinder) representing the foam skeleton, as well as developing laminar flow through a short capillary channel (foam pores model - cells and windows) were considered. Consideration of flow resistance alone did not provide a clear answer, which mechanism is correct. Using the generalized Lévêque equation (GLE), both mechanisms ("flow around" and "flow through") were considered, determining flow resistance coefficients based on theoretical relationships. It has been found that both the pressure drop and the heat/mass transfer for solid foams may be satisfactory described using the model of developing laminar flow in short capillary channel – the cell diameter of the foam – which length equals to the strut diameter. This is the first one the literature describes the mechanisms of flow and transport for solid foams.

## Spis treści

1. Charakterystyka pian stałych .....	7
1.1. Metody otrzymywania pian stałych .....	7
1.2. Właściwości pian stałych .....	9
1.3. Zastosowanie pian stałych .....	11
2. Cel i zakres pracy, tezy badawcze .....	17
2.1. Badane piany .....	17
2.2. Tezy pracy .....	18
3. Morfologia pian stałych .....	19
3.1. Elementy morfologii pian stałych .....	19
3.2. Metody badań morfologii pian .....	20
3.3. Metody badawcze stosowane w pracy .....	25
3.3.1. Tomografia komputerowa .....	25
3.3.2. Mikroskopia optyczna .....	26
3.3.3. Piknometria helowa .....	27
3.4. Wyniki badań morfologii pian stałych .....	27
3.5. Modele geometryczne pian stałych .....	37
4. Opory przepływu przez złożę pian stałych .....	46
4.1. Aktualny stan wiedzy .....	46
4.2. Aparatura badawcza i metodyka prowadzenia badań eksperymentalnych .....	52
4.3. Wyniki badań oporów przepływu .....	53
4.4. Mechanizm przepływu przez piany stałe .....	59
4.4.1. Przepływ przez krótką kapilarę .....	60
4.4.2. Opływ ciała stałego .....	64
5. Transport ciepła i masy w pianach stałych .....	69
5.1. Znaczenie i powiązanie transportu ciepła i masy .....	69
5.2. Aktualny stan wiedzy .....	70
5.3. Aparatura badawcza oraz metodyka prowadzenia badań .....	75
5.4. Wyniki badań .....	77
6. Analogie transportu pędu, ciepła i masy oraz mechanizm przepływu i transportu dla pian stałych .....	84
6.1. Podstawowe informacje. Aktualny stan wiedzy .....	84
6.2. Równanie Lévêque'a – opływ ciała stałego .....	90
6.3. Równanie Lévêque'a – przepływ przez kapilarę .....	93

7. Podsumowanie i wnioski.....	100
Summary and conclusions.....	102
SPIS LITERATURY .....	104
Oznaczenia .....	113

# 1. Charakterystyka pian stałych

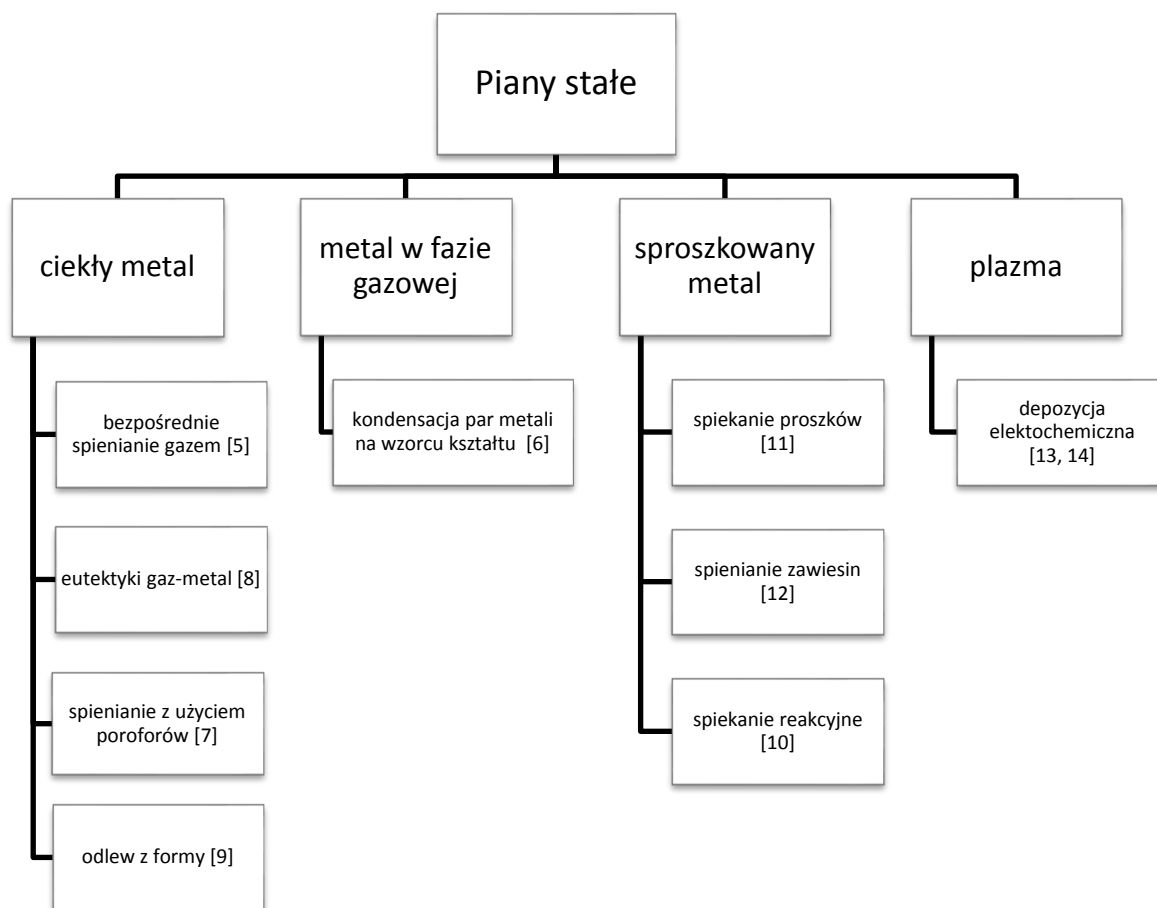
## 1.1. Metody otrzymywania pian stałych

Pod pojęciem „piany stałe” rozumie się porowate materiały, które stanowią nowoczesną grupę materiałów inżynierskich. Wzrost zainteresowania tymi strukturami obserwuje się od połowy lat dziewięćdziesiątych XX w. [1, 2], jednak pierwsze wzmianki pochodzą z 1925 r. [1] i lat czterdziestych ubiegłego wieku [3], kiedy to zgłoszono pierwsze patenty dotyczące metod ich produkcji. Od tego czasu liczba prac obejmujących piany stałe systematycznie rośnie, a od 2010 r. wzrost ten jest jeszcze gwałtowniejszy, osiągając wartość ponad 500 prac w 2016 r. Tak duże zainteresowanie spowodowane jest korzystnymi właściwościami pian stałych oraz możliwością ich stosowania w wielu różnych dziedzinach: od medycyny po wykorzystanie w technologii kosmicznej.

Istotną zaletą pian stałych jest fakt, że mogą być wykonane z niemal dowolnych materiałów. Na rynku dostępne są piany: metalowe (aluminiowe, chromoniklowe, niklowe, miedziane), ceramiczne (z korundu, węgla krzemu, tlenku cyrkonu, mullitu), polimerowe (polistyrenowe, polichlorowinyłowe, polietylenowe), a także szklane i węglowe (amorficzne lub grafitowe).

Istnieje obecnie wiele technologii produkcji pian stałych. Przykładowo, metalowe piany stałe mogą być produkowane metodami, które w uproszczeniu można podzielić na cztery grupy, odnoszące się do czterech stanów skupienia materiału użytego w produkcji [3-5] (rys. 1.1):

- z ciekłego metalu,
- z oparów metalu lub gazowych związków metali,
- ze sproszkowanego metalu,
- z zastosowaniem plazmy.



Rys. 1.1 Przykłady metod wytwarzania metalowych pian stałych z podziałem na stan skupienia materiału wyjściowego [3, 5].

Z kolei do produkcji pian ceramicznych powszechnie używa się dwóch technik produkcji. Pierwsza polega na wykorzystaniu piany polimerowej o otwartej strukturze jako wzorca, który pokrywa się ceramiczną zawiesiną (np. korundem). Nadmiar zawiesiny jest usuwany, następuje suszenie i wyprażanie tak przygotowanej piany [15-18]. W wyniku zastosowania obróbki wysokotemperaturowej ceramika przybiera ostateczną formę, natomiast piana polimerowa stanowiąca wzorzec kształtu zostaje wypalona. Drugą metodą produkcji, analogiczną do metody otrzymywania pian z metali ciekłych, jest wprowadzenie do ceramicznej zawiesiny gazu (w wyniku mechanicznego spieniania bądź bezpośredniego wtryskiwania strumienia gazu) lub dodanie środków spieniających (poroforów), które w trakcie procesu produkcji wytwarzają pęcherzyki gazu [15, 19-21].

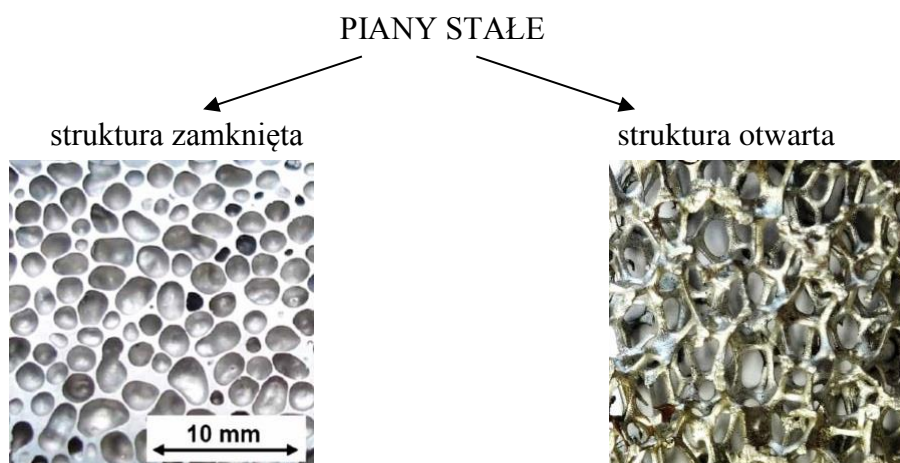
Do produkcji pian węglowych wykorzystywane są wysokotemperaturowe metody przetwarzania. Piany polimerowe poddaje się procesowi pirolizy, czego rezultatem jest szklista piana węglowa (ang. *Reticulated Vitreous Carbon, RVC*), zachowująca kształt piany polimerowej wykorzystanej w procesie produkcji [22, 23].



Z przytoczonych przykładów wyraźnie widać, że piany polimerowe często wykorzystuje się jako „substrat” do produkcji pian z innych materiałów. Metoda produkcji pian polimerowych jest analogiczna do metod omówionych powyżej dla fazy ciekłej jako materiału wyjściowego, służącego do produkcji pozostałych pian. Najczęściej stosowana jest metoda spieniania gorącego polimeru strumieniem gazu, dodatkami poroforów lub przez wprowadzenie do mieszaniny reakcyjnej wody [24].

## 1.2. Właściwości pian stałych

W zależności od metody produkcji, możemy otrzymać piany o dwóch różnych strukturach porów, tj. zamkniętą lub otwartą (rys. 1.2).



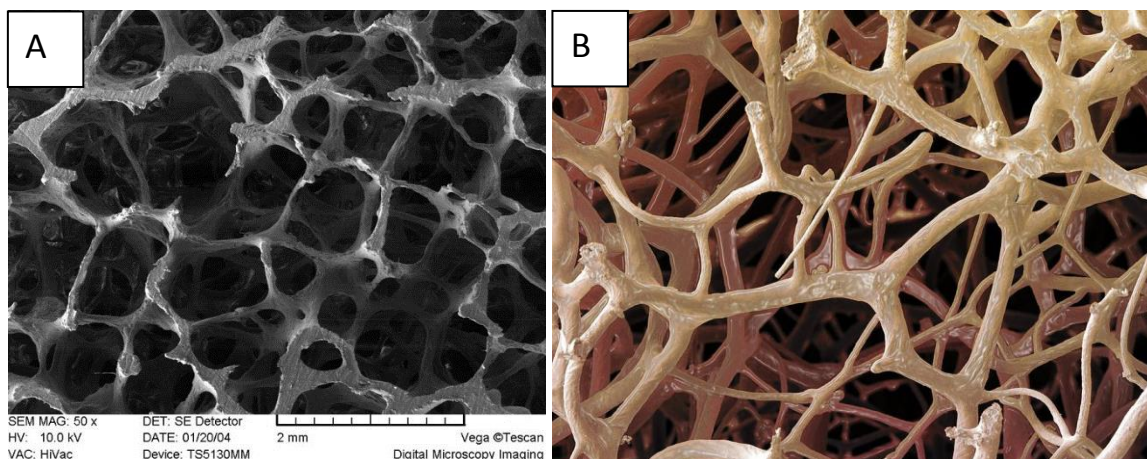
Rys. 1.2 Podział pian stałych ze względu na strukturę ich porów.

W stosunku do pian o zamkniętej strukturze termin „piana” jest w pełni adekwatny. Jest to klasyczny układ, w którym pęcherzyki gazu (faza rozproszona) są od siebie odizolowane materiałem stałym (faza rozpraszająca), jak to ma miejsce np. w pianie mydlanej, morskiej czy piwnej (rys. 1.3).



Rys. 1.3 Przykładowe zdjęcia pian: mydlanej (A), morskiej (B), piwnej (C).

W odniesieniu do pian o strukturze otwartej pojęciem bardziej precyzyjnym jest termin „gąbka” [16], który w pełni odzwierciedla ich budowę, podobną do struktury np. kości czy gąbki naturalnej (rys. 1.4). Do niedawna w literaturze, w szczególności z przełomu XX/XXI wieku, pojęcia „piana stała” (ang. *solid foam*) oraz „gąbka” (ang. *sponge*) stosowano zamiennie. Ostatecznie jednak na stałe przyjęło się pojęcie „piana stała”, które określa zarówno piany o strukturze zamkniętej, jak i otwartej.



Rys. 1.4 Zdjęcie ludzkiej kości (A) [25] oraz gąbki naturalnej (B) [26].

Należy podkreślić, że spienienie materiału lekkiego powoduje istotne zmiany jego właściwości. Piany wykazują znaczący wzrost elastyczności, natomiast przewodność cieplna i elektryczna, moduł Younga, wytrzymałość na rozciąganie są często mniejsze w porównaniu do lekkiego materiału [3].

Piany o otwartej strukturze porów posiadają specyficzne właściwości, jak:

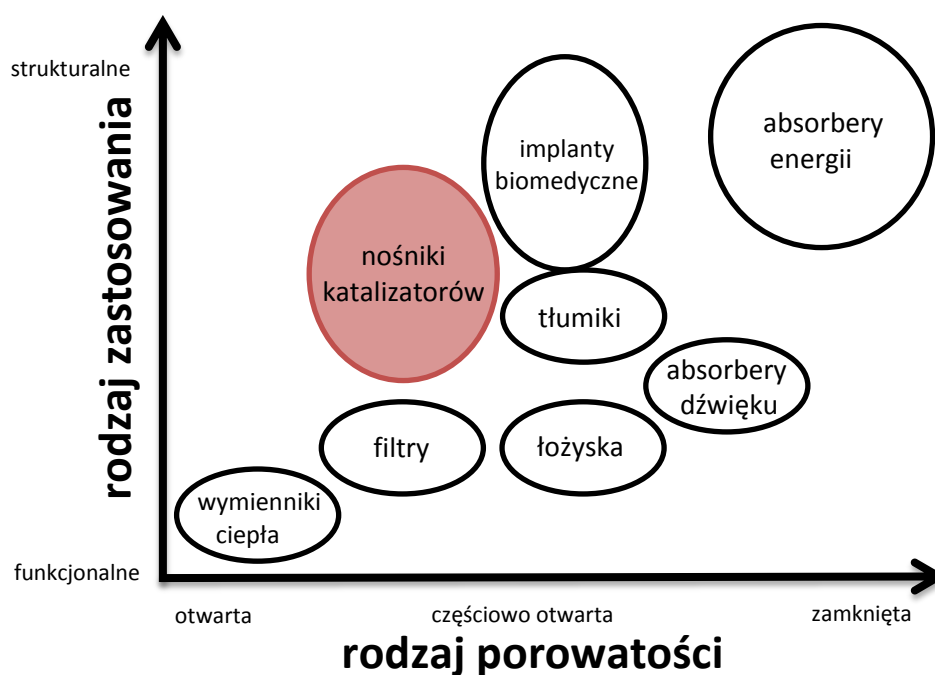
- znaczna wolna objętość (porowatość), dochodząca do 97% [27, 28],
- duża powierzchnia geometryczna [1, 29],
- intensywny transport ciepła i masy pomiędzy przepływającym płynem a szkieletem piany [30],
- niewielki ciężar właściwy [31], będący następstwem dużej porowatości.

Piany stałe były wielokrotnie porównywane do tradycyjnych wypełnień reaktorów. Liczne prace zwracają uwagę, że pod względem współczynnika wnikania masy i oporów przepływu piany można umiejscowić pomiędzy złożem ziaren katalizatora a monolitami o podobnej powierzchni geometrycznej [32, 33]. Literatura wskazuje na przewagę pian stałych nad złożem ziaren w postaci znacznie mniejszych oporów przepływu, przy akceptowalnej wydajności prowadzonego procesu [32-34]. Patcas i wsp. [33] podkreślili

ponadto intensywniejszy transport ciepła w pianach stałych w porównaniu do ceramicznego monolitu i zdecydowanie lepsze właściwości mieszające.

### 1.3. Zastosowanie pian stałych

Piany stałe, zarówno o zamkniętej, jak i otwartej strukturze porów, są szeroko stosowane w różnych gałęziach przemysłu. Piany ceramiczne od wielu już lat są powszechnie stosowane w przemyśle metalurgicznym jako filtry zanieczyszczeń stałych w procesach przetwórstwa ciekłych metali [35]. Rozważane są również jako termiczna izolacja pieców wysokotemperaturowych [36], wykorzystywanych do produkcji stali, szkła czy cementu. Piany metalowe wykorzystywane są w procesach wymiany ciepła, stosuje się je w wymiennikach ciepła w zastępstwie ożebrowania, jako radiatory mikroprocesorów o dużej mocy w urządzeniach elektronicznych [37]. Ponadto znane są badania nad wykorzystaniem pian jako absorberów energii zderzeń [38] (w tym zastosowania wojskowe), a także jako konstrukcje nośne i elementy elewacji (budownictwo) [3]. Inne zastosowania pian stałych to elementy palników gazowych, separatory oleju, elektrody w niektórych procesach elektrochemicznych, elementy akumulatorów i ogniw paliwowych [39], elementy konstrukcyjne samolotów [40, 41] i samochodów, czy jako implanty kości w medycynie [3]. Potencjalne zastosowania pian stałych, w szczególności pian metalowych, z uwzględnieniem ich struktury przedstawiono na rys. 1.5.

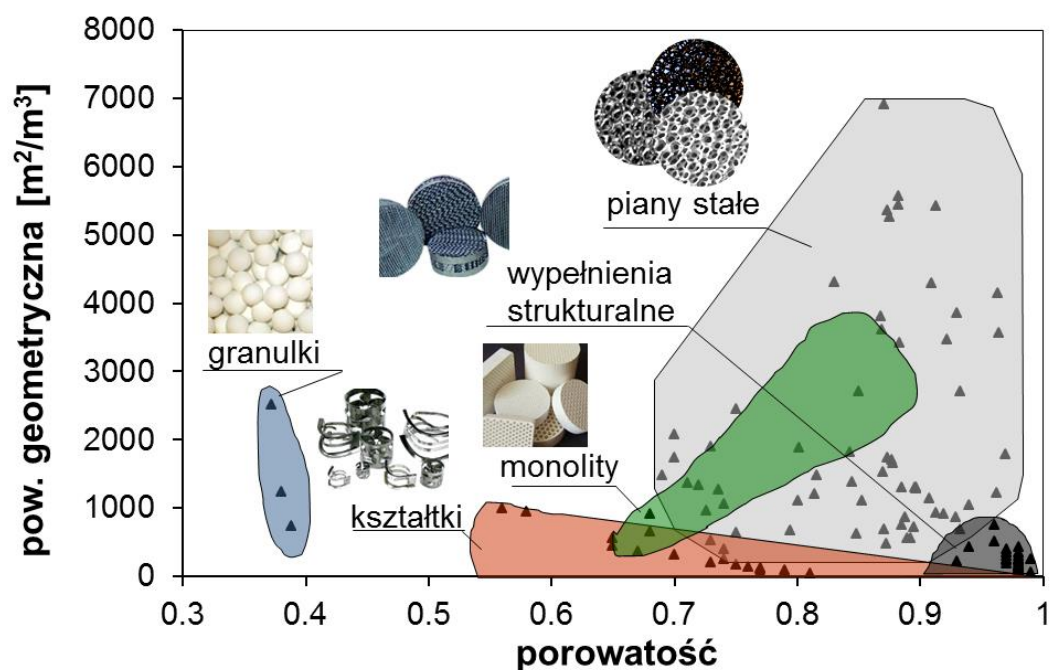


Rys. 1.5 Zastosowanie pian stałych w zależności od rodzaju porowatości [3].

Jak można zauważyć, piany stałe są brane pod uwagę również jako wypełnienie strukturalne reaktorów chemicznych (strukturalny nośnik katalizatora). W tym przypadku rozważane są piany o otwartej strukturze komórek. W przemyśle chemicznym, rafineryjnym czy w ochronie środowiska powszechnie stosowane są klasyczne reaktory ze złożem usypanym z ziaren katalizatora. Zaletą tego rozwiązania jest znaczna intensywność transportu ciepła i masy do powierzchni ziaren, łatwość wymiany materiału katalitycznego oraz stosunkowo niskie nakłady inwestycyjne. Technologia ta jest jednak ograniczona małą wolną objętością złoża (rzędu  $0,3 \div 0,6$  [42]), co skutkuje dużymi oporami przepływu [42] i zwiększa tym samym koszty eksploatacyjne [16]. Oporo przepływu są tym większe, im mniejsza jest średnica stosowanych ziaren, co preferowałoby raczej stosowanie ziaren większych. Jednak wówczas zdecydowanie zmniejsza się powierzchnia kontaktu płyn-katalizator, a ponadto, zwłaszcza dla szybkich reakcji katalitycznych, wydajność procesu zostaje ograniczona oporami dyfuzji wewnętrznej i w rezultacie wykorzystana jest tylko zewnętrzna warstwa materiału katalitycznego. Alternatywnym rozwiązaniem są tzw. „*egg shell catalysts*”. W tym rozwiązaniu stosuje się nieporowate ziarna katalityczne, na powierzchni których naniesiona jest cienka warstwa porowatej ceramiki, tzw. „washcoatu” ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), z osadzonym na jej powierzchni aktywnym katalizatorem. To rozwiązanie prowadzi do istotnych oszczędności drogich metali szlachetnych, lecz nie usuwa zasadniczej wady złożeń usypanych – dużych oporów przepływu.

Drugim, powszechnie stosowanym rozwiązaniem są reaktory z ceramicznym wypełnieniem monolitycznym. Dzięki regularnej budowie, monolity charakteryzują się dużo mniejszymi oporami przepływu niż tradycyjne reaktory ze złożem ziaren usypanych [33, 43]. Kanały monolitów mają najczęściej kwadratowy, prostokątny lub trójkątny kształt przekroju poprzecznego, przy czym dodatkowe modyfikacje kształtu – jak żebra wewnętrzne – pozwalają na zwiększenie powierzchni geometrycznej przy zachowaniu niewielkich oporów przepływu [43]. Niestety, monolity nie są pozbawione wad. Charakteryzują się one małą intensywnością transportu ciepła i masy do powierzchni katalizatora, co stanowi istotne ograniczenie dla szybkich procesów, jak np. dopalanie katalityczne.

W istniejącej sytuacji prowadzone są intensywne prace nad nowymi typami wypełnień strukturalnych reaktorów katalitycznych, które mogą zachować zalety rozwiązań już znanych, jednocześnie unikając ich wad, tzn. łączyć intensywny transport masy z akceptowalnymi ekonomicznie oporami przepływu przy zachowaniu rozwiniętej powierzchni wypełnienia. Porównanie najpopularniejszych wypełnień przedstawiono na rys. 1.6.



Rys. 1.6 Właściwości najpopularniejszych wypełnień reaktorów chemicznych.

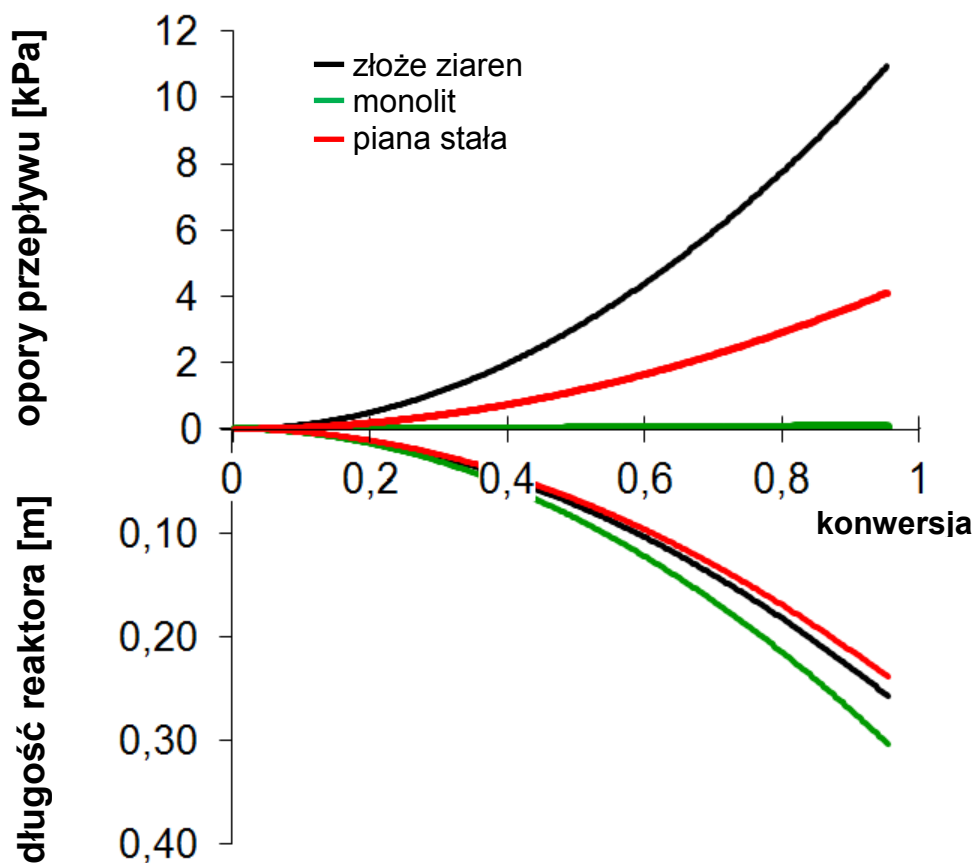
Z zestawienia wynika, że zainteresowanie pianami stałymi jako wypełnieniem strukturalnych reaktorów katalitycznych jest w pełni uzasadnione. Łącząc dużą wolną objętość, która przekłada się na relatywnie niskie opory przepływu, ze znaczną powierzchnią geometryczną, piany są potencjalnym rozwiązaniem pośrednim pomiędzy tradycyjnym złożem ziaren usypanych a monolitami.

Piany stałe z powodzeniem testowano jako nośnik katalizatora dla wielu reakcji chemicznych, jak np. utlenianie tlenku węgla [15, 16, 32-34, 44-49]. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że katalizator osadzony na pianie stałej wykazuje większą wydajność przy redukcji zanieczyszczeń pochodzących z silnika diesla w porównaniu z monolitem o takiej samej warstwie aktywnej katalizatora (Pestryakov i wsp. [49], piany metalowe, np. NiCr; katalizator Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lub Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; temperatura procesu 150-350°C). W praktyce oznacza to, że przy tej samej konwersji dla pewnego procesu reaktor wypełniony pianą stałą może być wyraźnie krótszy, niż reaktor monolityczny [49]. Podobne wnioski otrzymali również Giani i wsp. [32] dla procesu utleniania CO, porównując pianę metalową ze złożem usypanych ziaren katalizatora oraz monolitem ceramicznym (piana Porvair FeCrAl 10, 20, 40 PPI; katalizator Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; temperatura procesu 300÷450°C). Peng i Richardson [50] zaproponowali procesy, dla których zastosowanie ceramicznych pian stałych jako nośników katalizatora może okazać się korzystne (tabela 1).

Tabela 1. Procesy, dla których zastosowanie ceramicznych pian stałych może być korzystne (zestawienie wg [50]).

Charakter reakcji	Rodzaj reakcji	Przykład reakcji
reakcja egzotermiczna	utlenianie	<ul style="list-style-type: none"> <li>etylen do tlenku etylenu</li> <li>o-ksylen do bezwodnika ftalowego</li> <li>propen do kwasu akrylowego</li> <li>butan do bezwodnika maleinowego</li> <li>metanol do formaldehydu</li> </ul>
	alkilowanie	<ul style="list-style-type: none"> <li>benzen do etylobenzenu, dietylobenzenu lub kumenu</li> </ul>
	przegrupowanie oksydacyjne	<ul style="list-style-type: none"> <li>konwersja tlenku węgla parą wodną</li> </ul>
	oksychlorowanie	<ul style="list-style-type: none"> <li>kwas octowy do octanu winylu</li> <li>etylen do dichlorku etylenu</li> </ul>
	uwodornienie	<ul style="list-style-type: none"> <li>synteza metanolu</li> <li>metanizacja CO/CO<sub>2</sub></li> <li>synteza Fischera-Tropscha</li> </ul>
reakcja endotermiczna	dehydrogenacja	<ul style="list-style-type: none"> <li>etylobenzen do styrenu</li> <li>cykloheksan do benzenu</li> <li>cykloheksanol do cykloheksanonu</li> <li>butanol do ketonu metylowo-etylowego</li> </ul>
	reforming parowy	<ul style="list-style-type: none"> <li>gaz ziemny do gazu syntezowego</li> <li>benzyna do gazu syntezowego</li> </ul>

Również modelowanie przeprowadzone dla reakcji pierwszego rzędu potwierdza, że piany stałe stanowią pośrednie rozwiązanie pomiędzy złożem monolitycznym a usypanym (rys. 1.7).



Rys. 1.7 Długość reaktora i opory przepływu dla różnych wypełnień: piana stała, złożo ziaren usypanych, monolit. Kinetyka wg pracy Bennetta i wsp. [51],  $w_0 = const, T = const$ .

Dla poprawnego opisu reakcji chemicznej oraz transportu pędu, ciepła i masy, a tym samym dla zaawansowanego modelowania procesów reakcyjnych, niezbędne jest właściwe zrozumienie mechanizmu przepływu płynu poprzez strukturę piany. Pomimo, że literatura na temat pian jest dość obszerna i dotyczy różnorodnej tematyki, mechanizm przepływu płynu i transportu ciepła (masy) dla pian stałych nie został, jak dotąd, opisany. Dlatego w niniejszej pracy po raz pierwszy podjęto próbę określenia mechanizmu przepływu i transportu. Rozważono tu przepływ przez krótką kapilarę (pory piany) oraz opływ ciała stałego (szkielet piany), czyli zjawiska, które mogą w niej potencjalnie zachodzić, biorąc pod uwagę złożoną strukturę piany stałej.

Problemy transportu ciepła i masy rozpatruje się często, szukając analogii pomiędzy równaniami opisującymi zagadnienia transportu pędu, ciepła i masy. W literaturze znaleźć można wiele analogii, jednak najczęściej stosowanymi są analogie Reynoldsa, Prandtla (analogie transportu pędu i ciepła), Chiltona i Colburna (analogia transportu ciepła i masy), czy równanie L  v  que'a (równanie opisuje transport pędu, ciepła i masy dla przepływu

laminarnego). Jak dotąd, liczba doniesień literaturowych na temat możliwości stosowania powyższych analogii w przypadku pian stałych jest niewielka [52, 53].

W niniejszej pracy przedyskutowano możliwość zastosowania różnych analogii w oparciu o eksperymentalnie wyznaczone współczynniki transportu ciepła i opory przepływu. Pozwoli to na weryfikację analogii literaturowych i wybór najbardziej odpowiedniej dla opisu pian stałych.

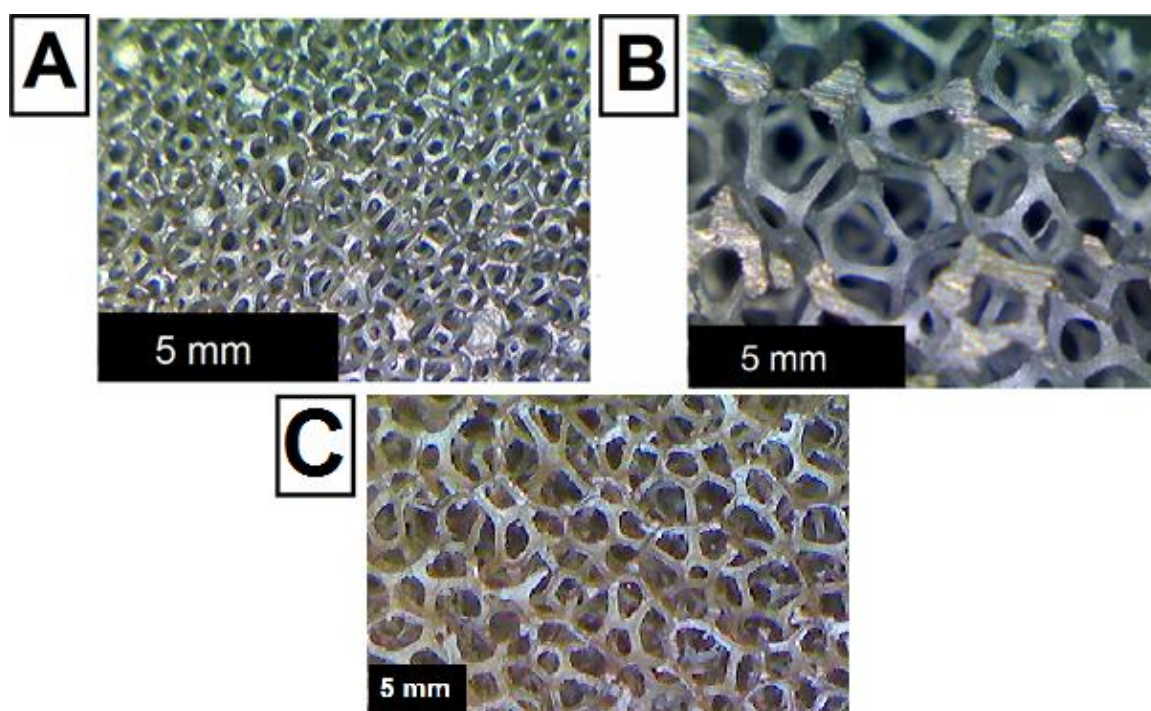


## 2. Cel i zakres pracy, tezy badawcze

Celem pracy jest doświadczalne wyznaczenie parametrów morfologicznych, oporów przepływu i współczynników transportu ciepła (masy) dla wybranych pian stałych w celu powiązania parametrów przepływowych i transportowych z parametrami morfologicznymi. Istotnym elementem pracy jest identyfikacja mechanizmu przepływu płynów przez piany, w szczególności sprawdzenie, czy zjawiska transportu pędu, ciepła i masy można opisać modelem rozwijającego się przepływu laminarnego przez krótką kapilarę, względnie opływu ciała stałego (walca lub kuli).

### 2.1. Badane 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 producenta,  $6\div 10$ ,  $27\div 33$ ,  $47\div 53$  porów na cal (ang. *pores per inch*, PPI), natomiast dla aluminiowej 10, 20 i 40 PPI. Zdjęcia wybranych pian pokazano na rys. 2.1, natomiast ich parametry zebrano w tabeli 2 (dane producentów). W odniesieniu do badanych pian w niniejszej pracy konsekwentnie używano oznaczeń zgodnie z tabelą 2.



Rys. 2.1 Zdjęcia badanych pian: NC 2733 (A), Al-20 (B), Ni 0610 (C).

Tabela 2. Opis i parametry badanych pian deklarowane przez producentów.

Piana	Producent	Materiał*	Parametry pian			
			$PPI^{**}$	$d_p$ [mm]	$S_v$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\varepsilon$ [%]
NC 0610	Recemat BV (Holandia)	Ni – 60÷80% Cr – 15÷40% Cu – 0,5%	6÷10	2,3	500	92,2
NC 2733			27÷33	0,6	2800	92,2
NC 4753			47÷53	0,4	5400	92,2
Ni 0610		Ni – 99,5%	6÷10	2,3	500	95,0
Ni 2733			27÷33	0,6	2800	95,2
Ni 4753			47÷53	0,4	5400	95,2
Al-10	ERG Aerospace Corporation (USA)	Al>95,5% Mg – 0,35÷0,8% Si – 0,3÷0,7%	10	b/d	440÷920	85÷98
Al-20			20	b/d	820÷1450	85÷98
Al-40			40	b/d	1140÷150	85÷98

\* pominięto pierwiastki występujące w ilości śladowej

\*\* wg deklaracji producentów

Piany aluminiowe produkowane są metodą wykorzystującą ciekły metal [27], natomiast produkcja pian NC i Ni opiera się na procesie elektrodepozycji i stopniowej metalizacji piany polimerowej, stanowiącej wzorzec kształtu [38, 54, 55].

## 2.2. Tezy pracy

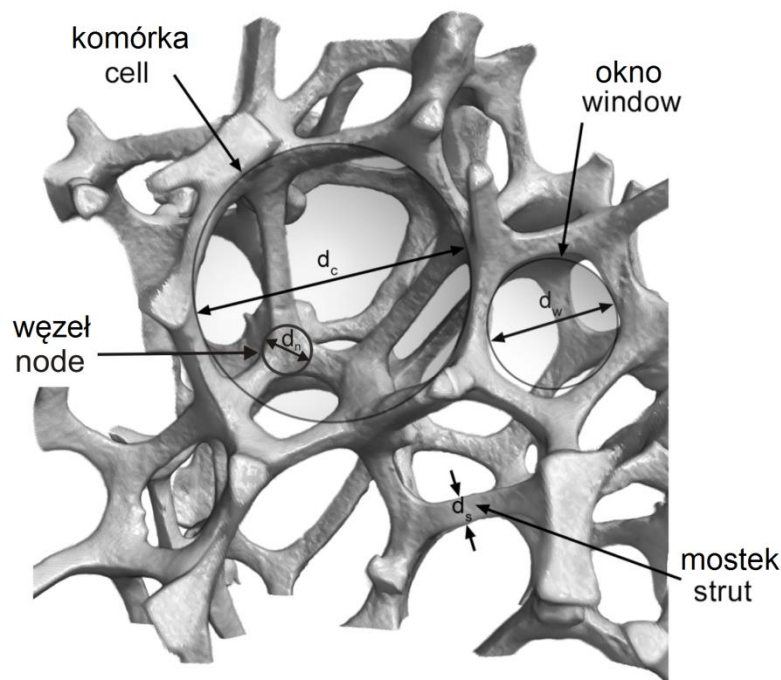
Założono następujące tezy pracy:

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

### 3. Morfologia pian stałych

#### 3.1. Elementy morfologii pian stałych

Piana stała to trójwymiarowa struktura przestrzenna (rys. 3.1), 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 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. 3.1 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 przypadku pian stałych możemy rozróżnić kilka rodzajów porowatości:

- porowatość otwartą (tzw. hydrodynamiczna)  $\varepsilon$ , odpowiada ona podejściu makroskopowemu i definiuje wyłącznie wolną objętość dostępną dla przepływającego płynu,
- porowatość wewnętrzną szkieletu piany  $\varepsilon_s$ , będącą wynikiem metody wytwarzania,
- porowatość całkowitą  $\varepsilon_c$ , która obejmuje wszystkie rodzaje pustych przestrzeni w strukturze ( $\varepsilon_t = \varepsilon + \varepsilon_s$ ).

Rozpatrując stosowanie pian stałych jako strukturalnych nośników katalizatora w reaktorach chemicznych, porowatość otwarta jest najistotniejszym parametrem hydrodynamicznym, warunkującym opory przepływu [18, 56]. Pory szkieletu piany są niedostępne dla reagentów – zostają zamknięte naniesioną na powierzchnię piany warstwą washcoatu (katalizatora).

Znajomość parametrów morfologicznych pian ma kluczowe znaczenie dla określenia ich charakterystyk hydrodynamicznych oraz transportowych (opory przepływu oraz współczynniki transportu ciepła i masy). Parametry morfologiczne są niezbędne do wyznaczenia bezwymiarowych liczb kryterialnych (np. liczb Reynoldsa, Nusselta, Sherwooda) stosowanych w modelach matematycznych reaktora.

### 3.2. Metody badań morfologii pian

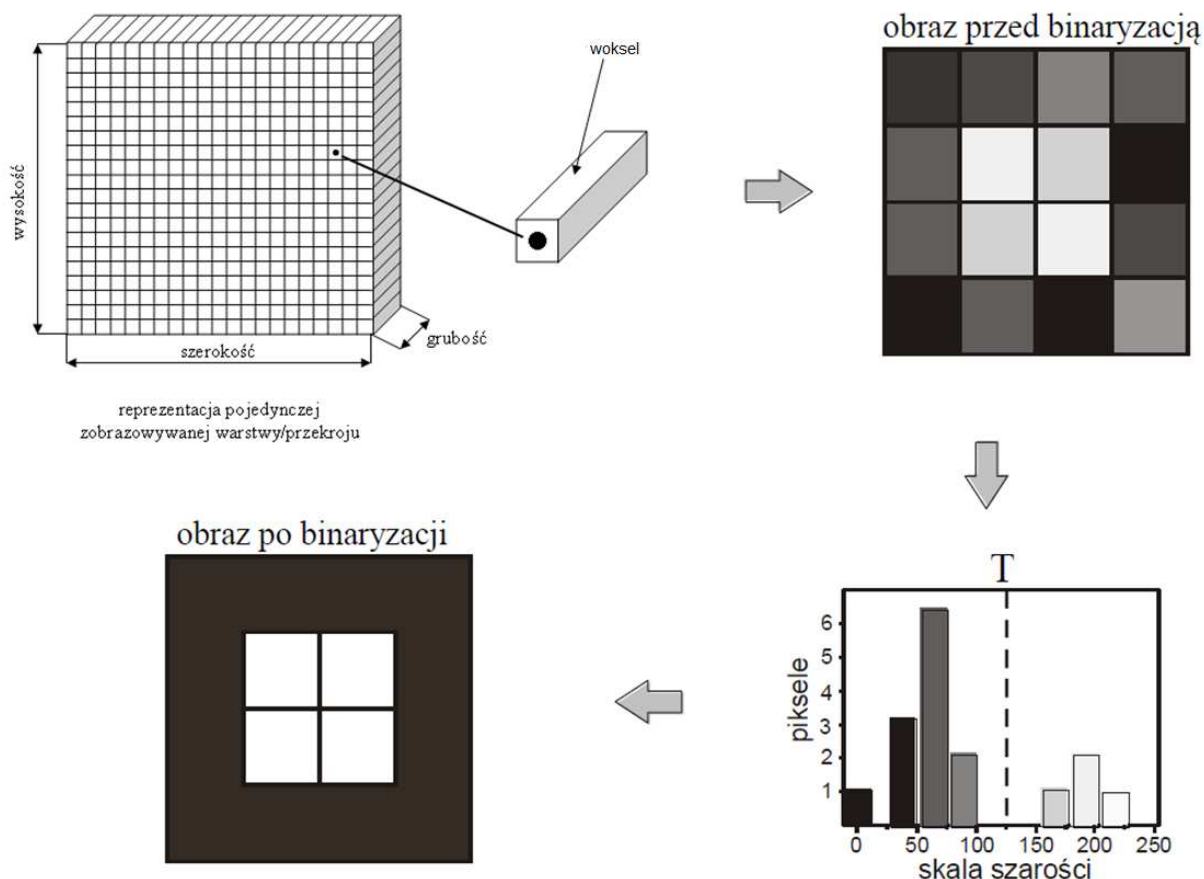
Parametry morfologiczne pian stałych wyznaczać można za pomocą następujących metod:

- rentgenowskiej tomografii komputerowej (TK),
- tomografii metodą rezonansu magnetycznego (MRI),
- piknometrii helowej (PH),
- porozymetrii rtęciowej,
- mikroskopii optycznej (MO),
- elektronowego mikroskopu skaningowy (SEM).

Rentgenowska tomografia komputerowa jest, obok rezonansu magnetycznego, najbardziej zaawansowaną i wszechstronną, niedestrukcyjną metodą, służącą do analizy małych obiektów o złożonej budowie przestrzennej. Wykorzystuje ona różnice w pochłanianiu wiązki promieniowania rentgenowskiego przez materiał badanego obiektu (szkieletu piany) i powietrze. Każdy mikrotomograf zbudowany jest z trzech zasadniczych elementów: źródła wiązki promieniowania, detektora oraz manipulatora. Źródłem

promieniowania może być cyklotron lub lampa rentgenowska. Zadaniem detektora jest przekształcenie fotonów promieniowania rentgenowskiego na impuls elektryczny. Konstrukcja manipulatora odróżnia mikrotomografię od tomografii medycznej, bowiem w mikrotomografii pozycja wiązki promieniowania i detektora jest stała, a w czasie pomiaru to próbka wykonuje obrót o odpowiedni kąt.

Tomografia nie jest jednak techniką, która bezpośrednio daje pożądane wyniki. Dalsza obróbka danych wymaga wykorzystania specjalistycznego oprogramowania do analizy obrazów tomograficznych. Powszechnie stosowany jest, często w zmodyfikowanej formie, tzw. Algorytm Feldkampa [57, 58]. Jest to metoda projekcji wstecznej, która polega na filtrowaniu płaskich, dwuwymiarowych obrazów, a następnie na przeprowadzeniu wstecznej rekonstrukcji przetworzonych „warstw” w obraz 3D. W trakcie analizy obraz podzielony jest na mniejsze elementy przestrzenne, tzw. woksele (ang. *voxels*), trójwymiarowe odpowiedniki pikseli, obrazowo zaprezentowane na rys. 3.2. W związku z tym, że surowe obrazy tomograficzne zawierają całą gamę odcieni szarości, poddaje się je procesowi binaryzacji, czyli oddzieleniu obiektu od tła podczas rekonstrukcji. Jest to jeden z najważniejszych kroków w analizie obrazu. W literaturze zostało opisanych wiele sposobów binaryzacji obrazu [59]. W zależności od wybranej metody, kluczowym problemem jest określenie odpowiednich parametrów przetwarzania obrazu, takich jak optymalna wartość progowa czy rozdzielczość pomiaru [60]. Jeśli przyjęta rozdzielczość pomiaru jest dużo mniejsza od wymiarów badanej struktury, wówczas jej wpływ jest niewielki [60]. Natomiast określenie optymalnej wartości progowej oraz sposób jej określania ma istotny wpływ na mierzone parametry. W praktyce najczęściej stosowane są dwie metody progowania: lokalna oraz globalna. Progowanie globalne GT (ang. *global thresholding*) wykorzystuje metodę Otsu. Jest to w pełni automatyczny algorytm, który polega na wyznaczeniu, w oparciu o analizę obrazu, pojedynczego, globalnego poziomu progowania. W konsekwencji jedna wartość progowa jest określona dla całego zbioru danych. Zasadę tego procesu przedstawia schemat na rys. 3.2. Niezaprzeczalną zaletą tej metody jest jej szybkość, bywa ona jednak niedokładna. Alternatywną metodą jest progowanie lokalne AT (ang. *adaptive thresholding*). W tym przypadku próg szarości ustalany jest dla każdego woksela niezależnie, na podstawie analizy jego otoczenia.



Rys. 3.2 Procedura progowania globalnego. Wartość progowa  $T$  jest wyznaczana na podstawie histogramu odcieni szarości obrazu przed binaryzacją (tzw. surowego). Czarne linie reprezentują granice między woksłami.

Na podstawie obrazów TK można wyznaczyć szereg parametrów morfologicznych pian, takich jak:

- rozkład średnicy porów  $d_p$ ,
- rozkład średnicy mostków  $d_s$ ,
- porowatość otwarta, wewnętrzna i całkowita,
- powierzchnia geometryczna  $S_v$ ,
- labiryntowość (współczynnik labiryntowości).

W celu uzyskania parametrów morfologicznych pian stałych, standardowe oprogramowanie TK często jest wspomagane dodatkowym oprogramowaniem, jak np. Matlab Image Processing Toolbox [54] czy iMorph [61]. Programy te wyposażone są w podstawowe operatory morfologiczne, takie jak erozja i dylatacja, które pozwalają na odpowiednie przetwarzanie obrazów binarnych, np. wypełnianie wolnych przestrzeni występujących w szkieletach niektórych pian. Ponadto oprogramowanie iMorph umożliwia

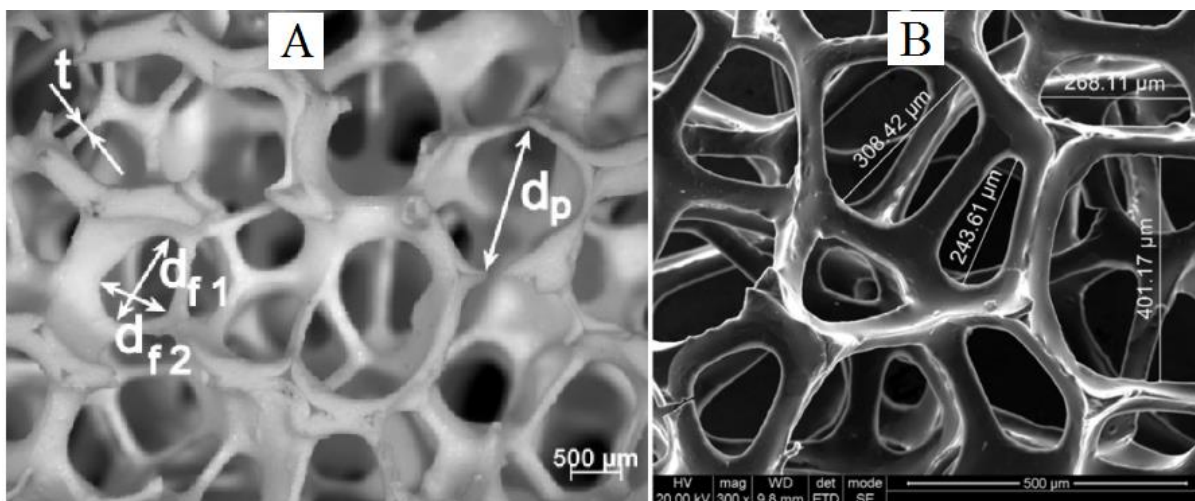
dodatkowo klasyfikację mostków piany ze względu na ich kształt i orientację, a także wyznaczenie kształtu połączeń mostków.

Alternatywną techniką jest, wykorzystywane powszechnie w diagnostyce medycznej, obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego – MRI. Rezonans magnetyczny polega na rejestracji promieniowania elektromagnetycznego, które powstaje przy relaksacji wzbudzonych w silnym polu magnetycznym spinów jądrowych cząsteczek [62]. Doniesienia literaturowe mówią o wykorzystaniu rezonansu magnetycznego do badania pian ceramicznych [34, 63, 64], technika ta służy przede wszystkim do wyznaczania powierzchni geometrycznej,  $S_v$  [34, 56, 63]. Metodę tę zastosowano także przy wyznaczaniu innych parametrów morfologicznych pian stałych, takich jak [63]:

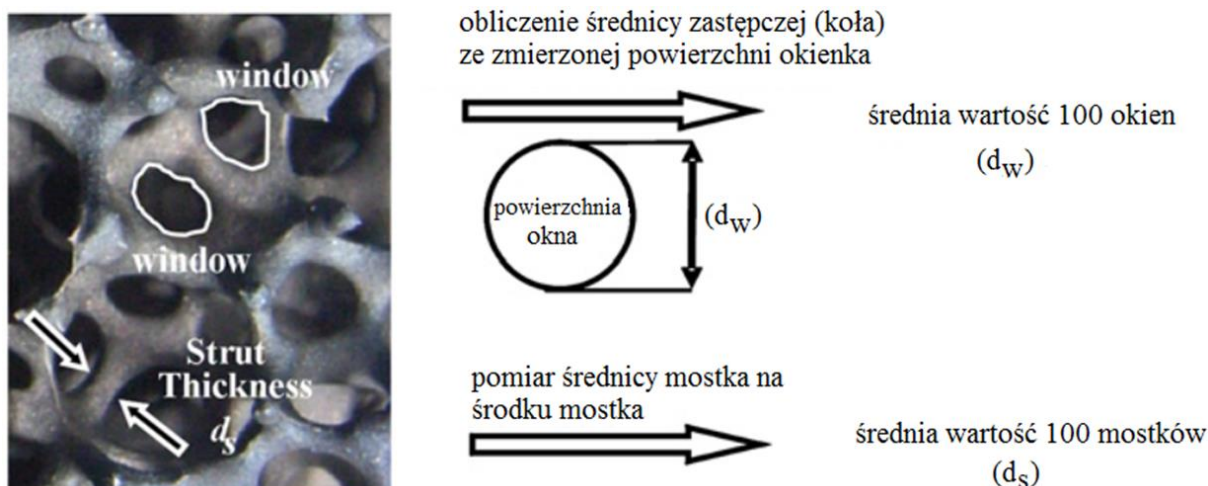
- średnia średnica porów  $d_p$ ,
- średnia średnica mostków  $d_s$ ,
- porowatość  $\varepsilon$ .

Należy podkreślić, że piany ceramiczne nie wytwarzają praktycznie żadnego sygnału w standardowych doświadczeniach MRI. Z tego powodu badaną próbkę należy umieścić w odpowiedniej cieczy umożliwiającej prowadzenie badań, np. siarczanie miedzi [34, 63, 64], który pozwala na szybsze pomiary dzięki zwiększonym efektom relaksacyjnym. Technika rezonansu magnetycznego zaniża jednak porowatość pian [63], co ogranicza możliwości jej praktycznego wykorzystania przy wyznaczaniu tego parametru i wskazuje na konieczność sprawdzenia go przy użyciu innych technik (np. piknometrii helowej).

Metoda MRI, podobnie jak TK, pomimo znacznego zaawansowania technologicznego, podaje rozkład wszystkich porów występujących w strukturze piany bez ich podziału na okna i komórki. Wymiary te można wyznaczyć metodą dekonwolucji rozkładu średnic porów (Inayat i wsp. w pracy [18]). Średnice okien i komórek częściej wyznacza się jednak za pomocą technik mikroskopowych, np. mikroskopii optycznej [2, 17, 34, 65] lub elektronowej mikroskopii skaningowej (SEM) [38, 66, 67]. Wyniki można uzyskać bezpośrednio (rys. 3.3) [63, 68] lub wyznaczyć średnicę zastępczą dla koła o powierzchni odpowiadającej powierzchni zmierzonego okna lub komórki (rys. 3.4) [18]. Techniki optyczne umożliwiają także wyznaczenie średnic mostków [34, 56].



Rys. 3.3 Bezpośredni pomiar parametrów morfologicznych z użyciem technik optycznych: A – piana  $Al_2O_3$  [63]; B – piana RVC [68].



Rys. 3.4 Wyznaczanie parametrów morfologicznych pian stałych z wykorzystaniem średnicy zastępczej [18].

Porowatość całkowitą pian wyznacza się najczęściej przy użyciu piknometrii helowej (PH) [16, 18, 69]. Jest to nieniszczące badanie, pozwalające określić gęstość szkieletu piany. Porowatość całkowitą wyznaczamy z zależności

$$\varepsilon_c = 1 - \frac{m_{piany}}{\rho_{szkieletu\ piany} V_{piany}} \quad (1)$$

Do badania porowatości służy również metoda porozymetrii rtęciowej [64, 70].

Na podstawie danych literaturowych (załączniki A.1-A.3, odpowiednio dla pian Al, Ni i NC) można stwierdzić, że zmierzone wartości średnic okien,  $d_w$ , komórek,  $d_c$ , oraz mostków,  $d_s$ , a także porowatość,  $\varepsilon$ , niezależnie od zastosowanej techniki pomiarowej,



w większości przypadków nie różnią się znacząco od siebie. Wyjątkiem jest tutaj wielkość powierzchni geometrycznej, która dla tych samych pian może różnić się nawet o kilkadziesiąt procent, co jest związane z metodą jej wyznaczania.

### *3.3. Metody badawcze stosowane w pracy*

Do wyznaczenia parametrów morfologicznych pian stałych zastosowano tomografię komputerową, mikroskopię optyczną i piknometrię helową.

#### **3.3.1. Tomografia komputerowa**

W celu przeprowadzenia kompleksowej analizy struktury pian stałych zastosowano mikrotomografię komputerową. Badania przeprowadzono we współpracy z Zakładem Fizyki Medycznej Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego.

Pomiary zostały wykonane przy użyciu mikrotomografu (SkyScan 1172). Ponieważ rozdzielczość obrazu nie ma istotnego wpływu na mierzone wielkości, jeśli jest dużo mniejsza od mierzonych wielkości [71], dlatego w niniejszej pracy stosowano zmienną wielkość woksela, zależnie od wymiarów badanej piany. Energia wiązki, filtr oraz rozdzielczość były tak dobierane, aby zapewnić optymalny kontrast i stosunek sygnału do szumu na obrazie projekcji, a otrzymane obrazy dawały precyzyjny wgląd w strukturę badanych pian. Parametry pracy mikrotomografu zestawiono w tabeli 3. Otrzymane obrazy były binaryzowane (oprogramowanie CTAnalyser, SkyScan), a następnie wykonywano komputerową, trójwymiarową rekonstrukcję obiektu w oparciu o zmodyfikowany algorytm Feldkampa (oprogramowanie NRecon, SkyScan), na podstawie której wyznaczono średnice mostków i porów metodą zaproponowaną przez Hildebranda [72].

Tabela 3. Parametry mikrotomografu przy badaniu morfologii pian stałych.

Piana	Parametry mikrotomografu		
	U [kV]	Filtr	woksel [ $\mu\text{m}$ ]
NC 0610	80	Al	9,9
NC 2733	80	Al	12
NC 4753	80	Al+Cu	1,9
Ni 0610	80	Al+Cu	10
Ni 2733	80	Al+Cu	6
Ni 4753	80	Al+Cu	4,9
Al-10	80	Al	12
Al-20	80	Al	12
Al-40	80	Al	12

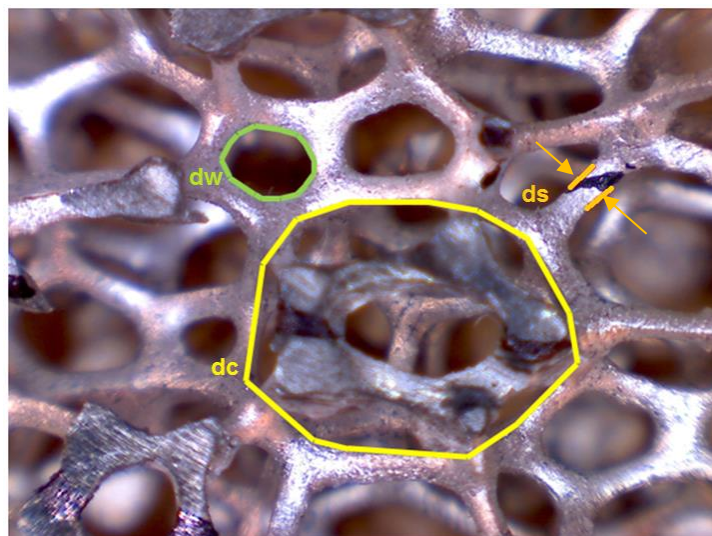
### 3.3.2. Mikroskopia optyczna

Wykorzystując mikroskop optyczny (Delta Optical Smart 2MP), sporządzono bazę obrazów, na podstawie których wyznaczono wybrane parametry morfologiczne. Dla każdej piany wyznaczono wymiary co najmniej 100 komórek, okien oraz mostków, co pozwoliło na porównanie parametrów z wymiarami otrzymanymi techniką TK.

Na rys. 3.5 wyróżniono poszczególne elementy szkieletu piany, które były wyznaczane z użyciem oprogramowania AutoCAD. Żółtym kolorem oznaczono granicę pola zajmowanego przez komórkę, zielonym przez okienko, natomiast pomarańczowym kolorem oznaczono średnicę mostka. W celu wyznaczenia wielkości średnic komórek i okien wykorzystano wzór na średnicę ekwiwalentną:

$$d_e = \sqrt{\frac{4P}{\pi}} \quad (2)$$

gdzie  $P$  jest polem powierzchni,  $\text{m}^2$ .



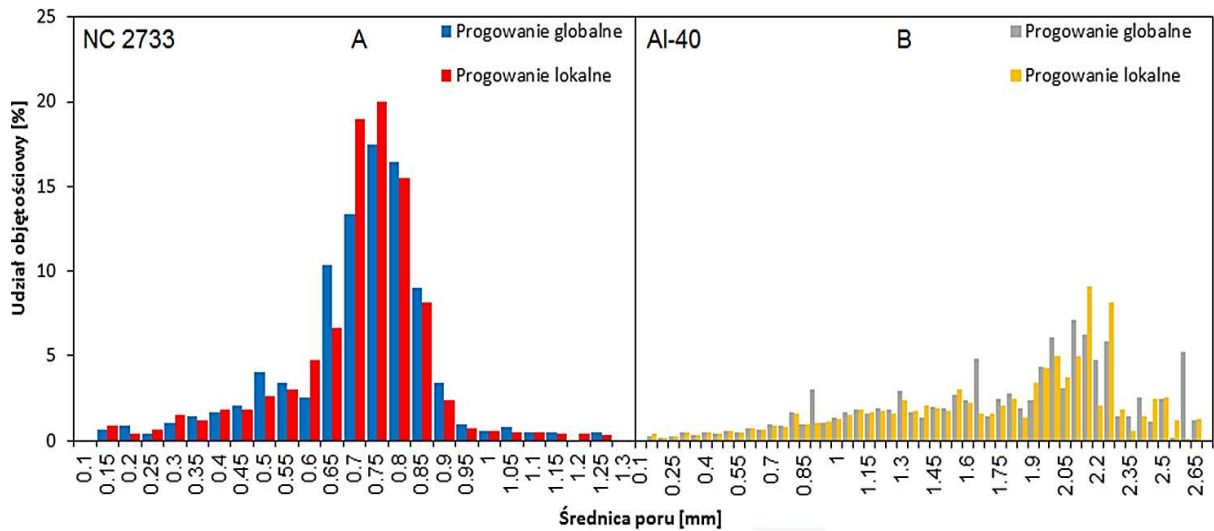
Rys. 3.5 Ilustracja metody pomiaru mikroskopem optycznym z zastosowaniem oprogramowania AutoCAD.

### 3.3.3. Piknometria helowa

W badaniach wykorzystano również piknometr helowy (Micromeritics AccuPyc 1330), który stosowano do określenia porowatości pian stałych. Przed badaniem próbki były mierzone i ważone, następnie przy użyciu aparatu wyznaczano gęstość szkieletu piany, co pozwalało na wyznaczenie porowatości zgodnie z równaniem (1).

### 3.4. Wyniki badań morfologii pian stałych

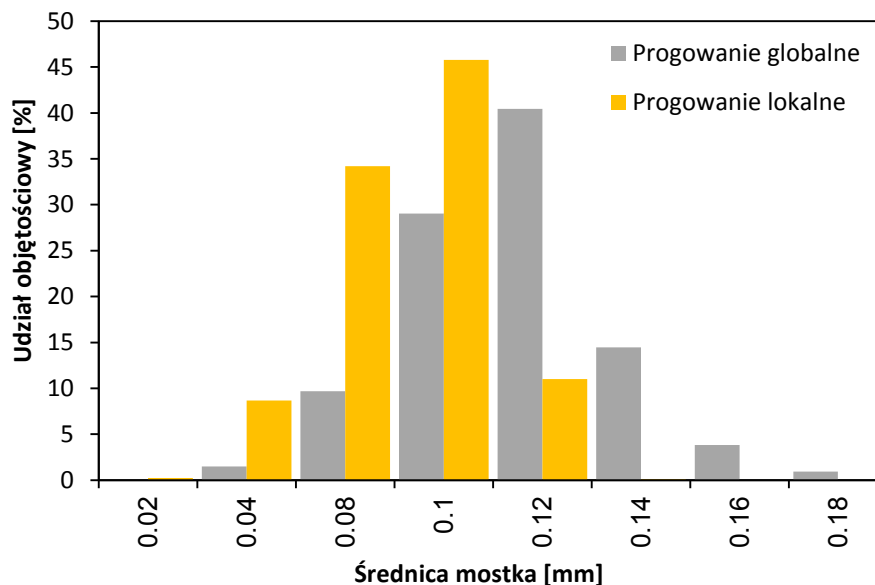
W pierwszym etapie pracy porównano wyniki otrzymane metodą progowania GT i AT. Progowanie lokalne zostało wykorzystane jedynie we wstępnej fazie badań, która obejmowała piany: NC 2733, Al-10, Al-20, Al-40. W załącznikach A.4 i A.5 zebrano w postaci tabel podstawowe parametry morfologiczne pian stałych otrzymane w wyniku badania mikrotomograficznego z wykorzystaniem progowania globalnego i lokalnego. Porównanie obu metod progowania zostało zaprezentowane w postaci histogramów dla średnic porów i mostków na przykładach piany NC 2733 (rys. 3.6A) oraz Al-40 (rys. 3.6B).



Rys. 3.6 Rozkłady średnic porów piany NC 2733 (A) i Al-40 (B) otrzymane przy zastosowaniu dwóch metod progowania: progowania globalnego oraz progowania lokalnego.

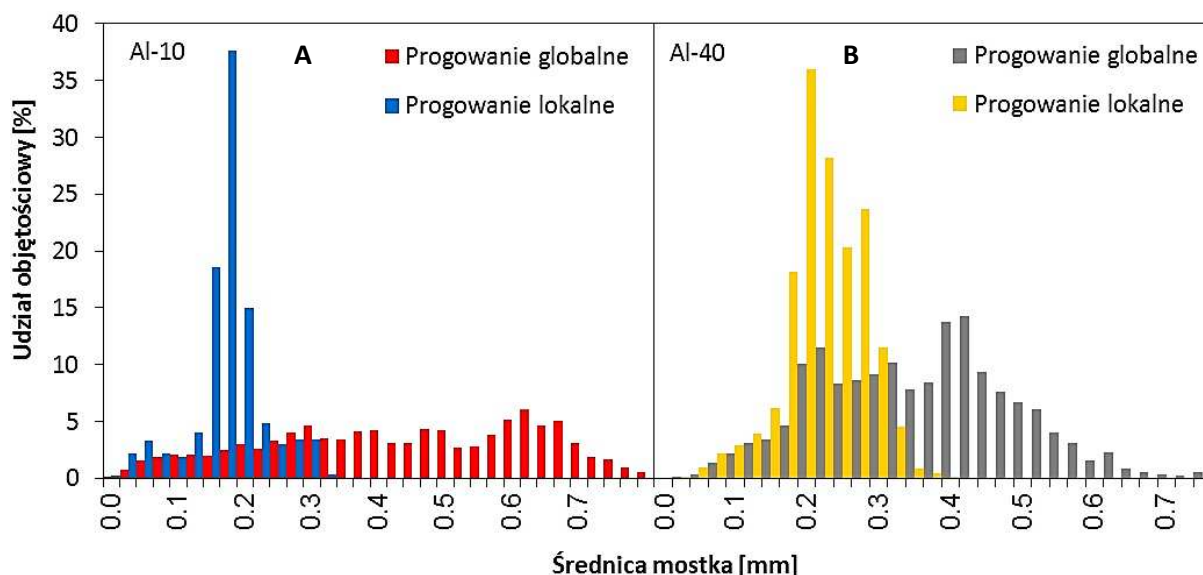
Jak widać na wykresie (rys. 3.6), wybór metody progowania w przypadku pian NC 2733 i Al-40 nie wykazuje znaczącego wpływu na kształt rozkładu średnicy porów, w obu przypadkach otrzymano rozkłady o niemal identycznych cechach. Są to bardzo dobrze uformowane, gładkie rozkłady z bardzo wyraźnie zaznaczonym maksimum. Oba rozkłady wykazują również bardzo podobny stopień asymetryczności względem maksimum.

Wyniki mikrotomograficznych badań średnic mostków tych pian, z użyciem progowania globalnego i lokalnego, przedstawiono na 3.7 i 3.8.



Rys. 3.7 Rozkład średnic mostków piany NC 2733 uzyskanych z użyciem progowania globalnego i lokalnego.

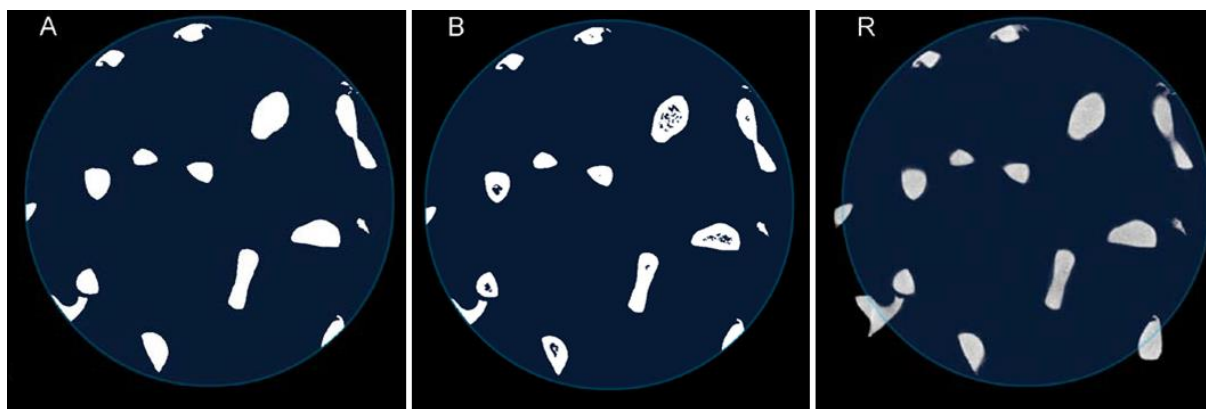
Dla średnic mostków piany NC 2733 (rys. 3.7) widać tylko niewielki wpływ metody progowania na otrzymany rozkład. W przypadku metody GT najczęściej występują mostki w zakresie średnic  $0,1 \div 0,12$  mm, natomiast w przypadku metody AT wartości te są mniejsze i mieszczą się w zakresie  $0,08 \div 0,1$  mm.



Rys. 3.8 Rozkład średnic mostków piany Al-10 i Al-40 uzyskanych z użyciem progowania globalnego i lokalnego.

Analiza wyników otrzymanych dla piany Al-10 (rys. 3.8A) oraz Al-40 (rys. 3.8B) pozwala stwierdzić, że w odróżnieniu od rozkładów średnic porów, procedura progowania ma bardzo duży wpływ na rozkład średnic mostków. Progowanie lokalne daje znacznie mniejsze wymiary mostków w porównaniu do progowania globalnego. Dodatkowo obserwuje się zmianę kształtu samego rozkładu.

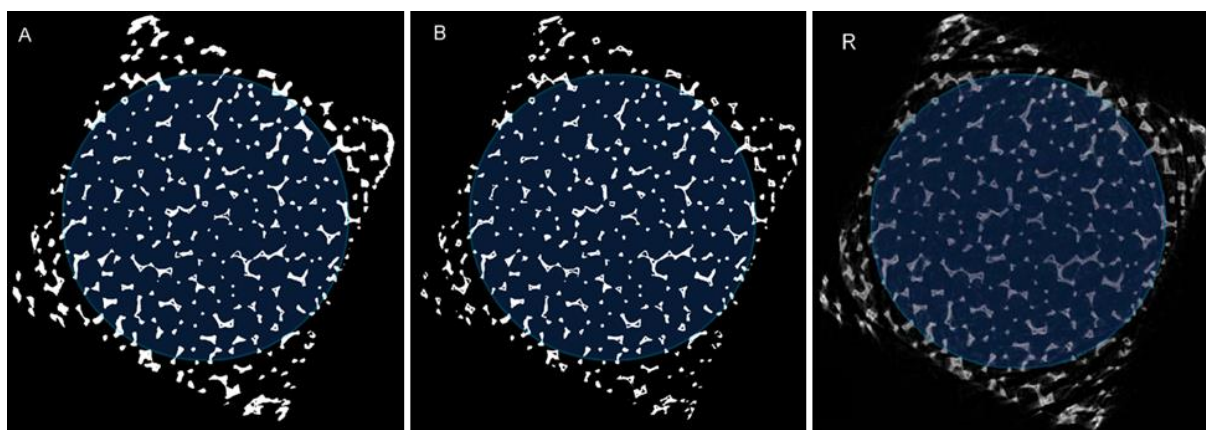
W celu wyjaśnienia tego zjawiska poddano dokładnej analizie pojedyncze obrazy tomograficzne rzeczywistego przekroju poprzecznego próbki Al-10 oraz binarne obrazy obliczone na podstawie globalnego i lokalnego progowania (rys. 3.9).



Rys. 3.9 Porównanie binarnych obrazów uzyskanych na podstawie progowania globalnego (A) i lokalnego (B) dla obrazu surowego (R) piany AI-10. Granatowe koło oznacza obszar próbki wybrany do analizy.

Biały obszar stanowi materiał piany, kolor czarny to wolna przestrzeń. Jak widać na rys. 3.9B, progowanie lokalne „produkuje” liczne wolne przestrzenie wewnątrz mostków. Nie występują one, gdy do obliczeń stosowane jest progowanie globalne (rys. 3.9A). Nie są również widoczne na obrazie surowym (rys. 3.9R), który jest bezpośrednim wynikiem pomiaru.

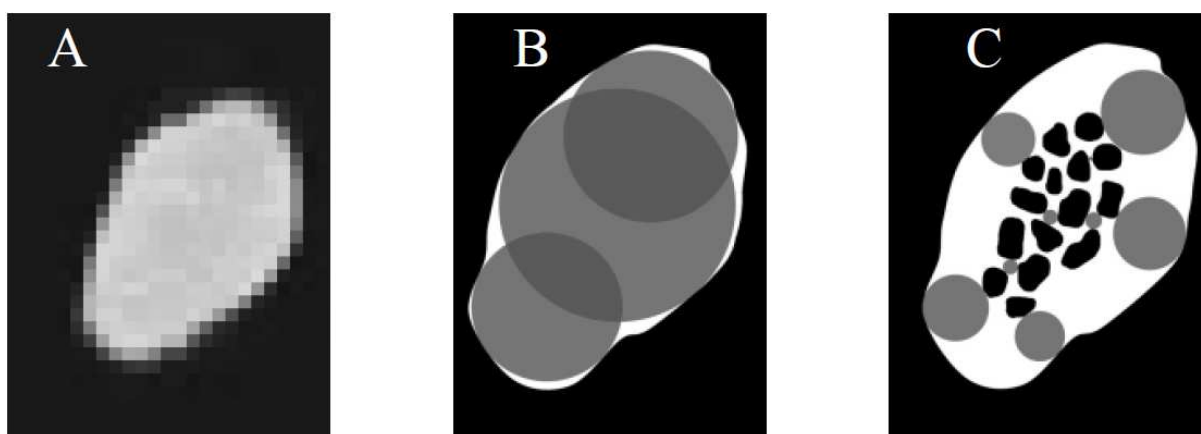
Analogiczne badania przeprowadzono dla pozostałym pian. Na rys. 3.10 przedstawiono wynik dla piany NC 2733.



Rys. 3.10 Porównanie binarnych obrazów obliczonych na podstawie progowania globalnego (A) i lokalnego (B) dla obrazu surowego (R) piany NC 2733. Granatowe koło oznacza obszar próbki wybrany do analizy.

W tym przypadku porowatość wewnątrz mostków występuje na wszystkich trzech obrazach: dla progowania globalnego (rys. 3.10A), lokalnego (rys. 3.10B) oraz, co w tym miejscu należy mocno podkreślić, na obrazie surowym (rys. 3.10R). Analizując dokładnie ich liczbę na białych obszarach (A) i (B), daje się zauważyć, że minimalnie częściej pojawiają się przy

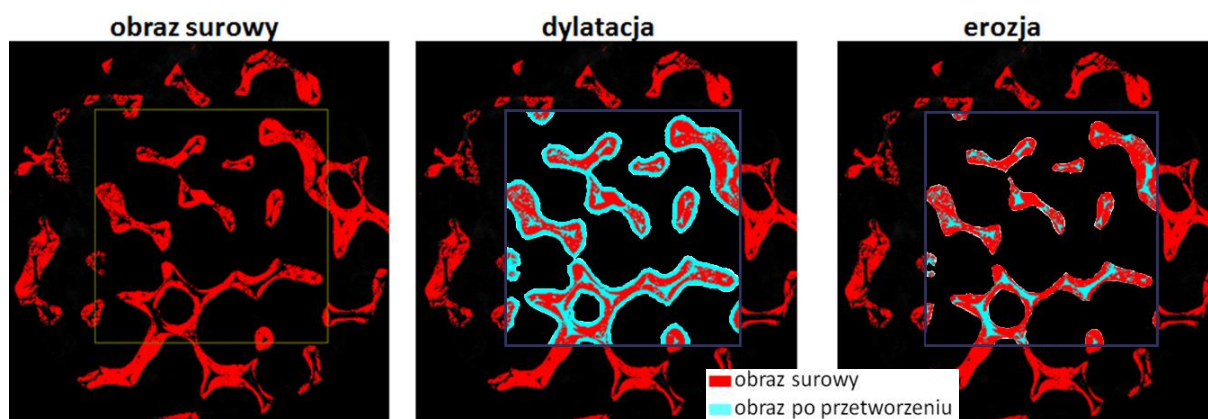
obliczeniach z wykorzystaniem progowania lokalnego. Metodą produkcji pian NC jest wyprężanie piany polimerowej, na której osadzono warstwę metalu [55]. Na tej podstawie można sądzić, że widoczne na zdjęciach tomograficznych puste przestrzenie wewnątrz mostków występują w rzeczywistości i są efektem procesu produkcji. Natomiast w przypadku obrazu surowego piany Al-10 (rys. 3.9R) nie widać wyraźnych czarnych obszarów (punktów) na tle mostków, świadczących o wewnętrznych porach w szkielecie. Nie są one również widoczne w wyniku obrazowania z progowaniem globalnym. Skłoniło to do wysunięcia wstępnego wniosku, że w przypadku pian Al analizowanych z użyciem progowania lokalnego możemy mieć do czynienia z artefaktami – czyli nieistniejącymi w rzeczywistości lokalnymi „przyciemnieniami” na tle mostków, będącymi wynikiem złożonej procedury przetwarzania obrazu, czyli „produkowanymi” – w sposób fałszywy – przez procedurę komputerową. Obecność tych fałszywych objętości wewnątrz szkieletu powoduje wirtualne zmniejszenie rozmiarów mostków zmierzonych metodą Hildebranda-Ruegseggera [72], co pokazano na rys. 3.11.



Rys. 3.11 Metoda rekonstrukcji zaproponowana przez Hildebranda i Ruegseggera [72] dla progowania globalnego i lokalnego. Piana Al-10; A – obraz surowy, B – progowanie globalne, C – progowanie lokalne. Średnica kuli odpowiada mierzonej wartości wymiaru mostka.

W celu potwierdzenia lub wykluczenia występowania wewnętrznych porów w szkielecie pian Al przeprowadzono tzw. badanie fantomowe. Badaniu mikrotomografem poddano aluminiowy drucik, co do którego nie było wątpliwości, że posiada litą, jednorodną strukturę. Także w tym przypadku okazało się, że lokalne progowanie ukazuje wewnętrzne nieciągłości struktury, które z całą pewnością są artefaktami (czyli pozornymi obrazami obiektów, które nie istnieją w rzeczywistości) i wynikają z niedoskonałości metody pomiarowej.

Ponieważ w niniejszej pracy piany stałe rozpatrywane są jako potencjalny nośnik warstwy katalitycznie aktywnej, w szczególności interesuje nas zewnętrzna, dostępna dla katalizatora powierzchnia piany. Dlatego surowe obrazy otrzymane metodą TK poddano obróbce programem iMorph: obrazy poddano progowaniu globalnemu (rys. 3.12 – obraz surowy), a następnie przeprowadzono tzw. dylatację morfologiczną, która zamyka otwory oraz zatoki we wnętrzu obiektu (rys. 3.12 – dylatacja). W wyniku tej operacji obiekty zwiększają swoje wymiary i objętość, stąd w kolejnym kroku konieczne było przeprowadzenie operacji erozji, której działanie polega na równomiernym obcinaniu zewnętrznych brzegów obrazu obiektu (rys. 3.12 – erozja). Wskaźnikiem poprawnego wykonania obu operacji było zachowanie zewnętrznych wymiarów mostków z pierwotnego obrazu tomograficznego, co jest równoważne niezmiennej porowatości zewnętrznej pian. Dla tak opracowanych obrazów przeprowadzono rekonstrukcję 3D i wyznaczono powierzchnię geometryczną  $S_v$  oraz porowatość  $\varepsilon$  pian.



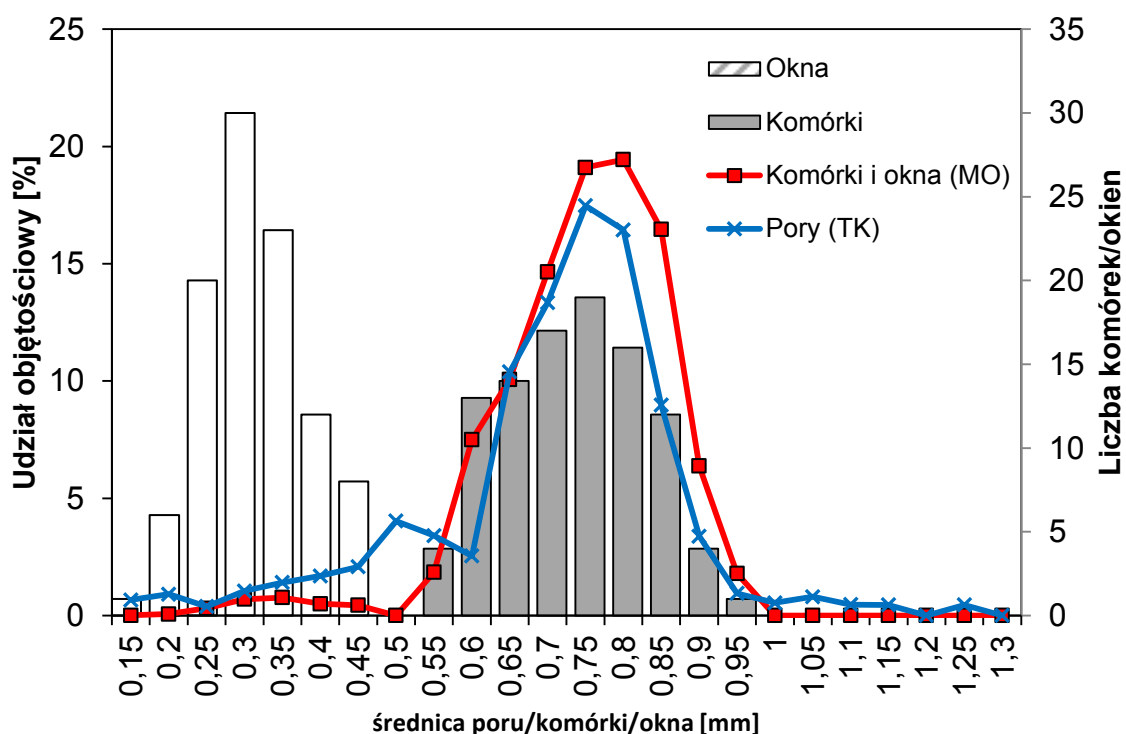
Rys. 3.12 Procedura operacji morfologicznych iMorph na obrazie TK. W części „dylatacja” i „erozja”: obraz surowy (kolor czerwony) i obraz po przetworzeniu (kolor niebieski, wypełnienie wskutek operacji „dylatacja”) odnosi się do obszaru poddawanej operacji (kwadrat).

Porównanie parametrów morfologicznych wyznaczonych w oparciu o oryginalne obrazy otrzymane metodą TK oraz po zastosowaniu programu iMorph (rys. 3.12) wykazało, że zastosowanie wymienionych operacji praktycznie nie wpływa na wielkość porowatości, natomiast istotnie zmienia powierzchnię właściwą pian stałych produkowanych metodą replikacji, w których szkielecie występują rzeczywiste wewnętrzne pory, tj. piany NC i Ni (porównanie  $S_v$  w załączniku A.4 i tabeli 6). W tym przypadku powierzchnia geometryczna została pomniejszona o powierzchnię wynikającą z wewnętrznej porowatości szkieletu pian. Jeśli piany stałe rozpatrywane są jako potencjalne wypełnienie strukturalne reaktorów

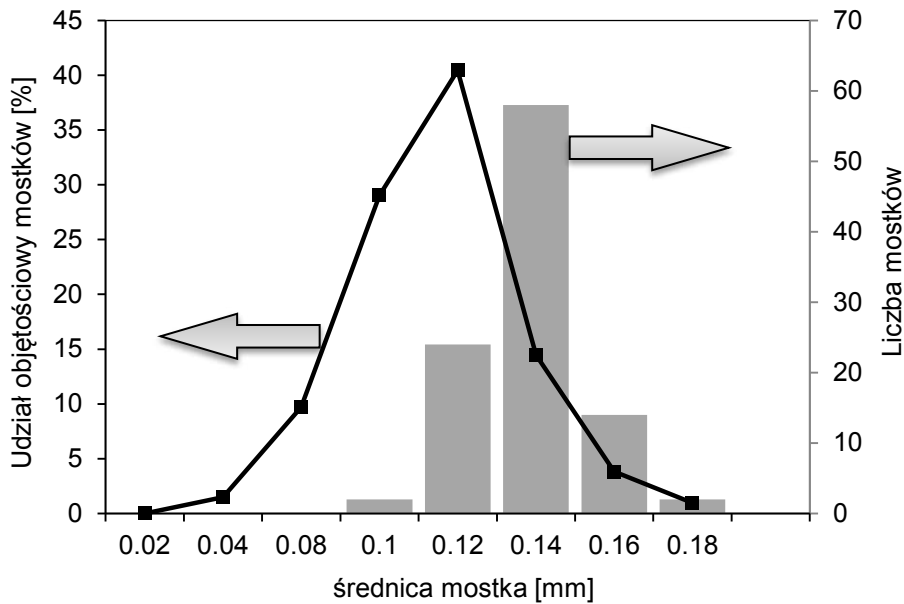


chemicznych, wówczas istotna jest znajomość zewnętrznej powierzchni geometrycznej, na której osadzany jest katalizator. Dlatego w dalszych częściach pracy brano pod uwagę wyłącznie zewnętrzną powierzchnię geometryczną  $S_v$  oraz odpowiadającą jej porowatość  $\varepsilon$ , które obliczane były po przeprowadzeniu odpowiednich sekwencji operacji „dylatacja” oraz „erozja” z użyciem programu iMorph.

Średnice komórek, okien i mostków wyznaczono przy pomocy mikroskopii optycznej (patrz załącznik A.6). Na rys. 3.13 oraz rys. 3.14 porównano rozkłady parametrów morfologicznych otrzymanych przy użyciu metody tomograficznej oraz mikroskopowej dla piany NC 2733.



Rys. 3.13 Rozkład średnic komórek i okien dla piany NC 2733. Liczba komórek/okien – prawa oś (słupki), udział objętościowy porów (TK)/komórek i okien (MO) - lewa oś (linie), %.



Rys. 3.14 Rozkład średnic mostków dla piany NC 2733. Mikroskopia optyczna – liczba mostków (słupki), TK – udział objętościowy mostków (linie), %.

Z analizy wykresu opisującego rozkład porów, komórek i okien (rys. 3.13) wynika, że w obu metodach maksimum „dużych średnic” występuje w tym samym zakresie 0,7÷0,8 mm, natomiast w przypadku okien najczęściej powtarzają się wartości z zakresu 0,2÷0,3 mm. Rozkład objętości porów (z tomografii) nie wykazuje w tym zakresie maksimum, a jedynie stały poziom około 1% objętości. Przyczyną jest prawdopodobnie mała objętość okien. Objętość okna jest bowiem równa w przybliżeniu iloczynowi jego powierzchni ( $\pi d_w^2/4$ ) przez „wysokość” równą średnicy mostka  $d_s$ :

$$V_w = \frac{\pi}{4} d_w^2 d_s \quad (3)$$

Dla typowego okna (rys. 3.13)  $d_w = 0,25$  mm, a  $d_s = 0,14$  mm (rys. 3.14), co daje  $V_w = 0,0069$  mm<sup>3</sup> wobec  $V_c = 0,22$  mm<sup>3</sup> objętości komórki ( $\pi d_c^3/6$ ), czyli 32 razy mniej (objętość 100 okien = objętość 3 komórek).

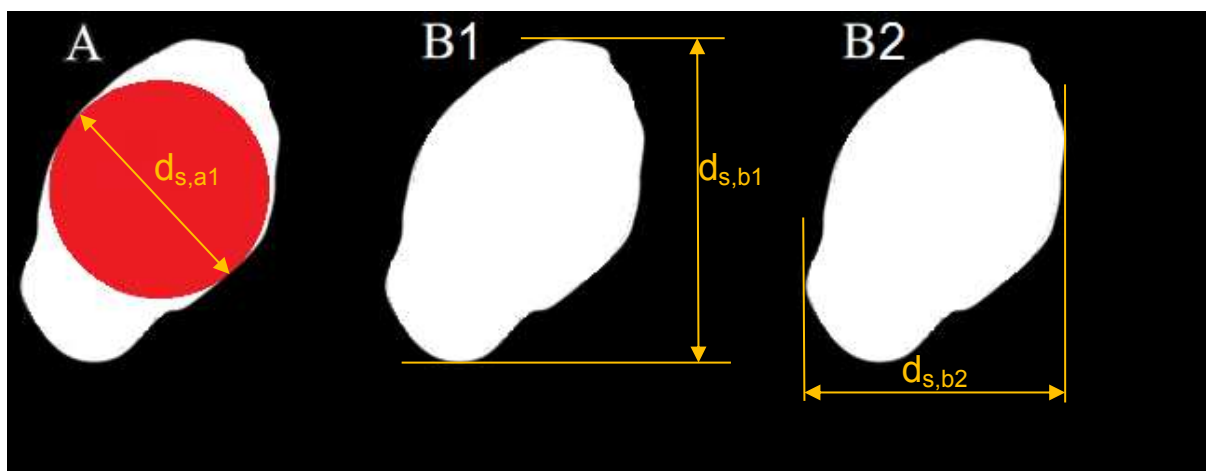
Porównanie rozkładu średnic mostków otrzymanych metodą TK i MO (rys. 3.14) potwierdza wnioski wysunięte przy omawianiu tomografii jako metody badania morfologii pian. W przypadku wykorzystania metody optycznej maksimum (najliczniejsze wyniki) przesunięte jest w kierunku większych wartości średnic w porównaniu z metodą TK. W tabeli 4 porównano wyniki badania średnicy mostków przy użyciu techniki TK oraz mikroskopii optycznej dla badanych pian.

Tabela 4. Średnice mostków badanych pian wyznaczone przy pomocy mikroskopii optycznej oraz mikrotomografii.

Piana	$d_s$ [mm]	
	TK	MO
Al-10	0,44	0,45
Al-20	0,39	0,37
Al-40	0,34	0,30
NC 0610	0,16	0,53
NC 2733	0,12	0,13
NC 4753	0,03	0,08
Ni 0610	0,16	0,47
Ni 2733	0,05	0,14
Ni 4753	0,05	0,12

W przypadku pian aluminiowych (litych, bez wewnętrznych porów) można zaobserwować bardzo dobrą zgodność wyników pomiarów średnicy mostków otrzymanych z użyciem mikroskopii i tomografii (progowanie GT), a obserwowane (niewielkie) różnice w wartościach mają charakter naturalny, wynikający bezpośrednio z różnicy pomiędzy samymi technikami pomiarowymi, co schematycznie przedstawiono na rys. 3.15.

Jak można zauważyć, położenie mostka w przestrzeni ma wpływ na wartość pomiaru w przypadku metody optycznej (rys. 3.15 B1, B2). Jednak seria 100 pomiarów jest statystycznie reprezentatywna i uśrednia tę różnicę, a sam wynik średniej wartości należy uznać za wiarygodny.



Rys. 3.15 Porównanie metod pomiaru średnicy mostka w metodzie mikrotomograficznej (A) i optycznej (B1,2).

W przypadku pian produkowanych techniką replikacji (NC, Ni) średnice mostków różnią się znacznie. Jest to wynik obecności wewnętrznych porów w szkielecie piany. Dostępne oprogramowanie do obróbki obrazów TK może w takim przypadku prowadzić do błędów. Stąd średnicę mostków wyznaczano przy pomocy mikroskopii optycznej dla wszystkich badanych pian.

Porowatość pian została określona dodatkowo w oparciu o gęstość szkieletową piany wyznaczoną metodą piknometrii helowej (PH) (Micromeritics AccuPyc 1330), a porównanie z metodą TK w połączeniu z oprogramowaniem iMorph zaprezentowano w tabeli 5. Jak można zauważyć, porowatości pian stałych wyznaczone metodami piknometrii helowej oraz tomografii komputerowej są podobne, a różnice wynoszą do kilku procent.

Tabela 5. Porowatość pian metalowych. Porównanie wyników otrzymanych metodą TK + iMorph oraz piknometrii helowej (PH).

Piana	$\varepsilon$	
	TK + iMorph	PH
Al-10	0,89	0,91
Al-20	0,91	0,91
Al-40	0,91	0,91
NC 0610	0,88	0,92
NC 2733	0,87	0,93
NC 4753	0,86	0,89
Ni 0610	0,92	0,92
Ni 2733	0,88	0,93
Ni 4753	0,88	0,92

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz omówionych powyżej problemów zdecydowano, że w dalszej części 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,

które zestawiono w tabeli 6.

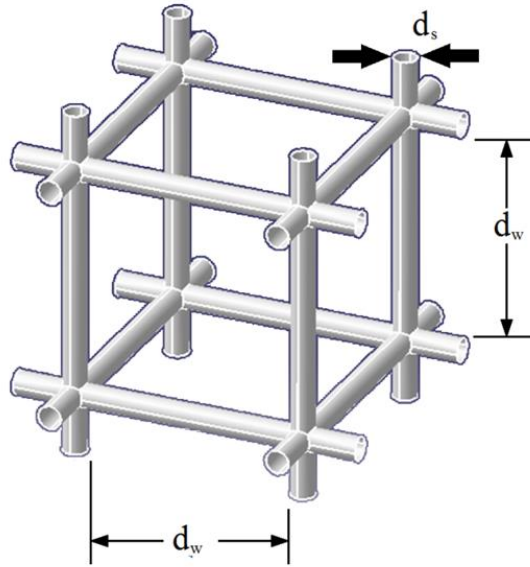
Tabela 6. Parametry morfologiczne pian stałych.

Piana	$d_p$ [mm]	$d_c$ [mm]	$d_w$ [mm]	$d_s$ [mm]	$\varepsilon$	$S_v$ [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

### 3.5. Modele geometryczne pian stałych

Parametry morfologiczne pian stałych, takie jak powierzchnia geometryczna, porowatość czy średnica mostków, można wyznaczyć w oparciu o modele geometryczne [73]. 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.

Najprostszym modelem geometrycznym jest model sześcienny (ang. *cubic cell*, *cc*, rys. 3.16) zaproponowany przez Lu i wsp. [37]. Porównanie wyników modelowania pian aluminiowych o gęstości 10, 20 i 40 PPI z danymi producenta wskazuje, że wykorzystanie walca jako kształtu mostka daje zadowalające rezultaty. Autorzy pracy [37] jednak podkreślają, że wielkość komórek w pianie nie jest w rzeczywistości stała. Natomiast kształt, którym można przybliżyć przekrój poprzeczny mostka, lepiej opisać kwadratem lub trójkątem, ponieważ lepiej oddają one jego rzeczywisty przekrój [37].



Rys. 3.16 Schemat modelu sześciennego (ang. *cubic cell, cc*).

Autorzy przedstawili równania umożliwiające obliczenie powierzchni geometrycznej:

$$S_v = \left( \frac{2\sqrt{3}\pi}{d_c} \right) \sqrt{\frac{\rho_{\text{piany}}}{\rho_{\text{ciała stałego}}}} \quad (4)$$

i średnicy mostka:

$$d_s = d_c \left( \frac{2}{\sqrt{3}\pi} \right) \sqrt{\frac{\rho_{\text{piany}}}{\rho_{\text{ciała stałego}}}} \quad (5)$$

Model sześcienny został również wykorzystany w pracy Gianiego i wsp. [52] dla piany kantalowej FeCrAl. Zaletą tego modelu, obok jego prostoty i akceptowalnego poziomu dokładności, jest możliwość jego łatwej modyfikacji w celu rozważenia prostopadłościanu zamiast sześcienu. Jest to istotne z uwagi na anizotropię pian, w której rozmiary porów mogą zmieniać się w zależności od rozważanego przekroju: podłużnego czy poprzecznego.

Model ten został zastosowany również przez Lacroix i wsp. [46] do wyznaczenia relacji pomiędzy średnicą mostka a średnicą ziarna dla materiałów o tej samej porowatości. Autorzy wprowadzili do swoich rozważań wymiar  $b$ , który jest opisany sumą:

$$b = d_w + 2d_s \quad (6)$$

W modelu tym objętość całkowitą modelowej komórki  $V_o$  można więc opisać prostym wzorem na objętość sześcienu:

$$V_o = b^3 \quad (7)$$

Całkowita objętość szkieletu piany może zostać obliczona jako funkcja porowatości:

$$V_s = (1 - \varepsilon)V_o \quad (8)$$

Jednak  $V_s$  można obliczyć także jako całkowitą objętość mostków (zgodnie z modelem cylindrów) zawartych w pojedynczej modelowej komórce (sześciianie):

$$V_s = \frac{12}{4} \pi \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 b \quad (9)$$

Łącząc równanie (8) i (9) średnicę mostka można wyznaczyć ze wzoru:

$$d_s = \frac{d_w [(4/(3\pi))(1 - \varepsilon)]^{1/2}}{1 - [(4/(3\pi))(1 - \varepsilon)]^{1/2}} \quad (10)$$

stąd powierzchnia geometryczna piany wyrażona jest wzorem:

$$S_v = \frac{4}{d_s} (1 - \varepsilon) \quad (11)$$

Dla złoża ziaren kulistych powierzchnia geometryczna może być wyznaczona równaniem:

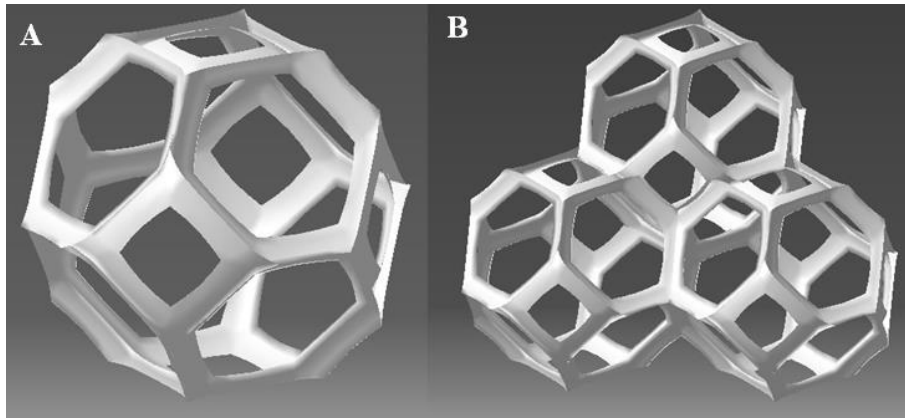
$$S_v = \frac{6}{d_z} (1 - \varepsilon) \quad (12)$$

Porównanie wzorów (10) i (11) prowadzi do związku pomiędzy średnicą mostka piany  $d_s$  a średnicą modelowej kuli  $d_z$ :

$$d_z = 1,5d_s \quad (13)$$

przy założeniu, że piana i modelowe złożo ziaren mają taką samą powierzchnię geometryczną  $S_v$  i porowatość  $\varepsilon$ .

W pracy Richardsona i wsp. [69] przedstawiony został model, w którym komórka piany jest opisana 14-ścianem składającym się z 8 sześciokątów foremnych, 6 kwadratów, 36 krawędzi (ośmiościan ścięty lub tetrakaidekahedron – TTKD), który przedstawiono na rys. 3.17.



Rys. 3.17 Pojedyncza bryła TTKD (A), połączone bryły TTKD (B).

W modelu tym mostki stanowiące krawędzie modelowej bryły mają przekrój trójkątny, a ich wymiar można opisać wzorem [30, 69]:

$$d_s = \frac{0,5338d_w(1 - \varepsilon)^{0,5}}{1 - 0,971(1 - \varepsilon)^{0,5}}(1 - \varepsilon) \quad (14)$$

natomiast powierzchnię geometryczną  $S_v$  równaniem:

$$S_v = \frac{12,979[1 - 0,971(1 - \varepsilon)^{0,5}]}{d_w(1 - \varepsilon)^{0,5}} \quad (15)$$

Autorzy [30, 69] porównali wyniki modelowania powierzchni geometrycznej pian ceramicznych wyznaczonej w oparciu o model TTKD (rys. 3.17) ze wzorem na powierzchnię geometryczną porowatego złoza:

$$S_v = \frac{4\varepsilon}{d_w} \quad (16)$$

oraz powierzchnię geometryczną wykorzystywaną w metalografii ilościowej:

$$S_v = \frac{4}{d_w} \quad (17)$$

Otrzymane dane dla wszystkich trzech modeli są zbliżone, a autorzy rekomendują używanie równania (16). Jednak, jak stwierdzają Giani i wsp. [52], struktura piany i złoza ziaren różni się diametralnie, dlatego analogia pomiędzy tymi dwoma rodzajami wypełnień wydaje się nie do końca uzasadniona. Model ten jest akceptowalny dla pian ceramicznych o porowatości w przedziale  $0,75 \div 0,8$ , natomiast nie jest on polecany dla pian o większej porowatości, np. pian metalowych.

Model TTKD został również wybrany przez Buciumana i wsp. [17] do opisu parametrów morfologicznych piany ceramicznej na bazie  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ . W celu określenia



powierzchni geometrycznej autorzy założyli, podobnie jak w pracy [69], że krawędzie mają kształt graniastosłupa o podstawie trójkątnej, i biorąc pod uwagę tylko pole powierzchni bocznej otrzymali równanie na powierzchnię geometryczną:

$$S_v = 4,82 \frac{1}{D_e} \sqrt{\varepsilon} \quad (18)$$

gdzie:  $D_e = d_w + d_s$ , m.

Model 14-ścianu był stosowany również przez Inayata i wsp. [18, 74]. Autorzy wzięli jednak pod uwagę wpływ kształtu przekroju poprzecznego mostka na powierzchnię geometryczną; rozważali kształt cylindryczny, trójkątny oraz kształt hipocykloidy (deltoidy) Steinera (ang. *concave triangular* [18], co dosłownie można tłumaczyć jako „trójkąt wklęsły”). Ostatecznie zaproponowane równanie do obliczenia powierzchni geometrycznej pian stałych ma postać:

$$S_v = 1 + \phi \frac{[1 - 0,971(1 - \varepsilon)^{0,5}]}{d_w(1 - \varepsilon)^{0,5}} (1 - \varepsilon) \quad (19)$$

gdzie  $\phi$  jest stałą geometryczną, zależną od kształtu przekroju poprzecznego mostka piany:

$\phi = 4,87$  – mostki cylindryczne,

$\phi = 5,62$  – mostki trójkątne,

$\phi = 6,49$  – mostki wklęsłe.

Natomiast do obliczeń średnicy mostka otrzymano równania [18]:

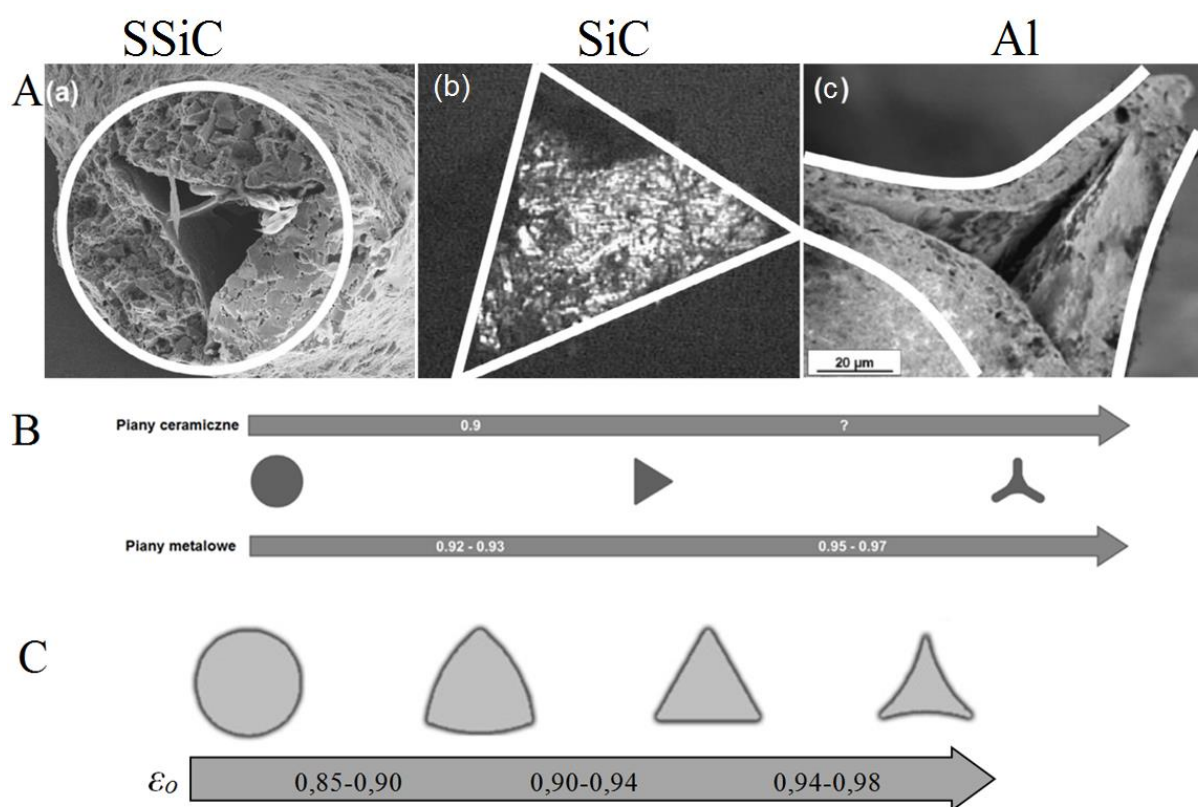
$$d_{s-trójkątny} = \frac{0,5338d_w(1 - \varepsilon)^{0,5}}{1 - 0,971(1 - \varepsilon)^{0,5}} \quad (20)$$

$$d_{s-cylindryczny} = \frac{0,6164d_w(1 - \varepsilon)^{0,5}}{1 - 0,971(1 - \varepsilon)^{0,5}} \quad (21)$$

W przypadku mostka o przekroju deltoidy Steinera autorzy proponują zastosowanie kombinacji powyższych równań: równania (21) dla obliczenia średnicy pozornej – odpowiadającej odległości pomiędzy dwoma wierzchołkami mostka i równania (20) dla obliczenia średnicy efektywnej – odpowiadającej średnicy koła opisanego na deltoidzie.

Wyboru odpowiedniego kształtu mostka, a co za tym idzie odpowiedniej wartości stałej  $\phi$ , jak sugerują autorzy [18, 74], można dokonać w oparciu o rzeczywiste kształty mostków, uzyskane np. w wyniku analizy obrazów SEM (rys. 3.18A). Kształt przekroju poprzecznego mostków pian jest powiązany z ich porowatością: przekrój poprzeczny mostków zmienia się, w zależności od porowatości piany stałej, od okrągłego do trójkątnego,

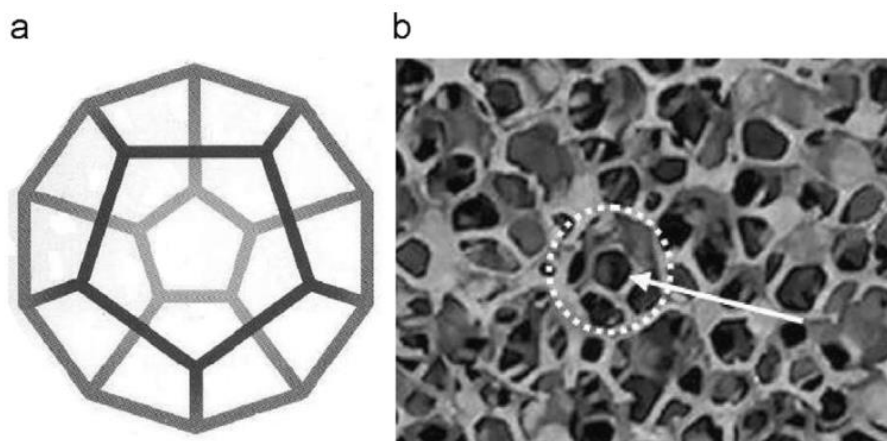
zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.18B. Zależność taką zaobserwowali już wcześniej Bhattacharya i wsp. [75] (rys. 3.18C), którzy, w porównaniu do prac Inayata i wsp. [18, 74], wprowadzili dodatkowy przekrój pomiędzy trójkątnym a okrągłym, który odpowiada przekrojowi poprzecznemu mostka pian ceramicznych (trójkąt o zaokrąglonych wierzchołkach).



Rys. 3.18 (A) – rzeczywiste kształty przekrojów poprzecznych mostków pian stałych [74]; (B) – zależność kształtu mostka od porowatości wg Inayata [74]; (C) – zależność kształtu mostka od porowatości wg Bhattacharya [75].

Porównanie wartości  $S_v$  obliczonych z modelu (19) z wynikami eksperymentalnych pomiarów powierzchni geometrycznej otrzymanych z wykorzystaniem TK dla pian ceramicznych wykazało bardzo dobrą zgodność [74]. Niestety, autorzy wykorzystali wyniki eksperymentalne dla pian o porowatości mniejszej od 0,9, dlatego nie stwierdzono, czy model sprawdza się również dla pian o większych porowatościach.

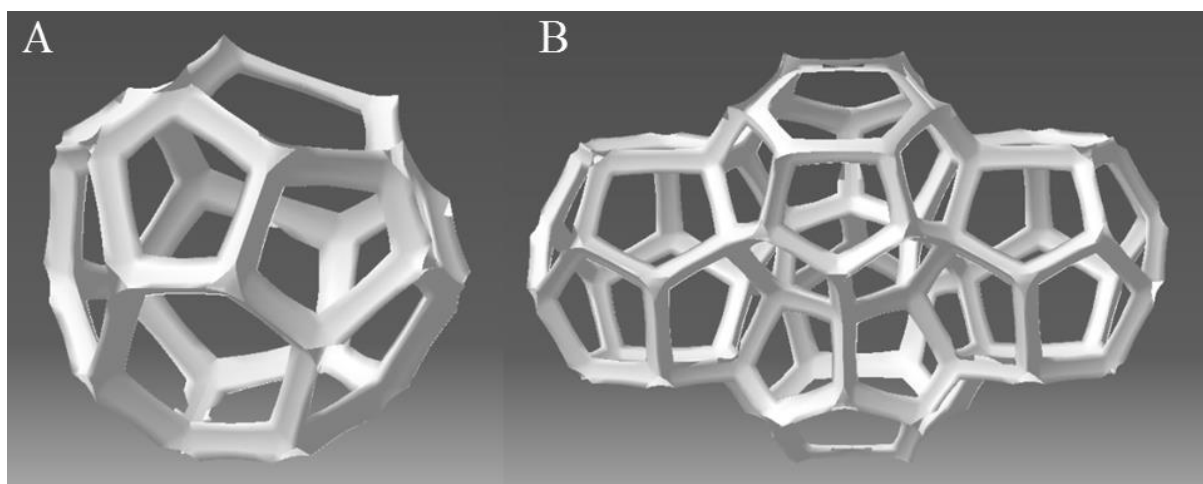
Lacroix i wsp. w pracy [31], analizując strukturę piany SiC doszli do wniosku, że najlepiej przybliża ją kształt dwunastościanu foremego (dodecahedronu) składający się z dwunastu pięciokątów foremnych, 20 wierzchołków i 30 krawędzi (rys. 3.19).



Rys. 3.19 Modelowa komórka o kształcie dodekahedronu (a) oraz zaznaczona komórka piany SiC (b) [31].

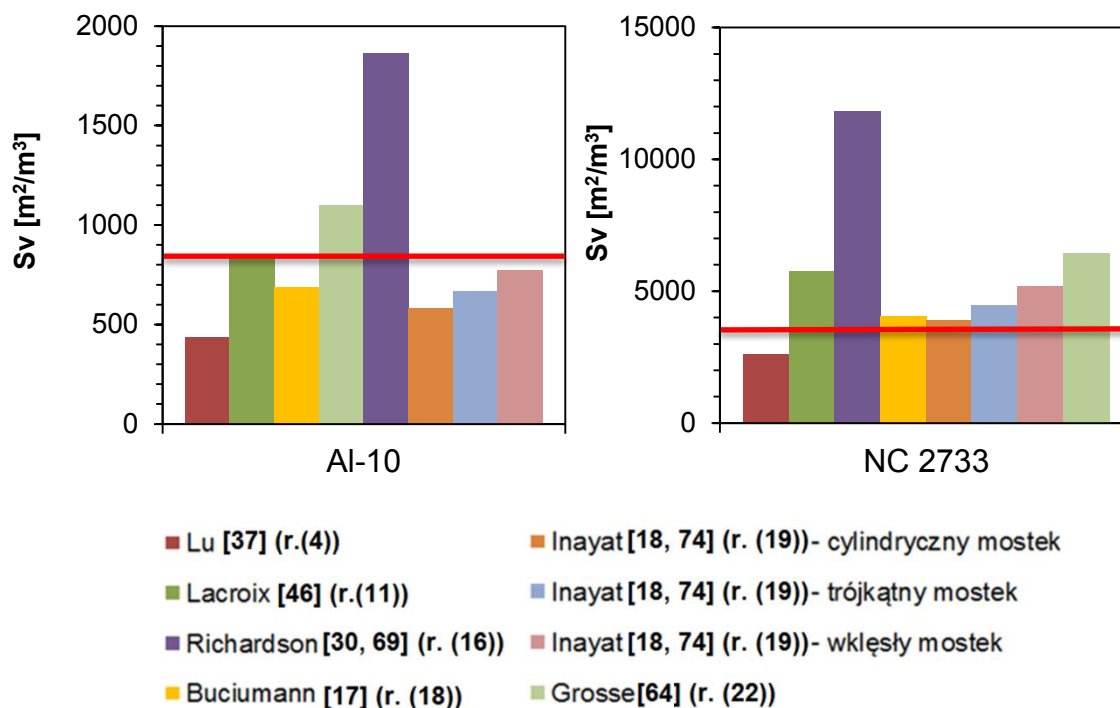
Po połączeniu 2 dwunastościanów oraz 6 czternastościanów otrzymamy strukturę zaproponowaną przez Weaire'a i Phelana (rys. 3.20). Modelem tym, jak sugerują Grosse i wsp. [64], można lepiej odwzorować nieregularną strukturę pian. Mostki traktowane są jako cylindry z otworem wewnątrz. Ponadto autorzy [64] sugerują, że należy wziąć pod uwagę także zgrubienia materiału w miejscu łączenia mostków, tzw. węzły. W rezultacie zostało opracowane równanie:

$$S_v = \frac{8,21\sqrt{1-\varepsilon} - 1,55(1-\varepsilon)}{d_w + d_s} \quad (22)$$



Rys. 3.20 Pojedyncza struktura Weaire'a i Phelana (A), upakowane bryły (B).

Wybrane modele, spośród omówionych powyżej, zostały porównane z wynikami eksperymentalnymi otrzymanymi przy użyciu mikrotomografii w połączeniu z oprogramowaniem iMorph dla badanych pian, co pokazano na rys. 3.21 dla pian Al-10 oraz NC 2733.



Rys. 3.21 Porównanie modeli literaturowych (słupki) z wyznaczonymi powierzchniami geometrycznymi pian Al-10 i NC 2733 (linia).

Można zauważyć, że równanie zaproponowane przez Lacroix i wsp. [46] (równanie (11)) z najlepszą dokładnością przybliża powierzchnię piany aluminiowej o gęstości 10 PPI. Natomiast dla piany NC 2733, najbliższy eksperymentalnej wartości powierzchni geometrycznej  $S_v$  jest wynik otrzymany z korelacji opracowanej przez Inayata i wsp. [18, 74] dla cylindrycznego przekroju poprzecznym mostka (równanie (19)). Dla pozostałych pian obserwowano podobne rozbieżności, co przedstawiono w tabeli 7.

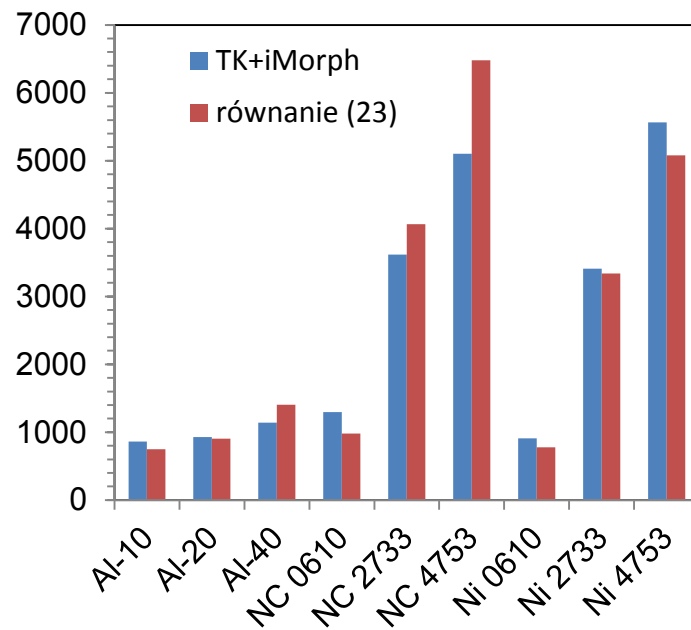
Tabela 7. Dokładność wybranych modeli do wyznaczania powierzchni geometrycznej badanych pian stałych.

Autor modelu		$e_{Y,śr}$ [%]
Lu i wsp. [37]		42,3
Lacroix i wsp. [46]		28,4
Richardson i wsp. [30]		179,0
Buciuman i wsp. [17]		17,5
Inayat i wsp. [18, 74]	cylindryczny mostek	18,3
	trójkątny mostek	16,8
	wklęsły mostek	21,8
Grosse i wsp. [64]		24,7

Analizując dostępne modele literaturowe, stwierdzono, że model zaproponowany przez Richardsona i wsp. [30] (równanie (16)) jest modelem prostym i łatwym w użyciu. Jeśli zamiast średnicy okna, zaproponowanej przez autorów [30], zastosujemy średnicę komórki jako wymiar charakterystyczny:

$$S_v = \frac{4\varepsilon}{d_c} \quad (23)$$

wówczas równanie to przybliży eksperymentalnie wyznaczone powierzchnie geometryczne wszystkich badanych pian, ze średnim błędem ok. 14% (rys. 3.22).



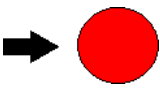
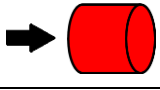
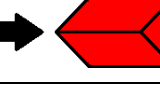

Rys. 3.22 Porównanie wyników obliczeń powierzchni geometrycznych wg równania (23) z wynikami eksperymentalnymi.

## 4. Opory przepływu przez złoża pian stałych

### 4.1. Aktualny stan wiedzy

Na podstawie doniesień literaturowych wyróżnić można szereg parametrów wpływających na opory przepływu. Jednym z nich jest gęstość piany: wraz ze wzrostem PPI wyraźnie wzrastają opory przepływu [30, 31, 34, 38, 56, 65, 66, 69, 76-88]. Zależność ta występuje niezależnie od materiału, z którego wykonane są piany. Wraz ze zmianą gęstości porów (PPI) zmieniają się oczywiście wartości pozostałych parametrów morfologicznych, takich jak średnica mostka, okna, komórki, pora czy też powierzchnia geometryczna. Można więc stwierdzić, że opory przepływu zależą od parametrów morfologicznych. Drugim parametrem, mającym niewątpliwie istotny wpływ na opory przepływu jest porowatość złoża: im większa porowatość, tym większa wolna przestrzeń dla płynącego gazu, a zatem mniejsze opory przepływu [89]. Nie bez znaczenia pozostaje również kształt przekroju poprzecznego mostków, który zależy od porowatości pian stałych, na co zwrócili uwagę Bhattacharya i wsp. [75] oraz Inayat i wsp. [74] (patrz rys. 3.18). Od dawna bowiem wiadomo, że kształt opływającego elementu ma istotny wpływ na wartość współczynnika oporu czołowego  $C_D$ . Przykładowe wartości współczynnika  $C_D$  zestawiono w tabeli 8 [90, 91].

Tabela 8. Wartość współczynnika oporu czołowego  $C_D$  w zależności od kształtu bryły [90, 91] dla  $Re = 10^4 \div 10^5$ .

Bryła	Wizualizacja bryły i kierunku przepływu	$C_D$
Kula		0,47
Walec		0,62÷0,98
Graniastosłup o podstawie trójkątnej		1,2*
		1,3÷3,5*

\*dane odczytane z wykresu [91]

Ponadto w przypadku pian stałych na wartość współczynnika oporu przepływu ma wpływ, obok kształtu mostków, również ich długość, na co zwrócili uwagę Kumar i Topin [92].

W literaturze można wskazać dwa zasadnicze sposoby opisu oporów przepływu płynu przez złoża porowate, do których zaliczają się też piany stałe. Pierwszy sposób polega na opisie spadku ciśnienia z wykorzystaniem tzw. współczynnika przepuszczalności,  $K$ . Dla nieliniowej zależności pomiędzy spadkiem ciśnienia a prędkością przepływu, używane jest równanie Forchheimera:

$$\frac{\Delta P_K}{H} = \frac{\eta}{K} w_0 + \beta \rho w_0^2 \quad (24)$$

W równaniu tym opory przepływu są sumą składowej laminarnej (gradient ciśnienia proporcjonalny do lepkości płynu) i burzliwej (proporcjonalnie do gęstości płynu), z ewentualnym udziałem oporów inercyjnych.

Szczególnym przypadkiem równania Forchheimera jest wzór Erguna [92] dla złoża ziaren usypanych:

$$\frac{\Delta P_{dz}}{H} = C_1 \frac{\eta w_0 (1 - \varepsilon)^2}{d_z^2 \varepsilon^3} + C_2 \frac{\rho w_0^2 (1 - \varepsilon)}{d_z \varepsilon^3} \quad (25)$$

W równaniu tym złożo porowate jest taktowane jako wiązka kapilar. Pierwszy człon równania odnosi się do przepływu laminarnego w kapilarze, drugi do przepływu burzliwego, z uwzględnieniem oporów czołowych. Współczynniki  $C_1$ ,  $C_2$  równania (25) uwzględniają odpowiednio opory laminarne i turbulenty, w tym opory inercyjne, i są zwykle określane doświadczalnie.

Inny sposób opisu oporów przepływu gazu przez złożo stałe polega na wyznaczeniu bezwymiarowego współczynnika oporu hydraulicznego. W zależności od tego, w jaki sposób traktujemy rozpatrywany ośrodek, możemy tu wyróżnić dwa zasadnicze podejścia. W pierwszym przypadku złożo traktowane jest jako kapilara, przez którą przepływa medium. Tym samym możemy zastosować klasyczne równanie Darcy-Weisbacha. Jest to rozwiązanie często stosowane w mechanice płynów dla przepływu burzliwego w rurze, z poprawką w postaci wolnej objętości w przypadku złożów porowatych:

$$\frac{\Delta P_D}{H} = 2f_D \frac{\rho w_0^2}{\varepsilon^2 D} \quad (26)$$

Współczynnikiem proporcjonalności jest tutaj współczynnik oporu hydrodynamicznego Fanninga,  $f$ . Otrzymane wyniki często koreluje się z wykorzystaniem równania:

$$f_D = \frac{A_1}{Re_D} + A_2 \quad (27)$$

Pierwszy człon zawierający liczbę Reynoldsa opisuje składową laminarną, natomiast stała  $A_2$  odpowiada za efekty turbulentne i inercyjne (w tym opór czołowy kształtu).

Drugi model traktuje przepływ płynu w złożach porowatych jako opływ wokół elementów ciała stałego, tworzących rozważane złożo. Podstawę stanowi tu równanie na opór pojedynczego elementu:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho w_0^2 C_D A \quad (28)$$

Należy zauważyć, że na opór czołowy (ang. *drag force*), składają się opory o charakterze zarówno lepkościowym, jak i inercyjnym. Tradycyjnie rozpatrywana jest prędkość płynu liczona na pusty aparat, tzw. *approach velocity*, czyli prędkość zbliżeniowa w pewnej odległości od elementów wypełnienia. Współczynnikiem proporcjonalności jest bezwymiarowy współczynnik oporu (kształtu)  $C_D$  (ang. *drag coefficient*). W przypadku tego modelu najprostsze, a zarazem najczęściej rozpatrywane przypadki to opływ walca nieskończonego lub kuli. Opór czołowy jest zawsze odniesiony do wartości powierzchni przekroju elementu  $A_c$  prostopadłego do kierunku przepływu.

Powyższe równania stanowią punkt wyjścia w rozważaniach oporów przepływu przez piany stałe. Najczęściej spotykane są korelacje oparte o zmodyfikowaną postać równania Forchheimera i Erguna, w których złożo porowate traktowane jest jako zbiór równoległych kapilar. Przykładowe równania opracowane w oparciu o rozwiązania Forchheimera i Erguna przedstawiono w tabeli 9. Jak można zauważyć, równania te w wielu przypadkach różnią się jedynie wartościami współczynników  $C_1$  i  $C_2$ , które często dopasowane są w oparciu o dane eksperymentalne [36, 80, 93, 94] lub metodą iteracji [76, 95]. Stąd współczynniki te zależą od materiału i gęstości badanych pian, co oznacza, że nie mają one charakteru uniwersalnego. Ponadto w równaniach autorzy różnie definiują wymiar poprzeczny, który może być powiązany ze średnicą mostka [80, 93, 96], komórki [36, 52], okna [87, 88, 97], porowatością [78, 94, 98] czy gęstością porów [84, 99].



Tabela 9. Równania literaturowe opracowane w oparciu o rozwiązania Forchheimera i Erguna opisujące opory przepływu dla pian stałych.

Autor	Piany	Wymiar poprzeczny	Równanie
Topin i wsp. [80, 93]	NC, Ni, Cu	$d_s$	$\frac{\Delta P_{ds}}{H} = \frac{1}{1,391 \times 10^{-4}} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{d_s^2 \varepsilon^3} \eta w_0 + 1,32 \rho w_0^2 \quad (29)$
Giani i wsp. [52]	FeCrAl, Cu	$d_s = d_c \left[ \frac{4}{3\pi} (1 - \varepsilon) \right]^{1/2}$	$\frac{\Delta P_{ds}}{H} = 13,56 \frac{d_c^3}{2(d_c - d_s)^4 d_s} \eta w_0 + 0,87 \frac{d_c^3}{2(d_c - d_s)^4} \rho w_0^2 \quad (30)$
Fourie i Du Plessis [87], Du Plessis i wsp.[88]	Al, Ni	$d_w$	$\frac{\Delta P_{dw}}{H} = 36 \frac{\tau(\tau - 1)(3 - \tau)^2}{4d_w^2 \varepsilon^2} \eta w_0 + 2,05 \frac{\tau(\tau - 1)}{2d_w \varepsilon^2} \rho w_0^2 \quad (31)$ $\tau = 2 + 2 \cos \left( \frac{4\pi}{3} + \frac{1}{3} \cos^{-1}(2\varepsilon - 1) \right)$
Inayat i wsp. [97]	Struktura TTKD wykonana z Ti-6Al- 4V	$d_w$	$\frac{\Delta P_{dw}}{H} = \alpha \frac{S_v^2 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \eta w_0 + \beta \frac{S_v (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \rho w_0^2 \quad (32)$ $\alpha = \left[ \left( \frac{1 - 0,971(1 - \varepsilon)^{0,5}}{0,6164(1 - \varepsilon)^{0,5}} \right) \varepsilon \right]^{-1}$ $\beta = \left[ \left( \frac{1 - 0,971(1 - \varepsilon)^{0,5}}{0,6164(1 - \varepsilon)^{0,5}} \right) (1 - \varepsilon) \right]$ $S_v = 4,867 \frac{[1 - 0,971(1 - \varepsilon)]^{0,5}}{d_w (1 - \varepsilon)^{0,5}}$

Cd tabela 9. Równania literaturowe opracowane w oparciu o rozwiązania Forchheimera i Erguna opisujące opory przepływu dla pian stałych.

Autor	Piany	Wymiar poprzeczny	Równanie
Inayat i wsp. [74]	Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> , FeCrAl, SiC, SSIC	$D_h = \frac{4\varepsilon}{S_v}$	$\frac{\Delta P_{Dh}}{H} = 32 \frac{\tau^2}{D_h^2 \varepsilon} \eta w_0 + \frac{1}{2} \frac{\tau^3}{D_h \varepsilon^2} \rho w_0^2 \quad (33)$ $\tau$ - geometryczny współczynnik labiryntowości $\phi$ zależy od kształtu przekroju poprzecznego mostka: $\phi = 4,87$ – mostki cylindryczne $\phi = 5,62$ – mostki trójkątne $\phi = 6,49$ – mostki wklęsłe
Liu i wsp. [94]	Al	$D_p = 1,5d_p \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon}$	$\frac{\Delta P_{Dp}}{H} = 22 \frac{(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} \eta w_0 + 0,22 \frac{(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} \rho w_0^2 \quad (34)$
Khayargoli i wsp. [78]	NC	$D_p = 1,5d_p \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon}$	$\frac{\Delta P_{Dp}}{H} = 100 \frac{(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} \eta u_0 + 1 \frac{(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} \rho w_0^2 \quad (35)$
Mancin i wsp. [84, 99]	Al	$D_h = 0,0122PPI^{-0,849}$	$\frac{\Delta P_{Dh}}{H} = \frac{2 \left( \frac{1,765 Re^{-0,1014} \varepsilon^2}{PPI^{0,6}} \right) \rho w_0^2}{D_h} \quad (36)$

W literaturze można znaleźć także równania, które opisują współczynnik oporów hydraulicznych w pianach za pomocą współczynnika przepuszczalności  $K$ . Współczynnik oporów określany jest wówczas równaniem [100]:

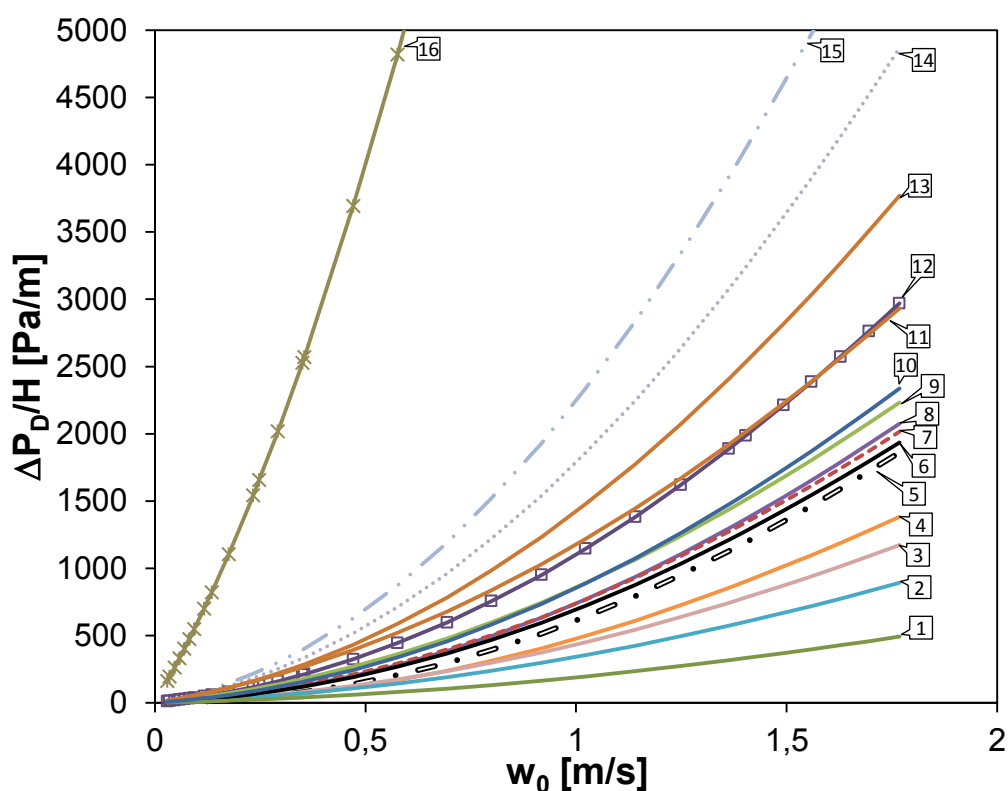
$$f_K = \frac{(\Delta P_K/H)\sqrt{K}}{\rho w_0^2} \quad (37)$$

natomiast liczba Reynoldsa zdefiniowana jest równaniem:

$$Re_K = \frac{\rho w_0 \sqrt{K}}{\eta} \quad (38)$$

Korelacje wykorzystujące powyższe zależności zestawiono w załączniku A.7.

Porównanie wartości oporów przepływu, wyznaczonych dla pian stałych w oparciu o przykładowe równania literaturowe, przedstawiono na rys. 4.1. Do porównania wykorzystano dane morfologiczne dla piany Al-20.



Rys. 4.1 Porównanie korelacji literaturowych opisujących opory przepływu dla pian stałych: 1 – Liu i wsp. [94]; 2 – Beavers i Sparrow [101]; 3 – Paek i wsp. [100]; 4 – Mancin i wsp. [84]; 5 – Inayat i wsp. [97]; 6 – Lacroix i wsp. [31]; 7 – Moreira i wsp. [76]; 8 – Inayat i wsp. [74]; 9 – Khayargoli i wsp. [78]; 10 – Dietrich i wsp. [56]; 11 – Giani i wsp. [52]; 12 – Fourie i Du Plessis [87]; Du Plessis i wsp. [88]; 13 – Innocentini i wsp. [98]; 14 – Colombo i wsp. [36]; 15 – Topin i wsp. [80]; 16 – Mao i wsp. [95]. Wykorzystano dane morfologiczne dla piany Al-20.

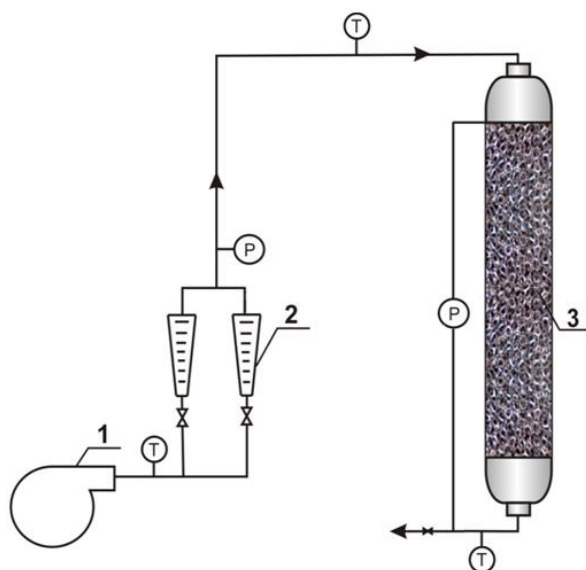
Jak można zauważyć, pomimo licznych prac poświęconych zagadnieniu oporów przepływu przez złoża pian stałych, liczba prezentowanych przez badaczy równań nie przekłada się na możliwości ich aplikacji w praktyce projektowej. W rzeczywistości nie jest to zjawisko zaskakujące. Przyczyną są znaczące różnice w budowie morfologicznej pian, na które składa się ich materiał, technologia produkcji czy gęstość porów. Jedną z przyczyn, jak wspomniano wcześniej, jest brak uniwersalności wielu równań proponowanych w literaturze. Ponadto, różnice w sposobie wyznaczania powierzchni właściwej oraz parametrów morfologicznych opisujących szkielet pian stałych również mogą wpływać na dokładność stosowanych korelacji [29].

#### *4.2. Aparatura badawcza i metodyka prowadzenia badań eksperymentalnych*

Badania doświadczalne oporów przepływu prowadzono w aparaturze przedstawionej na rys. 4.2. Główny element stanowiła 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. Wysokość pojedynczego krążka wynosiła 0,005 lub 0,01 m, natomiast wysokość złoża zmieniana była w zakresie 0,05÷0,6 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÷1,8 ms<sup>-1</sup>. 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 ( $\Delta P < 850$  Pa) oraz manometr hydrostatyczny ( $\Delta P \geq 850$  Pa).

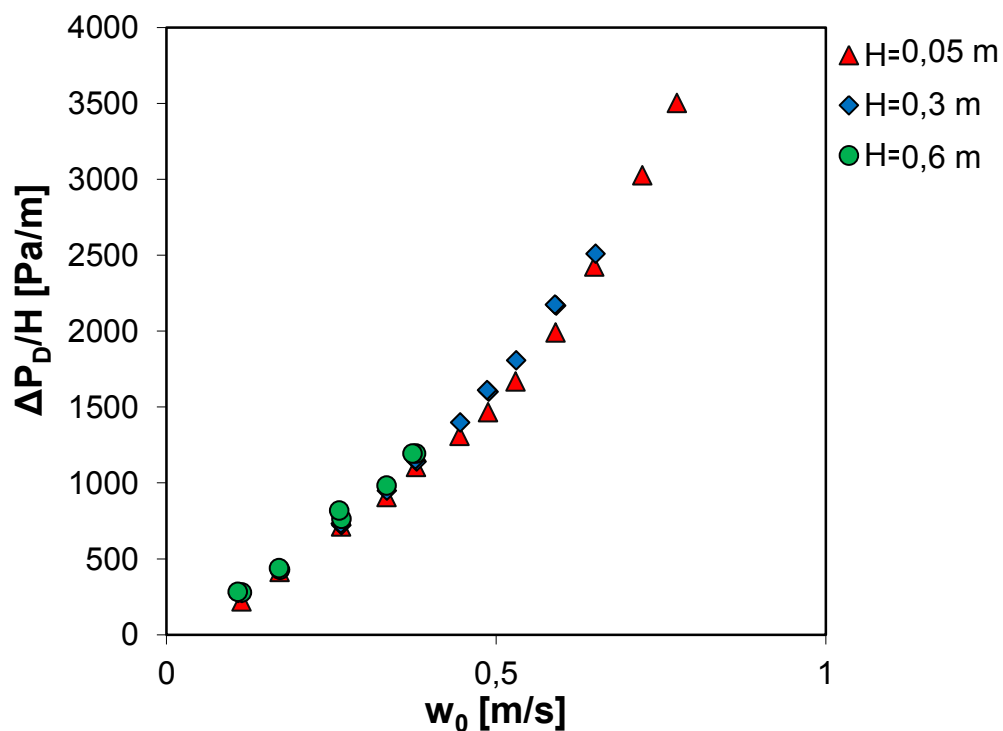
Przed rozpoczęciem właściwych badań wykonano serię pomiarów dla kolumny pomiarowej wypełnionej jedynie koszulką termokurczliwą. Wskazania różnicy ciśnień dla całego badanego zakresu były pomijalnie małe w porównaniu z wielkością dla złoża pian (poniżej 1%).



Rys. 4.2 Schemat aparatury do badania oporów przepływu: 1 – dmuchawa, 2 – rotametry, 3 – kolumna z wypełnieniem, T – termopary, P – manometr (mikromanometr Recknagla lub U-rurka).

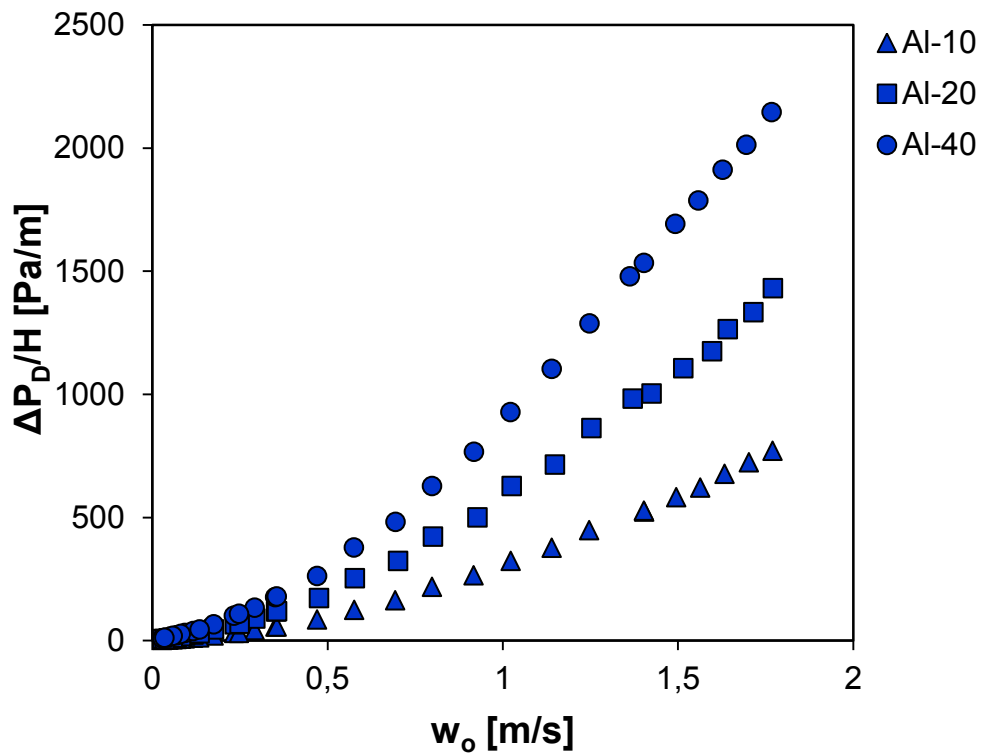
#### 4.3. Wyniki badań oporów przepływu

Pierwszym etapem było sprawdzenie wpływu wysokości złoża na jednostkowy spadek ciśnienia. W tym celu zbadano opory przepływu dla 3 różnych wysokości złoża piany NC 2733, mianowicie dla 0,05; 0,3 i 0,6 m, co przedstawiono na rys. 4.3.

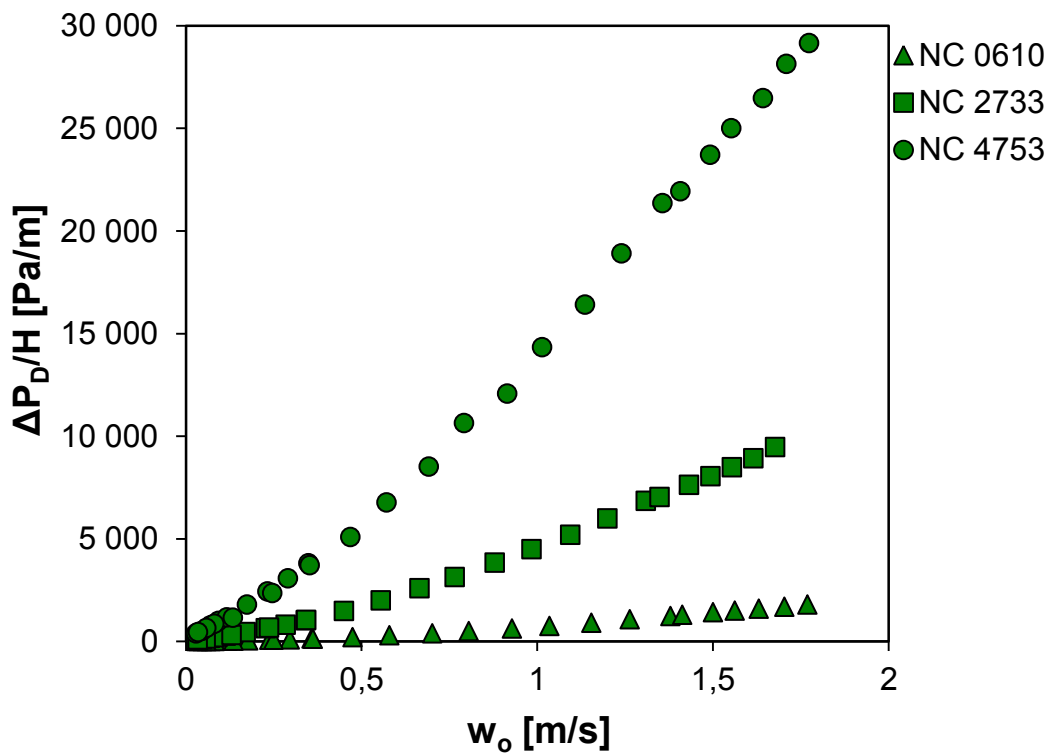


Rys. 4.3 Wpływ wysokości złoża na opory przepływu pian na przykładzie NC 2733.

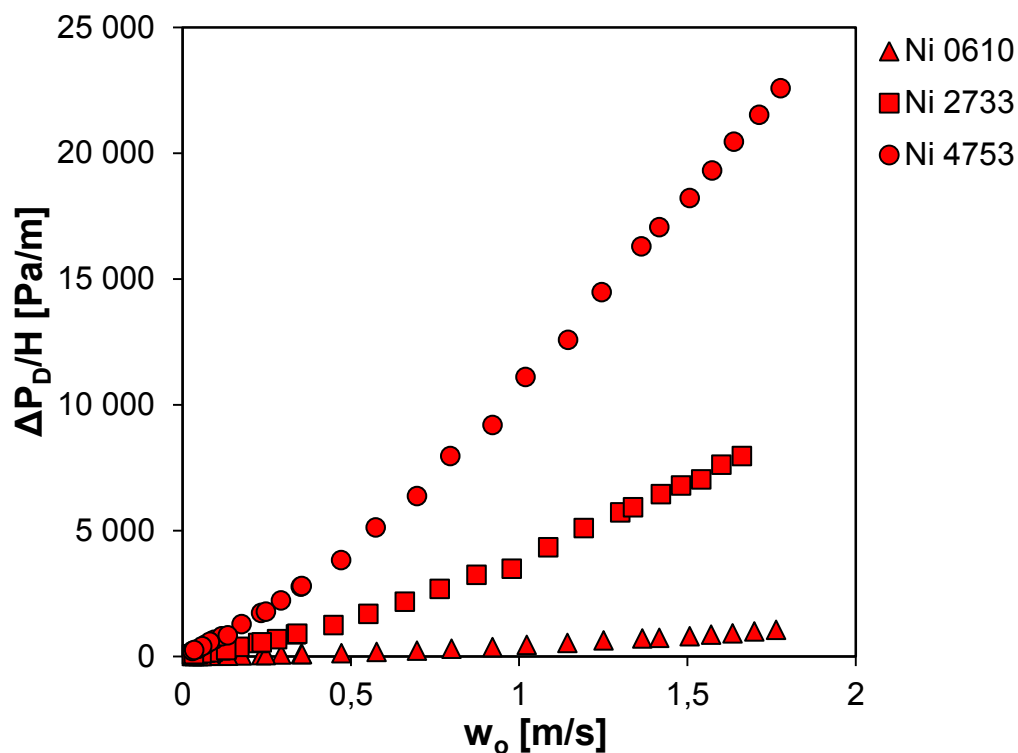
Jak można zauważyć, wysokość złoża praktycznie nie wpływa na jednostkowy gradient ciśnienia. Wyniki badań oporów przepływu dla pian Al, NC i Ni przedstawiono odpowiednio na rys. 4.4-4.6.



Rys. 4.4 Opory przepływu przez piany Al.



Rys. 4.5 Opory przepływu przez piany NC.

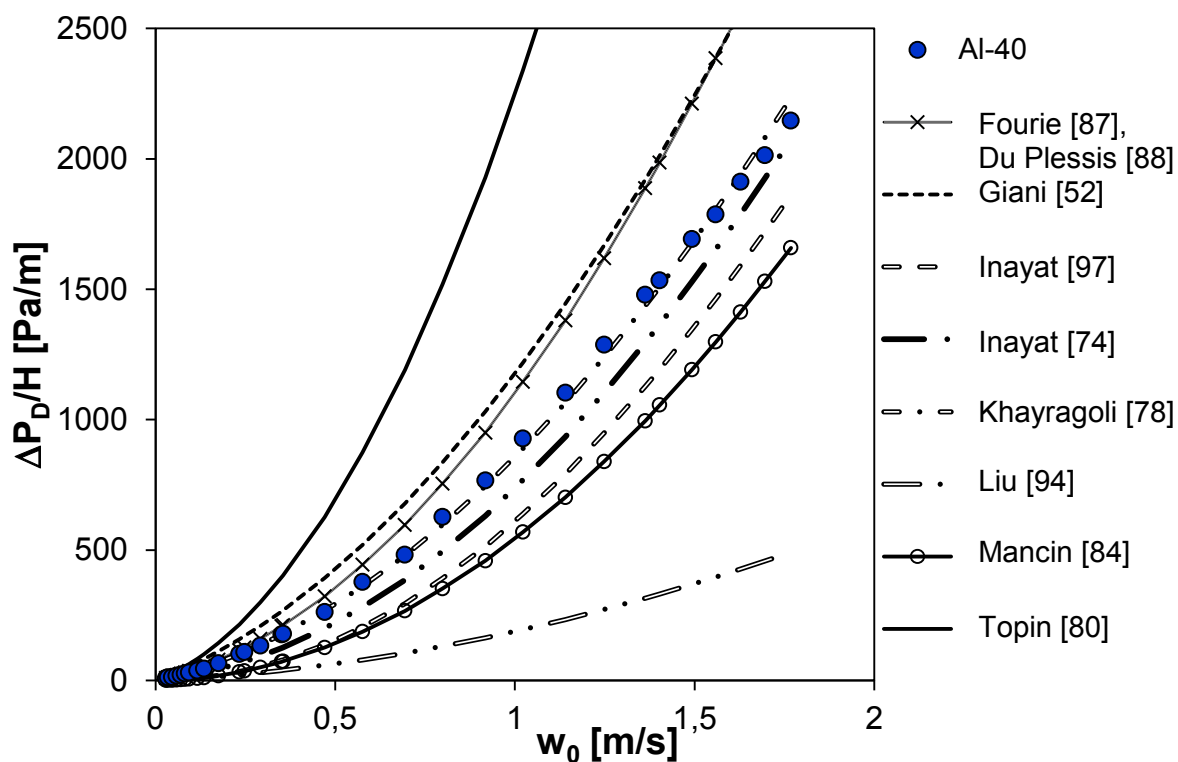


Rys. 4.6 Opory przepływu przez piany Ni.

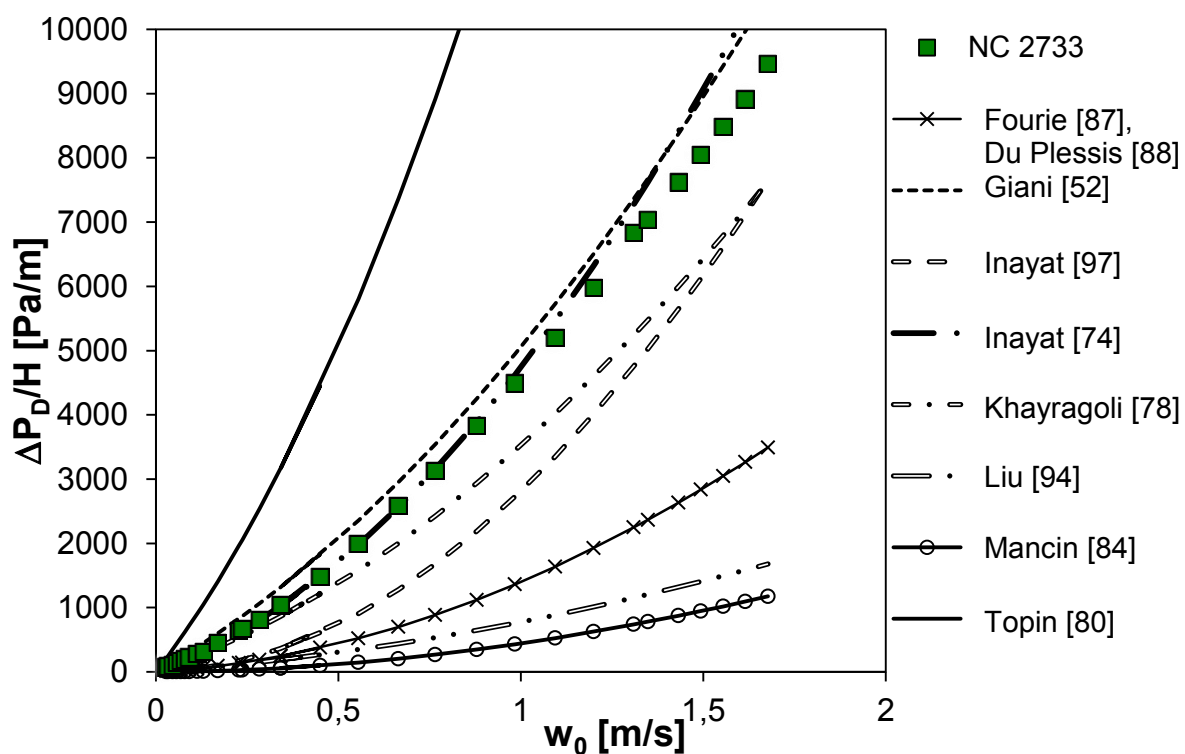
Jak można zauważyć, opory przepływu rosną ze wzrostem prędkości gazu oraz ze wzrostem PPI (a zatem ze zmniejszaniem się średnicy porów).

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

Jak już wspomniano wcześniej, w literaturze dostępnych jest wiele równań opisujących opory przepływu gazu przez złożę pian stałych. Porównanie eksperymentalnych wyników oporów przepływu dla wybranych pian metalowych (Al-40, NC 2733 i Ni 0610) z literaturowymi równaniami korelacyjnymi przedstawiono odpowiednio na rys. 4.7-4.9. Do porównania z otrzymaną bazą wyników eksperymentalnych wybrano korelacje opracowane dla pian wykonanych z Al [84, 87, 88, 94], NC [78, 80], Ni [80, 87, 88] oraz FeCrAl [52] – ponieważ ich struktura posiada cechy zbliżone do piany NC. Ponadto, równania zaproponowane przez Inayata i wsp. [74, 97], które opracowano dla różnego rodzaju pian w oparciu o ich geometrię, również zostały wybrane do celów porównawczych ze względu na ich ogólny charakter.

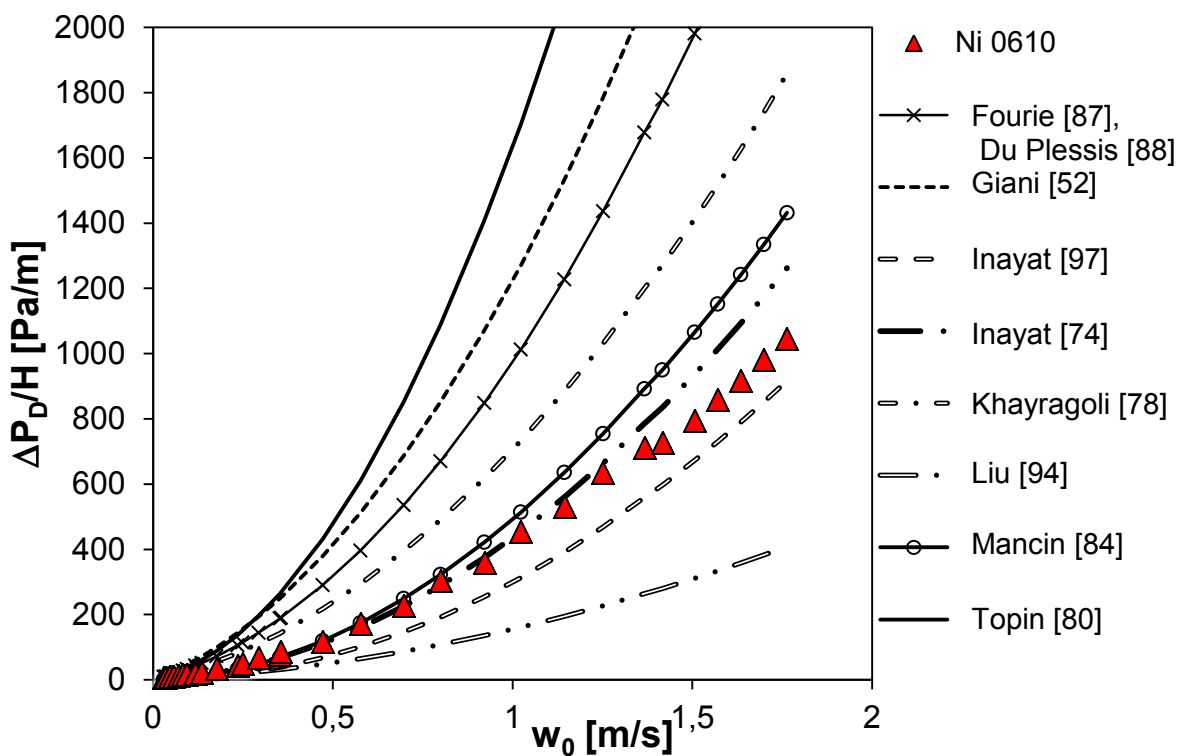


Rys. 4.7 Opory przepływu dla pian Al-40: porównanie wyników eksperymentalnych z korelacjami literaturowymi.



Rys. 4.8 Opory przepływu dla pian NC 2733: porównanie wyników eksperymentalnych z korelacjami literaturowymi.





Rys. 4.9 Opory przepływu dla pian Ni 0610: porównanie wyników eksperymentalnych z korelacjami literaturowymi.

Równania literaturowe wykazują poważne rozbieżności w porównaniu z wynikami badań eksperymentalnych, co przedstawiono w tabeli 10.

Tabela 10. Porównanie wyników eksperymentalnych z korelacjami literaturowymi.

Autorzy Piana	błąd korelacji $e_{Y,\bar{s}r}$ [%]			
	Fourie[87], Du Plessis i wsp. [88]	Giani i wsp. [52]	Inayat i wsp. [97]	Inayat i wsp. [74]
NC 0610	92,87	127,22	33,87	12,50
NC 2733	74,23	23,59	57,24	5,75
NC 4753	91,78	26,52	77,27	39,49
Ni 0610	122,80	193,18	50,26	24,53
Ni 2733	71,56	47,50	63,94	23,61
Ni 4753	98,97	99,52	97,87	94,65
Al-10	333,17	164,37	37,45	22,88
Al-20	52,23	58,09	49,64	31,49
Al-40	53,83	74,29	64,27	30,40
<b>średnia</b>	110,16	90,48	59,09	31,70

Cd. tabela 10. Porównanie wyników eksperymentalnych z korelacjami literaturowymi.

Autorzy Piana	błąd korelacji $e_{Y,śr}$ [%]			
	Khayragoli i wsp. [78]	Liu i wsp. [94]	Mancin i wsp. [84]	Topin i wsp. [80]
NC 0610	24,63	72,58	53,03	314,60
NC 2733	17,89	81,94	93,51	201,85
NC 4753	50,48	89,11	98,01	116,43
Ni 0610	67,94	63,05	37,67	225,56
Ni 2733	6,68	79,18	92,08	187,21
Ni 4753	99,74	99,94	99,71	93,79
Al-10	87,78	58,69	53,34	456,55
Al-20	13,30	49,07	30,97	91,56
Al-40	11,95	101,81	59,43	210,31
<b>średnia</b>	42,27	77,26	68,64	210,87

Jak już wspomniano wcześniej, różnice te tłumaczyć można, jak sugeruje Dietrich [29], problemami z prawidłowym określeniem powierzchni geometrycznej i pozostałych parametrów morfologicznych charakteryzujących szkielet pian stałych. Jedynie teoretyczne równanie (33) (tabela 8) zaproponowane przez Inayata i wsp. [74] opisuje spadek ciśnienia z dobrą dokładnością dla wszystkich badanych pian ( $e_{Y,śr} = 32\%$ ). Równanie (33) ma postać zmodyfikowanego równania Erguna i uwzględnia parametry morfologiczne pian:

$$\frac{\Delta P_{Dh}}{H} = 32 \frac{\tau^2}{D_h^2 \varepsilon} \eta w_0 + \frac{1}{2} \frac{\tau^3}{D_h \varepsilon^2} \rho w_0^2$$

gdzie  $\tau$  jest geometrycznym współczynnikiem labiryntowości zdefiniowanym:

$$\tau = 1 + \frac{S_v d_w}{4\varepsilon} \quad (39)$$

a powierzchnia geometryczna wyrażona jest równaniem:

$$S_v = \phi \frac{[1 - 0,971(1 - \varepsilon)]^{0,5}}{d_w(1 - \varepsilon)^{0,5}} \quad (40)$$

stąd

$$\tau = 1 + \phi \frac{[1 - 0,971(1 - \varepsilon)]^{0,5}}{4\varepsilon(1 - \varepsilon)^{0,5}} (1 - \varepsilon) \quad (41)$$

w którym  $\phi$  jest bezwymiarowym współczynnikiem kształtu przekroju poprzecznego mostka (patrz tabela 9).

#### 4.4. Mechanizm przepływu przez piany stałe

Pomimo wielu badań przedstawionych w literaturze, do tej pory problem mechanizmu przepływu przez piany stałe nie był w zasadzie 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 biegnących na wypełnieniach strukturalnych z pian stałych.

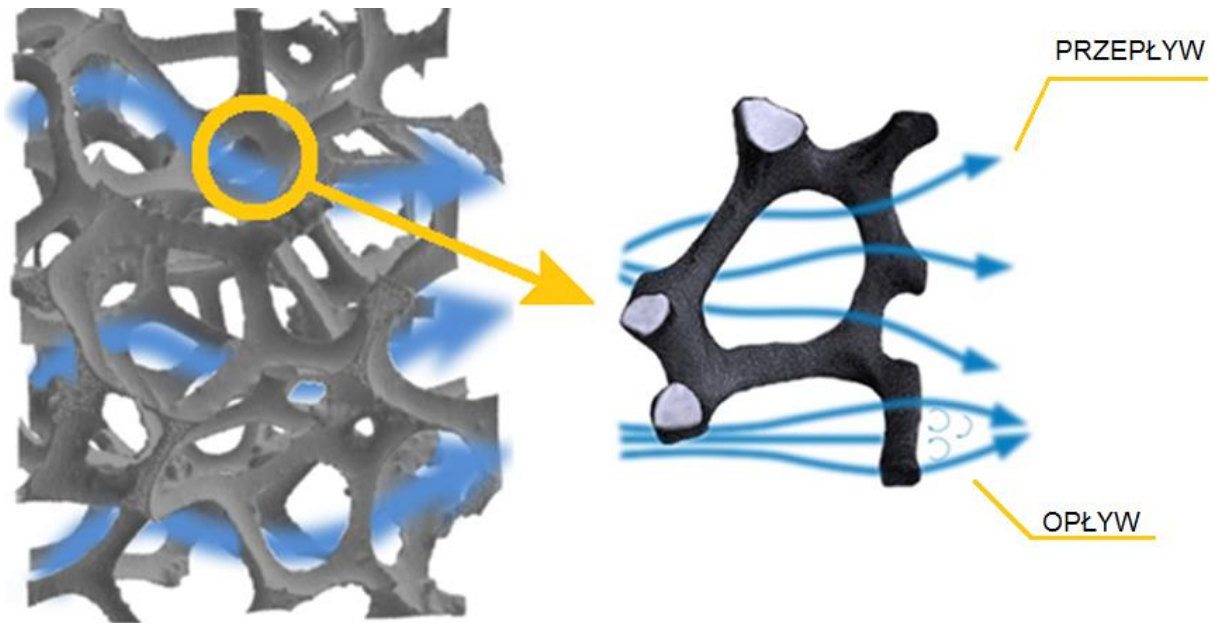
Rozważając mechanizm przepływu płynu przez dowolny ośrodek porowaty, najczęściej rozpatruje się dwa podstawowe modele: model przepływu przez kapilarę oraz model opływu ciała stałego, zazwyczaj kuli lub walca.

Oba podejścia są z powodzeniem stosowane do opisu np.:

- transportu pneumatycznego i sedymentacji ziaren – opływ kuli [102, 103];
- przepływu płynu przez siatki tkane – opływ walca [104];
- przepływu przez bardzo krótkie monolity – przepływ przez krótki kanał kapilarny [105];
- w modelu Erguna [92] dla złoża ziaren usypanych – przepływ przez długą kapilarę.

Należy tu podkreślić, że w kapilarze zazwyczaj mamy do czynienia z przepływem laminarnym (liczba Reynoldsa  $< 2100$ ), który jest powszechnie identyfikowany z równoległymi liniami strumienia i parabolicznymi profilami prędkości lub temperatury; taki rodzaj przepływu nazywa się rozwiniętym przepływem laminarnym. Ponadto, w odcinku wlotowym kanału występuje tzw. rozwijający się przepływ laminarny; oznacza to płaski profil prędkości na wlocie do kanału, który stopniowo przekształca się w profil paraboliczny, charakterystyczny dla przepływu rozwiniętego. Jeśli zachodzi transport ciepła, profile temperatury formują się podobnie (przepływ rozwijający się termicznie). W rozwijającym się przepływie laminarnym, w krótkiej kapilarze lub we wlotowej części długiego kanału, transport pędu, ciepła i masy jest zdecydowanie intensywniejszy, niż w warunkach rozwiniętego przepływu laminarnego [106, 107].

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. 4.10.



Rys. 4.10 Wizualizacje rozważanych mechanizmów przepływu przez piany: przepływu przez krótką kapilarę oraz opływu ciała stałego.

Podsumowując, oba podejścia, to jest opływ ciała stałego oraz przepływ przez krótką kapilarę, wydają się być wiarygodne z fizycznego punktu widzenia, dlatego poddano je dokładniejszej analizie.

#### 4.4.1. Przepływ przez krótką kapilarę

Biorąc pod uwagę strukturę piany stałej (rys. 3.1), można wyróżnić dwa elementy morfologiczne o cechach krótkich kanałów kapilarnych:

1. komórka – większa struktura wyróżniana w szkielecie piany, o kształcie eliptycznym lub kulistym, średnicy i długości modelowego kanału równej  $d_c$ ,
2. okno – o średnicy  $d_w$ , wyraźnie mniejszej niż średnica komórki, dla której długością kanału jest średnica mostka  $d_s$ .

Jednakże struktura pian jest skomplikowana i stochastyczna, dlatego wzięto pod uwagę również inne średnice modelowego kanału:

3. średnicę hydrauliczną, zdefiniowaną jako  $D_h = 4\varepsilon/S_v$ ,
4. przeciętną średnicę porów  $d_p$ .

Jeśli dla dwóch pierwszych przypadków długość kanału jest intuicyjna, to dla pozostałych nie jest już tak oczywista. Wzięto zatem również pod uwagę średnicę pora jako długość modelowego kanału. Podsumowując, możliwe są cztery warianty średnicy kanału  $D$ :

- średnica hydrauliczna, zdefiniowana jako  $D_h = 4\varepsilon/S_v$ ,
- średnica komórki  $d_c$ ,

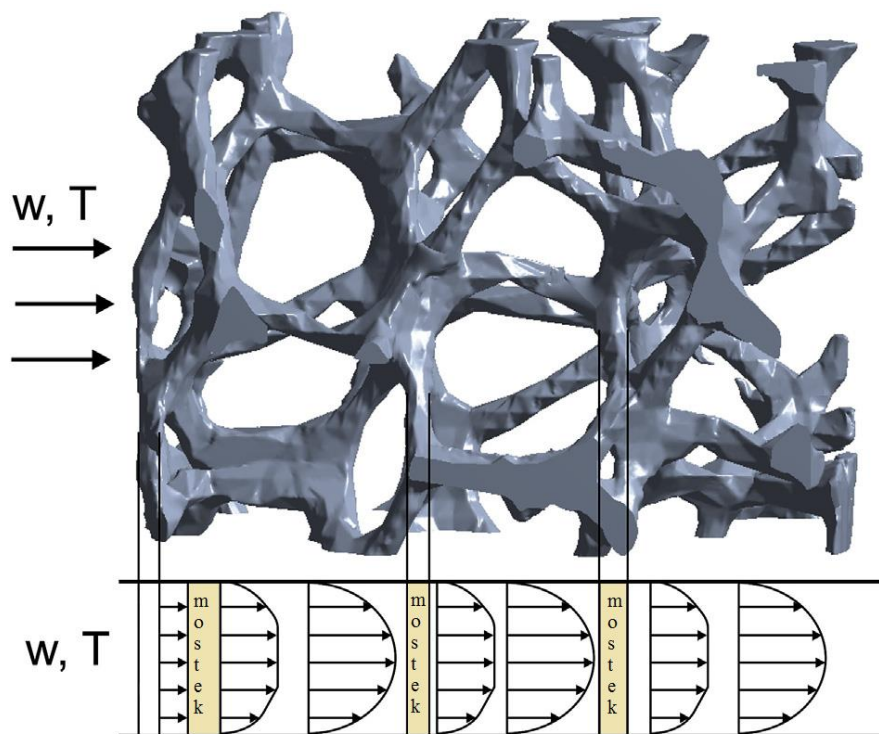
- średnica okna  $d_w$ ,
- średnica pora  $d_p$ .

Jako długość modelowego kanału  $L$  można brać pod uwagę:

- średnicę komórki  $d_c$ ,
- średnicę pora  $d_p$ ,
- średnicę mostka  $d_s$ .

Ponieważ wskazanie właściwej średnicy i długości kanału *à priori* jest bardzo trudne, dlatego przeanalizowano wszystkie możliwe kombinacje.

Biorąc pod uwagę strukturę pian stałych, można założyć, że mamy do czynienia ze stale rozwijającym się przepływem laminarnym, co przedstawiono schematycznie na rys. 4.11. Wydaje się, że powyższe założenie jest zgodne z naturą przepływu płynu w pianach: profile prędkości i temperatury są stale zakłócone przez mostki, więc profile te nieustannie muszą się rozwijać.



Rys. 4.11 Rozwijające się profile prędkości i temperatury w pianach stałych.

Dlatego do wyznaczenia współczynników oporu hydraulicznego Fanninga  $f$  zastosowano rozwiązanie teoretyczne Shaha [108] dla kanału okrągłego dla rozwijającego się przepływu laminarnego:

$$f_D = \frac{3,44}{Re_D(L^+)^{1/2}} + \frac{16 + 1,25/(4L^+) - 3,44(L^+)^{-1/2}}{Re_D(1 + 0,00021(L^+)^{-2})} \quad (42)$$

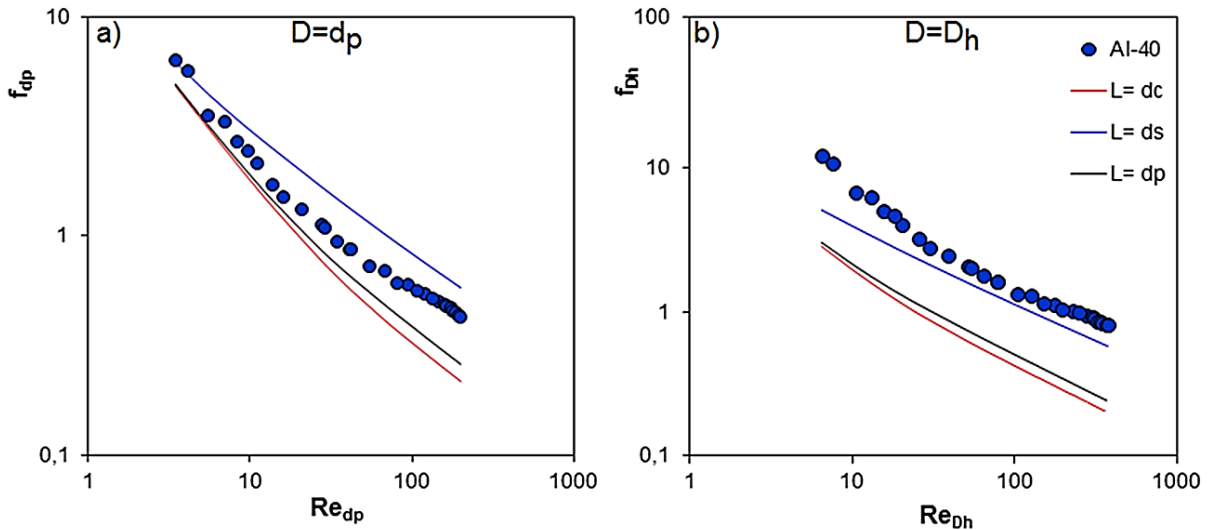
Bezwymiarową długość kanału  $L^+$  zdefiniowano jako:

$$L^+ = \frac{L}{Re_D D} \quad (43)$$

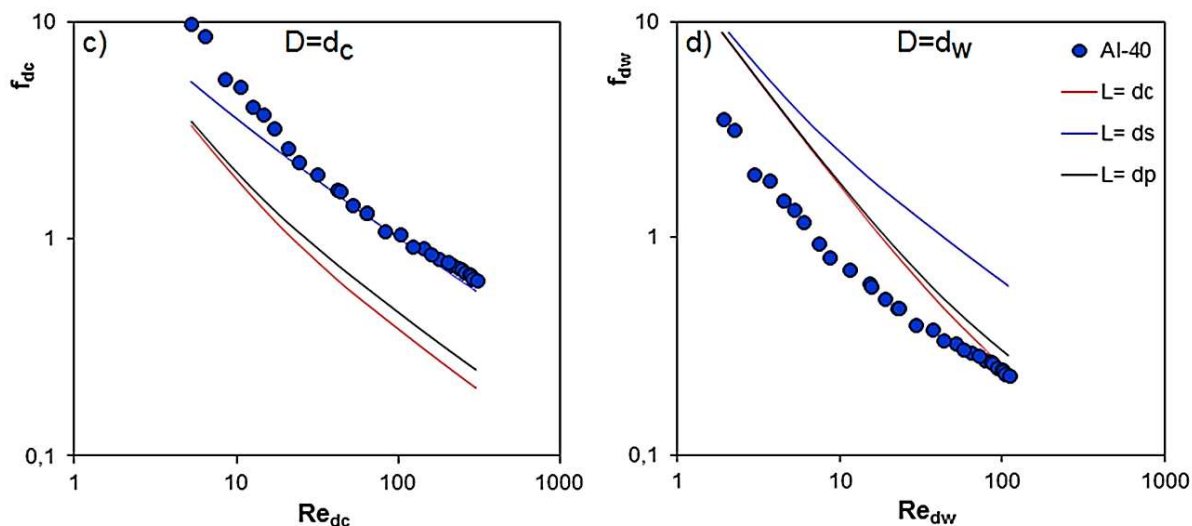
Liczba Reynoldsa jest zdefiniowana:

$$Re_D = \frac{w_0 D \rho}{\varepsilon \eta} \quad (44)$$

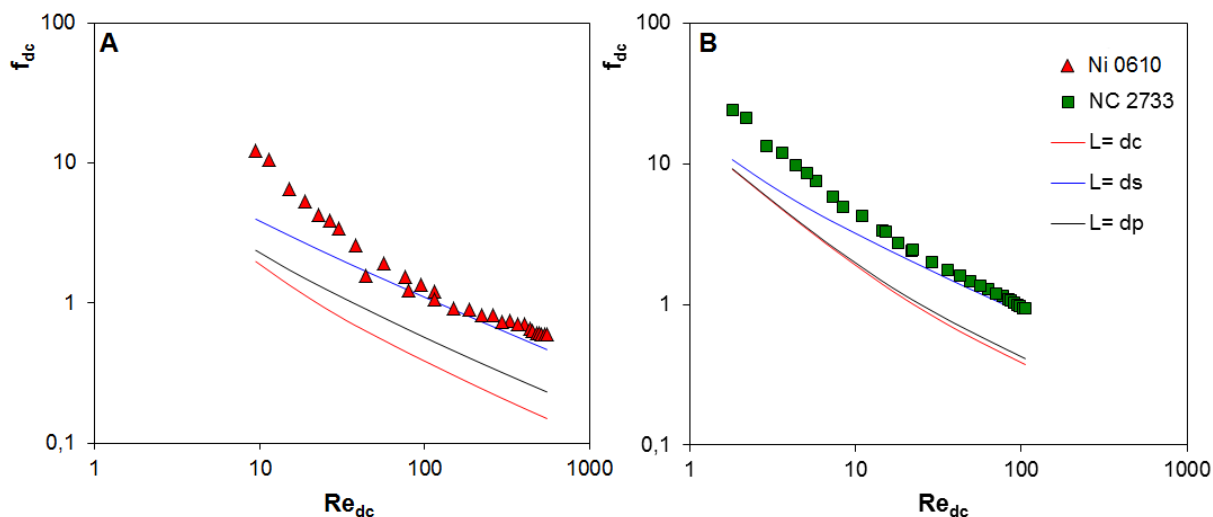
Porównanie rozwiązania teoretycznego Shaha [108] (42), dla rozważanych średnic  $D$  i długości  $L$  modelowego kanału, przedstawiono odpowiednio na rys. 4.12 dla piany Al-40. Natomiast na rys. 4.13 pokazano wyniki otrzymane odpowiednio dla piany Ni 0610 i NC 2733 dla  $D = d_c$  i rozważanych wartości  $L$ . Dla pozostałych pian otrzymano podobne wyniki. W każdym przypadku stosowano konsekwentnie tę samą wartość modelowej średnicy  $D$  w definicji liczby  $Re_D$  i we wzorach na współczynnik oporu hydrodynamicznego Fanninga  $f_D$  oraz na bezwymiarową długość kanału  $L^+$  (stosując w tym przypadku różne długości kanału  $L$ ).



Rys. 4.12 Porównanie wyników eksperymentalnych dla piany Al-40 z modelem rozwijającego się przepływu laminarnego w kanale kołowym o średnicy: a)  $D = d_p$ , b)  $D = D_h$ , c)  $D = d_c$ , d)  $D = d_w$  i różnych długości kanału.



Cd. rys. 4.12 Porównanie wyników eksperymentalnych dla piany Al-40 z modelem rozwijającego się przepływu laminarnego w kanale kołowym o średnicy: a)  $D = d_p$ , b)  $D = D_h$ , c)  $D = d_c$ , d)  $D = d_w$  i różnych długości kanału.



Rys. 4.13 Porównanie wyników eksperymentalnych dla piany Ni 0610 (A) i NC 2733 (B) z modelem rozwijającego się przepływu laminarnego w kanale kołowym dla modelowej średnicy  $D = d_c$  i różnych długości kanału.

Jak można zauważyć dla większości przypadków, rozbieżności między modelami i eksperymentami są wyraźne dla zakresu małych liczb Reynoldsa, znacznie lepszą zgodność obserwuje się dla zakresu większych liczb Reynoldsa. Jednak najlepszą dokładność zaobserwowano dla modelu  $D = d_c$ ,  $L = d_s$ , co potwierdził rachunek błędów przedstawiony w tabeli 11 dla wszystkich rozważanych wymiarów modelowego kanału.

Tabela 11. 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.

		$e_{Y,śr} [\%], (\sigma)$			
$L \backslash D$		$D_h$	$d_w$	$d_p$	$d_c$
	$d_c$	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)

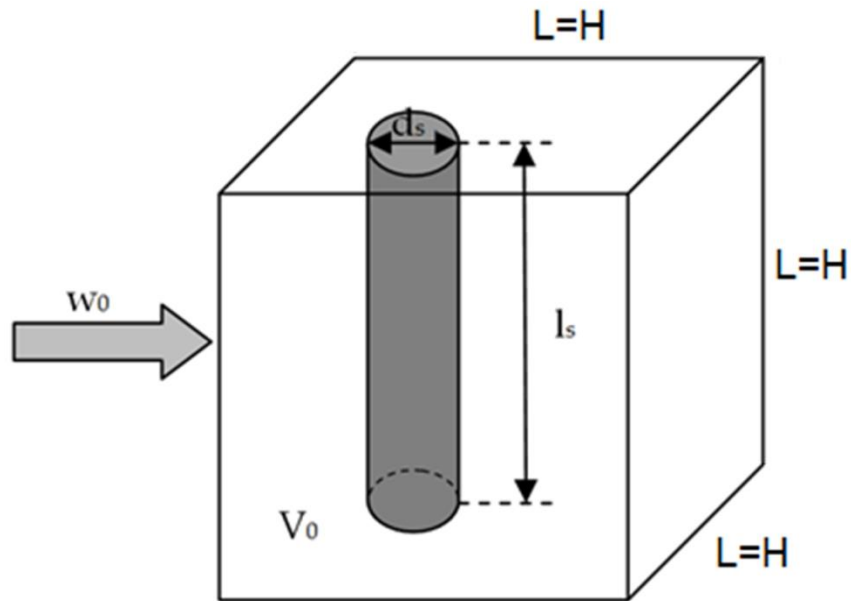
#### 4.4.2. Optyw ciała stałego

Drugim rozpatrywanym mechanizmem jest optyw ciała stałego, tj. optyw kuli oraz optyw nieskończenie długiego walca. Patrząc na strukturę piany stałej (rys. 3.1), optyw wokół walca wydaje się, intuicyjnie, właściwym podejściem charakteryzującym optyw wokół mostków piany. Z kolei optyw wokół kuli może reprezentować optyw 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.

Pierwszym problemem, który napotkano w trakcie rozpatrywania tego rodzaju mechanizmu, było prawidłowe określenie współczynnika oporu  $C_D$  dla piany. Wyznaczono go w oparciu o podstawy teoretyczne aero- i hydrodynamiki przedstawione poniżej.

W objętości piany  $V_0$  pojedynczy cylinder o średnicy  $d_s$  i długości  $l_s$  reprezentuje mostek piany (co schematycznie przedstawiono na rys. 4.14).





Rys. 4.14 Uproszczony model opływu mostków piany stałej.

Średnia prędkość gazu w porowatym złożu piany wynosi  $w_o/\varepsilon$ . Przy założeniu objętości szkieletu piany  $V_s$  w objętości całej próbki porowatość jest równa:

$$\varepsilon = \frac{V_0 - V_s}{V_0} \quad (45)$$

a objętość mostka reprezentowanego przez cylinder:

$$V_s = \frac{\pi d_s^2}{4} l_s \quad (46)$$

Stąd powierzchnia zewnętrzna mostka (cylindra) wynosi:

$$S_V = \frac{\pi d_s}{V_0} l_s \quad (47)$$

Natomiast powierzchnia czołowa:

$$A = d_s l_s \quad (48)$$

Wstawiając powierzchnię czołową  $A$  z równ. (48) do równania na siłę oporu wyrażoną jako:

$$F_D = C_D \frac{\rho w_0^2}{2\varepsilon^2} A \quad (49)$$

otrzymano:

$$F_D = C_D \frac{\rho w_0^2}{2\varepsilon^2} d_s l_s \quad (50)$$

Wprowadzając równanie (50) do równania na spadek ciśnienia otrzymano:

$$\frac{\Delta P_{ds}}{H} = \frac{F_D}{V_0} = C_D \frac{\rho w_0^2 d_s l_s}{2\varepsilon^2 V_0} \quad (51)$$

gdzie  $H$  jest krawędzią sześcianu o objętości  $V_0$ , zgodnie z rys. 4.15.

W oparciu o rys. 4.14, po uszeregowaniu równań (45) i (47), otrzymano następujące równania:

$$1 - \varepsilon = \frac{\pi d_s^2 l_s}{4V_0} \quad (52)$$

$$l_s = \frac{S_v^2 V_0}{4\pi(1 - \varepsilon)} \quad (53)$$

$$d_s = \frac{4(1 - \varepsilon)}{S_v} \quad (54)$$

Wstawiając równania (52-54) do (51), po uporządkowaniu otrzymano ostateczną formę równania, które posłużyło do wyznaczenia eksperymentalnego współczynnika oporu  $C_D$ :

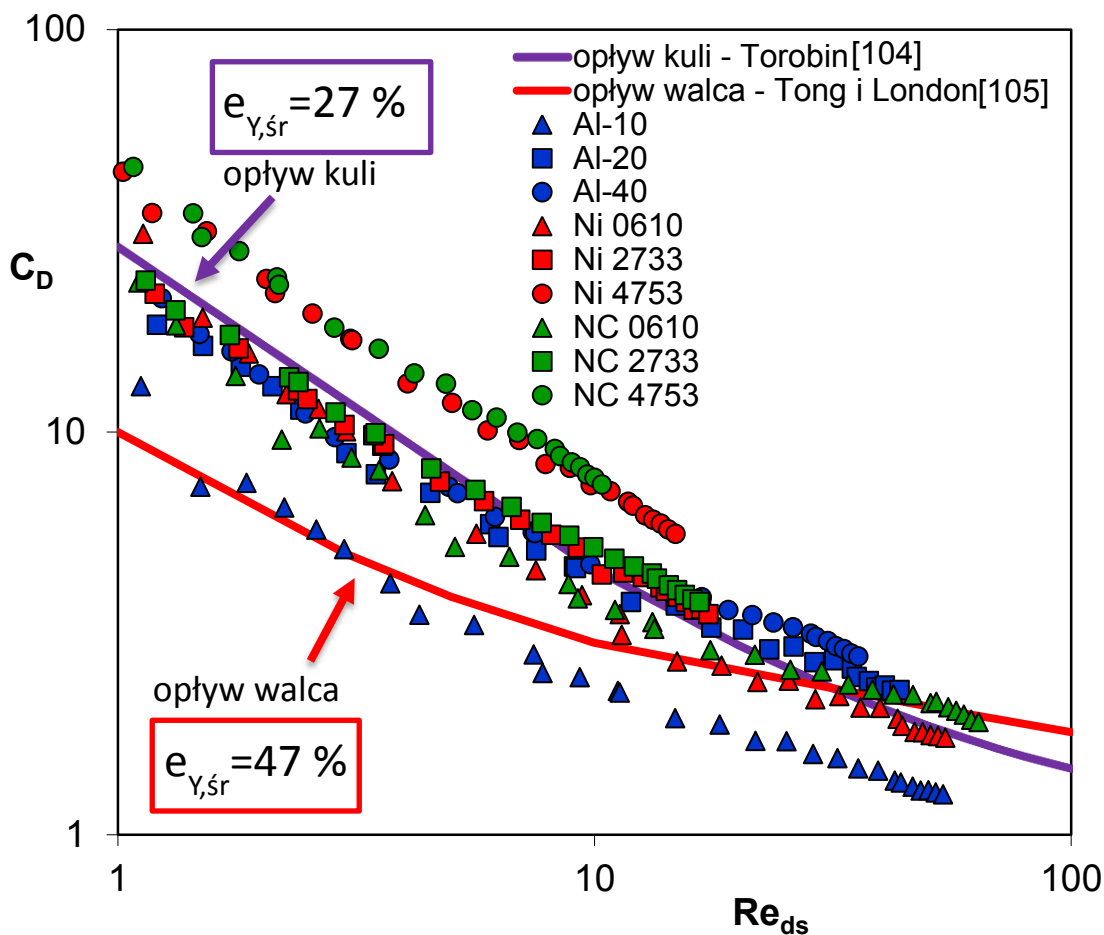
$$\frac{\Delta P_{ds}}{H} = C_D \frac{\rho w_0^2}{2\pi\varepsilon^2} S_v \quad (55)$$

Wartości te porównano z wartościami wyznaczonymi w oparciu o dane literaturowe dla kuli i walca, co przedstawiono na rys. 4.15.

W literaturze można znaleźć szereg równań, pozwalających na obliczenie współczynnika oporu  $C_D$  dla kuli [102] w funkcji od liczby  $Re$ , jednak ich wyniki nie różnią się istotnie między sobą. Na potrzeby niniejszej pracy zastosowano równanie zaproponowane przez Torobina [103]:

$$C_D = \frac{24}{Re_{ds}} (1 + 0,197 Re_{ds}^{0,63} + 0,0026 Re_{ds}^{1,38}) \quad (56)$$

gdzie liczbę Reynoldsa  $Re_{ds}$  obliczono w oparciu o średnicę mostka  $d_s$ . Natomiast dane dla opływu wokół pojedynczego walca zostały zaczerpnięte z wykresu zamieszczonego w pracy Tonga i Londona [104].



Rys. 4.15 Model mechanizmu opływu wokół ciała stałego: eksperymentalny współczynnik oporu  $C_D$  w funkcji liczby Reynoldsa w porównaniu ze współczynnikiem oporu opływu wokół kuli [103] i walca [104].

Zaobserwowano dobrą zgodność wyników eksperymentalnych współczynnika oporu  $C_D$  z wartościami obliczonymi dla kuli wg równania (56) dla sześciu pian: Al-20, Al-40, Ni 0610, Ni 2733, NC 0610, NC 2733; 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 Reynolds ( $Re_{ds} < 5$ ), a 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 rezultatów zarówno dla walca, jak i dla kuli. Wyjaśnienie tego zjawiska jest trudne. Wydaje się, że jednym z powodów może być kształt przekroju poprzecznego mostków badanych pian. Piana Al-10 posiada mostki o przekroju poprzecznym zbliżonym do trójkąta o zaokrąglonych wierzchołkach, natomiast Ni 4753 oraz NC 4753 posiadają drobne mostki o ostrych narożnikach i kształcie zbliżonym do hipocykloidy Steinera („wklęsły trójkąt”). Pozostałe piany mają raczej trójkątne przekroje mostków. Z kolei węzły mają kształt nieregularny, zwykle daleki od kuli. Różnice te trudno jednak

określić jednoznacznie i przedstawić w sposób liczbowy, np. w postaci współczynnika korygującego odchylenia.

Podsumowując, stwierdzono, 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  $f$  oraz oporu czołowego  $C_D$ , co przedstawiono w tabeli 12. Na podstawie analizy wyłącznie oporów przepływu trudno zatem jednoznacznie wskazać, który z rozważanych mechanizmów transportu pędu (a zatem również transportu masy i ciepła) jest mechanizmem dominującym dla pian stałych.

W tych rozważaniach porównujemy doświadczalnie wyznaczone współczynniki oporów hydraulicznych Fanninga  $f_D$  z modelem przepływu laminarnego w krótkim kanale, na wartość  $f_D$  składa się suma oporów lepkich  $f_L$  i inercyjnych  $f_d$ . Wzór Shaha (czy Hawthorne'a) odnosi się wyłącznie do składowej lepkiej  $f_L$ . W analizie czysto hydrodynamicznej nie uwzględnia się oporów inercyjnych, które niewątpliwie istnieją w pianach, co jest możliwym powodem obserwowanych rozbieżności. Zagadnienie to zostało szerzej omówione w rozdziale 6 niniejszej pracy, który poświęcony jest analogiom przepływu.

Tabela 12. Błąd średni  $e_{Y,śr}$  i odchylenie standardowe dla badanych mechanizmów przepływu.

Piana	Opływ kuli		Opływ walca		Przepływ przez kapilarę o wymiarach $D = d_c$ , $L = d_s$	
	$e_{Y,śr}$ [%]	$\sigma$	$e_{Y,śr}$ [%]	$\sigma$	$e_{Y,śr}$ [%]	$\sigma$
Al-10	83,32	36,60	30,31	27,44	26,98	11,70
Al-20	13,79	7,01	33,03	18,53	24,41	9,93
Al-40	14,06	16,41	43,18	13,69	12,85	11,46
Ni 0610	15,87	16,66	29,45	19,10	24,50	17,36
Ni 2733	7,12	3,78	54,33	13,35	31,53	15,78
Ni 4753	37,33	3,11	72,38	9,24	58,80	10,22
NC 0610	17,32	11,24	24,70	16,78	32,78	9,27
NC 2733	7,51	4,90	56,90	12,34	22,85	15,56
NC 4753	42,37	6,41	76,93	9,05	49,36	15,62
średnia	26,52	11,79	46,80	15,50	31,56	12,99

## 5. Transport ciepła i masy w pianach stałych

### 5.1. Znaczenie i powiązanie transportu ciepła i masy

W zastosowaniach reaktorowych, w których katalizator reakcji jest osadzony na nośniku, kluczowa jest znaczna intensywność transportu ciepła i masy. Zwłaszcza dla szybkich reakcji, biegnących w wysokich temperaturach, szybkość procesu – która może być teoretycznie bardzo duża dla szybkiej reakcji – jest bardzo często ograniczona niewystarczającą szybkością transportu masy reagentów do powierzchni katalizatora, osadzonego na nośniku. Zarazem każda reakcja posiada jakiś efekt cieplny. W reakcjach dopalania katalitycznego wydzielają się znaczne ilości ciepła, które muszą być odprowadzone z powierzchni katalizatora do płynącego przez reaktor płynu (mieszaniny reagentów). Niewystarczająca intensywność transportu ciepła powoduje przegrzewanie katalizatora, a w konsekwencji jego termiczną dezaktywację.

Transport ciepła i masy są ze sobą ściśle powiązane, powszechnie stosowana jest analogia Chiltona - Colburna. Wykorzystując bezwymiarowe liczby  $Nu$  oraz  $Sh$ , opisane równaniami kryterialnymi, liczba Stanton dla transportu ciepła i masy wynosi:

$$St_H = \frac{Nu_D}{Re_D Pr} = C Re_D^{A-1} Pr^{B-1} \quad (57)$$

$$St_M = \frac{Sh_D}{Re_D Sc} = C Re_D^{A-1} Sc^{B-1} \quad (58)$$

porównując zatem liczbę Stanton dla transportu ciepła i masy otrzymamy:

$$j = St_H Pr^{1-B} = St_M Sc^{1-B} = C Re^{A-1} \quad (59)$$

gdzie  $j$  to tzw. czynnik wnikania ciepła ( $j_H$ ) lub masy ( $j_M$ ) Colburna.

Wstawiając stałą  $B = 1/3$ , otrzymano zależność pomiędzy transportem ciepła i masy w postaci zależności:

$$j_H = St_H Pr^{\frac{2}{3}} = \frac{Nu_D}{Re_D Pr} Pr^{\frac{2}{3}} = \frac{Nu_D}{Re_D Pr^{\frac{1}{3}}} = j_M = St_M Sc^{\frac{2}{3}} = \frac{Sh_D}{Re_D Sc} Sc^{\frac{2}{3}} = \frac{Sh_D}{Re_D Sc^{\frac{1}{3}}} \quad (60)$$

Dla pian stałych, podejście to zostało zweryfikowane przez Gianiego [32] oraz Groppiego i wsp. [109]. Wskazali oni, że porównując wyniki badania transportu masy z niezależnymi pomiarami wnikania ciepła w pianach stałych, wykonanych w innej skali i przy użyciu całkowicie różnych metod eksperymentalnych, podobieństwo otrzymanych

korelacji jest bardzo wyraźne, a obserwowane różnice - niewielkie. Tym samym, analogia Chiltona - Colburna może być z powodzeniem stosowana również dla pian stałych [109].

## 5.2. Aktualny stan wiedzy

Analogicznie, jak w przypadku oporów przepływu, współczynniki transportu ciepła rosną ze wzrostem prędkości przepływu płynu. Ponadto, jak zauważył Hsieh i wsp. [110] dla pian Al, liczba Nusselta rośnie wraz ze wzrostem gęstości porów (PPI) oraz porowatością. Podobne wnioski przedstawili również Giani i wsp. [52], którzy intensyfikację wymiany ciepła zaobserwowali wraz ze wzrostem gęstości porów pian metalowych, co związane jest, jak sugerują autorzy, ze wzrostem powierzchni właściwej oraz zmniejszeniem średnicy mostków piany. Z kolei w pracach [27, 84, 111-113] stwierdzono, że wzrost intensywności transportu ciepła obserwowany jest ze spadkiem porowatości i gęstości porów (PPI), zarówno dla pian metalowych [27, 84, 111, 113] jak i ceramicznych [112].

Wyraźnie widać brak zgodności co do wpływu parametrów morfologicznych na transport ciepła. Pewna rozbieżność panuje również przy opisie transportu ciepła za pomocą równań korelacyjnych. W pracach opublikowanych do tej pory [27, 50, 52, 67, 75, 84, 85, 89, 100, 109-127] wyniki opisywane są najczęściej za pomocą równań o postaci:

$$Nu_D = C Re_D^A \quad (61)$$

$$Nu_D = C Re_D^A Pr^B \quad (62)$$

lub 
$$Nu_D = C Re_D^A Pr^B Da^D \quad (63)$$

Wybrane korelacje literaturowe opisujące transport ciepła równaniami o postaci (61) lub (62) zestawiono w tabeli 13.

Jak zwrócono uwagę w pracach Gianiego i wsp. [32, 52], równanie opisujące współczynnik transportu ciepła jest zbliżone do korelacji obowiązującej dla transportu ciepła przy przepływie prostopadłym do pęku rur dla wartości liczby Reynoldsa  $10^0 < Re < 10^2$ :

$$Nu_{ds} = 0,9 Re_{ds}^{0,4} Pr^{1/3} \quad (64)$$

Tabela 13. Korelacje literaturowe opisujące transport ciepła wg równania (61) i (62).

Autor	Piany	Wymiar poprzeczny	Równanie
Hsieh i wsp. [110]	Al	$D_e = 1,5d_p \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon}$	$Nu_{De} = (0,45 \div 0,77)Re_{De}^{(0,38 \div 0,46)}$ (65)
Shih i wsp. [113]	Al	$D_e = 1,5d_p \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon}$	$Nu_{De} = (0,904 \div 2,58 \times 10^{-3})Re_{De}^{(0,38 \div 0,50)}$ (66)
Hwang i wsp. [27]	Al	$d_p$	$Nu_{dp} = 0,6Re_{dp}^{0,32}$ (67)
Giani i wsp. [52]	FeCr	$d_s = d_c \left[ \frac{4}{3\pi} (1 - \varepsilon) \right]^{1/2}$	$Nu_{ds} = 1,2Re_{ds}^{0,43} Pr^{1/3}$ (68)
Mancin i wsp. [28, 128]	Al	$d_s$	$Nu_{ds} = 0,02Re_{ds}^{0,9} Pr^{1/3}$ (69)
Mancin i wsp. [84]	Al	$d_s$	$Nu_{ds} = 0,418Re_{ds}^{0,53} Pr^{1/3}$ (70)
Dukhan i wsp. [129]	Al	$d_s$	$Nu_{ds} = 0,26Re_{ds}^{0,5} Pr^{0,36}$ (71)

W pracach Phanikumara i Mahajana [111], Calmidiego i Mahajana [122] oraz Albanakisa i wsp. [67] zastosowano wprost korelacje zaproponowane przez Žkauskasa [130] dla przepływu prostopadłego do pęku rur, które, w zależności od wartości liczby Reynoldsa, mają postać:

$$1 \leq Re < 40 \quad Nu_{ds} = 0,76Re_{ds}^{0,4}Pr^{0,37} \quad (72)$$

$$40 \leq Re < 1 \times 10^3 \quad Nu_{ds} = 0,52Re_{ds}^{0,5}Pr^{0,37} \quad (73)$$

$$1 \times 10^3 \leq Re < 2 \times 10^5 \quad Nu_{ds} = 0,26Re_{ds}^{0,6}Pr^{0,37} \quad (74)$$

$$2 \times 10^5 \leq Re < 1 \times 10^7 \quad Nu_{ds} = 0,023Re_{ds}^{0,8}Pr^{0,37} \quad (75)$$

Jeśli jednak dla pęku rur średnicą charakterystyczną jest średnica rury, to dla pian średnica ta definiowana jest jako średnica komórki [111], mostka [67, 122], lub średnica ekwiwalentna zdefiniowana przez Richardsona i wsp. [69] jako:

$$D_e = 1,18d_p \sqrt{\frac{(1 - \varepsilon)}{3\pi}} \quad (76)$$

Równania zaproponowane przez Žkauskasa [130] obowiązują dla mostka okrągłego. W przypadku pian, mostki o kształcie zbliżonym do walca możemy obserwować wyłącznie przy strukturach o małej porowatości, dlatego Phanikumar i Mahajan [111] zaproponowali – na podstawie symulacji – równanie dla pian o nieokrągłych przekrojach poprzecznych mostków:

$$Nu_{ds} = 0,52Re_{ds}^{0,5}Pr^{1/3} \quad (77)$$

Na uwagę zasługuje również równanie zaproponowane przez Dasa i wsp. [126], które opracowane zostało w oparciu o badania tomograficzne i numeryczną mechanikę płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics, CFD*) dla „typowej struktury piany”:

$$Nu_{De} = 0,2 + 0,158Re_{De}^{0,7796}Pr^{1/3} \quad (78)$$

gdzie:  $D_e = 6V_s/S_v$ , m.

Do opisu transportu masy powszechnie stosowane jest równanie na bezwymiarową liczbę Sherwooda w funkcji liczby Schmidta, które jest analogiczne do równania (62):

$$Sh_D = CRe_D^A Sc^B \quad (79)$$

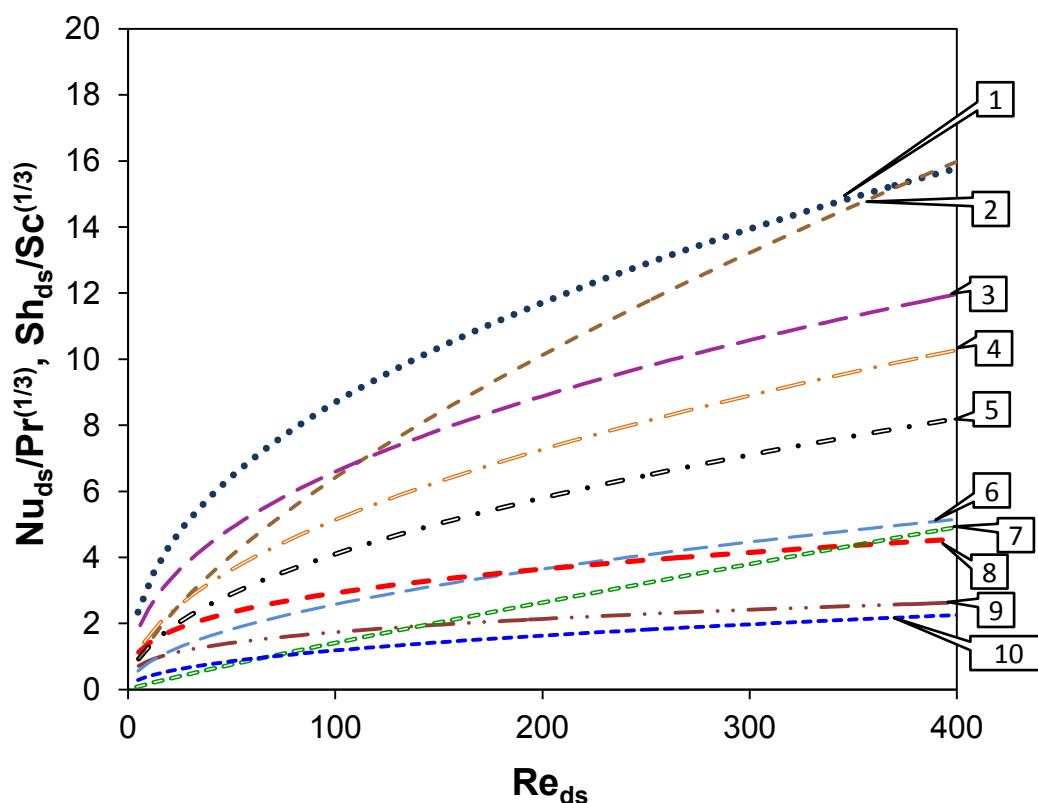
Ze względu na niewielką liczbę prac, do porównania wzięto pod uwagę zarówno korelacje zaproponowane dla pian metalowych, jak i ceramicznych, które zestawiono w tabeli 14.



Tabela 14. Piany stałe jako strukturalne wypełnienie katalityczne. Wybrane korelacje literaturowe opisujące transport masy.

Autor	Piany	Wymiar poprzeczny	Równanie
Ambrosetti [131]	FeCr	$D_h$	$Sh_{Dh} = 0,436Re_{Dh}^{0,466}Sc^{0,33}$ (80)
Huu i wsp. [114]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$d_s$	$Sh_{ds} = (S_v d_s)Re_{ds}^{1/2}Sc^{1/3}$ (81)
Garrido i wsp. [34]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FeCr,Al	$D_e = d_c + d_s$	$Sh_{De} = 1,0Re_{De}^{0,47}Sc^{1/3}\left(\frac{D_e}{0,001}\right)^{0,58}\varepsilon^{0,44}$ (82)
Garrido i wsp. [53]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$d_w$	$Sh_{dw} = 0,81Re_{dw}^{0,47}Sc^{1/3}\left(\frac{a^2}{b \times c}\right)^{0,84}\varepsilon^{0,43}$ (83)
Giani i wsp. [32]	FeCr	$d_s$	$Sh_{ds} = 1,1Re_{ds}^{0,43}Sc^{1/3}$ (84)
Groppi i wsp. [109]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$d_s$	$Sh_{ds} = 0,91Re_{ds}^{0,43}Sc^{1/3}$ (85)

Porównanie wartości współczynników transportu ciepła i masy dla pian stałych, wyznaczonych w oparciu o wybrane równania literaturowe, przedstawiono na rys. 5.1 w postaci zależności modułu  $Nu_{ds}/Pr^{1/3}$  ( $Sh_{ds}/Sc^{1/3}$ ) od liczby Reynoldsa  $Re_{ds}$ . Do porównania wykorzystano dane morfologiczne dla piany NC 2733.



Rys. 5.1 Porównanie korelacji literaturowych opisujących transport ciepła i masy dla pian stałych: 1 – Giani i wsp. [52]; 2 – Das i wsp. [126]; 3 – Groppi i wsp. [109]; 4 – Calmidi i Mahajan [122]; 5 – Huu i wsp. [114]; 6 – Dukhan i wsp. [129]; 7 – Mancin i wsp. [28, 128]; 8 – Hwang i wsp. [27]; 9 – Mancin i wsp. [84]; 10 – Ambrosetti i wsp. [131]. Parametry morfologiczne piany NC 2733.

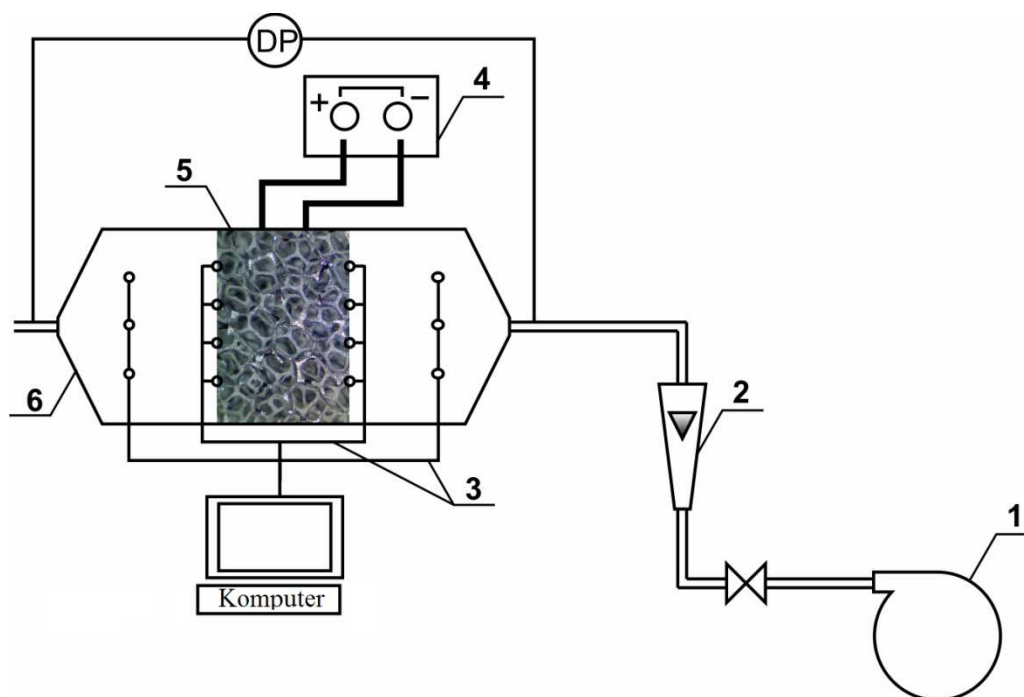
Ponieważ równania zaprezentowane na rys. 5.1 definiowane są za pomocą różnych średnic charakterystycznych, zostały one przeliczone dla średnicy mostka jako wymiaru charakterystycznego. Jak można zauważyć, podobnie jak w przypadku oporów przepływu, również współczynniki transportu ciepła i masy obliczone na podstawie różnych równań dają znacznie różniące się wartości stosunku  $Nu_{ds}/Pr^{1/3}$  ( $Sh_{ds}/Sc^{1/3}$ ) dla tych samych wartości liczb  $Re$ . Należy jednak podkreślić, że równania literaturowe opisujące współczynniki transportu ciepła lub masy dla pian stałych niejednokrotnie opracowane zostały dla jednej konkretnej piany. Dlatego sposób prowadzenia eksperymentów, warunki przyjęte dla

modelowania, sposób wyznaczenia parametrów morfologicznych piany mogą mieć wpływ na stosowalność otrzymanego równania korelacyjnego.

Podsumowując, można powiedzieć, że w odniesieniu do współczynników transportu ciepła i masy dla pian stałych pojawiają się dwa główne problemy. Po pierwsze, nie ma zgodności wśród autorów co do średnic charakterystycznych stosowanych przy opisie kryterialnych liczb bezwymiarowych ( $Nu$ ,  $Sh$ ,  $Re$ ). Równania z przytoczonych wyżej prac wskazują wyraźnie, że do opisu transportu ciepła i masy jako wymiar charakterystyczny brana jest pod uwagę średnica poru  $d_p$  [27, 112], średnica okna  $d_w$  [53], średnica mostka  $d_s$  [28, 52, 84, 109, 114, 122, 128, 129], średnica hydrauliczna  $D_h$  [131] czy różnie zdefiniowana średnica ekwiwalentna  $D_e$  [34, 67, 110, 113]. Zjawisko to jest powszechne, na co zwrócono również uwagę w rozdziale poświęconym oporom przepływu. Drugim, znacznie istotniejszym problemem jest niezgodność co do wpływu parametrów morfologicznych (porowatości i gęstości porów) na intensywność transportu ciepła i masy dla pian stałych.

### 5.3. Aparatura badawcza oraz metodyka prowadzenia badań

Schemat instalacji badawczej przedstawiono na rys. 5.2.



Rys. 5.2 Schemat instalacji badawczej: DP – pomiar spadku ciśnienia; 1 – dmuchawa; 2 – rotametr; 3 – termopary; 4 – źródło prądu elektrycznego; 5 – badana piana; 6 – reaktor.

Badania eksperymentalne transportu ciepła prowadzono w laboratoryjnym reaktorze o przekroju prostokątnym, o wymiarach 45x30 mm. Przez reaktor przepływało powietrze, które tłoczone było za pomocą dmuchawy. Prędkość płynącego gazu zmieniana była w zakresie 0,07÷11,4 ms<sup>-1</sup>. W centralnej części reaktora umieszczano badaną pianę metalową, która miała kształt prostopadłościanu wypełniającego w pełni przekrój poprzeczny reaktora, wymiar próbki w kierunku przepływu powietrza wynosił 5 lub 10 mm, w zależności od badanej piany. Próbkę 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.

Liczbę Nusselta wyznaczano z zależności:

$$Nu_D = \alpha D / \lambda \quad (86)$$

gdzie  $D$  jest charakterystycznym wymiarem poprzecznym,  $\lambda$  – przewodnością cieplną gazu przy średniej temperaturze, a  $\alpha$  jest współczynnikiem wnikania ciepła zdefiniowanym jako:

$$\alpha = \frac{Q_{eff}}{S_v} \Delta T_m \quad (87)$$

gdzie  $Q_{eff}$  oznacza ciepło efektywnie wydzielone na badanej pianie w wyniku przepływu prądu elektrycznego, natomiast  $\Delta T_m$  jest średnią logarytmiczną różnicy temperatur pomiędzy powierzchnią piany a strumieniem powietrza:

$$\Delta T_m = \frac{(T_{piany,wlot} - T_{gazu,wlot}) - (T_{piany,wylot} - T_{gazu,wylot})}{\ln \frac{(T_{piany,wlot} - T_{gazu,wlot})}{(T_{piany,wylot} - T_{gazu,wylot})}} \quad (88)$$

Różnica temperatur  $\Delta T_m$  utrzymywana była w granicach 5÷15 K.

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.

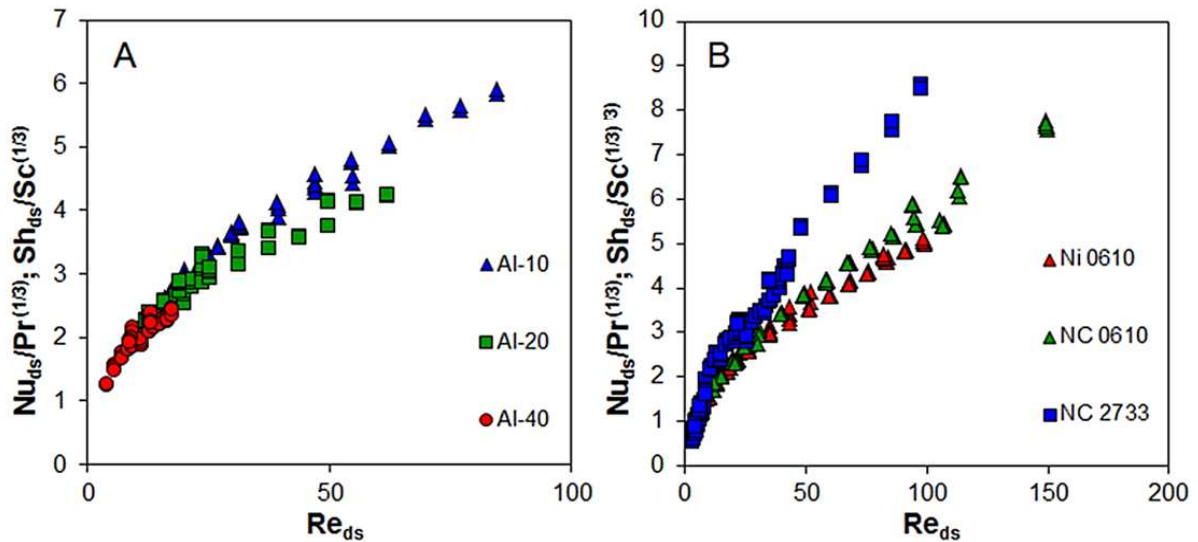
W niniejszej pracy wykonywano wyłącznie badania doświadczalne transportu ciepła, natomiast opis transportu masy uzyskano, stosując analogię Chiltona - Colburna. Na podstawie tej analogii można zapisać:

$$Nu_D/Pr^{1/3} = Sh_D/Sc^{1/3} = f(Re_D) \quad (89)$$

W literaturze często stosuje się zbiorcze wykresy, ujmujące łącznie badania transportu ciepła i masy, w których oś rzędnych (y) opisana jest wartościami  $(Nu_D/Pr^{1/3}; Sh_D/Sc^{1/3})$  (alternatywnie), a oś odciętych (x) liczbą  $Re_D$ . Taką też konwencję postanowiono zastosować w niniejszej pracy. Wyznaczony na podstawie analogii Chiltona-Colburna stosunek  $Sh_D/Sc^{1/3}$  określany będzie w dalszej części jako wynik doświadczalny.

#### 5.4. Wyniki badań

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. 5.3.



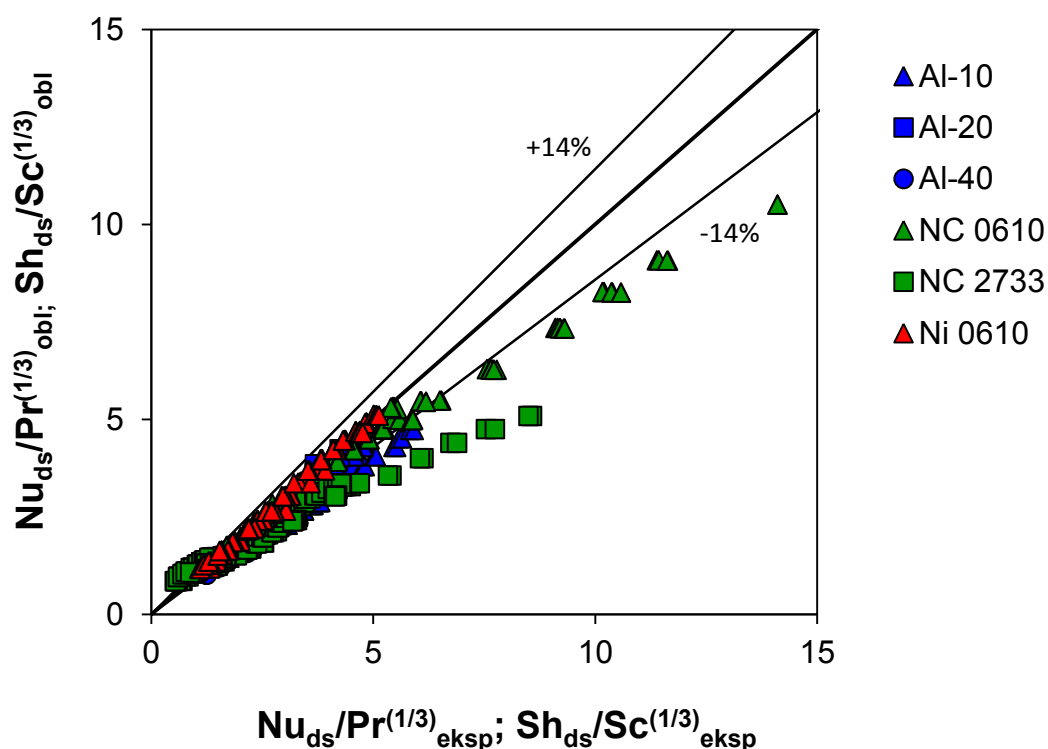
Rys. 5.3 Wnikanie ciepła i masy dla metalowych pian stałych: piany aluminiowe (A), piany NC i Ni (B). Liczby kryterialne zdefiniowano stosując średnicę hydrauliczną  $d_s$  jako wymiar poprzeczny.

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 w przypadku pian NC, gdzie wyraźnie widać wzrost wartości wnikania ciepła wraz ze wzrostem gęstości porów piany.

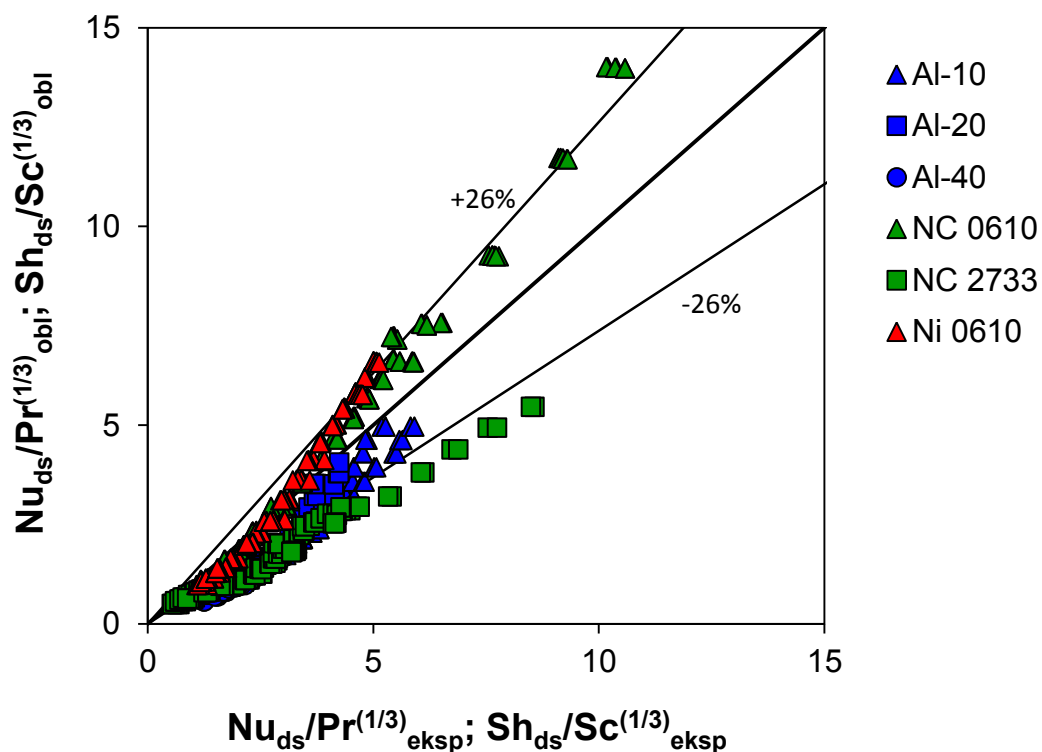
W celu poprawnej interpretacji wyników eksperymentalnych należy uważnie przeanalizować parametry morfologiczne badanych pian. O ile w przypadku pian chromoniklowych obserwowane różnice takich parametrów, jak powierzchnia geometryczna  $S_v$  czy średnica mostka  $d_s$  są wyraźne, to w przypadku pian aluminiowych sytuacja jest inna.

Kluczowe parametry morfologiczne pian Al są zbliżone (patrz tabela 6), co może tłumaczyć niewielkie różnice w wartościach transportu ciepła i masy.

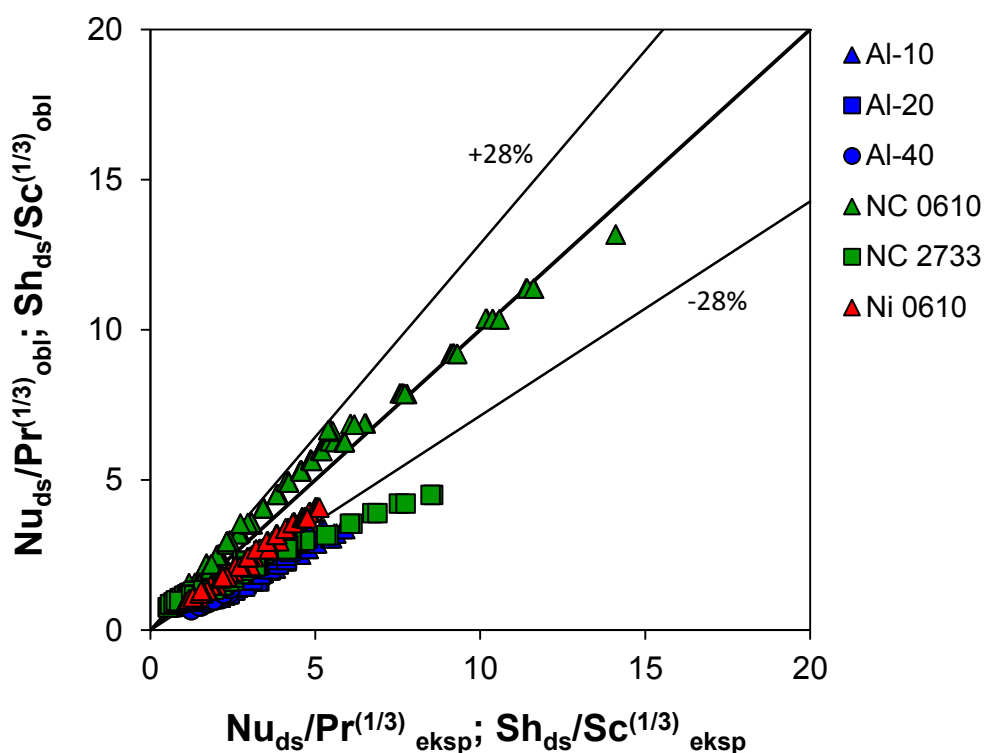
Do porównania z otrzymanymi wynikami eksperymentalnymi wybrano korelacje literaturowe, które zostały opracowane w oparciu o dane uzyskane dla grupy pian (min. 3), różniących się parametrami morfologicznymi (PPI,  $S_v$ ,  $\varepsilon$ ). Założono zatem, że opisują one piany jako zbiór struktur, a nie pojedyncze próbki. Wybrano równania zaproponowane dla pian Al [28, 84, 122, 128] oraz piany FeCrAl [32, 34, 52, 131]. Wyjątek stanowią tu praca Dasa i wsp. [126], która również została wzięta pod uwagę, oraz korelacje zaproponowane dla opisu transportu masy pian ceramicznych [53, 109, 114]. Wyniki porównania przedstawiono na rys. 5.4-5.7, w tabeli 15 zestawiono wartości parametrów statystycznych: średni błąd względny oraz odchylenie standardowe zmierzonych i obliczonych z wybranych równań wartości ( $Nu_D/Pr^{1/3}$ ;  $Sh_D/Sc^{1/3}$ ). Wykreślenie zaprezentowano rozwiązania, dla których średni błąd wyniósł poniżej  $e_{Y,śr} = 30\%$ .



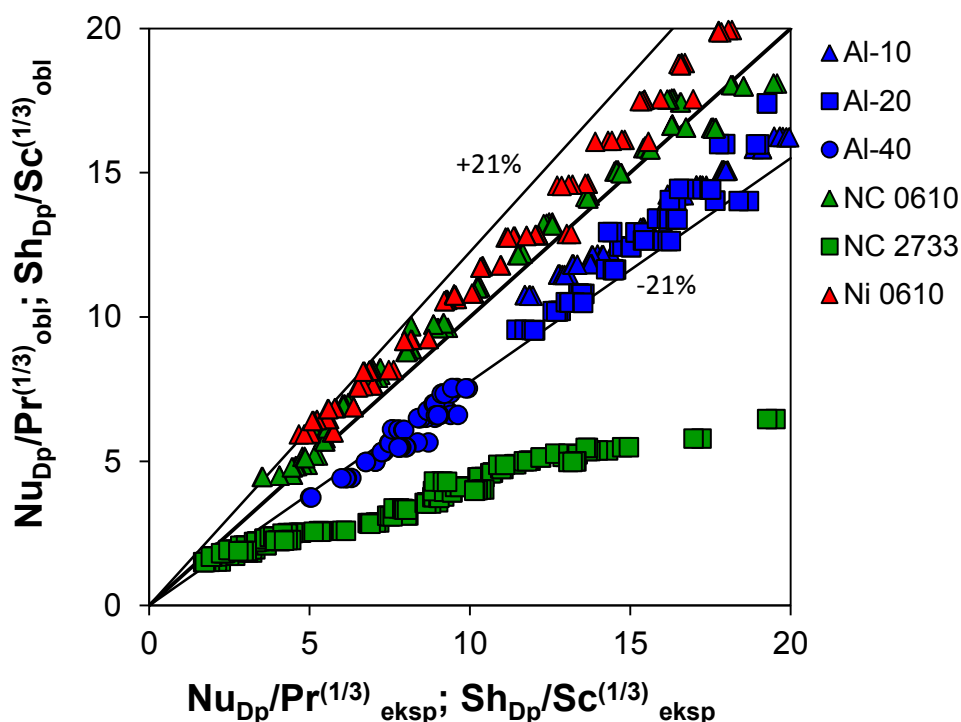
Rys. 5.4 Porównanie korelacji (73) (Calmidi i Mahajan [122]) z danymi eksperymentalnymi dla wnikania ciepła i masy; zastosowano średnicę mostka  $d_s$  jako wymiar poprzeczny.



Rys. 5.5 Porównanie korelacji (78) (Das i wsp. [126]) z danymi eksperymentalnymi dla wnikania ciepła i masy; zastosowano średnicę mostka  $d_s$  jako wymiar poprzeczny.



Rys. 5.6 Porównanie korelacji (81) (Huu i wsp. [114]) z danymi eksperymentalnymi dla wnikania ciepła i masy; zastosowano średnicę mostka  $d_s$  jako wymiar poprzeczny.



Rys. 5.7 Porównanie korelacji (82) (Garrido i wsp. [34]) z danymi eksperymentalnymi dla wnikania ciepła i masy; zastosowano średnicę zastępczą  $D_p$  jako wymiar poprzeczny.

Tabela 15. Średni błąd względny  $e_{Y,śr}$  i odchylenie standardowe  $\sigma$  zależności  $(Nu_D/Pr^{1/3}; Sh_D/Sc^{1/3})$  obliczonych z wybranych równań korelacyjnych dostępnych w literaturze i wyznaczonych eksperymentalnie.

Badane piany	$e_{Y,śr}$ [%] ( $\sigma$ )				
	Giani i wsp. [52]	Calmidi i Mahajan [122]	Mancin i wsp. [28, 128]	Mancin i wsp. [84]	Das i wsp. [126]
Al-10	38,75 (24,45)	20,05 (6,99)	85,74 (4,73)	66,61 (9,84)	25,15 (34,15)
Al-20	52,41 (11,72)	15,81 (6,07)	87,23 (4,44)	61,64 (4,38)	25,48 (33,56)
Al-40	59,73 (7,20)	15,80 (4,95)	90,15 (5,64)	55,10 (3,74)	30,08 (28,19)
NC 0610	55,74 (21,33)	9,69 (7,69)	79,56 (9,56)	61,43 (10,82)	28,34 (34,81)
NC 2733	74,72 (56,38)	21,29 (13,78)	87,54 (3,66)	49,69 (22,26)	26,00 (32,79)
Ni 0610	78,74 (21,48)	2,92 (11,58)	82,38 (6,89)	55,58 (8,93)	23,88 (36,42)
Dla wszystkich pian, $e_{Y,śr}$ ( $\sigma$ )	61,75 (32,43)	14,17 (9,80)	84,84 (6,29)	57,82 (13,26)	26,28 (33,72)

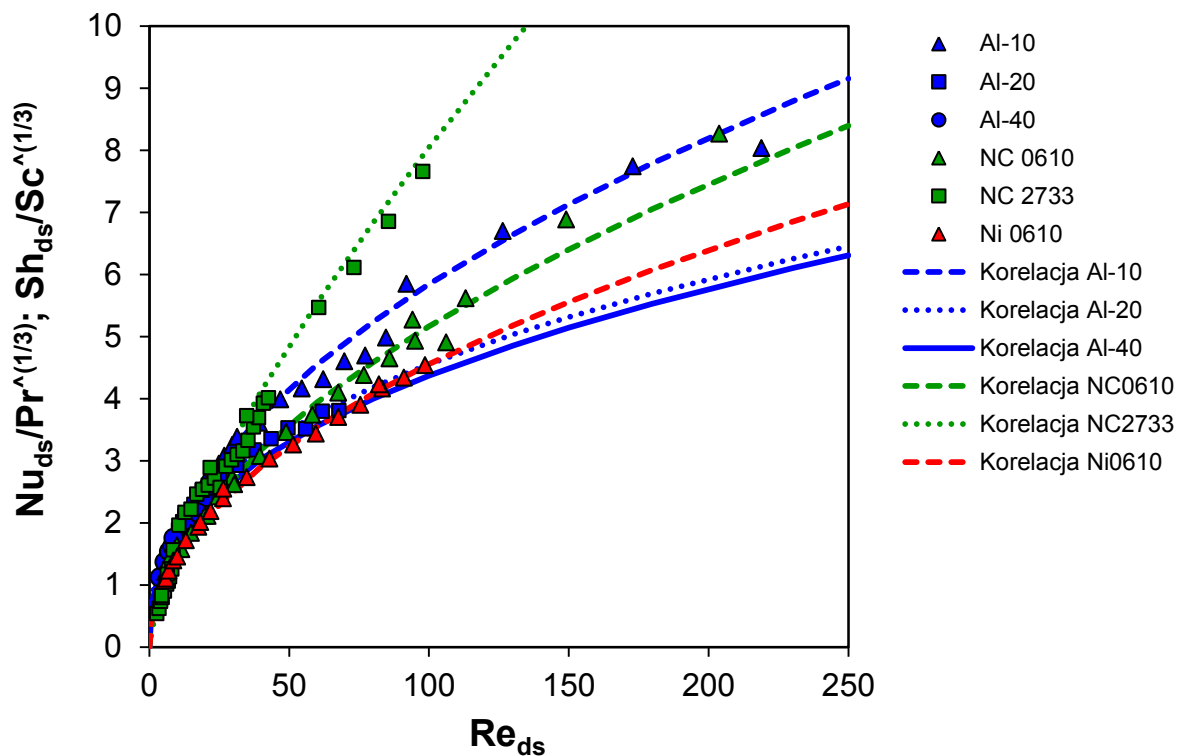


Cd. tabela 15. Średni błąd względny  $e_{Y,\bar{s}r}$  i odchylenie standardowe  $\sigma$  zależności  $(Nu_D/Pr^{1/3}; Sh_D/Sc^{1/3})$  obliczonych z wybranych równań korelacyjnych dostępnych w literaturze i wyznaczonych eksperymentalnie.

Badane piany	$e_{Y,\bar{s}r} [\%] (\sigma)$					
	Ambrosetti [131]	Huu i wsp. [114]	Garrido i wsp. [34]	Garrido i wsp. [53]	Giani i wsp. [32]	Groppi i wsp. [109]
Al-10	82,56 (4,74)	43,28 (14,72)	9,37 (13,02)	50,64 (7,74)	27,19 (22,53)	14,73 (24,13)
Al-20	82,47 (4,70)	45,77 (22,67)	12,84 (10,17)	69,18 (24,44)	39,71 (10,84)	25,63 (13,61)
Al-40	82,02 (4,24)	45,85 (26,06)	22,14 (3,84)	43,82 (7,80)	46,42 (6,64)	34,93 (6,55)
NC 0610	73,27 (5,35)	14,09 (13,87)	12,42 (11,48)	21,38 (28,02)	42,21 (19,58)	34,99 (17,58)
NC 2733	75,85 (7,09)	23,95 (7,91)	46,41 (28,86)	37,23 (37,42)	61,05 (51,06)	54,84 (49,94)
Ni 0610	77,58 (1,48)	20,63 (9,19)	16,66 (7,69)	74,01 (27,93)	63,94 (19,59)	48,44 (15,07)
Dla wszystkich pian, $e_{Y,\bar{s}r} (\sigma)$	77,91 (5,12)	28,88 (14,55)	21,75 (16,70)	47,15 (27,03)	48,39 (29,53)	37,88 (28,66)

Jak można zauważyć (tabela 15), równania zaproponowane przez Calmidiego i wsp. [122], Dasa i wsp. [126], Huu i wsp. [114] oraz Garrido i wsp. [34] opisują wyniki eksperymentalne z zadowalającą dokładnością.

Na podstawie otrzymanych danych eksperymentalnych, dla każdej badanej piany wyznaczono równanie korelacyjne opisujące zależność  $(Nu_{ds}/Pr^{1/3}; Sh_{ds}/Sc^{1/3})$  w funkcji liczby  $Re_{ds}$ , które wraz z parametrami statystycznymi przedstawiono w tabeli 16 i na rys. 5.8. Liczby  $Nu_{ds}$  i  $Re_{ds}$  zdefiniowane zostały w oparciu o średnicę mostka jako wymiar charakterystyczny. Transport ciepła jest bezpośrednio związany z litym materiałem piany – jej szkieletem. Parametrem, który najlepiej go opisuje, jest średnica mostka, stąd wybór  $d_s$  jako wymiaru charakterystycznego przy liczbach kryterialnych. Jest to podejście stosowane w wielu opublikowanych pracach. Jak stwierdzono w dalszej części pracy (rozdział 6), średnica mostka jest kluczowa dla opisu transportu ciepła (masy) dla pian stałych.



Rys. 5.8 Eksperymentalne wyniki transportu ciepła wraz z opracowanymi korelacjami: zależność  $(Nu_{ds}/Pr^{1/3}; Sh_{ds}/Sc^{1/3})$  w funkcji liczby Reynoldsa  $Re_{ds}$ ; obie liczby zdefiniowano, stosując średnicę mostka  $d_s$  jako wymiar poprzeczny.

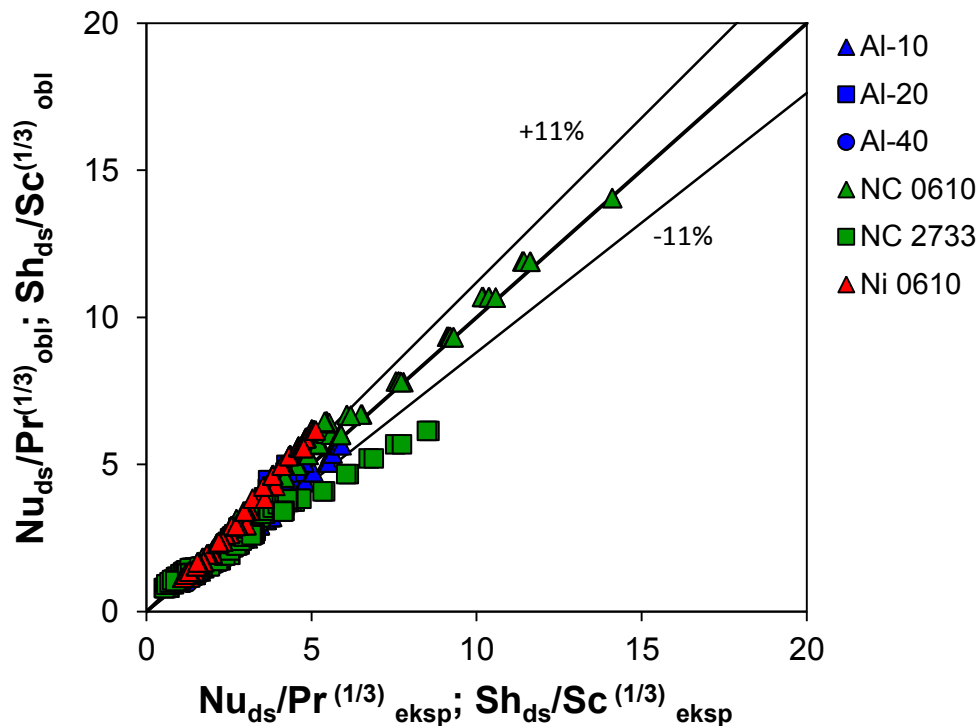
Tabela 16. Korelowanie wyników eksperymentalnych.

Badane piany	Korelacja	$e_{Y,śr}$ [%]	$\sigma$
Al-10	$\frac{Nu_{ds}}{Pr^{1/3}} = \frac{Sh_{ds}}{Sc^{1/3}} = 0,68Re_{ds}^{0,49}$ (90)	3,38	9,31
Al-20	$\frac{Nu_{ds}}{Pr^{1/3}} = \frac{Sh_{ds}}{Sc^{1/3}} = 0,88Re_{ds}^{0,38}$ (91)	2,71	9,49
Al-40	$\frac{Nu_{ds}}{Pr^{1/3}} = \frac{Sh_{ds}}{Sc^{1/3}} = 0,77Re_{ds}^{0,40}$ (92)	3,24	9,01
NC 0610	$\frac{Nu_{ds}}{Pr^{1/3}} = \frac{Sh_{ds}}{Sc^{1/3}} = 0,50Re_{ds}^{0,53}$ (93)	5,34	7,41
NC 2733	$\frac{Nu_{ds}}{Pr^{1/3}} = \frac{Sh_{ds}}{Sc^{1/3}} = 0,31Re_{ds}^{0,73}$ (94)	9,55	6,49
Ni 0610	$\frac{Nu_{ds}}{Pr^{1/3}} = \frac{Sh_{ds}}{Sc^{1/3}} = 0,53Re_{ds}^{0,49}$ (95)	2,82	9,39

Ponieważ stałe w otrzymanych równaniach są zbliżone, dlatego wyniki uzyskane dla wszystkich badanych pian można opisać za pomocą równania:

$$\frac{Nu_{ds}}{Pr^{1/3}} = \frac{Sh_{ds}}{Sc^{1/3}} = 0,45Re_{ds}^{0,57} \quad (96)$$

które ze średnim błędem względnym wynoszącym  $e_{Y, sr} = 11,80\%$  i odchyleniem  $\sigma = 7,77$ , opisuje wyniki eksperymentalne, co pokazano na rys. 5.9.



Rys. 5.9 Porównanie korelacji (96) z danymi eksperymentalnymi: zależność  $(Nu_{ds}/Pr^{1/3}; Sh_{ds}/Sc^{1/3})$  w funkcji liczby Reynoldsa  $Re_{ds}$ ; obie liczby zdefiniowano, stosując średnicę mostka  $d_s$  jako wymiar poprzeczny.

Podsumowując, można stwierdzić, że parametry morfologiczne badanych pian wpływają w zdecydowany sposób na transport ciepła.

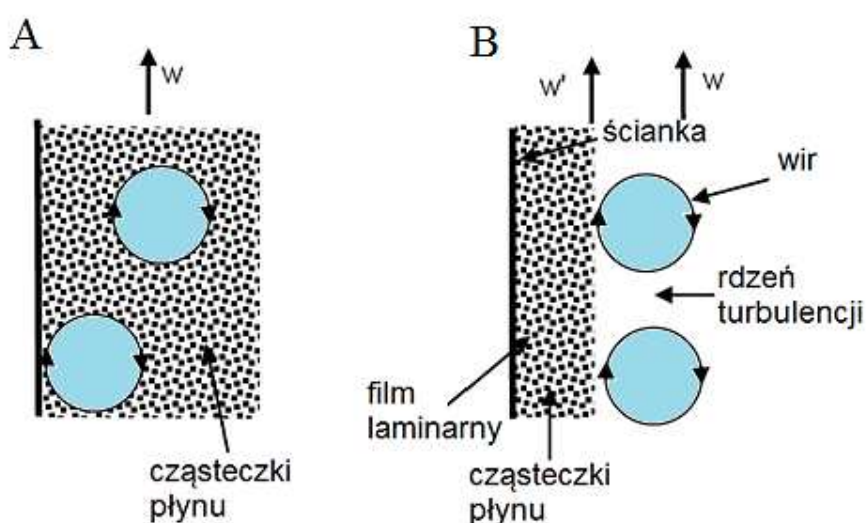
*Potwierdza to postawioną tezę, że morfologia pian stałych ma istotny wpływ na charakterystyki transportowe tych struktur.*

Różnica w średnicach czy powierzchni geometrycznej ma odzwierciedlenie w wynikach eksperymentalnych. Wpływ PPI został uwidoczniiony na przykładzie pian NC, które wyraźnie się od siebie różnią. Natomiast relatywnie niewielka różnica porowatości badanych pian powoduje, że nie można określić jednoznacznie, czy porowatość jest parametrem wpływającym istotnie na transport ciepła

## 6. Analogie transportu pędu, ciepła i masy oraz mechanizm przepływu i transportu dla pian stałych

### 6.1. Podstawowe informacje. Aktualny stan wiedzy

Analogie łączące przenoszenie ciepła i masy, jak np. przedstawiona w rozdziale poświęconym transportowi ciepła i masy analogia Chiltona - Colburna, są często stosowane w inżynierii chemicznej. Opracowanych zostało również wiele analogii łączących przenoszenie pędu i przekazywanie ciepła (masy), jak np. analogia Reynoldsa, Prandtla, Colburna, von Karmana [132] lub równanie L  v  que'a [133].



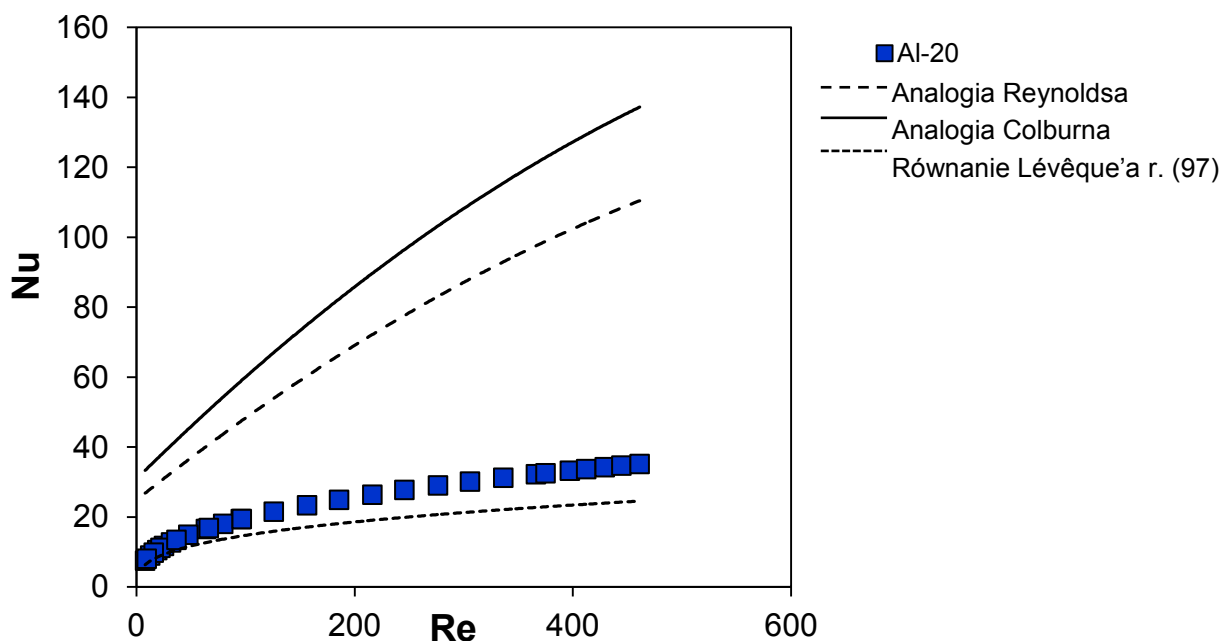
Rys. 6.1 Analogia Reynoldsa (A) i Prandtla (B).

Pierwszą zaproponowaną analogi   by   analogia Reynoldsa, która dla turbulenta przepływu płynu w kanale zak  lada, że zarówno cząstki płynu, jak i wiry przepływają burzliwie i uderzają w ścianek (powierzchni   wymiany ciepła), co schematycznie przedstawiono na rys. 6.1A. Modyfikacj   analogii Reynoldsa jest analogia Prandtla zak  ladaj  ca, że wiry znajdują się tylko w rdzeniu burzliwego przepływu, natomiast przy ściance kanału występuje subwarstwa laminarna. Transport ciepła pomiędzy płynem a   ciank   przewodu zachodzi więc w warstwie laminarnej (rys. 6.1B). Zależnośc pomiędzy profilem prędkości i temperatury określa liczba Prandtla: mała wartośc liczby  $Pr$  oznacza, że najpierw rozwija się profil temperatury (dla  $Pr \rightarrow 0$  – przykładowo dla ciekłego metalu – szybko rozwija się profil temperatury, natomiast profil prędkości pozostaje płaski). Dla  $Pr \gg 1$  profil temperatury rozwija się wolniej, niż profil prędkości. W przypadku, gdy profile prędkości i temperatury rozwijają się z jednakową szybkością ( $Pr = 1$ ) analogie

Reynoldsa i Prandtla przyjmują taką samą postać. Powyższe analogie zostały dalej rozwinięte przez von Karmana [134] i Colburna [135]. Równanie Lévêque'a [136-138] opracowane zostało dla przepływu laminarnego rozwiniętego hydrodynamicznie i rozwijającego się termicznie w krótkiej kapilarze:

$$Nu = 1,615 \left( Re Pr \frac{D}{L} \right)^{1/3} \quad (97)$$

Porównanie różnych analogii przedstawiono na rys. 6.2.



Rys. 6.2 Porównanie analogii z wprowadzonymi doświadczalnymi wynikami oporów przepływu (współczynnik Fanninga  $f$ ) dla przykładowej piany stałej; wykorzystano parametry morfologiczne piany Al-20. Przyjęto średnicę kanału  $D = d_c$ , długość  $L = d_s$ .

Jak widać na rys. 6.2, równanie Lévêque'a (97), po wprowadzeniu doświadczalnie wyznaczonych oporów przepływu (współczynników Fanninga), najlepiej przybliża doświadczalne rezultaty transportu ciepła dla pian stałych.

Na podstawie prac Lévêque'a, Schlünder [136, 137], a następnie Martin [138, 139] zaproponowali tzw. uogólnione równanie Lévêque'a (ang. *Generalized Lévêque Equation*, GLE), które można przedstawić jako:

$$\frac{Nu_D}{Pr^{1/3}} = \frac{Sh_D}{Sc^{1/3}} = 0,4038 \left( 2x_f Hg \frac{D}{L} \right)^{1/3} \quad (98)$$

gdzie liczba Hagena:

$$Hg_D = 2f Re_D^2 = \frac{\Delta P}{\Delta H} \frac{\rho D^3}{\eta^2} \quad (99)$$

Kombinacja równań (98) i (99) daje:

$$\frac{Nu_D}{Pr^{1/3}} = \frac{Sh_D}{Sc^{1/3}} = 0,4038 \left( 4x_f f Re^2 \frac{D}{L} \right)^{1/3} \quad (100)$$

Współczynnik  $x_f$  jest tu udziałem oporów o charakterze lepkiem w ogólnych oporach przepływu, określonych współczynnikiem Fanninga  $f$ . Opory lepkie efektywnie wpływają na współczynniki transportowe, w odróżnieniu od oporów o charakterze inercyjnym, które wpływają niemal wyłącznie na opory przepływu.

GLE łączy transport ciepła i masy ( $Nu_D$ ,  $Sh_D$ ) z oporami przepływu ( $Hg_D$ ). Lewa strona równania (97) jest analogią Chiltona - Colburna. Wymiar poprzeczny  $D$  (średnica kanału) nie ma istotnego wpływu na uzyskane wyniki (liczby Nusselta), jeżeli jest tak samo zdefiniowany w liczbach kryterialnych  $Re_D$ ,  $Nu_D$ ,  $Sh_D$  oraz w równaniu Darcy'ego-Weisbacha przy wyznaczaniu współczynnika Fanninga  $f$  [138].

Rozważając uogólnione równanie L  v  que'a dla przypadku pian stałych, pojawiają się trzy ważne problemy. Pierwszym problemem jest właściwe określenie współczynnika  $x_f$ . W przypadku tak złożonej struktury, jaką są piany stałe, wartość współczynnika  $x_f$  jest trudna do określenia, o ile w ogóle jest to możliwe. Drugim problemem jest poprawne wyznaczenie wymiaru podłużnego  $L$ , identyfikowanego z długością kanału. Wybór tego wymiaru w przypadku pian stałych nie jest oczywisty, a jest bardzo istotny. Równanie L  v  que'a zakłada w pełni rozwinięty profil prędkości i p  ski profil temperatury na wejściu do kanału, co powoduje powstanie trzeciego problemu. Jeśli przepływu rozwija się hydraulicznie w bardzo krótkich kanałach (np. w pianach stałych), wówczas profile prędkości i temperatury kształtują się równocześnie. Jednak, biorąc pod uwagę zło  zoną strukturę pian stałych, można założyć, że profile te są nieustannie zaburzane, a zatem ustawicznie rozwijają się, co schematycznie przedstawiono na rys. 4.11 w rozdziale po  święconym oporom przepływu.

Równanie GLE mo  że byc z powodzeniem stosowane zarówno dla opływu ciała stałego (kuli lub walca), jak i dla przepływu przez krótki kanał kapilarny [138]. Jak przedstawiono wcześniej w podrozdziale 4.4, na podstawie analizy oporów przepływu nie można jednoznacznie stwierdzić, który mechanizm r  dzi przepływem płynów przez piany: przepływu przez kapilarę (pory piany) czy opływ ciała stałego (mostki, węzły). Prawidłowo określony mechanizm przepływu powinien równocześnie opisywać opory przepływu oraz transport ciepła (masy). Zatem, zgodnie z wnioskami dotyczącymi mechanizmu przepływu, w przypadku pian stałych nale  ży rozwa  żyć oba przypadki.

To kolejny problem pojawiający się w kontekście równania L ev eque'a: jaki jest mechanizm przenoszenia ciepła/pędu w pianach stałych: przepływ przez kanał czy opływ ciała stałego.

W dostępcnej literaturze można znaleźć prace, w których stosowano GLE do opisu współczynnika transportu masy [34] (liczba Sherwooda) lub ciepła [140] (liczba Nusselta). W pracy Garrido i wsp. [34] ostatecznie zaproponowano jedynie równanie opisujące współczynnik transportu masy (liczbę Sherwooda) w funkcji liczby Hagena, które otrzymano w oparciu o dane eksperymentalne dla piany ceramicznej:

$$Sh_{De} = 0,62F_L Hg_{De}^{0,31} Sc^{1/3} \quad (101)$$

gdzie  $F_L$  jest geometrycznym współczynnikiem korekcyjnym:

$$F_L = \left( \frac{d_w + d_s}{0,001} \right)^{0,48} \varepsilon^{2,34} \quad (102)$$

Przyjmując, że komórki w pianie ceramicznej mają kształt elipsoidy, Garrido i wsp. [53] wprowadzili do równania geometryczny współczynnik "anizotropii"  $F_{L,A}$ :

$$F_{L,A} = \left( \frac{a^2}{b \cdot c} \right)^{0,7} \varepsilon^{2,34} \quad (103)$$

w którym ( $a$ ,  $c$ ) to średnice poprzeczne, natomiast ( $b$ ) to średnica wzdłużna. Ostatecznie równanie (101) przyjęło postać:

$$Sh_{De} = 0,52F_{L,A} Hg_{De}^{0,31} Sc^{1/3} \quad (104)$$

Również Dietrich [140] zaproponował równanie opisujące tylko liczbę  $Nu$  w funkcji liczby  $Hg$ :

$$Nu_{Dh} = 0,31Hg_{Dh}^{1/3} Pr^{1/3} \quad (105)$$

gdzie:

$$Hg_{Dh} = 110Re_{Dh} + 1,45Re_{Dh}^2 \quad (106)$$

Jednakże, ponieważ rozrzut wyników doświadczalnych (liczb  $Nu$ ) był duży w stosunku do równania (105) (ponad 40%), Dietrich [140] wprowadził dwa arbitralne parametry korekcyjne  $C_{Re}$  i  $C_{geo}$  w postaci:

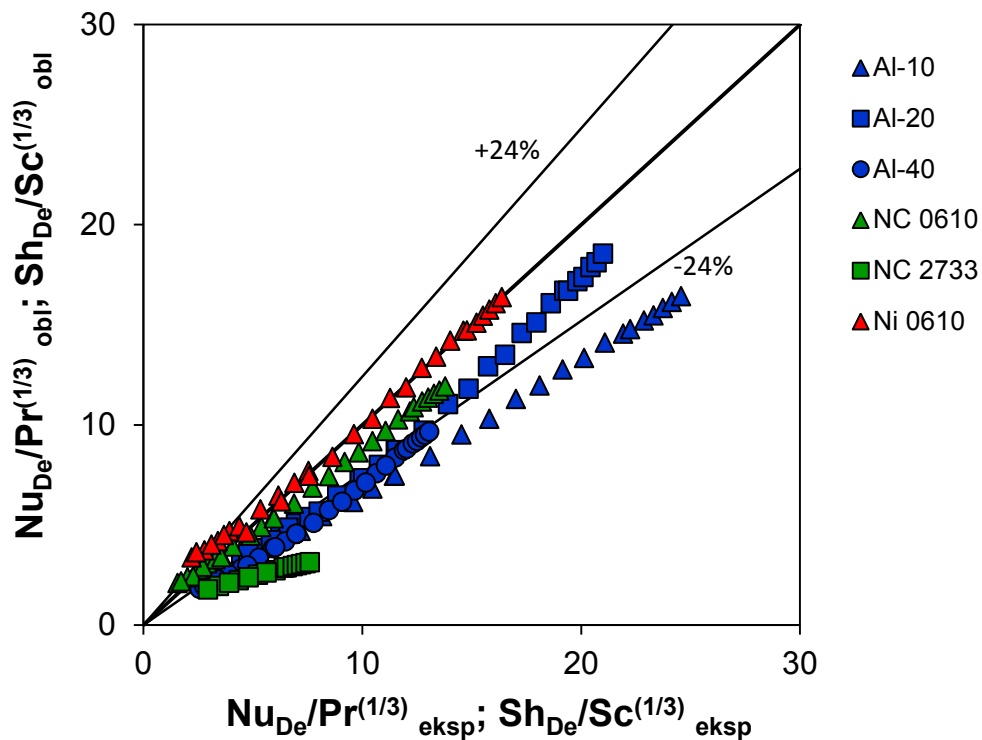
$$C_{Re} = \left( \frac{Re_{Dh} + 1}{Re_{Dh} + 1000} \right)^{0,25} \quad (107)$$

$$C_{geo} = \left( \frac{D_h/(d_s + d_w)}{(D_h/(d_s + d_w))_{sr}} \right)^{1,5} \quad (108)$$

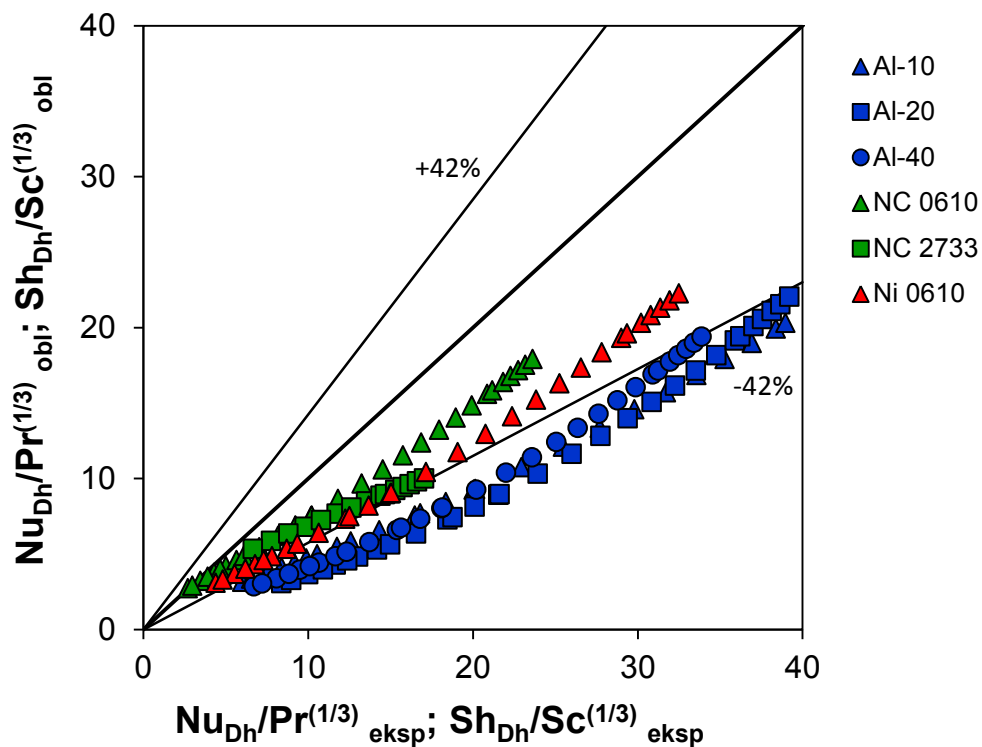
w efekcie proponując równanie:

$$Nu_{Dh} = 0,45C_{Re}C_{geo}Hg_{Dh}^{1/3} Pr^{1/3} \quad (109)$$

Porównanie współczynników transportu ciepła (liczb  $Nu_D$ ) otrzymanych eksperymentalnie w niniejszej pracy oraz wyznaczonych w oparciu o powyższe korelacje (równania (101), (105), (109)) przedstawiono na rys. 6.3-6.5.

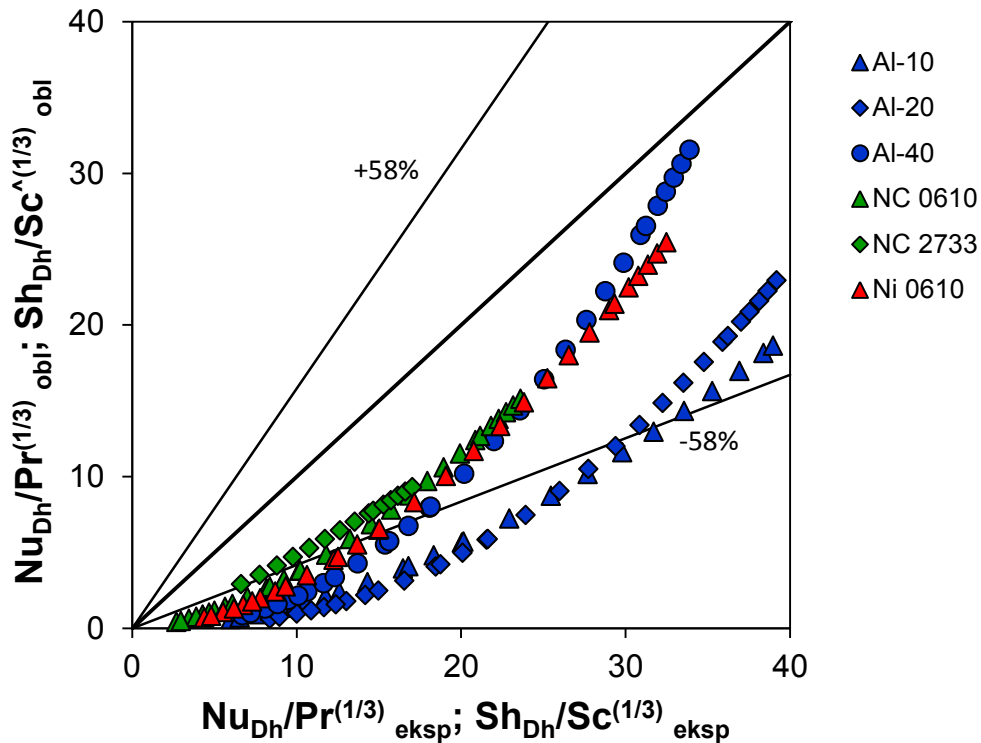


Rys. 6.3 Porównanie rozwiązania Garrido i wsp. [34] – równanie (101) z wynikami eksperymentalnymi.



Rys. 6.4 Porównanie rozwiązania Dietricha [140] – równanie (105) z wynikami eksperymentalnymi.





Rys. 6.5 Porównanie rozwiązania Dietricha [140] – równanie (109) z wynikami eksperymentalnymi.

Najlepszą zgodność pomiędzy liczbami  $Nu$  wyznaczonymi eksperymentalnie i obliczonymi otrzymano dla korelacji zaproponowanej przez Garrido i wsp. [34]. Równania zaproponowane przez Dietricha znacznie zaniżają wyniki obliczeniowe w stosunku do rezultatów doświadczalnych. Różnice te mogą wynikać z metodyki pomiarowej oraz parametrów badanych pian – powyższe korelacje zostały bowiem opracowane dla pian ceramicznych. Należy tu stanowczo podkreślić, że w pracach [34, 53, 140] nie stosowano równania GLE – brak tu stosunku  $\frac{L}{D}$  oraz współczynnika  $x_f$ . Korelacja liczb  $Nu_D$ ,  $Sh_D$  z użyciem liczby  $Hg_D$  (będącej funkcją liczby  $Re_D$ ) jest niczym innym, jak klasycznym równaniem postaci  $Nu_D(Sh_D) = f(Re_D)$ .

Ponieważ GLE można stosować zarówno dla przypadku opływu wokół ciała stałego (kuli lub walca), jak również dla przepływu przez krótką kapilarę, przeanalizowano, podobnie jak w przypadku określania mechanizmu przepływu (rozdz. 4.4), oba przypadki, które, jak wcześniej stwierdzono, dla pian stałych są równie prawdopodobne.

## 6.2. Równanie L ev eque'a – opływ ciała stałego

Współczynnik oporu dla kuli  $C_D$ , wyznaczony np. równaniem Stokesa:

$$C_D = \frac{24}{Re_{ds}} \quad (110)$$

obejmuje łącznie opory lepkie i inercyjne. Do GLE należy podstawić wartości odpowiadające wyłącznie za opory lepkie.

Dla opływu wokół kuli Martin [138], na podstawie teorii Stokesa i empirycznej korelacji Brauera [141], zaproponował równanie opisujące współczynnik oporu lepkiego  $C_F$ :

$$C_{F,sph} = \frac{16}{Re_{ds}} + \frac{3,73}{\sqrt{Re_{ds}}} + 0,03 \quad (111)$$

Stała (0,03) została oszacowana z wykorzystaniem danych eksperymentalnych transportu ciepła i masy z wielu różnych źródeł [136, 138, 139]. Wartość  $C_F$  jest oczywiście mniejsza od  $C_D$  o udział oporów o charakterze inercyjnym.

Podobnie dla walca, na podstawie rozwiązania Suckera i Brauera [142], Martin [138] zaproponował równanie analogiczne jak dla kuli:

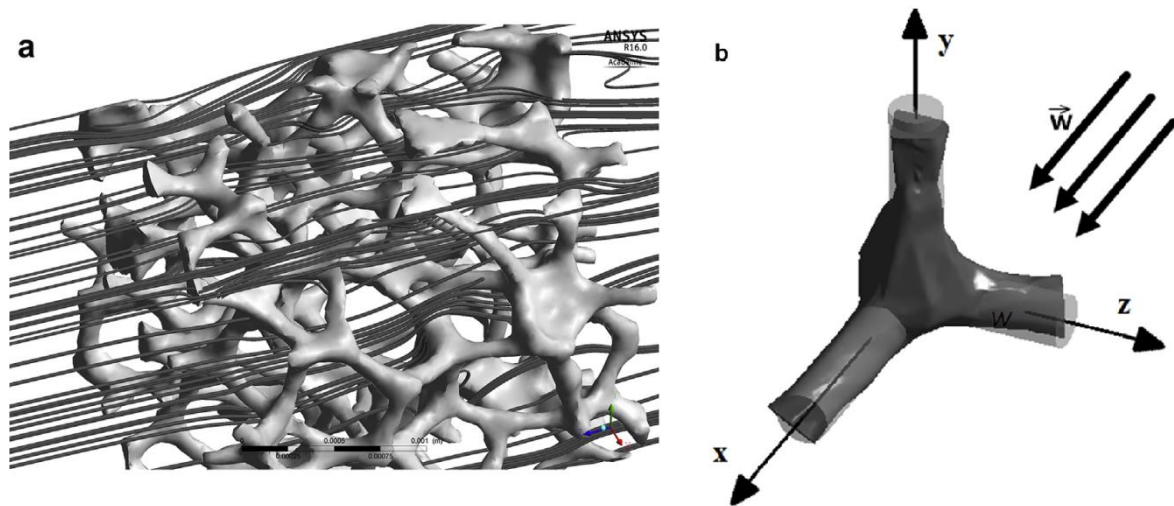
$$C_{F,cyl} = \frac{3,4}{Re_{ds}^{0,89}} + \frac{1,96}{\sqrt{Re_{ds}}} + 0,03 \quad (112)$$

Definicja  $C_F$  jest identyczna z definicją współczynnika oporów Darcy'ego  $f_D = 4f$ , w związku z tym parametr  $C_F$  powinien zostać zastosowany w miejsce  $(4x_f f)$  w równaniu (100). Stosunek  $(D/L)$  w równaniu (96) zastąpiony został wyrażeniem  $(4A_c/A)$  (gdzie  $A_c$  - pole przekroju poprzecznego dostępnego dla przepływu,  $A$  - pole powierzchni, które dla kuli wynosi  $(4(\pi D^2/4)/(\pi D^2)) = 1$ ; natomiast dla walca  $(4(DL)/(\pi DL)) = 4/\pi$ ). Ponadto Martin [138] wprowadził wartość minimalną  $Nu_0$  dla płynów w stagnacji ( $w_0 = 0$ ) otrzymując ostatecznie dla kuli:

$$Nu_{ds} = 0,4038 \left( C_F Re_{ds}^2 Pr \frac{4A_c}{A} \right)^{1/3} + Nu_0 \quad (113)$$

Wartość  $Nu_0$  dla kuli ( $Nu_0=2$ ) jest wartością teoretyczną.

Opływ wokół kuli może, w przypadku pian stałych, reprezentować opływ wokół węzłów. Ponieważ trudno wyznaczyć ich rzeczywistą średnicę, podobnie jak w przypadku określania mechanizmu przepływu, również w tym przypadku jako wymiar charakterystyczny przyjęto średnicę mostka.



Rys. 6.6 Linie prądu opracowane w oparciu o CFD dla płynu przepływającego przez pianę stałą (a); wizualizacja rozkładu porów na przestrzennym układzie współrzędnych (b).

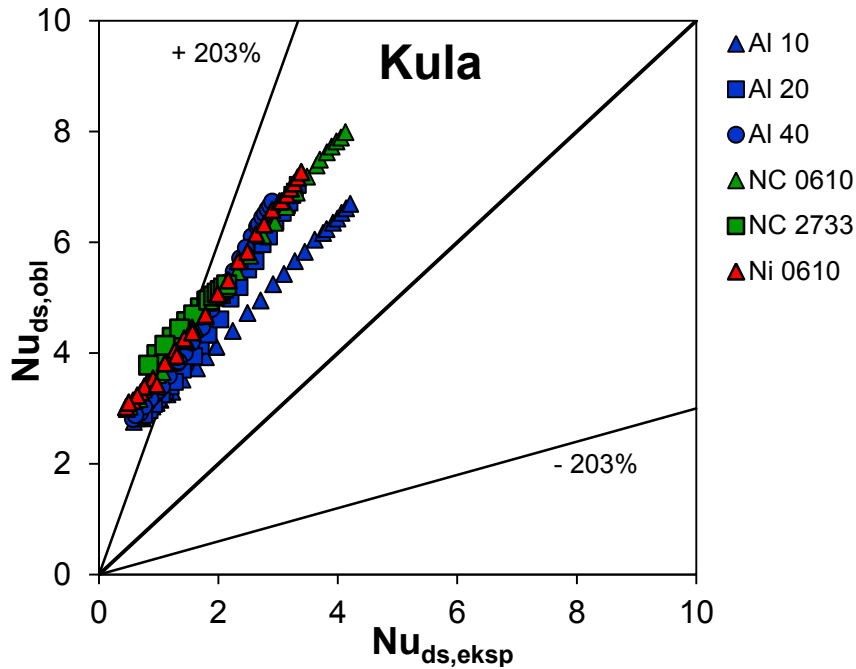
Biorąc pod uwagę złożoną strukturę piany stałej, dla modelowania opływu wokół walca (mostka) konieczne jest przyjęcie pewnych uproszczeń. Zakładając jednokierunkowy przepływ płynu przez trójwymiarową strukturę piany stałej (rys. 6.6a) (wektor prędkości gazu jest równoległy do osi x, a prostopadły do 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. 6.6b. 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:

$$Nu_{ds} = 0,4038 \left( \frac{2}{3} C_F Re_{ds}^2 Pr \frac{4A_C}{A} \right)^{1/3} + Nu_0 \quad (114)$$

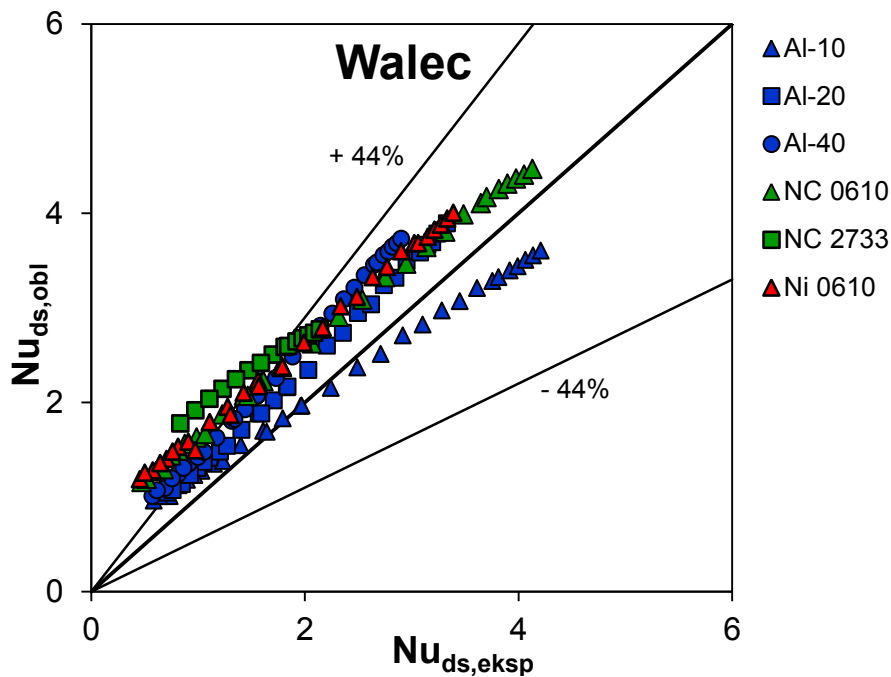
Wartość  $Nu_0$  dla walca ( $Nu_0=0,18$ ) wyznaczono w oparciu o dane literaturowe .

Na rys. 6.7 i 6.8 przedstawiono porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami obliczonymi na podstawie równań dla kuli (równanie (113)) i walca (równanie (114)). Jako średnicę kuli i walca przyjęto średnicę mostka  $d_s$ . Wartość liczby  $Nu_0$  dla płynu w stagnacji ( $Re \rightarrow 0$ ) przyjęto za Martinem [139]:

- dla kuli  $Nu_0 = 2$ ,
- dla walca  $Nu_0 = 0,18$ .



Rys. 6.7 Wartości liczb Nusselta obliczonych przy użyciu równania Lévêque'a – równanie (113), z uwzględnieniem współczynników  $C_F$  zgodnie z równaniem (111) dla kuli, w porównaniu z wynikami eksperymentalnymi.



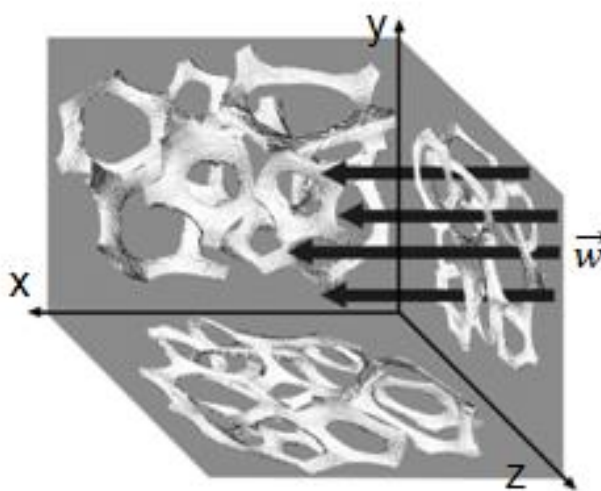
Rys. 6.8 Wartości liczb Nusselta obliczonych przy użyciu równania Lévêque'a – równanie (114), z uwzględnieniem współczynników  $C_F$  zgodnie z równaniem (112) dla walca, w porównaniu z wynikami eksperymentalnymi.

Na podstawie przedstawionych wyników stwierdzono, że wartości obliczone na podstawie równania opracowanego dla kuli (równanie (111)) znacznie zawyżają wyniki eksperymentalne (błąd średni  $e_{Y,śr} = 203,09\%$ ). Zastosowana w modelu średnica mostka jako

średnica modelowej kuli ma ograniczony sens fizyczny, chociaż niewątpliwie w pewnym stopniu wielkości te są ze sobą powiązane. Natomiast w przypadku opływu walca model w sposób zadowalający przybliża dane eksperymentalne (błąd średni  $e_{Y, \dot{s}r} = 44,82\%$ ), zwłaszcza dla większych wartości liczb Reynoldsa.

### 6.3. Równanie L ev eque'a – przepływ przez kapilarę

Drugim modelem, który poddano analizie, jest laminarny przepływ rozwijajacy się w krótkich kanałach kapilarnych. Również w tym przypadku zostały przyjęte pewne zał żenia. Rzutuc statystyczne pory piany na trójwymiarowy układ wsp rzednych i zakładajac, podobnie jak dla opływu wokół walca, ze wektory prędkości gazu są równoległe do osi x, a prostopadłe do osi y i z, można przyjac, ze tylko 1/3 liczby statystycznych porów bierze czynny udzial w procesie transportu ciepła. Udzial w transporcie ciepła pozostałych 2/3 liczby porów wydaje się byc mniejszy, bowiem plyn tylko „lizga” się po ich powierzchni, co schematycznie przedstawiono na rys. 6.9. Dlatego, do równania GLE wprowadzony zostal wsp czynn timer 1/3. Podejście to jest podobne do statystycznego rozkladu przestrzennego wektorów pędu cząstek, co zastosowano do wyprowadzenia równania Clapeyrona.



Rys. 6.9 Wizualizacja rozkladu porów na przestrzennym układzie wsp rzednych.

O ile wartości wsp czynn timer Fanniga  $f$  zostały doświadczalnie wyznaczone dla badanych pian, o tyle nie można eksperymentalnie wyznaczyc wartości  $x_f$ . Postanowiono jednak wyznaczyc wartośc  $f$  ze wzorów teoretycznych dla modelowego kanału kapilarnego, w którym zachodzi rozwijajacy si  hydrodynamicznie i termicznie przepływ laminarny.

Wówczas oczywiście rozważane jest tylko tarcie lepkie ( $x_f = 1$ ). Dla obliczenia współczynnika  $f$  rozważono dwa równania:

- Hawthorne'a [143]

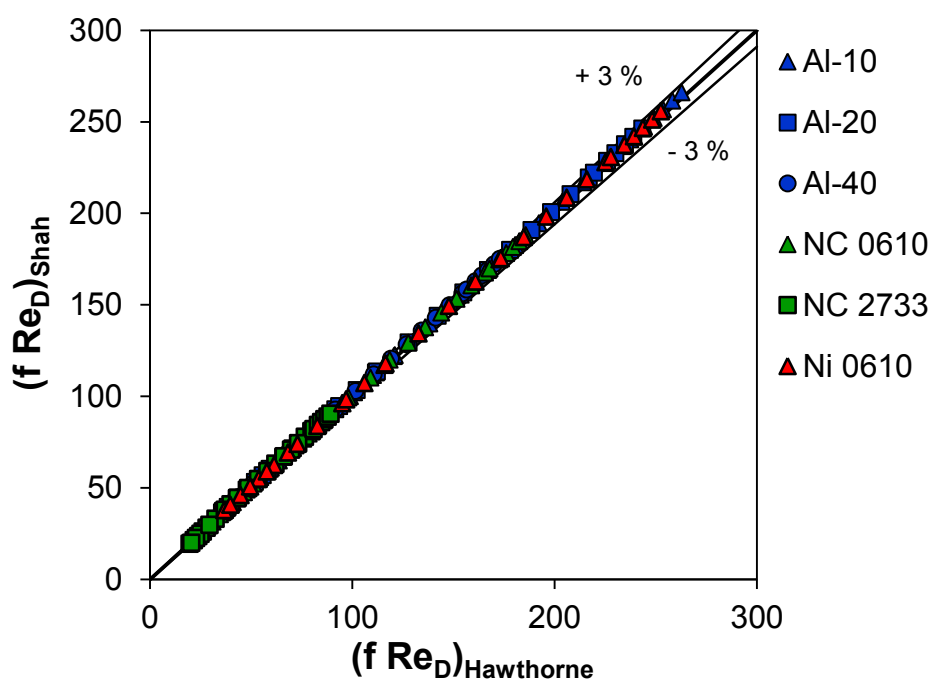
$$(fRe_D) = (f_{fd}Re_D) \left( 1 + \frac{0,045}{L^+} \right)^{0,5} \quad (115)$$

gdzie  $f_{fd}$  odnosi się do w pełni rozwiniętego przepływu laminarnego, dla kanału kołowego ( $f_{fd}Re_D$ )=16,  $L^+$  jest bezwymiarową długością kanału opisaną równaniem (43) [106]

- oraz teoretyczne rozwiązanie Shaha [108] (równanie (42)):

$$(fRe_D) = \frac{3,44}{\sqrt{L^+}} + \frac{\frac{1,25}{4L^+} + 16 - \frac{3,44}{\sqrt{L^+}}}{1 + \frac{0,00021}{(L^+)^2}}$$

Oba równania, zaproponowane dla laminarnego przepływu rozwijającego się hydrodynamicznie, porównano na rys. 6.10.



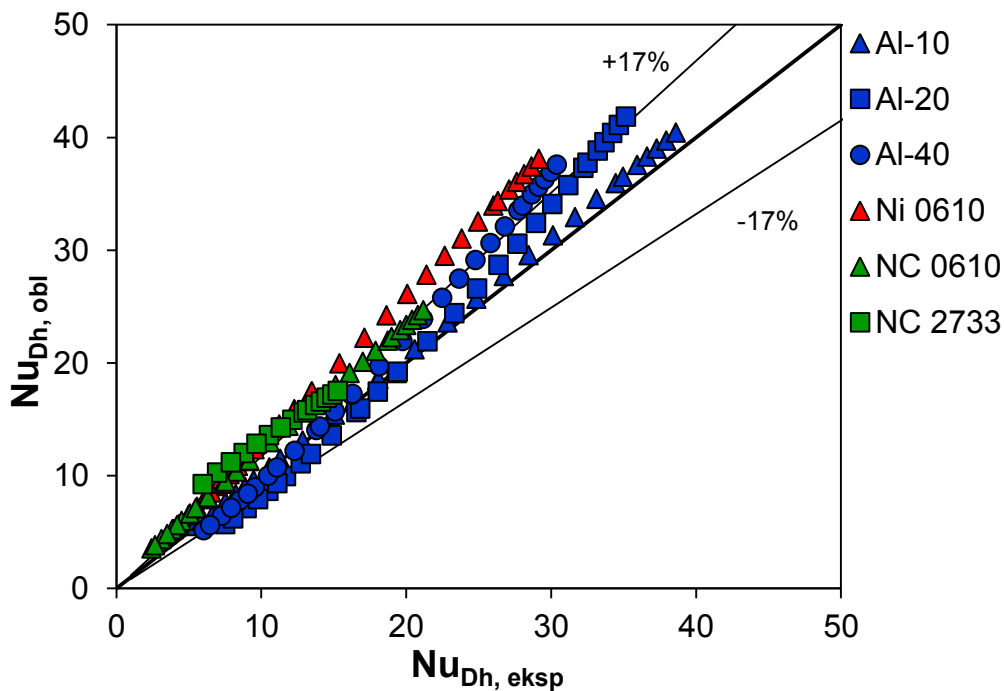
Rys. 6.10 Porównanie równań (115) i (43). Wykorzystano  $d_c$  jako średnicę modelowego kanału  $D$  oraz średnicę mostka jako długość modelowego kanału  $L$ .

Wartości  $(fRe_D)$  wyznaczone za pomocą obu równań są podobne, maksymalne różnice pomiędzy otrzymanymi wartościami wynoszą mniej niż 3%. Na potrzeby modelowania wybrano prostsze równanie Hawthorne'a.

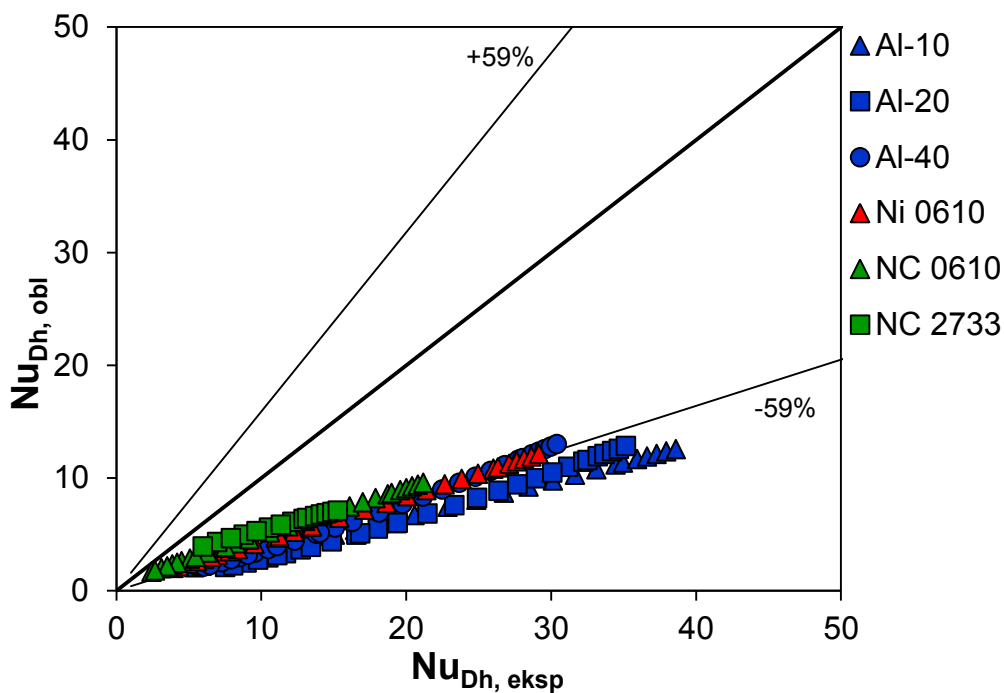
Wprowadzając wszystkie przyjęte uproszczenia, uogólnione równanie L ev eque'a dla pian stałych przyjął ostatecznie postać:

$$\frac{Nu_D}{Pr^{1/3}} = \frac{Sh_D}{Sc^{1/3}} = 0,4038 \left[ \frac{1}{3} 4(fRe_D)Re \frac{D}{L} \right]^{1/3} = 0,4038 \left[ 21,33Re_D \frac{D}{L} \left( 1 + \frac{0,045DRe_D}{L} \right)^{0.5} \right]^{1/3} \quad (116)$$

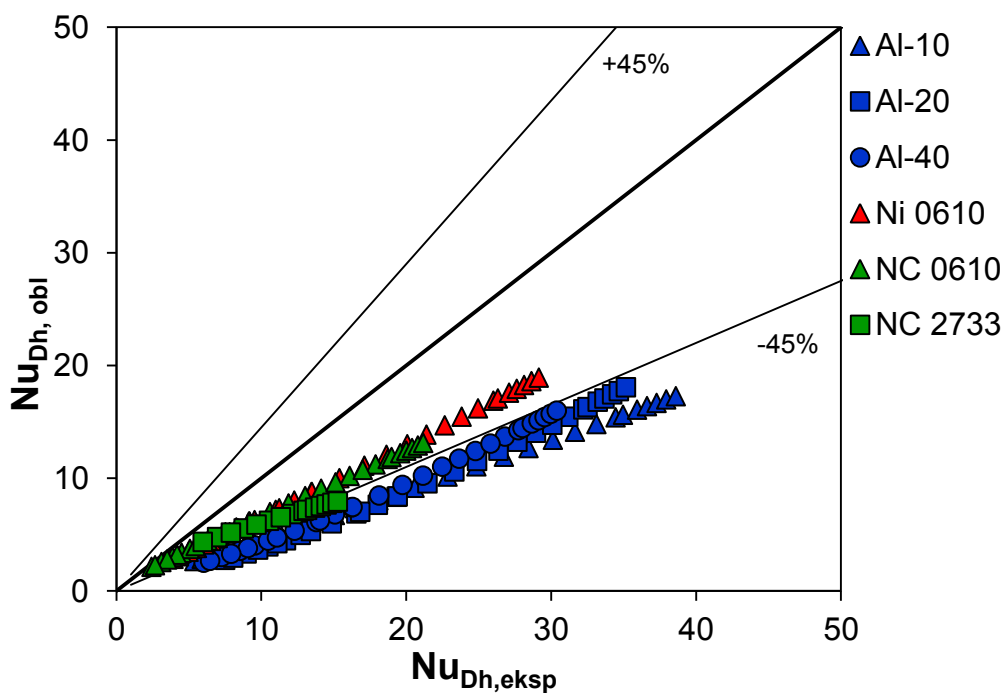
W przypadku pian stałych średnica modelowego kanału może być równa średnicy komórki ( $d_c$ ), okna ( $d_w$ ), pora ( $d_p$ ) lub średnicy hydraulicznej ( $D_h$ ). Jednak wybór średnicy kanału ma mniejsze znaczenie, jeśli zastosujemy ten sam wymiar w liczbach kryterialnych  $Re$ ,  $Nu$ ,  $Sh$  i równaniu Darcy'ego-Weisbacha [139]. Długość modelowego kanału może być równa średnicy mostka ( $d_s$ ), komórki ( $d_c$ ) lub pora ( $d_p$ ). Podobnie jak przy określaniu mechanizmu przepływu, również w tym przypadku przeprowadzono dokładną analizę wszystkich możliwych kombinacji  $D$  i  $L$ . Porównanie wartości obliczonych z danymi doświadczalnymi dla badanych pian Al-10, Al-20, Al-40, Ni 0610, NC 0610, NC 2733 dla różnych długości kanału i średnicy kanału  $D = D_h$  przedstawiono na rys 6.11-6.13. Dla innych średnic kanału zależności były podobne, analizę błędów wszystkich wariantów zebrano w tabeli 17.



Rys. 6.11 Porównanie wyników eksperymentalnych z równaniem L ev eque'a (równanie (116)); modelowa średnica kanału  $D = D_h$ , modelowa długość kanału  $L = d_s$ .



Rys. 6.12 Porównanie wyników eksperymentalnych z równaniem L ev eque'a (r ownanie (116)); modelowa średnica kanału  $D = D_h$ , modelowa długość kanału  $L = d_c$ .

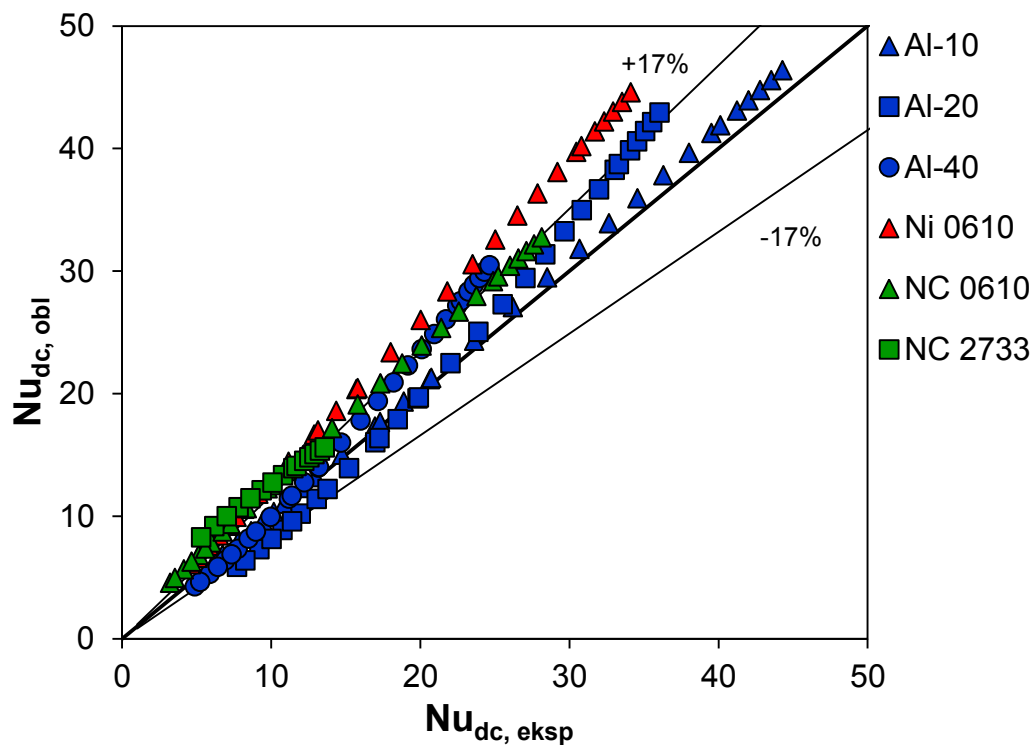


Rys. 6.13 Porównanie wyników eksperymentalnych z równaniem L ev eque'a (r ownanie (116)) modelowa średnica kanału  $D = D_h$ , modelowa długość kanału  $L = d_p$ .

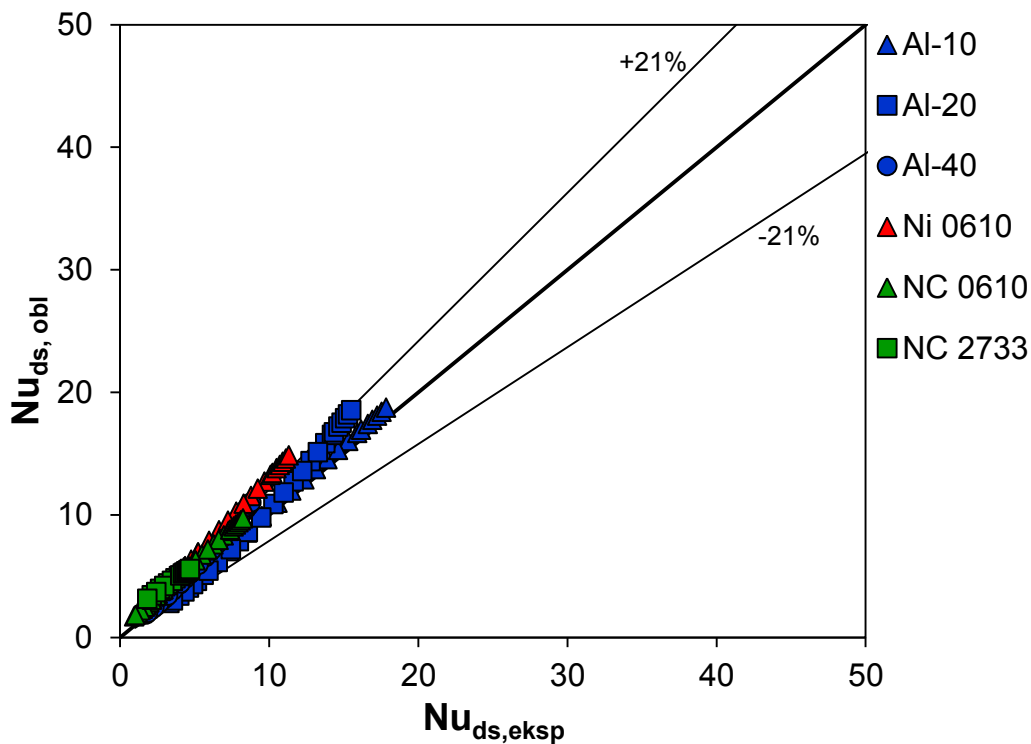
Analiza otrzymanych wyników jednoznacznie wskazuje, że właściwą długością kanału jest średnica mostka  $d_s$ , a uzyskany średni błąd wynoszący 17% potwierdza dobrą zgodność modelowania z wynikami eksperymentalnymi.



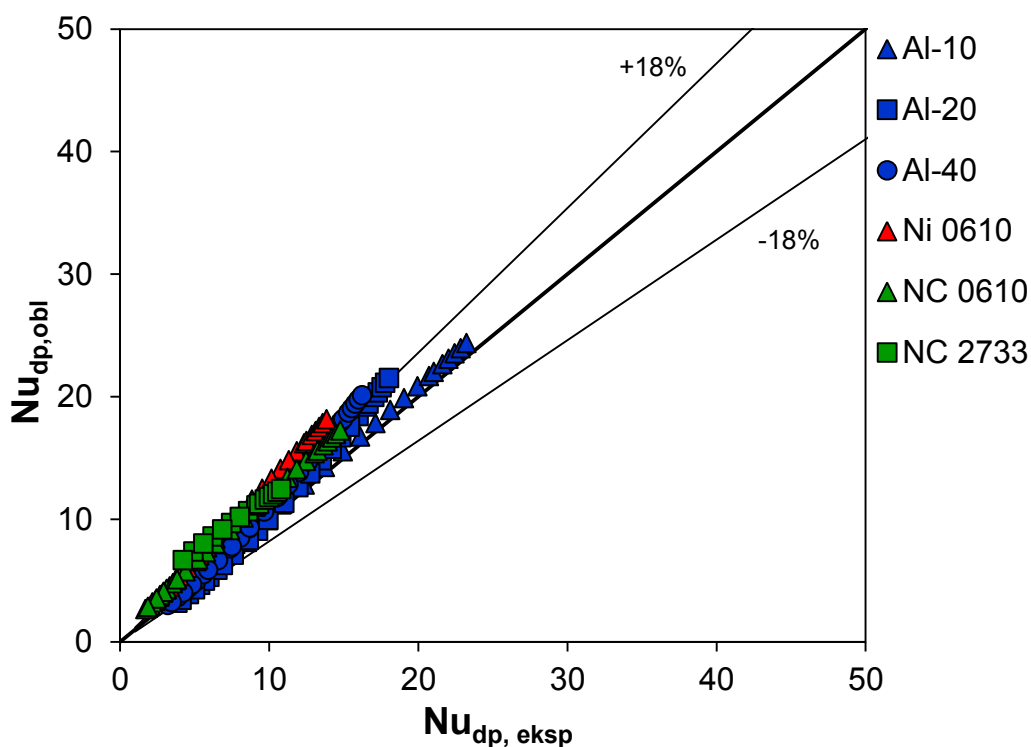
Wybór średnicy modelowego kanału w równaniu opisującym przepływ przez pianę stałą (równanie (116)), pomimo wprowadzenia pewnych uproszczeń do równania GLE (równanie (97) lub (99)), również ma niewielkie znaczenie. Średni błąd względny dla wszystkich rozważanych średnic modelowego kanału był zbliżony, co przedstawiono na rys. 6.14-6.16. Nieznacznie większy błąd otrzymano jedynie dla średnicy okna jako modelowej średnicy kanału ( $e_{Y,śr} = 21\%$ ), dla pozostałych średnic średni błąd względny wyniósł ok. 17-18 %.



Rys. 6.14 Porównanie wyników eksperymentalnych z równaniem Lévêque'a (równanie (116)); modelowa średnica kanału  $D = d_c$ , modelowa długość kanału  $L = d_s$ .



Rys. 6.15 Porównanie wyników eksperymentalnych z równaniem L ev eque'a (r ownanie (116)); modelowa średnica kanału  $D = d_w$ , modelowa długość kanału  $L = d_s$ .



Rys. 6.16 Porównanie wyników eksperymentalnych z równaniem L ev eque'a (r ownanie (116)); modelowa średnica kanału  $D = d_p$ , modelowa długość kanału  $L = d_s$ .

Tabela 17. Średni błąd względny  $e_{Y,śr}$  i odchylenie standardowe  $\sigma$  – analiza równania Lévêque’a.

Modelowa średnica	Modelowa długość kanału	Średni błąd $e_{Y,śr}, \%$	odchylenie standardowe $\sigma, -$
$D = D_h$	$L = d_c$	59,04	8,81
	$L = d_s$	17,76	11,93
	$L = d_p$	45,42	11,52
$D = d_c$	$L = d_c$	59,34	8,30
	$L = d_s$	17,44	11,70
	$L = d_p$	45,68	10,89
$D = d_w$	$L = d_c$	52,38	12,69
	$L = d_s$	21,46	16,35
	$L = d_p$	39,20	13,89
$D = d_p$	$L = d_c$	56,17	9,63
	$L = d_s$	18,72	13,41
	$L = d_p$	42,67	12,47

Podsumowując, można stwierdzić, że wyniki otrzymane w oparciu o równanie Lévêque’a zdecydowanie wskazują na rozwijający się hydrodynamicznie przepływ laminarny w krótkiej kapilarze jako właściwy mechanizm opisujący zjawiska transportowe w pianach stałych (rys. 6.14-6.16). Zastosowanie średnicy mostka  $d_s$  jako modelowej długości kanału  $L$  jest właściwe i daje satysfakcjonujące rezultaty, co potwierdzają również wnioski otrzymane podczas określania mechanizmu przepływu w pianach stałych (rozdział 4.4). Ponieważ wybór średnicy kanału ma niewielki wpływ na wyniki modelowania przy użyciu równania Lévêque’a, dlatego parametr ten może być dość swobodnie wybrany spośród rozważanych (średnica komórki, okna, pora czy średnica hydrauliczna). Jednak w przypadku określania mechanizmu przepływu średnica modelowego kanału modelu ma znaczenie. Jak wykazano w rozdziale 4.4, najlepszą zgodność dla mechanizmu przepływu przez krótką kapilarę pomiędzy wynikami eksperymentalnymi i obliczonymi (równanie (42)) uzyskano dla średnicy komórki ( $d_c$ ) jako średnicy modelowego kanału. Średnica hydrauliczna również może być stosowana jako modelowa średnica kanału, ale z nieco mniejszą dokładnością.

## 7. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono obszerne badania morfologii dla dziewięciu pian metalowych (tabela 2), stosując tomografię komputerową z użyciem progowania globalnego, uzupełnioną zaawansowanym oprogramowaniem iMorph. Ponadto dla identyfikacji parametrów morfologicznych pian zastosowano mikroskopię optyczną oraz piknometrię helową.

Dla wszystkich badanych pian przeprowadzono badania doświadczalne 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 doświadczalne współczynniki transportu ciepła w fazie gazowej. Natomiast współczynniki transportu masy wyznaczono, stosując analogię Chiltona - Colburna. Opracowano korelacje w postaci liczb kryterialnych.

Stosując równanie L  v  que'a (GLE), podjęto próbę określenia łącznie 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 ogólna, 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. Z uwagi na bardzo małą objętość, okna nie pojawiają

się w postaci wyraźnych pików na histogramach wynikających z TK, podających udział objętościowy porów w pianie.

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 na:
  - a. Przepływ przez krótką kapilarę o średnicy  $d_s$ ,
  - b. Opływ walca o średnicy  $d_s$ , lub
  - c. Opływ kuli o średnicy  $d_s$ .

Dokładność poszczególnych modeli była zbliżona, nie pozwalając na jednoznaczne określenie mechanizmu. W przypadku przepływu w kapilarze 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 L  v  que'a (GLE) przyniósł jednoznaczną odpowiedz: dla wszystkich badanych pian mechanizmem przepływu i transportu jest rozwijający się przepływ laminarny w krótkim kanale (porze piany). Długość modelowego kanału bez wątpliwości jest równa s  rednicy mostka piany, s  rednica kanału ma mniejsze znaczenie, może byc równa s  rednicy 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 u  cislenie tezy nr 2: w strukturze piany występują zjawiska przepływu przez krótką kapilarę.

## Summary and conclusions

The dissertation presents extensive morphology studies for nine metal foams (Table 2). Data has been acquired using computer tomography with global thresholding, supplemented by advanced iMorph software. In addition, optical microscopy and helium pycnometry were used to identify the morphological parameters of the foams.

The flow resistance experiments were performed for all tested foams using air at ambient pressure and temperature. Based on the obtained results, an attempt to identify the mechanism of flow through the foam was made. The flow around the solid body (a cylinder or sphere) and a laminar flow developing through a short capillary (solid foam pores) were considered, but obtained results were ambiguous.

Experimental results of heat transfer for seven foams are presented. Using the commonly known Chilton-Colburn analogy, mass transport results were obtained. The correlations equations for foams were developed using criterial numbers.

Using the L ev eque equation (GLE), an attempt to determine the total flow and heat (mass) transfer mechanism for solid foams was made. Two possible mechanisms were considered: flow around submerged objects – a sphere or a cylinder – as well as developing laminar flow through the short capillary channel. It has been found that the best results was obtained for the model of developing laminar flow in short capillary channel.

On the basis of the obtained results, the following conclusions has been derived:

1. Examination of the morphological structure of foams using X-ray computed tomography may cause problems. Using improper thresholding procedure artifacts can be received in the results, distorting such morphological parameters as porosity, specific surface area or strut diameter. Global thresholding is an appropriate method for examination solid foam using the CT method.
2. For many foams, depending on the production technology used, there are true pores inside the skeleton. In the standard processing of tomographic images, they cause inaccurate determination of the outer dimensions of the foam skeleton. For the proper development of CT images, dilatation operations (filling the internal voids in the foam skeleton) and erosion (in order to restore the real external dimensions) are necessary.
3. Tomography does not distinguish between two main types of foam pores: cells and windows. For their identification, a visual assessment is necessary, e.g. using optical microscopy. Due to the very small volume, the windows do not appear in

the form of clear peaks in histograms resulting from the CT, giving the volume fraction of pores in the foam.

4. The flow resistance and transport coefficients increase with the pore density (PPI) and the geometric surface of the foams, but decrease with the increase of the pore diameter, which confirms the thesis # 1: flow and transport properties of solid foams depend on their morphology.
5. An attempt to identify the flow mechanism through the foams, carried out on the basis of flow resistance tests, did not yield unambiguous results indicating:
  - a. Flow through a short capillary channel with diameter  $d_s$ ,
  - b. Flow around a cylinder with diameter  $d_s$ , or
  - c. Flow around a sphere with diameter  $d_s$ .

The accuracy of individual models was similar, not allowing for an unambiguous determination of the mechanism. In the case of flow through a short capillary channel, the analysis did not take into account the inertial resistance, only viscous resistances were taken into account, hence probably worse accuracy.

6. The simultaneous description of the momentum and heat (mass) transfer phenomena using the generalized Lévêque equation (GLE) brought an unambiguous answer: for all foams tested, the mechanism of flow and transport there is a developing laminar flow through a short capillary channel. The length of the model channel without any doubt is equal to the diameter of the foam strut, the diameter of the channel is less important, it can be equal to the hydraulic diameter  $D_h$ , cells  $d_c$ , window foam  $d_w$ . This is the first attempt in the literature to identify the mechanism of flow through the foam. and confirmation, that flow phenomena through the short capillary in the foam structure.

## SPIS LITERATURY

1. 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.
2. Edouard, D., et al., *Pressure drop modeling on SOLID foam: State-of-the art correlation*. Chemical Engineering Journal, 2008. **144**: p. 299-311.
3. Banhart, J., *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams*. Progress in Materials Science, 2001. **46**: p. 559-632.
4. Ashby, M.F., et al., *Metal Foams: A Design Guide*. 2000.
5. Srivastava, V.C. and K.L. Sahoo, *Processing, stabilization and applications of metallic foams. Art of science*. Materials Science Poland, 2007. **25**: p. 733-753.
6. Paserin, V., et al., *CVD Technique for Inco Nickel Foam Production*. Advanced Engineering Materials, 2004. **6**(6): p. 454-459.
7. Vonzeppelin, F., et al., *Desorption of hydrogen from blowing agents used for foaming metals*. Composites Science and Technology, 2003. **63**(16): p. 2293-2300.
8. Liu, Y., Y. Li, and J. Wan, *Directional solidification of metal-gas eutectic and fabrication of regular porous metals*. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2007. **2**(2): p. 180-183.
9. Yamada, Y., et al., *Processing of Cellular Magnesium Materials*. Advanced Engineering Materials, 2000. **2**(4): p. 184-187.
10. Reutter, O., et al., *Characterization of Air Flow Through Sintered Metal Foams*. Journal of Fluids Engineering, 2008. **130**(5): p. 051201-1 - 051201-5.
11. Jiang, B., et al., *A novel method for making open cell aluminum foams by powder sintering process*. Materials Letters, 2005. **59**(26): p. 3333-3336.
12. Arrance, F.C., *Battery electrode and battery, and process for preparing said electrode*. 1966.
13. Badiche, X., et al., *Mechanical properties and non-homogeneous deformation of open-cell nickel foams: application of the mechanics of cellular solids and of porous materials*. Materials Science and Engineering: A, 2000. **289**(1-2): p. 276-288.
14. Paserin, V., S. J., and M. S. *Superior Nickel Foam Production: Starting from Raw Materials Quality Control*. in *Metfoam 2005*. 2005. Kyoto: JIMIC-4.
15. Scheffler, M. and P. Colombo, *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties, Applications*. 2005, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
16. Twigg, M.V. and J.T. Richardson, *Fundamentals and Applications of Structured Ceramic Foam Catalysts*. Industrial Engineering Chemical Research, 2007. **46**: p. 4166-4177.
17. Buciuman, F.C. and B. Kraushaar-Czarnetzki, *Ceramic foam monoliths as catalyst carriers. I. Adjustment and description of the morphology*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003. **42**(9): p. 1863-1869.
18. Inayat, A., et al., *Determining the specific surface area of ceramic foams: The tetrakaidehedra model revisited*. Chemical Engineering Science, 2011. **66**(6): p. 1179-1188.
19. Sepulveda, P. and J.G.P. Binner, *Processing of cellular ceramics by foaming and in situ polymerisation of organic monomers*. Journal of the European Ceramic Society, 1999. **19**(12): p. 2059-2066.
20. Colombo, P., *Ceramic foams: fabrication, properties and applications*. Key Engineering Materials, 2002. **206-213**: p. 1913-1918.
21. Peng, H.X., et al., *Microstructure of ceramic foams*. Journal of the European Ceramic Society, 2000. **20**(7): p. 807-813.
22. Inagaki, M., J.S. Qiu, and Q.G. Guo, *Carbon foam: Preparation and application*. Carbon, 2015. **87**: p. 128-152.
23. Gallego, N.C., W. Klett, J.W. *Carbon foams for thermal management*. International Seminar on Advanced Applications for Carbon Materials. Jeju Island, Korea. September 12-13, 2002 2002; Available from: [web.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/pres/114927.pdf](http://web.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/pres/114927.pdf).
24. Khemani, K.C., *Polymeric Foams: An Overview*. 1997. **669**: p. 1-7.
25. <http://hansmalab.physics.ucsb.edu/afmbone.html>. Dostęp 22.06.2018 r.
26. <https://images.fineartamerica.com/images-medium-large-5/1-natural-sponge-sem-power-and-syred.jpg>. Dostęp 22.06.2018 r.



27. 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.
28. 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.
29. Dietrich, B., *Pressure drop correlation for ceramic and metal sponges*. Chemical Engineering Science, 2012. **74**: p. 192-199.
30. 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.
31. Lacroix, M., et al., *Pressure drop measurements and modeling on SiC foams*. Chemical Engineering Science, 2007. **62**: p. 3259-3267.
32. Giani, L., G. Groppi, and E. Tronconi, *Mass-transfer characterization of metallic foams as supports for structured catalysts*. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2005. **44**: p. 4993-5002.
33. Patcas, F.C., G.I. Garrido, and B. Kraushaar-Czarnetzki, *CO oxidation over structured carriers: A comparison of ceramic foams, honeycombs and beads*. Chemical Engineering Science, 2007. **62**(15): p. 3984-3990.
34. Garrido, G.I., et al., *Mass transfer and pressure drop in ceramic foams: A description for different pore sizes and porosities*. Chemical Engineering Science, 2008. **63**(21): p. 5202-5217.
35. Große, J. and B. Dietrich, et al, *Morphological Characterization of Ceramic Sponges for Applications in Chemical Engineering*. Industrial Engineering Chemical Research 2009. **48**(23): p. 10395-10401.
36. Biasetto, L., et al., *Gas Permeability of Microcellular Ceramic Foams*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007. **46**: p. 3366-3372.
37. Lu, T.J., H.A. Stone, and M.F. Ashby, *Heat transfer in open-cell metal foams*. Acta Materialia, 1998. **46**(10): p. 3619-3635.
38. Medraj, M., et al., *The effect of microstructure on the permeability of metallic foams*. Journal of Materials Science, 2007. **42**(12): p. 4372-4383.
39. Friedrich, J.M., et al., *Reticulated vitreous carbon as an electrode material*. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2004. **561**: p. 203-217.
40. Dukhan, N. and K.-C. Chen, *Heat transfer measurements in metal foam subjected to constant heat flux*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007. **32**(2): p. 624-631.
41. Amori, K.E. and H.A. Laibi, *Experimental and numerical analysis of electrical metal foam heater*. Energy, 2011. **36**(7): p. 4524-4530.
42. David Edouard, D., et al., *The effective thermal properties of solid foam beds: Experimental and estimated temperature profile*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010. **53**: p. 3807-3816.
43. Cybulski, A. and J.A. Moulijn, *Monoliths in Heterogeneous Catalysis*. Catalysis Reviews: Science and Engineering, 1994. **36**(2): p. 179-270.
44. Chin, Y., et al., *Preparation of a novel structured catalyst based on aligned carbon nanotube arrays for a microchannel Fischer-Tropsch synthesis reactor*. Catalysis Today, 2005. **110**(1-2): p. 47-52.
45. Duong-Viet, C., et al., *Silicon carbide foam as a porous support platform for catalytic applications*. New Journal of Chemistry, 2016. **40**(5): p. 4285-4299.
46. Lacroix, M., et al., *Silicon carbide foam composite containing cobalt as a highly selective and re-usable Fischer-Tropsch synthesis catalyst*. Applied Catalysis a-General, 2011. **397**(1-2): p. 62-72.
47. Gargiulo, N., et al., *Me-ZSM-5 monolith foams for the NH<sub>3</sub>-SCR of NO*. Catalysis Today, 2017.
48. Setiabudi, A., M. Makkee, and J.A. Moulijn, *An optimal NO<sub>x</sub> assisted abatement of diesel soot in an advanced catalytic filter design*. Applied Catalysis B: Environmental, 2003. **42**(1): p. 35-45.
49. Pestryakov, A.N., E.N. Yurchenko, and A.E. Feofilov, *Foam-metal catalysts for purification of waste gases and neutralization of automotive emissions*. Catalysis Today, 1996. **29**(1-4): p. 67-70.

50. Peng, Y. and J.T. Richardson, *Properties of ceramic foam catalyst supports: one-dimensional and two-dimensional heat transfer correlations*. Applied Catalysis A: General, 2004. **266**(2): p. 235-244.
51. Bennett, C.J., S.T. Kolaczkowski, and W.J. Thomas, *Determination of heterogeneous reaction kinetics and reaction rates under mass transfer controlled conditions for a monolith reactor*. Trans Inst Chem Eng, 1991. **B 69**: p. 209-220.
52. Giani, L., G. Groppi, and E. Tronconi, *Heat Transfer Characterization of Metallic Foams*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005. **44**(24): p. 9078-9085.
53. Garrido, G.I. and B. Kraushaar-Czarnetzki, *A general correlation for mass transfer in isotropic and anisotropic solid foams*. Chemical Engineering Science, 2010. **65**(6): p. 2255-2257.
54. Calvo, S., et al., *Phase distribution measurements in metallic foam packing using X-ray radiography and micro-tomography*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2009. **48**(5): p. 1030-1039.
55. <http://www.recemat.nl/eng/metal-foam/>. Dostęp 18.12.2017 r.
56. Dietrich, B., et al., *Pressure drop measurements of ceramic sponges-Determining the hydraulic diameter*. Chemical Engineering Science, 2009. **64**: p. 3633-3640.
57. McDonald, S.A., et al., *Characterization of the three-dimensional structure of a metallic foam during compressive deformation*. J Microsc, 2006. **223**(Pt 2): p. 150-8.
58. Trater, A.M., S. Alavi, and S.S.H. Rizvi, *Use of non-invasive X-ray microtomography for characterizing microstructure of extruded biopolymer foams*. Food Research International, 2005. **38**(6): p. 709-719.
59. Sezgin, M. and B. Sankur, *Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation*. Journal of Electronic Imaging, 2004. **13**(1): p. 146.
60. Olurin, O.B., et al., *The investigation of morphometric parameters of aluminium foams using micro-computed tomography*. Materials Science and Engineering: A, 2002. **328**(1-2): p. 334-343.
61. Vicente, J., F. Topin, and J.-V. Daurelle, *Open Celled Material Structural Properties Measurement: From Morphology To Transport Properties*. Materials Transactions, 2006. **47**: p. 2195-2202.
62. Hardy, E.H., *Magnetic Resonance Imaging in Chemical Engineering: Basics and Practical Aspects*. Chemical Engineering & Technology, 2006. **29**(7): p. 785-795.
63. Grosse, J., et al., *Volume image analysis of ceramic sponges*. Chemical Engineering and Technology, 2008. **31**(2): p. 307-314.
64. Grosse, J., et al., *Morphological Characterization of Ceramic Sponges for Applications in Chemical Engineering*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009. **48**(23): p. 10395-10401.
65. Ji, X. and J. Xu, *Experimental study on the two-phase pressure drop in copper foams*. Heat and Mass Transfer, 2011. **48**(1): p. 153-164.
66. Miwa, S. and S.T. Revankar, *Hydrodynamic characterization of nickel metal foam, Part I: Single-phase permeability*. Transport in Porous Media, 2009. **80**: p. 269-279.
67. Albanakis, C., et al., *Experimental analysis of the pressure drop and heat transfer through metal foams used as volumetric receivers under concentrated solar radiation*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009. **33**: p. 246-252.
68. Pec, M.K., et al., *Reticulated vitreous carbon: A useful material for cell adhesion and tissue invasion*. European Cells and Materials, 2010. **20**: p. 282-294.
69. Richardson, J.T., D. Remue, and Y. Peng, *Properties of ceramic foam catalyst supports: pressure drop*. Applied Catalysis A: General 2000. **204**: p. 19-32.
70. Edouard, D., et al., *Pressure drop measurements and hydrodynamic model description of SiC foam composites decorated with SiC nanofiber*. Catalysis Today, 2009. **141**: p. 403-408.
71. Gancarczyk, A., et al., *Parametry morfologiczne pian stałych – metody i wyzwania*. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk, 2016. **20**: p. 63-75.
72. Hildebrand, T. and P. Ruegsegger, *A new method for the model-independent assessment of thickness in three-dimensional images*. Journal of Microscopy-Oxford, 1997. **185**(1): p. 67-75.

73. Gibson, L.J. and M. Ashby, F., *Cellular Solids: Structure and Properties*. 1987: Pergamon press.
74. Inayat, A., et al., *Development of a new pressure drop correlation for open-cell foams based completely on theoretical grounds: Taking into account strut shape and geometric tortuosity*. Chemical Engineering Journal, 2016. **287**: p. 704-719.
75. Bhattacharya, A., V.V. Calmidei, and R.L. Mahajan, *Thermophysical properties of high porosity metal foams*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002. **45**(5): p. 1017-1031.
76. Moreira, E.A. and J.R. Coury, *The influence of structural parameters on the permeability of ceramic foams*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2004. **21**(1): p. 23-33.
77. Bonnet, J.P., F. Topin, and L. Tadrist, *Flow laws in metal foams: Compressibility and pore size effects*. Transport in Porous Media, 2008. **73**(2): p. 233-254.
78. Khayargoli, P., et al. *The impact of microstructure on the permeability of metal foams*. in *CSME 2004 Forum*. 2004. Ontario, London.
79. Ribeiro, G.B., J.R. Barbosa, and A.T. Prata, *Performance of microchannel condensers with metal foams on the air-side: Application in small-scale refrigeration systems*. Applied Thermal Engineering, 2012. **36**: p. 152-160.
80. Topin, F., et al., *Experimental Analysis of Multiphase Flow in Metallic foam: Flow Laws, Heat Transfer and Convective Boiling*. Advanced Engineering Materials, 2006. **8**(9): p. 890-899.
81. Diani, A., et al. *Experimental Measurements of Air Forced Convection Through Copper Foams*. in *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*. 2012. West Lafayette, Indiana, USA.
82. Dukhan, N., R. Picón-Feliciano, and A.R. Álvarez-Hernández, *Air Flow Through Compressed and Uncompressed Aluminum Foam: Measurements and Correlations*. Journal of Fluids Engineering, 2006. **128**: p. 1004-1012.
83. Leong, K.C. and L.W. Jin, *Effect of oscillatory frequency on heat transfer in metal foam heat sinks of various pore densities*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006. **49**(3-4): p. 671-681.
84. Mancin, S., et al., *Air forced convection through metal foams: Experimental results and modelling*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013. **62**: p. 112-123.
85. Lu, W., C.Y. Zhao, and S.A. Tassou, *Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part I: Metal-foam filled pipes*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006. **49**(15-16): p. 2751-2761.
86. Dukhan, N. and K. Patel, *Effect of sample's length on flow properties of open-cell metal foam and pressure-drop correlations*. Journal of Porous Materials, 2011. **18**(6): p. 655-665.
87. Fourie, J.G. and J.P. Du Plessis, *Pressure drop modelling in cellular metallic foams*. Chemical Engineering Science, 2002. **57**(14): p. 2781-2789.
88. Du Plessis, P., et al., *Pressure drop prediction for flow through high porosity metallic foams*. Chemical Engineering Science, 1994. **49**: p. 3545-3553.
89. Kamath, P.M., C. Balaji, and S.P. Venkateshan, *Experimental investigation of flow assisted mixed convection in high porosity foams in vertical channels*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011. **54**(25-26): p. 5231-5241.
90. Hoerner, S.F., *Fluid-Dynamic Drag: Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance*. 1965, Brick Town, USA: Hoerner Fluid Dynamics.
91. Heddleson, C.F., D.L. Brown, and R.T. Cliffe, *Summary of Drag Coefficients of Various Shaped Cylinders*. 1957, Cincinnati, USA: General Electric: Aircraft Nuclear Propulsion Dept., Atomic Products Division.,
92. Ergun, S., *Fluid flow through packed columns*. Chemical Engineering Progress, 1952. **48**(2): p. 89-94.
93. Kumar, P. and F. Topin, *Influence of Morphology on Flow Law Characteristics in Open-Cell Foams: An Overview of Usual Approaches and Correlations*. Journal of Fluids Engineering, 2017. **139**(7): p. 071301.
94. Liu, J.F., et al., *Measurement and correlation of friction characteristic of flow through foam matrixes*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2006. **30**: p. 329-336.

95. Mao, S., et al., *Correlation studies of hydrodynamics and heat transfer in metal foam heat exchangers*. Applied Thermal Engineering, 2014. **71**(1): p. 104-118.
96. Tadrist, L., et al., *About the use of fibrous materials in compact heat exchangers*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004. **28**(2-3): p. 193-199.
97. Inayat, A., et al., *Periodic open-cell foams: Pressure drop measurements and modeling of an ideal tetrakaidecahedra packing*. Chemical Engineering Science, 2011. **66**(12): p. 2758-2763.
98. Innocentini, M.D.M., et al., *Prediction of ceramic foams permeability using Ergun's equation*. Materials Research, 1999. **2**(4): p. 283-289.
99. Mancin, S., et al., *Pressure drop during air flow in aluminum foams*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010. **53**(15-16): p. 3121-3130.
100. Paek, J.W., et al., *Effective thermal conductivity and permeability of aluminum foam materials*. International Journal of Thermophysics, 2000. **21**(2): p. 453-464.
101. Beavers, G.S. and E.M. Sparrow, *Non-Darcy Flow Through Fibrous Porous Media*. Journal of Applied Mechanics, 1969. **36**(4): p. 711.
102. Almedeij, J., *Drag coefficient of flow around a sphere: Matching asymptotically the wide trend*. Powder Technology, 2008. **186**: p. 218-223.
103. 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.
104. 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.
105. Iwaniszyn, M., et al., *Short-Channel Structured Reactor as a Catalytic Afterburner*. Topics in Catalysis, 2013. **56**: p. 273-278.
106. Shah, R.K. and A.L. London, *Laminar Flow Forced Convection in Ducts: a source book for compact heat exchanger analytical data*. 1978, New York: Academic Press.
107. Kołodziej, A., *Strukturalne wypełnienia krótkokanałowe w reaktorach katalitycznych o intensywnym transporcie masy*. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk, 2009. **12**.
108. 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.
109. Groppi, G., L. Giani, and E. Tronconi, *Generalized correlation for gas/solid mass-transfer coefficients in metallic and ceramic foams*. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2007. **46**(12): p. 3955-3958.
110. Hsieh, W.H., et al., *Experimental investigation of heat-transfer characteristics of aluminum-foam heat sinks*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004. **47**(23): p. 5149-5157.
111. Phanikumar, M.S. and R.L. Mahajan, *Non-Darcy natural convection in high porosity metal foams*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002. **45**: p. 3781-3793.
112. Younis, L.B. and R. Viskanta, *Experimental determination of the volumetric heat transfer coefficient between stream of air and ceramic foam*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993. **36**(6): p. 1425-1434.
113. Shih, W.H., W.C. Chiu, and W.H. Hsieh, *Height Effect on Heat-Transfer Characteristics of Aluminum-Foam Heat Sinks*. Journal of Heat Transfer, 2006. **128**(6): p. 530.
114. Huu, T.T., et al., *Towards a more realistic modeling of solid foam: Use of the pentagonal dodecahedron geometry*. Chemical Engineering Science, 2009. **64**(24): p. 5131-5142.
115. Wu, Z., et al., *Numerical simulation of convective heat transfer between air flow and ceramic foams to optimise volumetric solar air receiver performances*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011. **54**(7-8): p. 1527-1537.
116. Bai, M. and J.N. Chung, *Analytical and numerical prediction of heat transfer and pressure drop in open-cell metal foams*. International Journal of Thermal Sciences, 2011. **50**(6): p. 869-880.
117. Kim, S.Y., B.H. Kang, and J.-H. Kim, *Forced convection from aluminum foam materials in an asymmetrically heated channel*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001. **44**(7): p. 1451-1454.

118. Ranut, P., E. Nobile, and L. Mancini, *High resolution microtomography-based CFD simulation of flow and heat transfer in aluminum metal foams*. Applied Thermal Engineering, 2014. **69**(1-2): p. 230-240.
119. Marafie, A. and K. Vafai, *Analysis of non-Darcian effects on temperature differentials in porous media*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001. **44**(23): p. 4401-4411.
120. Zhao, C.Y., W. Lu, and S.A. Tassou, *Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part II: Tube heat exchangers*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006. **49**(15-16): p. 2762-2770.
121. Lee, D.-Y. and K. Vafai, *Analytical characterization and conceptual assessment of solid and fluid temperature differentials in porous media*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999. **42**(3): p. 423-435.
122. Calmidi, V.V. and R.L. Mahajan, *Forced Convection in High Porosity Metal Foams*. Journal of Heat Transfer, 2000. **122**(3): p. 557.
123. Noh, J.-S., K.B.k. Lee, and C.G. Lee, *Pressure loss and forced convective heat transfer in an annulus filled with aluminum foam*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2006. **33**(4): p. 434-444.
124. Dai, Z., et al., *A Comparison of Metal-Foam Heat Exchangers to Compact Multilouver Designs for Air-Side Heat Transfer Applications*. Heat Transfer Engineering, 2012. **33**(1): p. 21-30.
125. Jeng, T.-M. and S.-C. Tzeng, *Numerical study of confined slot jet impinging on porous metallic foam heat sink*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005. **48**(23-24): p. 4685-4694.
126. Das, S., N.G. Deen, and J.A.M. Kuipers, *Direct numerical simulation for flow and heat transfer through random open-cell solid foams: Development of an IBM based CFD model*. Catalysis Today, 2016. **273**: p. 140-150.
127. Leong, K.C. and L.W. Jin, *An experimental study of heat transfer in oscillating flow through a channel filled with an aluminum foam*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005. **48**(2): p. 243-253.
128. Mancin, S., et al., *Heat Transfer Performance of Aluminium Foams*. Journal of Heat Transfer, 2011. **133**: p. 060904-1-060904-9.
129. Dukhan, N., et al., *One-dimensional heat transfer analysis in open-cell 10-ppi metal foam*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005. **48**(25-26): p. 5112-5120.
130. Žkauskas, A., *Heat Transfer from Tubes in Crossflow*. 1987. **18**: p. 87-159.
131. Ambrosetti, M., et al., *Analytical Geometrical Model of Open Cell Foams with Detailed Description of Strut-Node Intersection*. Chemie Ingenieur Technik, 2017. **89**(7): p. 915-925.
132. Churchill, S.W., *Critique of the Classical Algebraic Analogies between Heat, Mass, and Momentum Transfer*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1997. **36**(9): p. 3866-3878.
133. Lévêque, A., *Les lois de la transmission de chaleur par convection*. Annales des Mines, 1928. **13**: p. 201-299, 503-362, 381-415.
134. von Karman, T., *The analogy between fluid friction and heat transfer*. Trans. ASME, 1939. **61**: p. 705-710.
135. Colburn, A.P., *A method of correlating forced convection heat transfer data and a comparison with fluid friction*. Trans. AIChE, 1933. **29**: p. 174-210.
136. Schlünder, E.U., *Die wissenschaftliche Theorie der Wärmeübertragung. Geschichtliche Entwicklung und heutiger Stand*. Chemie Ingenieur Technik, 1970. **42**(14): p. 905-910.
137. Schlünder, E.U., *Analogy between heat and momentum transfer*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 1998. **37**(1): p. 103-107.
138. 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.
139. Martin, H. *The generalized Lévêque equation and its use to predict heat or mass transfer from fluid friction. in 20th National Heat Transfer Conference, UIT*. 2002. Maratea, Italy.
140. Dietrich, B., *Heat transfer coefficients for solid ceramic sponges – Experimental results and correlation*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013. **61**: p. 627-637.

141. Brauer, H., *Impuls-, Stoff- und Wärmetransport durch die Grenzfläche kugelförmiger Partikeln*. Chem. Ing. Tech., 1973. **45**: p. 1099-1103.
142. Sucker, D. and H. Brauer, *Fluiddynamik bei quer angeströmten Zylindern*. Wärme- und Stoffübertragung, 1975. **8**: p. 149-158.
143. Hawthorne, R.D., *Afterburner catalysis – effects of heat and mass transfer between gas and catalyst surface*. AIChE Symposium Series, 1974. **70**: p. 428-438.
144. Leong, K.C. and L.W. Jin, *Characteristics of oscillating flow through a channel filled with open-cell metal foam*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2006. **27**(1): p. 144-153.
145. Dukhan, N., *Correlations for the pressure drop for flow through metal foam*. Experiments in Fluids, 2006. **41**(4): p. 665-672.
146. Dukhan, N. and M. Ali, *On various flow regimes in open-cell metal foam*. International Journal of Transport Phenomena, 2012. **13**(2): p. 85-97.
147. T'Joen, C., et al., *Thermo-hydraulic study of a single row heat exchanger consisting of metal foam covered round tubes*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010. **53**: p. 3262–3274.
148. Kim, S.Y., J.W. Paek, and B.H. Kang, *Flow and heat transfer correlations for porous fin in plate-fin heat exchanger*. Journal of Heat Transfer, 2000. **122**(3): p. 572-578.
149. Boomsma, K. and D. Poulikakos, *The effects of compression and pore size variations on the liquid flow characteristics in metal foams*. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme, 2002. **124**(1): p. 263-272.
150. Boomsma, K., D. Poulikakos, and F. Zwick, *Metal foams as compact high performance heat exchangers*. Mechanics of Materials, 2003. **35**(12): p. 1161-1176.
151. De Schampheleire, S., et al., *How to Study Thermal Applications of Open-Cell Metal Foam: Experiments and Computational Fluid Dynamics*. Materials, 2016. **9**(2): p. 94.
152. Miwa, S. and S.T. Revankar, *Hydrodynamic Characterization of Nickel Metal Foam, Part 2: Effects of Pore Structure and Permeability*. Transport in Porous Media, 2011. **89**(3): p. 323-336.
153. Montillet, A., J. Comiti, and J. Legrand, *Determination of Structural Parameters of Metallic Foams from Permeametry Measurements*. Journal of Materials Science, 1992. **27**(16): p. 4460-4464.
154. Montillet, A., J. Comiti, and J. Legrand, *Axial-Dispersion in Liquid Flow-through Packed Reticulated Metallic Foams and Fixed-Beds of Different Structures*. Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal, 1993. **52**(2): p. 63-71.
155. S., L. and C. F., *Flow-through and flow-by porous electrodes of nickel foam. I. Material characterization*. Journal of Applied Electrochemistry, 1989. **19**(1): p. 43-50.
156. Gerbaux, O., et al., *Experimental characterization of single and two-phase flow through nickel foams*. Chemical Engineering Science, 2009. **64**(19): p. 4186-4195.
157. Huang, X., G. Franchi, and F. Cai, *Characterization of porous bi-modal Ni structures*. Journal of Porous Materials, 2009. **16**(2): p. 165-173.
158. Innocentini, M.D.M., et al., *Influence of sample thickness and measurement set-up on the experimental evaluation of permeability of metallic foams*. Journal of Porous Materials, 2010. **17**(4): p. 491-499.
159. Vafai, K. and C.L. Tien, *Boundary and inertia effects on convective mass transfer in porous media*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1982. **25**(8): p. 1183-1190.

Praca wykonana została w ramach projektu badawczego OPUS 2 nr 2011/03/B/ST8/05455 pt. „Piany stałe jako efektywny nośnik katalizatora – badania podstawowe transportu pędu, ciepła i masy” finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki. Zgodnie z wymogami przyjęcia projektu badawczego, część wyników pracy została przedstawiona w poniższych publikacjach oraz zaprezentowana na niżej wymienionych konferencjach naukowych

#### Publikacje

1. A. Gancarczyk, K. Sintera, M. Iwaniszyn, **M. Piątek**, W. Macek, P.J. Jodłowski, S. Wroński, M. Sitarz, J. Łojewska, A. Kołodziej, 2019, *Metal Foams as Novel Catalyst Support in Environmental Processes*. Catalysts, 9, 587.
2. A. Gancarczyk, M. Iwaniszyn, **M. Piątek**, K. Sintera, M. Korpyś, P. J. Jodłowski, J. Łojewska, A. Kołodziej, 2018, *Interfacial Heat and Momentum Transfer Relation for Porous Media*, Int. J. Therm. Sci., 132, 42–51; DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.04.028.
3. A. Gancarczyk, M. Iwaniszyn, **M. Piątek**, M. Korpyś, K. Sintera, P. J. Jodłowski, J. Łojewska, A. Kołodziej, 2018, *Catalytic Combustion of Low-Concentration Methane on Structured Catalyst Supports*, Ind. Eng. Chem. Res., 57, 10281-10291; DOI: 10.1021/acs.iecr.8b01987.
4. **M. Piątek**, A. Gancarczyk, M. Iwaniszyn, P.J. Jodłowski, J. Łojewska, A. Kołodziej, 2017, *Gas-Phase Flow Resistance of Metal Foams: Experiments and Modeling*, AIChE J., 63, 1799 – 1803.
5. A. Gancarczyk, **M. Piątek**, M. Iwaniszyn, P. J. Jodłowski, J. Łojewska, J. Kowalska, A. Kołodziej, 2017, *In Search of Governing Gas Flow Mechanism through Metal Solid Foams*, Catalysts, 7, 124; DOI: 10.3390/catal7040124.
6. A. Gancarczyk, K. Sintera, **M. Piątek**, M. Iwaniszyn, M. Korpyś, M. Jaroszyński, B. Janus, T. Kleszcz, A. Kołodziej, Liquid axial mixing in solid foams, 2017, Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk, 21, 81 – 97.
7. B. Leszczyński, A. Gancarczyk, A. Wróbel, **M. Piątek**, J. Łojewska, A. Kołodziej, R. Pędrys, 2016, Global and Local Thresholding Methods Applied to X-ray Microtomographic Analysis of Metallic Foams, Journal of Nondestructive Evaluation, 35:35; DOI 10.1007/s10921-016-0352-x.
8. A. Gancarczyk, M. Iwaniszyn, **M. Piątek**, B. Leszczyński, G. Ziółkowski, D. Piech, B. Janus, T. Kleszcz, A. Kołodziej, 2016, Parametry morfologiczne pian stałych – metody i wyzwania. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk, 20, 63 – 75.
9. Gancarczyk, **M. Piątek**, M. Iwaniszyn, J. Kryca, B. Leszczyński, J. Łojewska, A. Kołodziej, 2015, *Struktura, wytwarzanie i zastosowanie pian stałych*, Przem. Chem., 10, 1821-1824.
10. R. Dyga, S. Witczak, A. Gancarczyk, **M. Piątek**, M. Jaroszyński, J. Łojewska, A. Kołodziej, 2015, Piany metalowe jako alternatywny nośnik katalizatora w silnie egzotermicznych procesach utleniania katalitycznego. Przem. Chem., 10, 1825-1827.
11. **M. Piątek**, M. Iwaniszyn, M. Jaroszyński, B. Janus, T. Kleszcz, A. Gancarczyk, 2015, Wpływ struktury morfologicznej pian na transport ciepła. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk, 19, 75 – 84.
12. A. Gancarczyk, **M. Piątek**, M. Jaroszyński, 2013, Zawieszenie cieczone dla dwufazowego przepływu przez złożę pian stałych, Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk, 17, 117 – 125.
13. **M. Piątek**, M. Iwaniszyn, A. Gancarczyk, B. Janus, T. Kleszcz, J. Kryca, F. Owczarek, J. Łojewska, A. Kołodziej, 2013, Opory przepływu i zjawiska transportu

dla piany metalowej: wyniki badań eksperymentalnych, Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk, 17, 93 – 103.

#### Konferencje

1. Gancarczyk, **M. Piątek**, 2014, *Solid foams: novel catalyst support in trickle bed reactors*, XXI International Conference on Chemical Reactors CHEMREACTOR-21, Delft, Holandia, plakat.
2. **M. Piątek**, M. Iwaniszyn, A. Gancarczyk, S. Kolaczkowski, A. Kołodziej, 2014, *Flow resistance, transport and morphology of metallic foams applied as catalyst carrier*, XXI International Conference on Chemical Reactors CHEMREACTOR-21, Delft, Holandia, plakat.
3. A. Gancarczyk, B. Leszczyński, A. Wróbel, K. Maresz, **M. Piątek**, M. Iwaniszyn, J. Kryca, A. Kołodziej, 2015, *Specific surface area of solid foams: morphology studied by various methods and incompatible geometrical models*, 9th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams Metfoam 2015, Barcelona, Hiszpania, wystąpienie ustne A. Gancarczyk.
4. **M. Piątek**, A. Gancarczyk, M. Iwaniszyn, J. Kryca, A. Wróbel, B. Leszczyński, J. Łojewska, A. Kołodziej, 2015, *Impact of the foam structure on heat transfer: experiments and theoretical analysis*, 9th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams Metfoam 2015, Barcelona, Hiszpania, plakat.
5. A. Gancarczyk, **M. Piątek**, M. Iwaniszyn, J. Kryca, J. Łojewska, A. Kołodziej, 2015, *Liquid flow through metallic foams: flow resistance and axial dispersion*, 9th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams Metfoam 2015, Barcelona, Hiszpania, plakat.
6. **M. Piątek**, A. Gancarczyk, M. Iwaniszyn, J. Kryca, B. Leszczyński, R. Pędrys, J. Łojewska, A. Kołodziej, 2015, *Aluminium open-cellular foams study: Influence of the morphological parameters on transport phenomena*, 10th International Congress on Catalysis and Automotive Pollution Control CAPOC10, Bruksela, Belgia, pl
7. A. Gancarczyk, **M. Piątek**, M. Iwaniszyn, Ł. Mokrzycki, W. Rojek, T. Machej, J. Łojewska, A. Kołodziej, 2016, *Single-phase fluid flow through the solid foams - hydrodynamics and catalytic reaction*, 5th International Conference on Structured Catalysts and Reactors ICOSCAR-5, San Sebastian, Hiszpania, wystąpienie ustne A. Gancarczyk.
8. **M. Piątek**, A. Gancarczyk, M. Iwaniszyn, J. Kryca, B. Leszczyński, A. Wróbel, J. Łojewska, A. Kołodziej, *Flow resistance and heat transfer study for Aluminium foams: experimental and modeling*, , 5th International Conference on Structured Catalysts and Reactors ICOSCAR-5, San Sebastian, Hiszpania, plakat.
9. A. Gancarczyk, **M. Piątek**, M. Iwaniszyn, Ł. Mokrzycki, J. Łojewska, A. Kołodziej, 2016, *Piany stałe jako potencjalne strukturalne nośniki katalizatora*, XXII Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Spała, Polska, wystąpienie ustne A. Gancarczyk.



## Oznaczenia

$a, b, c$	– parametry geometryczne, m geometric parameters
$A_1, A_2, C_1, C_2$	– stałe w równaniach, - constants
$A$	– pole powierzchni, $m^2$ surface area
$A_c$	– pole przekroju poprzecznego przepływu, $m^2$ cross-flow area
$C_D$	– współczynnik oporu czołowego drag coefficient
$C_F$	– współczynnik oporu lepkiego, - viscous coefficient
$c_p$	– ciepło właściwe gazu, $J\ kg^{-1}K^{-1}$ gas specific heat
$C_{Re}, C_{geo}$	– parametry korekcyjne (definicja rów. (107) i (108)) correction parameters (eq. (107), (108))
$D$	– średnica (nie określona), m diameter (not specified)
$D_A$	– współczynnik dyfuzji, $m^2s^{-1}$ diffusivity
$Da$	– liczba Darcy'ego, $= KH^{-2}$ , - Darcy number
$d_c$	– średnica komórki, m cell diameter
$d_e$	– średnica zastępcza dla metody optycznej (rów. (21)), m equivalent diameter in optical method
$D_h$	– średnica hydrauliczna, m hydraulic diameter
$D_e$	– średnica zastępcza, m equivalent diameter
$D_p$	– średnica zastępcza (rów. (34) i (35)), m equivalent diameter

$d_p$	– średnica pora, m pore diameter
$d_s$	– średnica mostka, m strut diameter
$d_w$	– średnica okna, m window diameter
$d_z$	– średnica kuli (rów. (13)), m sphere diameter
$e_{y,śr}$	– błąd średni, % average relative error,
$f$	– współczynnik oporów hydraulicznych Fanninga, - Fanning friction factor
$f_D$	– współczynnik oporów Darcy’ego, - Darcy coefficient
$F_D$	– siła oporu czołowego, - drag force
$F_L$	– geometryczny współczynnik korekcyjny (definicja rów. (66)), - geometric correction coefficient (eq. (66))
$F_{L,A}$	– współczynnik „anizotropii” (definicja rów. (67)), - „anisotropy” coefficient (eq. (67))
$H$	– wysokość złoża, m bed heigh
$Hg$	– liczba Hagena, $= \Delta PH^{-1}D^3\rho\eta^{-2}$ , - Hagen number
$j$	– czynnik wnikania ciepła lub masy Colburna, $j_H = NuRe^{-1}Pr^{-1/3}$ , $j_D = ShRe^{-1}Pr^{-1/3}$ , - Colburn factor
$K$	– przepuszczalność, $m^2$ Permeability
$k_c$	– współczynnik wnikania masy, $m\ s^{-1}$ mass transfer coefficient
$L$	– długość, m length
$L^+$	– bezwymiarowa długość kanału (rów. (43)), - dimensionless channel length

$l_s$	– długość walca, m cylinder length
$m$	– masa, kg mass
$Nu$	– liczba Nusselta, $= \alpha D \lambda^{-1}$ , - Nusselt number
$P$	– pole powierzchni porów w metodzie optycznej (równ. (2)), $m^2$ pores area in optical method
$\Delta P$	– spadek ciśnienia, Pa pressure drop
$Pr$	– liczba Prandtla, $= c_p \eta \lambda^{-1}$ , - Prandtl number
$Q_{eff}$	– ciepło efektywnie wydzielone, J heat generated effective
$Re$	– liczba Reynoldsa, $= w_0 D \rho \varepsilon^{-1} \eta^{-1}$ , - Reynolds number
$Sc$	– liczba Schmidta, $= \eta \rho^{-1} D_A^{-1}$ , - Schmidt number
$Sh$	– liczba Sherwooda, $= k_c D D_A^{-1}$ , - Sherwood numer
$St_H$	– liczba Stanton dla transportu ciepła, - Stanton number for heat transfer
$St_M$	– liczba Stanton dla transportu masy, - Stanton number for mass transfer
$S_v$	– powierzchnia geometryczna, $m^2 m^{-3}$ specific surface area
$T$	– temperatura, K, °C temperature
$U$	– napięcie elektryczne, V electric voltage
$\dot{V}$	– objętościowe natężenie przepływu, $m^3 s^{-1}$ volumetric flow rate
$V_c$	– objętość komórek, $m^3$ cells volume

$V_o$	– objętość całkowita, $m^3$ total volume
$V_s$	– objętość szkieletu piany, $m^3$ foam volume
$V_w$	– objętość okien, $m^3$ windows volume
$w_0$	– prędkość średnia płynu (na przekrój pustego reaktora), $m\ s^{-1}$ superficial fluid velocity
$x_f$	– udział oporów lepkich, - viscous friction share

#### Litery greckie

$\alpha$	– współczynnik wnikania ciepła, $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ heat transfer coefficient
$\beta$	– współczynnik bezwładności, - inertial coefficient
$\varepsilon$	– porowatość otwarta, – open porosity
$\varepsilon_t$	– porowatość całkowita, – total porosity
$\varepsilon_s$	– porowatość szkieletu (mostków), - skeleton (struts) porosity
$\eta$	– dynamiczny współczynnik lepkości, Pa s dynamic viscosity
$\phi$	– stała geometryczna, - geometric constant
$\lambda$	– współczynnik przewodzenia ciepła, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ thermal conductivity of fluid
$\rho$	– gęstość, $kg\ m^{-3}$ density
$\rho_e$	– oporność elektryczna właściwa, $\Omega\ m$ resistivity
$\sigma$	– odchylenie standardowe, - standard deviation

$\tau$  – geometryczny współczynnik labiryntowości, -  
geometric tortuosity coefficient

#### Indeksy dolne

$D$  – odnosi się do średnicy (nie określona)  
refers to the diameter (not specified)

$d_c$  – odnosi się do średnicy komórki  
refers to the cell diameter

$D_e$  – odnosi się do średnicy zastępczej  
refers to the equivalent diameter

$D_h$  – odnosi się do średnicy hydraulicznej  
refers to the hydraulic diameter

$d_p$  – odnosi się do średnicy pora  
refers to the pore diameter

$D_p$  – odnosi się do średnicy zastępczej (rów. (34) i (35))  
refers to the equivalent diameter (eq. (34) and (35))

$d_s$  – odnosi się do średnicy mostka  
refers to the strut diameter

$d_w$  – odnosi się do średnicy okna  
window diameter

$d_z$  – odnosi się do średnicy kuli  
refers to the sphere diameter

$eksp$  – wartość eksperymentalna  
experimental

$K$  – odnosi się do przepuszczalności  
refers to the permeability

$obl$  – obliczone z równania  
calculated

Załącznik A.1 Morfologia pian aluminiowych – dane literaturowe

Autorzy	Producent	PPI	$S_v$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\epsilon$	$d_p$ x10 <sup>-3</sup> [m]	$d_c$ x10 <sup>-3</sup> [m]	$d_w$ x10 <sup>-3</sup> [m]	$d_s$ x10 <sup>-3</sup> [m]
[144]		10		0,91 <sup>1</sup>				0,427 <sup>2</sup>
		20		0,9 <sup>1</sup>				0,221 <sup>2</sup>
		40		0,9 <sup>1</sup>				0,112 <sup>2</sup>
[94]	ERG	5		0,914 <sup>3</sup>		1,208		
		10		0,918 <sup>3</sup>		1,190		
		20		0,87 <sup>3</sup>		0,827		
		40		0,935 <sup>3</sup>		0,685		
[89]	m-pore	10		0,95 <sup>1</sup>		4,952		0,445 <sup>2</sup>
		20		0,9 <sup>1</sup>		3,416		0,451 <sup>2</sup>
		30		0,92 <sup>1</sup>		2,324		0,216 <sup>2</sup>
		45		0,9 <sup>1</sup>		1,654		0,184 <sup>2</sup>
[86]	ERG	10		0,929 <sup>1</sup>		4,23		
		20		0,925 <sup>1</sup>		2,12		
		40		0,935 <sup>1</sup>		1,06		
[145]	ERG	10	792-809	0,915-0,919				0,406
		20	1240-1265	0,919-0,924				0,203
		40	1800	0,923				0,102

Cd. załącznik A.1 Morfologia pian aluminiowych – dane literaturowe

Autorzy	Producent	PPI	$S_v$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\epsilon$	$d_p$ x10 <sup>-3</sup> [m]	$d_c$ x10 <sup>-3</sup> [m]	$d_w$ x10 <sup>-3</sup> [m]	$d_s$ x10 <sup>-3</sup> [m]
[146]	ERG	10		0,89		4,24	2.55	
		20		0,90		2,12	1.27	
[147]		10	410 <sup>4</sup>	0,932 <sup>4</sup>	4,00 <sup>4</sup>	5,28 <sup>4</sup>		0,46 <sup>4</sup>
		20	720 <sup>4</sup>	0,913 <sup>4</sup>	2,45 <sup>4</sup>	3,15 <sup>4</sup>		0,31 <sup>4</sup>
[84, 99]	ERG	5	339 <sup>3</sup>	0,921 <sup>3</sup>		5,08		0,540
		10	537 <sup>3</sup>	0,956 <sup>3</sup>		2,54		0,445
		20	1156 <sup>3</sup>	0,932 <sup>3</sup>		1,27		0,367
		40	1679 <sup>3</sup>	0,930 <sup>3</sup>		0,635		0,324
[128]	ERG	5	342 <sup>3</sup>	0,920 <sup>3</sup>		5,08		0,49
		10	736 <sup>3</sup>	0,926 <sup>3</sup>		2,54		0,553
		20	1169 <sup>3</sup>	0,930 <sup>3</sup>		1,27		0,315
		40	1721 <sup>3</sup>	0,926 <sup>3</sup>		0,635		0,282
[100]				0,89-0,96		0,65		
						1,25		
						2,5		
[148]]		10	790	0,92				
		20	1240-2020	0,89-0,96				
		40	2740	0,92				

Cd. załącznik A.1 Morfologia pian aluminiowych – dane literaturowe

Autorzy	Producent	PPI	$S_v$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\epsilon$	$d_p$ x10 <sup>-3</sup> [m]	$d_c$ x10 <sup>-3</sup> [m]	$d_w$ x10 <sup>-3</sup> [m]	$d_s$ x10 <sup>-3</sup> [m]
[27]	ERG	10		0,95 <sup>5</sup>		2,03		0,36
[123]		10		0,90				
[149, 150]	ERG	10	820 <sup>3</sup>	0,921 <sup>1</sup>			6,9 <sup>2</sup>	
		20	1700 <sup>3</sup>	0,92 <sup>1</sup>			3,6 <sup>2</sup>	
		40	2700 <sup>3</sup>	0,928 <sup>1</sup>			2,3 <sup>2</sup>	
[144]		10		0,91 <sup>1</sup>			0,427 <sup>2</sup>	
		20		0,9 <sup>1</sup>			0,221 <sup>2</sup>	
		40		0,9 <sup>1</sup>			0,112 <sup>2</sup>	
[111]		5		0,899-0,93		4,221-4,347		0,535-0,56
		10		0,9085-0,9386		3,422-3,413		0,4144-0,4428
		20		0,92-0,9353		2,723-2,784		0,3321-0,35
		40		0,9091-0,9586		1,727-1,935		0,2094-0,25
[151]		10	380-462 <sup>4</sup>	0,932-0,951 <sup>4</sup>		4,22-6,42 <sup>4</sup>	2,56-2,61 <sup>4</sup>	
		20	580-860 <sup>4</sup>	0,913-0,967 <sup>4</sup>		2,52-4,15 <sup>4</sup>	1,53-1,69 <sup>4</sup>	
[75]	ERG	5		0,905-0,9726		3,8-4,0		0,47-0,55
		10		0,8991-0,949		2,96-3,28		0,37-0,45
		20		0,9005-0,978		2,58-2,9		0,3-0,38
		40		0,9132-0,972		1,8-2,02		0,2-0,25



Cd. załącznik A.1 Morfologia pian aluminiowych – dane literaturowe

Autorzy	Producent	PPI	$S_v$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\epsilon$	$d_p$ x10 <sup>-3</sup> [m]	$d_c$ x10 <sup>-3</sup> [m]	$d_w$ x10 <sup>-3</sup> [m]	$d_s$ x10 <sup>-3</sup> [m]
[87]	ERG	10		0,936		5,2		0,4732
		20		0,931		4,5		0,4271
		30		0,915		2,7		0,2881

<sup>1</sup>-wykorzystanie gęstości pozornej

<sup>2</sup>-wyznaczona przy użyciu metod optycznych

<sup>3</sup>-dane producenta

<sup>4</sup>-wyznaczone przy użyciu mikrotomografii

<sup>5</sup>-wyznaczona przy użyciu metody hydrostatycznej

Załącznik A.2 Morfologia pian niklowych – dane literaturowe

Autorzy	Producent	PPI	Sv [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	ε	d <sub>p</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]	d <sub>c</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]	d <sub>w</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]	d <sub>s</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]
[77]	Fibernide	100			0,5			
		10	680 <sup>3</sup>	0,92	4,43 <sup>3</sup>			
[66, 152]	INCO	60		0,903		0,755 <sup>2</sup>	0,427 <sup>2</sup>	0,148 <sup>2</sup>
				0,829		0,512 <sup>2</sup>	0,172 <sup>2</sup>	0,098 <sup>2</sup>
				0,833		0,571 <sup>2</sup>	0,182 <sup>2</sup>	0,107 <sup>2</sup>
		90		0,802		0,393 <sup>2</sup>	0,180 <sup>2</sup>	0,068 <sup>2</sup>
		110		0,870		0,389 <sup>2</sup>	0,144 <sup>2</sup>	0,061 <sup>2</sup>
				0,878		0,439 <sup>2</sup>	0,181 <sup>2</sup>	0,061 <sup>2</sup>
				0,896		0,290 <sup>2</sup>	0,112 <sup>2</sup>	0,043 <sup>2</sup>
[153]		100	440 000 <sup>5</sup>	0,973	0,33			
		60	252 000 <sup>5</sup>	0,975	0,62			
		45	186 000 <sup>5</sup>	0,978	0,96			
[154]	Sorapec	45	186 000	0,978	0,96			
		60	255 000	0,975	0,61			
[88]		45		0,978		0,564		0,054
		60		0,975		0,423		0,054
		100		0,973		0,254		0,047

Cd. załącznik A.2 Morfologia pian niklowych – dane literaturowe

Autorzy	Producent	PPI	Sv [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	ε	d <sub>p</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]	d <sub>c</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]	d <sub>w</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]	d <sub>s</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]
[155]	Sorapec	45	19 000 <sup>4</sup>	0,978	0,44 <sup>2</sup>			0,11
		60	30 000 <sup>4</sup>	0,975	0,3 <sup>2</sup>			0,075
		100	41 000 <sup>4</sup>	0,973	0,2 <sup>2</sup>			0,055
[156]	INCO			0,964 <sup>1</sup>	0,5			
				0,97 <sup>1</sup>	0,5			
[157]	INCO			0,97	0,4-0,7			
[80]		100			0,5			
		10	680		4,43			
[38]	NRC-IMI	60		0,90 <sup>1</sup>		0,273-0,31 <sup>2</sup>	0,054-0,068 <sup>2</sup>	
		70		0,91-0,92 <sup>1</sup>		0,461-0,512 <sup>2</sup>	0,055-0,057 <sup>2</sup>	
[67]				0,92	0,6 <sup>2</sup>			
[78]	NRC-IMI	60			0,69			
		70			0,36			

<sup>1</sup>-wykorzystanie gęstości pozornej

<sup>2</sup>-wyznaczona przy użyciu metod optycznych

<sup>3</sup>-wyznaczone przy użyciu mikrotomografii

<sup>4</sup>-wyznaczona przy użyciu metody BET

<sup>5</sup>-wyznaczona przy użyciu przepuszczalnościomierza

Załącznik A.3 Morfologia pian chromoniklowych – dane literaturowe

Autorzy	Producent	PPI	Sv [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	ε	d <sub>p</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]	d <sub>c</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]	d <sub>w</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]	d <sub>s</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]
[77, 80]	Recemat BV	47-53	5400 <sup>2008</sup> 5600 <sup>2006</sup>	0,9 <sup>2006</sup>	0,4			
		37-43	5303 <sup>4</sup>	0,87 <sup>4</sup>	0,569			
		27-33	3614 <sup>4</sup>	0,91 <sup>4</sup>	0,831			
		17-23	1658 <sup>4</sup>	0,88 <sup>4</sup>	1,84			
		11-16	1295 <sup>4</sup>	0,89 <sup>4</sup>	2,452			
[38]	Recemat BV	11-16		0,87-0,91 <sup>1</sup>		1,4 <sup>2</sup>		
		17-23		0,88-0,9 <sup>1</sup>		0,9 <sup>2</sup>		
		27-33		0,89-0,9 <sup>1</sup>		0,6 <sup>2</sup>		
		37-43		0,83-0,84 <sup>1</sup>		0,5 <sup>2</sup>		
		47-53		0,85-0,87 <sup>1</sup>		0,4 <sup>2</sup>		
[78]	Recemat BV	11-16	1000 <sup>3</sup>	0,9 <sup>1</sup>	1,4 <sup>3</sup>			
		17-23	1700 <sup>3</sup>	0,885 <sup>1</sup>	0,9 <sup>3</sup>			
		27-33	2500 <sup>3</sup>	0,9 <sup>1</sup>	0,6 <sup>3</sup>			
		37-43	3700 <sup>3</sup>	0,83 <sup>1</sup>	0,5 <sup>3</sup>			
		47-53	5600 <sup>3</sup>	0,86 <sup>1</sup>	0,4 <sup>3</sup>			

Cd. załącznik A.3 Morfologia pian chromoniklowych – dane literaturowe

Autorzy	Producent	PPI	Sv [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	ε	d <sub>p</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]	d <sub>c</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]	d <sub>w</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]	d <sub>s</sub> x10 <sup>-3</sup> [m]
[158]		11-16		0,93	1,4			
		17-23		0,917	0,9			
[67]				0,93	0,58 <sup>2</sup>			

<sup>1</sup>-wykorzystanie gęstości pozornej

<sup>2</sup>-wyznaczona przy użyciu metod optycznych

<sup>3</sup>-dane producenta

<sup>4</sup>-wyznaczone przy użyciu mikrotomografii

#### Załącznik A.4

Podstawowe parametry morfologiczne wyznaczone przy pomocy mikrotomografii komputerowej dla pian AI-10, AI-20, AI-40, NC 0610, NC 2733, NC 4753, Ni0610, Ni 2733, Ni 4753 z zastosowaniem procedury globalnego progowania.

Piana	$VOI$ [m <sup>3</sup> ]· 10 <sup>7</sup>	$S$ [m <sup>2</sup> ]· 10 <sup>3</sup>	$d_s$ [m]· 10 <sup>3</sup>	$d_p$ [m]· 10 <sup>3</sup>	$\varepsilon_c$	$S_v$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
AI-10	6,89	0,60	0,44	2,48	0,90	866,47
AI-20	7,63	0,76	0,39	2,02	0,91	1000,00
AI-40	7,74	0,94	0,34	1,70	0,90	1218,35
NC 0610	5,70	0,96	0,16	1,89	0,92	1675,44
NC 2733	4,40	1,73	0,12	0,68	0,88	3929,55
NC 4753	0,35	0,25	0,03	0,45	0,93	7000,00
Ni 0610	2,96	0,46	0,16	1,92	0,92	1537,16
Ni 2733	2,75	1,35	0,05	0,68	0,91	4920,00
Ni 4753	2,64	1,85	0,05	0,42	0,89	7003,79

#### Załącznik A.5

Podstawowe parametry morfologiczne wyznaczone przy pomocy mikrotomografii komputerowej dla pian AI-10, AI-20, AI-40, NC 2733 z zastosowaniem procedury lokalnego progowania.

Piana	$VOI$ [m <sup>3</sup> ]· 10 <sup>7</sup>	$S$ [m <sup>2</sup> ]· 10 <sup>3</sup>	$d_s$ [m]· 10 <sup>3</sup>	$d_p$ [m]· 10 <sup>3</sup>	$\varepsilon_c$	$S_v$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
AI-10	6,89	0,98	0,19	2,43	0,92	1413,64
AI-20	7,63	0,90	0,21	2,02	0,92	1175,62
AI-40	7,74	1,03	0,21	1,71	0,91	1335,92
NC 2733	4,40	1,76	0,09	0,63	0,89	3995,45

$VOI$  – ang. *volume-of-interest* – całkowita objętość próbki, która została wybrana do analizy,

$S$  – powierzchnia zbinaryzowanego obiektu wewnątrz  $VOI$ ,

$d_s$  – średnia średnica mostka,

$d_p$  – średnia średnica pora,

$\varepsilon_c$  – porowatość całkowita, procentowy udział objętości wszystkich porów w objętości  $VOI$ ,

$S_v$  – powierzchnia geometryczna pian stałych, liczona wg relacji  $S/VOI$ .

### Załącznik A.6

Podstawowe parametry morfologiczne wyznaczone przy pomocy mikroskopii optycznej dla pian badanych pian.

Piana	$d_c$ [m]· 10 <sup>3</sup>	$d_w$ [m]· 10 <sup>3</sup>	$d_s$ [m]· 10 <sup>3</sup>
Al-10	4,73	1,90	0,45
Al-20	4,04	1,74	0,37
Al-40	2,58	0,92	0,30
NC 0610	3,60	1,06	0,53
NC 2733	0,86	0,29	0,13
NC 4753	0,53	0,20	0,08
Ni 0610	4,73	1,57	0,47
Ni 2733	1,06	0,36	0,14
Ni 2733	0,69	0,24	0,12

### Załącznik A7.

Opory przepływu przez złożę pian stałych wyrażane współczynnikiem przepuszczalności.

Autor	Równanie opisujące spadek ciśnienia	Równanie pomocnicze	Badane piany
Kang i wsp. [100]	$\frac{\Delta P}{H} = \frac{\rho w_0}{\eta K} + 0,105 \frac{\rho w_0^2}{\sqrt{K}}$	$Re_k = \frac{\rho w_0 \sqrt{K}}{\eta}$	
Beavers i wsp. [101]	$\frac{\Delta P}{H} = \frac{\rho w_0}{\eta K} + 0,074 \frac{\rho w_0^2}{\sqrt{K}}$	$Re_k = \frac{\rho w_0 \sqrt{K}}{\eta}$	Ni
Hamaguchi i wsp., za [100]	$\frac{\Delta P}{H} = \frac{\rho w_0}{\eta K} + 0,076 \frac{\rho w_0^2}{\sqrt{K}}$	$Re_k = \frac{\rho w_0 \sqrt{K}}{\eta}$	Ni
Vafai i wsp. [159]	$\frac{\Delta P}{H} = \frac{\rho w_0}{\eta K} + 0,057 \frac{\rho w_0^2}{\sqrt{K}}$	$Re_k = \frac{\rho w_0 \sqrt{K}}{\eta}$	
Miwa i Revankar [66]	$\frac{\Delta P}{H} = \frac{\rho w_0}{\eta K}$	$Re_k = \frac{\rho w_0 \sqrt{K}}{\eta}$	Al, Cu