

INSTYTUT INŻYNIERII CHEMICZNEJ  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Rozprawa doktorska

**Transport pędu i ciepła w wypełnieniach  
reaktorów strukturalnych wykonywanych  
metodami addytywnymi**

mgr inż. Katarzyna Sintera

Promotor:

dr hab. inż. Anna Gancarczyk

Promotor pomocniczy:

dr inż. Marzena Iwaniszyn

**GLIWICE 2024**

*Pragnę serdecznie podziękować*

*Promotorkom, Pani dr hab. inż. Annie Gancarczyk oraz Pani dr inż. Marzenie Iwaniszyn za cierpliwość, zaangażowanie, cenne wskazówki i wszechstronną pomoc w trakcie tworzenia niniejszej rozprawy.*

*Pragnę również wyrazić wdzięczność*

*Panu prof. dr. hab. inż. Andrzejowi Kołodziejowi, za umożliwienie prowadzenia badań w ramach projektu OPUS II stanowiących przedmiot niniejszej pracy doktorskiej, wprowadzenie w tematykę wypełnień strukturalnych reaktorów katalitycznych, wsparcie i inspirację do podjęcia kolejnych badań*

*Panu dr. inż. Mateuszowi Korpysowi,  
Panu mgr. inż. Mikołajowi Suwakowi,  
Panu inż. Tadeuszowi Kleszczowi  
i Panu Jerzemu Snopkowskiemu za pomoc  
w realizacji badań i ofiarowany czas*

*oraz*

*Mojemu Mężowi, dr. inż. Piotrowi Sinderze  
za wsparcie i udzieloną pomoc.*

## Streszczenie

Przedmiotem badań była charakterystyka zjawisk przepływowych i transportowych krótkokanałowych wypełnień strukturalnych nowej generacji, tzw. struktur opływowych. Są to struktury krótkokanałowe (krótkie monolity) o zmodyfikowanym kształcie przekroju poprzecznego ścianek, uformowanym na wzór skrzydła samolotu. Zgodnie z przedstawioną w pracy analizą, kształt ten intensyfikuje transport ciepła, co wskazuje na celowość jego zastosowania w reaktorach katalitycznych. Jest to pierwsza praca przedstawiająca wyniki badań struktur krótkokanałowych o opływowych ściankach.

Badaniom poddano nośniki wydrukowane ze stali 316 metodą SLM (ang. Selective Laser Melting) o trzech różnych kształtach przekroju poprzecznego kanałów (kwadratowym, trójkątnym i sześciokątnym) o długościach 3, 6 i 12 mm. Z zastosowaniem tomografii komputerowej wyznaczono powierzchnię właściwą i porowatość struktur - parametry niezbędne do opisu zjawisk transportowych. Potwierdzono, że geometria struktur opływowych wytworzonych metodą SLM wykazuje dużą zgodność z wymiarami modelu CAD.

Przeprowadzono badania eksperymentalne oporów przepływu i współczynników wnikania ciepła, na ich podstawie określono wpływ długości i kształtu przekroju poprzecznego kanałów na wartości liczb Nusselta oraz współczynników oporu Fanninga, opracowano również własne korelacje opisujące otrzymane wyniki doświadczalne. Ponieważ, jak dotąd, brak jest prac na temat krótkokanałowych nośników katalitycznych o opływowym kształcie ścianek, otrzymane wyniki eksperymentalne porównano z wartościami obliczonymi na podstawie dostępnych w literaturze korelacji zaproponowanych dla struktur krótkokanałowych. Stwierdzono, że wartości współczynników oporu Fanninga oraz liczb Nusselta dla testowanych struktur są większe lub zbliżone do wartości literaturowych. Ponadto, transport ciepła i opory przepływu dla struktur opływowych są mniejsze porównaniu do złoża usypanego, a większe niż dla monolitu.

W celu lepszego poznania zjawisk transportowych i przepływowych występujących w badanych strukturach, przeprowadzono symulacje numeryczne z zastosowaniem komputerowej dynamiki płynów CFD (ang. Computational Fluid Dynamics), dla geometrii opływowych, jak i dla krótkokanałowych (o ściankach prostopadłościennych) o kwadratowym kształcie przekroju poprzecznego kanałów. Uzyskane wyniki numeryczne przedstawiono w postaci map temperatur płynącego płynu, linii prądu (linii stycznych w każdym punkcie do wektora lokalnej prędkości płynu  $\vec{w}$ ), lokalnych wartości liczb Nusselta

oraz w formie oporów przepływu płynu przez strukturę. Na ich podstawie stwierdzono, że opływowa geometria redukuje zawirowania i strefy stagnacji we wlotowej części kanałów, które występują w przypadku struktur krótkokanałowych i wpływają na obniżenie lokalnych wartości liczb Nusselta. Wiry wylotowe tworzą się dla obu geometrii, jednak w przypadku struktury opływowej intensyfikują one wymianę ciepła w wylotowej części kanału. Potwierdzono również, że struktura opływowa charakteryzuje się wyższymi uśrednionymi wartościami liczb Nusselta i większymi oporami przepływu w prawie całym testowanym zakresie liczb Reynoldsa w porównaniu do struktury krótkokanałowej.

## Abstract

The aim of the research was to characterize the flow and transport phenomena of new generation short-channel structured carriers, the so-called streamlined structures. These are short-channel structures (short monoliths) with a modified cross-section of the walls, shaped like an airplane wing. According to the analysis presented in this work, such a geometry intensifies heat transport, thus indicating purposefulness of its use in catalytic reactors. This is the first work presenting the research on short-channel structures with streamlined walls.

The tests were carried out on carriers manufactured from 316 steel using the SLM (Selective Laser Melting) additive method. Three different channel cross-sectional shapes (square, triangular and hexagonal) with lengths of 3, 6 and 12 mm were prepared. Using computed tomography, the specific surface area and porosity of the structures were determined - these are parameters necessary to describe transport phenomena. It was confirmed that the geometry of the streamlined structures manufactured using the SLM method is highly consistent with the dimensions of the CAD model.

Experimental tests were carried out to determine pressure drop and heat transfer coefficients; on this basis, influence was determined of the channel length and cross-sectional shape on the Nusselt number and Fanning friction factor. The correlations describing the experimental results were derived. Since, so far, there is no work on short-channel catalytic carriers with a streamlined wall shape, the obtained experimental results were compared with the correlations for short-channel structures available in the literature. It was found that the the Fanning friction factors and Nusselt numbers for the tested structures are higher or close to the literature ones. Moreover, heat transport and flow resistance for streamlined structures are lower compared to a packed bed, and higher than for a monolith.

In order to better understand the transport and flow phenomena occurring in the tested structures, numerical simulations were carried out using CFD (Computational Fluid Dynamics). The analysis was performed for streamlined and short-channel geometries (with cuboidal walls) for the square channel cross-section. The obtained numerical results are presented in the forms of temperature contours of the flowing fluid, streamlines (lines tangent to the fluid velocity vectors  $\vec{w}$ ), local Nusselt numbers and flow resistances. On these basis, it was found that the streamlined geometry reduces vortices and stagnation zones in the inlet part of the channels. These flow disturbances occur in short-channel structures

and reduce local Nusselt numbers in the inlet section. Outlet vortices are formed for both geometries, but for streamlined structures, they intensify heat transfer in the outlet channel section. It was confirmed that the streamlined structure is characterized by higher averaged values of Nusselt numbers and higher flow resistance in almost the entire tested range of Reynolds numbers compared to the short-channel structure.

## Spis treści

Wstęp.....	- 8 -
1. Aktualny stan wiedzy .....	- 10 -
1.1. Strukturalne reaktory katalityczne .....	- 10 -
1.2. Struktury krótkokanałowe - wypełnienia monolityczne o zintensyfikowanych właściwościach transportowych.....	- 12 -
1.3. Proponowana metoda modyfikacji geometrii wypełnień monolitycznych .....	- 16 -
1.4. Wstępna analiza CFD .....	- 19 -
2. Cel i zakres pracy .....	- 22 -
3. Metody badawcze.....	- 23 -
3.1 Testowane struktury .....	- 23 -
3.2. Badania cieplne i przepływowe .....	- 24 -
4. Opracowanie wyników i dyskusja.....	- 27 -
4.1. Charakterystyka struktur.....	- 27 -
4.2. Opory przepływu .....	- 33 -
4.3. Transport ciepła .....	- 51 -
5. Modelowanie CFD .....	- 67 -
5.1. Preprocessing .....	- 67 -
5.2. Processing .....	- 70 -
5.3. Postprocessing .....	- 71 -
6. Podsumowanie i wnioski.....	- 81 -
Spis symboli .....	- 85 -
Spis literatury .....	- 88 -
Spis ilustracji .....	- 96 -
Spis tabel .....	- 99 -
Dodatek 1 - procedura obliczeniowa współczynników wnikania ciepła dla struktur opływowych.....	- 100 -

## Wstęp

Rozwój przemysłu i cywilizacji powoduje wzrost ilości niebezpiecznych substancji w atmosferze, jak np.: metanu, tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ) i siarki ( $\text{SO}_x$ ), cząstek pyłów zawieszonych ( $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ), czy szerokiej grupy lotnych związków organicznych (LZO), jak acetonu, formaldehydu, etanolu, benzenu, toluenu, styrenu, ksyłenu, propanu czy naftalenu [1, 2]. Zanieczyszczenia te są rezultatem m. in. produkcji energii (spalania paliw kopalnych, utylizacji odpadów), działalności rolniczej (hodowli zwierząt oraz stosowania nawozów) oraz działalności przemysłowej (np. celulozowo-papierniczej, chemicznej, spożywczej, rafineryjnej i petrochemicznej, przetwórstwa żelaza i stali) [3-5]. Wiele z tych emisji, obok tlenku węgla (IV), prowadzi do zwiększania efektu cieplarnianego. Szacuje się, że metan posiada 27 - 30-krotnie, a tlenek azotu (I) ( $\text{N}_2\text{O}$ ) nawet 273-krotnie większy wpływ na efekt cieplarniany w porównaniu do  $\text{CO}_2$  (dla okresu 100 lat) [6, 7]. Do tej pory działalność człowieka wpłynęła na podwyższenie temperatury na Ziemi średnio o około  $1^\circ\text{C}$  (względem okresu przedprzemysłowego, czyli przed rokiem 1900 [8]). Wzrost temperatury globalnej o każde  $0,5^\circ\text{C}$  powoduje wyraźne zwiększenie intensywności i częstotliwości występowania fal upałów, opadów, a także susz rolniczych i środowiskowych [8]. Jako przykład widocznych już skutków globalnego ocieplenia można podać największe w historii pożary lasów w Australii w latach 2019/20, które są uważane za konsekwencję wystąpienia najcieplejszego i najbardziej suchego roku w historii wykonywania pomiarów [9, 10]. Obliczenia przedstawione przez specjalistów z Międzynarodowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (ang. Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) wskazują, że jeśli obecne trendy w wykorzystaniu paliw kopalnych nie ulegną zmianom, średnia temperatura na Ziemi może podnieść się nawet o  $4^\circ\text{C}$  do następnego stulecia (tj. do 2100 roku) [8]. Wiele zmian będzie mieć charakter nieodwracalny, przykładowo: glacyolodzy przewidują, że jeśli obecne tempo topnienia nie zostanie spowolnione do 2200 roku, stopnieje każdy z ponad 400 islandzkich lodowców [11]. Konsekwencją topnienia lodu będzie podniesienie się poziomu mórz i oceanów, nawet o 6 metrów w 2300 roku w stosunku do roku 1900 [8]. Ucierpi na tym ogromna liczba ludzi zamieszkujących obszary przybrzeżne (w 2010 roku 992 miliony ludzi zostało narażonych na powódź, w roku 2050 liczba ta może ulec zwiększeniu o około 308 milionów [12]).

Wiele spośród wymienionych powyżej substancji emitowanych do atmosfery jest również niebezpiecznych dla zdrowia ludzkiego. Znana jest szkodliwość  $\text{NO}_x$  (zwiększając podatność na choroby układu oddechowego [13]) i CO (jego powinowactwo



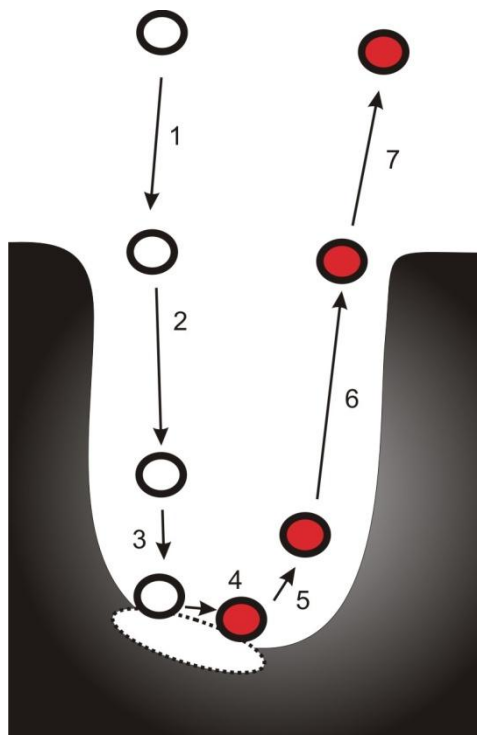
do hemoglobiny jest 230 - 270 razy większe niż do tlenu, co może powodować niedotlenienie organizmu [14]). Groźnym zanieczyszczeniem jest pył zawieszony powodujący zimą smog typu londyńskiego, a latem, w połączeniu z działaniem wyższych temperatur i znacznych ilości tlenków azotu – smog typu Los Angeles [15]. Znaczna część emisji LZO to substancje trujące i kancerogenne, często mutagenne. Udowodniono, że substancje powstające w wyniku spalania węgla i drewna, a zwłaszcza spaliny z silników o zapłonie samoczynnym (silniki Diesla) powodują powstawanie nowotworów [16]. Wg klasyfikacji International Agency for Research on Cancer (IARC) wiele z występujących obecnie zanieczyszczeń powietrza zostało zaklasyfikowanych do 1 grupy czynników o udowodnionym kancerogennym działaniu na organizm człowieka [16]. Wykazano genotoksyczny wpływ zanieczyszczeń zawartych w powietrzu na komórki rozrodcze [17]. U osób, których wykonywany zawód związany jest bezpośrednio z centrami dużych miast (np. policjantów z ulicznych patroli, kierowców autobusów, itp.) występuje zwiększona ilość mutacji chromosomowych [18, 19]. Oszacowano, że tylko w 2010 roku około 3,22 miliona ludzi na całym świecie zmarło w wyniku chorób spowodowanych przez zanieczyszczenia powietrza [20]. W 2019 roku liczba zgonów spowodowanych tym samym czynnikiem oszacowana została na 6,5 miliona osób [21]. Oznacza to, że wartość ta uległa podwojeniu w ciągu 9 lat. Według danych z 2019 roku 99% ludzi na całej Ziemi mieszkało w miejscach, które nie spełniały poziomów wytycznych World Health Organisation (WHO) dotyczących jakości powietrza [22]. Kwestia poprawy jakości powietrza ma szczególne znaczenie w przypadku Polski, na obszarze której, według danych WHO z 2018 roku, znajdują się 33 z 50 najbardziej zanieczyszczonych miast Unii Europejskiej [23].

Jednym ze sposobów na ograniczenie szkodliwych emisji jest zastosowanie reaktorów katalitycznych [24, 25], np. do oczyszczania przemysłowych gazów odlotowych w fabrykach, drukarniach, lakierniach, w miejscach składowania i utylizacji śmieci, oborach, chlewniach, fermentatorach masy organicznej, itp. [26, 27]. Obecnie coraz większą uwagę skupia się na katalitycznych reaktorach strukturalnych. Jednym z najpowszechniej stosowanych jest katalizator samochodowy, umożliwiający redukcję emisji niebezpiecznych produktów spalania paliw kopalnych w silnikach samochodowych [28, 29].

# 1. Aktualny stan wiedzy

## 1.1. Strukturalne reaktory katalityczne

Głównym elementem ("sercem") strukturalnego reaktora katalitycznego jest faza aktywna katalitycznie naniesiona na powierzchnię inertnego, strukturalnego nośnika. Nowoczesne projektowanie takiego reaktora powinno zatem rozpocząć się od zaprojektowania centrów aktywnych (optymalizacja pod względem struktury, określenie mechanizmu reakcji i aktywności). Struktura fazy aktywnej jest odpowiedzialna za ogólną wydajność oraz selektywność procesu, a ostatnie dekady przyniosły jej gwałtowny rozwój. W przypadku dopalania katalitycznego LZO i procesów selektywnej redukcji tlenków azotu za pomocą amoniaku ( $\text{deNO}_x$ ) wciąż jednak stosowane są efektywne, ale drogie metale szlachetne, takie jak platyna, pallad czy rod [30, 31], które są wrażliwe na tzw. trucizny katalityczne (np. siarkę) oraz dezaktywację termiczną. Tego rodzaju fazy aktywne wykazują natomiast zadowalającą aktywność już w stosunkowo niskich temperaturach. Właściwości fazy aktywnej warunkują przebieg reakcji, jednak, aby reakcja zaszła, centra aktywne muszą zostać osiągnięte przez substraty na drodze dyfuzji (wnikanie masy). Proces ten przedstawiono schematycznie na Rys. 1. Wiele badań laboratoryjnych prowadzonych w celu opracowania nowego katalizatora wykonuje się na rozdrobnionych substancjach (w postaci proszku), co jest zwykle niemożliwe do wdrożenia w praktyce przemysłowej. Przepływ płynu przez drobne ziarna generuje bowiem duże opory przepływu, a zatem wysokie koszty tłoczenia płynów przez reaktor. Ponadto, stosowanie drobnych ziaren stwarza również problemy z ich separacją z produktów. Dlatego w praktyce przemysłowej stosuje się nośniki (np. kształtki, siatki, monolity), jednak w celu osadzenia warstwy aktywnej na ich powierzchni zwykle potrzebna jest warstwa substancji ułatwiającej adhezję, tzw. warstwa pośrednia (ang. washcoat). Dobór, optymalizacja i sposób nałożenia tej warstwy jest istotny, ponieważ może wpływać na efektywność fazy aktywnej katalitycznie [32, 33] - jest to zatem kolejny etap w projektowaniu reaktora. Warstwa ta może zostać wytworzona z tlenków metali, jak np.  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  lub  $\text{ZrO}_2$  [34, 35], a dzięki niewielkiej grubości, nie generuje dużych oporów dyfuzyjnych.



Rys. 1. Etapy heterogenicznego procesu katalitycznego: 1 - dyfuzja zewnętrzna substratów do powierzchni warstwy aktywnej, 2 - dyfuzja wewnętrzna substratów w porach warstwy katalitycznej, 3 - adsorpcja substratów na centrach aktywnych, 4 - reakcja chemiczna, 5 - desorpcja produktów z centrów aktywnych, 6 - dyfuzja wewnętrzna produktów w porach warstwy katalitycznej, 7 - dyfuzja zewnętrzna produktów do przepływającego płynu [24]

Pożądany nośnik warstwy katalitycznej powinien zapewnić:

- a) dużą powierzchnię właściwą, dostępną dla osadzenia warstwy katalitycznej (washcoat z warstwą aktywną katalitycznie),
- b) intensywny transport masy do powierzchni warstwy katalitycznej, by nie ograniczać wydajności reakcji,
- c) małe opory przepływu,
- d) odpowiednią wytrzymałość termiczną i mechaniczną.

Od wielu lat poszukiwane są nowe typy nośników katalitycznych, które spełniałyby wszystkie powyższe wymagania. Rozważane są m. in. piany stałe [36, 37], siatki metalowe [38-40], czy struktury typu POCS - periodic open cellular structures [41, 42].

Jednak w przemyśle dominują dwa klasyczne rozwiązania, jakimi są reaktor ze złożem usypanym oraz reaktor monolityczny. Pierwsze rozwiązanie zapewnia intensywny transport ciepła i masy, ale równocześnie charakteryzuje się znacznymi oporami przepływu [43]. Zaletą monolitów są natomiast małe opory przepływu, lecz transport masy (i ciepła) pomiędzy warstwą katalityczną a przepływającym płynem jest znacznie mniejszy w porównaniu do złoża usypanego. Wypełnienie monolityczne to struktura o długich,

prostych kanałach, na ściankach której osadzona jest cienka warstwa katalityczna. Nośnik ten charakteryzuje się możliwością modyfikacji właściwości transportowych w zależności od gęstości upakowania kanałów. Jest wytwarzany z ceramiki, np. z kordierytu (który zapewnia odporność na wysokie temperatury, rzędu ponad 1000 °C oraz małe przewodnictwo cieplne), lub z metalu [25, 44]. Kanały monolitów mogą mieć różne kształty przekrojów poprzecznych, np. kwadratowe [45-47], okrągłe [45-47], trójkątne [46, 47], sinusoidalne [47, 48], sześciokątne [46, 47, 49], itp. Ich powierzchnia właściwa może wynosić nawet powyżej 4000 m<sup>2</sup>·m<sup>-3</sup> [50]. W przemyśle samochodowym, w którym tego typu nośniki są używane od lat, zwykle stosowane są monolity o długości rzędu 20 cm i gęstości kanałów wynoszącej 400 - 1200 kanałów na cal kwadratowy (cpsi, channels per square inch) [28, 44]. W literaturze opisane są przykłady zastosowania wypełnienia monolitycznego w procesach (również w skali przemysłowej) redukcji NO<sub>x</sub>, spalania paliw do turbin gazowych, utleniania CO, SO<sub>2</sub> i amoniaku, rozkładu O<sub>3</sub> (np. w samolotach), dopalania węglowodorów reformingu parowego, uwodornienia (np. benzenu), odwodornienia (np. cykloheksanu), hydroodsiarczania (np. tiofenu) [25, 51-53]. Wypełnienia tego rodzaju były również badane pod kątem zastosowania w procesach adsorpcji LZO, wytwarzania wodoru do ogniw paliwowych, czy selektywnego utlenienia (np. ksylenu, amoniaku, cykloheksanu) [51, 53]. Szerokie stosowanie wypełnienia monolitycznego w przemyśle skutkuje wciąż podejmowanymi pracami mającymi na celu intensyfikację procesów prowadzonych z ich wykorzystaniem, np. poprzez dodawanie żeber czy wypustek prostopadłych do ściany kanału, które zwiększają powierzchnię kontaktu płyn – ciało stałe, a także wymuszają „zakłócenia” w przepływie laminarnym, co może polepszyć transport masy [54, 55].

## **1.2. Struktury krótkokanałowe - wypełnienia monolityczne o zintensyfikowanych właściwościach transportowych**

Jedną z możliwości intensyfikacji transportu ciepła i masy w kanałach monolitu jest skrócenie jego długości, co zostało zaproponowane i eksperymentalnie potwierdzone w pracach Kołodzieja i wsp. [56, 57]. To rozwiązanie opiera się na teorii rozwijającego się przepływu laminarnego [58]. Przepływ płynu przez długie kanały monolitu, ze względu na ich małe średnice, ma charakter laminarny. Profile prędkości, temperatury i stężenia na przeważającej długości kanału są w pełni rozwinięte (paraboliczne). Intensywność

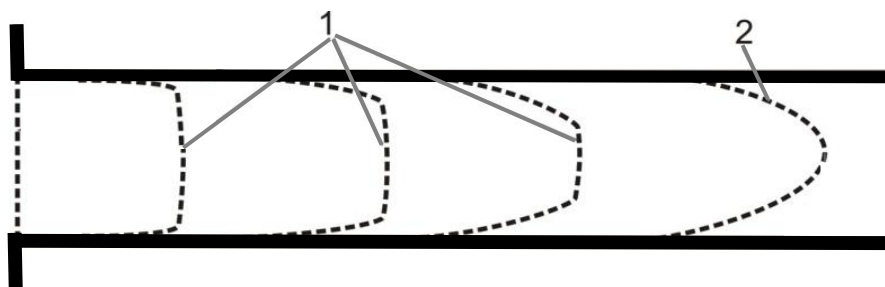
transportu ciepła i masy jest zatem mała, ponieważ transport odbywa się na drodze porównywalnej z ekwiwalentnym promieniem kanału. Zakładając płaski profil prędkości/temperatury/stężenia na wlocie do kanału, tuż za jego wlotem profile te rozwijają się (występuje wtedy tzw. przepływ laminarny rozwijający się) [58] (Rys. 2). Transport ciepła i masy zachodzi wówczas tylko przez stosunkowo cienką warstwę przyścienną, co skutkuje większymi współczynnikami wnikania ciepła i masy w porównaniu do przepływu laminarnego w pełni rozwiniętego. Również współczynnik oporu Fanninga dla przepływu rozwijającego się jest większy niż dla przepływu rozwiniętego. W literaturze współczynniki te opisywane są liczbami kryterialnymi odpowiednio dla wnikania ciepła - liczbą Nusselta, masy - liczbą Sherwooda i oporów przepływu - współczynnikiem oporu Fanninga. Jak podaje Shah i London [58] liczby te można opisać za pomocą bezwymiarowej długości kanału zdefiniowanej dla przepływu rozwijającego się

termicznie: 
$$L^* = \frac{L}{d_h \cdot Re \cdot Pr} \quad (1)$$

masowo: 
$$L^{*M} = \frac{L}{d_h \cdot Re \cdot Sc} \quad (2)$$

hydrodynamicznie: 
$$L^+ = \frac{L}{d_h \cdot Re} \quad (3)$$

gdzie:  $L$  oznacza długość kanału,  $d_h$  - średnicę hydrauliczną,  $Re$  - liczbę Reynoldsa,  $Pr$  - liczbę Prandtla,  $Sc$  - liczbę Schmidta.

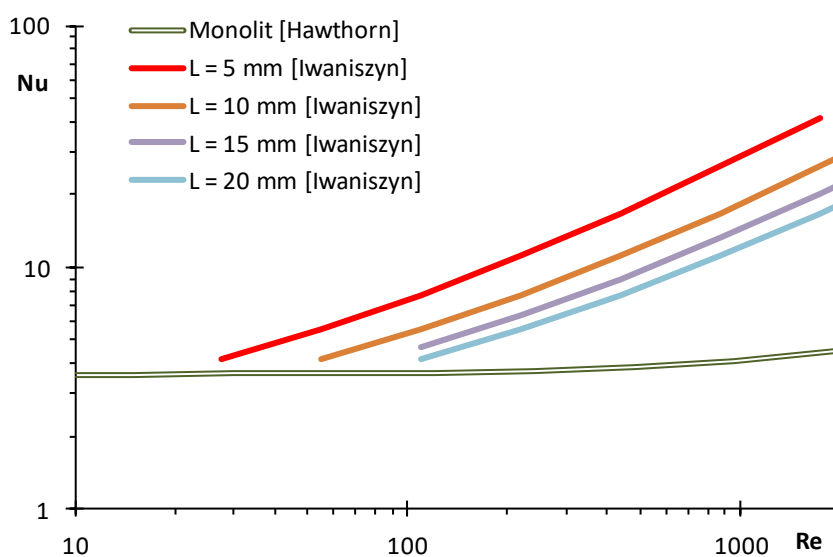


Rys. 2. Formowanie się profilu prędkości/temperatury/stężenia w kanale: 1 - przepływ laminarny rozwijający się, 2 - przepływ rozwinięty [58]

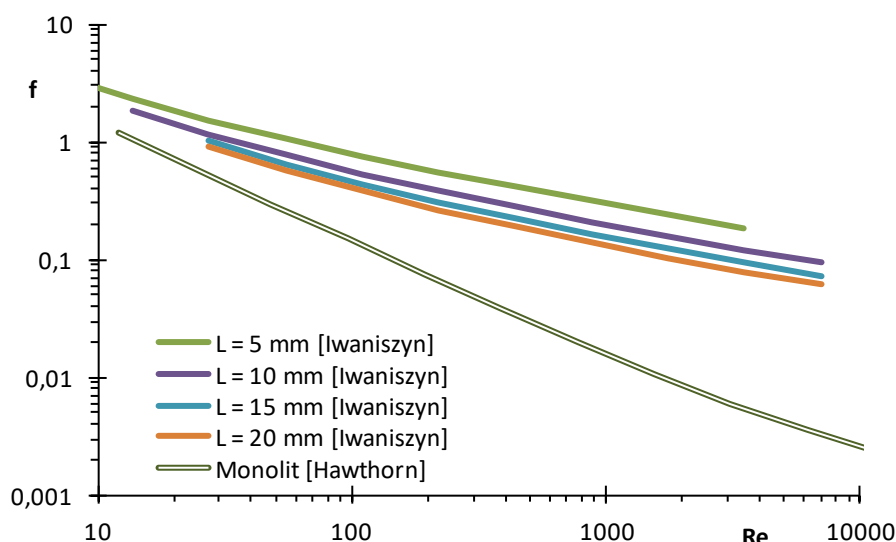
Długość struktur krótkokanałowych powinna zostać zatem dobrana w taki sposób, aby rozwijający się przepływ laminarny występował na całej, lub przeważającej, długości kanału. W pracy Shaha i Londona [58] stwierdzono, że dla krótkich kanałów, w przypadku gdy wartość bezwymiarowej długości kanału  $L^+$  przyjmuje wartość mniejszą niż  $10^{-3}$ , przepływ płynu może mieć charakter laminarny rozwijający się, nawet dla wartości liczb Reynoldsa rzędu  $10^5$ . Oznacza to, że istnieje możliwość takiego doboru

długości kanału, dla której występować będzie przepływ laminarny rozwijający się nawet w zakresie dużych prędkości płynu.

Wypełnienia monolityczne charakteryzujące się długością uniemożliwiającą osiągnięcie w pełni rozwiniętego przepływu laminarnego nazywane są "strukturami krótkokanałowymi" [56]. Dopuszczalne jest również nazywanie tym terminem struktur, w przypadku których przepływ laminarny rozwijający się występuje na przeważającej długości kanału [59]. Korzystne właściwości tego rodzaju nośników zostały potwierdzone w wielu pracach [59-67]. Na Rys. 3 i Rys. 4 przedstawiono porównanie właściwości transportowych i oporów przepływu struktur krótkokanałowych o różnych długościach oraz klasycznego wypełnienia monolitycznego (monolit 600 cpsi, o kwadratowym kształcie przekroju poprzecznego kanałów i długości 0,2 m, co odpowiada wypełnieniom stosowanym w przemyśle samochodowym). Dla małych wartości liczb Reynoldsa, struktury krótkokanałowe cechują się zbliżonymi wartościami liczb Nusselta do wypełnienia monolitycznego. Wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa obserwowana jest coraz większa różnica pomiędzy wartościami liczb Nusselta obliczonymi dla obu typów wypełnień (Rys 3). Dla  $Re \sim 2000$  wartości liczb Nusselta dla struktur krótkokanałowych są ok. 5 - 10 krotnie większe niż dla monolitu. Ponadto, skrócenie długości struktury w niewielkim stopniu wpływa na wielkość współczynnika oporu Fanninga (Rys. 4), jednak dla wszystkich długości obserwowane są nieco większe wartości  $f$  w porównaniu do złoza monolitycznego.

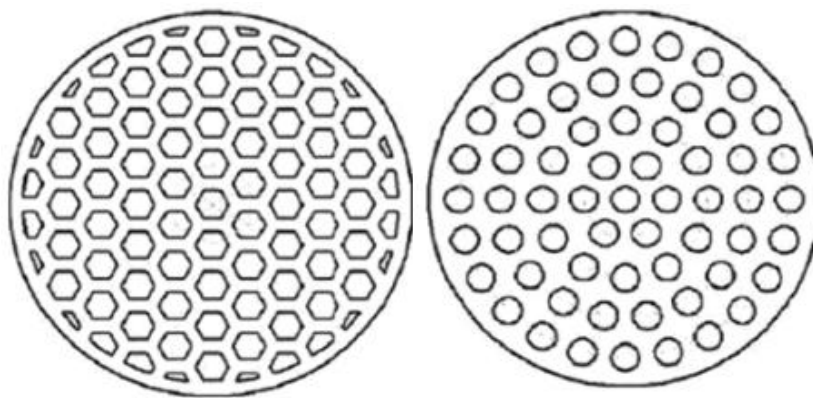


Rys. 3. Porównanie właściwości transportowych monolitu i struktur krótkokanałowych o trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów o długości  $L = 3,1 - 20$  mm [59, 67, 68]



Rys. 4. Porównanie wartości współczynników oporu Fanninga dla monolitu i struktur krótkokanałowych o trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów o długości  $L = 3,1 - 20$  mm [67, 68]

Kolejnym czynnikiem wpływającym na właściwości transportowe i przepływowe jest kształt przekroju poprzecznego kanałów. Wpływ ten można ocenić, porównując np. wartości liczb Nusselta dla laminarnego przepływu rozwiniętego, dla którego wartość ta jest funkcją tylko kształtu kanału. Wartości te zostały zamieszczone w Tab. 1 z uwzględnieniem dwóch różnych warunków brzegowych: stały strumień ciepła dostarczany do ścianki kanału ( $\langle H \rangle$ ) lub stała temperatura ścianki kanału ( $\langle T \rangle$ ). Warunek brzegowy  $\langle H \rangle$  wyraża intensywniejszy transport ciepła niż warunek  $\langle T \rangle$ . Z analizy danych zamieszczonych w Tab.1 wynika, że najbardziej korzystnym kształtem przekroju poprzecznego kanału jest koło. Duża część prac naukowych poświęcona jest tego rodzaju strukturom [69-75]. Należy pamiętać jednak o tym, że kształt ten charakteryzuje się najbardziej korzystnymi właściwościami w przypadku rozpatrywania pojedynczego kanału. Jeśli wziąć pod uwagę cały monolit - bardziej korzystne będzie zastosowanie kanałów o przekroju w kształcie sześciokąta foremego niż w kształcie koła, ponieważ zapewniają lepszy stopień wypełnienia jego przekroju poprzecznego (Rys. 5). Innymi słowy, monolit o kanałach sześciokątnych (których wysokość jest równa średnicy kanałów okrągłych) posiada około 10% więcej kanałów niż monolit o kanałach okrągłych. Ponadto, w porównaniu do pozostałych kształtów kanału (kwadratowych i trójkątnych), kształt sześciokątny zapewnia lepsze parametry transportowe (Tab. 1).



Rys. 5. Porównanie wypełnień monolitycznych o sześciokątnym i okrągłym kształcie przekroju poprzecznego kanałów ([76])

Tab. 1. Parametry transportowe i przepływowe dla różnych geometrii przekroju poprzecznego kanałów

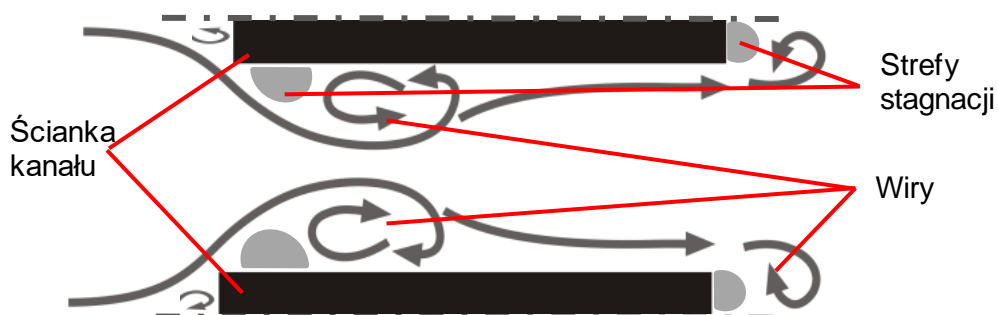
Kształt przekroju poprzecznego kanału	$Nu_{fd<H>}$	$Nu_{fd<T>}$	$(fRe)_{fd}$	$\frac{Nu_{fd<H>}}{(f \cdot Re)_{fd}}$	$\frac{Nu_{fd<T>}}{(f \cdot Re)_{fd}}$	Lit.
Kwadrat	3,608	2,976	14,227	0,254	0,209	[77]
Trójkąt równoboczny	3,111	2,47	13,333	0,233	0,185	[58, 77]
Koło	4,364	3,657	16	0,273	0,229	[58]
Sześciokąt foremny	4,002	3,346	15,054	0,266	0,222	[49, 58]

### 1.3. Proponowana metoda modyfikacji geometrii wypełnień monolitycznych

Aby przetłoczyć płyn przez reaktor, konieczne jest pokonanie oporów przepływu będących sumą oporów lepkich i inercyjnych. Pierwsza składowa - opory lepkie - powstaje w wyniku działania sił tarcia lepkiego. W przepływie laminarnym opory te są proporcjonalne do iloczynu lepkości i prędkości płynu ( $\eta \cdot w$ ) [78]. Drugi rodzaj oporów - inercyjne - są proporcjonalne do iloczynu gęstości i kwadratu prędkości płynu ( $\rho \cdot w^2$ ) [78]. Opory tego typu występują, gdy płyn napotyka na swojej drodze przeszkodę, która powoduje zmianę kierunku jego ruchu (kierunku wektora prędkości  $\vec{w}$ ). Podczas opływu ciała stałego o prostych krawędziach powstają zawirowania oraz strefy stagnacji [79], co schematycznie pokazano na Rys. 6. W zależności od prędkości płynu struga może zostać również oderwana od powierzchni ciała. Wszystkie te zjawiska wpływają niekorzystnie na transport ciepła



i masy. Na Rys. 7 przedstawiono przepływ płynu wokół ciała o tzw. kształcie aerodynamicznym (skrzydła samolotu). Linie przepływu są tu znacznie łagodniejsze, ograniczone jest występowanie zawirowań i stref stagnacji.




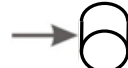

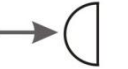


Rys. 6. Zjawiska towarzyszące przepływowi przez kanał monolitów i struktur krótkokanałowych

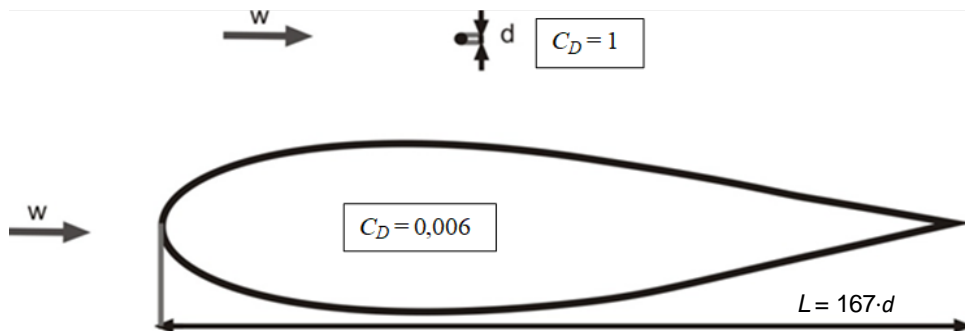
Jak powszechnie wiadomo, kształt omywanego obiektu ma istotny wpływ na wartość współczynnika oporu czołowego,  $C_D$ , który z kolei wpływa na wielkość oporów czołowych. Przykładowe wartości współczynnika  $C_D$  dla różnych obiektów w zakresie liczb  $Re$  od  $10^4$  do  $10^6$  zestawiono w Tab. 2. Jak można zauważyć, sześcian posiada wartość współczynnika oporów czołowych ponad dwukrotnie większą niż półkula. Duże znaczenie ma również promień krzywizny obiektu (zarówno w odniesieniu do powierzchni czołowej, jak i dalszej części kształtu). Łza, kula i półkula mają bardzo zbliżony kształt powierzchni czołowej, jednak kształt łzy, dzięki wydłużonej części tylnej, charakteryzuje się mniejszymi oporami czołowymi niż półkula i kula. Z kolei profil skrzydła samolotu, dzięki jeszcze bardziej wydłużonemu kształtowi oraz mniejszej krzywiznie powierzchni czołowej, posiada wartość  $C_D$  o rząd mniejszą niż łaza. W celu zobrazowania wpływu kształtu struktury, a zatem wartości współczynnika oporów czołowych na opory przepływu, na Rys. 8 przedstawiono walec o średnicy  $d$  oraz profil skrzydła, którego długość  $L = 167 \cdot d$ . W przypadku, gdy  $10^6 < Re < 10^7$  oraz gdy kierunek przepływu płynu jest zgodny z przedstawionym na rysunku, oba ciała wykazują identyczny opór aerodynamiczny, natomiast różnica w wartości  $C_D$  wynosi ponad dwa rzędy wielkości [79].



Rys. 7. Opływ ciała stałego o aerodynamicznym kształcie [79]

Tab. 2. Wartości współczynników oporów czołowych  $C_D$  dla obiektów o różnych kształtach dla  $Re = 10^4 - 10^6$

Obiekt	$C_D$	Lit.
 sześcian	1,05	[80] [81]
 walec	1	[79]
 kula	0,47	[80]
 półkula	0,42	[80]
 łza	0,05	[80]
 profil skrzydła samolotu	0,006	[79]

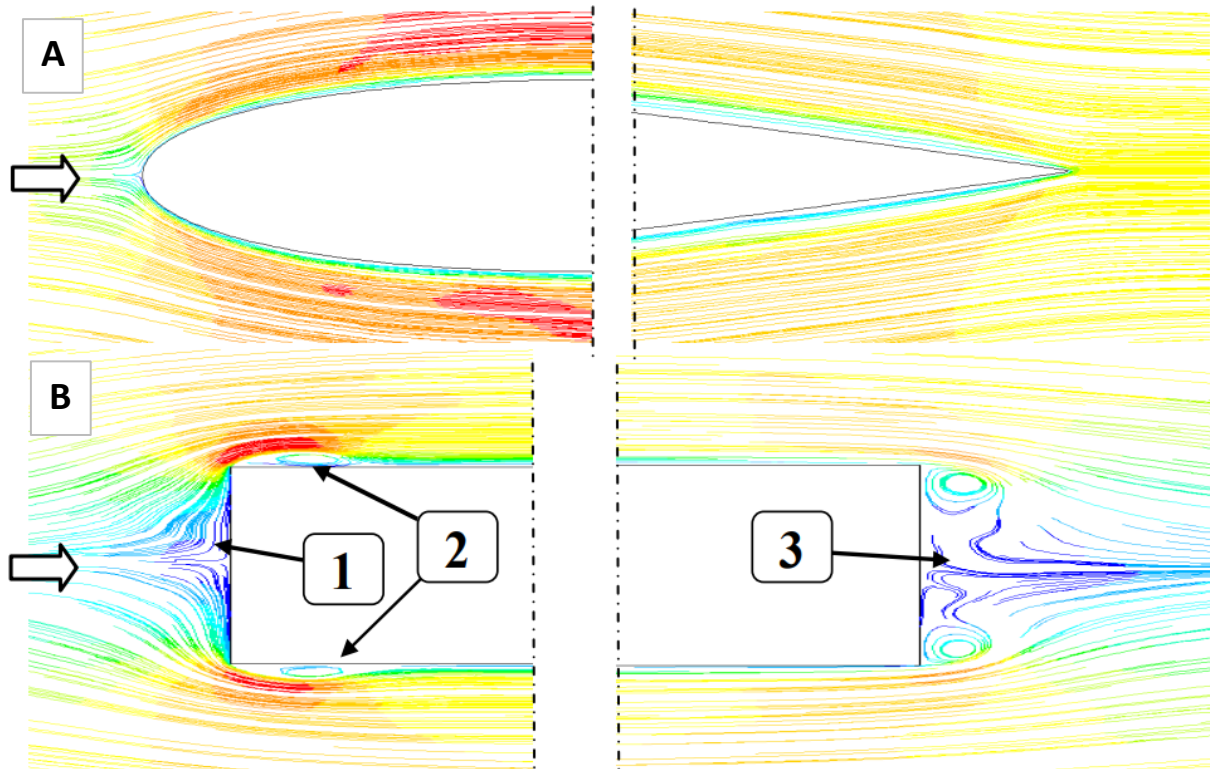


Rys. 8. Porównanie wymiarów dwóch obiektów – walca oraz profilu skrzydła o takim samym oporze [79]

Przedstawione powyżej rozważania wskazują jednoznacznie, że kształty zbliżone do prostopadłościanu charakteryzują się znacznymi wartościami współczynników oporu czołowego, obserwowane są również wyraźne zawirowania płynu i strefy stagnacji. Zjawiska te występują także w strukturalnych nośnikach katalizatorów, monolitach. Znaczne opory czołowe o charakterze inercyjnym stwierdzono w pracy Iwaniszyn i wsp. [60] dla metalowych struktur krótkokanałowych o grubości ścianek 0,05 - 0,1 mm. Powstające zawirowania powodują istotne zmniejszenie intensywności transportu ciepła i masy, co przedyskutowano szerzej w następnym rozdziale. Można zatem założyć, że ukształtowanie ścianek krótkokanałowej struktury na podobieństwo skrzydła samolotu powinno zmniejszyć opory przepływu płynu przez strukturę oraz zintensyfikować transport ciepła i masy.

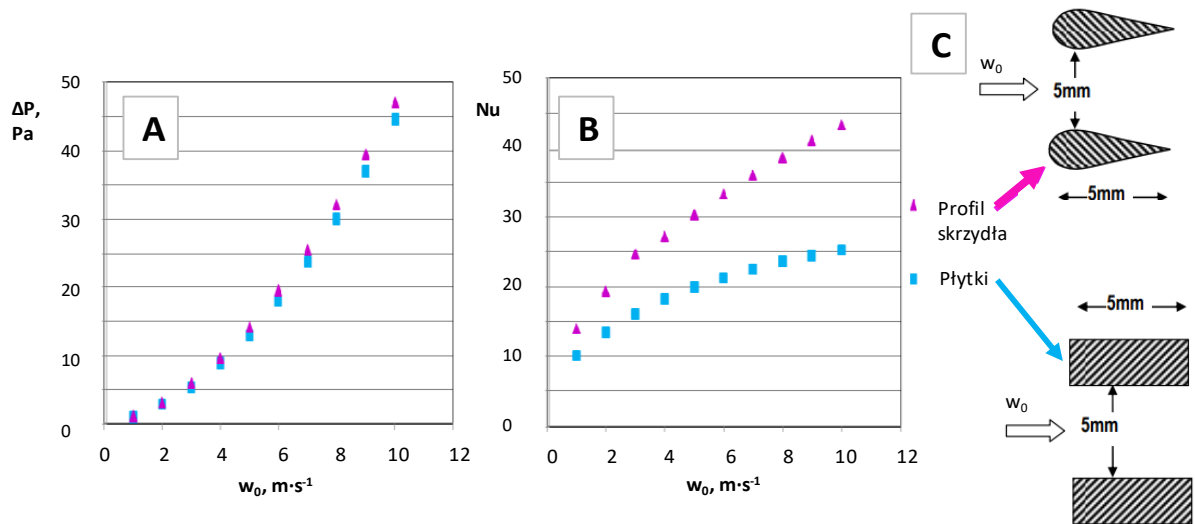
#### 1.4. Wstępna analiza CFD

Analiza numeryczna CFD (ang. Computational Fluid Dynamics) umożliwia opisanie z dużą dokładnością zjawisk transportowych i przepływowych dla różnych typów wypełnień, w tym strukturalnych [40, 60, 61, 66]. Analizę taką przeprowadzono dla geometrii skrzydła samolotu - tzw. opływowej (wzorowanej na profilu NACA 0006 ze względu na jego korzystne opory przepływu [82, 83]) oraz, dla porównania, prostopadłościenną (Rys. 9). Wysokość prostopadłościanu oraz geometrii opływowej w najszerszym miejscu była identyczna (1 mm), a prędkość gazu na wlocie domeny obliczeniowej w obu przypadkach wynosiła  $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Na Rys. 9 przedstawiono rozkład wektorów prędkości powietrza opływających oba typy geometrii. Przy wlotowej i wylotowej części prostopadłościanu (Rys. 9B) widoczne są zawirowania oraz strefy stagnacji. Geometria ta sprzyja również tworzeniu się przepływów wstecznych. Strefy stagnacji utrudniają mieszanie płynu, co może zaburzać efektywny transport ciepła i masy. W przypadku geometrii opływowej wiry wlotowe i wylotowe nie występują (Rys. 9A). **Analiza wyników symulacji wskazuje zatem, że opływowy kształt korzystnie wpływa na właściwości przepływowe geometrii opływowej, zmniejszając intensywność zawirowań płynu.**



Rys. 9. Porównanie linii prądu dla struktury opływowej (A) i prostopadłościenniej (B). Zawiorania i strefy stagnacji: 1 - na ścianie czołowej, 2 - we wlotowej części kanału, 3 - za strukturą

Analiza CFD właściwości transportowych i oporów przepływu została przedstawiona na Rys. 10. Geometria o kształcie wzorowanym na profilu skrzydła samolotu cechuje się intensywniejszą wymianą ciepła w porównaniu do prostopadłościenniej, wartości liczb Nusselta są większe nawet o około 70% (Rys. 10B). Równocześnie, opory przepływu dla obu geometrii są podobne (Rys 10A). Można zatem przyjąć, że **parametry transportowe wyznaczone dla struktur opływowych wskazują na ich duży potencjał jako nośników katalitycznych.**



Rys. 10. Wyniki analizy CFD (A -  $\Delta P$  vs.  $w_0$ , B -  $Nu$  vs.  $w_0$ ) oraz geometrie zastosowane do jej przeprowadzenia (C)

## 2. Cel i zakres pracy

Celem pracy było zbadanie zjawisk przepływowych i transportowych dla nowej generacji krótkokanałowych wypełnień strukturalnych reaktorów katalitycznych, tzw. struktur opływowych. Zasadniczą innowacją proponowanych wypełnień jest ukształtowanie ścianki kanałów na podobieństwo skrzydła samolotu. Jako profil ścianki wybrano profil skrzydła NACA 0006. Taka geometria powinna znacząco zintensyfikować transport ciepła i masy w porównaniu do tradycyjnych monolitów i struktur krótkokanałowych, równocześnie opory przepływu powinny być nieco większe niż dla monolitów i podobne do wartości właściwych dla struktur krótkokanałowych.

Zakres pracy obejmował badania doświadczalne oporów przepływu i współczynników wnikania ciepła oraz symulacje numeryczne z zastosowaniem komputerowej dynamiki płynów (CFD) dla identyfikacji zjawisk przepływowych i transportu ciepła. Badania eksperymentalne wykonano dla przepływu powietrza przez struktury opływowe o trzech różnych kształtach przekroju poprzecznego kanałów (kwadratowym, trójkątnym i sześciokątnym) dla trzech długości kanałów: 3, 6 i 12 mm. Opracowano własne korelacje opisujące eksperymentalnie otrzymane wartości liczb Nusselta oraz współczynników oporu Fanninga. Ponieważ, jak dotąd, brak jest prac na temat krótkokanałowych nośników katalitycznych o opływowym kształcie ścianek, otrzymane wyniki eksperymentalne porównano z wartościami obliczonymi na podstawie korelacji opracowanych dla struktur krótkokanałowych, a także wypełnień klasycznych (monolitycznego i złoża usypanego). Symulacje numeryczne wykonano dla struktur o kwadratowym przekroju poprzecznym kanału, zarówno dla struktur opływowych, jak też dla struktur krótkokanałowych o ściankach prostopadłościennych. Uzyskane wyniki numeryczne przedstawiono w postaci linii przepływu (linii stycznych w każdym punkcie do wektora lokalnej prędkości płynu  $\vec{w}$ ), w postaci map temperatur płynącego płynu, lokalnych wartości liczb Nusselta oraz w formie oporów przepływu płynu przez strukturę.

### 3. Metody badawcze

#### 3.1 Testowane struktury

Struktury testowane eksperymentalnie zostały wytworzone techniką selektywnego stapiania laserowego (ang. Selective Laser Melting, SLM) ze stali nierdzewnej 316L przy użyciu urządzenia SLM 50 firmy Realizer. Wszystkie nośniki zostały wytworzone na Politechnice Wrocławskiej (Wydział Mechaniczny). Przykładowe zdjęcia testowanych eksperymentalnie struktur przedstawiono na Rys. 11, a ich parametry zamieszczono w Tab. 3. Dla uproszczenia, w dalszej części pracy struktury o kwadratowym kształcie przekroju poprzecznego kanałów będą nazywane "strukturami kwadratowymi" (w skrócie SKw), lub „strukturami trójkątnymi” (STri) i „strukturami sześciokątnymi” (SHex) odpowiednio dla struktur o trójkątnym i sześciokątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów.



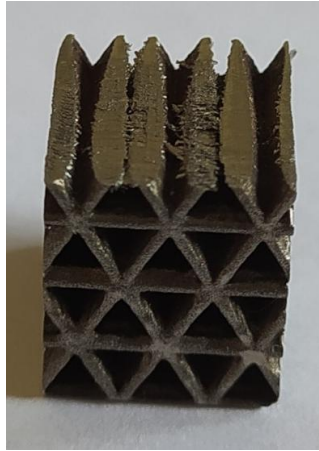
Rys. 11. Zdjęcia przykładowych struktur opływowych o sześciokątnym, kwadratowym i trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów

Tab. 3. Parametry testowanych struktur

Oznaczenie struktury	Kształt przekroju poprzecznego kanału	Długość kanału, mm	Długość boków kanału (jednostki powtarzalnej), mm	cpsi
SKw3	Kwadrat	3	4	34
SKw6	Kwadrat	6	4	34
SKw12	Kwadrat	12	4	34
SHex3	Sześciokąt*	3	2,3	46
SHex6	Sześciokąt*	6	2,3	46
SHex12	Sześciokąt*	12	2,3	46
STri3	Trójkąt**	3	4	92
STri6	Trójkąt**	6	4	92
STri12	Trójkąt**	12	4	92

\*foremny, \*\*równoboczny

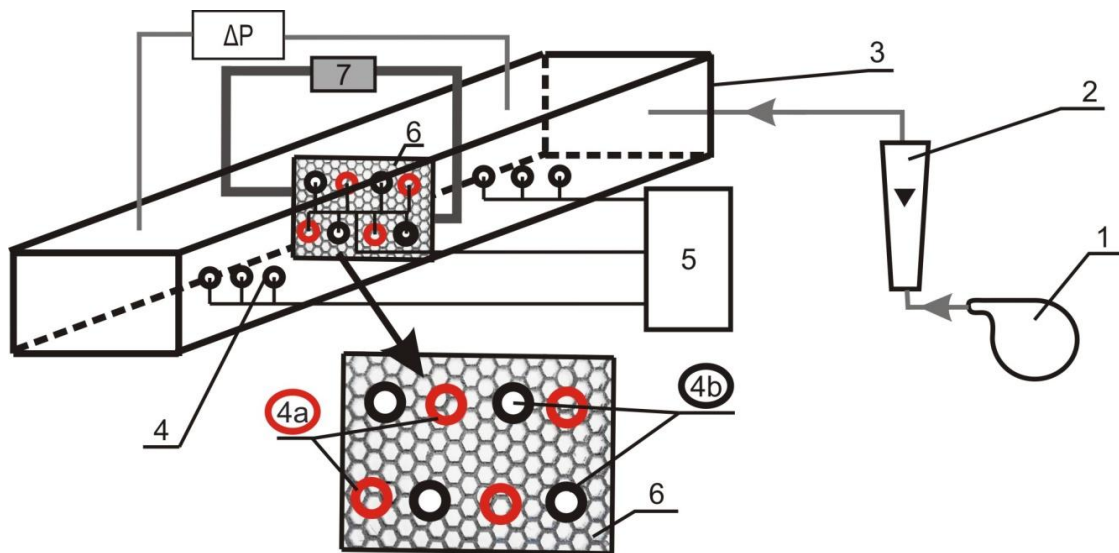
Na Rys. 12 przedstawiono wycinek struktury opływowej z widocznym aerodynamicznym profilem ścianki bocznej.



Rys. 12. Wycinek przykładowej struktury opływowej

### 3.2. Badania cieplne i przepływowe

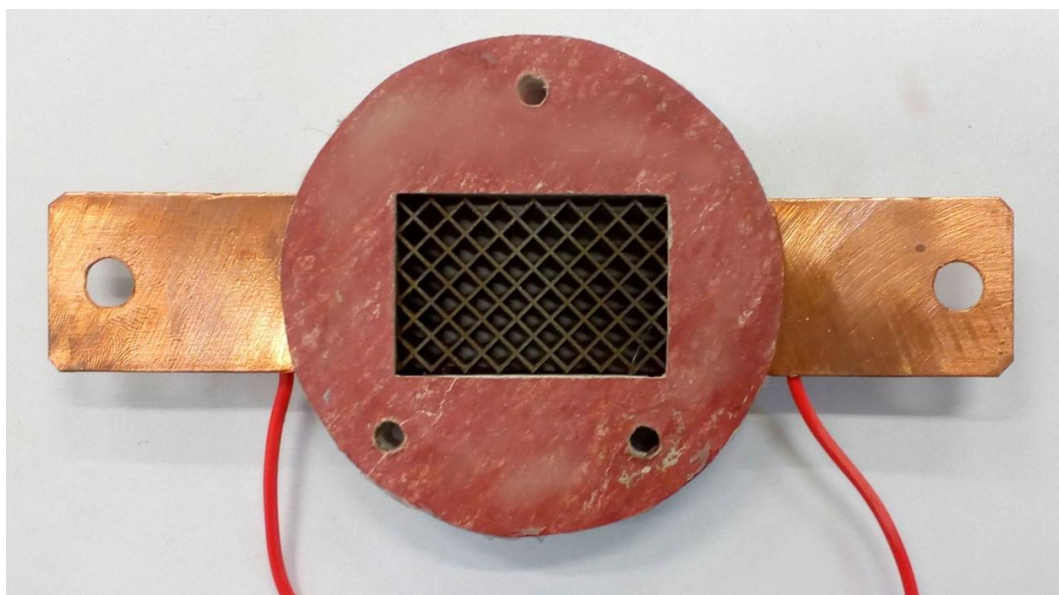
Badania eksperymentalne współczynników wnikania ciepła oraz oporów przepływu przeprowadzono dla wszystkich testowanych struktur. Schemat aparatury pomiarowej przedstawiono na Rys. 13.



Rys. 13. Aparatura pomiarowa: 1 - sprężarka, 2 - rotometr, 3 - reaktor, 4 - termopary (4a - umieszczone na strukturze od strony wlotowej, 4b - umieszczone na strukturze od strony wylotowej), 5 - system zbierania/przetwarzania danych, 6 - struktura, 7 - źródło prądu elektrycznego



Eksperymenty prowadzono dla jednofazowego przepływu gazu (powietrza) w warunkach otoczenia, zmieniając prędkość przepływu  $w_0$  w zakresie od  $\sim 0,7 \div \sim 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (co odpowiada liczbie Reynoldsa  $Re$  w zakresie  $\sim 40 \div \sim 3000$ , oraz prędkości masowej na przekrój pustego reaktora  $g_0$  od  $\sim 0,2 \div \sim 14 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). W badaniach stosowano reaktor o prostokątnym kształcie przekroju poprzecznego o wymiarach wewnętrznych  $45 \times 30 \text{ mm}$ . Badane struktury umieszczane były w module pomiarowym (Rys. 14), instalowanym w reaktorze. W celu ogrzania struktury wykorzystano efekt Joule'a - przepływający prąd elektryczny zwiększał temperaturę badanej struktury. W zależności od rodzaju struktury maksymalne stosowane natężenie prądu  $I_{max}$  wynosiło  $290 \text{ A}$ , podczas gdy maksymalne napięcie  $U_{max}$  nie przekraczało  $2 \text{ V}$ . Temperaturę powierzchni struktury mierzono za pomocą 8 termopar typu K (umieszczone po 4 na wlotowej i na wylotowej stronie). Dokładność pomiaru temperatury wynosiła  $0,2 \text{ K}$ . Termopary przymocowano na powierzchni struktury za pomocą kleju epoksydowego, zapewniającego dobre przewodnictwo cieplne i izolację elektryczną. Temperaturę przepływającego powietrza mierzono na wlocie i wylocie z reaktora (po 3 termopary z każdej strony).



Rys. 14. Badana struktura z przylutowanymi blaszkami doprowadzającymi prąd elektryczny, umieszczona w module pomiarowym, widok od strony wlotowej

W celu wyznaczenia współczynników wnikania ciepła stosowano następującą procedurę pomiarową: po wstępnym rozgrzaniu aparatury ustawiano żądane natężenie przepływu powietrza, oraz prąd grzania, dla którego wartość średniej logarytmicznej różnicy temperatur  $\Delta t_{ln}$  pomiędzy powierzchnią struktury a przepływającym powietrzem wynosiła

10°C. Po uzyskaniu stanu ustalonego odczytywano wartości pomiarowe. Następnie, dla tego samego natężenia przepływu, zwiększano natężenie prądu do uzyskania  $\Delta t_{ln} = 20^\circ\text{C}$ , powtarzając procedurę pomiarową. Dla każdej struktury wykonano w ten sposób serię pomiarów zmieniając stopniowo prędkość gazu. Różnicę temperatur  $\Delta t_{ln}$  definiowano jako [84]:

$$\Delta t_{ln} = \frac{(t_{str.wlot} - t_{pow.wlot}) - (t_{str.wydot} - t_{pow.wydot})}{\ln \frac{(t_{str.wlot} - t_{pow.wlot})}{(t_{str.wydot} - t_{pow.wydot})}} \quad (4)$$

gdzie:  $t_{str.wlot}$  i  $t_{str.wydot}$  oznaczają odpowiednio średnią temperaturę struktury po stronie wlotowej i wylotowej [ $^\circ\text{C}$ ], natomiast  $t_{pow.wlot}$  i  $t_{pow.wydot}$  - odpowiednio średnią temperaturę powietrza po stronie wlotowej i wylotowej [ $^\circ\text{C}$ ]. Z użyciem średniej logarytmicznej różnicy temperatur obliczano wartość współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]:

$$\alpha = \frac{Q_{eff}}{F \cdot \Delta t_{ln}} \quad (5)$$

gdzie:  $Q_{eff}$  oznacza efektywnie wydzielone ciepło na strukturze [W], a  $F$  – powierzchnię wymiany ciepła [ $\text{m}^2$ ]. Następnie obliczano wartość liczby Nusselta z zależności:

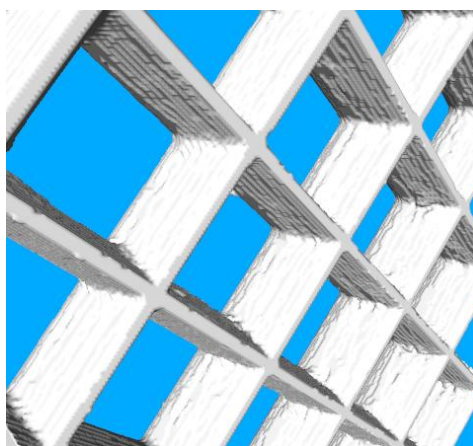
$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_h}{\lambda} \quad (6)$$

gdzie  $d_h$  oznacza średnicę hydrauliczną, a  $\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]. Opory przepływu mierzono za pomocą mikromanometru Recknagla oraz przetwornika różnicy ciśnień (dokładność pomiaru dla obu urządzeń wynosi 1 Pa). Procedurę obliczeniową stosowaną do wyznaczania współczynników wnikania ciepła zamieszczono w Dodatku 1.

## 4. Opracowanie wyników i dyskusja

### 4.1. Charakterystyka struktur

Parametrami, którymi można opisać struktury opływowe są powierzchnia właściwa ( $S_v$ , ang. specific surface area), która jest powierzchnią dostępną dla osadzenia warstwy aktywnej katalitycznie, porowatość ( $\varepsilon$ ) oraz wysokość wewnętrzna kanału ( $h$ ) która istotnie zmienia się wzdłuż długości struktury. Parametry te są niezbędne dla określenia właściwości transportowych testowanych struktur oraz do opisu matematycznego reaktora. Wartości te wyznaczono dla struktur modelowych w oparciu o geometrie CAD. W celu zweryfikowania dokładności wydruku, parametry te określono również dla wydrukowanych struktur, wykorzystując metodę tomografii komputerowej (ang. x-ray computed tomography - XCT). Technika ta polega na skanowaniu wykonanej struktury, czego rezultatem jest seria obrazów przekrojów poprzecznych próbki „warstwa po warstwie” [85]. Metoda ta jest stosowana w przypadku nośników katalitycznych o strukturze 3D [37, 86]. Analiza wykonana została za pomocą urządzenia Metrotom 1500 firmy Zeiss, z rozdzielczością wynoszącą 63,88  $\mu\text{m}$ , we współpracy z Katedrą Technologii Laserowych, Automatykacji i Organizacji Produkcji Politechniki Wrocławskiej. Przykładową rekonstrukcję 3D otrzymaną na podstawie obrazów tomograficznych 2D przedstawiono na Rys. 15. W Tab. 4 przedstawiono porównanie wartości powierzchni właściwej i porowatości wyznaczonych na podstawie modeli CAD oraz metodą tomografii komputerowej wspomaganą oprogramowaniem iMorph.



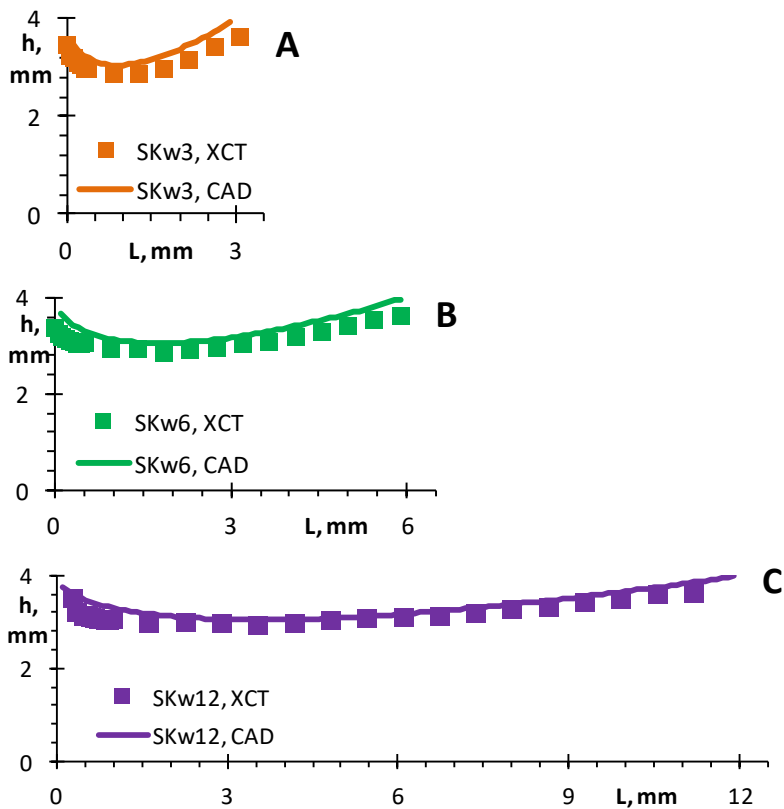
Rys. 15. Rekonstrukcja 3D struktury kwadratowej o długości 3 mm otrzymana metodą XCT z wykorzystaniem programu iMorph, widok od strony wylotowej

Tab. 4. Porównanie rzeczywistych i modelowych wartości parametrów charakteryzujących badane struktury

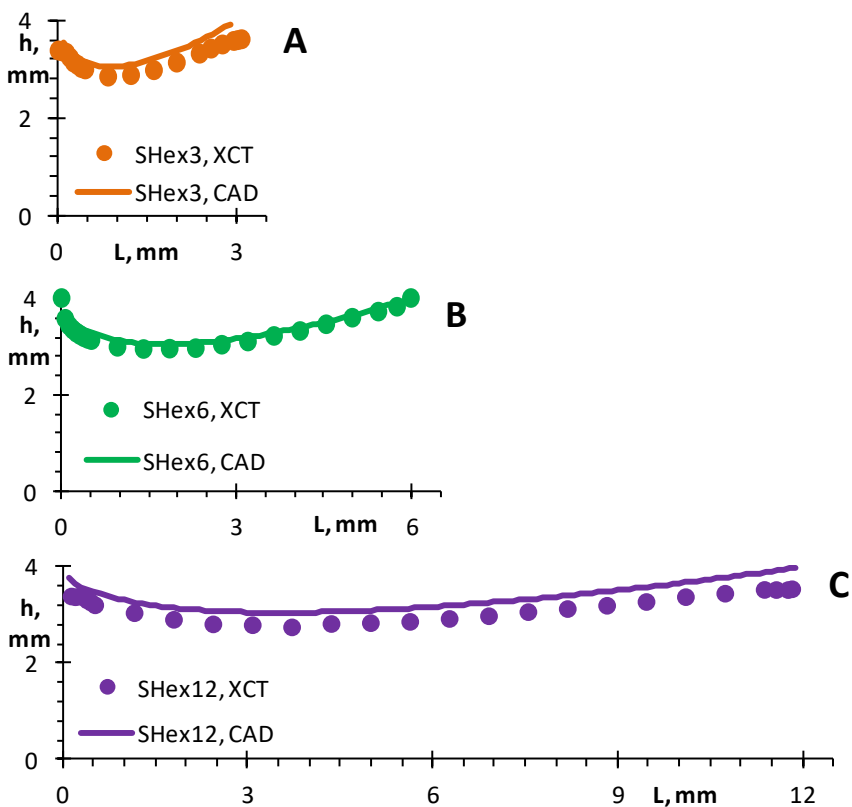
Nośnik	$\varepsilon_{CAD}$	$S_{vCAD},$ $m^2 \cdot m^{-3}$	$h_{srCAD},$ mm	$\varepsilon_{XCT}$	$S_{vXCT},$ $m^2 \cdot m^{-3}$	$h_{srXCT},$ mm	$e_{yCAD}, \%$		
							$\varepsilon$	$S_v$	$h_{sr}$
SKw3	0,708	924,81	3,36	0,677	926,64	3,21	4	<1	4
SKw6	0,708	867,47	3,36	0,683	869,34	3,14	4	<1	6
SKw12	0,708	847,74	3,36	0,701	850,79	3,18	1	<1	5
SHex3	0,708	925,29	3,37	0,698	923,20	3,16	1	<1	5
SHex6	0,708	867,61	3,37	0,657	848,68	3,27	7	2	2
SHex12	0,708	848,36	3,37	0,691	844,10	3,06	2	1	8
STri3	0,533	1387,01	2,52	0,470	1264,40	2,13	12	9	14
STri6	0,533	1294,71	2,52	0,502	1230,78	2,09	6	5	16
STri12	0,533	1262,74	2,52	0,498	1206,31	2,09	7	4	16

Wszystkie struktury rzeczywiste wykazały nieco mniejszą porowatość ( $\varepsilon_{XCT}$ ) w porównaniu do struktur modelowych ( $\varepsilon_{CAD}$ ). Jednak, jak można zauważyć, wartości błędów względnych są niewielkie, jedynie w przypadku najkrótszej struktury trójkątnej różnica w porowatości modelowej i rzeczywistej przekracza 10%. Największą rozbieżność pomiędzy powierzchnią właściwą i porowatością zaobserwowano dla struktur trójkątnych.

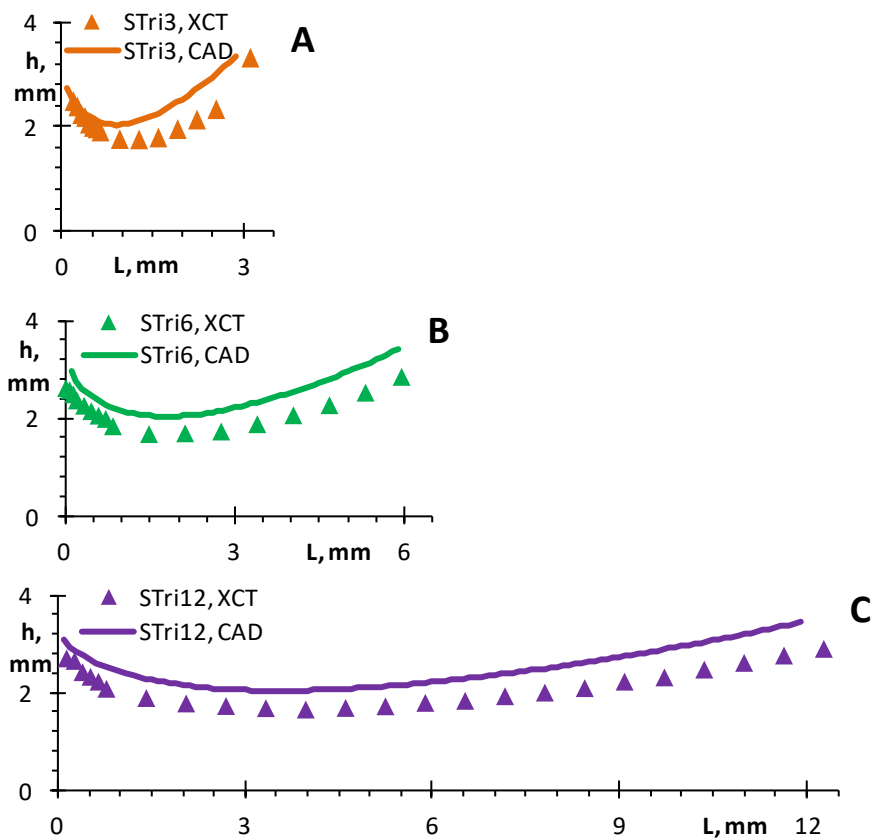
Na podstawie obrazów tomograficznych 2D wyznaczono również wysokości kanałów na całej ich długości. Pomiar wykonano dla co najmniej 3 kanałów, a otrzymane wartości uśredniono. Wyznaczone w ten sposób wysokości kanałów wydrukowanych struktur porównano z wartościami modelu CAD, a wyniki przedstawiono również w Tab. 4 i na Rys. 16 - 18.



Rys. 16. Porównanie rzeczywistej i modelowej wysokości kanałów struktur kwadratowych o długości A- 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm



Rys. 17. Porównanie rzeczywistej i modelowej wysokości kanałów struktur sześciokątnych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm



Rys. 18. Porównanie rzeczywistej i modelowej wysokości kanałów struktur trójkątnych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm

Porównując wymiary rzeczywiste i modelowe (CAD) testowanych struktur, zaobserwowano rozbieżności w odwzorowaniu krzywizny części wlotowej struktur, jak również niezgodności w odwzorowaniu wymiarów części wylotowej. Zwłaszcza dla struktur trójkątnych zauważono, że kanał wydrukowanych struktur jest węższy i dłuższy w porównaniu do modelu CAD (Rys. 18). Rozbieżności te mogą tłumaczyć niezgodności obserwowane dla tego typu struktur w wartościach  $S_v$ ,  $\varepsilon$  i  $h_{sr}$  (Tab. 4).

Ponieważ dla wypełnień strukturalnych, w tym struktur krótkokanałowych, jako wymiar charakterystyczny zwykle przyjmowana jest średnica hydrauliczna definiowana jako:

$$d_h = \frac{4\varepsilon}{S_v} \quad (7)$$

również w tej pracy jako wymiar charakterystyczny przyjęto  $d_h$ . W tym celu porównano wartości  $d_h$  wyznaczone eksperymentalnie dla rzeczywistych struktur ( $d_{h_{XCT}}$ ) oraz na podstawie modeli CAD ( $d_{h_{CAD}}$ ), co przedstawiono w Tab. 5. Dla każdego z testowanych nośników wartości te są zbliżone do siebie (wartości błędów względnych wynoszą

maksymalnie 5 %). Dlatego w dalszej części pracy symbolem  $d_h$  oznaczana będzie wartość uzyskana w oparciu o wyniki analizy XCT.

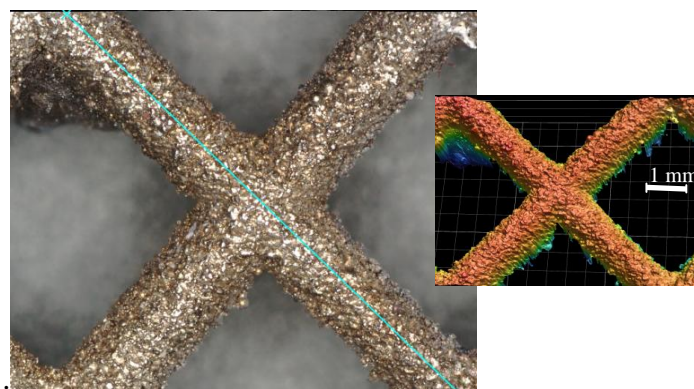
Tab. 5. Porównanie wartości średnic hydraulicznych testowanych struktur obliczonych na podstawie modelu CAD i wyników analizy tomograficznej

Struktura	$d_{hXCT}$ , mm	$d_{hCAD}$ , mm	$e_{yCAD}$ , %
SKw3	2,92	3,06	5
SKw6	3,14	3,26	4
SKw12	3,30	3,34	1
SHex3	3,02	3,06	1
SHex6	3,10	3,26	5
SHex12	3,27	3,35	2
STri3	1,49	1,54	3
STri6	1,63	1,65	1
STri12	1,65	1,69	2

W technologii SLM produkt wytwarzany jest z metalicznego proszku, selektywnie rozprowadzanego i nadtapianego za pomocą lasera warstwa po warstwie [87]. Choć metoda ta cechuje się wysoką dokładnością odwzorowania [88-92], niemożliwym jest uniknięcie powstawania pewnych defektów struktur. Różnice pomiędzy wymiarami wydruków i modelu CAD mogą wynikać z [92-98]:

- a) osadzania się na powierzchni struktury cząsteczek częściowo stopionych;
- b) niewłaściwie dobranych parametrów procesowych (zbyt wysoka/niska temperatura stopu). Jeżeli metaliczny proszek zostanie rozgrzany do niedostatecznie wysokiej temperatury, może skrzepnąć w postaci elementów przypominających krople;
- c) nieregularnej geometrii surowego proszku (odbiegającej w dużym stopniu od najbardziej korzystnego, kulistego kształtu cząsteczek proszku, ale także składającej się na przykład z aglomeratów);
- d) powstawania struktury o powierzchni przypominającej schody (konsekwencja warstwowego sposobu wytwarzania elementu);

Aby ocenić jakość wydruków wykonano topograficzną analizę powierzchni, wykorzystując profilometr optyczny (Keyence). Wyniki analizy, dla przykładowej struktury SKw3, przedstawiono na Rys. 19 oraz w Tab. 6.



Rys. 19. Obrazy powierzchni struktury wykonane za pomocą profilometru optycznego

Tab. 6. Wyniki analizy topograficznej powierzchni SKw3

Wartość parametru	Opis parametru
$Ra = 21,11 \mu\text{m}$	$Ra$ - średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości
$Rz = 11,63 \mu\text{m}$	$Rz$ - maksymalna wysokość profilu chropowatości
$Sa = 89,34 \mu\text{m}$	$Sa$ - średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia
$Sz = 2175,67 \mu\text{m}$	$Sz$ - maksymalna wysokość profilu 3D

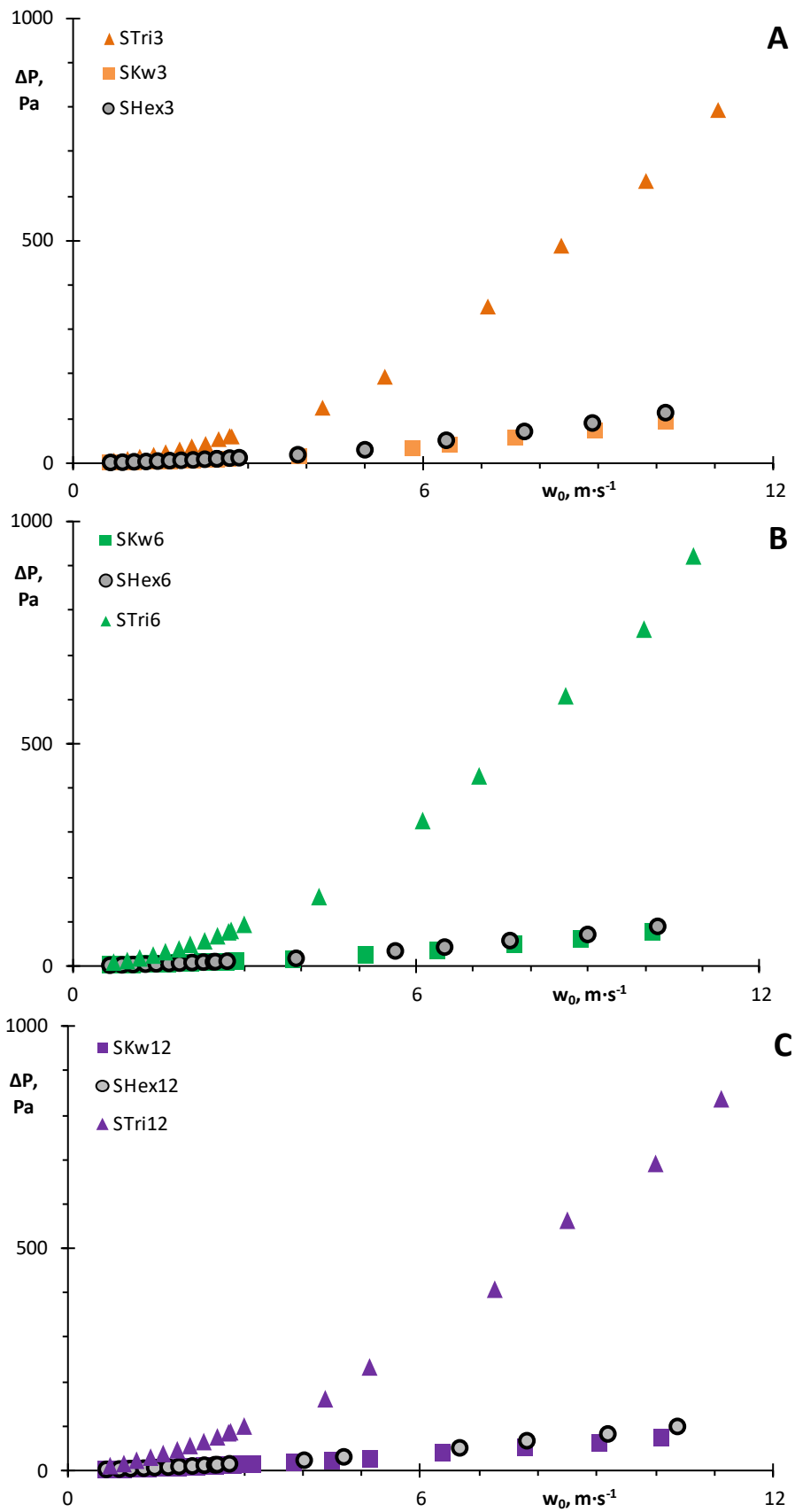
W celu określenia stopnia chropowatości powierzchni struktury posłużono się normą PN-58/M-04252-04252, która zakłada podział na 14 klas chropowatości, przy czym 1 oznacza najbardziej chropowatą powierzchnię, a 14 - najmniej chropowatą. Na podstawie wartości parametrów zebranych w Tab. 6. powierzchnia struktur odpowiada klasie 3, co świadczy o dużej chropowatości. W pracy Snyder'a i Thole'a [99] zastosowano podział wydruków na dwa rodzaje: o małej ( $Sa = 21,9 \mu\text{m}$ ) i dużej chropowatości ( $Sa = 38,4 \mu\text{m}$ ). Zgodnie z powyższą klasyfikacją, badaną strukturę należy uznać za strukturę o dużej chropowatości. W literaturze przyjmuje się, że w zakresie przepływu laminarnego rozwiniętego chropowatość powierzchni nie wpływa na opory przepływu [100, 101]. Wyjątek stanowi przepływ laminarny przez kanały o średnicach rzędu mikrometrów, gdzie wpływ chropowatości na opory przepływu jest zauważalny [102]. Natomiast w zakresie przepływu turbulentnego zwiększona chropowatość może pozytywnie wpływać na intensywność zjawisk transportowych, ponieważ wystające elementy tworzące powierzchnię nośnika zwiększają prawdopodobieństwo pojawiania się zawirowań cząsteczek płynu [103]. Można zatem przyjąć, że chropowatość powierzchni badanych struktur nie powinna istotnie wpływać na wyniki badań transportowych i przepływowych, które prowadzone były głównie w zakresie przepływu laminarnego.



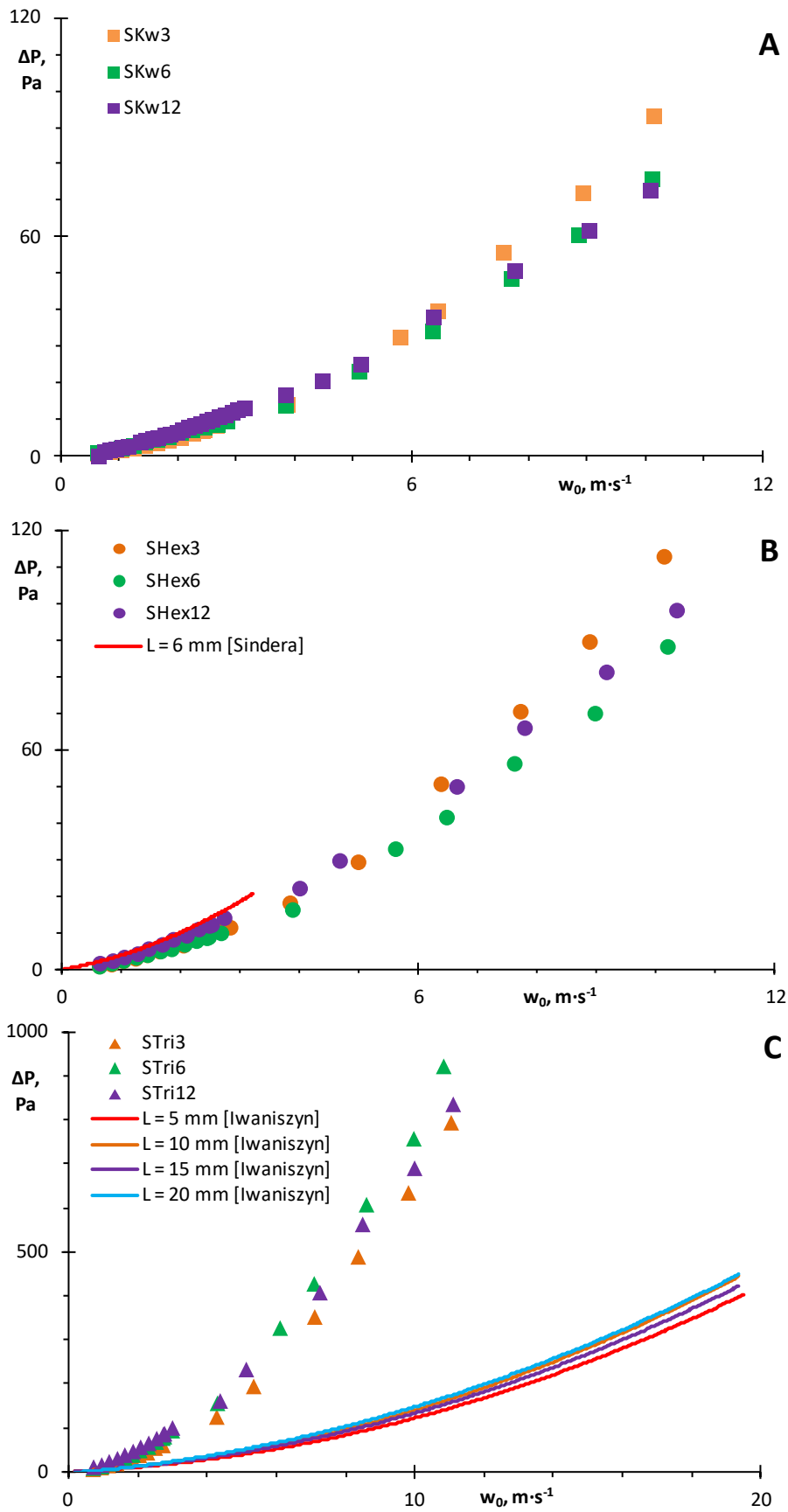
## 4.2. Opory przepływu

Jak już wspomniano wcześniej (rozdział 1.2), wartości współczynników oporu Fanninga zależą od kształtu przekroju poprzecznego kanałów. Przeprowadzono badania eksperymentalne dla oceny wpływu tego parametru na wielkość oporów przepływu dla struktur opływowych, co przedstawiono na Rys. 20. Jak można zauważyć, dla danej długości kanału, spadki ciśnienia dla struktur trójkątnych są znacznie większe, niż dla struktur sześciokątnych i kwadratowych. Różnice te rosną ze wzrostem prędkości przepływu. Spadki ciśnienia dla struktur sześciokątnych i kwadratowych są porównywalne w całym zakresie prędkości gazu  $w_0$ .

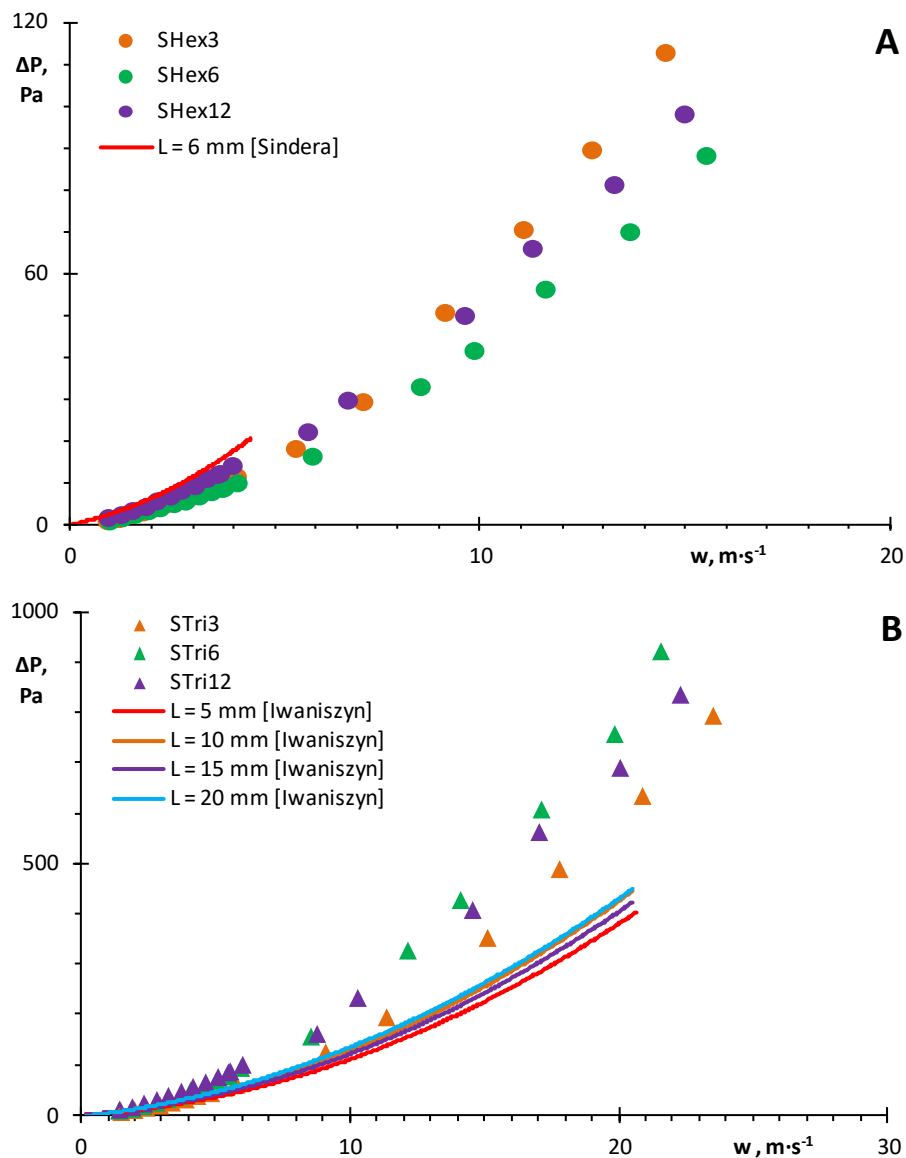
Sprawdzono również wpływ długości badanych struktur na wielkość oporów przepływu, co pokazano na Rys. 21. Jak można zauważyć, wpływ ten jest niewielki i rośnie ze wzrostem prędkości gazu. Na rysunku tym zamieszczono również wartość  $\Delta P$  dla struktur krótkokanałowych o trójkątnym [67] i sześciokątnym [65] przekroju poprzecznym kanałów (odpowiednio Rys. 21B i Rys. 21C). Podobny, niewielki wpływ długości kanałów można zauważyć również dla trójkątnych struktur krótkokanałowych. Ponadto, opory przepływu dla obu typów struktur sześciokątnych są podobne, natomiast dla struktur trójkątnych różnice te są bardzo duże. Może to wynikać z istotnie różnych wartości porowatości: dla struktury krótkokanałowej  $\varepsilon = 0,945$ , natomiast dla STri  $\varepsilon = 0,470 - 0,502$ . Aby uwzględnić tę różnicę, wyniki oporów przepływu przedstawiono w zależności od prędkości rzeczywistej ( $w = w_0/\varepsilon$ ), mając na uwadze, że jest to podejście niestandardowe, jednak w tym przypadku pozwala ująć wpływ  $\varepsilon$  na analizowaną wielkość. Wyniki przedstawiono na Rys. 22. Jak można zauważyć, opory przepływu dla struktur opływowych i krótkokanałowych są porównywalne (Rys. 22A), lub nieco większe (Rys. 22B), co jest zgodne z wynikami badań wstępnych (Rozdział 1.4).



Rys. 20. Wpływ kształtu przekroju poprzecznego kanałów na opory przepływu dla struktury o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C- 12 mm



Rys. 21. Wpływ długości struktury na opory przepływu: A - struktury kwadratowe, B - struktury sześciokątne [65], C - struktury trójkątne [67]



Rys. 22. Spadki ciśnień dla struktur opływowych i krótkokanałowych o trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów [65, 67]

Jak już wspomniano wcześniej (Rozdział 2) w literaturze brak jest prac na temat struktur opływowych, dlatego wyznaczone doświadczalnie wartości oporów przepływu dla struktur opływowych porównano z wartościami obliczonymi z korelacji literaturowych dla wypełnień monolitycznych oraz struktur krótkokanałowych, uwzględniających różne kształty przekroju poprzecznego kanałów. W większości są to jednak rozwiązania teoretyczne, które zakładają płaski profil prędkości płynu na wlocie do kanału. Oznacza to, że pomijany jest wpływ powierzchni czołowej kanału, która powoduje powstawanie składowych prędkości prostopadłych do kierunku przepływu (patrz rozdział 1.3). W większości przypadków korelacji teoretycznych wyznaczone opory są więc głównie oporami lepкими towarzyszącymi przepływowi przez kanał, natomiast w warunkach

eksperymentalnych występują również opory inercyjne [60]. W literaturze dostępne są także równania półempiryczne, np. Hawthorna [68] oraz korelacje oparte na wynikach eksperymentalnych [59, 62, 65, 67]. Równania literaturowe dla wypełnień monolitycznych i krótkokanałowych, często przedstawiają opory przepływu jako funkcję współczynnika oporu hydrodynamicznego Fanninga  $f$  w zależności od liczby Reynoldsa  $Re$ , gdzie  $f$  definiowane jest jako:

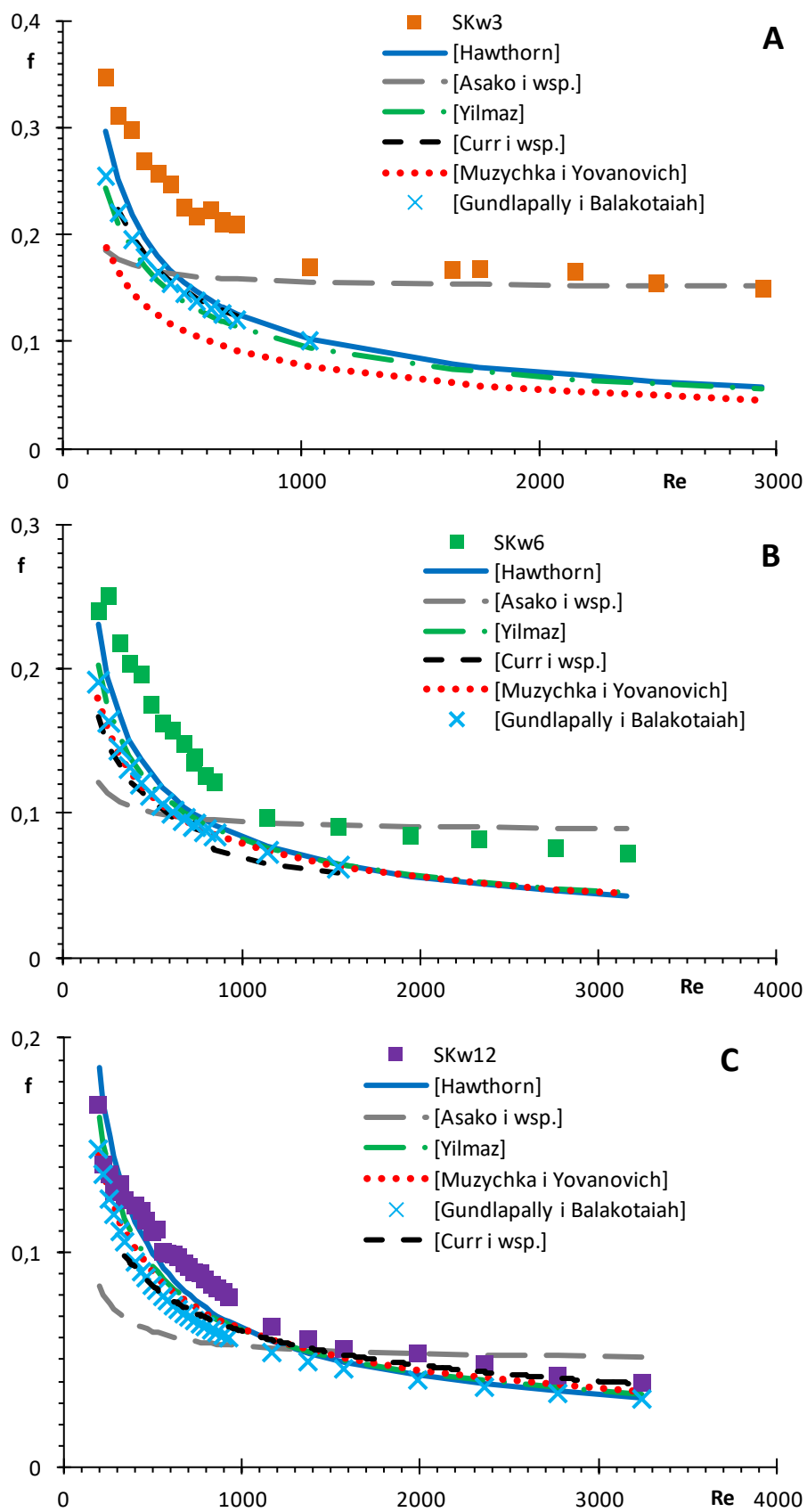
$$\frac{\Delta P}{L} = 2f \frac{\rho w_0^2}{\varepsilon^2 d_h} \quad (8)$$

W niniejszej pracy porównanie oporów przepływu dla struktur opływowych z wartościami właściwymi dla wypełnienia monolitycznego i struktur krótkokanałowych również przedstawiono w formie zależności  $f$  od  $Re$ .

Dla struktur o kwadratowym kształcie przekroju poprzecznego kanałów zastosowano równania: Hawthorna [68], Asako i wsp. [104], Yilmaza [105], Muzychki i Yovanovicha [106] oraz Gundlapally i Balakotaiah [107], które zostały zamieszczone w Tab. 7, oraz dane z pracy Curr'a i wsp. [108]. Porównanie wartości eksperymentalnych i obliczonych na podstawie korelacji literaturowych zaprezentowano na Rys. 23.

Tab. 7. Korelacje literaturowe opisujące opory przepływu dla struktur kwadratowych

Lit.	Wzór	Uwagi
Hawthorn [68]	$f \cdot Re = 14,227 \left(1 + \frac{0,045}{L^+}\right)^{0,5}$	$L^+ < 0,2$
Asako i wsp. [104]	$\frac{\Delta P}{\frac{\rho \cdot w_0^2}{2}} = 14,167 \cdot \frac{4L^+}{d_h \cdot Re} + K$	$K = 1,445$ $0,00002 < L^+ < 0,7$
Yilmaz [105]	$\Delta P = 64\psi \cdot L^+ + \frac{13,766(L^+)^{0,5}}{\left[1 + 13,95\psi \cdot (L^+)^{0,5} + \left(\frac{13,766}{K}\right)^3 \cdot (L^+)^{1,5}\right]^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}$	$\psi = \frac{1 + (\psi_\infty - 1)}{1 + 0,33 \cdot d^{*2,25}}$ $\psi_\infty = \frac{3}{8} d^{*2} \cdot (3 - d^*); n = \frac{A}{A_e}; d^* = \frac{d_e}{d_{max}}; d_e = \frac{4A}{P}$ $K = \frac{1,33}{\left[1 + \frac{\left(\frac{1,33}{K_\infty - 1}\right)}{1 + \frac{0,74 \cdot d^{*2}}{n - 1}}\right]}$ $K_\infty = \frac{12}{5} (3 - d^*)^2 \cdot \left[\frac{9}{7} \cdot \frac{3 - d^*}{7 - 3d^*} - \frac{1}{5 - 2d^*}\right]$ cały zakres $L^+$
Muzychka i Yovanovich [106]	$f \cdot Re_{\sqrt{A}} = \left[ \left( \frac{12}{\sqrt{\epsilon} \cdot (1 + \epsilon) \left[ 1 - \frac{192\epsilon}{\pi^5} \tanh\left(\frac{\pi}{2\epsilon}\right) \right]} \right)^2 + \left( \frac{3,44}{\sqrt{L^+}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	$\epsilon = 1$ cały zakres $L^+$
Gundlapally i Balakotaiah [107]	$f \cdot Re = 14,23 + \frac{0,65}{L^+ + 0,189\sqrt{L^+}}$	$0,001 < L^+ < 10$



Rys. 23. Współczynnik oporów Fanninga dla struktur kwadratowych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm. Porównanie z równaniami literaturowymi [68, 104-108]

Współczynnik oporów Fanninga dla struktur opływowych są większe lub zbliżone do wartości obliczonych według korelacji literaturowych. W zakresie dużych wartości  $Re$  (powyżej  $\sim 1000$ ) wyniki eksperymentalne dobrze zgadzają się z korelacją Asako i wsp. [104]. Natomiast dla małych wartości  $Re$ , (poniżej 1000) wyniki eksperymentalne dla SKw12 są bliskie obliczonym według równania Hawthorna [68] i Yilmaza [105]. Wartości średnich błędów względnych zawarto w Tab. 8. Dla wszystkich równań średnia wartość  $e_y$  jest podobna i wynosi około 30%. Średnie odchylenie standardowe  $\sigma$  nie przekracza 17%.

Tab. 8. Porównanie wyników eksperymentalnych i korelacji literaturowych dla struktur kwadratowych. Wartości błędów względnych i odchylenia standardowego

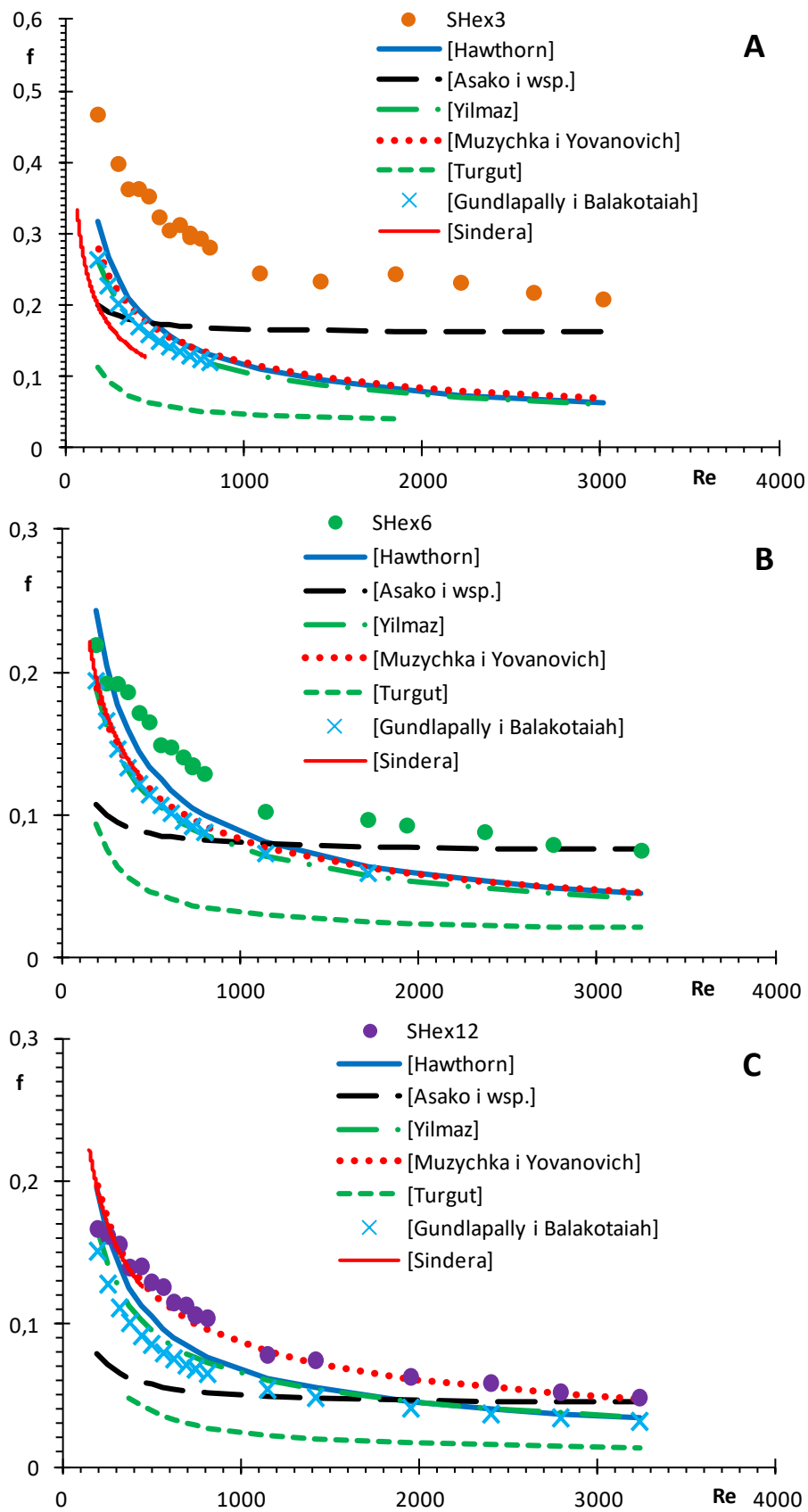
Lit.	SKw3		SKw6		SKw12		Średnia	
	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$
Hawthorn [68]	38	14	27	8	12	4	26	9
Asako i wsp. [104]	24	15	30	17	33	13	29	15
Yilmaz [105]	45	10	30	5	13	5	29	7
Curr i wsp. [108]	38	7	32	4	17	10	29	7
Muzychka i Yovanovich [106]	56	7	34	4	14	5	35	5
Gundlapally i Balakotaiah [107]	38	5	32	5	20	6	30	5

Korelacje literaturowe dla struktur o sześciokątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów zostały przedstawione w Tab. 9. Do porównania zastosowano korelacje Hawthorna [68], Asako i wsp. [104], Yilmaza [105], Muzychki i Yovanovicha [106], Gundlapally i Balakotaiah [107], oraz Turguta [49] (z pracy [65]) opracowane dla klasycznych wypełnień monolitycznych oraz korelację Sindery i wsp. [65] zaproponowaną dla struktury krótkokanałowej o długości kanału wynoszącej 6 mm. Porównanie zaprezentowano na Rys. 24.



Tab. 9. Korelacje literaturowe opisujące opory przepływu dla struktur sześciokątnych

Lit.	Wzór	Uwagi
Hawthorn [68]	$f \cdot Re = 15,054 \left(1 + \frac{0,045}{L^+}\right)^{0,5}$	$L^+ < 0,2$
Asako i wsp. [104]	$\frac{\Delta P}{\frac{\rho \cdot u_0^2}{2}} = 15,065 \cdot \frac{4L^+}{d_h \cdot Re} + K$	$K = 1,324$ $0,00002 < L^+ < 0,7$
Turgut [49] za [65]	$(f \cdot Re) = 15,077 + 0,03(L^+)^{-1,01}$	$0,0005 < L^+ < 0,1$
Yilmaz [105]	$\Delta P = 64\psi \cdot L^+ + 13,766(L^+)^{0,5} + \frac{\rho \cdot u^2}{\left[1 + 13,95\psi \cdot (L^+)^{0,5} + \left(\frac{13,766}{K}\right)^3 \cdot (L^+)^{1,5}\right]^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2}$	$\psi = \frac{1+(\psi_\infty-1)}{1+0,33 \cdot d^{*2,25}}; \psi_\infty = \frac{3}{8}d^{*2} \cdot (3-d^*); n = \frac{A}{A_e};$ $d^* = \frac{d_e}{d_{max}}; d_e = \frac{4A}{P}; K = \frac{1,33}{\left[1 + \frac{(1,33)}{K_\infty - 1}\right]^{\frac{1}{1 + \frac{0,74 \cdot d^{*2}}{n-1}}}}$ $K_\infty = \frac{12}{5}(3-d^*)^2 \cdot \left[\frac{9}{7} \cdot \frac{3-d^*}{7-3d^*} - \frac{1}{5-2d^*}\right]$ cały zakres $L^+$
Muzychka i Yovanovich [106]	$f \cdot Re_{\sqrt{A}} = \left[ \left( \frac{12}{\sqrt{\epsilon} \cdot (1 + \epsilon) \left[ 1 - \frac{192\epsilon}{\pi^5} \tanh\left(\frac{\pi}{2\epsilon}\right) \right]} \right)^2 + \left( \frac{3,44}{\sqrt{L^+}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	$\epsilon = 1$ cały zakres $L^+$
Gundlapally i Balakotaiah [107]	$f \cdot Re = 15,05 + \frac{0,65}{L^+ + 0,189\sqrt{L^+}}$	$0,001 < L^+ < 10$
Sindera i wsp. [65]	$(f \cdot Re) = 15,054 + 0,175(L^+)^{-1,19}$	$L = 6 \text{ mm},$ kanał: wysokość 2,26 mm, grubość ścianek 0,43 mm; $0,008 < L^+ < 0,1$



Rys. 24. Współczynnik oporów Fanninga dla struktur sześciokątnych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm. Porównanie z równaniami literaturowymi [49, 65, 68, 104-107]

Jak można zauważyć, eksperymentalny współczynnik oporu Fanninga dla SHex3 leży powyżej obliczonych na podstawie korelacji literaturowych. Dla struktury o długości 6 mm dobrą zgodność wyników eksperymentalnych otrzymano z obliczonymi według korelacji Hawthorna [68] dla  $Re$  poniżej 1000 i według Asako [104] dla  $Re$  powyżej 1000. Wartość  $f$  dla najdłuższej struktury (SHex12) w całym zakresie wartości liczby Reynoldsa dobrze oposane są równaniem Muzychki i Yovanovicha [106]. Porównanie wyników otrzymanych dla struktury opływowej o długości 6 mm z wynikami przedstawionymi w pracy Sindery i wsp. [65] wykazało, że współczynnik oporu Fanninga dla struktur opływowych są zbliżone lub większe niż dla struktury krótkokanałowej. Należy jednak podkreślić, że opory przepływu dla obu typów struktur były podobne (Rys. 22A), a różnice w wartościach  $f$  wynikają w różnej geometrii struktur. Porównanie wartości średnich błędów względnych i średnich odchyłeń standardowych przedstawiono w Tab. 10.

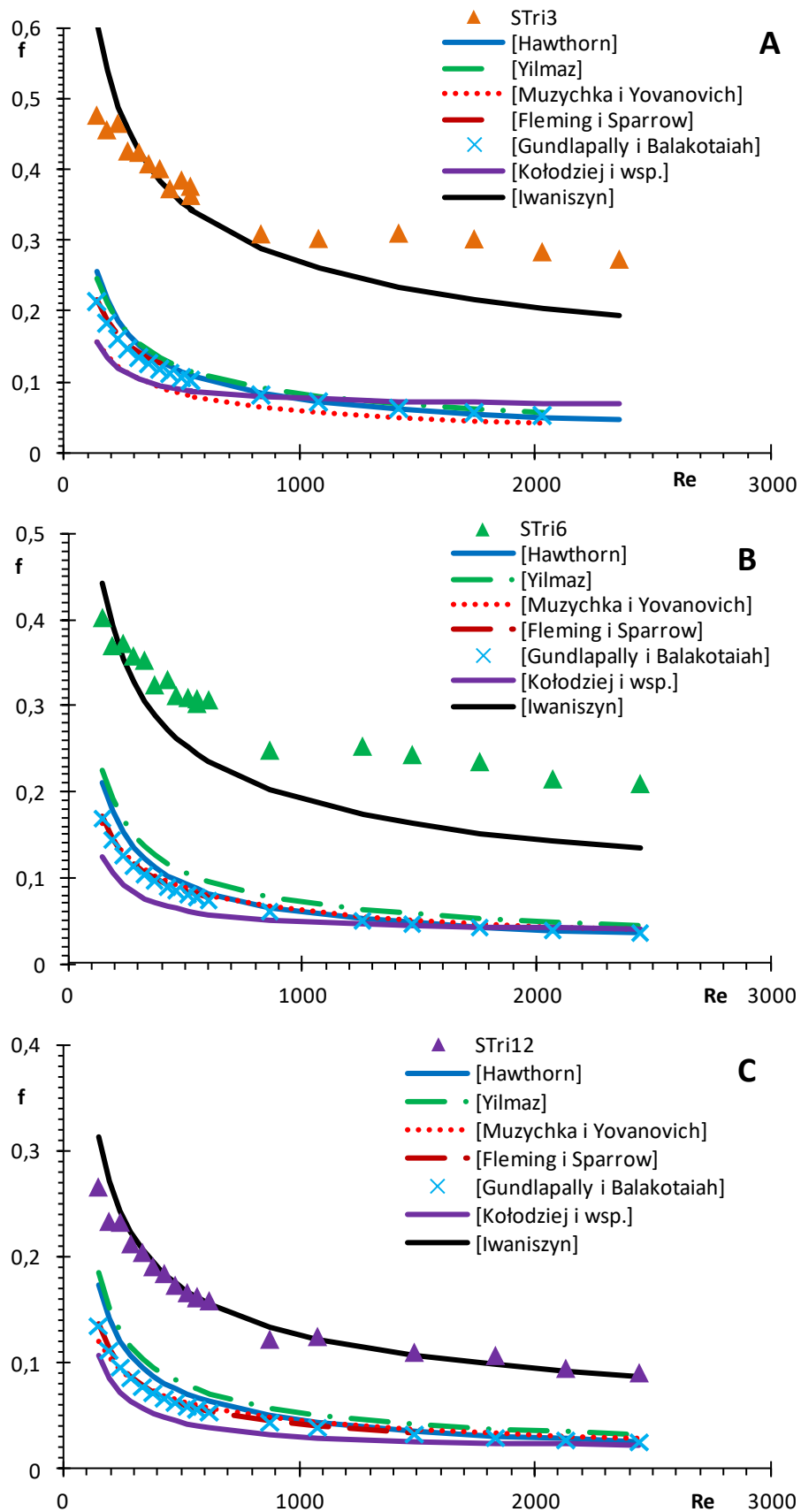
Tab. 10. Porównanie wyników eksperymentalnych i korelacji literaturowych dla struktur sześciokątnych. Wartości błędów względnych i odchylenia standardowego

Lit.	SHex3		SHex6		SHex12		Średnia	
	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$
Hawthorn [68]	52	12	23	12	21	8	32	11
Asako i wsp. [104]	41	10	34	19	43	17	39	15
Turgut [49] za [65]	81	3	70	5	72	2	74	3
Yilmaz [105]	57	9	32	12	24	7	38	9
Muzychka i Yovanovich [106]	52	9	28	10	5	4	28	8
Sindera i wsp. [65]	68	6	35	10	19	13	41	10
Gundlapally i Balakotaiah [107]	52	7	28	7	32	7	37	7

Dla struktur trójkątnych korelacje literaturowe zostały przedstawione w Tab. 11. Do porównania z eksperymentalnie otrzymanymi wartościami  $f$  dla struktur trójkątnych wybrano równania Hawthorn'a [68], Yilmaz'a [105], Gundlapally i Balakotaiah [107], Kołodzieja i wsp. [59], Iwaniszyn [67], Muzychki i Yovanovich'a [106] oraz Fleming'a i Sparrow'a [109], co przedstawiono na Rys. 24. Dostępne są również równania Miller'a i Han'a [110] oraz Gangal'a [111] jednak wyniki tych prac są bardzo zbliżone do tych przedstawionych w pracy Fleming'a i Sparrow'a [109], co stwierdzono w pracy Kołodzieja [112].

Tab. 11. Korelacje literaturowe opisujące opory przepływu dla struktur trójkątnych

Lit.	Wzór	Uwagi
Hawthorn [68]	$f \cdot Re = 13,33 \left(1 + \frac{0,045}{L^+}\right)^{0,5}$	$L^+ < 0,2$
Yilmaz [105]	$\Delta P = 64\psi \cdot L^+ + \frac{13,766(L^+)^{0,5}}{\left[1 + 13,95\psi \cdot (L^+)^{0,5} + \left(\frac{13,766}{K}\right)^3 \cdot (L^+)^{1,5}\right]^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2}$	$\psi = \frac{1+(\psi_\infty-1)}{1+0,33 \cdot d^{*2,25}}; \psi_\infty = \frac{3}{8}d^{*2} \cdot (3-d^*); n = \frac{A}{A_e};$ $d^* = \frac{d_e}{d_{max}}; d_e = \frac{4A}{P}; K = \frac{1,33}{\left[1 + \frac{\left(\frac{1,33}{K_\infty-1}\right)}{1 + \frac{0,74 \cdot d^{*2}}{n-1}}\right]}$ $K_\infty = \frac{12}{5}(3-d^*)^2 \cdot \left[\frac{9}{7} \cdot \frac{3-d^*}{7-3d^*} - \frac{1}{5-2d^*}\right]$ cały zakres $L^+$
Muzychka i Yovanovich [106]	$f \cdot Re_{\sqrt{A}} = \left[ \left( \frac{12}{\sqrt{\epsilon} \cdot (1 + \epsilon) \left[ 1 - \frac{192\epsilon}{\pi^5} \tanh\left(\frac{\pi}{2\epsilon}\right) \right]} \right)^2 + \left( \frac{3,44}{\sqrt{L^+}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	$\epsilon = 0,87$ cały zakres $L^+$
Fleming i Sparrow [109] za [112]	$f \cdot Re = 13,33 + 0,8031(L^+)^{-0,731}$	kanał: trójkąt równoboczny $0,005 < L^+ < 0,1$
Gundlapally i Balakotaiah [107]	$f \cdot Re = 13,33 + \frac{0,65}{L^+ + 0,189\sqrt{L^+}}$	$0,001 < L^+ < 10$
Kołodziej i wsp. [59]	$f \cdot Re = 13,33 + 0,124(L^+)^{-1,01}$	$L = 3,1$ mm; kanał: trójkąt równoramienny o podstawie 5,58 mm i wysokości 3,5 mm; $0,002 < L^+ < 0,05$
Iwaniszyn [67]	$f \cdot Re = 13,33 + 4,926(L^+)^{-0,64}$	$L = 5 - 20$ mm; kanał: trójkąt równoramienny o podstawie 5,5 mm i wysokości 4,5 mm; $(f \cdot Re)_{fd} = 13,333$ ; $0,0006 < L^+ < 0,3$



Rys. 25. Współczynnik oporu Fanninga dla struktur trójkątnych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm. Porównanie z równaniami literaturowymi [59, 67, 68, 105-107, 109, 112]

Wyniki eksperymentalne dobrze zgadzają się z wartościami obliczonymi według równania Iwaniszyn i wsp. [67], pomimo, że nośniki badane w tej pracy charakteryzowały się dwukrotnie większą wysokością kanałów i znacznie cieńszymi ściankami (0,05 - 0,1 mm) w porównaniu do struktur opływowych trójkątnych. Wartości  $e_y$  i  $\sigma$  dla wszystkich zastosowanych korelacji przedstawiono w Tab. 12.

Tab. 12. Porównanie wyników eksperymentalnych i korelacji literaturowych dla struktur trójkątnych. Wartości błędów względnych i odchylenia standardowego

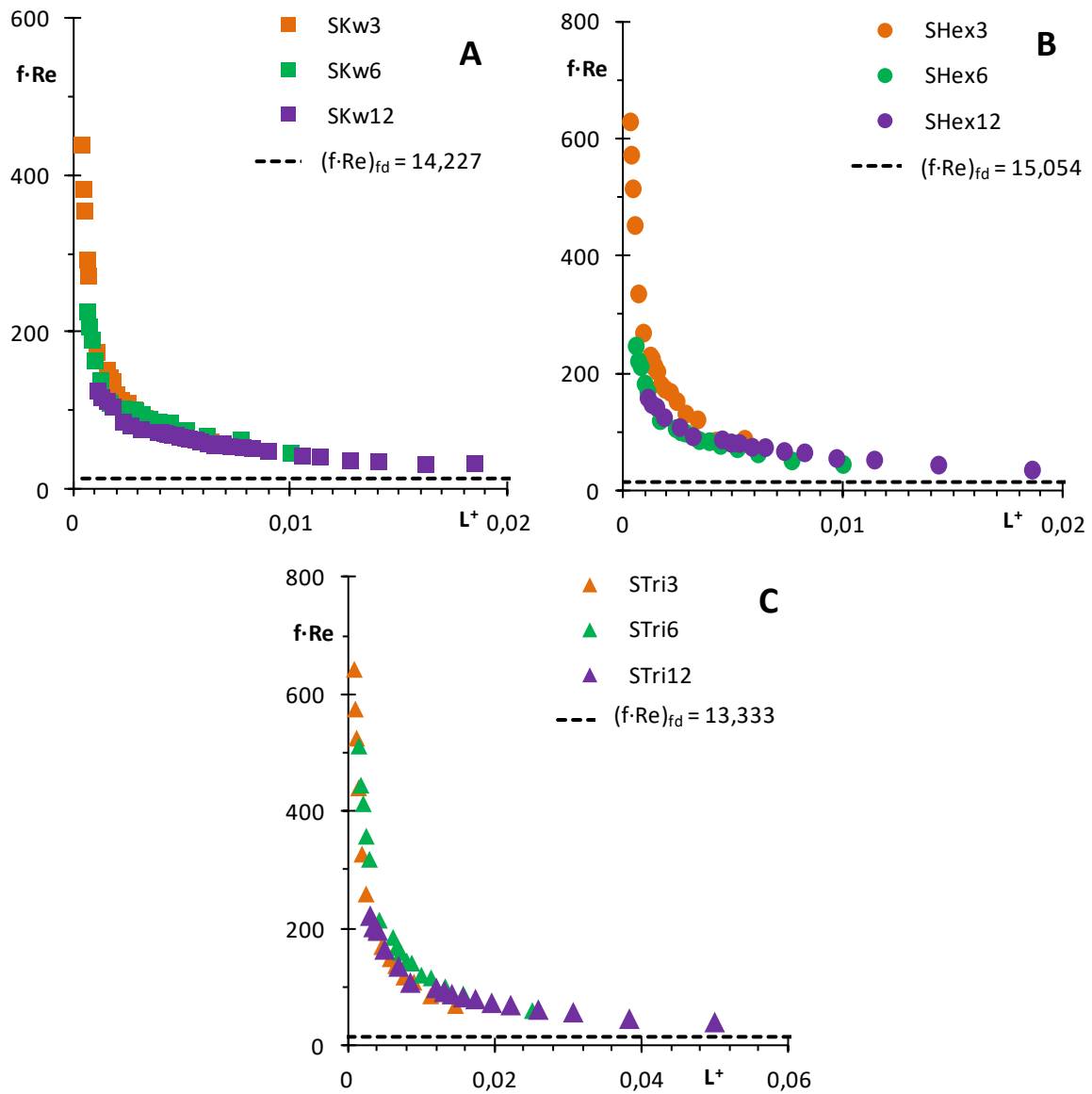
Lit.	STri3		STri6		STri12		Średnia	
	$e_y$ , %	$\sigma$ , %	$e_y$ , %	$\sigma$ , %	$e_y$ , %	$\sigma$ , %	$e_y$ , %	$\sigma$ , %
Hawthorn [68]	69	10	70	10	57	10	65	10
Yilmaz [105]	68	9	66	10	52	9	62	9
Muzychka i Yovanovich [106]	78	5	72	6	63	4	71	5
Fleming i Sparrow [109] za [112]	64	5	69	5	62	6	65	5
Kołodziej [59]	75	2	79	4	73	4	76	3
Iwaniszyn [67]	13	11	20	10	5	5	13	9
Gundlapally [107]	71	7	74	7	64	6	70	7

Dla przepływu laminarnego rozwijającego się, dla wypełnień monolitycznych i struktur krótkokanałowych, często opory przepływu opisywane są zależnością w funkcji bezwymiarowej długości kanału dla przepływu rozwijającego się hydrodynamicznie ( $L^+$ ). Również dla struktur opływowych o tym samym kształcie przekroju poprzecznego kanałów wyznaczone eksperymentalnie zależności ( $f \cdot Re$ ) od  $L^+$  są zbliżone do siebie (Rys. 26), dlatego dla każdego z nich opracowano równanie korelacyjne postaci proponowanej w literaturze:

$$f \cdot Re = (f \cdot Re)_{fd} + a \cdot (L^+)^b \quad (9)$$

które zestawiono w Tab. 13. Równania te opisują wyniki eksperymentalne ze średnim błędem względnym nieprzekraczającym 16% i maksymalnym odchyleniem standardowym wynoszącym 11% (Tab. 13). Porównanie wartości eksperymentalnych z obliczonymi na podstawie zaproponowanych korelacji przedstawiono na Rys. 27. Wszystkie wyniki eksperymentalne otrzymane dla struktur opływowych znajdują się powyżej linii właściwej

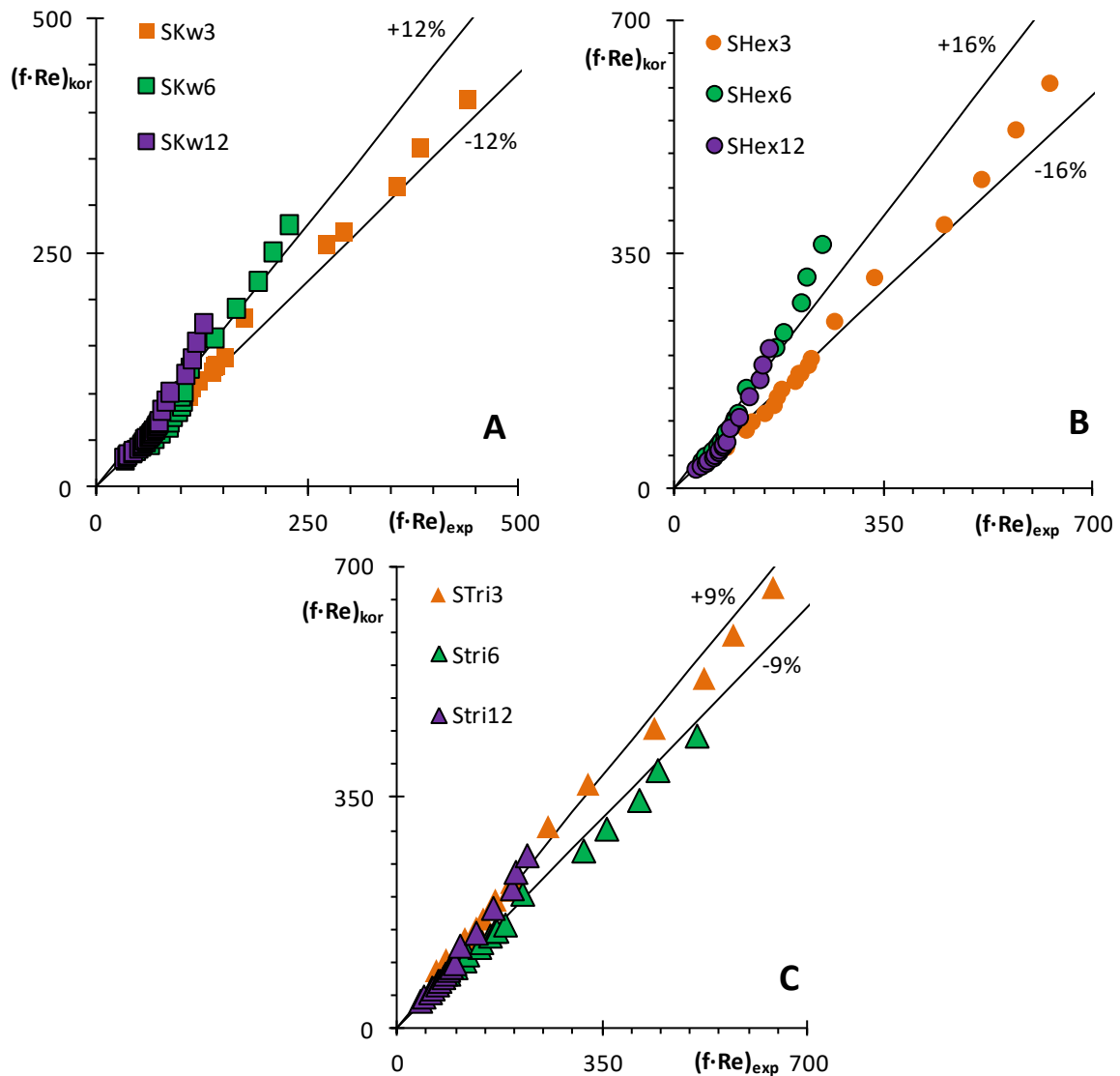
dla przepływu laminarnego w pełni rozwiniętego  $(f \cdot Re)_{fd}$ , co potwierdza występowanie rozwijającego się przepływu laminarnego w kanałach testowanych struktur.



Rys. 26. Wartość  $(f \cdot Re)$  w zależności od  $L^+$  dla struktur: A - kwadratowych, B - sześciokątnych, C - trójkątnych

Tab. 13. Równania opisujące opory przepływu dla struktur opływowych

Rodzaj struktur	Równanie	$e_y, \%$	$\sigma, \%$
Kwadratowe	$f \cdot Re = 14,227 + 0,5351 \cdot (L^+)^{-0,8388}$	12	6
Sześciokątne	$f \cdot Re = 15,054 + 0,4146 \cdot (L^+)^{-0,9077}$	16	11
Trójkątne	$f \cdot Re = 13,333 + 2,6781 \cdot (L^+)^{-0,7826}$	9	6



Rys. 27. Porównanie wartości  $(f \cdot Re)$  eksperymentalnych i obliczonych z równań wg. Tab. 13 dla struktur: A - kwadratowych, B - sześciokątnych, C - trójkątnych

Struktury opływowe porównano również z konwencjonalnymi wypełnieniami: monolitycznym oraz złożem usypanym, posiadające powierzchnię właściwą zbliżoną do testowanych struktur (około  $1000 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ ). Ich parametry przedstawiono w Tab. 14. Ponieważ najpowszechniej stosowanym wypełnieniem monolitycznym jest wypełnienie o długości 0,1 - 0,3 m [113] i kwadratowym przekroju poprzecznym kanałów (katalizator samochodowy), dlatego do porównania przyjęto monolit o długości 0,2 m, oraz kwadratowym przekroju kanałów. Opory przepływu dla monolitu wyznaczono za pomocą korelacji Hawthorna [68], natomiast dla złoża usypanego zastosowano korelację Erguna [114]:

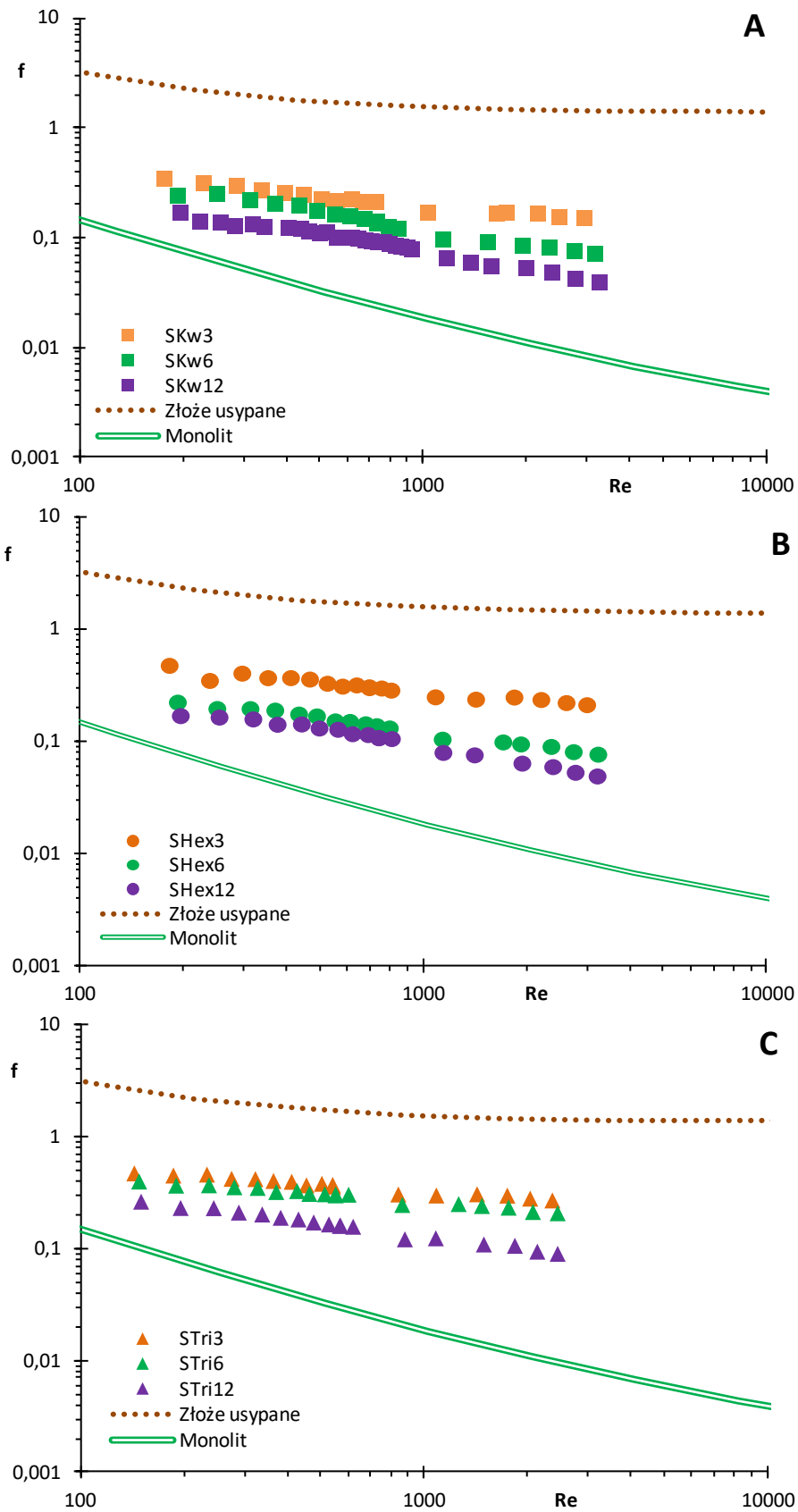
$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \cdot \frac{\eta \cdot w_0 \cdot (1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \cdot \varepsilon^3} + 1,75 \cdot \frac{\rho \cdot w_0^2 \cdot (1-\varepsilon)}{D_p \cdot \varepsilon^3} \quad (10)$$



Tab. 14. Parametry wypełnienia monolitycznego i złoża usypanego wybranych do porównania

Nośnik	$S_v$ , $m^2 \cdot m^{-3}$	$\varepsilon$	$L$ , m	$D_p$ , mm	Lit.
Wypełnienie monolityczne 50 cpsi	917	0,68	0,2		[44]
Złoże usypane o średnicy ziaren	1220	0,39		3	[115]

Wyniki porównania przedstawiono na Rys. 28. Współczynniki oporu Fanninga dla testowanych struktur, niezależnie od kształtu przekroju poprzecznego kanałów, są znacznie mniejsze w porównaniu do złoża usypanego i większe niż dla monolitu.



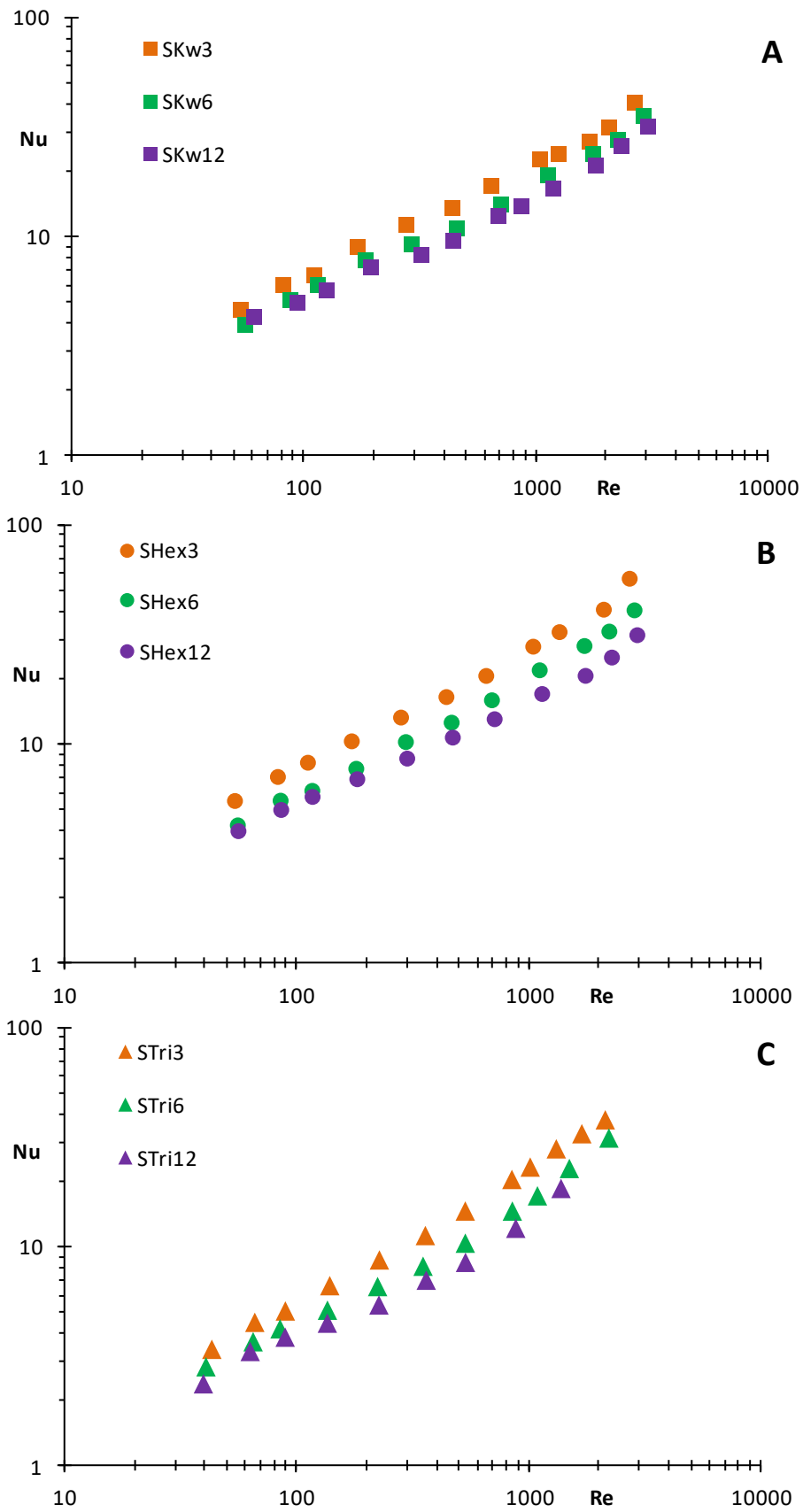
Rys. 28. Porównanie oporów przepływu dla złoża usypanego, wypełnienia monolitycznego i struktur opływowych: A - kwadratowych, B - sześciokątnych, C - trójkątnych

### 4.3. Transport ciepła

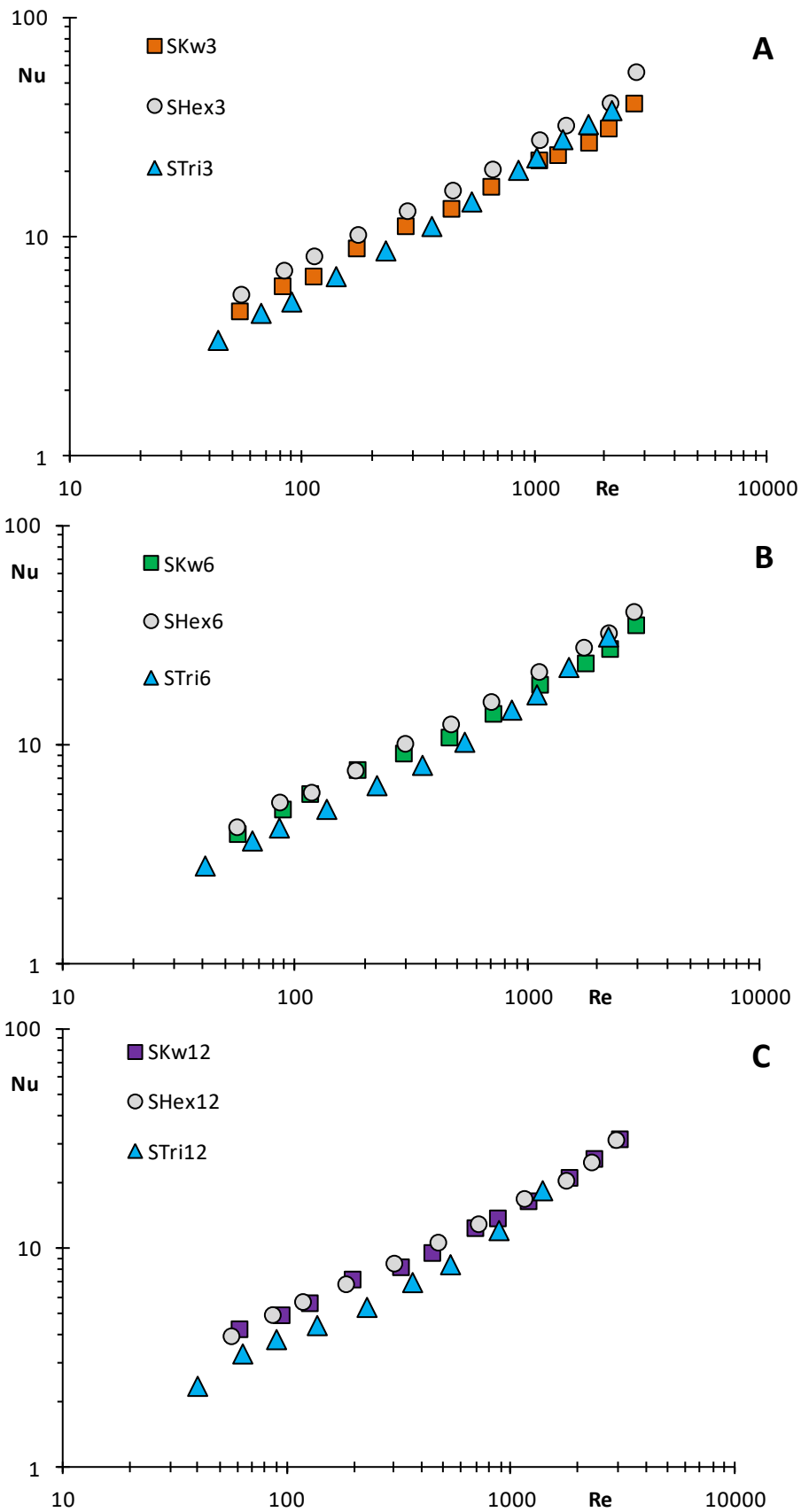
W rozdziałach 1.3 i 1.4 przedstawiono wstępną analizę zjawisk przepływowych i transportowych w strukturach krótkokanałowych i opływowych. Na Rys. 9 porównano linie prądu dla struktury prostopadłościennej i opływowej. Wyraźnie widoczna jest znaczna redukcja wirów wlotowych dla struktury opływowej. Wiry te, występujące w strukturach o prostopadłościennych ściankach mogą zaburzać transport ciepła i masy w pobliżu wlotu - a więc w miejscu, gdzie, zgodnie z teorią przepływu laminarnego rozwijającego się, transport ciepła i masy jest najintensywniejszy [58]. Struktury opływowe, wskutek braku wirów wlotowych (Rys. 9A) powinny wykazywać większą intensywność transportu ciepła i masy, jak pokazano na Rys. 10. Ponadto, właściwości transportowe struktur krótkokanałowych zależą od długości struktury (Rys. 3) oraz kształtu przekroju poprzecznego kanałów (Tab. 1). W niniejszym rozdziale przeanalizowano wpływ wymienionych powyżej parametrów na intensywność transportu ciepła dla struktur opływowych.

Badania eksperymentalne struktur krótkokanałowych opisanych w pracach [56, 57, 60, 66] wykazały, że skrócenie długości struktury powoduje zwiększenie wartości liczby Nusselta. Niewielki wpływ długości zaobserwowano również dla struktur opływowych, co pokazano na Rys. 29.

Jak przedstawiono w Tab. 1 (Rozdział 1.2), dla wypełnienia monolitycznego o tej samej długości, najbardziej korzystnymi właściwościami transportowymi dla przepływu laminarnego rozwiniętego charakteryzuje się monolit o sześciokątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów, a następnie kolejno: o kształcie kwadratowym i trójkątnym (pomijając kształt okrągły, ponieważ struktury o kanałach tego rodzaju nie badano eksperymentalnie). Dla struktur opływowych wpływ ten jest niewielki (Rys. 30). Dla nośników o kwadratowym i sześciokątnym przekroju poprzecznym kanałów wartości liczb Nusselta są zbliżone, natomiast dla struktur trójkątnych, są nieco mniejsze niż dla pozostałych struktur, niezależnie od długości nośnika.



Rys. 29. Wpływ długości struktury na wartości liczby  $Nu$ :  
 A - struktury kwadratowe, B - struktury sześciokątne, C - struktury trójkątne



Rys. 30. Wpływ kształtu przekroju poprzecznego kanału na wartości liczb Nusselta dla struktur o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm

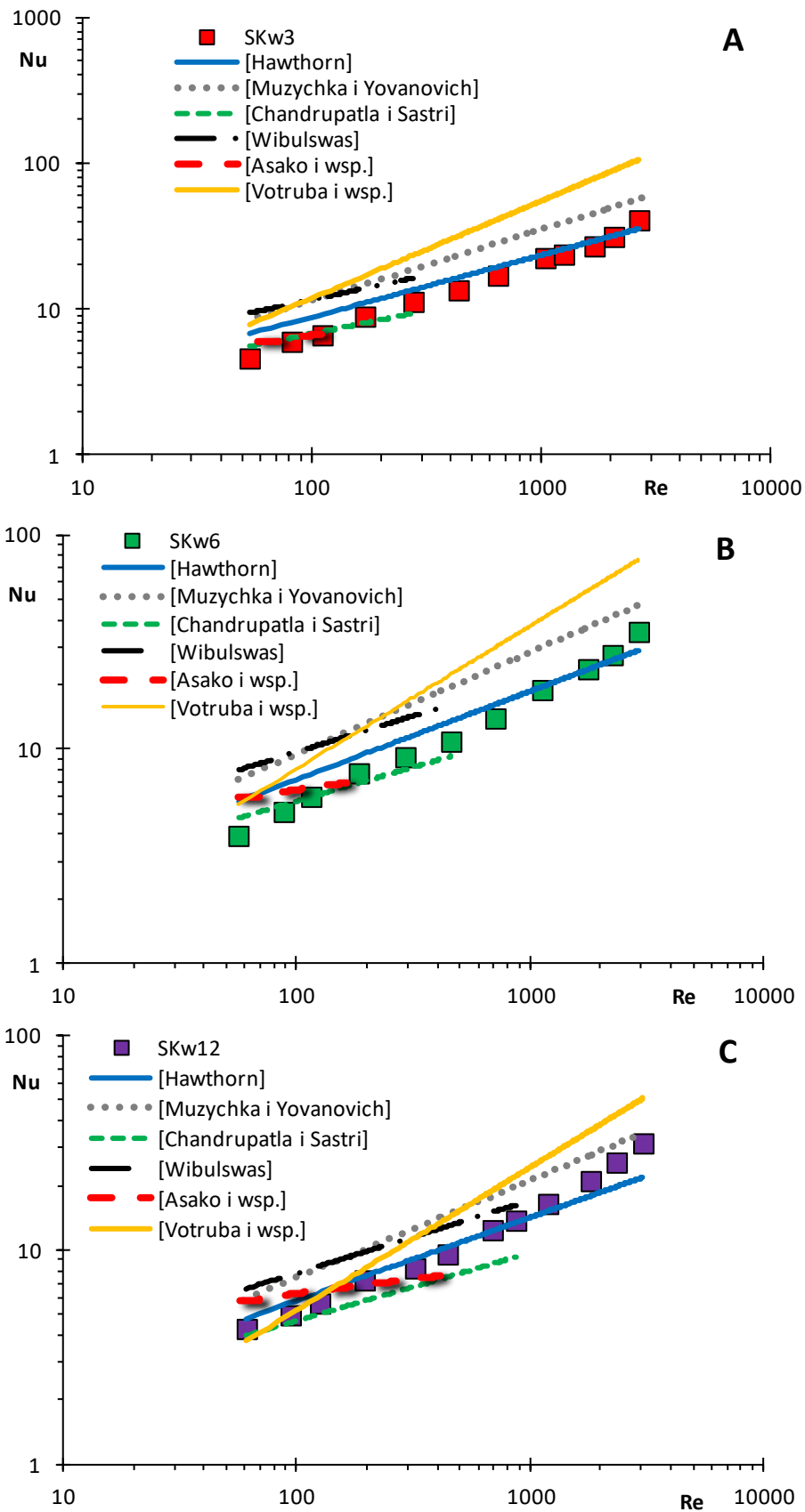
Wyznaczone dla struktur opływowych wartości liczby Nusselta porównano z wartościami obliczonymi na podstawie korelacji opracowanych dla wypełnień monolitycznych i krótkokanałowych dostępnych w literaturze. W szczególności wzięto pod uwagę te korelacje, które są obowiązujące dla zakresu rozwijającego się przepływu laminarnego w kanałach o różnych kształtach przekrojów poprzecznych. W większości są to prace teoretyczne (np: Muzychki i Yovanovich'a [106], Asako i wsp. [104], Chandrupatli i Sastri'ego [116]), zakładające płaski profil temperatury i prędkości na wlocie do kanału. Powierzchnia czołowa kanału istotnie wpływa na właściwości transportowe struktur krótkokanałowych: powoduje tworzenie się stref stagnacji i przepływów wstecznych, które wyraźnie wpływają na lokalne, a zatem i średnie wartości współczynników wnikania ciepła [66]. Dostępne są również równania opracowane na podstawie badań eksperymentalnych, uwzględniające zatem występowanie wyżej wymienionych zjawisk (np. Votruba i wsp. [117], Iwaniszyn i wsp. [62, 66, 118] i Kołodziej [59]), oraz równanie półempiryczne (Hawthorn [68]).

Dla struktur o kwadratowym kształcie przekroju poprzecznego kanałów do porównania zastosowano równania Hawthorn'a [68], Votruby i wsp. [117], Muzychki i Yovanovich'a [106] (przedstawione w Tab. 15), oraz dane z prac Wibulswasa [119], Asako i wsp. [104] oraz Chandrupatli i Sastri'ego [116], które zostały zaprezentowane przez autorów w formie tabelarycznej lub wykresów. Porównanie eksperymentalnie wyznaczonych liczb  $Nu$  z obliczonymi na podstawie równań literaturowych dla struktur kwadratowych przedstawiono na Rys. 31.

Wartości eksperymentalne dla struktur opływowych najlepiej opisują równania Hawthorna [68] niezależnie od długości testowanej struktury, oraz Chandrupatli i Sastri'ego [116] dla SKw3 i SKw6. Należy jednak zaznaczyć, że równanie opracowane na podstawie danych [116] odnosi się tylko do wartości  $Re$  mniejszych od 300, a zatem nie obejmuje całego testowanego w niniejszej pracy zakresu  $Re$ . Największe błędy otrzymano natomiast dla wartości wyznaczonych na podstawie empirycznego równania Votruby i wsp. [117]. Należy tu jednak zwrócić uwagę, że autorzy [117] zaproponowali jedno równanie dla wypełnień o długości w zakresie 12,5 - 40 mm, zatem dłuższych, niż stosowane w niniejszych badaniach, co może tłumaczyć występowanie tak dużych błędów. Wartości średnich błędów względnych i średnich odchyłeń standardowych otrzymanych dla korelacji literaturowych zostały przedstawione w Tab. 16.

Tab. 15. Korelacje literaturowe opisujące transport ciepła dla struktur kwadratowych

Lit.	Wzór	Uwagi
Hawthorn [68]	$Nu = 3,608 \left(1 + \frac{0,095}{L^*}\right)^{0,45}$	$L^* < 0,3$
Votruba i wsp. [117]	$Nu = 0,571 \left(Re \frac{d}{L}\right)^{\frac{2}{3}}$	$1 < Re \frac{d}{L} < 1000$ d od 1 do 10 mm L od 12,5 do 40 mm
Muzychka i Yovanovich [106]	$Nu_{\sqrt{A}} = \left[ \left( \frac{2 \cdot f(Pr)}{\sqrt{L^*}} \right)^m + \left( \left\{ 0,7515 \cdot \left( \frac{f \cdot Re_{\sqrt{A}}}{L^*} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}^5 + \left\{ 3,86 \left( \frac{f \cdot Re_{\sqrt{A}}}{8\sqrt{\pi} \epsilon^{0,1}} \right) \right\}^5 \right)^{\frac{m}{5}} \right]^{\frac{1}{m}}$ $m = 2,27 + 1,65 Pr^{\frac{1}{3}}; f(Pr) = \frac{0,886}{\left[ 1 + \left( 1,909 Pr^{\frac{1}{6}} \right)^{\frac{2}{9}} \right]^{\frac{2}{9}}}$	$\epsilon = \frac{b}{a}$ gdzie b - wysokość kanału, a - szerokość kanału cały zakres $L^*$



Rys. 31. Transport ciepła dla struktur kwadratowych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 m. Porównanie z równaniami literaturowymi [68, 104, 106, 116, 117, 119]



Tab. 16. Porównanie wyników eksperymentalnych i korelacji literaturowych dla struktur kwadratowych. Wartości błędów względnych i odchylenie standardowego.

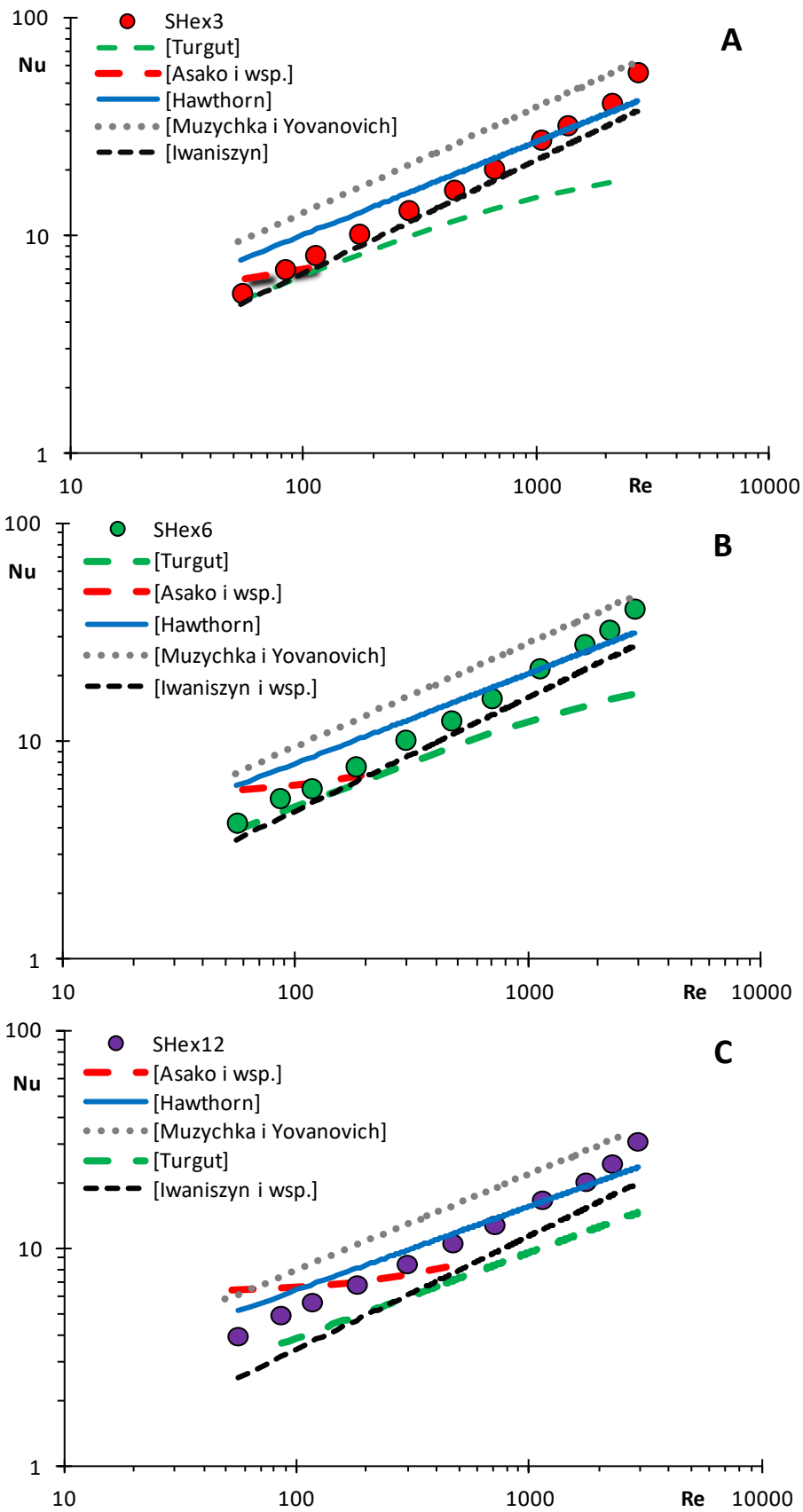
Lit.	SKw3		SKw6		SKw12		Średnia	
	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$
Hawthorn [68]	11	9	12	10	16	12	13	10
Muzychka i Yovanovich [106]	74	12	64	14	36	10	58	12
Chandrupatla i Sastri [116]	12	7	11	7	19	10	14	8
Wibulswas [119]	48	20	44	18	18	12	37	17
Asako i wsp. [104]	13	13	19	20	19	11	17	15
Votruba i wsp. [117]	130	43	89	37	41	35	87	38

Dla opływowych struktur sześciokątnych do porównań z wartościami eksperymentalnymi wykorzystano równania: Hawthorn'a [68], Muzychki i Yovanovich'a [106], Iwaniszyn i wsp. [66] (Tab. 17) oraz dane przedstawione na wykresach w pracach Asako i wsp. [104] oraz Turguta [49]. Porównanie eksperymentalnych wartości liczb Nusselta z obliczonymi z równań literaturowych zostało przedstawione na Rys. 31.

Równanie Hawthorna [68] najlepiej opisuje eksperymentalnie wyznaczone wartości liczb Nusselta. Warto zauważyć, że wartości liczb Nusselta dla struktur opływowych są nieco większe niż wyznaczone w oparciu o korelację zaproponowaną dla struktur krótkokanałowych [66], co wskazuje na intensywniejszy transport ciepła dla opracowanych struktur. Pomimo, że dla korelacji własnej opracowanej na podstawie danych z pracy Asako i wsp. [104] otrzymano małe wartości błędów względnych (Tab. 18), to jak można zauważyć na Rys. 32, obejmuje ona tylko niewielki zakres liczb  $Re$  stosowany w eksperymentach, ponadto, zależność  $Nu$  od  $Re$  przyjmuje inny przebieg niż otrzymany eksperymentalnie. Wartości średnich błędów względnych i średnich odchyłeń standardowych wyznaczonych eksperymentalnie i obliczonych z wybranych równań literaturowych wartości liczb Nusselta przedstawiono w Tab. 18.

Tab. 17. Korelacje literaturowe opisujące transport ciepła dla struktur sześciokątnych

Lit.	Wzór	Uwagi
Hawthorn [68]	$Nu = 4,002 \left( 1 + \frac{0,095}{L^*} \right)^{0,45}$	$L^* < 0,3$
Iwaniszyn i wsp. [66]	$Nu = 0,728 \cdot (L^*)^{-0,52}$	L: 1, 2, 4 mm d = 2,26 mm $0,0003 < L^* < 0,1$
Muzychka i Yovanovich [106]	$Nu_{\sqrt{A}} = \left[ \left( \frac{2 \cdot f(Pr)}{\sqrt{L^*}} \right)^m + \left( \left\{ 0,7515 \cdot \left( \frac{f \cdot Re_{\sqrt{A}}}{L^*} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}^5 + \left\{ 3,86 \left( \frac{f \cdot Re_{\sqrt{A}}}{8\sqrt{\pi}\epsilon^{0,1}} \right) \right\}^5 \right)^{\frac{m}{5}} \right]^{\frac{1}{m}}$ $m = 2,27 + 1,65Pr^{\frac{1}{3}}; f(Pr) = \frac{0,886}{\left[ 1 + \left( 1,909Pr^{\frac{1}{6}} \right)^{\frac{2}{9}} \right]^{\frac{2}{9}}}$	$\epsilon = \frac{b}{a}$ b - wysokość kanału, a - szerokość kanału cały zakres $L^*$



Rys. 32. Transport ciepła dla struktur sześciokątnych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm. Porównanie z równaniami literaturowymi [49, 66, 68, 104, 106]

Tab. 18. Porównanie wyników eksperymentalnych i korelacji literaturowych dla struktur sześciokątnych. Wartości błędów względnych i odchylenie standardowego

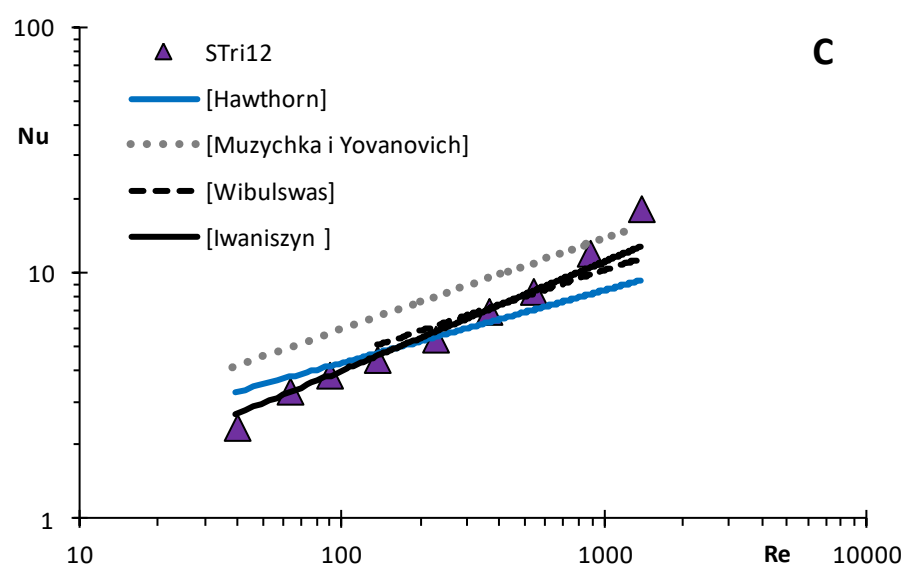
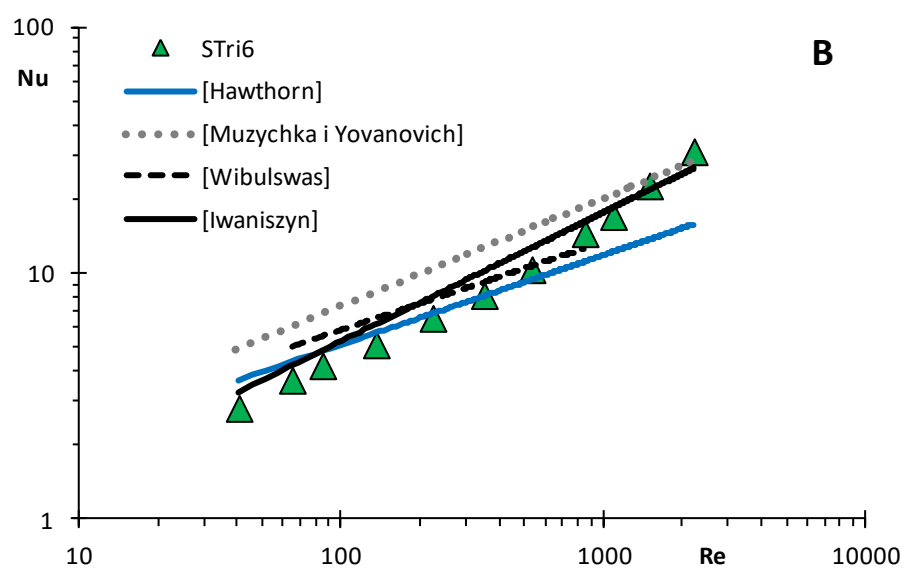
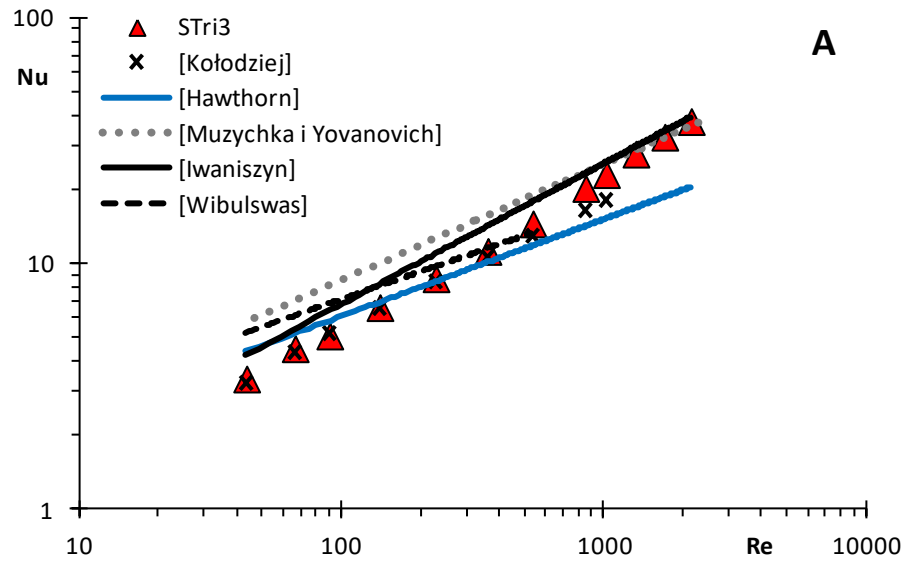
Lit.	SHex3		SHex6		SHex12		Średnia	
	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$
Hawthorn [68]	18	11	20	13	12	10	17	11
Muzychka i Yovanovich [106]	49	17	47	18	33	11	43	15
Turgut [49]	34	19	31	17	32	27	32	21
Iwaniszyn i wsp. [66]	16	7	20	6	31	4	22	6
Asako i wsp. [104]	11	6	17	16	25	21	18	14

Do porównań z wartościami eksperymentalnymi struktur trójkątnych wykorzystano równania z prac Hawthorn'a [68], Muzychki i Yovanovich'a [106] oraz Iwaniszyn [67] i Kołodzieja i wsp. [59], które zamieszczono w Tab. 19. Prace Iwaniszyn [67] oraz Kołodzieja i wsp. [59] przedstawiają wyniki badań eksperymentalnych dla struktur o trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanału, wykonanych z cienkiej blaszki kantalowej, o długości 3,1 mm [59] lub 5, 10, 15 oraz 20 mm [67].

Równanie zaproponowane w pracy Kołodzieja i wsp. [59] najlepiej opisuje wyniki eksperymentalne otrzymane dla struktur opływowych o długości 3 mm, natomiast równanie opracowane przez Iwaniszyn [67] dobrze opisuje wartości otrzymane dla struktur opływowych o długościach 6 i 12 mm. Wartości średnich błędów względnych i średnich odchyleń standardowych otrzymane dla równań literaturowych zostały przedstawione w Tab. 20.

Tab. 19. Korelacje literaturowe opisujące transport ciepła dla struktur trójkątnych

Lit.	Wzór	Uwagi
Hawthorn [68]	$Nu = 3,111 \left( 1 + \frac{0,095}{L^*} \right)^{0,45}$	$L^* < 0,3$
Wibulswas [119] za [112]	$Nu = 3,111 + 0,448 \cdot (L^*)^{-0,608}$	$0,005 < L^* < 0,1$
Kołodziej i wsp. [59]	$Nu = (3,111 + 0,448(L^*)^{-0,608}) \cdot 0,978 \cdot \exp(-9,96Pr \cdot L^*)$	L = 3,1 mm; przekrój poprzeczny kanału - trójkąt równoramienny o podstawie 5,58 mm i wysokości 3,56 mm $0,003 < L^* < 0,13$
Iwaniszyn [67]	$Nu = [3,111 + 0,448(L^*)^{-0,608}] \cdot [0,547(Pr \cdot L^*)^{-0,146}]$	L = 5 - 20 mm; przekrój poprzeczny kanału - trójkąt równoramienny o podstawie 5,5 mm i wysokości 4,5 mm $0,0008 < L^* < 0,4$
Muzychka i Yovanovich [106]	$Nu_{\sqrt{A}} = \left[ \left( \frac{2 \cdot f(Pr)}{\sqrt{L^*}} \right)^m + \left( \left\{ 0,7515 \cdot \left( \frac{f \cdot Re_{\sqrt{A}}}{L^*} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}^5 + \left\{ 3,86 \left( \frac{f \cdot Re_{\sqrt{A}}}{8\sqrt{\pi}\epsilon^{-0,3}} \right) \right\}^5 \right)^{\frac{m}{5}} \right]^{\frac{1}{m}}$ $m = 2,27 + 1,65Pr^{\frac{1}{3}}; f(Pr) = \frac{0,886}{\left[ 1 + \left( 1,909Pr^{\frac{1}{6}} \right)^{\frac{2}{9}} \right]^{\frac{2}{9}}}$	$\epsilon = \frac{b}{a}$ gdzie b - wysokość kanału, a - szerokość kanału cały zakres $L^*$



Rys. 33. Transport ciepła dla struktur trójkątnych o długości:  
 A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm. Porównanie z równaniami literaturowymi [59, 67, 68, 106, 119]

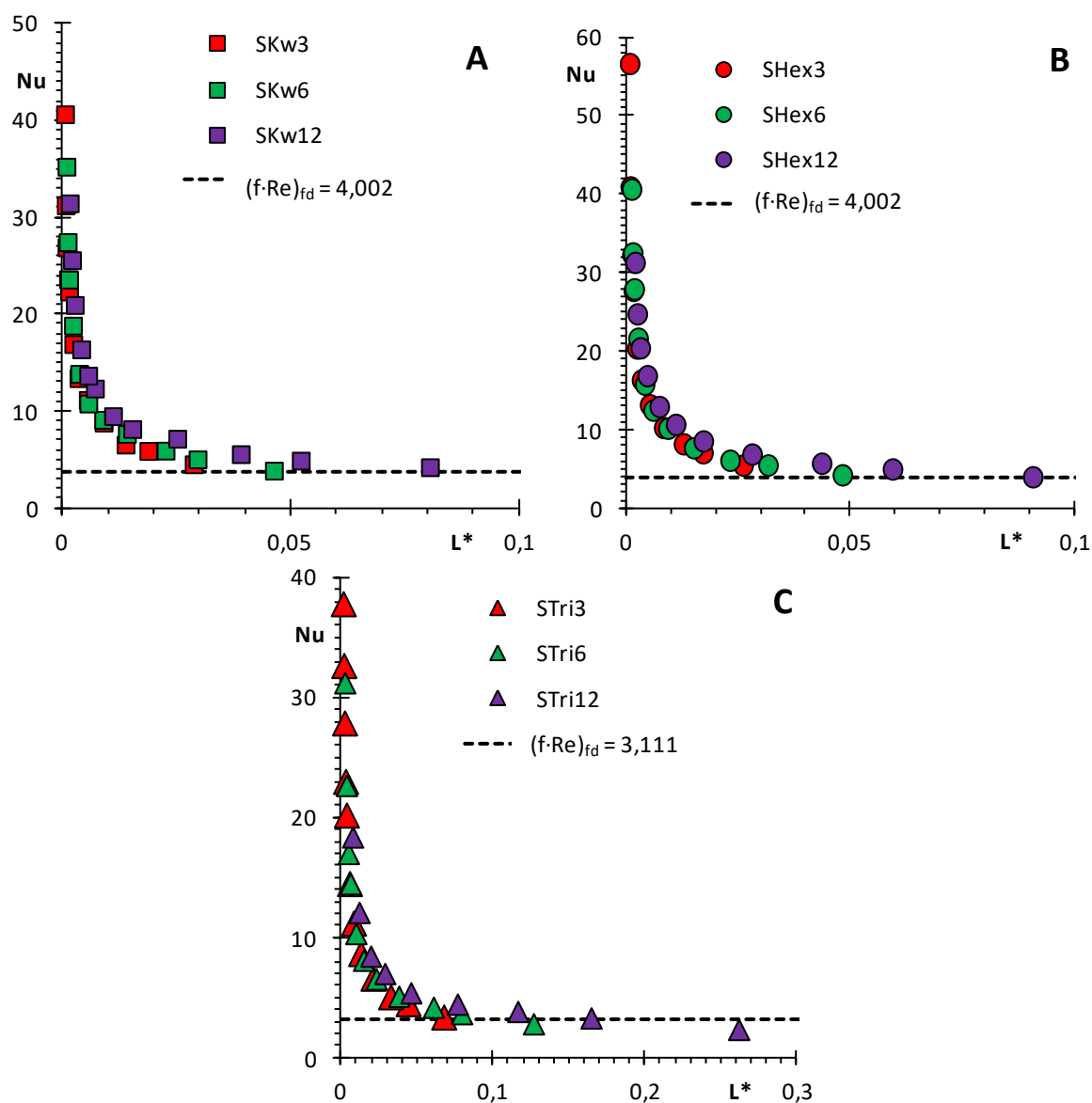
Tab. 20. Porównanie wyników eksperymentalnych i korelacji literaturowych dla struktur trójkątnych. Wartości błędów względnych i odchylenie standardowego.

Lit.	STri3		STri6		STri12		Średnia	
	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$	$e_y, \%$	$\sigma, \%$
Hawthorn [68]	47	15	43	19	42	17	44	17
Muzychka i Yovanovich [106]	36	25	43	30	37	25	39	27
Wibulswas [119]	23	21	19	17	15	17	19	18
Kołodziej i wsp. [59]	13	10						
Iwaniszyn [67]	17	8	13	9	8	9	13	9

Jak można zauważyć na Rys. 34, większość eksperymentalnie wyznaczonych wartości liczb Nusselta dla struktur opływowych leży powyżej  $Nu_{fd}$ . Potwierdza to występowanie laminarnego przepływu rozwijającego się w kanałach badanych struktur w przeważającym zakresie testowanych wartości  $L^*$ . Ponadto, wyznaczone eksperymentalnie wartości liczb  $Nu$  w zależności od  $L^*$  dla struktur o tym samym kształcie przekroju poprzecznego kanałów są zbliżone (Rys. 34), dlatego skorelowano je za pomocą jednego równania postaci:

$$Nu = Nu_{fd} \left(1 + \frac{0,095}{L^*}\right)^{0,45} \cdot a(Pr \cdot L^*)^b \quad (11)$$

Forma ta jest stosowana w literaturze i stanowi połączenie równania Hawthorna [68] oraz poprawki eksperymentalnej  $(a(Pr \cdot L^*)^b)$ . Równania korelacyjne zestawiono w Tab. 21. Zależności te opisują wartości eksperymentalne ze średnim błędem względnym i odchyleniem standardowym nie przekraczającym odpowiednio 11% i 6%, co przedstawiono na Rys. 35.

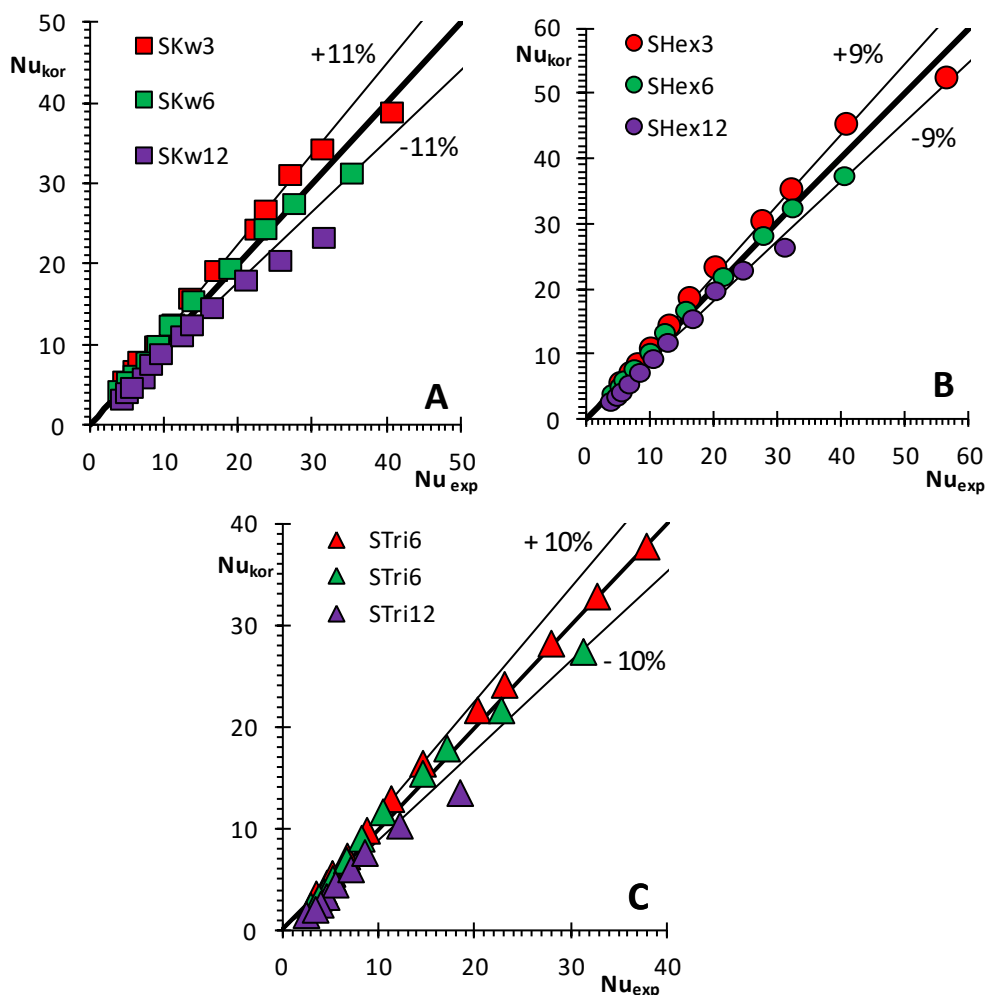


Rys. 34. Transport ciepła struktur: A - kwadratowych, B - sześciokątnych, C - trójkątnych

Tab. 21. Równania opisujące liczby Nusselta dla struktur opływowych

Rodzaj struktur	Równanie	$e_y, \%$	$\sigma, \%$
Kwadratowe	$Nu = 3,608 \left(1 + \frac{0,095}{L^*}\right)^{0,45} \cdot 0,6027(Pr \cdot L^*)^{-0,0791}$	11	6
Sześciokątne	$Nu = 4,002 \left(1 + \frac{0,095}{L^*}\right)^{0,45} \cdot 0,4891(Pr \cdot L^*)^{-0,1169}$	9	3
Trójkątne	$Nu = 3,111 \left(1 + \frac{0,095}{L^*}\right)^{0,45} \cdot 0,5064(Pr \cdot L^*)^{-0,1842}$	10	5



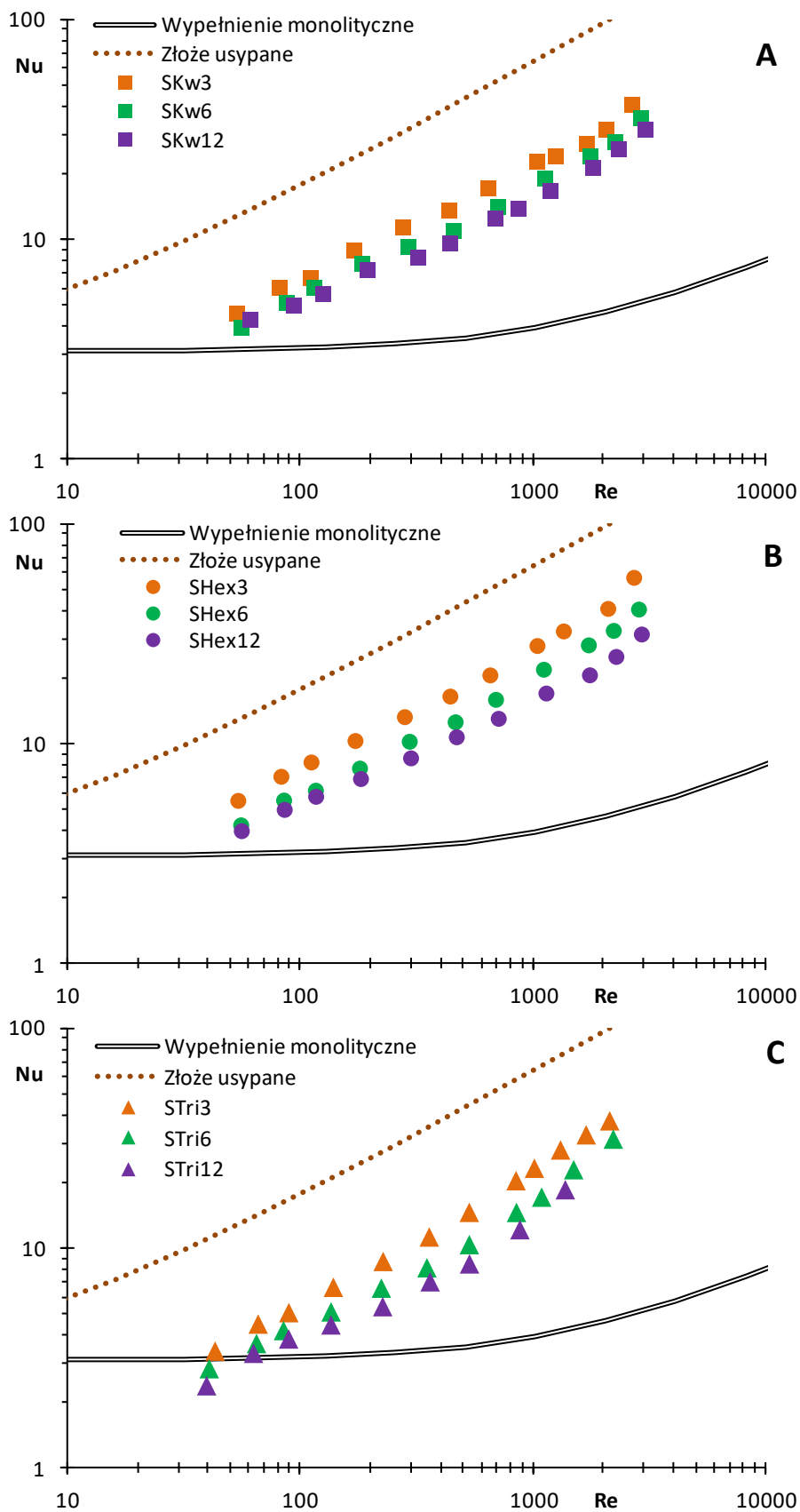


Rys. 35. Porównanie wartości eksperymentalnych i obliczonych z równań z Tab. 21 dla struktur: A - kwadratowych, B - sześciokątnych, C - trójkątnych

Porównanie właściwości transportowych badanych nośników, złoża usypanego i monolitycznego przedstawiono na Rys. 36. Parametry morfologiczne złoża i wypełnienia monolitycznego zamieszczono w Tab. 16. Do obliczenia wartości liczby Nusselta dla złoża usypanego zastosowano równanie Wakao i Kagui [120]:

$$Nu = 2 + 1,1 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{0,6} \quad (12)$$

a dla wypełnienia monolitycznego równanie Hawthorna [68] (Tab. 15). Struktury opływowe charakteryzują się wyższymi wartościami liczb Nusselta w porównaniu do wypełnienia monolitycznego i mniejszymi niż dla złoża usypanego (dla takich samych liczb Reynoldsa). Jedynie dla małych wartości liczb  $Re$ , wartości liczb Nusselta dla struktur trójkątnych i wypełnienia monolitycznego są zbliżone. Można również zauważyć, że charakterystyki  $Nu$  vs.  $Re$  dla wypełnień opływowych mają podobny przebieg, jak dla złoża usypanego.



Rys. 36. Porównanie wartości liczb Nusselta dla złoża usypanego, wypełnienia monolitycznego i struktur opływowych: A - kwadratowych, B - sześciokątnych, C - trójkątnych

## 5. Modelowanie CFD

W ramach pracy zrealizowano program symulacji CFD, których celem było głębsze poznanie zjawisk transportowych i przepływowych w badanych strukturach opływowych. Symulacje takie przeprowadzono również dla struktur krótkokanałowych o prostopadłościennych ściankach. Pozwoliło to na porównanie układu linii prądu, zwłaszcza tworzenia się wirów wlotowych i wylotowych, a także rozkładu lokalnych liczb Nusselta w obszarze kanałów struktur. Należy tu podkreślić, że symulacje te, w odróżnieniu od wstępnej analizy CFD (rozdział 1.4) wykonane zostały dla przepływu przez kanały o zaprojektowanych geometriach (patrz Tab. 5). Modelowanie CFD składało się z następujących etapów:

1. *Preprocessing* - przygotowanie modeli CAD testowanych struktur, wygenerowanie siatek obliczeniowych odpowiedniej jakości, zdefiniowanie warunków symulowanego procesu.
2. *Processing* - przeprowadzenie obliczeń numerycznych.
3. *Postprocessing* - analiza wyników symulacji.

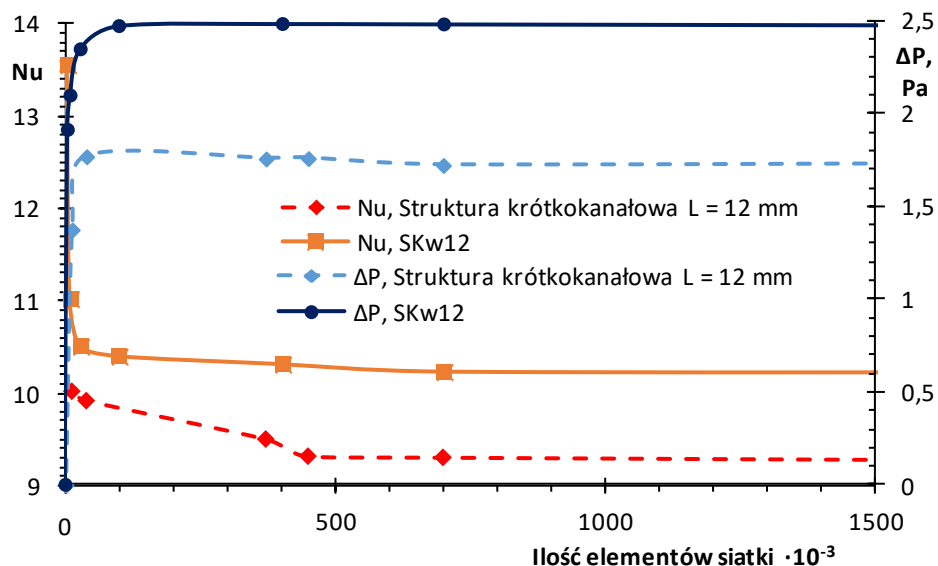
Wszystkie te etapy przeprowadzono z zastosowaniem oprogramowania firmy ANSYS.

### 5.1. Preprocessing

Za pomocą modułu DesignModeler opracowano trójwymiarowe modele CAD struktur opływowych oraz krótkokanałowych o kwadratowym kształcie przekroju poprzecznego kanałów o długościach 3, 6 i 12 mm. Każdy model odzwierciedlał kształt pojedynczego kanału, co jest zgodne z podejściem stosowanym w literaturze dla struktur monolitycznych [66, 121, 122].

Kolejnym etapem było przygotowanie siatek obliczeniowych w module Meshing. Geometrie CAD poddane zostały procesowi dyskretyzacji (podziału na mniejsze komórki, w tym przypadku - czworościany). Uzyskane domeny obliczeniowe były zagęszczone w obrębie kanału, gdzie spodziewane jest występowanie zwiększonego gradientu temperatury/prędkości/stężenia. Następnie każda z nich została przekonwertowana w module Ansys Fluent na siatkę polihedralną (składającą się z wielościanów), w celu zmniejszenia ilości komórek, a tym samym skrócenia czasu potrzebnego na wykonanie obliczeń. Ilość komórek siatki wpływa na wyniki symulacji, co pokazano w pracy [123], z tego powodu

przeprowadzono analizę CFD dla siatek składających się z różnej liczby elementów i dla każdej z nich obliczono wartość liczby Nusselta i spadku ciśnienia. Badanie jakości siatki przeprowadzono dla wszystkich testowanych struktur. Przykładowe wyniki dla struktur o długości 12 mm i prędkości gazu  $w_0 = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  przedstawiono na Rys. 37.

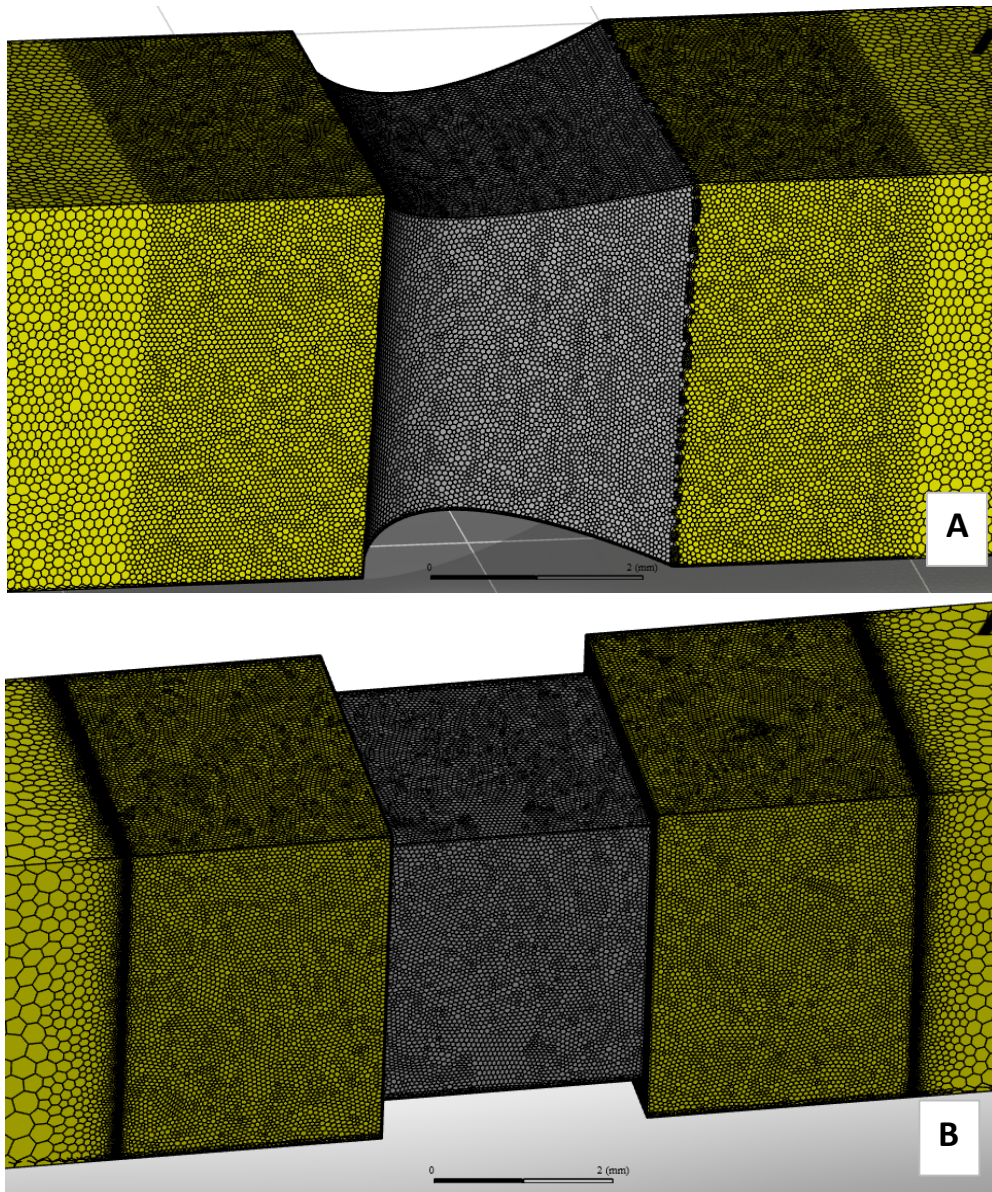


Rys. 37. Wpływ ilości elementów siatki na wartości liczb Nusselta i opory przepływu

Jak można zauważyć, wartość  $Nu$  oraz  $\Delta P$  jest stała dla siatki o liczbie elementów powyżej 700 i 450 tysięcy odpowiednio dla struktury opływowej i krótkokanałowej. Ilość zastosowanych elementów siatek dla poszczególnych struktur zestawiono w Tab. 22, a przykładowe siatki przedstawiono na Rys. 38.

Tab. 22. Ilości elementów siatek obliczeniowych

Struktura	Ilość elementów $\cdot 10^{-3}$
SKw3	2460,594
SKw6	3095,590
SKw12	2266,690
krótkokanałowa, $L = 3 \text{ mm}$	467,482
krótkokanałowa, $L = 6 \text{ mm}$	540,303
krótkokanałowa, $L = 12 \text{ mm}$	699,041



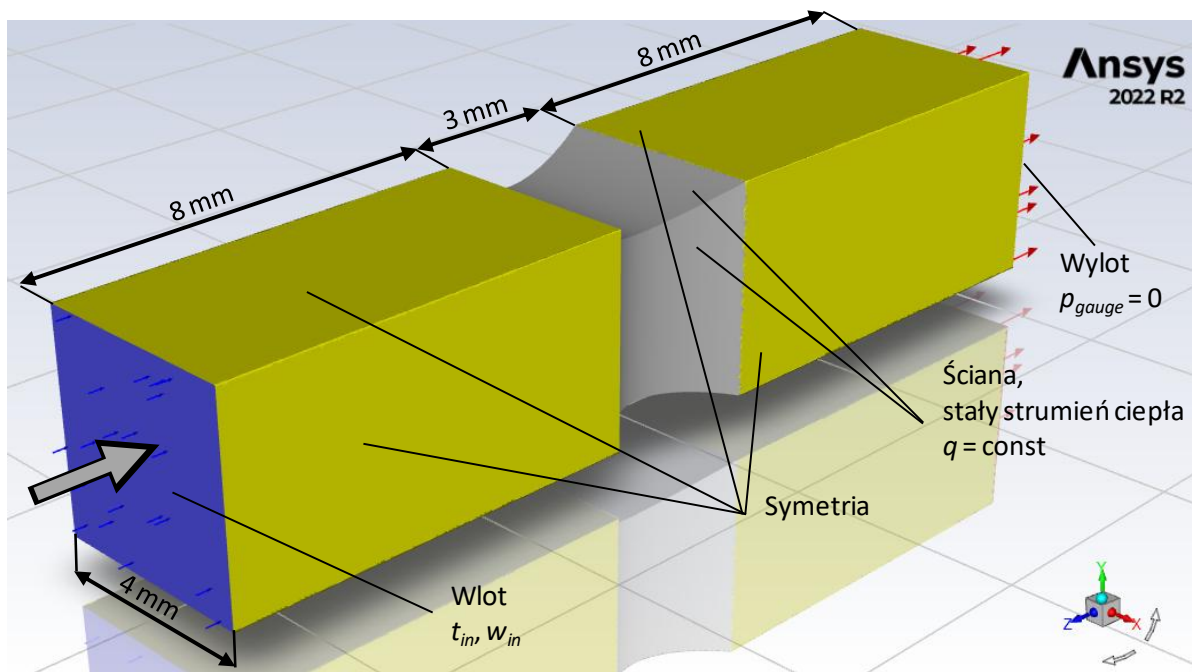
Rys. 38. Siatki obliczeniowe przykładowych struktur: A - SKw3, B - krótkokanałowej o długości 3 mm

Warunki przeprowadzonych symulacji z wykorzystaniem modułu FLUENT zdefiniowano w następujący sposób:

- laminarny przepływ powietrza,
- stan ustalony,
- zakres prędkości powietrza na wlocie do domeny obliczeniowej  $w_0 = 0,1 - 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- temperatura powietrza na wlocie do domeny obliczeniowej  $t = 300\text{K}$ ,
- stały strumień ciepła na ściankach kanału  $q = 1500 \text{ W}\cdot\text{m}^2$ ,

Warunki brzegowe dla przykładowej struktury przedstawiono w sposób graficzny na Rys. 39.

Właściwości fizyczne powietrza przyjęte na potrzeby symulacji przedstawiono w Tab. 23.



Rys. 39. Przykładowa domena obliczeniowa (struktury SKw3) wraz z warunkami brzegowymi

Tab. 23. Właściwości powietrza zastosowane w symulacjach CFD

Właściwość fizykochemiczna	Wartość
Gęstość $\rho$ , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1,225
Ciepło właściwe $c_p$ , $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1006,43
Współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda$ , $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0,0242
Dynamiczny współczynnik lepkości $\eta$ , $\text{Pa}\cdot\text{s}$	$1,7894\cdot 10^{-5}$

## 5.2. Processing

Obliczenia wykonane zostały z zastosowaniem następujących równań [124, 125]:

a) ciągłości

$$\nabla \cdot w = 0 \quad (14)$$

b) transportu pędu

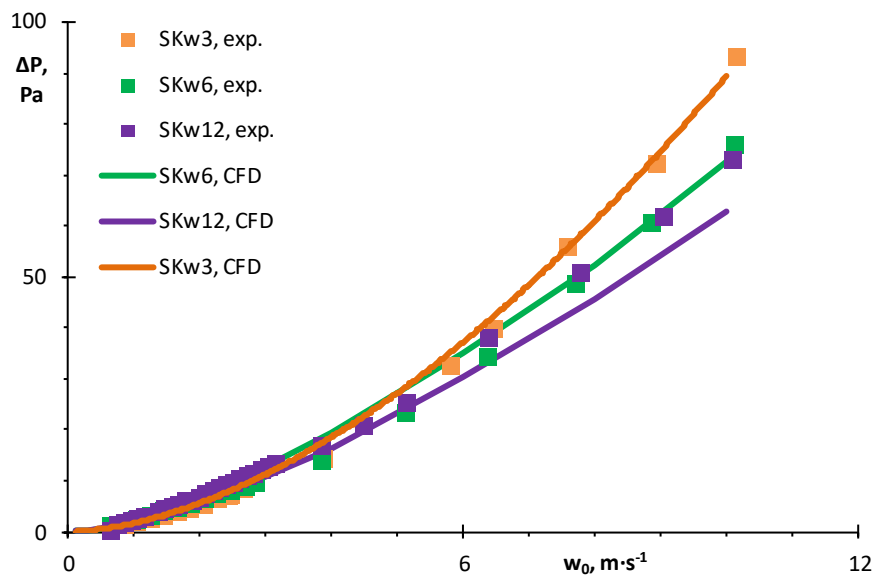
$$\nabla \cdot (w w) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \eta \nabla^2 w \quad (15)$$

c) transportu ciepła

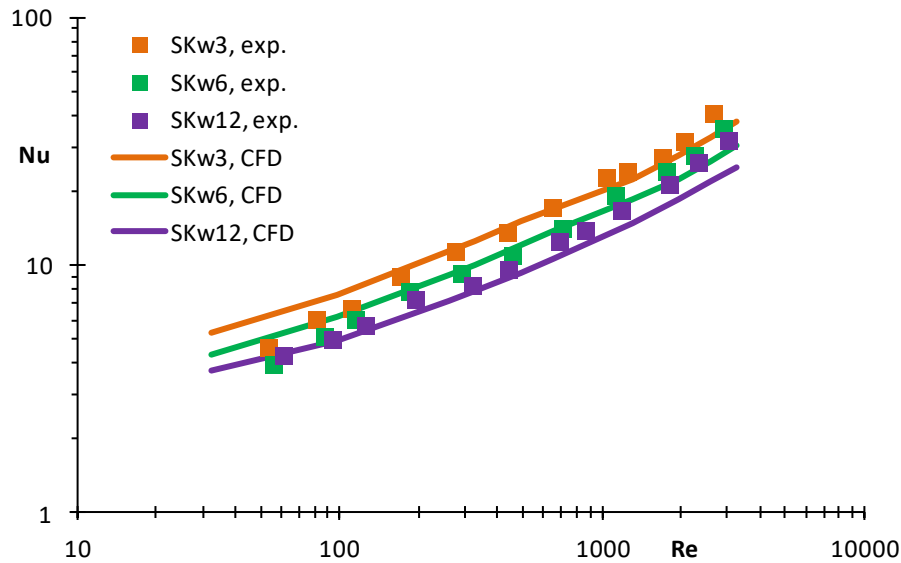
$$\nabla \cdot (wT) = \frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla^2 T \quad (16)$$

### 5.3. Postprocessing

W pierwszej kolejności zweryfikowano dokładność analizy CFD za pomocą wyników eksperymentalnych. Na Rys. 40 i Rys. 41 przedstawiono porównanie oporów przepływu i wartości liczb Nusselta uzyskanych eksperymentalnie oraz z symulacji komputerowych. Sposób obliczenia numerycznie wyznaczanych spadków ciśnienia oraz współczynników wnikania ciepła był taki sam jak dla eksperymentów. Wartości średnich błędów względnych i odchyłeń standardowych przedstawiono w Tab. 24. Porównanie danych eksperymentalnych z wynikami analizy numerycznej wykazało dobrą zgodność (maksymalna wartość  $e_{y_{CFD}}$  wynosiła 18 % oraz 13 % odpowiednio dla badań oporów przepływu oraz transportu ciepła). Obserwowane rozbieżności mogą wynikać z różnych geometrii modeli CAD i wydruków 3D, np. krzywizny ścianek kanałów (Rys. 16).



Rys. 40. Porównanie oporów przepływu wyznaczonych eksperymentalnie i za pomocą symulacji CFD



Rys. 41. Porównanie wartości liczb Nusselta wyznaczonych eksperymentalnie i przy zastosowaniu symulacji CFD

Tab. 24. Porównanie wyników symulacji CFD i eksperymentalnych dla struktur kwadratowych. Wartości błędów względnych i odchylenia standardowego

Struktura	Opory przepływu		Transport ciepła	
	$e_{y_{CFD}}, \%$	$\sigma, \%$	$e_{y_{CFD}}, \%$	$\sigma, \%$
SKw3	18	14	6	6
SKw6	12	9	7	6
SKw12	18	6	13	6

Jak wspomniano wcześniej, symulacja CFD pozwala na głębsze poznanie zjawisk transportowych i przepływowych zachodzących w kanałach badanych struktur. Na Rys. 42 przedstawiono rozkłady temperatur i linie prądu (ang. *streamlines*) powietrza w strukturze opływowej o długości 3 mm o kwadratowym kształcie przekroju poprzecznego kanałów dla prędkości  $w_0$  równej 0,3, 2 oraz 6  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (co odpowiada liczbom Reynoldsa  $Re$  odpowiednio: 89, 592 oraz 1777). Wyniki zaprezentowano w płaszczyznach umiejscowionych w osi kanału (Rys. 42A) i przy ścianie (Rys. 42B) oraz na jego przekątnej (Rys. 42C).

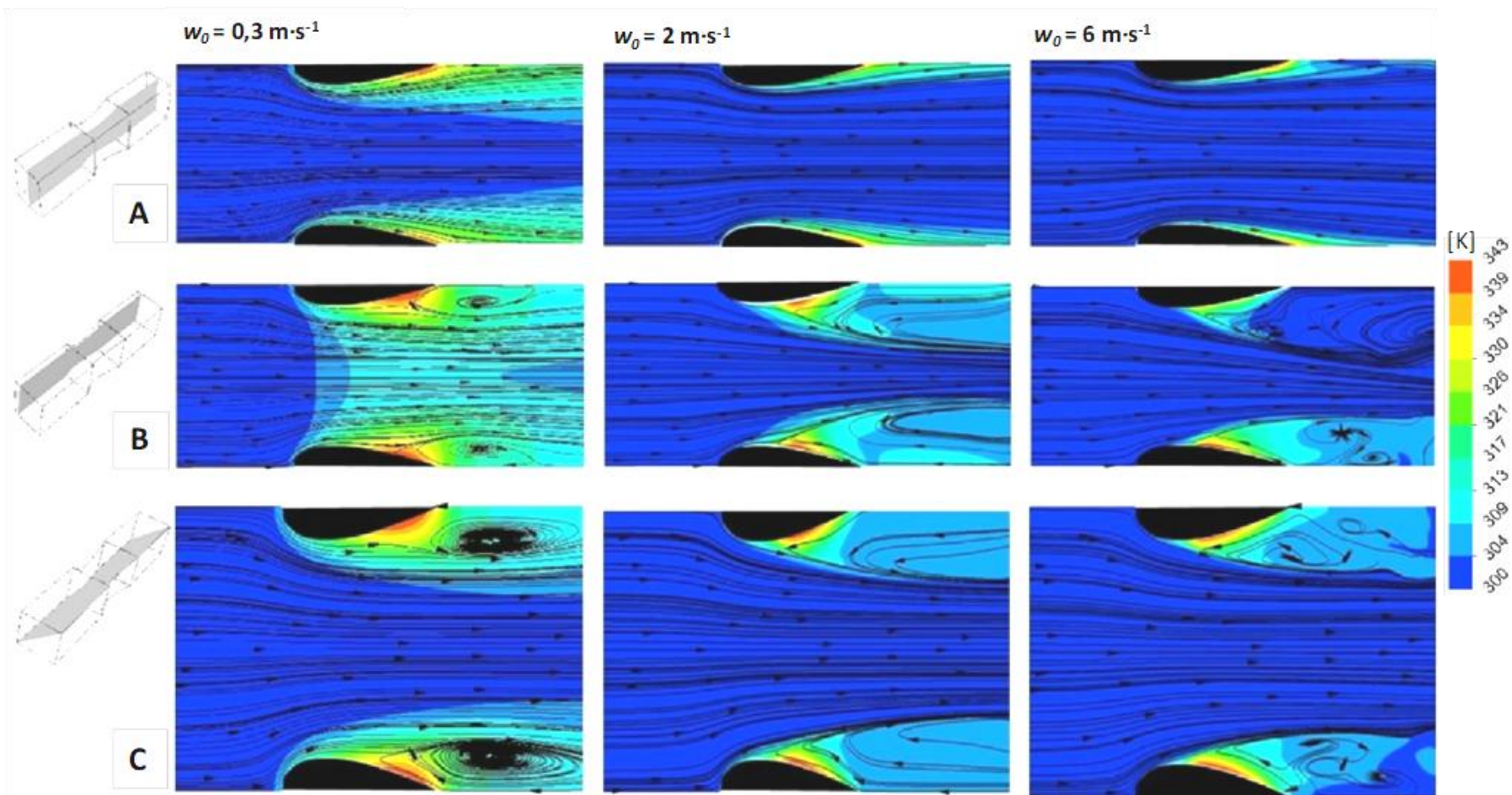
W osi kanału dla prędkości  $w_0 = 0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Rys. 42A) brak jest wirów zarówno we wlotowej, jak i wylotowej części struktury. W rdzeniu płynu linie prądu są równoległe względem siebie, przepływ ma charakter laminarny. Największy gradient temperatury obserwowany jest we wlotowej części kanału, co wskazuje na występowanie znacznych wartości lokalnych liczb Nusselta ( $Nu_{loc}$ ) w tej części struktury. Miejscowy wzrost



temperatury płynu widoczny jest przy powierzchni położonej w wylotowej części kanału (na tzw. krawędzi spływu), co świadczy o zmniejszonej wymianie ciepła w tym obszarze.

W płaszczyźnie ułożonej przy ścianie kanału (Rys. 42B) również nie obserwuje się tworzenia wirów we wlotowej części struktury, natomiast pewne zaburzenia przepływu (wiry) występują przy wylotowej części kanału. Ich powierzchnia zwiększa się ze wzrostem prędkości płynu. Wiry te, chociaż powodują zmniejszenie gradientu temperatury w środkowej części kanału, jednocześnie intensyfikują wymianę ciepła na jego końcu. Ze wzrostem prędkości gazu obserwowane jest przesunięcie obszaru o zmniejszonym gradiencie temperatury w kierunku wlotu do kanału. Dla  $w_0 = 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  za strukturą widoczne są znaczne wiry, różniące się między sobą wyglądem i rozkładem temperatur, co może świadczyć o niestacjonarnym charakterze przepływu.

Dla  $w_0 = 0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  większe wiry wylotowe obserwowano na przekątnej kanału (Rys. 42C) niż przy jego ścianie (Rys. 42B). Dla większych prędkości płynu, różnice takie nie występowały. Wraz ze wzrostem  $w_0$ , w wyniku oddziaływania wirów umiejscowionych w wylotowej części geometrii i za strukturą, obszar o zwiększonej temperaturze (a tym samym o zmniejszonym gradiencie temperatur i mniejszych wartościach liczb Nusselta) zostaje przesunięty w stronę wlotu kanału, powodując równocześnie wzrost intensywności wymiany ciepła w pobliżu krawędzi spływu.



Rys. 42. Rozkłady temperatur oraz linie prądu płynu w domenie obliczeniowej struktury opływowej o długości 3 mm - SKw3

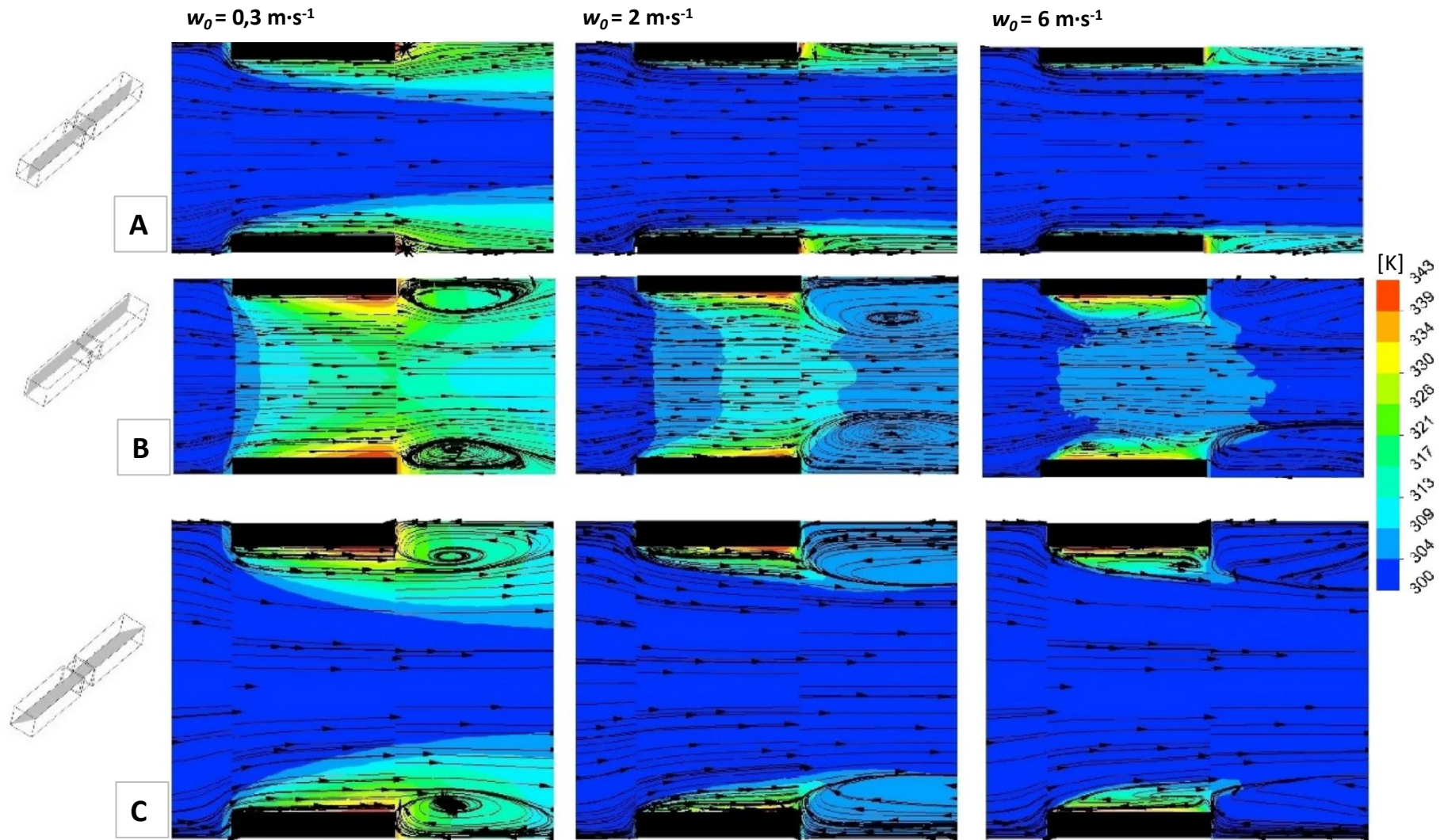
Na Rys. 43 przedstawiono rozkłady temperatur i linii prądu płynu dla struktury krótkokanałowej dla analogicznie umiejscowionych płaszczyzn, jak dla struktury opływowej, natomiast na Rys. 44 pokazano rozkłady prędkości dla wlotowych części kanałów.

W płaszczyźnie w osi kanału (Rys. 43A), w całym testowanym zakresie prędkości  $w_0$ , widoczne są zaburzenia przepływu w wylotowej strefie kanału, natomiast w rdzeniu płynu przepływ ma charakter laminarny. W strefie wlotowej kanału obserwowane są strefy stagnacji (Rys. 44A), które mogą zmniejszać intensywność wymiany ciepła w tym obszarze.

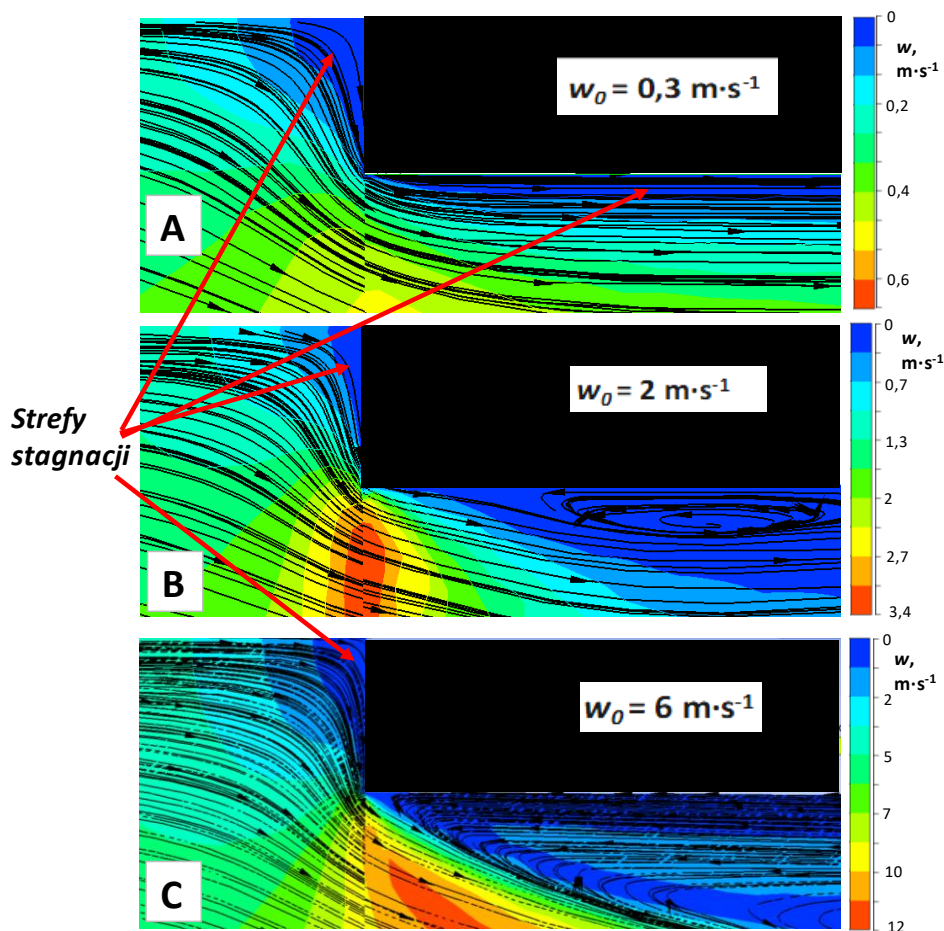
W płaszczyźnie umiejscowionej przy ścianie kanału (Rys. 43B), wiry wylotowe są widoczne we wszystkich przekrojach, przy czym ich intensywność wzrasta z prędkością płynu. W wylotowej strefie kanałów występują obszary o zmniejszonym gradiencie temperatur. Dla  $w_0 = 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  obszary te ulegają przesunięciu w kierunku części wlotowej kanału. Przy powierzchni czołowej geometrii również występują strefy stagnacji (zob. Rys. 44B).

W płaszczyźnie umiejscowionej na przekątnej kanału (Rys. 43C) w narożach kanałów obserwowane są zawirowania, o większym rozmiarze niż te, widoczne w pozostałych płaszczyznach. Na rozkładach prędkości widoczne są zarówno obszary stagnacji, jak i przepływy wsteczne (zob. Rys. 44C).

Przedstawione rozkłady temperatur i linie prądu dla struktury opływowej (Rys. 42) i krótkokanałowej (Rys. 43 oraz Rys. 44) znacząco różnią się między sobą. Różnice te dotyczą tworzenia się przepływów wstecznych, umiejscowienia wirów i stref stagnacji oraz ich wpływu na właściwości transportowe struktur. Dla geometrii krótkokanałowej, w przeciwieństwie do opływowej, w całym testowanym zakresie prędkości występują wiry wlotowe. Wiry wylotowe tworzą się dla obu geometrii, jednak w przypadku struktury opływowej intensyfikują one wymianę ciepła w wylotowej części kanału. Zjawisko to w przypadku struktur krótkokanałowych jest słabo zauważalne. Tego rodzaju zaburzenia mogą przyczyniać się do powstawania maksimum i minimum lokalnych rozkładów liczb Nusselta ( $Nu_{loc}$ ) w wylotowej części kanałów. Wspólną cechą obu struktur jest tworzenie się największych wirów w narożach kanałów. (Rys. 42B, C i Rys. 43B, C).

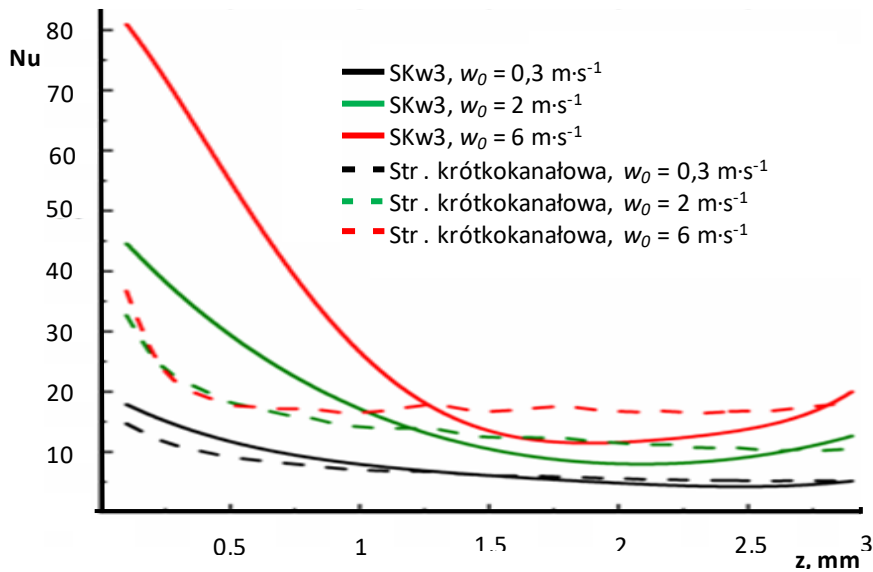


Rys. 43. Rozkłady temperatur oraz linie prądu płynu w domenie obliczeniowej struktury krótkokanałowej o długości 3 mm



Rys. 44. Linie prądu i rozkłady prędkości dla struktury krótkokanałowej w płaszczyźnie: A - w osi kanału, B - przy ścianie, C - na przekątnej kanału

Porównanie rozkładu liczb Nusselta wzdłuż kanałów (uśrednione na przekroju kanału) dla badanych struktur (CFD) przedstawiono na Rys. 45. Dla struktury opływowej obserwowany jest znaczny wzrost wartości liczb Nusselta w części wlotowej kanału w porównaniu do struktury krótkokanałowej, zwłaszcza dla  $w_0 = 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , co wynika z braku zaburzeń przepływu we wlotowej części kanału. Wiry obserwowane są natomiast w wylotowej części kanału struktury opływowej, czego wynikiem jest obniżenie lokalnych wartości liczb Nusselta obserwowane na długości kanału  $z = \sim 2 \text{ mm}$ , szczególnie dla  $w_0 = 2$  i  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Równocześnie, wiry te powodują wzrost wartości liczby Nusselta na końcu kanału.



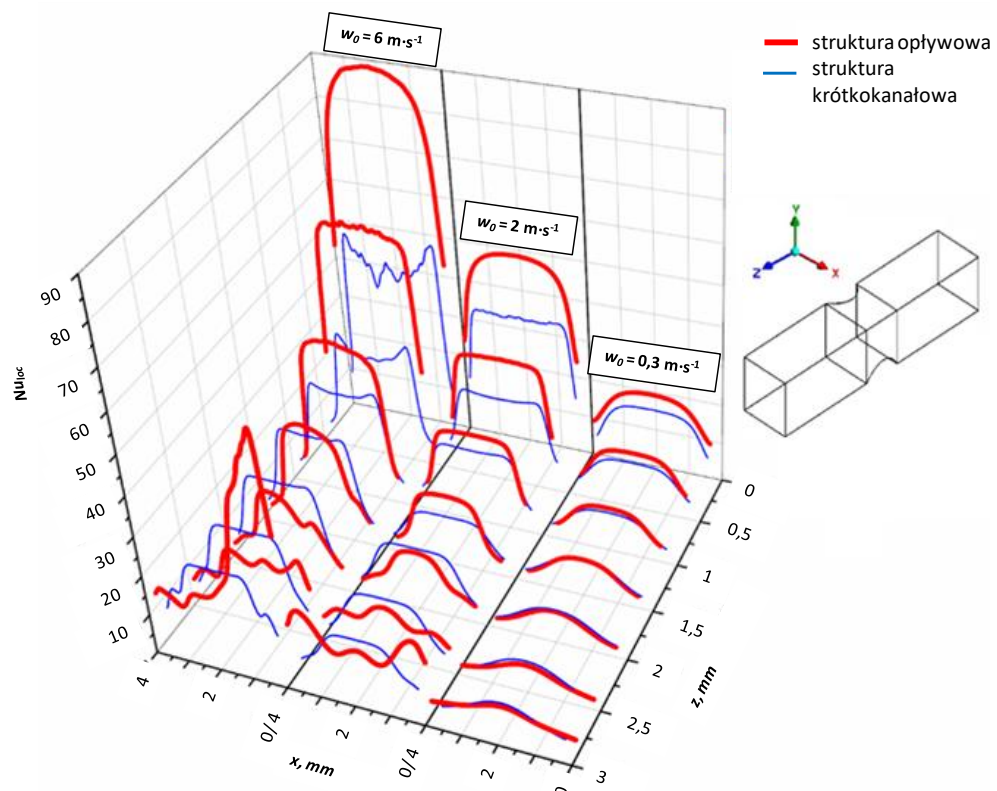
Rys. 45. Porównanie uśrednionych wartości liczb Nusselta dla struktury opływowej i krótkokanałowej o długości 3 mm

Rozkłady poprzeczne lokalnych liczb Nusselta ( $Nu_{loc}$ ), w kilku przekrojach na długości struktur (współrzędnej  $z$ ) zaprezentowano na Rys. 46. Dla  $w_0 = 0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  kształt charakterystyk dla struktury opływowej i krótkokanałowej jest zbliżony i przypomina formowanie się profili prędkości, temperatury i stężenia dla przepływu laminarnego (zob. Rys. 2). Rozkłady te charakteryzują się spłaszczonym kształtem, szczególnie w pobliżu wlotu do kanału. Ze wzrostem wartości współrzędnej  $z$  maleją wartości liczb Nusselta ( $Nu_{loc}$ ), jest to spowodowane występowaniem miejsc na powierzchni struktur o zmniejszonym gradiencie temperatur, co przedstawiono na Rys. 42 i Rys. 43. Geometria opływowa charakteryzuje się nieco większymi wartościami liczb Nusselta we wlotowym odcinku kanału i nieco bardziej spłaszczonym rozkładem w okolicy krawędzi spływu ( $z = 3 \text{ mm}$ ).

Ze wzrostem prędkości płynu  $w_0$  występują coraz większe różnice w przebiegu charakterystyk otrzymanych dla obu rodzajów struktur. Dla  $w_0 = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , we wlotowej i środkowej części kanałów ( $0 < z < 1,5 \text{ mm}$ ) dla obu geometrii kształty rozkładów nie uwidaczniają żadnych zaburzeń lokalnych wartości liczb Nusselta, przy czym dla struktury krótkokanałowej są mniejsze w porównaniu do opływowej. Różnica ta wynika z występowaniem stref stagnacji obserwowanych na wlocie do kanału struktury krótkokanałowej (Rys. 44), dla struktur opływowych zaburzenia te nie występują (Rys. 42). Znaczne rozbieżności pomiędzy rozkładami liczb Nusselta dla obu rodzajów geometrii widoczne są w wylotowej części kanałów. Dla struktury opływowej występują lokalne maksima rozkładów  $Nu_{loc}$ : dla  $z \sim 2 \text{ mm}$  w środkowej części kanału,

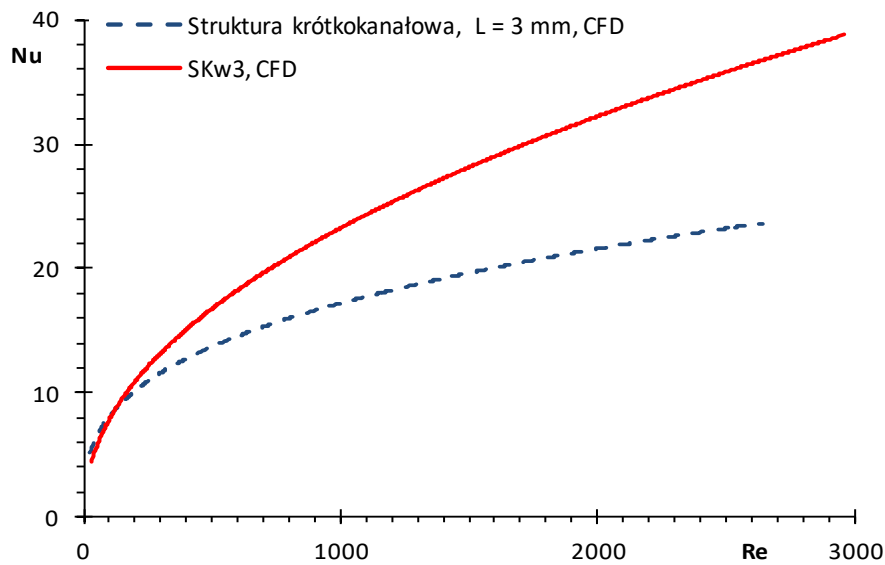
a dla  $z \sim 3$  mm - w narożach. Ponadto, w wylotowej części geometrii opływowej wartości liczb Nusselta w osi kanału są mniejsze niż w narożach. Dla tej struktury bowiem, na wartości lokalnych liczb Nusselta znacząco wpływają wiry umiejscowione w pobliżu części wylotowej kanału, które intensyfikują transport ciepła w narożach, co przedstawiono na Rys. 42. Jest to wynikiem opisanego już oddziaływania wirów wylotowych na ściankę kanału, w szczególności w strefie naroża kanału (Rys. 42B, C dla  $w_0 = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Dla największej prędkości,  $w_0 = 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , wpływ wspomnianych wirów wylotowych na wartości liczb Nusselta dla obu rodzajów struktur jest jeszcze bardziej widoczny. Kształt rozkładu w części wlotowej kanału dla struktury krótkokanałowej jest bardziej nieregularny, niż dla mniejszych prędkości, a zniekształcenie rozkładów w narożach kanałów struktury opływowej występuje już dla  $z = 1,5$  mm. Dla  $z > 2$  rozkłady liczb Nusselta dla struktury opływowej stają się asymetryczne, a w pobliżu naroży pojawiają się lokalne maksima. Szczególnie wyraźnie zarysowane maksimum występuje dla  $z \sim 3$  mm. Analiza rozkładów  $Nu_{loc}$  dla obu testowanych struktur potwierdza, że dla struktur opływowych na intensywność transportu ciepła istotnie wpływają wiry wylotowe, natomiast dla struktur krótkokanałowych - wiry wlotowe.

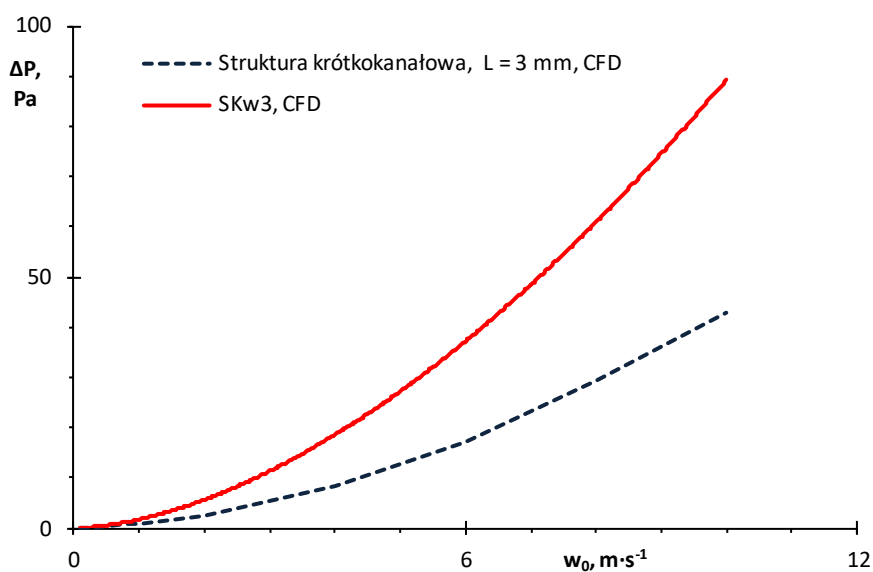


Rys. 46. Porównanie lokalnych wartości liczb Nusselta dla struktury opływowej (SKw3) i krótkokanałowej

Porównanie wartości liczb Nusselta i spadków ciśnień uśrednionych na całej powierzchni kanału dla struktur testowanych numerycznie o długości 3 mm przedstawiono odpowiednio na Rys. 47 i Rys. 48. Struktury opływowe charakteryzują się wyższymi wartościami liczb Nusselta i większymi oporami przepływu w prawie całym testowanym zakresie liczb Reynoldsa. Porównanie wyników analizy CFD dla struktur opływowych i krótkokanałowych o długości 6 oraz 12 mm prowadzi do analogicznych wniosków, jak dla struktur o długości 3 mm.



Rys. 47. Porównanie uśrednionych wartości liczb Nusselta dla struktury opływowej i krótkokanałowej o długości 3 mm



Rys. 48. Porównanie uśrednionych spadków ciśnień dla struktury opływowej i krótkokanałowej o długości 3 mm



## 6. Podsumowanie i wnioski

Jest to pierwsza praca przedstawiająca wyniki badań właściwości transportowych i przepływowych tzw. "struktur opływowych". Wypełnienia te można traktować jako struktury krótkokanałowe, o zmodyfikowanym kształcie ścianek ich kanałów, które zostały uformowane na podobieństwo skrzydła samolotu. Analiza przedstawiona w pracy dowodzi, że kształt ten intensyfikuje transport ciepła, co wskazuje na jego potencjał do zastosowania w reaktorach katalitycznych.

Badania eksperymentalne przeprowadzono dla struktur wydrukowanych ze stali 316 metodą SLM (ang. Selective Laser Melting) o długości 3, 6 i 12 mm, o kwadratowym, sześciokątnym i trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów. Dla każdej ze struktur za pomocą analizy tomograficznej wyznaczono powierzchnię właściwą oraz porowatość - parametry niezbędne do opisu zjawisk transportowych oraz weryfikacji dokładności wydruków.

Przeprowadzono badania doświadczalne oporów przepływu i wnikania ciepła. Określono wpływ długości struktury i kształtu przekroju poprzecznego kanałów na wartości liczb Nusselta i współczynników oporu Fanninga oraz sformułowano własne równania korelacyjne opisujące wyniki eksperymentalne. W literaturze brak jest prac na temat krótkokanałowych nośników katalitycznych o opływowym kształcie ścianek, dlatego otrzymane wartości eksperymentalne porównano z rozwiązaniami korelacji literaturowych dla monolitów i struktur krótkokanałowych. Wyniki doświadczalne zestawiono również z wartościami dla konwencjonalnych wypełnień - monolitu i złoża usypanego.

Przeprowadzono analizę CFD (Computational Fluid Dynamics) dla struktur opływowych i krótkokanałowych o kwadratowym kształcie przekroju poprzecznego kanałów. Porównano wyniki symulacji z danymi eksperymentalnymi. Przeanalizowano wpływ wirów występujących we wlotowej i wylotowej części geometrii na właściwości transportowe struktury opływowej i krótkokanałowej.

Na podstawie rezultatów badań wyprowadzono następujące wnioski:

1. Geometria struktur opływowych o kwadratowym i sześciokątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów wytworzonych metodą addytywną (SLM) wykazuje dużą zgodność z wymiarami modelu CAD, nieco mniejszą zgodność otrzymano dla struktur o przekroju trójkątnym.

2. Podobnie jak w strukturach krótkokanałowych, w kanałach testowanych struktur występuje przepływ laminarny rozwijający się hydrodynamicznie lub termicznie w przeważającym zakresie stosowanych bezwymiarowych długości kanału (odpowiednio  $L^+$  i  $L^*$ ).
3. Struktury opływowe o kwadratowym i sześciokątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów cechują się zbliżonymi wartościami spadków ciśnień i liczb Nusselta.
4. Struktury opływowe o trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów charakteryzują się nieco mniejszymi wartościami liczb Nusselta oraz większymi oporami przepływu niż struktury o kształcie kwadratowym i sześciokątnym, co może wynikać z większej gęstości upakowania kanałów lub nieco gorszego odwzorowania wymiarów modelu CAD.
5. Wpływ długości badanych struktur na opory przepływu i transport ciepła jest niewielki.
6. Na podstawie danych eksperymentalnych opracowano równania korelacyjne, za pomocą których można obliczyć wartości współczynników oporu Fanninga oraz liczb Nusselta dla różnych parametrów ruchowych reaktora.
7. Spadki ciśnień dla struktur opływowych są porównywalne lub nieco większe niż dla struktur krótkokanałowych.
8. Wartości liczb Nusselta dla testowanych struktur o sześciokątnym i kwadratowym przekroju kanału są nieco większe w porównaniu do struktury krótkokanałowej. Dla struktury trójkątnej zaobserwowano odmienną tendencję, co może być związane z różną geometrią porównywanych struktur.
9. Współczynniki oporu Fanninga oraz liczby Nusselta dla testowanych struktur, niezależnie od kształtu przekroju poprzecznego kanałów, są znacznie mniejsze w porównaniu do złoża usypanego i większe niż dla monolitu (dla takich samych liczb Reynoldsa).
10. Wykazano dobrą zgodność eksperymentalnie wyznaczonych spadków ciśnienia i wartości liczb Nusselta z wynikami analizy numerycznej (modelowaniem CFD).
11. Na podstawie modelowania CFD stwierdzono brak zawirowań w części wlotowej struktury opływowej, oraz pewne zaburzenia w części wylotowej, co powoduje wzrost lokalnych wartości liczb Nusselta w porównaniu do struktury krótkokanałowej.

Przeprowadzone w niniejszej pracy badania eksperymentalne oraz modelowanie CFD potwierdzają możliwość zastosowania struktur opływowych jako potencjalnego wypełnienia strukturalnych reaktorów katalitycznych. Zapewniają one intensywniejszy transport ciepła przy równocześnie nieco wyższych oporach przepływu w porównaniu do struktur krótkokanałowych, a w porównaniu do wypełnień klasycznych – znacznie intensywniejszy transport ciepła niż dla wypełnienia monolitycznego i istotnie mniejsze opory przepływu niż dla złoża usypanego.

Praca wykonana została w ramach projektu badawczego OPUS 11 nr 2016/21/B/ST8/00496 pt. "Strukturalne opływowe reaktory katalityczne z wypełnieniami drukowanymi w systemie 3D" 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. Korpyś, M.; Iwaniszyn, M.; Sintera, K.; Suwak, M.; Gancarczyk, A.; Kołodziej, A.; Flow phenomena in laminar flow through streamlined and sharp-edged short monolithic structures. *Scientific Reports*, 2023, 13, 15742, DOI:10.1038/s41598-023-42568-2
2. Sintera, K.; Korpyś, M.; Iwaniszyn, M.; Gancarczyk, A.; Suwak, M.; Kołodziej, A.; Innovative catalytic streamlined carriers with triangular channels. *Chemical and Process Engineering: New Frontiers*, 2023, 44, 3, DOI: 10.24425/cpe.2023.146733
3. Sintera, K.; Korpyś, M.; Iwaniszyn, M.; Gancarczyk, A.; Suwak, M.; Kołodziej, A.; New streamlined catalytic carriers of enhanced transport properties: Experiments vs CFD. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450, 3, 138297, DOI: 10.1016/j.cej.2022.138297

### **Prezentacje na konferencjach**

1. K. Sintera, M. Korpyś, M. Iwaniszyn, A. Gancarczyk, M. Suwak, A. Kołodziej, Heat and momentum transfer of streamlined catalytic carriers, 24th Polish Conference of Chemical and Process Engineering, 2023, Szczecin, Poland - plakat.
2. K. Sintera, M. Korpyś, M. Iwaniszyn, A. Gancarczyk, M. Suwak, A. Kołodziej, Innovative catalytic streamlined carriers with triangular channels, 8<sup>th</sup> European Process Intensification Conference, 2023, Warsaw, Poland - plakat.
3. K. Sintera, M. Korpyś, M. Iwaniszyn, A. Gancarczyk, M. Suwak, A. Kołodziej, New streamlined catalytic carriers of enhanced transport properties: experiments vs. CFD, XXIV International Conference on Chemical Reactors CHEMREACTOR-24, 2021, konferencja online – prezentacja ustna.

## Spis symboli

- $A_1$  - powierzchnia rzutu ciała na płaszczyznę prostopadłą do kierunku przepływu płynu, m<sup>2</sup>  
body frontal projected area normal to flow direction
- $C_D$  - współczynnik oporu czołowego =  $2F_d \cdot \rho^{-1} \cdot w^{-1} \cdot A_1^{-1}$   
drag coefficient
- $D_A$  - współczynnik dyfuzji, m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>  
diffusivity
- $D_p$  - średnica ziarna, m,  
grain diameter, m
- $d$  - średnica kanału, m  
channel diameter
- $d_h$  - hydrauliczna średnica kanału, m  
hydraulic channel diameter
- $e_y$  - błąd względny  
relative error
- $$e_{y_{CAD}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_{XCT} - y_{CAD}| \cdot 100\%}{y_{CAD}}$$
- $$e_{y_{CFD}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_{exp} - y_{CFD}| \cdot 100\%}{y_{exp}}$$
- $$e_{y_{kor}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_{exp} - y_{kor}| \cdot 100\%}{y_{exp}}$$
- $f$  - współczynnik oporów Fanninga  
Fanning friction factor
- $F_d$  - siła oporu aerodynamicznego, N  
drag force
- $h$  - wysokość kanału, m  
channel height
- $L$  - długość kanału, m  
channel length
- $L^+$  - bezwymiarowa długość kanału dla przepływu rozwijającego się hydrodynamicznie  
= $L \cdot d_h^{-1} \cdot Re^{-1}$   
dimensionless length for the hydrodynamic entrance region
- $L^*$  - bezwymiarowa długość kanału dla przepływu rozwijającego się termicznie  
= $L \cdot d_h^{-1} \cdot Re^{-1} \cdot Pr^{-1}$   
dimensionless length for the thermal entrance region
- $L^{*M}$  - bezwymiarowa długość kanału dla przepływu rozwijającego się masowo  
= $L \cdot d_h^{-1} \cdot Re^{-1} \cdot Sc^{-1}$

	dimensionless length for the mass transfer entrance region
Nu	- liczba Nusselta, $= \alpha \cdot d_h \cdot \lambda^{-1}$ Nusselt number
$\Delta P$	- spadek ciśnienia, Pa pressure loss
Pr	- liczba Prandtla, $= c_p \cdot \eta \cdot \lambda^{-1}$ Prandtl number
Ra	- średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości (zgodnie z [126]), $\mu\text{m}$ arithmetical mean height (according to [126])
Re	- liczba Reynoldsa, $= w_0 \cdot d_h \cdot \rho \cdot \eta^{-1} \cdot \varepsilon^{-1}$ Reynolds number
Rz	- maksymalna wysokość profilu chropowatości, (zgodnie z [126]), $\mu\text{m}$ maximum height of the profile (according to [126])
Sa	- średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia (zgodnie z [127]), $\mu\text{m}$ arithmetical mean surface height (according to [127])
Sc	- liczba Schmidta $= \eta \cdot \rho^{-1} \cdot D_A^{-1}$ Schmidt number
$S_v$	- powierzchnia właściwa, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ specific surface area
Sz	- maksymalna wysokość profilu 3D (zgodnie z [127]), $\mu\text{m}$ maximum height of 3D profile (according to [127])
w	- prędkość rzeczywista płynu, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ interstitial fluid velocity
$w_0$	- prędkość średnia płynu (liczona na przekrój pustego aparatu), $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ superficial fluid velocity
z	- współrzędna z z coordinate
$\alpha$	- współczynnik wnikania ciepła, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ heat transfer coefficient
$\varepsilon$	- porowatość, porosity
$\eta$	- dynamiczny współczynnik lepkości, Pa·s dynamic viscosity
$\lambda$	- współczynnik przewodzenia ciepła, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ thermal conductivity

$\rho$  - gęstość,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$   
density

$\sigma$  - odchylenie standardowe,  $= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \left| \frac{y_{exp.i} - y_{kor.i}}{y_{exp.i}} - \bar{e}_y \right| \right)^2} \cdot 100\%$   
standard deviation

#### Indeksy dolne

CAD - wartość obliczona na bazie wymiarów modelu CAD struktury  
value calculated based on the dimensions of the CAD model of the structure

exp - wartość experimentalna  
experimental value

fd - wartość dla rozwiniętego przepływu laminarnego  
for fully developed laminar flow

<H> - warunek brzegowy zakładający stały strumień ciepła dostarczanego do ścianki kanału  
constant heat flux boundary condition

kor - obliczone na bazie korelacji  
value calculated based on the correlation

loc - wartość lokalna  
local value

śr - wartość średnia  
average value

<T> - warunek brzegowy zakładający stałą temperaturę ścianki kanału  
constant wall temperature boundary condition

XCT - wartość obliczona na bazie wyników analizy tomograficznej  
value calculated on the basis of the results of the tomographic analysis

## Spis literatury

- [1] A. Mozaffar, Y.L. Zhang, Atmospheric Volatile Organic Compounds (VOCs) in China: a Review, *Current Pollution Reports* 6(3) (2020) 250-263. <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00149-1>.
- [2] EPA, Technical Overview of Volatile Organic Compounds, 2023. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds#2>. (Accessed 27.04.23).
- [3] M.C. Turner, Z.J. Andersen, A. Baccarelli, W.R. Diver, S.M. Gapstur, C.A. Pope, D. Prada, J. Samet, G. Thurston, A. Cohen, Outdoor air pollution and cancer: An overview of the current evidence and public health recommendations, *Ca-a Cancer Journal for Clinicians* 70(6) (2020) 460-479. <https://doi.org/10.3322/caac.21632>.
- [4] J. Lelieveld, J.S. Evans, M. Fnais, D. Giannadaki, A. Pozzer, The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale, *Nature* 525(7569) (2015) 367. <https://doi.org/10.1038/nature15371>.
- [5] Outdoor Air Pollution, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, IARC, 2016.
- [6] T. Aldhafeeri, M.K. Tran, R. Vrolyk, M. Pope, M. Fowler, A Review of Methane Gas Detection Sensors: Recent Developments and Future Perspectives, *Inventions* 5(3) (2020) 18. <https://doi.org/10.3390/inventions5030028>.
- [7] P. Forster, T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D.J. Lunt, T. Mauritsen, M.D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, H. Zhang, The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change 2021*, in: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (Eds.) *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021, pp. 923–1054.
- [8] P.Z. V. Masson-Delmotte, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, M.I.G. L. Goldfarb, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, O.Y. T. Waterfield, R. Yu and B. Zhou, IPCC, 2021: Podsumowanie dla Decydentów, *Zmiana Klimatu 2021: Fizyczne Podstawy Naukowe. Wkład I Grupy Roboczej do Szóstego Raportu Oceny Międzyrządowego Zespołu ds. Zmiany Klimatu*, Cambridge University Press.
- [9] N.J. Abram, B.J. Henley, A. Sen Gupta, T.J.R. Lippmann, H. Clarke, A.J. Dowdy, J.J. Sharples, R.H. Nolan, T.R. Zhang, M.J. Wooster, J.B. Wurtzel, K.J. Meissner, A.J. Pitman, A.M. Ukkola, B.P. Murphy, N.J. Tapper, M.M. Boer, Connections of climate change and variability to large and extreme forest fires in southeast Australia, *Communications Earth & Environment* 2(1) (2021) 17. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00065-8>.
- [10] M. McDonald, After the fires? Climate change and security in Australia, *Australian Journal of Political Science* 56(1) (2021) 1-18. <https://doi.org/10.1080/10361146.2020.1776680>.
- [11] *Za pięć dwunasta koniec świata. Kryzys klimatyczno-ekologiczny głosem wielu nauk*, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, Biblioteka Jagiellońska, Kraków, 2022.
- [12] J. Rentschler, M. Salhab, People in Harm's Way : Flood Exposure and Poverty in 189 Countries, in: P.R.W. Paper (Ed.) *World Bank*, Washington, 2020.
- [13] P.E. Morrow, Evaluation of recent nox toxicity data and an attempt to derive an ambient air standard for nox by established toxicological procedures, *Environmental Research* 10(1) (1975) 92-112. [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(75\)90076-6](https://doi.org/10.1016/0013-9351(75)90076-6).
- [14] H. Kinoshita, H. Turkan, S. Vucinic, S. Naqvi, R. Bedair, R. Rezaee, A. Tsatsakis, Carbon monoxide poisoning, *Toxicology Reports* 7 (2020) 169-173. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.01.005>.
- [15] D.J. Ball, R.S. Hamilton, R.M. Harrison, *The Influence of Highway-Related Pollutants on Environmental Quality*, *Studies in Environmental Science*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1991.



- [16] D. Loomis, Y. Grosse, B. Lauby-Secretan, F. El Ghissassi, V. Bouvard, L. Benbrahim-Tallaa, N. Guha, R. Baan, H. Mattock, K. Straif, Iarc, The carcinogenicity of outdoor air pollution, *Lancet Oncology* 14(13) (2013) 1262-1263. [https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(13\)70487-x](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(13)70487-x).
- [17] C.M. Somers, Ambient air pollution exposure and damage to male gametes: human studies and in situ 'sentinel' animal experiments, *Systems Biology in Reproductive Medicine* 57(1-2) (2011) 63-71. <https://doi.org/10.3109/19396368.2010.500440>.
- [18] R.J. Sram, O. Beskid, A. Rossnerova, P. Rossner, Z. Lnenickova, A. Milcova, I. Solansky, B. Binkova, Environmental exposure to carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons - The interpretation of cytogenetic analysis by FISH, *Toxicology Letters* 172(1-2) (2007) 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2007.05.019>.
- [19] D.M. DeMarini, Genotoxicity biomarkers associated with exposure to traffic and near-road atmospheres: a review, *Mutagenesis* 28(5) (2013) 485-505. <https://doi.org/10.1093/mutage/get042>.
- [20] G.B. Hamra, N. Guha, A. Cohen, F. Laden, O. Raaschou-Nielsen, J.M. Samet, P. Vineis, F. Forastiere, P. Saldiva, T. Yorifuji, D. Loomis, Outdoor Particulate Matter Exposure and Lung Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis, *Environmental Health Perspectives* 122(9) (2014) 906-911. <https://doi.org/10.1289/ehp.1408092>.
- [21] R. Fuller, P.J. Landrigan, K. Balakrishnan, G. Bathan, S. Bose-O'Reilly, M. Brauer, J. Caravanos, T. Chiles, A. Cohen, L. Corra, M. Cropper, G. Ferraro, J. Hanna, D. Hanrahan, H. Hu, D. Hunter, G. Janata, R. Kupka, B. Lanphear, M. Lichtveld, K. Martin, A. Mustapha, E. Sanchez-Triana, K. Sandilya, L. Schaepli, J. Shaw, J. Seddon, W. Suk, M.M. Tellez-Rojo, C.H. Yan, Pollution and health: a progress update, *Lancet Planetary Health* 6(6) (2022) E535-E547. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(22)00090-0).
- [22] WHO, Ambient (outdoor) air pollution, 2021. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). (Accessed 13.07.22).
- [23] M. Parascandola, Ambient air pollution and lung cancer in Poland: research findings and gaps, *Journal of Health Inequalities* 4(1) (2018) 3-8. <https://doi.org/https://doi.org/10.5114/jhi.2018.77639>.
- [24] J. Dumesic, G. Huber, M. Boudart, Principles of Heterogeneous Catalysis, *Handbook of Heterogeneous Catalysis*, Wiley-VCH Verlag, 2008.
- [25] A. Cybulski, J.A. Moulijn, Monoliths in heterogeneous catalysis, *Catalysis Reviews-Science and Engineering* 36(2) (1994) 179-270. <https://doi.org/10.1080/01614949408013925>.
- [26] *Structured Catalysts and Reactors*, Taylor & Francis, 2006.
- [27] P. Avila, M. Montes, E.E. Miro, Monolithic reactors for environmental applications - A review on preparation technologies, *Chemical Engineering Journal* 109(1-3) (2005) 11-36. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2005.02.025>.
- [28] T. Boger, A.K. Heibel, C.M. Sorensen, Monolithic catalysts for the chemical industry, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 43(16) (2004) 4602-4611. <https://doi.org/10.1021/ie030730q>.
- [29] S. Dey, N.S. Mehta, Automobile pollution control using catalysis, *Resources, Environment and Sustainability* 2(100006) (2020). <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2020.100006>.
- [30] J.M. Pardiwala, F. Patel, S. Patel, Review paper on Catalytic Converter for Automotive Exhaust Emission, *International Conference on Current Trends in Technology*, Nuicone, Ahmedabad, 2011.
- [31] M. Saternus, A. Fornalczyk, W. Gąsior, A. Dębski, S. Terlicka, Modifications and Improvements to the Collector Metal Method Using an mhd Pump for Recovering Platinum from Used Car Catalysts, *Catalysts* 10(8) (2020). <https://doi.org/10.3390/catal10080880>.
- [32] A. Papavasiliou, A. Tsetsekou, V. Matsouka, M. Konsolakis, I.V. Yentekakis, N. Boukos, Development of a Ce-Zr-La modified Pt/gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> TWCs' washcoat: Effect of synthesis procedure on catalytic behaviour and thermal durability, *Applied Catalysis B-Environmental* 90(1-2) (2009) 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.03.006>.
- [33] S. Azalim, R. Brahmi, M. Agunaou, A. Beaurain, J.M. Giraudon, J.F. Lamonier, Washcoating of cordierite honeycomb with Ce-Zr-Mn mixed oxides for VOC catalytic oxidation, *Chemical Engineering Journal* 223 (2013) 536-546. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.03.017>.
- [34] P.J. Jodłowski, D.K. Chlebda, R.J. Jędrzejczyk, A. Dzedzicka, L. Kuterasiński, M. Sitarz, Characterisation of well-adhered ZrO<sub>2</sub> layers produced on structured reactors using

- the sonochemical sol-gel method, *Applied Surface Science* 427 (2018) 563-574. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.057>.
- [35] M. Valentini, G. Groppi, C. Cristiani, M. Levi, E. Tronconi, P. Forzatti, The deposition of gamma-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers on ceramic and metallic supports for the preparation of structured catalysts, *Catalysis Today* 69(1-4) (2001) 307-314. [https://doi.org/10.1016/s0920-5861\(01\)00383-2](https://doi.org/10.1016/s0920-5861(01)00383-2).
- [36] C. Sinn, G.R. Pesch, J. Thoming, L. Kiewidt, Coupled conjugate heat transfer and heat production in open-cell ceramic foams investigated using CFD, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 139 (2019) 600-612. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.042>.
- [37] A. Gancarczyk, K. Sintera, M. Iwaniszyn, M. Piatek, W. Macek, P.J. Jodłowski, S. Wroński, M. Sitarz, J. Łojewska, A. Kołodziej, Metal Foams as Novel Catalyst Support in Environmental Processes, *Catalysts* 9(7) (2019) 13. <https://doi.org/10.3390/catal9070587>.
- [38] M.P. Vorob'eva, A.A. Greish, A.V. Ivanov, L.M. Kustov, Preparation of catalyst carriers on the basis of alumina supported on metallic gauzes, *Applied Catalysis a-General* 199(2) (2000) 257-261. [https://doi.org/10.1016/s0926-860x\(99\)00563-3](https://doi.org/10.1016/s0926-860x(99)00563-3).
- [39] M. Iwaniszyn, K. Sintera, A. Gancarczyk, B. Leszczyński, M. Korpyś, M. Suwak, A. Kołodziej, P.J. Jodłowski, Characterization of Fluid Flow and Heat Transfer of Expanded Metal Meshes for Catalytic Processes, *Energies* 15(22) (2022) 12. <https://doi.org/10.3390/en15228437>.
- [40] M. Iwaniszyn, K. Sintera, A. Gancarczyk, M. Korpyś, R.J. Jedrzejczyk, A. Kołodziej, P.J. Jodłowski, Experimental and CFD investigation of heat transfer and flow resistance in woven wire gauzes, *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification* 163 (2021) 14. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108364>.
- [41] R. Balzarotti, M. Ambrosetti, M. Arnesano, A. Anglani, G. Groppi, E. Tronconi, Periodic open cellular structures (POCS) as enhanced catalyst supports: Optimization of the coating procedure and analysis of mass transport, *Applied Catalysis B-Environmental* 283 (2021) 12. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119651>.
- [42] M. Iwaniszyn, Periodic Open Cellular Structures (POCS) as Catalyst Supports-A Review, *Energies* 15(20) (2022). <https://doi.org/10.3390/en15207703>.
- [43] K.G. Allen, T.W. von Backstrom, D.G. Kroger, Packed bed pressure drop dependence on particle shape, size distribution, packing arrangement and roughness, *Powder Technology* , 246 (2013) 590-600. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.06.022>.
- [44] J.L. Williams, Monolith structures, materials, properties and uses, *Catalysis Today* 69(1-4) (2001) 3-9. [https://doi.org/10.1016/s0920-5861\(01\)00348-0](https://doi.org/10.1016/s0920-5861(01)00348-0).
- [45] G. Groppi, A. Belloli, E. Tronconi, P. Forzatti, A comparison of lumped and distributed models of monolith catalytic combustors, *Chemical Engineering Science* 50(17) (1995) 2705-2715. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(95\)00099-q](https://doi.org/10.1016/0009-2509(95)00099-q).
- [46] F. Sadeghi, B. Tirandazi, A. Khalili-Garakani, S. Nasserri, R.N. Nodehi, N. Mostoufi, Investigating the effect of channel geometry on selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> in monolith reactors, *Chemical Engineering Research & Design* 118 (2017) 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.12.003>.
- [47] K. Ramanathan, V. Balakotaiah, D.H. West, Geometry effects on ignition in catalytic monoliths, *Aiche Journal* 50(7) (2004) 1493-1509. <https://doi.org/10.1002/aic.10120>.
- [48] A. Cybulski, J.A. Moulijn, Modeling of heat-transfer in metallic monoliths consisting of sinusoidal cells, *Chemical Engineering Science* 49(1) (1994) 19-27. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(94\)85030-5](https://doi.org/10.1016/0009-2509(94)85030-5).
- [49] O. Turgut, Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in hexagonal ducts under isothermal and constant heat flux boundary conditions, *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Mechanical Engineering* 38(M1) (2014) 45-56.
- [50] A. Kołodziej, J. Łojewska, Optimization of structured catalyst carriers for VOC combustion, *Catalysis Today* 105(3-4) (2005) 378-384. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2005.06.029>.
- [51] J.A. Moulijn, F. Kapteijn, Monolithic reactors in catalysis: excellent control, *Current Opinion in Chemical Engineering* 2(3) (2013) 346-353. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2013.05.003>.

- [52] S. Hosseini, H. Moghaddas, S.M. Soltani, S. Kheawhom, Technological Applications of Honeycomb Monoliths in Environmental Processes: A review, *Process Safety and Environmental Protection* 133 (2020) 286-300. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.020>.
- [53] V. Tomasic, Application of the monoliths in DeNO(x) catalysis, *Catalysis Today* 119(1-4) (2007) 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2006.08.047>.
- [54] P.J.M. Lebens, F. Kapteijn, S.T. Sie, J.A. Moulijn, Potentials of internally finned monoliths as a packing for multifunctional reactors, *Chemical Engineering Science* 54(10) (1999) 1359-1365. [https://doi.org/10.1016/s0009-2509\(99\)00060-3](https://doi.org/10.1016/s0009-2509(99)00060-3).
- [55] P.J.M. Lebens, M.M. Stork, F. Kapteijn, S.T. Sie, J.A. Moulijn, Hydrodynamics and mass transfer issues in a countercurrent gas-liquid internally finned monolith reactor, *Chemical Engineering Science* 54(13-14) (1999) 2381-2389. [https://doi.org/10.1016/s0009-2509\(98\)00353-4](https://doi.org/10.1016/s0009-2509(98)00353-4).
- [56] A. Kołodziej, J. Łojewska, Short-channel structured reactor for catalytic combustion: Design and evaluation, *Chemical Engineering and Processing* 46(7) (2007) 637-648. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.08.009>.
- [57] A. Kołodziej, J. Łojewska, J. Ochonska, T. Łojewski, Short-channel structured reactor: Experiments versus previous theoretical design, *Chemical Engineering and Processing* 50(8) (2011) 869-876. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.05.003>.
- [58] R.K. Shah, A.L. London, *Laminar flow forced convection in ducts*, Academic Press, New York, 1978. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-020051-1.50015-2>.
- [59] A. Kołodziej, J. Łojewska, T. Łojewski, M. Iwaniszyn, Short-channel structures of triangular cross-section, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54(15-16) (2011) 3291-3295. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.03.058>.
- [60] M. Iwaniszyn, M. Piątek, A. Gancarczyk, P.J. Jodłowski, J. Łojewska, A. Kołodziej, Flow resistance and heat transfer in short channels of metallic monoliths: Experiments versus CFD, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 109 (2017) 778-785. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.019>.
- [61] M. Iwaniszyn, J. Kryca, P.J. Jodłowski, M. Piątek, A. Gancarczyk, J. Łojewska, A. Kołodziej, Novel intense metallic monolith for automotive applications: Experimental versus numerical studies, *Comptes Rendus Chimie* 18(10) (2015) 1030-1035. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2015.03.010>.
- [62] M. Iwaniszyn, J. Ochonska, A. Gancarczyk, P. Jodłowski, A. Knapik, J. Łojewska, E. Janowska-Renkas, A. Kołodziej, Short-Channel Structured Reactor as a Catalytic Afterburner, *Topics in Catalysis* 56(1-8) (2013) 273-278. <https://doi.org/10.1007/s11244-013-9966-8>.
- [63] M. Iwaniszyn, J. Ochonska, P. Jodłowski, J. Łojewska, A. Kołodziej, Very short monoliths of triangular cross-sectional channel shape for fast catalytic reactions, *Przemysł Chemiczny* 91(7) (2012) 1435-1438.
- [64] A. Kołodziej, J. Łojewska, M. Iwaniszyn, P. Jodłowski, J. Ochońska, A. Rogulska, A. Gancarczyk, A. Matuszek-Chmurowska, Mass transfer and flow resistance for sinusoidal short-channel catalytic internals, *Przemysł Chemiczny* 91(10) (2012) 2074-2078.
- [65] K. Sintera, M. Iwaniszyn, P.J. Jodłowski, Momentum Transfer in Short-Channel Structures of Hexagonal Channel Cross-Section Shape: Experiments vs. CFD, *Catalysts* 11(9) (2021). <https://doi.org/10.3390/catal11091036>.
- [66] M. Iwaniszyn, P.J. Jodłowski, K. Sintera, A. Gancarczyk, M. Korpyś, R.J. Jędrzejczyk, A. Kołodziej, Entrance effects on forced convective heat transfer in laminar flow through short hexagonal channels: Experimental and CFD study, *Chemical Engineering Journal* 405 (126635) (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126635>.
- [67] M. Iwaniszyn, *Hydraulika i transport ciepła i masy w krótkokanałowych wypełnieniach strukturalnych*, Instytut Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk, Rozprawa doktorska, 2013.
- [68] R.D. Hawthorn, Afterburner catalysis-effects of heat and mass transfer between gas and catalyst surface, *AIChE Symp. Ser.*, 1974, pp. 428-438.
- [69] C.C. Templis, N.G. Papayannakos, Mass and Heat Transfer Coefficients in Automotive Exhaust Catalytic Converter Channels, *Catalysts* 9(6) (2019) 21. <https://doi.org/10.3390/catal9060507>.

- [70] C.J. Bennett, R.E. Hayes, S.T. Kolaczowski, W.J. Thomas, An experimental and theoretical-study of a catalytic monolith to control automobile exhaust emissions, *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences* 439(1907) (1992) 465-483. <https://doi.org/10.1098/rspa.1992.0162>.
- [71] R.E. Hayes, S.T. Kolaczowski, A study of Nusselt and Sherwood numbers in a monolith reactor, *Catalysis Today* 47(1-4) (1999) 295-303. [https://doi.org/10.1016/s0920-5861\(98\)00310-1](https://doi.org/10.1016/s0920-5861(98)00310-1).
- [72] I. Cornejo, G. Cornejo, P. Nikrityuk, R.E. Hayes, Entry length convective heat transfer in a monolith: The effect of upstream turbulence, *International Journal of Thermal Sciences* 138 (2019) 235-246. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.12.044>.
- [73] N. Gupta, V. Balakotaiah, Heat and mass transfer coefficients in catalytic monoliths, *Chemical Engineering Science* 56(16) (2001) 4771-4786. [https://doi.org/10.1016/s0009-2509\(01\)00134-8](https://doi.org/10.1016/s0009-2509(01)00134-8).
- [74] I. Cornejo, P. Nikrityuk, R.E. Hayes, Heat and mass transfer inside of a monolith honeycomb: From channel to full size reactor scale, *Catalysis Today* 383 (2022) 110-122. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.10.036>.
- [75] M. Everts, J.P. Meyer, Heat transfer of developing and fully developed flow in smooth horizontal tubes in the transitional flow regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 117 (2018) 1331-1351. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.071>.
- [76] L. Baharudin, M.J. Watson, Monolithic substrate support catalyst design considerations for steam methane reforming operation, *Reviews in Chemical Engineering* 34(4) (2018) 481-501. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0048>.
- [77] R.K. Shah, Laminar-flow friction and forced-convection heat-transfer in ducts of arbitrary geometry, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18(7-8) (1975) 849-862. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90176-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90176-3).
- [78] R. Koch, A. Noworyta, *Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1992.
- [79] H. Schlichting, *Boundary-Layer Theory*, 7th edition ed., New York, McGraw-Hill Book Company, 1979.
- [80] H. Heisler, 14 - Vehicle body aerodynamics,, in: H. Heisler (Ed.), *Advanced Vehicle Technology*, Butterworth-Heinemann 2002, pp. 584-634. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-075065131-8/50015-4>.
- [81] S.F. Hoerner, *Fluid-dynamic drag; practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance*, Midland Park, N. J.], 1958.
- [82] M.H. Ouahabi, H. El Khachine, F. Benabdelouahab, Aerodynamic Analysis of Wind Turbine Blade of NACA 0006 Using a CFD Approach, in: S. Bennani, Y. Lakhrissi, G. Khaissidi, A. Mansouri, Y. Khamlichi (Eds.), *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, Singapore, 2022. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-33-6893-4\\_50](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-33-6893-4_50).
- [83] M. Faruqi Bin Zahari, A study of drag force on different type Of airfoil in a subsonic wind tunnel, Faculty of Manufacturing Engineering, Universiti Malaysia Pahang, 2014.
- [84] J. Welty, C. Wicks, R. Wilson, G. Rorrer, *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer* 5th Edition ed., John Wiley & Sons, Inc. 2008.
- [85] E.N. Landis, D.T. Keane, X-ray microtomography, *Materials Characterization* 61(12) (2010) 1305-1316. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.09.012>.
- [86] B. Leszczyński, A. Gancarczyk, A. Wróbel, M. Piątek, J. Łojewska, A. Kołodziej, R. Pedrys, Global and Local Thresholding Methods Applied to X-ray Microtomographic Analysis of Metallic Foams, *Journal of Nondestructive Evaluation* 35(2) (2016) 9. <https://doi.org/10.1007/s10921-016-0352-x>.
- [87] L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs, J. Van Humbeeck, J.P. Kruth, A study of the micro structural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V, *Acta Materialia* 58(9) (2010) 3303-3312. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.02.004>.
- [88] G. Ziolkowski, E. Chlebus, P. Szymczyk, J. Kurzac, Application of X-ray CT method for discontinuity and porosity detection in 316L stainless steel parts produced with SLM technology, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14(4) (2014) 608-614. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.02.003>.
- [89] N. Otawa, T. Sumida, H. Kitagaki, K. Sasaki, S. Fujibayashi, M. Takemoto, T. Nakamura, T. Yamada, Y. Mori, T. Matsushita, Custom-made titanium devices as membranes for bone

- augmentation in implant treatment: Modeling accuracy of titanium products constructed with selective laser melting, *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery* 43(7) (2015) 1289-1295. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2015.05.006>.
- [90] K. Abd-Elghany, D.L. Bourell, Property evaluation of 304L stainless steel fabricated by selective laser melting, *Rapid Prototyping Journal* 18(5) (2012) 420-428. <https://doi.org/10.1108/13552541211250418>.
- [91] S.A.C. Ghani, M.H. Zakaria, W.S.W. Harun, Z. Zaulkafilai, Dimensional accuracy of internal cooling channel made by selective laser melting (SLM) And direct metal laser sintering (DMLS) processes in fabrication of internally cooled cutting tools, 2nd International Conference on Automotive Innovation and Green Vehicle (AiGEV), E D P Sciences, Malaysia Automot Inst, Cyberjaya, Malaysia, 2016.
- [92] J. Delgado, J. Ciurana, C.A. Rodriguez, Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 60(5-8) (2012) 601-610. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3643-5>.
- [93] K.A. Thole, S.P. Lynch , A.J. Wildgoose Chapter Five - Review of advances in convective heat transfer developed through additive manufacturing, Elsevier2021. <https://doi.org/10.1016/bs.aiht.2021.06.004>.
- [94] J.C. Snyder, K.A. Thole, Effect of Additive Manufacturing Process Parameters on Turbine Cooling, *Journal of Turbomachinery-Transactions of the Asme* 142(5) (2020) 11. <https://doi.org/10.1115/1.4046459>.
- [95] N.T. Aboulkhair, N.M. Everitt, I. Ashcroft, C. Tuck, Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting, *Additive Manufacturing* 1-4 (2014) 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.001>.
- [96] C. Teng, H.J. Gong, A. Szabo, J.J.S. Dilip, K. Ashby, S. Zhang, N. Patil, D. Pal, B. Stucker, Simulating Melt Pool Shape and Lack of Fusion Porosity for Selective Laser Melting of Cobalt Chromium Components, *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme* 139(1) (2017) 11. <https://doi.org/10.1115/1.4034137>.
- [97] F. Ahmed, U. Ali, D. Sarker, E. Marzbanrad, K. Choi, Y. Mahmoodkhani, E. Toyserkani, Study of powder recycling and its effect on printed parts during laser powder-bed fusion of 17-4 PH stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology* 278 (2020) 11. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116522>.
- [98] I. Yadroitsev, I. Smurov, Surface Morphology in Selective Laser Melting of Metal Powders, *Lasers in Manufacturing 2011: Proceedings of the Sixth International Wlt Conference on Lasers in Manufacturing, Vol 12, Pt A 12* (2011) 264-270. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.034>.
- [99] J.C. Snyder, K.A. Thole, Tailoring Surface Roughness Using Additive Manufacturing to Improve Internal Cooling, *Journal of Turbomachinery-Transactions of the Asme* 142(7) (2020) 12. <https://doi.org/10.1115/1.4047380>.
- [100] J. Nikuradse, *Stromungsgesetze in rauhen Rohren, Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*1933.
- [101] M. Kadivar, D. Tormey, G. McGranaghan, A review on turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and theories, *International Journal of Thermofluids* 10 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100077>.
- [102] D. Gloss, H. Herwig, Wall roughness effects in laminar flows: an often ignored though significant issue, *Experiments in Fluids* 49(2) (2010) 461-470. <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0811-6>.
- [103] L. Ventola, F. Robotti, M. Dialameh, F. Calignano, D. Manfredi, E. Chiavazzo, P. Asinari, Rough surfaces with enhanced heat transfer for electronics cooling by direct metal laser sintering, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 75 (2014) 58-74. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.037>.
- [104] Y. Asako, H. Nakamura, M. Faghri, Developing laminar-flow and heat-transfer in the entrance region of regular polygonal ducts, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 31(12) (1988) 2590-2593.

- [105] T. Yilmaz, General equations for pressure-drop for laminar-flow in ducts of arbitrary cross-sections, *Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the Asme* 112(4) (1990) 220-223. <https://doi.org/10.1115/1.2905761>.
- [106] Y.S. Muzychka, M.M. Yovanovich, Laminar forced convection heat transfer in the combined entry region of non-circular ducts, *Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme* 126(1) (2004) 54-61. <https://doi.org/10.1115/1.1643752>.
- [107] S.R. Gundlapally, V. Balakotaiah, Heat and mass transfer correlations and bifurcation analysis of catalytic monoliths with developing flows, *Chemical Engineering Science* 66(9) (2011) 1879-1892. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.01.045>.
- [108] R.M. Curr, D. Sharma, D.G. Tatchell, Numerical predictions of some three-dimensional boundary layers in ducts, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 1(2) (1972) 143-158. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0045-7825\(72\)90001-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0045-7825(72)90001-1).
- [109] D.P. Fleming, E.M. Sparrow, Flow in hydrodynamic entrance region of ducts of arbitrary cross section, *Journal of Heat Transfer* 91(3) (1969) 345-&. <https://doi.org/10.1115/1.3580173>.
- [110] R.W. Miller, L.S. Han, Pressure losses for laminar flow in entrance region of ducts of rectangular and equilateral triangular cross section, *Journal of Applied Mechanics* 38(4) (1971) 1083. <https://doi.org/10.1115/1.3408927>.
- [111] M.K. Gangal, *Some Problems in Channel Flow*, Dep. Math. Stat., University of Calgary, Calgary, 1974.
- [112] A. Kołodziej, *Strukturalne wypełnienia krótkokanałowe w reaktorach katalitycznych o intensywnym transporcie masy*, Instytut Inżynierii Chemicznej PAN, Rozprawa habilitacyjna, Gliwice 2009
- [113] M. Uberoi, C.J. Pereira, External mass transfer coefficients for monolith catalysts, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 35(1) (1996) 113-116. <https://doi.org/10.1021/ie9501790>.
- [114] S. Ergun, Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress* 48(2) (1952) 89-94.
- [115] A.K. Saroha, K.D.P. Nigam, Trickle bed reactors, *Reviews in Chemical Engineering* 12(3-4) (1996) 207-347. <https://doi.org/10.1515/revce.1996.12.3-4.207>.
- [116] A.R. Chandrupatla, V.M.K. Sastri, Laminar forced-convection heat-transfer of a non-newtonian fluid in a square duct, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 20(12) (1977) 1315-1324. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(77\)90027-8](https://doi.org/10.1016/0017-9310(77)90027-8).
- [117] J. Votruba, O. Mikus, K. Nguen, V. Hlavacek, J. Skrivanek, Heat and mass-transfer in honeycomb catalysts, 2, *Chemical Engineering Science* 30(2) (1975) 201-206. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(75\)80006-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(75)80006-6).
- [118] M. Iwaniszyn, J. Ochońska, P. Jodłowski, J. Łojewska, A. Matuszek-Chmurowska, A. Kołodziej, Microstructured Reactor as a Pre-Turbo Catalytic Converter, *Topics in Catalysis* 56(1-8) (2013) 384-389. <https://doi.org/10.1007/s11244-013-9984-6>.
- [119] P. Wibelwas, *Laminar-Flow Heat-Transfer in Non-Circular Ducts*, London University, London, 1966.
- [120] N. Wakao, S. Kaguei, T. Funazkri, Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid heat-transfer coefficients in packed-beds - correlation of nusselt numbers, *Chemical Engineering Science* 34(3) (1979) 325-336. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(79\)85064-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(79)85064-2).
- [121] I. Cornejo, P. Nikrityuk, R.E. Hayes, Improved Nu number correlations for gas flow in monolith reactors using temperature-dependent fluid properties, *International Journal of Thermal Sciences* 155 (2020) 10. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106419>.
- [122] G. Garretón, L. Maxwell, I. Cornejo, Transition of the Flow Regime Inside of Monolith Microchannel Reactors Fed with Highly Turbulent Flow, *Catalysts* 13(6) (2023) 17. <https://doi.org/10.3390/catal13060938>.
- [123] M. Sosnowski, J. Krzywanski, K. Grabowska, R. Gnatowska, Polyhedral meshing in numerical analysis of conjugate heat transfer, 12th International Conference on Experimental Fluid Mechanics (EFM), E D P Sciences, Mikulov, Czech Republic, 2017.
- [124] J.H. Lienhard IV, J.H. Lienhard V, *A heat transfer textbook*, 4th edition ed., Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, U.S.A., 2017.
- [125] Z. Jaworski, *Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2005.

[126] Keyence, Surface Roughness Parameters.

<https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/parameters.jsp>. (Accessed 13.10.21).

[127] Keyence, Area Roughness Parameters.

<https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/parameters.jsp>. (Accessed 9.12.21).

## Spis ilustracji

Rys. 1. Etapy heterogenicznego procesu katalitycznego: 1 - dyfuzja zewnętrzna substratów do powierzchni warstwy aktywnej, 2 - dyfuzja wewnętrzna substratów w porach warstwy katalitycznej, 3 - adsorpcja substratów na centrach aktywnych, 4 - reakcja chemiczna, 5 - desorpcja produktów z centrów aktywnych, 6 - dyfuzja wewnętrzna produktów w porach warstwy katalitycznej, 7 - dyfuzja zewnętrzna produktów do przepływającego płynu [24].....	11 -
Rys. 2. Formowanie się profilu prędkości/temperatury/stężenia w kanale: 1 - przepływ laminarny rozwijający się, 2 - przepływ rozwinięty [58] .....	13 -
Rys. 3. Porównanie właściwości transportowych monolitu i struktur krótkokanałowych o trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów o długości $L = 3,1 - 20$ mm [59, 67, 68].....	14 -
Rys. 4. Porównanie wartości współczynników oporu Fanninga dla monolitu i struktur krótkokanałowych o trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów o długości $L = 3,1 - 20$ mm [67, 68].....	15 -
Rys. 5. Porównanie wypełnień monolitycznych o sześciokątnym i okrągłym kształcie przekroju poprzecznego kanałów ([76]) .....	16 -
Rys. 6. Zjawiska towarzyszące przepływowi przez kanał monolitów i struktur krótkokanałowych	17 -
Rys. 7. Opływ ciała stałego o aerodynamicznym kształcie [79] .....	18 -
Rys. 8. Porównanie wymiarów dwóch obiektów – walca oraz profilu skrzydła o takim samym oporze [79].....	18 -
Rys. 9. Porównanie linii prądu dla struktury opływowej (A) i prostopadłościennej (B). Zawierania i strefy stagnacji: 1 - na ścianie czołowej, 2 - we wlotowej części kanału, 3 - za strukturą .....	20 -
Rys. 10. Wyniki analizy CFD (A - $\Delta P$ vs. $w_0$ , B - $Nu$ vs. $w_0$ ) oraz geometrie zastosowane do jej przeprowadzenia (C).....	21 -
Rys. 11. Zdjęcia przykładowych struktur opływowych o sześciokątnym, kwadratowym i trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów.....	23 -
Rys. 12. Wycinek przykładowej struktury opływowej.....	24 -
Rys. 13. Aparatura pomiarowa: 1 - sprężarka, 2 - rotametr, 3 - reaktor, 4 - termopary (4a - umieszczone na strukturze od strony wlotowej, 4b - umieszczone na strukturze od strony wylotowej), 5 - system zbierania/przetwarzania danych, 6 - struktura, 7 - źródło prądu elektrycznego .....	24 -
Rys. 14. Badana struktura z przylutowanymi blaszkami doprowadzającymi prąd elektryczny, umieszczona w module pomiarowym, widok od strony wlotowej.....	25 -
Rys. 15. Rekonstrukcja 3D struktury kwadratowej o długości 3 mm otrzymana metodą XCT z wykorzystaniem programu iMorph, widok od strony wylotowej.....	27 -
Rys. 16. Porównanie rzeczywistej i modelowej wysokości kanałów struktur kwadratowych o długości A- 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm.....	29 -
Rys. 17. Porównanie rzeczywistej i modelowej wysokości kanałów struktur sześciokątnych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm.....	29 -
Rys. 18. Porównanie rzeczywistej i modelowej wysokości kanałów struktur trójkątnych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm.....	30 -
Rys. 19. Obrazy powierzchni struktury wykonane za pomocą profilometru optycznego .....	32 -
Rys. 20. Wpływ kształtu przekroju poprzecznego kanałów na opory przepływu dla struktury o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C- 12 mm.....	34 -
Rys. 21. Wpływ długości struktury na opory przepływu: A - struktury kwadratowe, B - struktury sześciokątne [65], C - struktury trójkątne [67].....	35 -



Rys. 22. Spadki ciśnień dla struktur opływowych i krótkokanałowych o trójkątnym kształcie przekroju poprzecznego kanałów [65, 67].....	36 -
Rys. 23. Współczynnik oporów Fanninga dla struktur kwadratowych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm. Porównanie z równaniami literaturowymi [68, 104-108] .....	39 -
Rys. 24. Współczynnik oporów Fanninga dla struktur sześciokątnych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm. Porównanie z równaniami literaturowymi [49, 65, 68, 104-107] .....	42 -
Rys. 25. Współczynnik oporu Fanninga dla struktur trójkątnych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm. Porównanie z równaniami literaturowymi [59, 67, 68, 105-107, 109, 112].....	45 -
Rys. 26. Wartość ( $f \cdot Re$ ) w zależności od $L^+$ dla struktur: A - kwadratowych, B - sześciokątnych, C - trójkątnych .....	47 -
Rys. 27. Porównanie wartości ( $f \cdot Re$ ) eksperymentalnych i obliczonych z równań wg. Tab. 13 dla struktur: A - kwadratowych, B - sześciokątnych, C - trójkątnych.....	48 -
Rys. 28. Porównanie oporów przepływu dla złoża usypanego, wypełnienia monolitycznego i struktur opływowych: A - kwadratowych, B - sześciokątnych, C - trójkątnych .....	50 -
Rys. 29. Wpływ długości struktury na wartości liczby $Nu$ : A - struktury kwadratowe, B - struktury sześciokątne, C - struktury trójkątne .....	52 -
Rys. 30. Wpływ kształtu przekroju poprzecznego kanału na wartości liczb Nusselta dla struktur o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm.....	53 -
Rys. 31. Transport ciepła dla struktur kwadratowych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm. Porównanie z równaniami literaturowymi [68, 104, 106, 116, 117, 119] .....	56 -
Rys. 32. Transport ciepła dla struktur sześciokątnych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm. Porównanie z równaniami literaturowymi [49, 66, 68, 104, 106] .....	59 -
Rys. 33. Transport ciepła dla struktur trójkątnych o długości: A - 3 mm, B - 6 mm, C - 12 mm. Porównanie z równaniami literaturowymi [59, 67, 68, 106, 119] .....	62 -
Rys. 34. Transport ciepła struktur: A - kwadratowych, B - sześciokątnych, C - trójkątnych .....	64 -
Rys. 35. Porównanie wartości eksperymentalnych i obliczonych z równań z Tab. 21 dla struktur: A - kwadratowych, B - sześciokątnych, C - trójkątnych .....	65 -
Rys. 36. Porównanie wartości liczb Nusselta dla złoża usypanego, wypełnienia monolitycznego i struktur opływowych: A - kwadratowych, B - sześciokątnych, C - trójkątnych .....	66 -
Rys. 37. Wpływ ilości elementów siatki na wartości liczb Nusselta i opory przepływu .....	68 -
Rys. 38. Siatki obliczeniowe przykładowych struktur: A - SKw3, B - krótkokanałowej o długości 3 mm .....	69 -
Rys. 39. Przykładowa domena obliczeniowa (struktury SKw3) wraz z warunkami brzegowymi....	70 -
Rys. 40. Porównanie oporów przepływu wyznaczonych eksperymentalnie i za pomocą symulacji CFD .....	71 -
Rys. 41. Porównanie wartości liczb Nusselta wyznaczonych eksperymentalnie i przy zastosowaniu symulacji CFD .....	72 -
Rys. 42. Rozkłady temperatur oraz linie prądu płynu w domenie obliczeniowej struktury opływowej o długości 3 mm - SKw3 .....	74 -
Rys. 43. Rozkłady temperatur oraz linie prądu płynu w domenie obliczeniowej struktury krótkokanałowej o długości 3 mm.....	76 -
Rys. 44. Linie prądu i rozkłady prędkości dla struktury krótkokanałowej w płaszczyźnie: A - w osi kanału, B - przy ścianie, C - na przekątnej kanału .....	77 -
Rys. 45. Porównanie uśrednionych wartości liczb Nusselta dla struktury opływowej i krótkokanałowej o długości 3 mm.....	78 -
Rys. 46. Porównanie lokalnych wartości liczb Nusselta dla struktury opływowej (SKw3) i krótkokanałowej .....	79 -

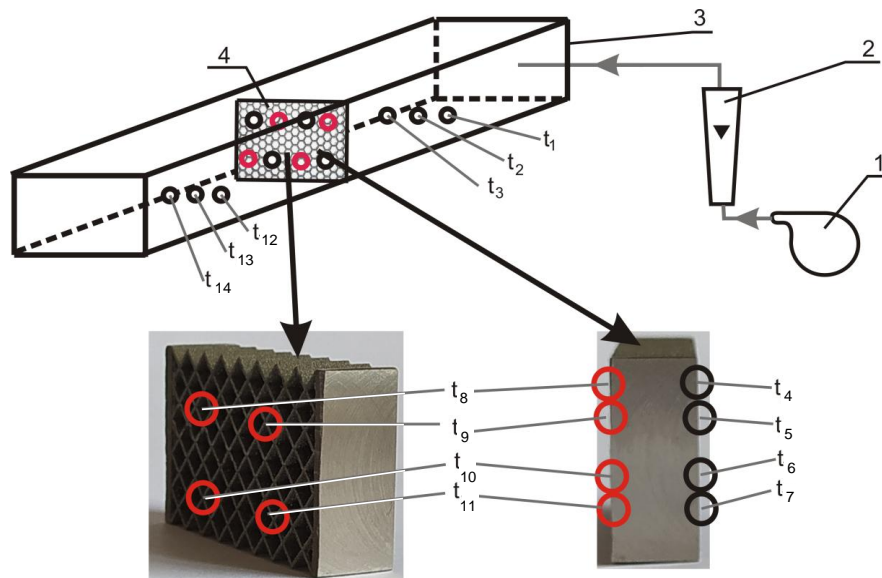
Rys. 47. Porównanie uśrednionych wartości liczb Nusselta dla struktury opływowej i krótkokanałowej o długości 3 mm.....	- 80 -
Rys. 48. Porównanie uśrednionych spadków ciśnień dla struktury opływowej i krótkokanałowej o długości 3 mm .....	- 80 -
Rys. 49. Schemat aparatury pomiarowej uwzględniający szczegółowe rozmieszczenie termopar: 1 - sprężarka, 2 - rotametr, 3 - reaktor, 4 - testowana struktura.....	- 100 -

## Spis tabel

Tab. 1. Parametry transportowe i przepływowe dla różnych geometrii przekroju poprzecznego kanałów .....	- 16 -
Tab. 2. Wartości współczynników oporów czołowych $C_D$ dla obiektów o różnych kształtach dla $Re = 10^4 - 10^6$ .....	- 18 -
Tab. 3. Parametry testowanych struktur .....	- 23 -
Tab. 4. Porównanie rzeczywistych i modelowych wartości parametrów charakteryzujących badane struktury .....	- 28 -
Tab. 5. Porównanie wartości średnic hydraulicznych testowanych struktur obliczonych na podstawie modelu CAD i wyników analizy tomograficznej .....	- 31 -
Tab. 6. Wyniki analizy topograficznej powierzchni SKw3 .....	- 32 -
Tab. 7. Korelacje literaturowe opisujące opory przepływu dla struktur kwadratowych .....	- 38 -
Tab. 8. Porównanie wyników eksperymentalnych i korelacji literaturowych dla struktur kwadratowych. Wartości błędów względnych i odchylenia standardowego .....	- 40 -
Tab. 9. Korelacje literaturowe opisujące opory przepływu dla struktur o sześciokątnych .....	- 41 -
Tab. 10. Porównanie wyników eksperymentalnych i korelacji literaturowych dla struktur sześciokątnych. Wartości błędów względnych i odchylenia standardowego .....	- 43 -
Tab. 11. Korelacje literaturowe opisujące opory przepływu dla struktur o trójkątnych .....	- 44 -
Tab. 12. Porównanie wyników eksperymentalnych i korelacji literaturowych dla struktur trójkątnych. Wartości błędów względnych i odchylenia standardowego .....	- 46 -
Tab. 13. Równania opisujące opory przepływu dla struktur opływowych .....	- 47 -
Tab. 14. Parametry wypełnienia monolitycznego i złoża usypanego wybranych do porównania .....	- 49 -
Tab. 15. Korelacje literaturowe opisujące transport ciepła dla struktur kwadratowych .....	- 55 -
Tab. 16. Porównanie wyników eksperymentalnych i korelacji literaturowych dla struktur kwadratowych. Wartości błędów względnych i odchylenie standardowego .....	- 57 -
Tab. 17. Korelacje literaturowe opisujące transport ciepła dla struktur sześciokątnych .....	- 58 -
Tab. 18. Porównanie wyników eksperymentalnych i korelacji literaturowych dla struktur sześciokątnych. Wartości błędów względnych i odchylenie standardowego .....	- 60 -
Tab. 19. Korelacje literaturowe opisujące transport ciepła dla struktur trójkątnych .....	- 61 -
Tab. 20. Porównanie wyników eksperymentalnych i korelacji literaturowych dla struktur trójkątnych. Wartości błędów względnych i odchylenie standardowego .....	- 63 -
Tab. 21. Równania opisujące liczby Nusselta dla struktur opływowych .....	- 64 -
Tab. 22. Ilości elementów siatek obliczeniowych .....	- 68 -
Tab. 23. Właściwości powietrza zastosowane w symulacjach CFD .....	- 70 -
Tab. 24. Porównanie wyników symulacji CFD i eksperymentalnych dla struktur kwadratowych. Wartości błędów względnych i odchylenia standardowego .....	- 72 -

## Dodatek 1 - procedura obliczeniowa współczynników wnikania ciepła dla struktur opływowych

Schemat aparatury pomiarowej zawierający szczegółowe rozmieszczenie termopar przedstawiono na Rys. 49.



Rys. 49. Schemat aparatury pomiarowej uwzględniający szczegółowe rozmieszczenie termopar:  
1 - sprężarka, 2 - rotametr, 3 - reaktor, 4 - testowana struktura

Procedura obliczeniowa współczynników wnikania ciepła dla struktur opływowych obejmowała następujące etapy:

1. Wprowadzenie do programu komputerowego parametrów stałych struktury: powierzchni czołowej  $A$ , powierzchni właściwej  $S_v$ , porowatości  $\varepsilon$ , średnicy hydraulicznej  $d_h$ , długości  $L$ .
2. Zmierzenie i wprowadzenie do programu komputerowego odległości  $x_1$ : pomiędzy termoparami umieszczonymi po wlotowej stronie struktury ( $t_4 - t_7$  na Rys. 49), a jej zewnętrzną krawędzią po stronie wlotowej, oraz odległości  $x_2$ : pomiędzy termoparami umieszczonymi po wylotowej stronie struktury ( $t_8 - t_{11}$  na Rys. 49), a jej zewnętrzną krawędzią po stronie wylotowej).
3. Wykonanie pomiarów zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 4.2.
4. Wykonanie obliczeń z zastosowaniem wzorów:

$$t_{g1} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} \quad t_{g2} = \frac{t_{12} + t_{13} + t_{14}}{3}$$

$$t_{gm} = \frac{t_{g1} + t_{g2}}{2}$$

$$c_p = f(t_{gm}) \quad \rho = f(t_{gm}) \quad \eta = f(t_{gm})$$

$$W_g = w_0 \cdot \rho \cdot c_p \cdot A$$

$$Re = \frac{w_0 \cdot \rho \cdot d_h}{\varepsilon \cdot \eta}$$

$$Q_{el} = I \cdot U$$

$$Q_{eff} = W_g \cdot (t_{g2} - t_{g1}) \quad Q_{str} = Q_{el} - Q_{eff}$$

$$t_{p1} = \frac{t_4 + t_5 + t_6 + t_7}{4} \quad t_{p2} = \frac{t_8 + t_9 + t_{10} + t_{11}}{4}$$

$$t_{pm} = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{2}$$

$$t_{l1} = t_{g1} + \frac{x_1 Q_{eff}}{L W_g} \quad t_{l2} = t_{g1} + \frac{x_2 Q_{eff}}{L W_g}$$

$$\Delta t_1 = t_{p1} - t_{l1} \quad \Delta t_2 = t_{p2} - t_{l2}$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)}$$

$$\alpha = \frac{Q_{eff}}{A \cdot S_v \cdot L \cdot \Delta t_{ln}}$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_h}{\lambda}$$

Gdzie:

$A$  – powierzchnia czołowa struktury (równa polu przekroju poprzecznego reaktora)

$I$  – prąd elektryczny grzania struktury

$Q_{el}$  – ciepło wydzielone na strukturze

$Q_{eff}$  – ciepło efektywnie wydzielone na strukturze (po odjęciu strat)

$Q_{str}$  – straty ciepłne w całym reaktorze

$t_1 - t_3$  – temperatury gazu na wlocie do reaktora

$t_4 - t_7$  – temperatury struktury na wlocie

$t_8 - t_{11}$  – temperatury struktury na wylocie

$t_{12} - t_{14}$  – temperatury gazu na wylocie z reaktora

$t_{g1}, t_{g2}$  – średnia temperatura gazu odpowiednio na wlocie do reaktora i wylocie z reaktora

$t_{p1}, t_{p2}$  – średnia temperatura struktury odpowiednio na wlocie i wylocie

$t_{gm}, t_{pm}$  – średnia temperatura odpowiednio gazu i struktury

$U$  – spadek potencjału elektrycznego na strukturze

$V^*$  - przepływ objętościowy gazu (odczyt rotametu)

$W_g$  – pojemność cieplna gazu

$x_1$  – odległość, w jakiej przyklejono termopary  $t_1 - t_3$  od wlotu struktury

$x_2$  – odległość, w jakiej przyklejono termopary  $t_4 - t_6$  od wlotu struktury

$\Delta t_1, \Delta t_2$  – różnica temperatur gazu i struktury odpowiednio strona wlotowa i wylotowa

$\Delta t_m$  – średnia logarytmiczna różnica temperatur gaz-struktura