



Imię i nazwisko autora rozprawy: Przemysław Kozak

Dyscyplina naukowa: inżynieria mechaniczna

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Teoretyczno-doświadczalne modelowanie konwekcji wymuszonej nanocieczny

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Experimental and numerical modeling of forced convection of nanofluids

Promotor	Drugi promotor
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>
prof. dr hab. inż. Janusz T. Cieśliński	<Tytuł, stopień, imię i nazwisko>
Promotor pomocniczy	Kopromotor
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>
<Tytuł, stopień, imię i nazwisko>	<Tytuł, stopień, imię i nazwisko>

Gdańsk, rok 2023



OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: Przemysław Kozak

Ja, niżej podpisany(a), oświadczam, iż jestem świadomy(a), że zgodnie z przepisem art. 27 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2021 poz. 1062), uczelnia może korzystać z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej:
Teoretyczno-doświadczalne modelowanie konwekcji wymuszonej nanociecicy
do prowadzenia badań naukowych lub w celach dydaktycznych.¹

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2021.478 t.j.), a także odpowiedzialności cywilnoprawnej oświadczam, że przedkładana rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie.

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem prof. dr. hab. inż. Januszem T. Cieślińskim, ~~drugim promotorem <drugi promotor>, promotorem pomocniczym <promotor pomocniczy>, kopromotorem <kopromotor>*~~.

Niniejsza rozprawa doktorska nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem stopnia doktora.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. rozprawie uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami, zgodnie z przepisem art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk,

dnia

.....

podpis doktoranta

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/~~nie wyrażam zgody~~* na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej.

Gdańsk, dnia

.....

podpis doktoranta

*niepotrzebne usunąć

¹Art. 27. 1. Instytucje oświatowe oraz podmioty, o których mowa w art. 7 ust. 1 pkt 1, 2 i 4–8 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, mogą na potrzeby zilustrowania treści przekazywanych w celach dydaktycznych lub w celu prowadzenia działalności naukowej korzystać z rozpowszechnionych utworów w oryginale i w tłumaczeniu oraz zwielokrotnić w tym celu rozpowszechnione drobne utwory lub fragmenty większych utworów.

2. W przypadku publicznego udostępniania utworów w taki sposób, aby każdy mógł mieć do nich dostęp w miejscu i czasie przez siebie wybranym korzystanie, o którym mowa w ust. 1, jest dozwolone wyłącznie dla ograniczonego kręgu osób uczących się, nauczających lub prowadzących badania naukowe, zidentyfikowanych przez podmioty wymienione w ust. 1.



OPIS ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy doktorskiej: Przemysław Kozak

Tytuł rozprawy doktorskiej w języku polskim: Teoretyczno-doświadczalne modelowanie konwekcji wymuszonej nanocieczy

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Experimental and numerical modeling of forced convection of nanofluids

Język rozprawy doktorskiej: polski

Promotor rozprawy doktorskiej: prof. dr hab. inż. Janusz T. Cieśliński

~~**Drugi promotor rozprawy doktorskiej*:** <imię, nazwisko>~~

~~**Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej*:** <imię, nazwisko>~~

~~**Kopromotor rozprawy doktorskiej*:** <imię, nazwisko>~~

Data obrony: <dzień, miesiąc, rok>

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku polskim: konwekcja wymuszona, nanociecze, badania eksperymentalne, obliczenia numeryczne

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku angielskim: forced convection, nanofluids, experimental investigation, numerical calculations

Streszczenie rozprawy w języku polskim: Przedłożona rozprawa doktorska dotyczy badań eksperymentalnych oraz numerycznych konwekcji wymuszonej nanocieczy. Badane nanociecze wytworzone były z cieczy bazowych takich jak woda demineralizowana i mieszaniny wody z glikolem etylenowym w trzech proporcjach objętościowych 90:10, 80:20 i 60:40. Jako nanocząstki użyto Al_2O_3 , a wytworzone nanociecze miały koncentracje masowe 0,1%, 1% i 5%. Wyznaczono eksperymentalnie dynamiczny współczynnik lepkości oraz współczynnik przewodzenia ciepła badanych nanocieczy. Wyznaczono współczynnik intensyfikacji ciepłno-hydraulicznej badanych nanocieczy. Wyniki eksperymentalne porównano z wynikami obliczeń numerycznych.

Streszczenie rozprawy w języku angielskim: This PhD thesis is dilling with experimental and numerical studies of forced convection of nanofluids. Tested nanofluids were made by use of base fluids such as demineralized water and mixtures of water and ethylene glycol in three volume ratios: 90:10, 80:20 and 60:40. Al₂O₃ nanoparticles were used to prepare nanofluids witch concetrations 0,1%, 1% and 5% by weight. Dynamic viscosity and thermal conductivity of tested nanofluids were experimentally determined. Based on the experimental data the coefficient of thermo-hydraulic intensification of nanofluids was determined. The experimental results were compared with results of numerical simulations.

Streszczenie rozprawy w języku, w którym została napisana:** <streszczenie, maksymalnie 1400 znaków ze spacjami>

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku, w którym została napisana:** <słowa kluczowe>

* niepotrzebne skreślić

** dotyczy rozpraw doktorskich napisanych w innych językach, niż polski lub angielski

Politechnika Gdańska

Wydział Inżynierii Materiałowej i Okrętownictwa

**TEORETYCZNO-DOŚWIADCZALNE MODELOWANIE
KONWEKCJI WYMUSZONEJ NANOCIECZY**

Rozprawa doktorska

Przemysław Kozak

Promotor
prof. dr hab. inż. Janusz T. Cieśliński

Gdańsk, 2023



Kochanej żonie Kasi i synowi Wojtkowi

Składam serdeczne podziękowania Panu Promotorowi
prof. dr. hab. inż. Januszowi T. Cieślińskiemu za cały poświęcony czas,
zaangażowanie oraz nieustanne motywowanie do podejmowania coraz to
nowszych wyzwań.

Serdecznie dziękuję Panu Prof. Dr.-Ing. Sławomirowi Smoleniowi z Hochschule
Bremen za umożliwienie badań własności termofizycznych nanocieczy i wszelką
pomoc w ich realizacji.

Dziękuję Panu Dipl.-Ing. Albrechtowi Eicke z Hochschule Bremen za okazaną
pomoc podczas wykonywania badań własności termofizycznych nanocieczy.

Serdeczne podziękowania składam Panu dr. hab. inż. Jackowi Barańskiemu,
prof. uczelni za pomoc w przygotowaniu modelu numerycznego oraz wykonaniu
obliczeń numerycznych.

Serdecznie dziękuję także wszystkim moim bliskim za ogromne wsparcie
duchowe i niegasnącą wiarę w to, że ta praca może powstać.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	4
1. Wstęp.....	6
2. Konwekcja wymuszona w przewodach.....	7
2.1. Korelacje do obliczania liczby Nusselta podczas przepływu w przewodach.....	9
2.2. Korelacje do obliczania współczynnika oporów przepływu.....	11
2.3. Intensyfikacja przenoszenia ciepła w przewodach.....	12
2.4. Współczynnik intensyfikacji ciepłno-hydraulicznej.....	14
3. Wytwarzanie i własności nanocieczy.....	15
3.1. Wytwarzanie nanocieczy.....	16
3.2. Stabilność nanocieczy.....	17
3.3. Własności termofizyczne nanocieczy.....	18
4. Badania nanocieczy w warunkach konwekcji wymuszonej.....	25
4.1. Badania eksperymentalne konwekcji wymuszonej w przewodach.....	25
4.2. Badania numeryczne konwekcji wymuszonej w przewodach.....	30
4.3. Korelacje do obliczania liczby Nusselta.....	38
4.4. Korelacje do obliczania współczynnika oporów przepływu.....	40
4.5. Badania konwekcyjnej wymiany ciepła w wybranych wymiennikach ciepła.....	41
4.6. Podsumowanie stanu wiedzy.....	51
5. Cel i zakres pracy.....	51
6. Stanowisko badawcze.....	54
6.1. Sekcja grzejna.....	57
6.2. Przygotowanie i charakterystyka badanych nanocieczy.....	58
6.3. Procedura pomiarowa.....	62
6.4. Własności termofizyczne badanych nanocieczy.....	63
6.5. Opracowanie wyników pomiarów.....	71
6.6. Oszacowanie niedokładności wyników pomiarów.....	75
7. Wyniki badań eksperymentalnych nanocieczy w warunkach konwekcji wymuszonej.....	77
7.1. Wyniki wzorcowania.....	77

7.2.	Wyniki badań ciepłno-hydraulicznych.....	78
7.3.	Własne równania korelacyjne.....	88
8.	Obliczenia numeryczne.....	98
8.1.	Równania zachowania i warunki brzegowe	98
8.2.	Metoda numeryczna.....	100
8.3.	Wpływ geometrii siatki.....	100
8.4.	Walidacja modelu numerycznego.....	102
8.5.	Wpływ koncentracji nanocząstek.....	103
8.6.	Wpływ cieczy bazowej.....	110
9.	Podsumowanie i wnioski końcowe.....	113
	Literatura.....	115
	Załączniki.....	123

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- a – dyfuzyjność cieplna, [m^2/s]
 A – pole powierzchni, [m^2]
 A_i – powierzchnia wymiany ciepła, [m^2]
 c_p – ciepło właściwe, [$J/kg \cdot K$]
 d – średnica, [m]
 f – współczynnik oporów przepływu, [-]
 I – natężenie prądu, [A]
 L – długość czynna rurki, [m]
 p – ciśnienie, [Pa]
 P – moc elektryczna, [W]
 \dot{q} – gęstość strumienia ciepła, [W/m^2]
 t – temperatura, [$^{\circ}C$]
 T – temperatura absolutna, [K]
 \bar{u} – średnia prędkość cieczy, [m/s]
 U – napięcie elektryczne, [V]
 \dot{V} – strumień objętościowy cieczy, [m^3/s]

Litery greckie

- α – współczynnik przejmowania ciepła, [$W/(m^2K)$]
 λ – współczynnik przewodzenia ciepła, [$W/(mK)$]
 μ – dynamiczny współczynnik lepkości, [$Pa \cdot s$]
 ν – kinematyczny współczynnik lepkości, [m^2/s]
 ξ – współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej, [-]
 ρ – gęstość, [kg/m^3]
 φ – koncentracja, [%]

Indeksy dolne

bf – ciecz bazowa

cs – przekrój poprzeczny rurki

f – ciecz

h – hydrauliczna

i – wewnętrzna

in – wlot

m – masowa

nf – nanociecz

o – zewnętrzna

out – wylot

p – nanocząstki

t – rurka

v – objętościowa

w – ścianka

Liczby bezwymiarowe

Nu Liczba Nusselta

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

Pr Liczba Prandtla

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$$

Re Liczba Reynoldsa

$$Re = \frac{\rho \bar{u} d_h}{\mu}$$

1. Wstęp

Zaostrzane normy dotyczące ochrony środowiska, skończone zasoby nośników energii i surowców, lokalne braki wody służącej jako chłodziwo oraz nieustanny postęp wielu technologii powodujących konieczność odbierania z chłodzonych ścianek coraz większych jednostkowych strumieni ciepła, wymuszają ciągle poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych w celu zmniejszenia masy i gabarytów urządzeń, wydłużenia czasu ich pracy, przy jednoczesnym ograniczaniu kosztów eksploatacji, wynikających np. ze zwiększonych oporów przepływu w zminiaturyzowanych urządzeniach. Stąd aktualność tematyki intensyfikacji przenoszenia ciepła, która może dotyczyć modyfikacji powierzchni przenoszenia ciepła, zmiany własności termofizycznych płynów lub obu tych działań jednocześnie.

Obie wspomniane tendencje, tj. miniaturyzacja urządzeń i rosnące obciążenia cieplne, powodują stałe zainteresowanie metodami intensyfikacji przejmowania ciepła, wśród których nanociecze wydają się jedną z najbardziej perspektywicznych. Opublikowane wyniki badań pokazują, że zastosowanie nanocieczy w jednofazowych układach termicznych prowadzi w większości przypadków do wzrostu współczynnika przejmowania ciepła, ale także jego obniżenia w zależności od rodzaju materiału nanocząstek, ich koncentracji i średniego wymiaru, oraz wartości liczby Reynoldsa i średniej temperatury nanocieczy. W przypadku konwekcji wymuszonej istotne są opory przepływu, które determinują moc pompowania. Jak wynika z badań, lepkość nanocieczy jest wyższa niż cieczy bazowej i rośnie wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek, co skutkuje wyższymi oporami przepływu. Istotne jest więc takie dobranie nanocieczy, aby dla danej geometrii przewodu i warunków przepływu maksymalizować intensyfikację przekazywania ciepła, a jednocześnie ograniczać (minimalizować) wzrost oporów przepływu. W związku z powyższym w przedłożonej pracy przeprowadzono systematyczne badania eksperymentalne jednofazowej konwekcji wymuszonej wybranych nanocieczy mające na celu wyznaczenie charakterystyk cieplno-przepływowych, które zostaną uogólnione w postaci korelacji do obliczania współczynnika przejmowania ciepła oraz oporów przepływu. Jednocześnie wyniki badań eksperymentalnych stanowiły podstawę do walidacji opracowanego modelu numerycznego.

2. Konwekcja wymuszona w przewodach

Wymiana ciepła zachodząca w płynach odbywa się przez przewodzenie oraz wskutek występowania prądów wewnętrznych płynu, powodujących przenoszenie energii cieplnej przez przemieszczające się porcje substancji. Proces ten, zwany konwekcją, dzieli się na [1]:

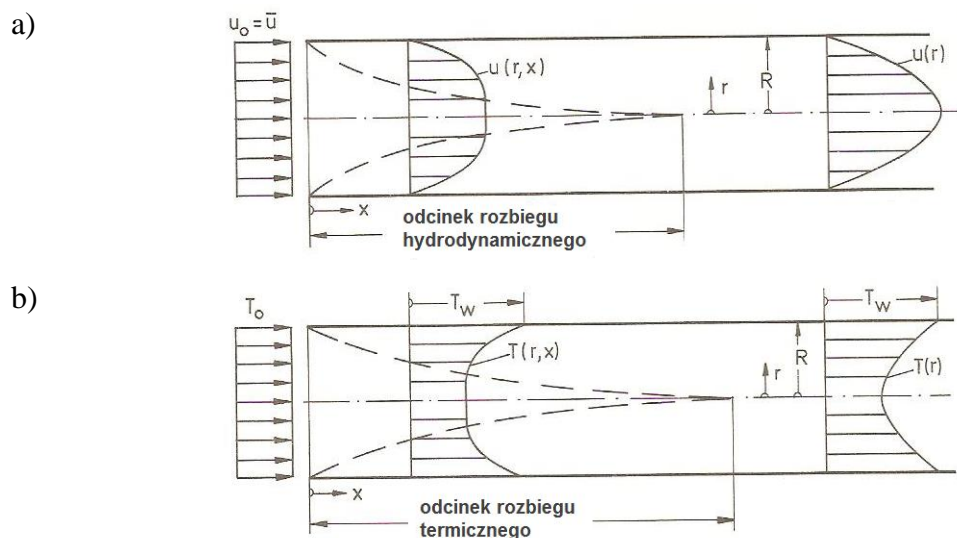
- konwekcję swobodną, dla której różnice temperatur płynu wpływają na zmianę gęstości, a co za tym idzie powstawanie sił wyporu powodujących tworzenie się prądów wewnętrznych,
- konwekcję wymuszoną, gdzie ruch płynu wywołany jest działaniem sił zewnętrznych: zmianą ciśnienia lub wysokości lub zastosowaniem dodatkowych urządzeń takich jak wentylatory lub pompy.

Przedłożona praca dotyczy wymiany ciepła między płynem, a ścianką przewodu wewnątrz którego przepływa płyn, zwanej przejmowaniem ciepła. Wyróżnia się trzy rodzaje przepływów: laminarny, przejściowy i turbulentny. Charakter przepływu określany jest na podstawie wartości liczby Reynoldsa:

$$Re = \frac{\bar{u} d_h}{\nu} \quad (2.1)$$

gdzie: \bar{u} [m/s] – średnia prędkość płynu,
 d_h [m] – średnica hydrauliczna przewodu,
 ν [m²/s] – kinematyczny współczynnik lepkości.

Przejmowanie ciepła podczas przepływu laminarnego odbywa się na zasadzie przewodzenia ciepła w warstwie przyściennej w kierunku prostopadłym do ścianki. Rozkład temperatury w termicznej warstwie przyściennej oraz rozkład prędkości w hydraulicznej warstwie przyściennej dla przepływu laminarnego w przewodzie okrągłym przedstawiono na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Warstwy przyścienne podczas przepływu laminarnego w przewodzie okrągłym
 a) hydrauliczna warstwa przyścienna, b) termiczna warstwa przyścienna dla $t_w = \text{const.}$ [2]

Podczas przepływu turbulentnego głównym mechanizmem wymiany ciepła jest silne mieszanie się porcji płynu, przy czym przy ścianie przewodu przenoszenie ciepła zachodzi na drodze przewodzenia ciepła. Do utworzenia równań opisujących przejmowanie ciepła przy przepływie turbulentnym wykorzystuje się analogie między wymianą ciepła, a wymianą pędu. Najprostszą z nich jest analogia Reynoldsa zakładająca, że turbulentne współczynniki lepkości i dyfuzyjności termicznej są jednakowe w każdym punkcie. Uproszczenie to może być stosowane jedynie dla płynów o liczbie Prandtla bliskiej jedności. W analogii Prandtla zakłada się występowanie podwarstwy laminarnej znajdującej się w pobliżu powierzchni ścianki. W tym obszarze wymiana pędu i ciepła ma charakter molekularny. Pozostała część płynu stanowi obszar, w którym zachodzi turbulentna wymiana pędu i ciepła. Rozwinięciem analogii Prandtla jest analogia Karmana, zakładająca dodatkowo występowanie między warstwą laminarną a turbulentną warstwy przejściowej.

2.1 Korelacje do obliczania liczby Nusselta podczas przepływu w przewodach

W badaniach dotyczących przejmowania ciepła zarówno wymiar charakterystyczny przewodu jak i współczynnik przewodzenia ciepła płynu są z reguły znane. Głównym problemem staje się wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła, co można zrobić przez przeprowadzenie stosownego eksperymentu lub też przez teoretyczną analizę procesu. Równania opisujące konwekcyjne przenoszenie ciepła uważa się za jedne z najtrudniejszych do rozwiązania i można je rozwiązać tylko dla najprostszych przypadków. Celem znalezienia związków matematycznych umożliwiających wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła wykorzystuje się teorię podobieństwa. Drugą metodą służącą do wyznaczania modułów podobieństwa zjawisk jest analiza wymiarowa [3]. W przypadku konwekcji wymuszonej w kanałach, równanie korelacyjne na liczbę Nusselta ma postać:

$$Nu = f(Re, Pr, Gr, \varepsilon_L, \varepsilon_T) \quad (2.2)$$

gdzie: Re – liczba Reynoldsa,

Pr – liczba Prandtla,

Gr – liczba Grashofa,

ε_L – poprawka uwzględniająca wpływ rozbiegu hydraulicznego,

ε_T – poprawka uwzględniająca wpływ temperatury na własności płynu.

W tab. 2.1 przedstawiono powszechnie uznane korelacje służące do wyznaczania liczby Nusselta podczas przepływu w przewodach.

Tab. 2.1. Korelacje do wyznaczania liczby Nu w przewodach

Nr	Autorzy	Wzór	Nr wzoru	Zakres	Uwagi
1	Dittus – Boelter [4]	$\overline{Nu} = 0,23Re^{0,8}Pr^n$	(2.3)	$Re > 10^4$ $0,7 < Pr < 100$ $L/d > 60$	$n=0,4$ - grzanie $n=0,3$ - chłodzenie

2	Kraußold [5]	$\overline{Nu} = 0,032Re^{0,8}Pr^m \left(\frac{L}{d}\right)^{-0,054}$	(2.4)	$Re > 10^4$	$m=0,37$ - grzanie $m=0,3$ - chłodzenie
3	Sieder – Tate [6]	$\overline{Nu} = 1,86(RePr)^{1/3} \left(\frac{d}{L}\right) \left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^{0,14}$ $\overline{Nu} = 0,027Re^{4/5}Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^{0,14}$	(2.5)	$Re < 2300$ $0,48 < Pr < 16700$ $0,0044 < \frac{\mu_f}{\mu_w} < 9,75$ $Re > 10^4$ $0,7 < Pr < 16700$ $L/d > 10$	$T = \text{const}$
4	Michiejew [7]	$\overline{Nu} = 0,15Re^{0,33}Gr^{0,1}Pr_f^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25} \varepsilon_L$ $\overline{Nu} = 0,021Re^{0,8}Pr_f^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25} \varepsilon_L$	(2.6)	$Re < 2300$ $10^4 < Re < 5 \cdot 10^6$ $0,6 < Pr < 2500$	ε_L – poprawka na rozbieg hydrauliczny, dobierana na podstawie stosunku L/d oraz Re
4	Petukhov [8]	$\overline{Nu} = \frac{(f/8)RePr}{1,07 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$	(2.7)	$10^4 < Re < 5 \cdot 10^6$ $0,5 < Pr < 2000$	$f = (1,82 \cdot \ln Re - 1,64)^{-2}$
5	Notter – Sleicher [9]	$\overline{Nu} = 4,8 + 0,0156Pe^{0,85}Pr^{0,08}$ $\overline{Nu} = 6,3 + 0,0167Pe^{0,85}Pr^{0,08}$	(2.8)	$10^4 < Re < 10^6$ $0,004 < Pr < 0,1$	$T = \text{const}$ $q = \text{const}$
6	Churchill – Ozoe [10]	$\overline{Nu} = \frac{0,3387Pr^{1/3}Re^{1/2}}{[1 + (0,0468/Pr)^{2/3}]^{1/4}}$	(2.9)	$Re > 100$	
7	Hausen [11]	$\overline{Nu} = 0,037 \left[1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{2/3} \right] [Re^{0,75} - 180] (Pr_f)^{0,42} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^{0,14}$	(2.10)	$2300 < Re < 2 \cdot 10^6$ $0,6 < Pr < 1000$ $d/L < 1$	
8	Gnieliński [12]	$\overline{Nu} = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{0,5}(Pr^{2/3} - 1)}$	(2.11)	$3 \cdot 10^3 < Re < 5 \cdot 10^6$ $0,5 < Pr < 2000$	$f = (0,79 \ln Re - 1,64)^{-2}$
9	Кутателадзе [13]	$\overline{Nu} = 1,61 \left(Pe \frac{d}{L} \right)^{1/3}$	(2.12)	$Pe > 12$ $d/L < 12$	

2.2 Korelacje do obliczania współczynnika oporów przepływu

Podczas przepływu płynu w przewodzie, na skutek tarcia o ścianki powstają opory przepływu. W przypadku przepływu burzliwego naprężenia styczne na ścianie są proporcjonalne do gęstości płynu i kwadratu średniej prędkości przepływu, co wyraża zależność [14]

$$\tau_w = f \frac{\rho \bar{u}^2}{2} \quad (2.13)$$

Współczynnik oporów przepływu f zależy od własności termofizycznych płynu, w tym szczególnie od lepkości, geometrii przewodu oraz chropowatości ścianek. W tab. 2.2 przedstawiono wybrane korelacje służące do obliczania współczynnika oporów podczas przepływu w przewodach.

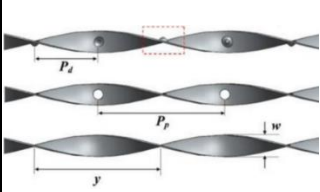
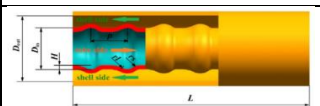
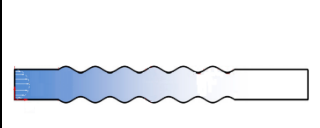
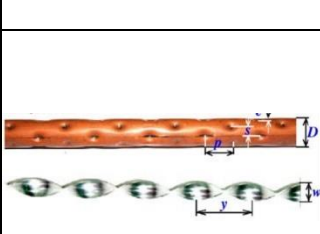
Tab. 2.2. Korelacje do wyznaczania współczynnika oporów przepływu f w przewodach


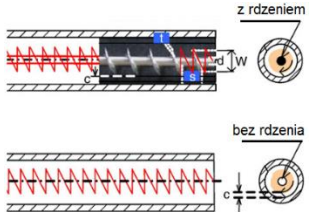
Nr	Autorzy	Wzór	Nr wzoru	Zakres	Uwagi
1	Darcy – Weisbach [15]	$f = 4 \frac{d_h}{2 \rho \bar{u}^2}$	(2.14)		
2	Blasius [16]	$f = 0,3164 Re^{-1/4}$	(2.15)	$3000 < Re < 10^6$	
3	Nikuradse [17]	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,0 \log(Re\sqrt{f}) - 0,8$	(2.16)	$4000 < Re < 3,24 \cdot 10^7$	
4	Colebrook [18]	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\varepsilon/d}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$	(2.17)	$Re > 2300$	ε – chropowatość powierzchni
5	Petukhov [8]	$f = (0,79 \ln Re - 1,64)^{-2}$	(2.18)	$3000 < Re < 5 \cdot 10^6$	
6	Haaland [19]	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/d}{3,7} \right)^{1,11} \right]$	(2.19)		

2.3 Intensyfikacja przenoszenia ciepła w przewodach

Intensyfikacja procesu przenoszenia ciepła w urządzeniach ciepłno-przepływowych może być realizowana przez modyfikację powierzchni wymiany ciepła, zmianę własności termofizycznych cieczy lub przez zastosowanie obu tych metod jednocześnie. W pierwszej metodzie wyróżnia się techniki pasywne takie jak zmianę powierzchni przez zwiększenie chropowatości, ozebrowanie lub deformowanie powierzchni, zastosowanie wkładek turbulizujących gładkich, z wgłębieniami lub nacinanych, karbowanie lub skręcanie przewodów, wykorzystanie mini-mikrokanalów, oraz aktywne polegające na wprowadzeniu układu w wibracje lub pulsacje płynu, wdmuch / ssanie czynnika, natryskiwanie oraz zaburzanie przepływu polem elektromagnetycznym [20, 21]. Wybrane przykłady opisane w literaturze przedstawiono w tab. 2.3.

Tab. 2.3. Metody intensyfikacji wymiany ciepła przez zmianę powierzchni

Nr	Autorzy	Metoda	Widok	Zakres	Uwagi
1	Dagdevir i in. [22]	wkładki ze zwiniętych taśm: gładkie, z wgłębieniami, perforowane,		$5200 < Re < 23000$	najwyższy wzrost Nu dla taśm z wgłębieniami znaczny wzrost oporów przepływu
2	Chen i in. [23]	rury faliste		$12000 < Re < 66000$	wzrost Nu
3	Jafari i in. [24]	przepływ pulsacyjny w rurze falistej		$Re = 50; 100; 150$ $Pr = 3,103$	powyżej pewnej częstotliwości pulsacji spadek Nu
4	Thiangpong i in. [25]	rurka z wgłębieniami + wkładka ze zwiniętej taśmy		$12000 < Re < 44000$	większy wzrost Nu i oporów przepływu przy jednoczesnym wykorzystaniu obu metod

5	Promwonge i in. [26]	wkładki ze zwinętych taśm + wkładki ze spiralnie zwinętego drutu		$3000 < Re < 18000$	dwukrotnie większy przyrost Nu w przypadku jednoczesnego wykorzystania obu elementów
6	Eiamsa-ard i in. [27]	spiralna taśma śrubowa z rdzeniem / bez rdzenia		$2000 < Re < 12000$	większy wzrost Nu oraz mniejszy oporów przepływu dla taśm bez rdzenia

Metody skupiające się na zmianie własności termofizycznych cieczy takich jak współczynnik przewodzenia ciepła, kąt zwilżania, napięcie powierzchniowe, lepkość czy temperatura krzepnięcia, polegają na dodawaniu do konwencjonalnych płynów roboczych substancji powierzchniowo czynnych (surfaktantów), tworzeniu mieszanin cieczy z inną cieczą lub cieczy z cząsteczkami ciał stałych, np. nanocząstkami. Wielkością opisującą wpływ zmian własności cieczy na proces przenoszenia ciepła jest liczba Mouromtseff'a [28]:

$$Mo = \frac{\rho^{0,8} \lambda^{0,67} c_p^{0,33}}{\mu^{0,47}} \quad (2.20)$$

Porównując dwie ciecze, korzystniejsze warunki wymiany ciepła zapewni ta ciecz, która będzie charakteryzowała się wyższą liczbą Mo .

2.4 Współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej

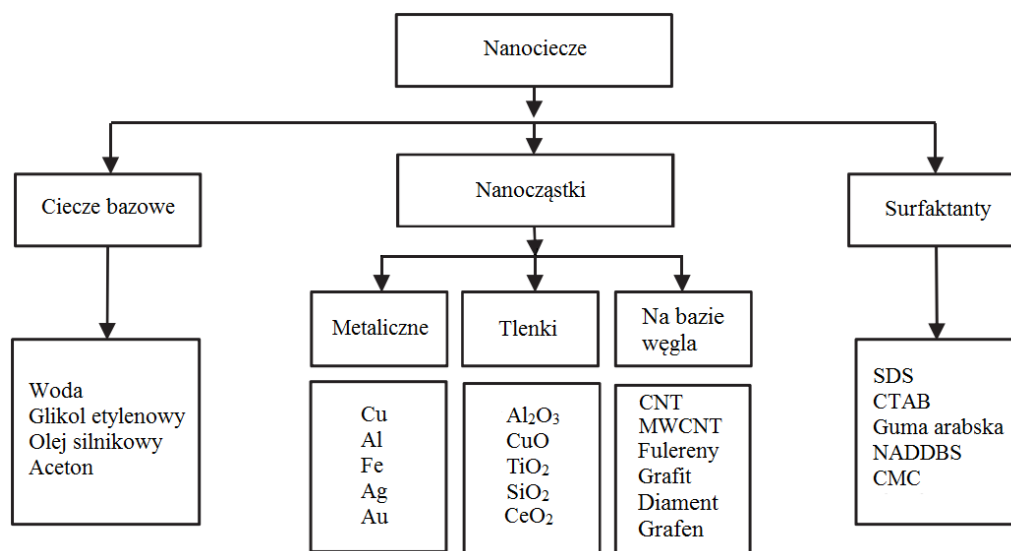
Zastosowanie większości metod intensyfikacji przenoszenia ciepła wiąże się ze wzrostem oporów przepływu. Do oceny skutków zastosowania danej metody stosuje się współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej. W literaturze zaproponowano wiele sposobów obliczania tego współczynnika. Wybrane wzory w odniesieniu do nanocieczy przedstawiono w tab. 2.4.

Tab. 2.4. Współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej

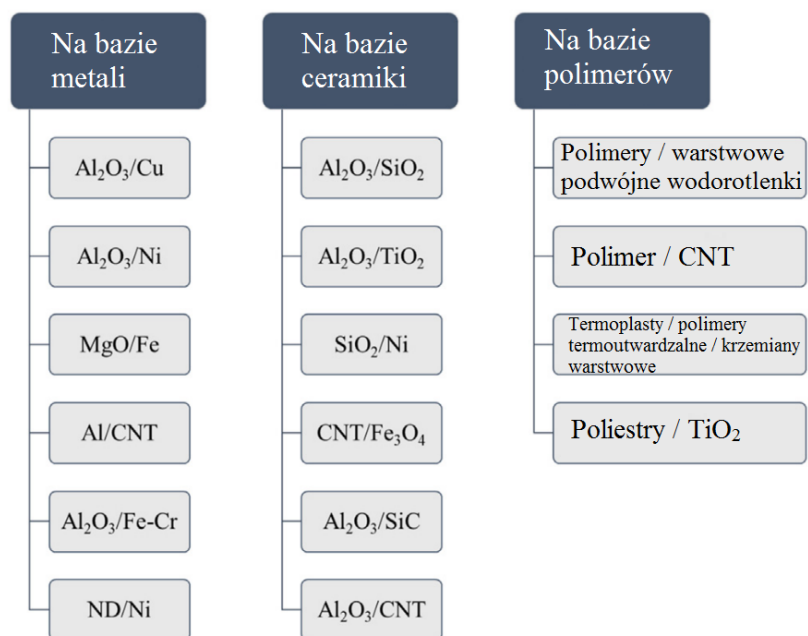
Nr	Autorzy	Wzór	Nr wzoru	Uwagi
1	Prasher i in. [29]	$\frac{\Delta p_{nf}}{\Delta p_{bf}} = \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}\right) \left(\frac{\lambda_{bf}}{\lambda_{nf}}\right)^4 \left(\frac{Nu_{bf}}{Nu_{nf}}\right)^4$	(2.21)	$\frac{\Delta p_{nf}}{\Delta p_{bf}} < 1$ – stosowanie nanocieczy może być korzystniejsze niż stosowanie cieczy bazowej
2	Suresh i in. [30]	$\xi = \frac{Nu_{nf}/Nu_{bf}}{(f_{nf}/f_{bf})^{1/3}}$	(2.22)	$\xi > 1$ – stosowanie nanocieczy może być korzystniejsze niż stosowanie cieczy bazowej
3	Pakdaman i in. [31]	$\xi = \frac{\lambda_{nf}/\lambda_{bf}}{\Delta p_{nf}/\Delta p_{bf}}$	(2.23)	$\xi > 1$ – stosowanie nanocieczy może być korzystniejsze niż stosowanie cieczy bazowej
4	Ferrouillat i in. [32]	$PEC = \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})}{\dot{V} \Delta p}$	(2.24)	$\frac{PEC_{nf}}{PEC_{bf}} > 1$ – stosowanie nanocieczy może być korzystniejsze niż stosowanie cieczy bazowej

3. Wytwarzanie i własności nanocieczy

Nanociecze to mieszaniny (zawiesiny) cieczy bazowej i cząstek o wymiarze liniowym poniżej 100 nm [33]. Nanocząstkami mogą być zarówno cząstki metaliczne, niemetaliczne jak i hybrydowe. Do nanocząstek metalicznych zalicza się nanocząstki wytworzone z pierwiastków metalicznych, np.: Au, Ag, Al, Cu, Ti, Fe, Pt, do nanocząstek niemetalicznych natomiast tlenki, np.: Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , ZnO , CuO , SiO_2 , węgiel w postaci grafenu, nanorurek węglowych lub pyłu diamentowego lub związki węgla, np. SiC [34]. Na rys. 3.1 przedstawiono składniki najczęściej stosowane do wytwarzania nanocieczy [35]. Nanocząstki hybrydowe są połączeniem cząstek różnych pierwiastków lub tych samych pierwiastków lecz w innej postaci. Do tego typu nanocząstek zalicza się nanorurki węglowe wypełnione sferycznymi cząsteczkami węgla (CNT-C), nanorurki węglowe wypełnione cząsteczkami miedzi lub srebra (CNT-Cu, CNT-Ag), wielowarstwowe nanorurki węglowe połączone z cząsteczkami tlenku żelaza (MWCNT- Fe_3O_4) lub połączenie tlenku aluminium z miedzią (Al_2O_3 - Cu) [36-38] – rys. 3.2. W celu uzyskania stabilnych zawiesin stosowane są różnego rodzaju substancje wspomagające, tzn. substancje powierzchniowo czynne, z których najbardziej popularne to SDS, PVP czy guma arabska [39]. Nanociecze wykazują własności zarówno cieczy newtonowskich jak i cieczy nienewtonowskich [40, 41].



Rys. 3.1. Wybrane ciecze bazowe, nanocząstki i surfaktanty używane do wytwarzania nanocieczy [35]



Rys. 3.2. Nanocząstki hybrydowe [38]

3.1 Wytwarzanie nanocieczy

W warunkach laboratoryjnych stosuje się dwie metody wytwarzania nanocieczy [39, 42-44]:

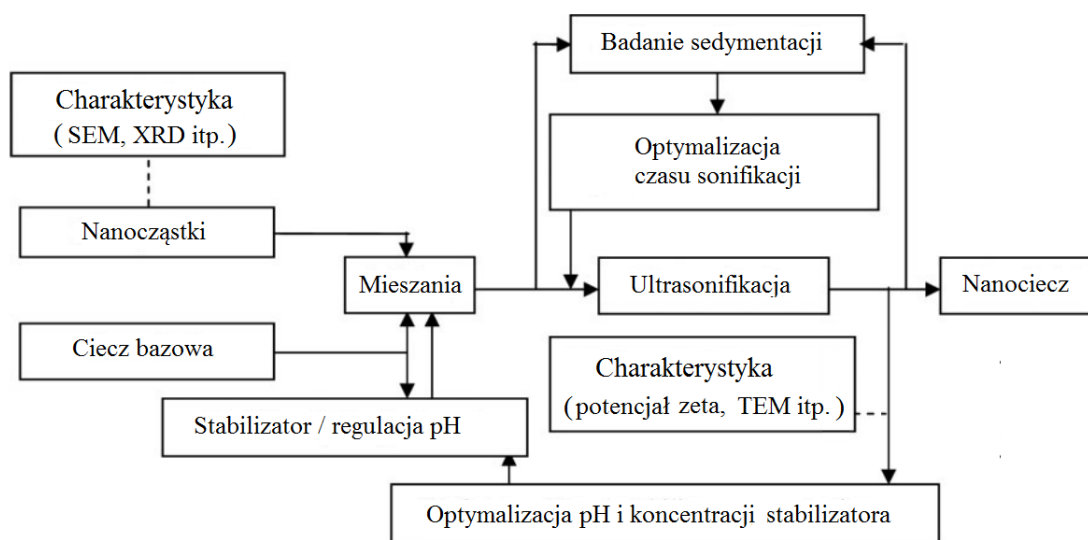
- metoda jednoetapowa (one - step method), która oparta jest na bezpośrednim formowaniu nanocząstek wewnątrz płynów bazowych,
- metoda dwuetapowa (two - step method), polegająca na wytworzeniu za pomocą dowolnej metody nanoproszku, a następnie na umieszczeniu materiału w cieczy bazowej.

Zaletami metody jednostopniowej są: mała aglomeracja wytworzonych nanocząstek co przekłada się na wzrost stabilności nanocieczy, uniknięcie utleniania wytwarzanych nanocząstek metali, możliwość produkcji nanocząstek o określonych wymiarach oraz brak kosztów suszenia i dyspersji nanocząstek. Metoda ta jest kosztowna i czasochłonna oraz możliwa do zastosowania jedynie w przypadku cieczy bazowych charakteryzujących się niskim ciśnieniem pary [45, 46].

Metoda dwuetapowa umożliwia wytwarzanie nanocieczy na dużą skalę, gdyż zarówno pierwszy etap, tj. produkcja nanocząstek, jak i drugi etap – mieszanie, są opanowane technologicznie. Wytworzone w ten sposób nanocząstki wykazują większą tendencję do aglomerowania co powoduje ich sedymentację, a więc całkowitą zmianę własności nie tylko nanocieczy, ale także powierzchni grzejnej w wyniku osadzania się na niej aglomeratów. W celu uniknięcia aglomeracji nanocząstek producenci nanocieczy stosują substancje powierzchniowoczynne lub regulatory pH (stabilizacja elektrostatyczna). Wadą tego rozwiązania jest jednak rozkład tych substancji przy wyższych temperaturach i zanieczyszczanie powierzchni grzejnej. Przy użyciu metody dwuetapowej wytwarzana jest większość nanocieczy zawierająca nanocząstki tlenków metali i nanorurki węglowe.

3.2 *Stabilność nanocieczy*

Warunkiem praktycznego zastosowania nanocieczy jest ich stabilność określana jako suma sił przyciągania i odpychania pomiędzy cząstkami zawieszonymi w roztworze [47-50]. Jeżeli siły zapobiegające przyciąganiu się cząsteczek są mniejsze niż siły van der Waalsa nanocząstki ulegają aglomeracji i sedymentacji w cieczy bazowej. Uzyskanie stabilnych zawiesin wymaga dodatkowo zastosowania odpowiednich czynności fizycznych wykorzystujących mieszadła, płuczki ultradźwiękowe czy homogenizatory [51]. W wielu przypadkach w celu zapewnienia stabilności wytwarzanych nanocieczy nieodzowne jest stosowanie surfaktantów czy regulatorów pH [52]. Na rys. 3.3 przedstawiono procedurę postępowania mającą na celu wytworzenie stabilnych nanocieczy.

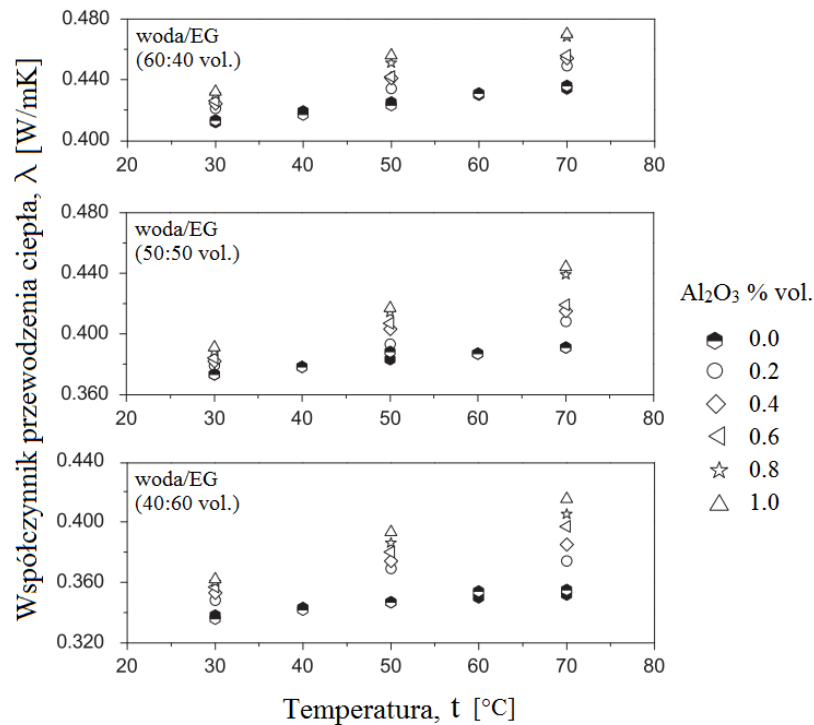


Rys. 3.3. Metodologia wytwarzania stabilnych nanocieczy metodą dwuetapową [53]

3.3 Własności termofizyczne nanocieczy

Współczynnik przewodzenia ciepła

Odkrycie niewspółmiernego wzrostu współczynnika przewodzenia ciepła cieczy bazowej w wyniku dodania nawet niewielkiej ilości nanocząstek spowodowało lawinowy wzrost zainteresowania nanocieczami [33, 54-56]. Co prawda praca [57] nie potwierdziła aż tak dużego wzrostu współczynnika przewodzenia ciepła nanocieczy, ale przyrost jest niepodważalny i na tyle istotny, aby nanociecze mogły znaleźć potencjalnie zastosowanie w wielu układach energetycznych [58-60]. Jak wynika z opublikowanych danych współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy zależy przede wszystkim od koncentracji nanocząstek, ale także od temperatury, kształtu, materiału i wymiaru nanocząstek oraz pH nanocieczy [61-63]. Na rys. 3.4 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych współczynnika przewodzenia ciepła dla nanocieczy, w których zastosowano różne proporcje mieszanin woda / glikol etylenowy jako cieczy bazowe oraz nanocząstki Al_2O_3 [64]. Wzrost koncentracji nanocząstek oraz temperatury powoduje wzrost współczynnika przewodzenia ciepła. Przyrost współczynnika przewodzenia ciepła jest tym wyższy im wyższa jest temperatura oraz udział glikolu etylenowego w mieszaninie woda/EG.



Rys. 3.4. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda/EG-Al₂O₃ [64]

W literaturze istnieje duża liczba wzorów do obliczania współczynnika przewodzenia ciepła nanocieczy [65], stąd w tab. 3.1 przedstawiono jedynie te wzory, które dotyczą cieczy badanych w przedłożonej pracy.

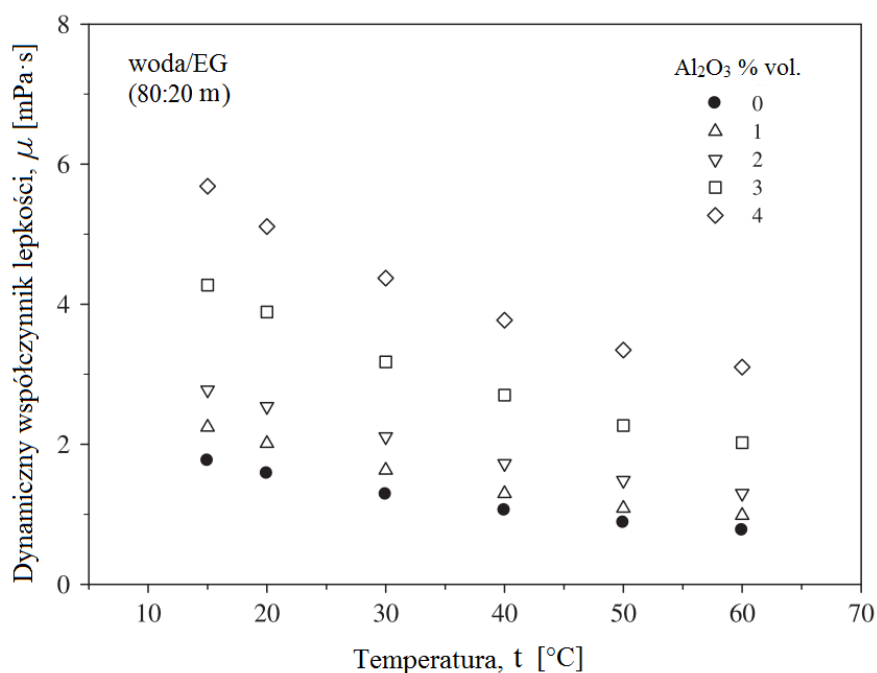
Tab. 3.1. Wzory do obliczania współczynnika przewodzenia ciepła nanocieczy na bazie wody i mieszanin woda/EG z nanocząstkami Al₂O₃

Nr	Autorzy	Wzór	Nr wzoru	Ciecz bazowa
1	Corcione [66]	$\lambda_{nf} = \lambda_{bf} \left(1 + 4,4Re^{0,4}Pr^{0,66} \left(\frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0,03} \varphi_v^{0,66} \right)$ $Re = \frac{2\rho_{bf}k_B T}{\pi\mu_{bf}^2 d_p}, k_B=1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ J/K (stała Boltzmanna)}$ $T_{fr} - \text{temperatura krzepnięcia cieczy bazowej}$	(3.1)	woda / EG

2	Khanafer i Vafai [67]	$\lambda_{nf} = \lambda_{bf} \left(0,9843 + 0,398\varphi_v^{0,7383} \left(\frac{1}{d_p} \right)^{0,2246} \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \right)^{0,0235} - 3,9517 \frac{\varphi_v}{t} + 34,034 \frac{\varphi_v^2}{t^3} + 32,509 \frac{\varphi_v}{t^2} \right)$	(3.2)	woda
3	Sundar i in. [68]	$\lambda_{nf} = \lambda_{bf}(1,0806 + 10,164\varphi_v)$	(3.3)	woda/EG (60:40wt)
		$\lambda_{nf} = \lambda_{bf}(1,0618 + 10,448\varphi_v)$	(3.4)	woda/EG (40:60wt)
4	Hassani i in. [69]	$\lambda_{nf} = \lambda_{bf} \left(1,04 + \varphi_v^{1,11} \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_{bf}} \right)^{0,33} Pr^{-1,7} \left[\frac{1}{Pr^{-1,7}} - \frac{262}{\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_{bf}} \right)^{0,33}} + \left(135 \left(\frac{d_{ref}}{d_p} \right)^{0,23} \left(\frac{v_{bf}}{d_p u_{Br}} \right)^{0,82} \right) \left(\frac{c_p}{T^{-1} u_{Br}^2} \right)^{-0,1} \left(\frac{T_B}{T} \right)^{-7} \right] \right)$ <p> $u_{Br} = \left(\frac{2k_B T}{\pi e_p d_p^3} \right)^{0,5}$ – prędkość w ruchu Browna </p>	(3.5)	woda / EG
5	Chiam i in. [70]	$\lambda_{nf} = \lambda_{bf} \left(0,9683 \left(1 + \frac{\varphi_v}{100} \right)^{11,13} \left(1 + \frac{T}{70} \right)^{0,1676} (0,01 + BR)^{0,00111} \left(\frac{d_p}{36} \right)^{0,0572} \right)$	(3.6)	woda/EG (60:40vol) woda/EG (50:50vol) woda/EG (40:60vol)
6	Sawicka i in. [71]	$\lambda_{nf} = \lambda_{bf} \left(1 + 0,1046\varphi_m^{0,2388} \left(\frac{100}{d_p} \right)^{3,14 \cdot 10^{-3}} \right)$	(3.7)	woda
		$\lambda_{nf} = \lambda_{bf}$	(3.8)	woda/EG (60:40vol) woda/EG (50:50vol) woda/EG (40:60vol)

Lepkość nanocieczy

Aktualny stan wiedzy wskazuje, że lepkość nanocieczy jest funkcją temperatury, koncentracji nanocząstek oraz średnicy i kształtu nanocząstek [72-77]. Jak wynika z rys. 3.5 lepkość nanocieczy wyraźnie maleje wraz ze wzrostem temperatury i rośnie wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek.



Rys. 3.5. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda/EG-Al₂O₃ [73]

Według [78] lepkość nanocieczy rośnie również wraz ze wzrostem średnicy nanocząstek, natomiast badania [79] pokazują tendencję odwrotną. Z kolei w [80] wykazano, że lepkość nanocieczy nie jest jednoznaczną funkcją średnicy nanocząstek. Według badań przedstawionych w [81, 82] lepkość nanocieczy bardzo silnie zależy od kształtu nanocząstek i przy tej samej koncentracji jest najmniejsza dla nanocząstek o kształcie kulistym.

W literaturze istnieje duża liczba wzorów do obliczania dynamicznego współczynnika lepkości, stąd w tab. 3.2 przedstawiono jedynie te wzory, które dotyczą cieczy badanych w przedłożonej pracy.

Tab. 3.2. Wzory do obliczania dynamicznego współczynnika lepkości nanocieczy na bazie wody i mieszanin woda/EG z nanocząstkami Al₂O₃

Nr	Autorzy	Wzór	Nr wzoru	Ciecz bazowa
1	Sahoo i in. [83]	$\mu_{nf} = 2,392 \cdot 10^{-4} e^{\left(\frac{2903}{T} + 0,1265\varphi_v\right)}$	(3.9)	woda/EG (40:60wt)
2	Pastoriza - Gallego i in. [84]	$\mu_{nf} = e^{\left(A + \frac{B}{T-T_0}\right)}$ Stałe A i B są odczytywane z tablic	(3.10)	woda, EG
3	Corcione [66]	$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left(\frac{1}{1 - 34,87(d_p/d_m)^{-0,3} \varphi_v^{1,03}} \right)$ $d_m = \left[\frac{6M}{\pi N \rho_{bf,0}} \right]^{1/3}$ - średnica molekuly cieczy bazowej, N=6,02214·10 ²³ – liczba Avogadro, $\rho_{bf,0}$ [kg/m ³] – gęstość cieczy bazowej w temp. 293 K	(3.11)	woda / EG
4	Khanafer i Vafai [67]	$\mu_{nf} = -0,4491 + \frac{28,837}{t} + 0,574\varphi_v - 0,1634\varphi_v^2 + 23,053 \frac{\varphi_v^2}{t^2} + 0,0132\varphi_v^3 - 2354,735 \frac{\varphi_v}{t^3} + 23,498 \frac{\varphi_v^2}{d_p^2} - 3,0185 \frac{\varphi_v^3}{d_p^2}$	(3.12)	woda
5	Sundar i in. [68]	$\mu_{nf} = 0,9299 \mu_{bf} e^{(67,43\varphi_v)}$	(3.13)	woda/EG (60:40wt)
		$\mu_{nf} = 1,1216 \mu_{bf} e^{(77,56\varphi_v)}$	(3.14)	woda/EG (40:60wt)
6	Chiam i in. [70]	$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left[\left(1 + \frac{\varphi_v}{100}\right)^{32} \left(\frac{T}{70}\right)^{-0,001} (0,1 + BR)^{0,08} \right]$	(3.15)	woda/EG (60:40vol) woda/EG (50:50vol) woda/EG (40:60vol)
7	Sawicka i in. [71]	$\mu_{nf} = 664,06\varphi_m^{0,0151} t^{0,236} \mu_{bf}^{1,939}$	(3.16)	woda
		$\mu_{nf} = 1,11\varphi_m^{0,0061} \mu_{bf}^{1,017}$	(3.17)	EG
		$\mu_{nf} = 1,13\varphi_m^{0,0106} \mu_{bf}^{1,003}$	(3.18)	woda/EG (60:40vol)
		$\mu_{nf} = 1,14\mu_{bf}^{0,9906}$	(3.19)	woda/EG (50:50vol)
		$\mu_{nf} = 2,83\varphi_m^{0,0094} t^{0,279} \mu_{bf}^{1,3237}$	(3.20)	woda/EG (40:60vol)

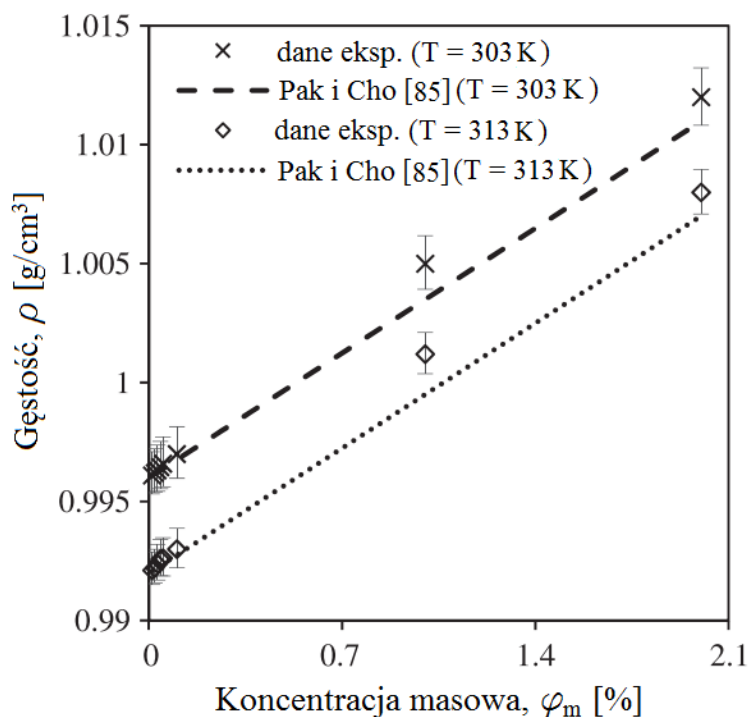


Gęstość nanocieczy

Powszechnie akceptowanym sposobem określania gęstości nanocieczy jest reguła dźwigni, co w tym przypadku oznacza zależność od udziałów obu faz, tzn. koncentracji objętościowej nanocząstek [85]:

$$\rho_{nf} = \varphi_v \rho_p + (1 - \varphi_v) \rho_{bf} \quad (3.21)$$

W zależności więc od tego czy gęstość nanocząstek jest większa czy mniejsza niż gęstość cieczy bazowej, to gęstość nanocieczy będzie rosła lub malała wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek. Na rys. 3.6 pokazano zależność gęstości nanocieczy woda- Al_2O_3 od koncentracji nanocząstek oraz temperatury. Zauważono, że gęstość nanocieczy rośnie wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek, gdyż gęstość Al_2O_3 wynosi $\rho = 3600 \text{ kg/m}^3$ – [87], natomiast gęstość wody jest wyraźnie mniejsza $\rho = 996 \text{ kg/m}^3$ (dla $T = 303 \text{ K}$) – [88]. Wraz ze wzrostem temperatury gęstość nanocieczy woda- Al_2O_3 maleje.



Rys. 3.6. Gęstość nanocieczy woda- Al_2O_3 [86]



Ciepło właściwe nanocieczy

Podobnie jak gęstość, tak i ciepło właściwe nanocieczy jest najczęściej obliczane z wykorzystaniem reguły dźwigni [85]:

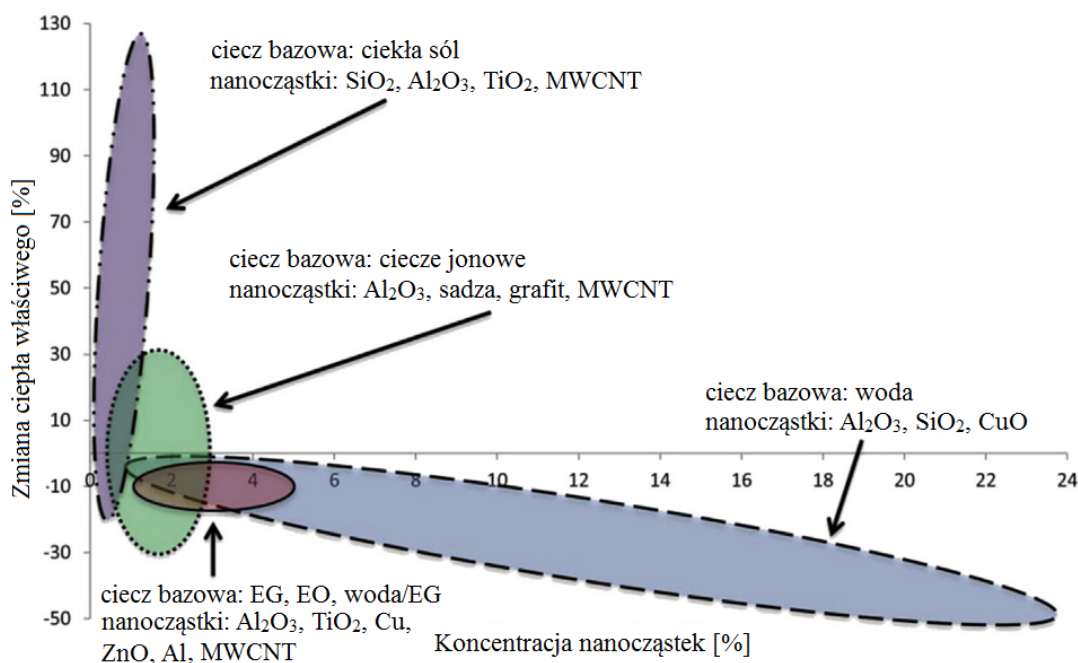
$$c_{p,nf} = \varphi_v c_{p,p} + (1 - \varphi_v) c_{p,bf} \quad (3.22)$$

Tak więc, w zależności od tego czy ciepło właściwe nanocząstek jest większe czy mniejsze niż ciepło właściwe cieczy bazowej, to ciepło właściwe nanocieczy będzie rosło lub malało wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek.

W pracy [88] zaproponowano wzór, który lepiej odwzorowuje dane pomiarowe:

$$c_{pnf} = \frac{(1 - \varphi_v) \rho_{bf} c_{pbf} + \varphi_v \rho_p c_{pp}}{\rho_{bf}} \quad (3.23)$$

Jak wynika z rys. 3.7 ciepło właściwe nanocieczy zmienia się w bardzo szerokim zakresie w zależności od kombinacji cieczy bazowej oraz rodzaju i koncentracji nanocząstek.



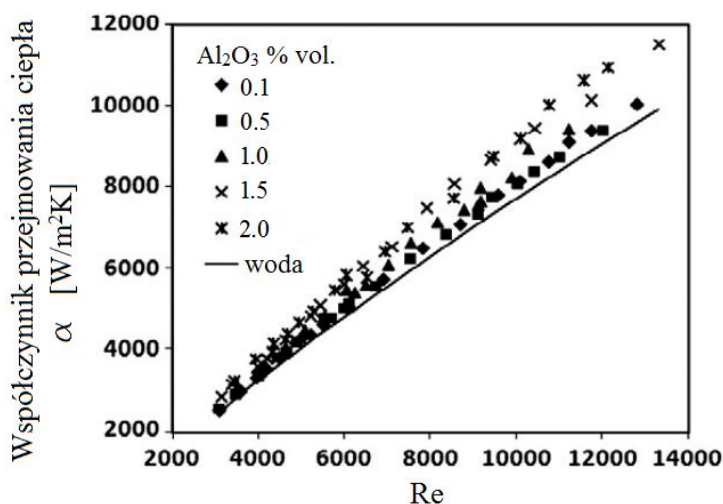
Rys. 3.7. Ciepło właściwe nanocieczy [89]

4. Badania nanocieczy w warunkach konwekcji wymuszonej

Wobec dużej liczby opublikowanych prac przeglądowych dotyczących przejmowania ciepła i oporów przepływu nanocieczy w warunkach konwekcji wymuszonej w przewodach o przekroju okrągłym [90-93] w przedłożonej pracy zostaną omówione badania dotyczące jedynie przepływu turbulentnego nanocieczy na bazie wody i mieszanin wody z glikolem etylenowym oraz nanocząstek Al_2O_3 , przeprowadzone w ostatnich 10 latach. Obszerna analiza wyników badań eksperymentalnych nanocieczy w prostych przewodach o przekroju okrągłym jest przedstawiona w [94].

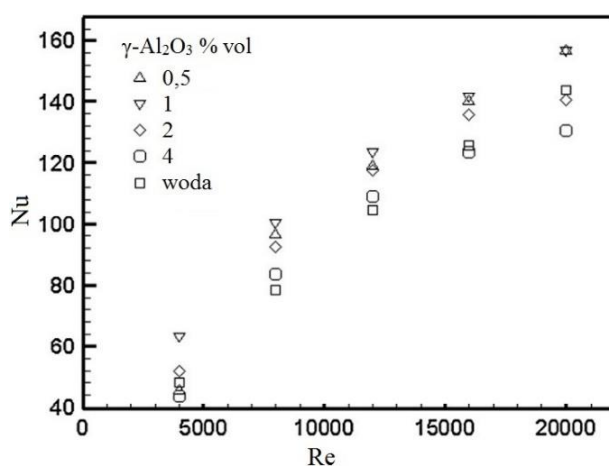
4.1 Badania eksperymentalne konwekcji wymuszonej w przewodach

Heyhat i in. [95] przeprowadzili badania eksperymentalne dotyczące konwekcji wymuszonej nanocieczy woda- Al_2O_3 , dla koncentracji objętościowych pomiędzy 0,1%, a 2%. Sekcja pomiarowa wykonana została z rurki miedzianej o średnicy wewnętrznej 5 mm oraz długości 2000 mm i była ogrzewana parą wodną. Zauważono wzrost współczynnika przejmowania ciepła wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek oraz liczby Re – rys. 4.1. Najwyższy wzrost współczynnika przejmowania ciepła w porównaniu z cieczą bazową wynoszący 23% uzyskano dla koncentracji nanocząstek 2%. Do obliczeń użyto własności termofizycznych nanocieczy wyznaczonych eksperymentalnie.

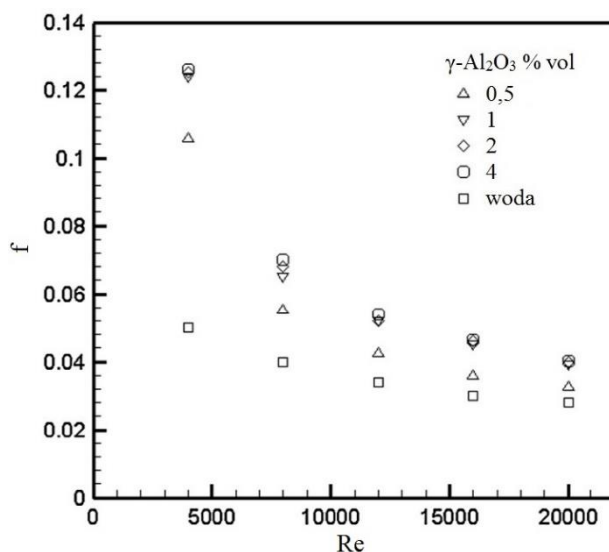


Rys. 4.1. Zależność współczynnika przejmowania ciepła od liczby Reynoldsa [95]

Sahin i in. [96] jako nanociecz zastosowali mieszaninę wody destylowanej i nanocząstek $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Koncentracje objętościowe nanocieczy wynosiły 0,5%, 1%, 2% i 4%. Do ogrzewania rurki pomiarowej wykonanej z aluminium, mającej długość 770 mm i średnicę wewnętrzną 11,7 mm, użyto grzałek spiralnych o mocy 2000W. Zauważono, że dodanie nanocząstek powoduje intensyfikację przejmowania ciepła tylko dla dwóch niższych badanych koncentracji, tj. 0,5% i 1% - rys. 4.2. Najwyższe liczby Nusselta, niezależnie od liczby Reynoldsa, zanotowano dla koncentracji objętościowej 0,5%. Zaobserwowano znaczny wzrost oporów przepływu, rosnący wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek – rys. 4.3.

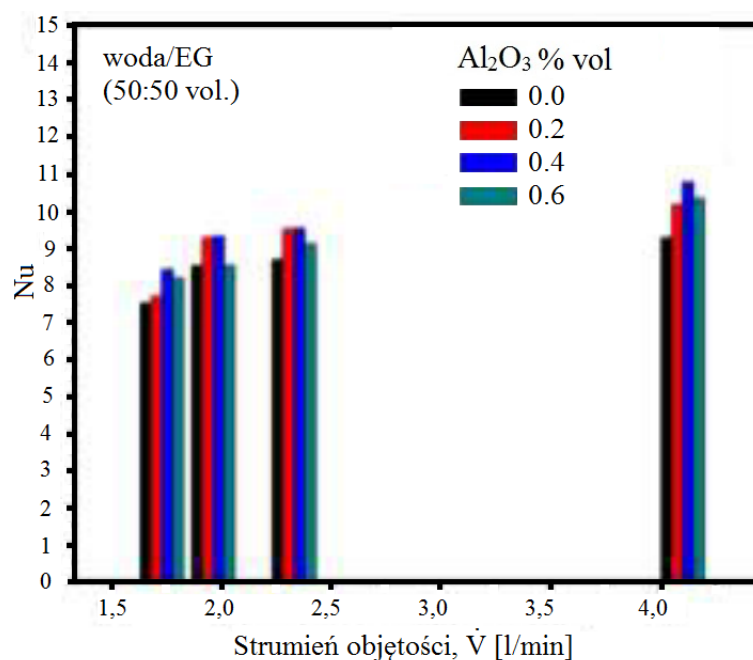


Rys. 4.2. Zależność liczby Nu od liczby Re dla nanocieczy woda- $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ [96]



Rys. 4.3. Współczynnik oporów przepływu f dla nanocieczy woda- $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ [96]

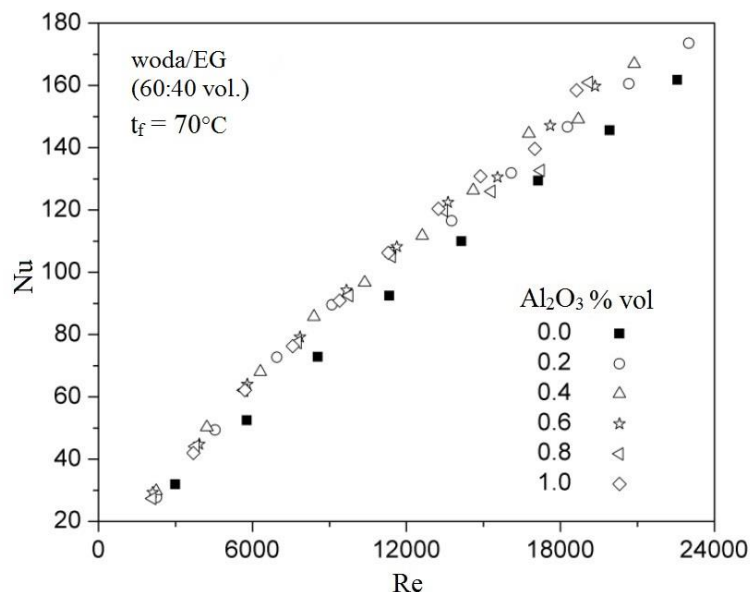
Patel i in. [97] przeprowadzili badania eksperymentalne przy wykorzystaniu mieszaniny woda/EG (50:50 vol.) jako cieczy bazowej oraz nanocząstek Al_2O_3 . Badania przeprowadzono dla trzech koncentracji objętościowych nanocząstek: 0,2%, 0,4% i 0,6%. Sekcja pomiarowa wykonana z rurki miedzianej o średnicy wewnętrznej 10 mm oraz długości 1000 mm owinięta została drutem oporowym co miało zapewnić warunek stałej gęstości strumienia ciepła. Własności termofizyczne nanocieczy obliczone zostały z wybranych korelacji. Zauważono intensyfikację przejmowania ciepła dla wszystkich badanych nanocieczy w porównaniu z cieczą bazową. Najwyższy wzrost liczby Nusselta rzędu 16% zaobserwowano dla koncentracji 0,4% oraz najwyższego objętościowego strumienia przepływu cieczy - rys. 4.4.



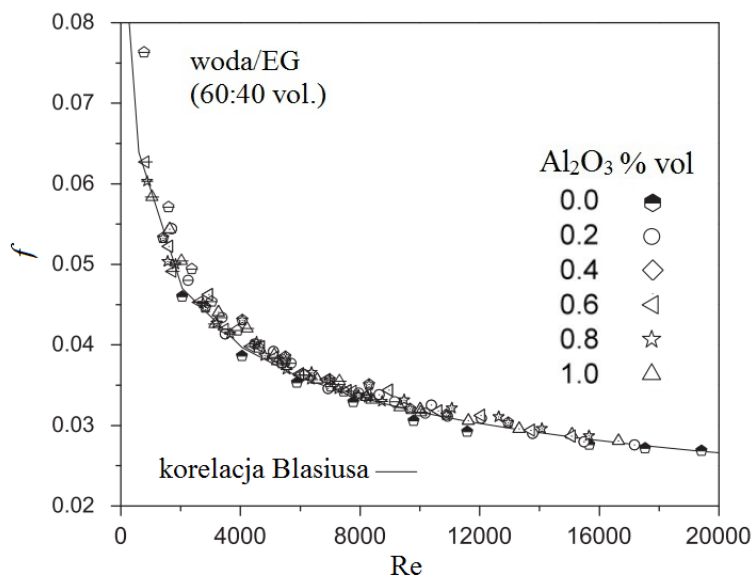
Rys. 4.4. Zależność Nu od strumienia objętości oraz koncentracji nanocząstek dla nanocieczy woda/EG- Al_2O_3 [97]

Azmi i in. [64] badali mieszaniny wody z glikolem etylenowym w stosunku objętościowym 60:40, 50:50, 40:60 oraz nanocząstek Al_2O_3 . Przy użyciu metody dwustopniowej przygotowano nanociecze o koncentracji objętościowej nanocząstek 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% i 1,0%. Pozioma miedziana rurka o długości 1500 mm i średnicy wewnętrznej 16 mm, owinięta została drutem oporowym, zapewniającym 1,5 kW mocy

grzejnej. Zauważono, że wpływ dodatku nanocząstek na intensyfikację przyjmowania ciepła zależy nie tylko od koncentracji nanocząstek, ale także średniej temperatury cieczy. Najwyższy procentowy wzrost współczynnika przyjmowania ciepła rzędu 25% zaobserwowano dla mieszaniny woda/EG (60:40) i koncentracji objętościowej nanocząstek 1%, oraz średniej temperatury płynu wynoszącej 70°C – rys. 4.5. Dla wszystkich przebadanych nanocieczki zauważono nieznaczny wzrost oporów przepływu – rys. 4.6.

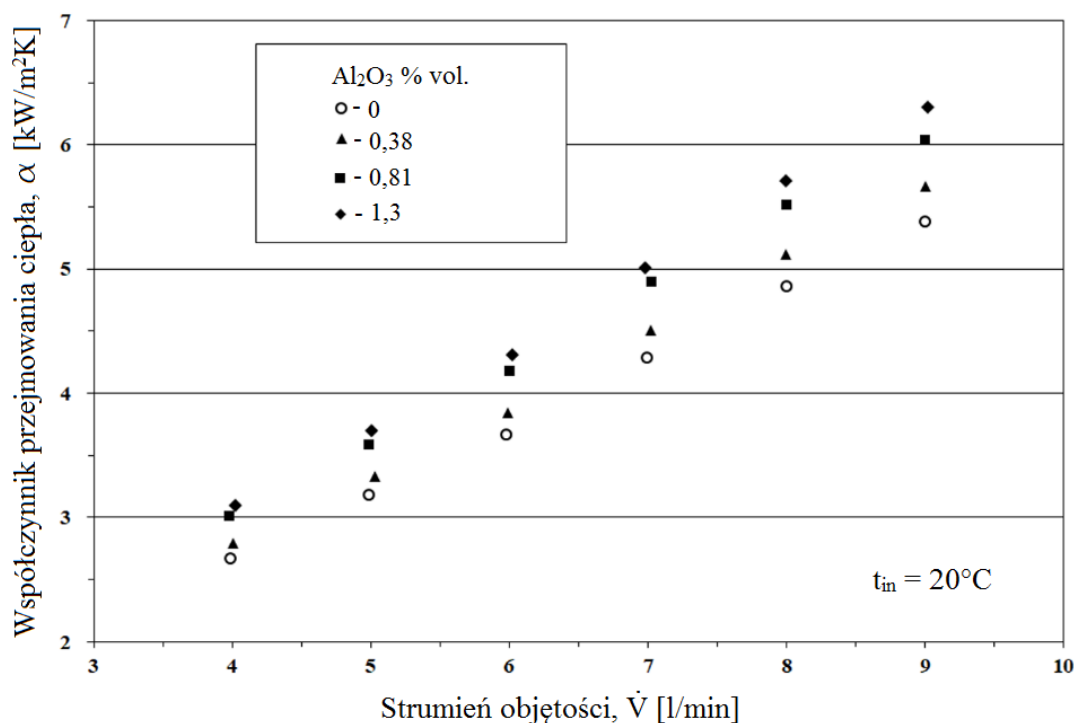


Rys. 4.5. Zależność liczby Nu od liczby Re dla nanocieczki woda/EG-Al₂O₃ [64]

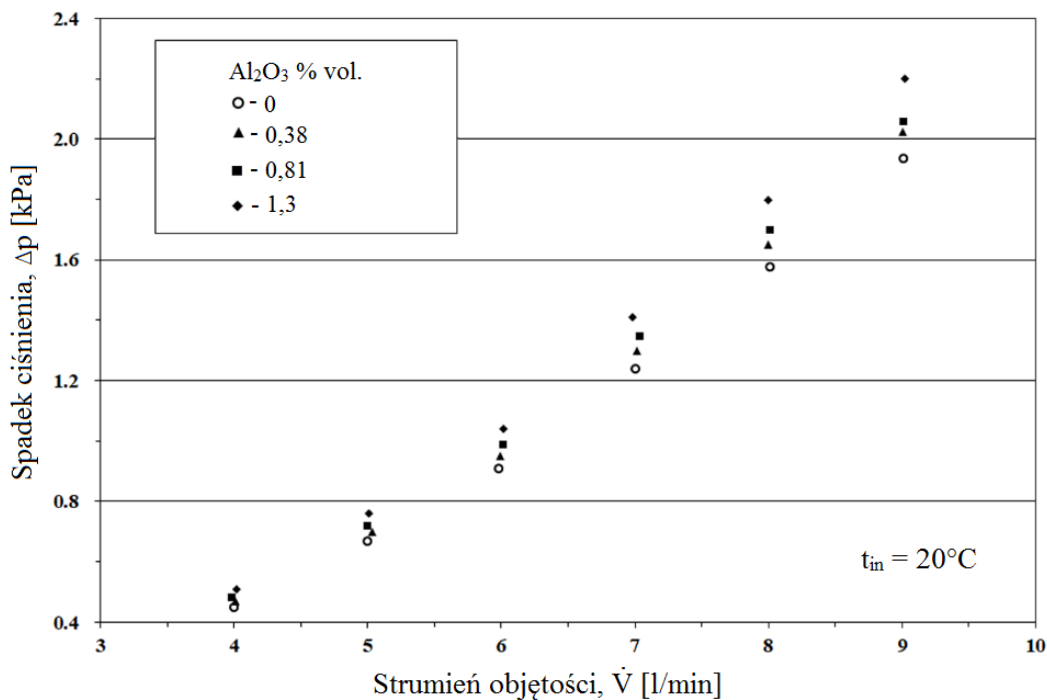


Rys. 4.6. Współczynnik oporów przepływu f dla nanocieczki woda/EG-Al₂O₃ [64]

Kong i in. [98] badali nanociecze woda- Al_2O_3 o koncentracjach objętościowych nanocząstek 0,38%, 0,81% i 1,3%. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla zakresu liczby $\text{Re} = 5300 - 19500$, oraz trzech temperatur cieczy na wlocie do sekcji pomiarowej: 10°C , 20°C i 30°C . Warunek stałej gęstości strumienia ciepła uzyskano przez owinięcie drutem oporowym rurki miedzianej o średnicy wewnętrznej 12,573 mm oraz długości 1200 mm. Zauważono, że wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek wzrasta współczynnik przejmowania ciepła oraz opory przepływu – rys. 4.7 i 4.8. Wzrost temperatury wlotowej cieczy powodował intensyfikację wymiany ciepła oraz spadek oporów przepływu. Najwyższy współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej zaobserwowano dla nanocieczy o koncentracji objętościowej nanocząstek 0,81%.



Rys. 4.7. Zależność współczynnika przejmowania ciepła od strumienia objętości dla nanocieczy woda- Al_2O_3 [98]



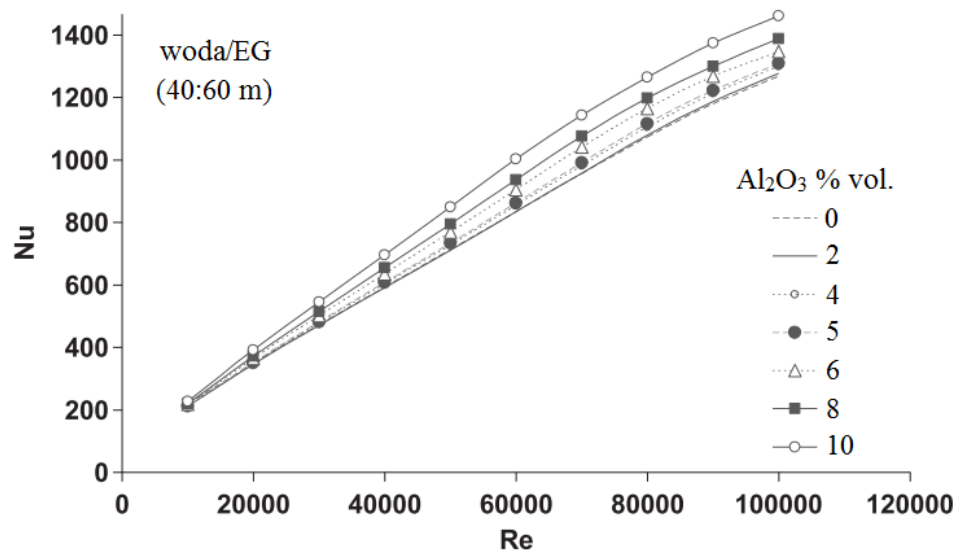
Rys. 4.8. Spadek ciśnienia nanocieczy woda- Al_2O_3 [98]

4.2 *Badania numeryczne konwekcji wymuszonej w przewodach*

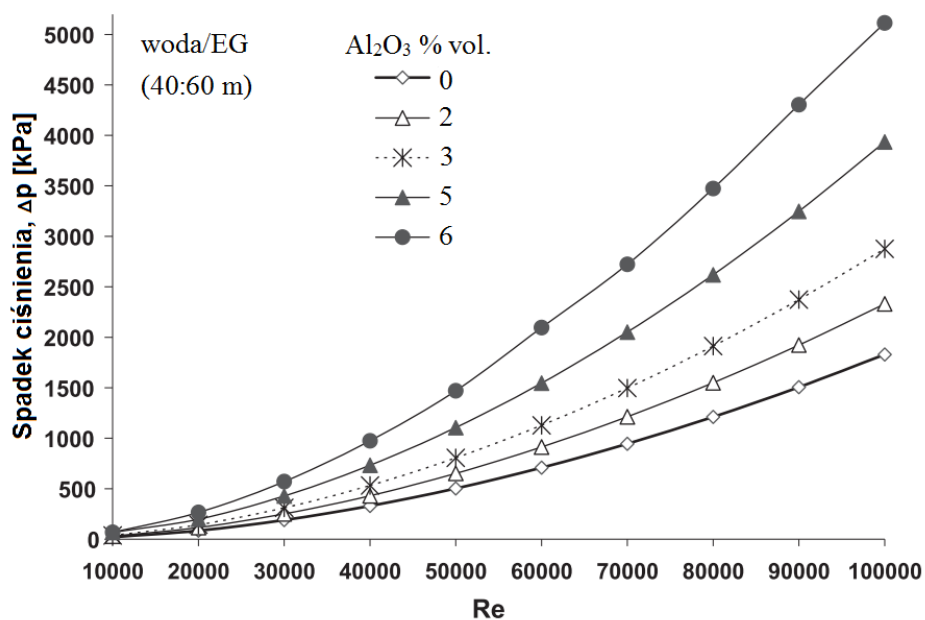
Podobnie jak w przypadku badań eksperymentalnych, poniżej przedstawione zostaną tylko prace dotyczące przepływu turbulenta nanocieczy na bazie wody i mieszanin wody z glikolem etylenowym oraz nanocząstek Al_2O_3 , przeprowadzone w ostatnich 10 latach. Wcześniej prace zostały zaprezentowane w artykułach przeglądowych [99, 100].

Bayat i Nikseresht [101] przeprowadzili analizę numeryczną procesu przejmowania ciepła w warunkach konwekcji wymuszonej w przewodzie dla nanocieczy na bazie mieszaniny woda/EG (40:60 wt) oraz nanocząstek Al_2O_3 . Obliczeń dokonano dla koncentracji objętościowej od 1% do 10% oraz przepływu turbulenta. Założono warunek stałej gęstości strumienia ciepła oraz średnicę rurki 10 mm i jej długość 1000 mm. Nanociecz traktowana była jako nieściśliwa, homogeniczna ciecz jednofazowa z własnościami termofizycznymi zależnymi od temperatury. Obliczeń dokonano metodą elementów skończonych, przyjmując dwa modele turbulencji: standardowy $k-\varepsilon$ oraz $k-\varepsilon$ z rozwiniętą

funkcją warstwy przyściennej. Otrzymane wyniki porównano z badaniami eksperymentalnymi oraz klasycznymi korelacjami otrzymując zadowalającą zgodność. Zauważono wzrost liczby Nu wraz ze zwiększającą się koncentracją nanocząstek. Wzrost był tym wyższy im wyższa była liczba Re – rys. 4.9. Zaobserwowano bardzo znaczny wzrost spadku ciśnienia wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek oraz liczby Re – rys. 4.10.

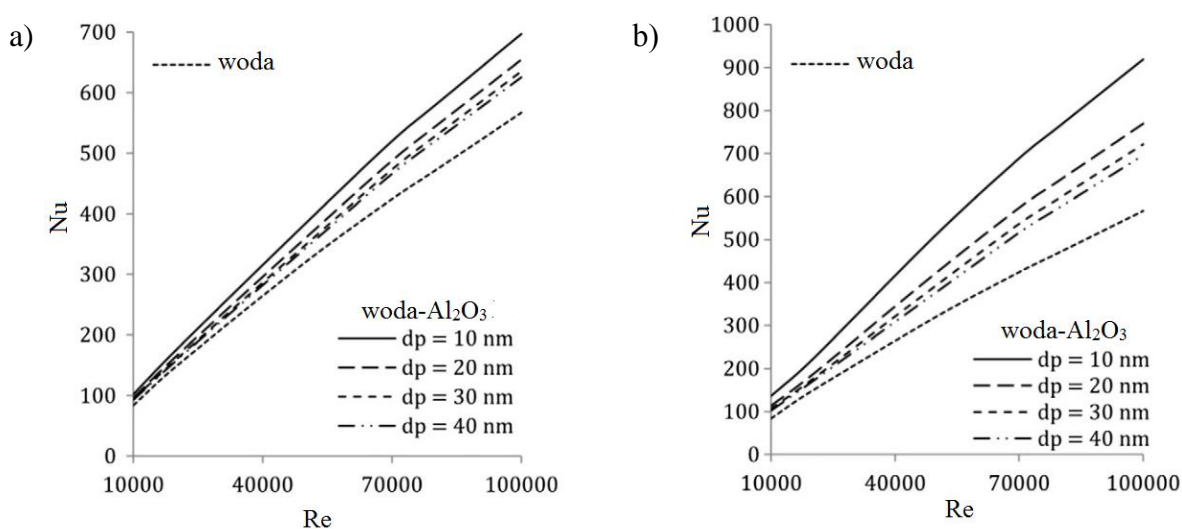


Rys. 4.9. Zależność liczby Nu od liczby Re dla nanocieczki woda/EG-Al₂O₃, [101]



Rys. 4.10. Spadek ciśnienia nanocieczki woda/EG-Al₂O₃ [101]

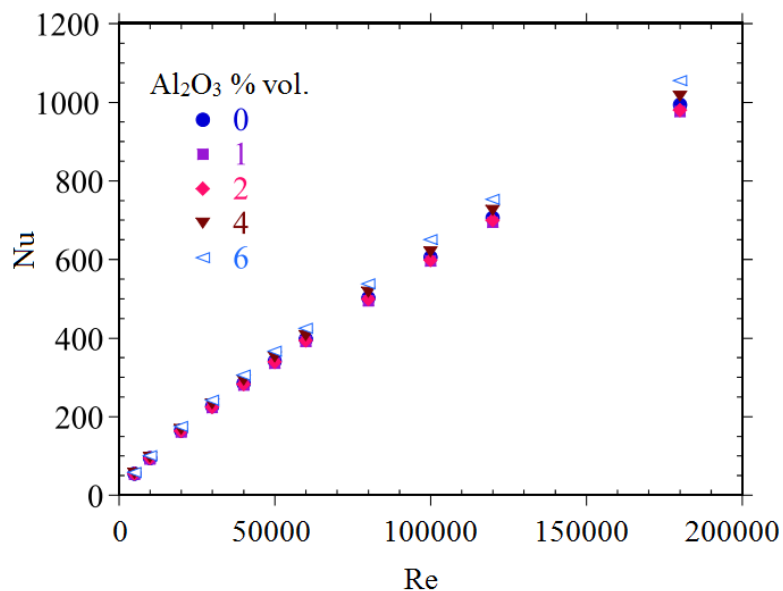
Saha i Paul [102] przeprowadzili obliczenia numeryczne dla nanocieczy woda- Al_2O_3 . Testowano wpływ zmiany koncentracji objętościowej nanocząstek, która wynosiła 1%, 4% i 6% oraz wymiaru nanocząstek wynoszących 10, 20, 30 i 40 nm, na przejmowanie ciepła przy warunku stałej gęstości strumienia ciepła. Przyjęto model mieszaniny wielofazowej. Obliczeń dokonano w programie Fluent stosując podejście Euler-Euler, metodę obliczeniową objętości skończonych oraz model turbulencji $k-\varepsilon$ z rozwiniętą funkcją warstwy przyściennej. Zauważono intensyfikację wymiany ciepła wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek oraz zmniejszającą się ich średnicą – rys. 4.11. Najwyższy wzrost liczby Nusselta wyniósł 62% dla nanocieczy o koncentracji 6% i średnicy nanocząstek 10 nm.



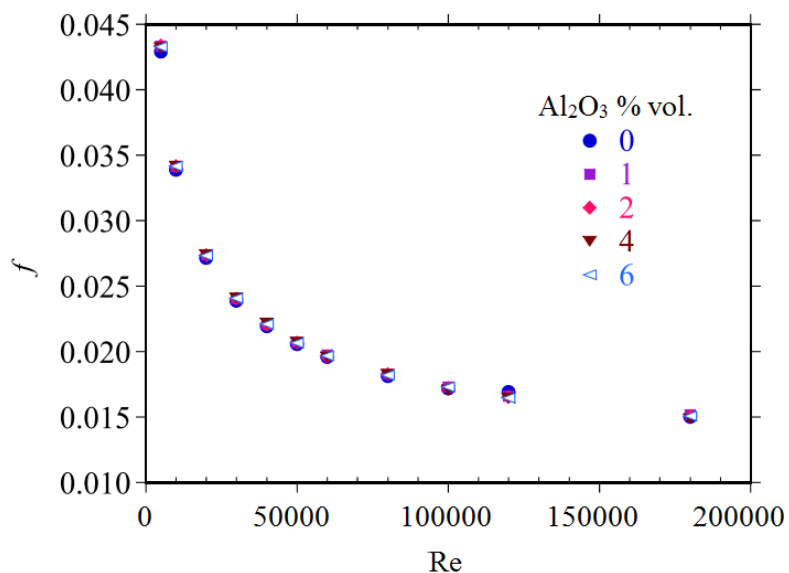
Rys. 4.11. Zależność liczby Nu od liczby Re dla nanocieczy woda- Al_2O_3 dla różnych średnic nanocząstek i koncentracji objętościowej: a) 4%, b) 6% [102]

Mwesigye i Huan [103] do obliczeń numerycznych dotyczących nanocieczy woda- Al_2O_3 użyli kodu obliczeniowego opartego na metodzie objętości skończonych programu Fluent. Największa koncentracja objętościowa nanocząstek wynosiła 6%, a własności termofizyczne nanocieczy obliczone zostały z wybranych korelacji. Przyjętym modelem fizycznym była ogrzewana stałą gęstością strumienia ciepła rurka o długości 1000 mm oraz średnicy od 1,8 mm do 252,3 mm. W obliczeniach zastosowano model turbulencji $k-\varepsilon$ z rozwiniętą funkcją warstwy przyściennej. Zauważono wzrost liczby Nusselta wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek oraz liczby Reynoldsa – rys. 4.12. Nie zaobserwowano wzrostu

współczynnika oporów przepływu wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek w całym testowanym zakresie liczby Re – rys. 4.13.



Rys. 4.12. Zależność liczby Nu od liczby Re dla nanocieczy woda-Al₂O₃, [103]

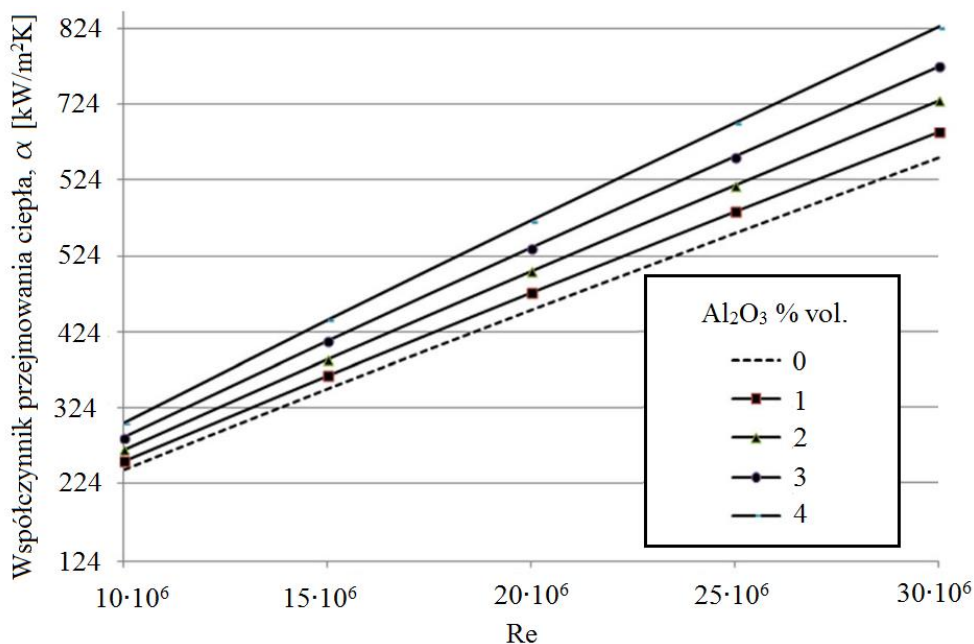


Rys. 4.13. Współczynnik oporów przepływu f dla nanocieczy woda-Al₂O₃ [103]

Minea [104] przeprowadziła badania numeryczne dotyczące konwekcji wymuszonej nanocieczy woda-Al₂O₃ o koncentracjach objętościowych 1%, 2%, 3% i 4%. Do obliczeń własności termofizycznych nanocieczy użyto pięciu różnych zestawów korelacji. Przyjęto

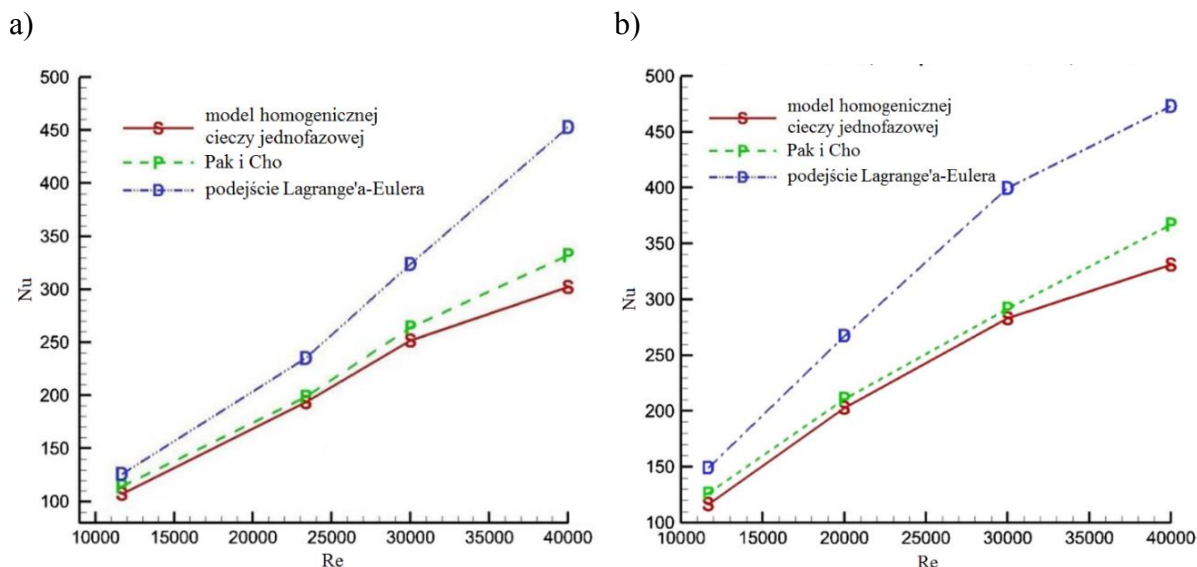


model homogenicznej cieczy jednofazowej oraz brak wpływu temperatury na własności cieczy w całym zakresie obliczeniowym. Obliczeń dokonano przy użyciu metody objętości skończonych oraz standardowego modelu turbulencji $k-\varepsilon$ dostępnego w programie Fluent. Zauważono znaczne różnice w intensyfikacji procesu przyjmowania ciepła przy użyciu nanocieczy w zależności od zastosowanych do obliczeń własności cieczy. Jak wynika z rys. 4.14 współczynnik przyjmowania ciepła rośnie wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek.



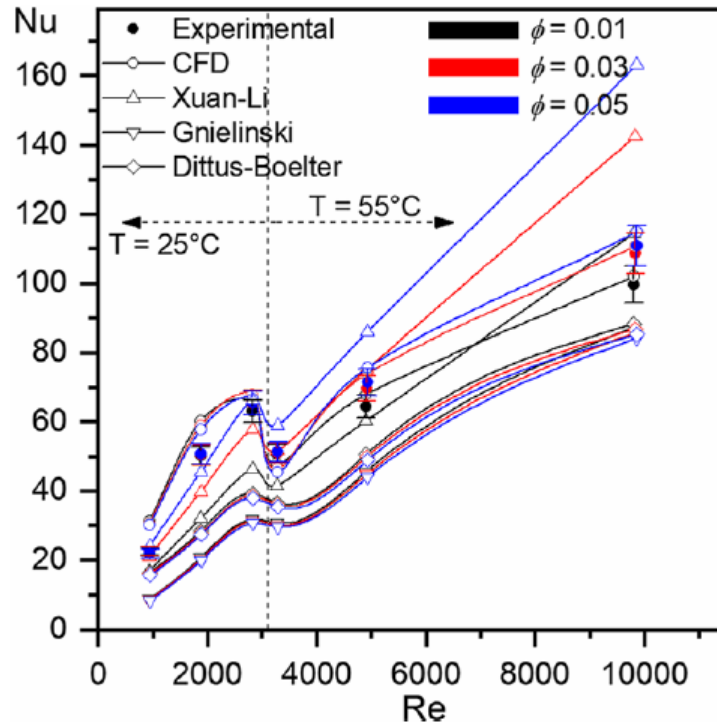
Rys. 4.14. Zależność współczynnika przyjmowania ciepła od liczby Re dla nanocieczy woda- Al_2O_3 [104]

Kumar i Puranik [105] do obliczeń numerycznych dotyczących nanocieczy woda- Al_2O_3 o koncentracjach objętościowych 1% i 2% wykorzystali podejście Lagrange'a-Eulera. Modelowa rurka miała średnicę wewnętrzną 10 mm i długość 400 mm. Założono warunek stałej gęstości strumienia ciepła. Do obliczeń wykorzystano metodę objętości skończonych oraz program Fluent. Otrzymane wyniki porównano z obliczeniami uzyskanymi dla modelu homogenicznej cieczy jednofazowej oraz z przewidywaniami zgodnie z korelacją Pak i Cho [85]. Wykazano, że lepszą zbieżność z korelacją uzyskuje się dla modelu homogenicznej cieczy jednofazowej – rys. 4.15.



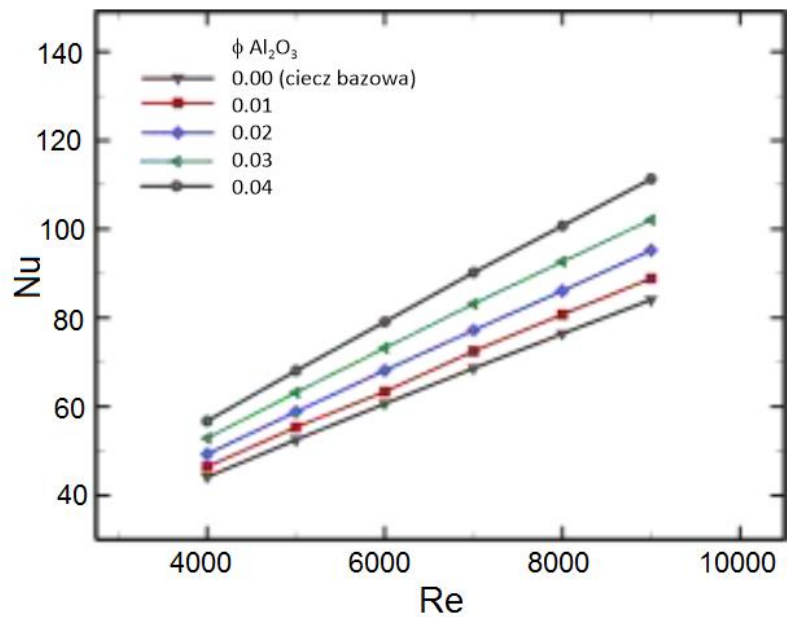
Rys. 4.15. Zależność liczby Nu od liczby Re dla nanocieczy woda- Al_2O_3 dla koncentracji objętościowej: a) 1%, b) 2% [105]

Uribe i in. [106] zastosowali model 3D, zakładając, że nanociecz jest homogeniczna. Symulacje wykonane przy użyciu komercyjnego oprogramowania COMSOL Multiphysics obejmowały nanociecz woda- Al_2O_3 o koncentracjach objętościowych 0,01%, 0,03% i 0,05%. Wykorzystano model turbulencji $k-\varepsilon$ ze zmodyfikowanym bilansem cieplnym umożliwiającym uwzględnienie wpływu turbulencji na wymianę ciepła. Wyniki obliczeń porównano z danymi eksperymentalnymi otrzymanymi dla rurki miedzianej o średnicy wewnętrznej 25,4 mm i długości 400 mm, ogrzewanej stałym strumieniem ciepła. Wyniki obliczeń porównano też z korelacjami Dittusa-Boeltera (2.3), Gnielińskiego (2.11) i Xuan-Li [107]. Zauważono, że zastosowany model obliczeniowy dobrze odwzorowuje wyniki uzyskane eksperymentalnie, natomiast korelacje dają wyniki zarówno zawyżone jak i zaniżone.

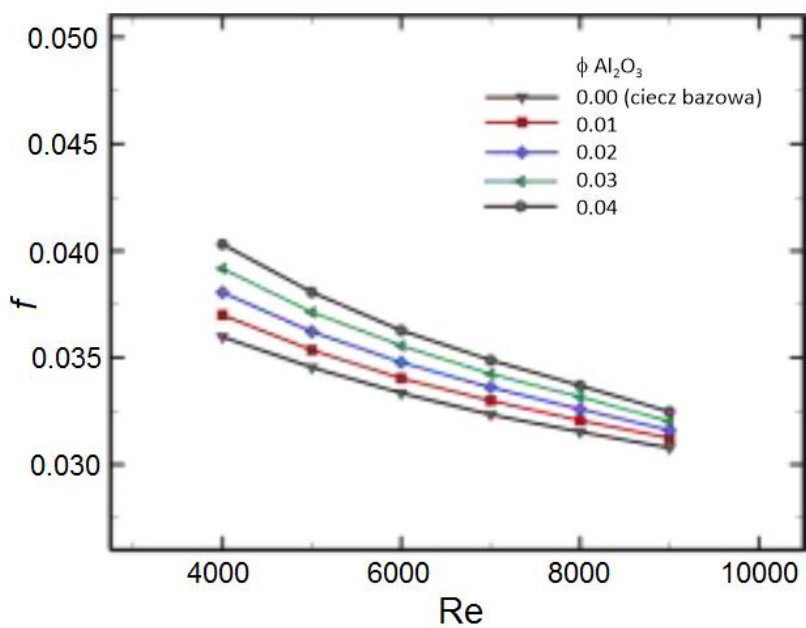


Rys. 4.16. Zależność liczby Nu od liczby Re dla nanocieczy woda- Al_2O_3 [106]

Yildiz i Akturk [108] przeprowadzili badania numeryczne nanocieczy woda- Al_2O_3 o koncentracjach objętościowych od 1 do 4% podczas przepływu w gładkiej, poziomej rurce. Analiza została przeprowadzona w oparciu o metodę objętości skończonych, model cieczy jednofazowej oraz model turbulencji $k-\varepsilon$. Własności nanocieczy opracowane zostały na bazie wybranych korelacji jako wielkości zależne od temperatury i koncentracji nanocząstek. Otrzymane wyniki wykazały znaczny wzrost współczynnika przejmowania ciepła wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek. Oprócz tego zaobserwowano wzrost współczynnika oporów przepływu, tym wyższy im wyższa była koncentracja nanocząstek.



Rys. 4.17. Zależność liczby Nu od liczby Re dla nanocieczy woda- Al_2O_3 [108]



Rys. 4.18. Współczynnik oporów przepływu f dla nanocieczy woda- Al_2O_3 [108]

4.3 Korelacje do obliczania liczby Nusselta

W tab. 4.1 przedstawiono korelacje służące do wyznaczania liczby Nusselta podczas przepływu w przewodach dla nanocieczy.

Tab. 4.1. Korelacje do wyznaczania liczby Nu w przewodach dla wybranych nanocieczy

Nr	Autorzy	Wzór	Nr wzoru	Nanociecz	Zakres		
1	Vasu i in. [109]	$\overline{Nu} = 0,0256 Re^{0,8} Pr^{0,4}$	(4.1)	woda- Al ₂ O ₃			
		$\overline{Nu} = 0,027 Re^{0,8} Pr^{0,4}$	(4.2)	woda- CuO			
2	Vajjha i in. [110]	$\overline{Nu} = 0,65 (Re^{0,65} - 60,22) (1 + 0,0169 \varphi^{0,15}) Pr^{0,542}$	(4.3)	W/EG- Al ₂ O ₃ W/EG- CuO W/EG- SiO ₂	3000 < Re < 16000 0% < φ < 0,1% - Al ₂ O ₃ 0% < φ < 0,06% - CuO, SiO ₂		
3	Asirvatham i in. [111]	$\overline{Nu} = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3} + (0,617 \varphi - 0,135) Re^{(0,445 \varphi - 0,37)} Pr^{(1,081 \varphi - 1,305)}$	(4.4)	woda-Ag	800 < Re < 12000 4 < Pr < 10 0% < φ < 2%		
4	Sajadi i Kazemi [112]	$\overline{Nu} = 0,067 Re^{0,71} Pr^{0,35} + 0,005 Re$	(4.5)	woda-TiO ₂	5000 < Re < 30000 φ ≤ 0,25%		
5	Abbasian Arani i Amani [113]	$\overline{Nu} = 0,041 Re^{0,83} Pr^{1,35} (1 + \varphi^{0,43})$	(4.6)	woda-TiO ₂	8000 < Re < 51000 φ ≤ 0,2%		
6	Hussein i in. [114]	$\overline{Nu} = 0,02 Re^b Pr^c$	(4.7)	woda-TiO ₂ woda-Al ₂ O ₃ woda-SiO ₂	5000 < Re < 5 · 10 ⁴ 6,8 < Pr < 11,97		
						b	c
		woda-TiO ₂				0,78	0,54
		woda-Al ₂ O ₃				0,788	0,45
	woda-SiO ₂	0,8	0,4				
7	Sahin [96]	$\overline{Nu} = 0,106 Re^{0,588} (1 + \varphi^{-0,1096}) Pr^{0,258}$	(4.8)	woda-Al ₂ O ₃	4000 < Re < 20000 5 < Pr < 7 0,5% < φ < 4%		

8	Zerradi i in. [115]	$\overline{Nu} = Pr^{0,1039}(1,0257 \varphi + 1,1397 Re_m^{0,205} + 0,7884 \varphi Re_m^{0,205} + 1,2069)$ $Re_m = \frac{1}{v_{bf}} \sqrt{\frac{18 k_{b,n} T}{\pi \rho_{bf} d_n}}$	(4.9)	woda-Al ₂ O ₃ woda- CuO woda-TiO ₂ woda-CNT	10 ⁻⁴ < Re _m < 10 ⁻¹ 1 < Pr < 10
9	Chavan i Pise [116]	$\overline{Nu} = 0,508358 Re^{0,7401} Pr^{-0,7026}$	(4.10)	woda-Al ₂ O ₃	6000 < Re < 14000 0,3% < φ < 1%
10	Jafarimoghaddam i Aberoumand [117]	$\overline{Nu} = 1,7 Re^{0,136} Pr^{0,8} (0,003 \varphi + 0,4)$	(4.11)	EG-Cu	Re < 160 0,011% < φ < 0,171%
11	Saxena i in. [118]	$\overline{Nu} = 0,309 Re^{0,451} (1 + 100 \varphi)^{0,455} W_{in}^{0,203}$ <p>W_{in} – moc elementu grzejnego</p>	(4.12)	woda-Al ₂ O ₃	1500 < Re < 6000 0% < φ < 0,5%
12	Durga Prasad i Gupta [119]	$\overline{Nu} = 0,09589 Re^{0,8} Pr^{0,4} (1 + \varphi)^{2,833}$	(4.13)	woda-Al ₂ O ₃	3000 < Re < 30000 5,12 < Pr < 6,54 0% < φ < 0,03%
13	Noghrehabadi i in. [120]	$Nu = 4,36 + (3 + \varphi^{0,442}) Re^{0,288} Pr^{0,0185} \left(\frac{d}{x}\right)^{0,3851}$ <p>d – średnica rurki x – odległość od wlotu do rurki</p>	(4.14)	woda-Al ₂ O ₃	900 < Re < 2100 0,1% < φ < 0,9% 40 < x/d < 180
14	Azmi i in. [64]	$\overline{Nu} = 0,025 Re^{0,76} Pr^{0,45} \left(1 + \frac{T}{70}\right)^{0,14} (0,01 + BR)^{-0,1}$ <p>BR – stosunek wody do EG</p>	(4.15)	W/EG- Al ₂ O ₃	3000 < Re < 25000 0,2% < φ < 1% W:EG 60:40; 50:50; 40:60

4.4 Korelacje do obliczania współczynnika oporów przepływu

W tab. 4.2 przedstawiono wybrane korelacje służące do obliczania współczynnika oporów przepływu dla nanocieczy.

Tab. 4.2. Korelacje do wyznaczania współczynnika oporów przepływu w przewodach dla wybranych nanocieczy

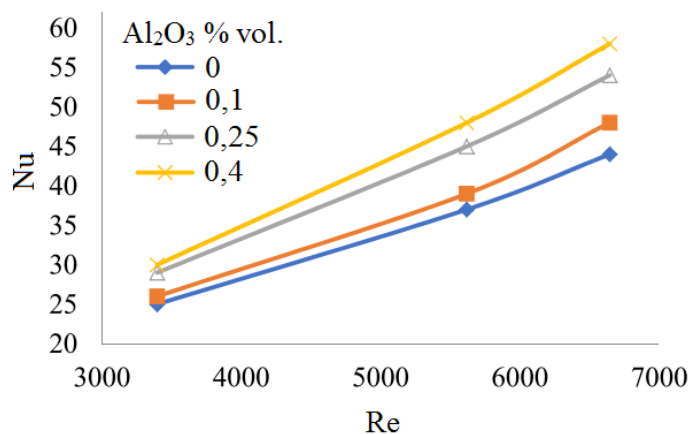
Nr	Autorzy	Wzór	Nr wzoru	Nanociecz	Zakres												
1	Vajjha i in. [110]	$f = 0,5814 Re^{-0,2986}$ lub $f = 0,3164 Re^{-0,25} \left(\frac{\rho_n f}{\rho_b f} \right)^{0,797} \left(\frac{\mu_n f}{\mu_b f} \right)^{0,108}$	(4.16)	W/EG- Al ₂ O ₃	4000 < Re < 16000 0% < φ < 0,1% W:EG 40:60 wt												
2	Hussein i in. [114]	$f = 0,3 Re^b Pr^c$ <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>b</th> <th>c</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>woda-TiO₂</td> <td>-0,1127</td> <td>0,001</td> </tr> <tr> <td>woda-Al₂O₃</td> <td>-0,111</td> <td>0,0012</td> </tr> <tr> <td>woda-SiO₂</td> <td>-0,106</td> <td>0,00125</td> </tr> </tbody> </table>		b	c	woda-TiO ₂	-0,1127	0,001	woda-Al ₂ O ₃	-0,111	0,0012	woda-SiO ₂	-0,106	0,00125	(4.17)	woda-TiO ₂ woda-Al ₂ O ₃ woda-SiO ₂	5000 < Re < 5 · 10 ⁴ 6,8 < Pr < 11,97
	b	c															
woda-TiO ₂	-0,1127	0,001															
woda-Al ₂ O ₃	-0,111	0,0012															
woda-SiO ₂	-0,106	0,00125															
3	Durga Prasad i Gupta [119]	$f = 0,3038 Re^{-0,2423} (1 + \varphi)^2$	(4.18)	woda-Al ₂ O ₃	3000 < Re < 30000 0% < φ < 0,03%												
4	Azmi i in. [64]	$f = 0,35 Re^{-0,266} Pr^{0,04} \left(1 + \frac{T}{70} \right)^{0,15} (1 + BR)^{-0,3}$ BR – stosunek wody do EG	(4.19)	W/EG- Al ₂ O ₃	3000 < Re < 25000 0,2% < φ < 1% W:EG 60:40; 50:50; 40:60												

4.5 *Badania konwekcyjnej wymiany ciepła w wybranych wymiennikach ciepła*

Równoległe do prac dotyczących przejmowania ciepła nanocieczy w warunkach konwekcji wymuszonej realizowanych w układach pomiarowych składających się z pojedynczej rurki pomiarowej, prowadzone są badania eksperymentalne mające na celu wykazanie możliwości wykorzystania nanocieczy zamiast tradycyjnego płynu roboczego w rzeczywistych urządzeniach ciepłno-przepływowych. Poniżej przedstawiono wyniki z wybranych prac dotyczących wymienników ciepła oraz układów solarnych, w których wykorzystano nanociecze na bazie wody lub mieszanin wody z glikolem etylenowym oraz nanocząstek Al_2O_3 .

Płaszczowo-rurowe wymienniki ciepła

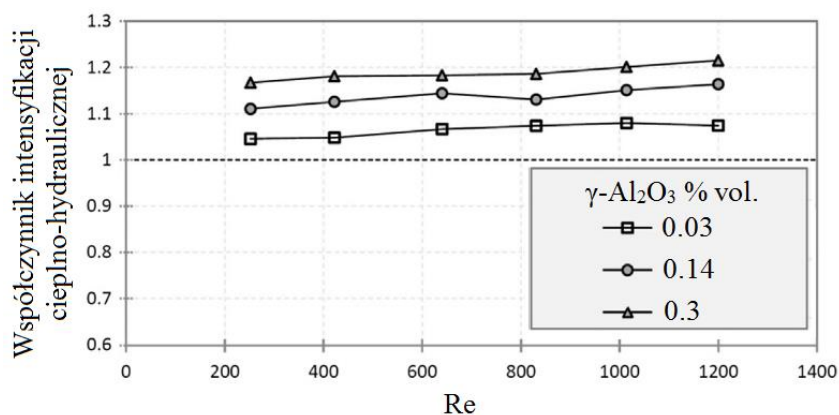
Naseema i in. [121] przeprowadzili badania eksperymentalne dotyczące turbulentnego przepływu nanocieczy wewnątrz wymiennika ciepła rura w rurze. Podczas eksperymentu wykorzystano nanociecze na bazie wody z dodatkiem nanocząstek Al_2O_3 o koncentracjach objętościowych: 0,1%, 0,25% oraz 0,4%, które przepływały przez szczelinę między rurami. Zaobserwowano wzrost liczby Nusselta wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek oraz liczby Reynoldsa – rys. 4.19.



Rys. 4.19. Zależność liczby Nu od liczby Re dla nanocieczy woda- Al_2O_3 [121]



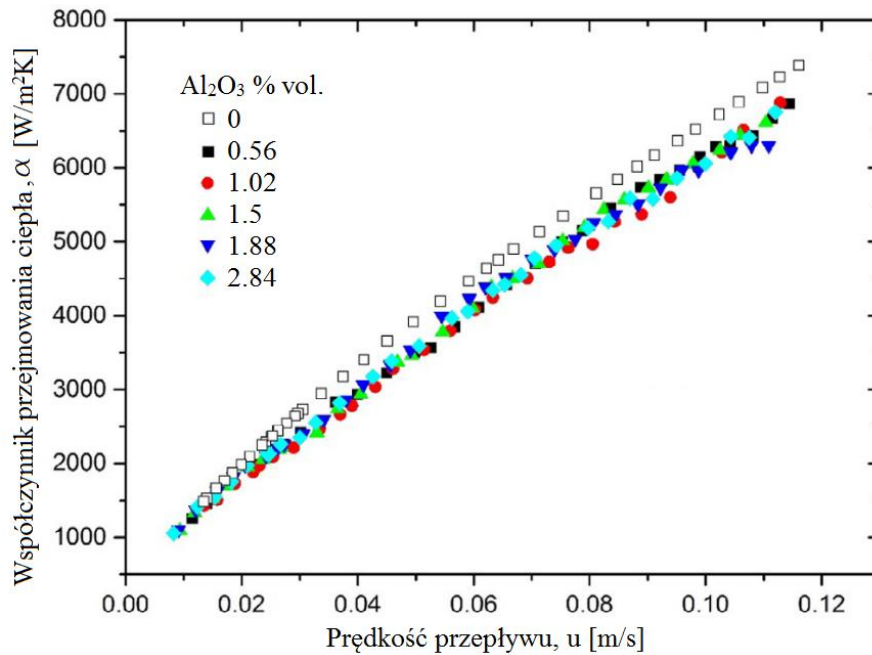
Barzegarian i in. [122] testowali wpływ dodania nanocząstek $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ do wody na intensyfikację procesu wymiany ciepła w wymienniku płaszczowo-rurowym z przegrodami segmentowymi. Badano trzy koncentracje objętościowe nanocząstek: 0,03%, 0,14% oraz 0,3%. W celu poprawienia stabilności nanocieczy użyto substancji powierzchniowoczynnej w postaci dodecylobenzenosulfonianu sodu. Podczas eksperymentu podgrzana nanociecz przepływała przez rury wymiennika, a po stronie płaszcza przepływała zimna woda sieciowa. Dla wszystkich badanych koncentracji nanocząstek zaobserwowano wzrost liczby Nu oraz nieznaczny wzrost oporów przepływu. Najwyższy współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej równy 18,9% uzyskano dla koncentracji objętościowej nanocząstek 0,3% - rys. 4.20.



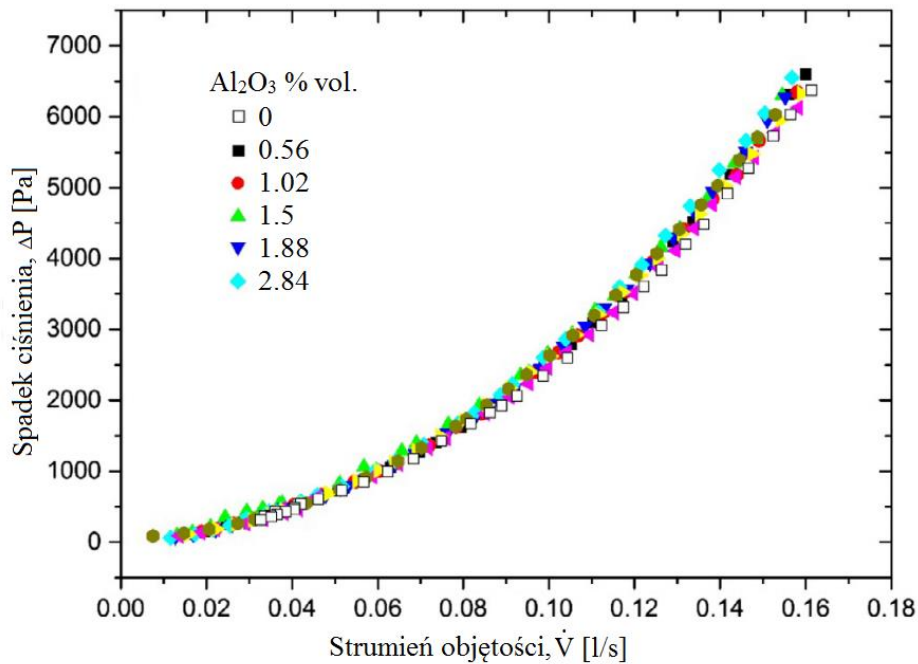
Rys. 4.20. Zależność współczynnika intensyfikacji cieplno-hydraulicznej od liczby Re dla nanocieczy woda- $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ [122]

Płytowe wymienniki ciepła

Huang i in. [123] wyznaczyli eksperymentalnie charakterystyki cieplno-hydrauliczne płytowego wymiennika ciepła z przetłoczeniami typu jodełkowego z wykorzystaniem nanocieczy woda- Al_2O_3 . Współczynniki przejmowania ciepła oraz spadki ciśnienia wyznaczone zostały dla nanocieczy o koncentracjach objętościowych: 0,56%, 1,02%, 1,5%, 1,18% i 2,48% a następnie porównane z wynikami otrzymanymi dla czystej cieczy bazowej. Zaobserwowano spadek współczynnika przejmowania ciepła dla stałej prędkości przepływu cieczy, większy dla wyższych koncentracji – rys. 4.21. Opory przepływu przez wymiennik rosły wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek – rys. 4.22.

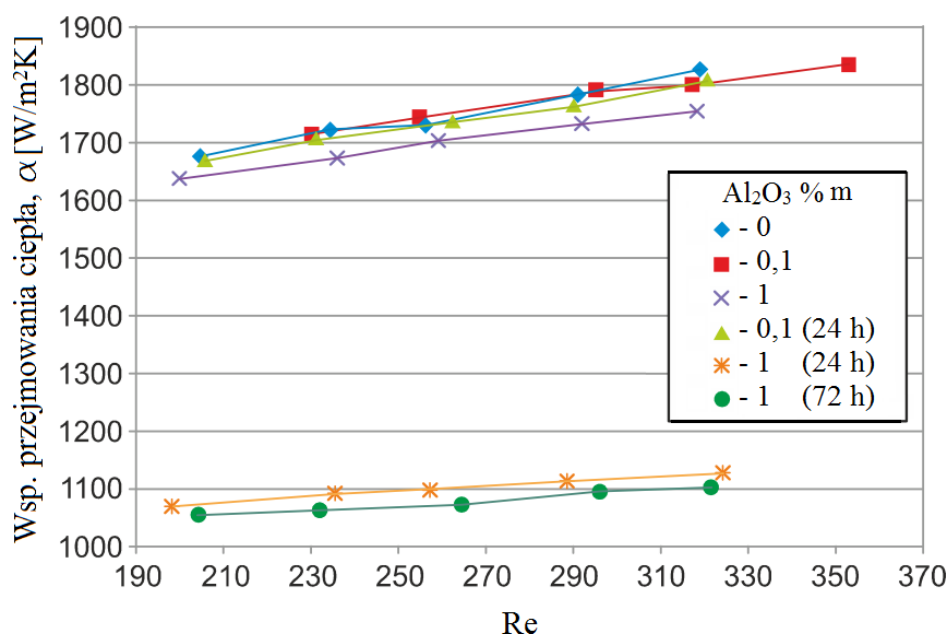


Rys. 4.21. Zależność współczynnika przejmowania ciepła od prędkości przepływu dla nanocieczy woda- Al_2O_3 [123]



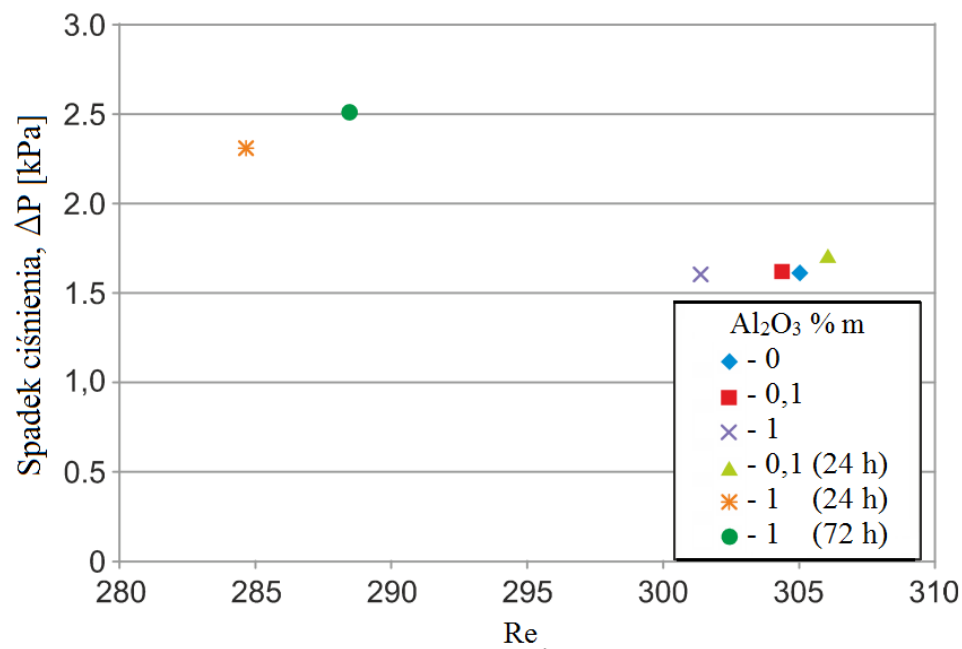
Rys. 4.22. Spadek ciśnienia dla nanocieczy woda- Al_2O_3 [123]

Głównym celem prac eksperymentalnych przeprowadzonych przez Cieślińskiego i in. [124] było sprawdzenie możliwości poprawy efektywności płytowego wymiennika ciepła przez zastosowanie nanocieczy woda- Al_2O_3 . Charakterystyka cieplno-przepływowa komercyjnie dostępnego lutowanego płytowego wymiennika ciepła wyznaczona została dla dwóch koncentracji masowych nanocząstek: 0,1% i 1%. Serie pomiarowe powtórzono po jednodniowej oraz trzydniowej przerwie, pozostawiając nanociecz wewnątrz instalacji. Zauważono, że dodanie nanocząstek skutkowało pogorszeniem wymiany ciepła dla badanego zakresu temperatury oraz liczby Reynoldsa. Nie zauważono zmiany współczynnika przejmowania ciepła dla nanocieczy o koncentracji 0,1% po jednodniowej przerwie, natomiast w przypadku nanocieczy o koncentracji 1% nastąpiło znaczne pogorszenie wymiany ciepła zarówno dla przerwy jedno jak i trzydniowej – rys. 4.23. Ponadto po każdej przerwie w pracy badanego wymiennika ciepła zanotowano znaczny wzrost oporów przepływu – rys. 4.24.



Rys. 4.23. Zależność współczynnika przejmowania ciepła od liczby Re dla nanocieczy woda- Al_2O_3 [124]

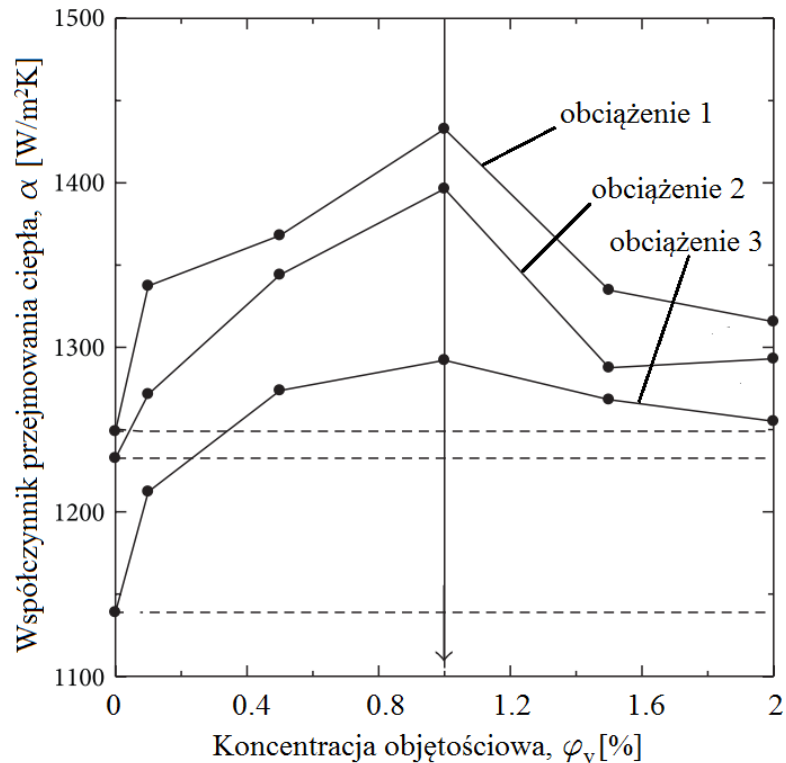




Rys. 4.24. Spadek ciśnienia dla nanocieczy woda-Al₂O₃ [124]

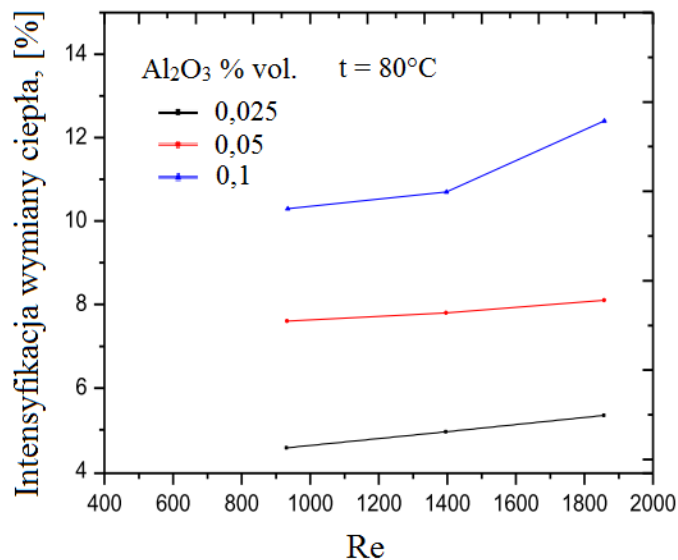
Chłodnice samochodowe

Ali i in. [125] przeprowadzili badania eksperymentalne dotyczące zastosowania nanocieczy w chłodnicy silnika spalinowego. Nanociecze woda-Al₂O₃ o koncentracjach objętościowych 0,1%, 0,5%, 1%, 1,5% i 2%. Dla każdej koncentracji przeprowadzono badania trzech przypadków symulacji obciążenia silnika. Parametrami zmiennymi pomiędzy poszczególnymi seriami pomiarowymi były: obciążenie cieplne, strumień cieczy chłodzącej i strumień powietrza przez chłodnicę. Zauważono intensyfikację wymiany ciepła dla koncentracji 0,1%, 0,5%, i 1%. W przypadku koncentracji 1,5% i 2% zauważono pogorszenie przejmowania ciepła w chłodnicy w porównaniu z niższymi koncentracjami – rys. 4.25.



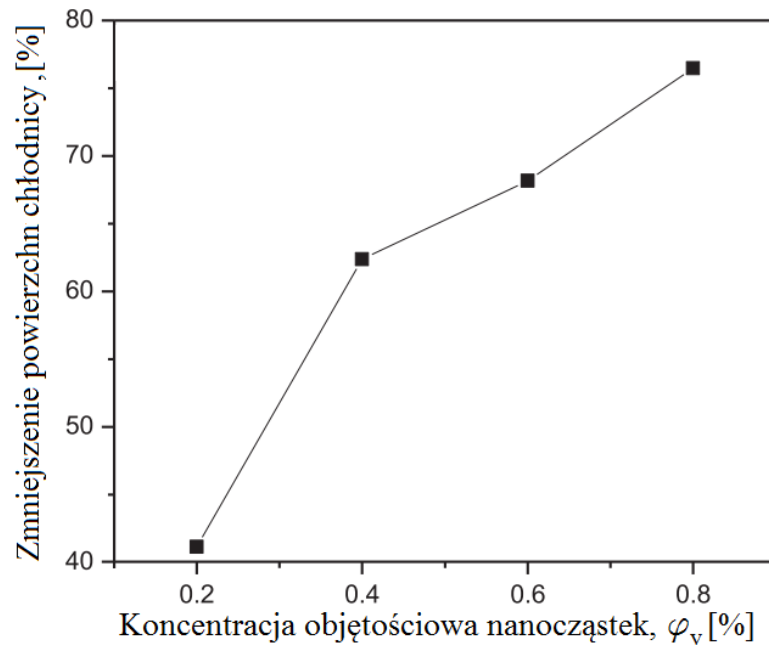
Rys. 4.25. Zależność współczynnika przejmowania ciepła od koncentracji objętościowej nanocząstek dla nanocieczy woda- Al_2O_3 [125]

Sasank i in. [126] testowali wpływ warunków pracy takich jak natężenie przepływu oraz temperatura wlotowa cieczy roboczej na intensywność wymiany ciepła chłodnicy samochodowej wykorzystując nanociecz woda- Al_2O_3 o koncentracji objętościowej: 0,025%, 0,05% i 0,1%. Zauważono, że stopień intensyfikacji wymiany ciepła wzrasta wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek oraz temperatury wlotowej cieczy – rys. 4.26. Najwyższy wzrost wynoszący 12,4% zanotowano dla koncentracji nanocząstek 0,1% oraz temperatury cieczy 80°C .



Rys. 4.26. Intensyfikacja wymiany ciepła dla nanocieczy woda-Al₂O₃ [126]

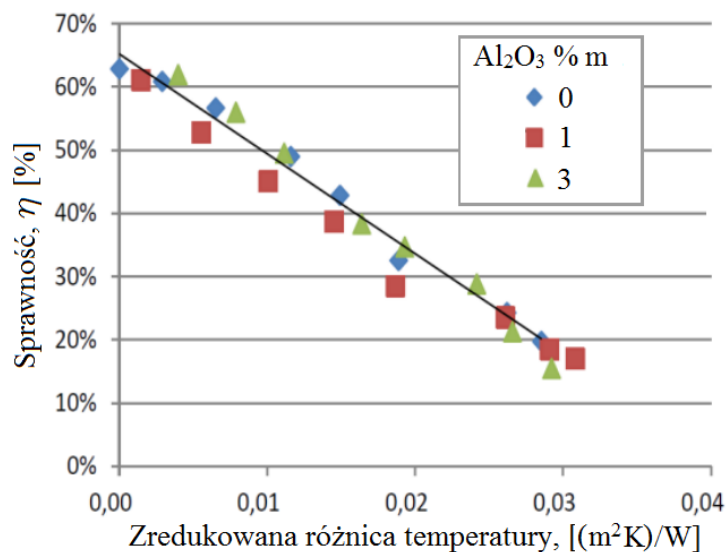
Subhedar i in. [127] przeprowadzili badania eksperymentalne wykorzystując nanociecze woda/EG-Al₂O₃ jako płyn roboczy w chłodnicy silnika spalinowego. Nanociecze na bazie mieszaniny wody z glikolem etylenowym w stosunku objętościowym 50:50 zostały przygotowane dla czterech koncentracji objętościowych nanocząstek: 0,2%, 0,4%, 0,6% oraz 0,8%. Jako parametry zmienne podczas badań przyjęto: wlotową temperaturę nanocieczy (65°C - 85°C), objętościowy strumień nanocieczy (4 l/min - 9 l/min) oraz prędkość powietrza (1,05 m/s - 2,39 m/s). Badano wydajność wymiany ciepła chłodnicy samochodowej oraz oceniono możliwości zmniejszenia jej powierzchni czołowej. Zauważono, że dodanie nanocząstek Al₂O₃ intensyfikuje wymianę ciepła w chłodnicy. Stopień intensyfikacji przejmowania ciepła zależał od koncentracji nanocząstek oraz strumienia objętościowego cieczy, natomiast temperatura wlotowa nanocieczy nie powodowała znaczących zmian. Badania pokazały, że zastosowanie już najniższej koncentracji nanocząstek (0,2%) może pozwolić zredukować powierzchnię chłodnicy nawet o 40% - rys. 4.27.



Rys. 4.27. Zmniejszenie powierzchni czołowej chłodnicy w zależności od koncentracji objętościowej nanocieczki woda/EG- Al_2O_3 [127]

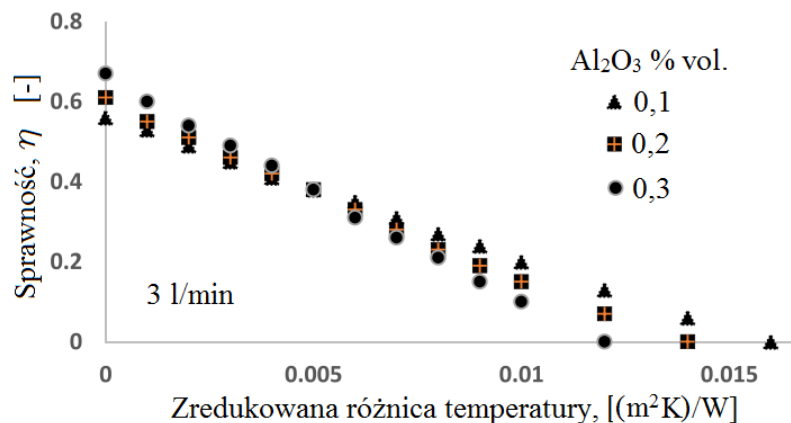
Układy solarne

Cieśliński i in. [128] przeprowadzili badania eksperymentalne dotyczące wpływu nanocieczki woda- Al_2O_3 o koncentracjach masowych 1% i 3% zastosowanych jako czynnik roboczy na sprawność kolektora hybrydowego PVT. Do badań użyto komercyjnego modułu hybrydowego będącego połączeniem panelu fotowoltaicznego z kolektorem słonecznym. Pomiary parametrów układu przeprowadzone zostały zarówno dla warunków sztucznego oświetlenia jak i warunków naturalnych. Zaobserwowano brak zauważalnego wpływu zastosowania nanocieczki na sprawność kolektora w porównaniu z cieczą bazową – rys. 4.28.



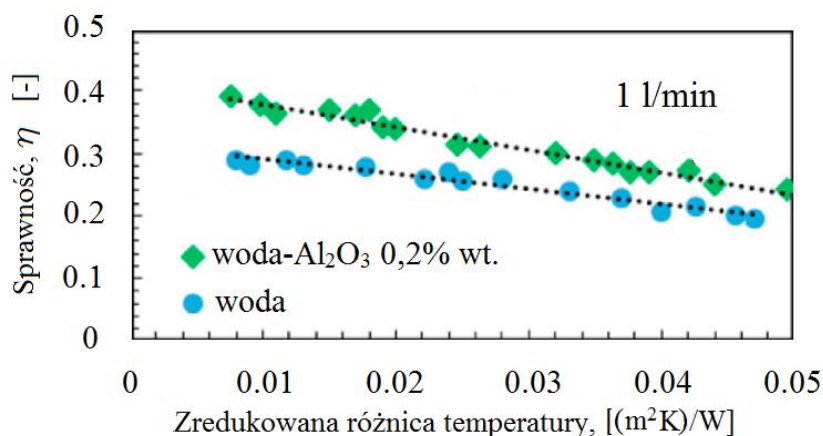
Rys. 4.28. Zależność sprawności płaskiego kolektora słonecznego od zredukowanej różnicy temperatury dla nanociecicy woda- Al_2O_3 [128]

Rajput i in. [129] przeprowadzili badania eksperymentalne dotyczące wykorzystania nanociecicy woda- Al_2O_3 do odbioru ciepła z płaskiego kolektora słonecznego. Prace zostały przeprowadzone dla trzech koncentracji objętościowych nanocząstek: 0,1%, 0,2% oraz 3% z dodatkiem siarczanu dodecyłu sodu jako surfaktantu w ilości 0,8% według masy nanocząstek. Eksperyment przeprowadzono w warunkach oświetlenia naturalnego dla różnych strumieni objętościowego natężenia przepływu cieczy oraz różnych kątów pochylecia kolektora. Zauważono 21% wzrost sprawności kolektora uzyskany dla koncentracji 0,3% oraz przepływu nanociecicy 3 l/min – rys. 4.29.



Rys. 4.29. Zależność sprawności płaskiego kolektora słonecznego od zredukowanej różnicy temperatury dla nanocieczy woda- Al_2O_3 [129]

Hosseini i in. [130] przeprowadzili badania eksperymentalne dotyczące oceny wydajności cieplnej parabolicznego rynnowego kolektora słonecznego zasilanego nanocieczą woda- Al_2O_3 . Układ badawczy wyposażony w kolektor, obieg cieczy roboczej oraz elementy pomiarowe umieszczono na dachu budynku celem przeprowadzenia eksperymentu w warunkach naturalnego źródła światła. Wyniki otrzymane dla nanocieczy o koncentracji masowej 0,2% oraz dla trzech strumieni objętości: 1, 3 i 5 l/min porównano z wynikami otrzymanymi dla cieczy bazowej. Najwyższy wzrost sprawności kolektora słonecznego wynoszący 32% otrzymano dla strumienia objętości nanocieczy 1 l/min – rys. 4.30.



Rys. 4.30. Zależność sprawności płaskiego kolektora słonecznego od zredukowanej różnicy temperatury [130]

4.6 Podsumowanie stanu wiedzy

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu prac eksperymentalnych zauważono, że przeważająca część artykułów dotyczy badań, w których wykorzystano nanociecz woda- Al_2O_3 . Ograniczona ilość prac skupiała się na nanocieczach wykorzystujących jako ciecze bazowe mieszaniny wody z glikolem etylenowym. Dodanie nanocząstek w większości przypadków intensyfikuje wymianę ciepła, ale także powoduje wzrost oporów przepływu. W przypadku nanocieczy woda- Al_2O_3 oraz woda/EG- Al_2O_3 rzadko stosuje się substancje powierzchniowocenne. W przypadku badań cieplno-przepływowych nanocieczy duże znaczenie ma precyzyjne wyznaczenie własności termofizycznych badanych nanocieczy.

Do obliczeń numerycznych dotyczących przejmowania ciepła nanocieczy najczęściej stosuje się programy komercyjne, np. Fluent oraz wbudowane w nich modele turbulencji. Wyniki obliczeń dające największą zbieżność z równaniami korelacyjnymi lub wynikami badań eksperymentalnych uzyskuje się wykorzystując model homogenicznej cieczy jednofazowej. Tak samo jak w przypadku badań eksperymentalnych, bardzo istotne jest jakie wykorzystano równania korelacyjne służące do wyznaczenia własności termofizycznych nanocieczy lub czy zastosowano własności zmierzone eksperymentalnie.

5. Cel i zakres pracy

Zasadniczym celem pracy jest określenie wpływu koncentracji nanocząstek Al_2O_3 na współczynnik przejmowania ciepła i opory przepływu wody destylowanej oraz mieszanin woda/glikol etylenowy w ogrzewanych poziomych rurkach.

Badania obejmowały:

- A. Zaprojektowanie, budowę i walidację stanowiska badawczego.
 1. Stosunek długości rurki do jej średnicy $L/d = 250$ był wystarczająco duży, aby traktować przepływ w rurce, jako w pełni rozwinięty.

2. Układ ogrzewania rurki zapewniał realizację warunku brzegowego II rodzaju, t.j. $\dot{q} = \text{const}$, jako bardziej realistycznego w praktyce przemysłowej, niż warunek brzegowy I rodzaju ($T_w = \text{const}$).
 - a) Rurka była ogrzewana przez przepuszczanie przez nią prądu elektrycznego (ciepło Joule'a). Ten sposób ogrzewania wybrano ze względu na równomierność rozkładu gęstości strumienia ciepła na całej długości rurki oraz stosunkowo łatwą i precyzyjną regulację doprowadzanej mocy (gęstości strumienia ciepła).
 - b) Rurka była wykonana ze stali nierdzewnej 304L ze względu na jej duży opór właściwy, co umożliwiło osiągnięcie relatywnie dużego spadku napięcia dla danego natężenia prądu.
 - c) Badania zostały wykonane dla jednej gęstości strumienia ciepła, która wynosiła $\dot{q} = 19500 \text{ W/m}^2$.
3. W celu walidacji stanowiska badawczego i procedury pomiarowej uzyskane wyniki dla wody destylowanej oraz mieszanin wody z glikolem etylenowym zostały porównane z przewidywaniami uzyskanymi z powszechnie akceptowanych korelacji.

B. Wytwarzanie i własności termofizyczne badanych nanociecz.

1. Nanociecze przygotowywano metodą dwustopniową bez dodatku substancji powierzchniowoczynnych.
2. Stabilność nanociecz była określana przez pomiar stopnia mętności.
3. Termofizyczne własności badanych nanociecz, tj. współczynnik przewodzenia ciepła i dynamiczny współczynnik lepkości były określone doświadczalnie i uogólnione jako funkcje temperatury i koncentracji nanocząstek: $\lambda = \lambda(T, \varphi_m)$ i $\mu = \mu(T, \varphi_m)$.
4. Badane nanociecze
 - a) Jako ciecze bazowe wykorzystano wodę destylowaną i mieszaniny wody destylowanej i glikolu etylenowego o stosunkach objętościowych woda/EG (90:10), woda/EG (80:20) oraz woda/EG (60:40). Woda została wybrana ze względu na dobre własności termofizyczne, dostępność i powszechność stosowania w układach chłodzących. Mieszaniny wody i glikolu etylenowego wybrano z powodu szerokiego zastosowania w przemyśle samochodowym oraz

układach solarnych. Potencjalne zastosowanie nanocieczy jako czynnika chłodzącego w chłodnicach może prowadzić do ich większej kompaktowości. Taki wybór cieczy bazowych umożliwił też badania konwekcji wymuszonej w szerokim zakresie liczby Reynoldsa.

- b) Jako nanocząstki wykorzystano Al_2O_3 ze względu na niski koszt i dużą dostępność.
- c) Koncentracja masowa nanocząstek w badanych nanocieczach wynosiła: 0,1%, 1% i 5%. Zgodnie z doniesieniami literaturowymi taki zakres koncentracji jest adekwatny do wykazania wpływu nanocząstek na przejmowanie ciepła, a jednocześnie nie pogarsza stabilności nanocieczy oraz nie powoduje znacznego wzrostu oporów przepływu w porównaniu z cieczą bazową.

C. Badania eksperymentalne konwekcji wymuszonej nanocieczy.

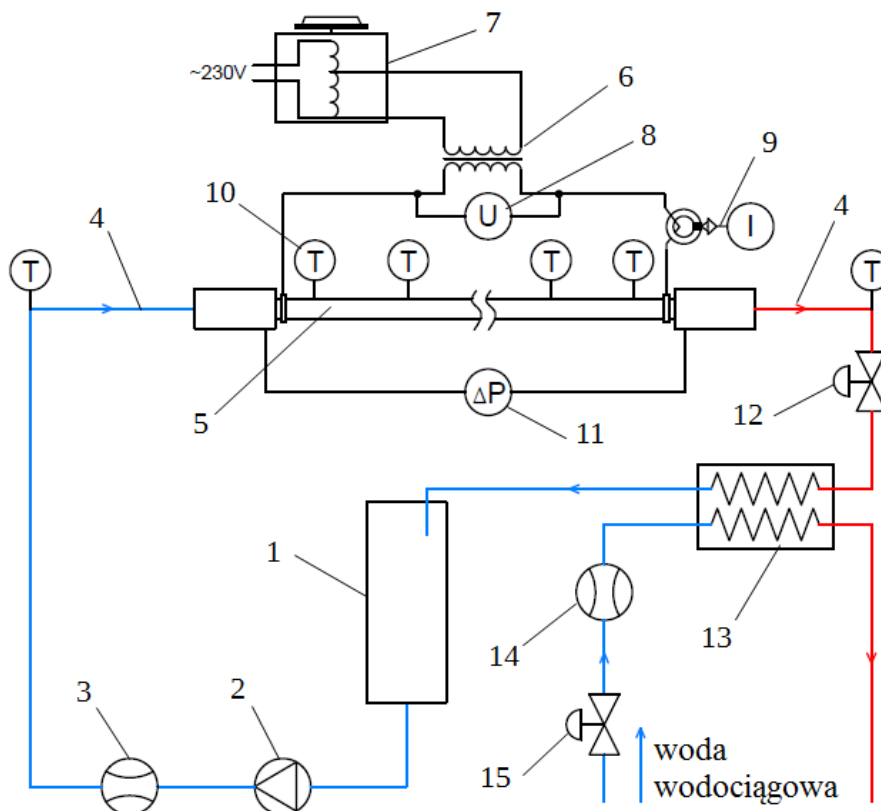
1. Określenie wpływu koncentracji nanocząstek na średnią liczbę Nusselta w funkcji liczby Reynoldsa.
2. Określenie wpływu koncentracji nanocząstek na współczynnik oporów przepływu w funkcji liczby Reynoldsa.
3. Określenie współczynnika intensyfikacji cieplno-hydraulicznej w funkcji liczby Reynoldsa.
4. Opracowanie równania korelacyjnego do obliczania średniej liczby Nusselta $Nu = f(Re, \varphi_m)$ dla zastosowań aplikacyjnych.
5. Opracowanie równania korelacyjnego do obliczania współczynnika oporów przepływu w postaci $f = f(Re, \varphi_m)$ dla zastosowań praktycznych.

D. Badania numeryczne konwekcji wymuszonej nanocieczy.

1. Weryfikacja przyjętego modelu homogenicznego nanocieczy w odniesieniu do wybranych korelacji oraz własnych badań eksperymentalnych.
2. Równania zachowania ciągłości, pędu i energii zastosowano jak dla płynu newtonowskiego z własnościami termofizycznymi zależnymi od temperatury.
3. Zagadnienie brzegowe rozwiązano metodą FVM przy użyciu kodu ANSYS.

6. Stanowisko badawcze

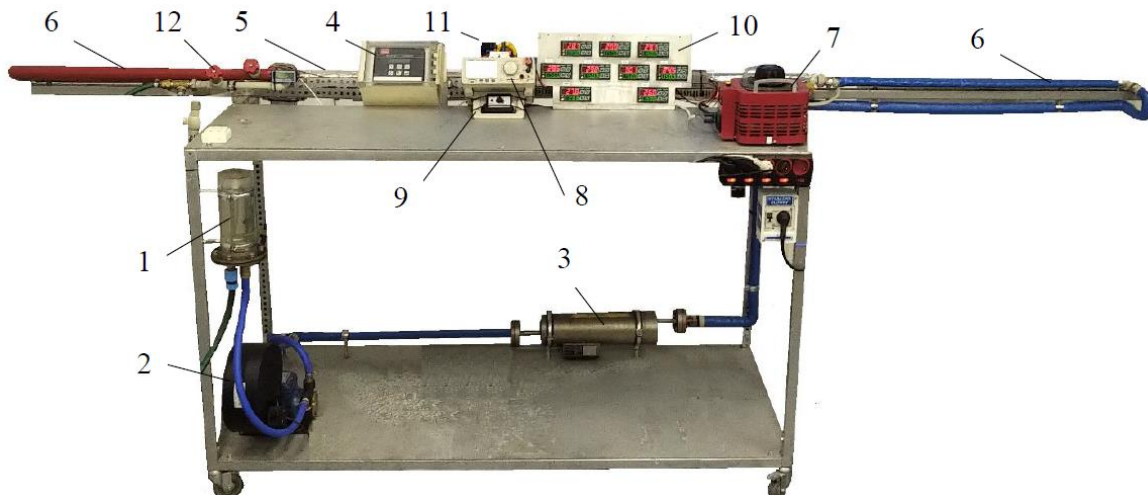
Na rys. 6.1 przedstawiono schemat układu pomiarowego zastosowanego do wyznaczania charakterystyk cieplno-przepływowych badanych nanocieczy.



Rys. 6.1. Schemat stanowiska badawczego

- 1 – zbiornik, 2 – pompa odśrodkowa, 3 – przepływomierz, 4 – odcinki rozbiegowe,
5 – rurka testowa, 6 – transformator, 7 – autotransformator, 8 – woltomierz,
9 – amperomierz cęgowy, 10 – czujniki temperatury, 11 – różnicowy przetwornik ciśnienia, 12 – zawór regulacyjny, 13 – płytowy wymiennik ciepła, 14 – przepływomierz,
15 – zawór regulacyjny wody chłodzącej

Rys. 6.2 przedstawia widok stanowiska pomiarowego.



Rys. 6.2. Widok stanowiska badawczego

1 – zbiornik, 2 – pompa odśrodkowa, 3 – przepływomierz, 4 – wyświetlacz przepływomierza, 5 – rurka testowa, 6 – odcinki rozbiegowe, 7 – autotransformator, 8 – multimetr cyfrowy, 9 – regulator obrotów pompy, 10 – wyświetlacze czujników temperatury, 11 – różnicowy przetwornik ciśnienia, 12 – zawór regulacyjny wody chłodzącej

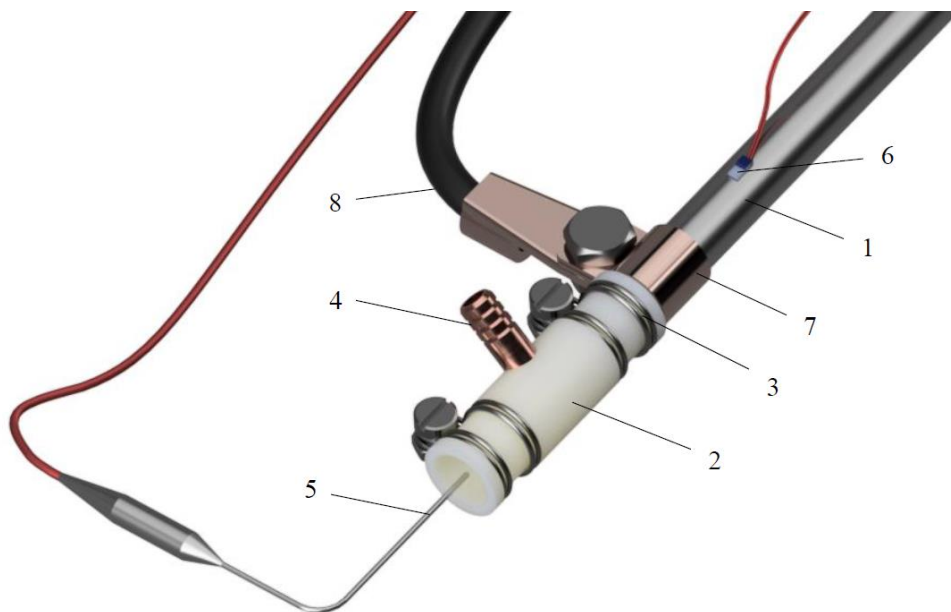
Stanowisko do wyznaczania charakterystyk cieplno-przepływowych nanocieczy składa się z sekcji grzejnej, układu zasilania energią elektryczną, układu cyrkulacji badanej cieczy, zasobnika oraz układu chłodzenia. Odcinki rozbiegowe zostały dobrane w taki sposób aby zapewnić niezaburzony przepływ na wlocie i wylocie z sekcji pomiarowej. W celu ograniczenia strat ciepła do otoczenia sekcja grzejna była zaizolowana warstwą wełny mineralnej o grubości 2 cm. Strumień ciepła przekazywany do badanej cieczy określany był jako iloczyn natężenia prądu elektrycznego przepływającego przez rurkę grzejną oraz spadku napięcia na rurce. Pomiary natężenia prądu i spadku napięcia realizowane były za pomocą miernika elektrycznego MT8045 MCP posiadającego funkcję pomiaru rzeczywistej wartości skutecznej prądu i napięcia przemiennego (True RMS). W celu umożliwienia pomiaru natężenia prądu i spadku napięcia bez konieczności przełączania przewodów wykonano przełącznik umożliwiający pomiar wybranego parametru. Po wybraniu

odpowiedniego zakresu oraz położenia przełącznika miernik działał jako woltomierz. Ze względu na to, że natężenie prądu elektrycznego przepływającego przez rurkę grzejną w zbudowanym układzie jest rzędu 130A, niemożliwym był bezpośredni pomiar tego parametru urządzeniem podłączonym szeregowo do układu. Aby dokonać pomiaru użyto przystawki cęgowej CA600 CIE, mierzącej natężenie prądu płynącego w obwodzie w sposób pośredni, przez pomiar pola elektrycznego generowanego przez przewód zasilający, na którym znajdowała się przystawka. Sygnał z przystawki przekazywany był do miernika elektrycznego jako sygnał w mV. W stosowanym zakresie pomiarowym przystawki, 1 mV jest wskazaniem odpowiadającym 1A. Jako zasobnik badanej cieczy użyto zbiornika wykonanego z PMMA. Przezroczystość materiału umożliwiała obserwowanie ewentualnego osadzania się nanocząstek podczas trwania eksperymentu. Dodatkowo zbiornik był wykonany jako rozbieralny co umożliwiała jego dokładne czyszczenie. Napełnianie zbiornika wykonywano przez umiejscowiony powyżej króciec do napełniania, zakończony zaworem kulowym. Ruch badanej cieczy wymuszony był przez pompę odśrodkową PQAm60 PEDROLLO. Prędkość obrotowa pompy, a co za tym idzie strumień cieczy, zmieniany był regulatorem obrotów silnika KOM-STER. Do pomiaru natężenia przepływu badanej cieczy użyto przepływomierza masowego MASSFLO MASS2100 DANFOSS połączonego z przetwornikiem sygnału pomiarowego MASSFLO MASS3000 DANFOSS. W celu określenia oporów przepływu zastosowano różnicowy przetwornik ciśnienia DMD831 SIMEX. Króćce przyłączeniowe przetwornika wyposażone zostały w zaworki odpowietrzające oraz połączone przewodem elastycznym z króćcami umiejscowionymi na wlocie i wylocie sekcji pomiarowej. W celu wychłodzenia badanej cieczy po przejściu przez rurkę grzejną wykorzystano płytowy wymiennik ciepła podłączony do zimnej wody sieciowej. Strumień cieczy chłodzącej regulowany był zaworem dławiącym. Zamontowany między zaworem dławiącym a płytowym wymiennikiem ciepła przepływomierz turbinkowy umożliwiał pomiar natężenia przepływu cieczy chłodzącej.



6.1 Sekcja grzejna

Na rys. 6.3 pokazano szczegóły sekcji grzejnej.



Rys. 6.3. Sekcja grzejna

1 – rurka grzejna, 2 – element mocująco-izolacyjny, 3 – opaski zaciskowe,
4 – króciec, 5 – płaszczowy rezystancyjny czujnik temperatury, 6 – cienkowarstwowy
rezystancyjny czujnik temperatury, 7 – zacisk przyłączeniowy, 8 – przewód
przyłączeniowy

Rurka grzejna o długości 2000 mm, średnicy wewnętrznej 8 mm oraz średnicy zewnętrznej 10 mm była wykonana ze stali nierdzewnej 304L. Przez miedziane zaciski przyłączeniowe rurka grzejna była podłączona do zespołu transformatorów i działała jako opornik elektryczny. Rurka grzejna była odizolowana cieplnie i elektrycznie od instalacji za pomocą tulei mocujących wykonanych z PTFE. Opaska zaciskowa umożliwia zaciśnięcie elementu mocującego na rurce zapewniając szczelność układu. Do pomiaru temperatury cieczy zastosowano płaszczowe rezystancyjne czujniki temperatury typu Pt100 (kl. A). Do pomiaru temperatury powierzchni rurki użyto 6 cienkowarstwowych rezystancyjnych czujników temperatury typu Pt100 (kl. A) przymocowanych do rurki klejem termoprzewodzącym. Wszystkie czujniki temperatury podłączone zostały do wyświetlaczy ER303 [EDO].

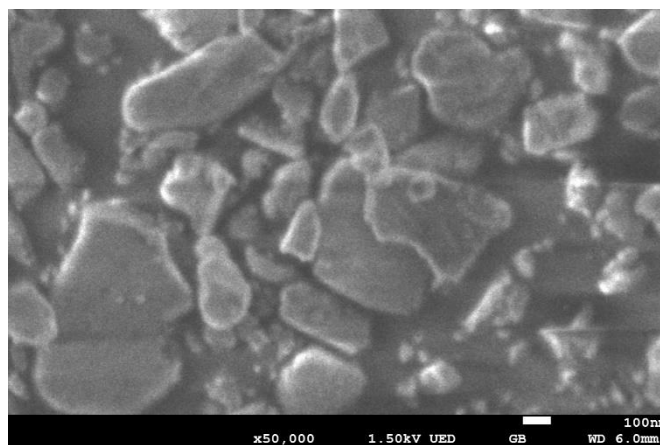
6.2 Przygotowanie i charakterystyka badanych nanociecz

W tab. 6.1 przedstawiono zestawienie wytworzonych nanociecz użytych do wyznaczenia własności termofizycznych oraz badań cieplno-przepływowych. Podstawowe własności termofizyczne cieczy bazowych oraz nanocząstek umieszczono w załączniku 1.

Tab. 6.1. Badane nanociecze

Badanie	Rodzaj cieczy bazowej	Rodzaj nanocząstek	Koncentracja masowa [%]
własności termofizyczne	woda destylowana	Al_2O_3	0,1; 1,0; 5,0
	woda/EG (90:10 vol.)		
	woda/EG (80:20 vol.)		
	woda/EG (60:40 vol.)		
cieplno-przepływowe	woda destylowana	Al_2O_3	0,1; 1,0; 5,0
	woda/EG (90:10 vol.)		
	woda/EG (80:20 vol.)		
	woda/EG (60:40 vol.)		

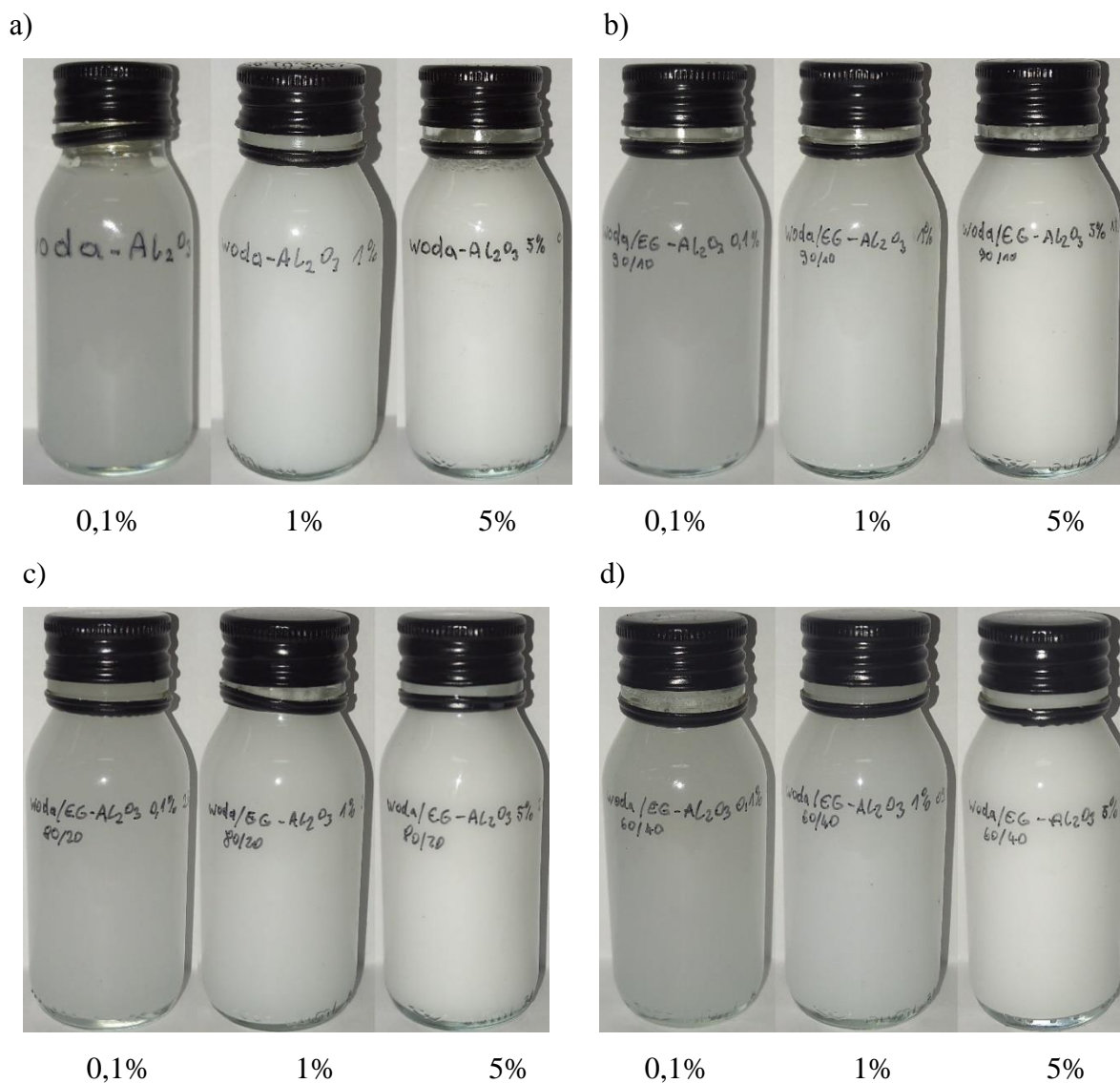
Rys. 6.4 przedstawia zdjęcie SEM użytych do wytwarzania nanociecz nanocząstek Al_2O_3 dostarczonych przez firmę SIGMA-ALDRICH. Zdjęcie wykonano przy pomocy skaningowego mikroskopu elektronowego JEOL JSM-7800F będącego na wyposażeniu Instytutu Technologii Maszyn i Materiałów Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej.



Rys. 6.4. Nanocząstki Al_2O_3

Nanociecze przygotowane zostały w oparciu o metodę dwuetapową. Do odmierzenia masy nanocząstek użyto precyzyjnej wagi laboratoryjnej LP420 SARTORIUS o zakresie ważenia do 420 g oraz dokładności $\pm 0,01$ g, a do odważenia cieczy bazowej wagi 323 BONSO o zakresie do 5000 g i dokładności ± 1 g. Po odważeniu odpowiedniej ilości, nanocząstki wraz z cieczą bazową umieszczone zostały w zbiorniku wyposażonym w węzownicę. W kolejnym kroku w naczyniu umieszczono mieszadło wysokoobrotowego homogenizera X1740 CAT o regulowanych obrotach w zakresie od 2500 do 23500 obr/min, a następnie mieszano nanociecz przez 30 minut przy nastawie 7000 obr/min. Dzięki zainstalowanej w zbiorniku węzownicy podłączonej do zimnej wody sieciowej możliwe było utrzymanie temperatury przygotowywanej nanocieczy w zakresie $20 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Następnie zbiornik przekładano do wanny płuczki ultradźwiękowej UNITRA wyposażonej w 12 przetworników piezoelektrycznych o częstotliwości pracy 35 kHz i łącznej mocy 1000W podłączonych do generatora ultradźwięków INTERSONIC. Czas ultrasonifikacji przygotowywanej nanocieczy wynosił 30 minut. W tym przypadku także użyto systemu chłodzenia aby zapewnić stałą temperaturę nanocieczy $20 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

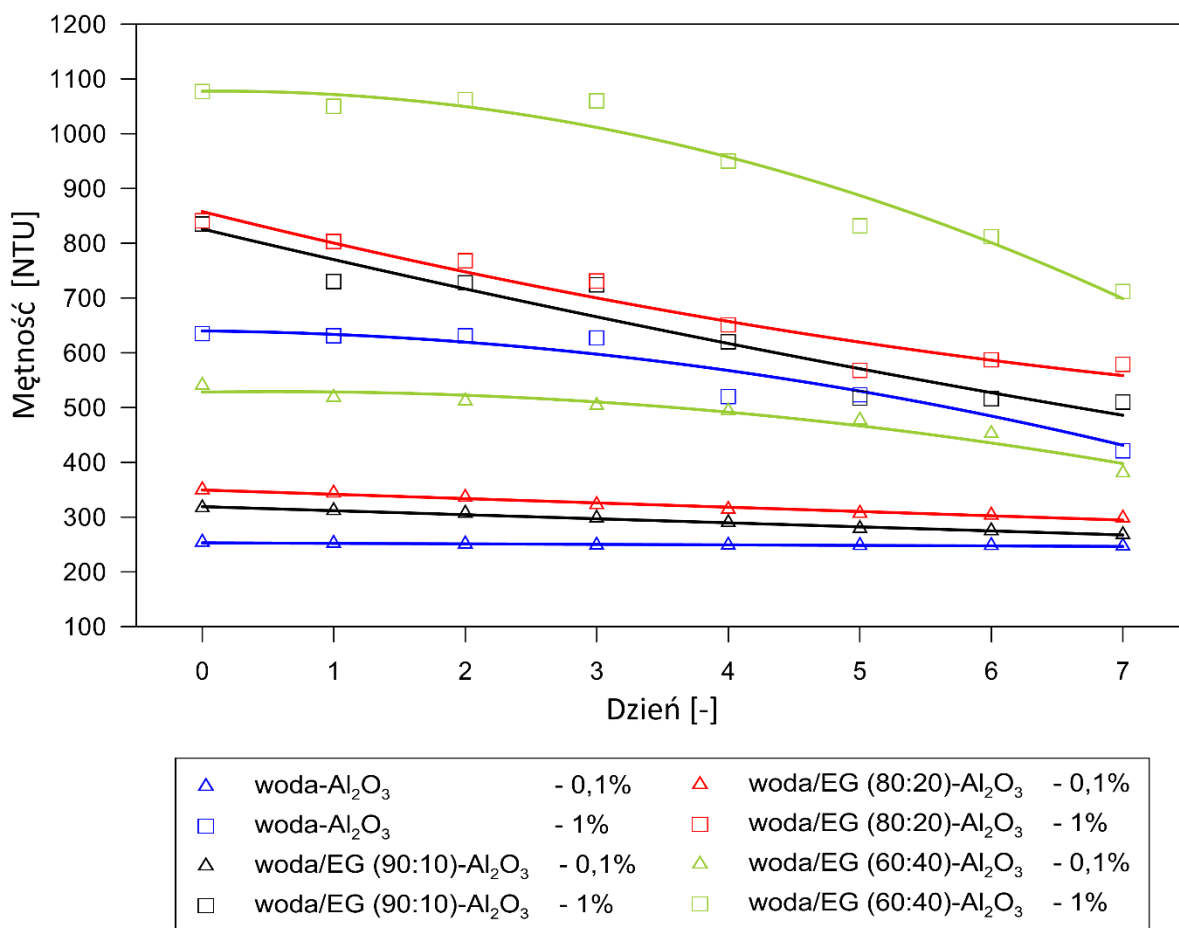
Na rys. 6.5 przedstawiono widok wytworzonych nanocieczy.



Rys. 6.5. Wytworzone nanocieczy: a) woda-Al₂O₃; b) woda/EG (90:10 vol.)-Al₂O₃; c) woda/EG (80:20 vol.)-Al₂O₃; d) woda/EG (60:40 vol.)-Al₂O₃;

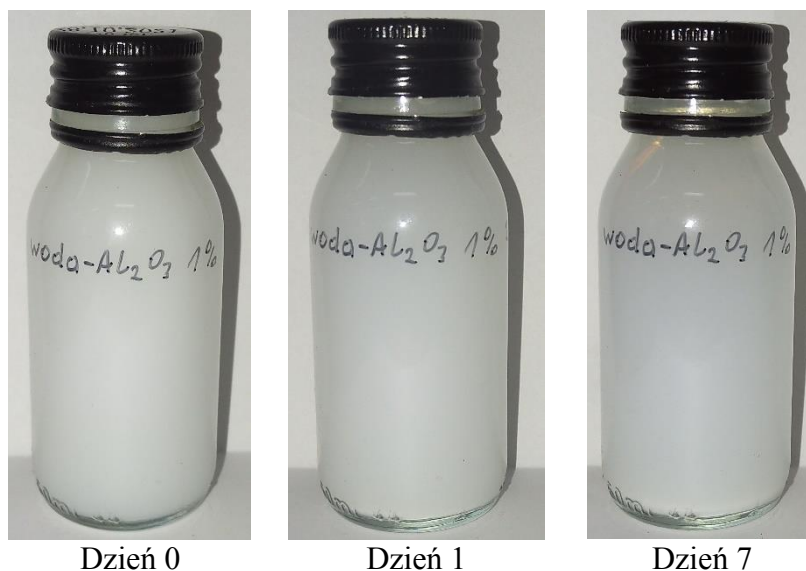
Wytworzone nanocieczy poddawane były badaniom eksperymentalnym od razu po wytworzeniu, co miało na celu uniknięcie ewentualnej sedymentacji nanocząstek. W celu określenia stabilności badanych nanocieczy użyto mętnościomierza laboratoryjnego AL250T-IR AQUALITYC. Urządzenie dokonuje pomiaru rozproszenia światła pod kątem 90°, przechodzącego przez próbkę badanej cieczy. Ponieważ zakres pomiaru mętnościomierza mieścił się w zakresie 0,01 – 1000 NTU (Nephelometric Turbidity Unit),

możliwe było zmierzenie mętności dla nanocieczy o koncentracji masowej 0,1% i 1%. Mętność nanocieczy o koncentracji 5% przekraczała zakres pomiarowy urządzenia. Pomiarów dokonywano codziennie w okresie jednego tygodnia. Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 6.6.



Rys. 6.6. Wyniki pomiarów mętności nanocieczy

Dodatkowo dokonywano bezpośredniej obserwacji próbek nanocieczy w okresie jednego tygodnia. Przykładowo na rys. 6.7 pokazano zdjęcia nanocieczy woda-Al₂O₃ o koncentracji nanocząstek 1% wykonane w dniu wytworzenia, następnego dnia oraz po tygodniu od wytworzenia. Zdjęcia pozostałych badanych nanocieczy przedstawiono w załączniku 2.



Rys. 6.7. Widok nanocieczy woda-Al₂O₃ o koncentracji masowej nanocząstek 1%

Zarówno wyniki pomiarów mętności jak i bezpośrednia obserwacja próbek nanocieczy wskazują, że po jednym dniu doszło do sedimentacji nanocząstek. Wyniki pomiarów mętności dla nanocieczy o koncentracji masowej 0,1% wykonanych na bazie wody i mieszaniny wody z glikolem etylenowym w proporcji objętościowej 90:10 i 80:20 wykazały niewielkie zmiany w okresie 7 dni. Dla koncentracji masowej 0,1% i cieczy bazowej woda/EG 60:40 (vol.) oraz wszystkich badanych nanocieczy o koncentracji 1% zaobserwowano znaczne zmiany w liczbie NTU określającej mętność cieczy. Z obserwacji wizualnej próbek można wywnioskować, że w każdej próbce doszło do częściowej sedimentacji nanocząstek co uwidaczniało się w zauważalnej zmianie koloru cieczy, rozwarstwieniach cieczy na wysokości próbki lub też pojawieniu się osadu na dnie próbki.

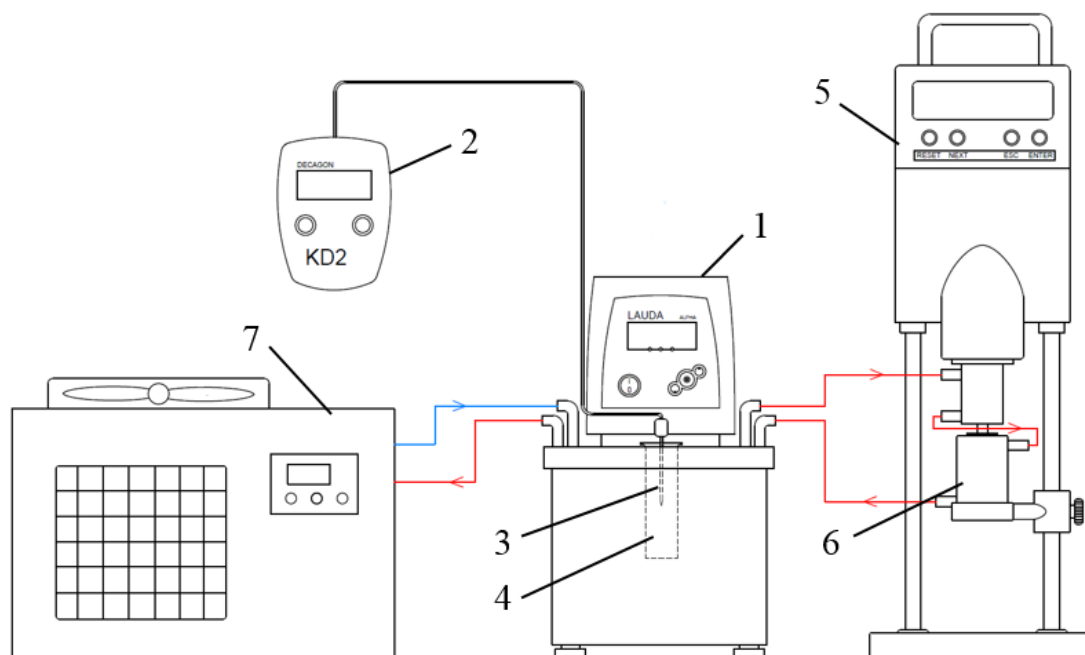
6.3 *Procedura pomiarowa*

Przed każdą serią pomiarową czyszczono rurkę grzejną z użyciem czyścika bawełnianego i wielokrotnym płukaniem bieżącą wodą. Następnie cały układ przepłukiwany był wodą destylowaną. Po opróżnieniu instalacji napełniano ją przygotowaną wcześniej nanocieczą. Po uruchomieniu pompy cyrkulacyjnej i ustawieniu jej obrotów na poziomie zapewniającym wymagany strumień badanej cieczy, włączano obieg wody chłodzącej oraz układ zasilania energią elektryczną. Parametry zasilania energią elektryczną ustawiano tak

aby uzyskać strumień ciepła równy $1000 \pm 50 \text{ W}$. Następnie regulowano strumień cieczy chłodzącej tak, aby utrzymać temperaturę badanej cieczy na wlocie do sekcji pomiarowej równą $25 \pm 0,1^\circ \text{C}$. Po uzyskaniu stanu ustalonego, czyli takiego w którym wskazania termometrów oporowych nie zmieniały się o więcej niż $\pm 0,01 \text{ K}$ w ciągu 15 minut, dokonywano odczytania i zapisania mierzonych wielkości. Po zapisaniu danych zmieniano nastawę pompy cyrkulacyjnej, a następnie powtarzano czynności dla następnego strumienia badanej cieczy.

6.4 Własności termofizyczne badanych nanociecz

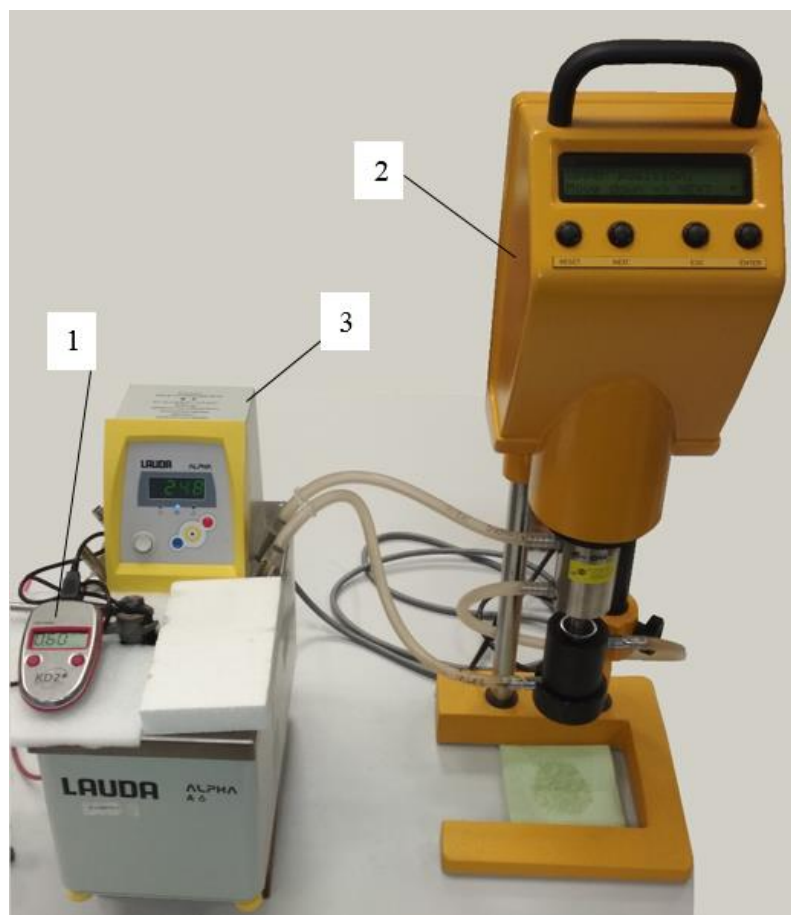
Na rys. 6.8 przedstawiono schemat stanowiska do badania własności termofizycznych nanociecz, natomiast na rys. 6.9 pokazano widok wykorzystanej aparatury pomiarowej.



Rys. 6.8. Schemat stanowiska do badania własności nanociecz

1 – termostat, 2 – miernik współczynnika przewodzenia ciepła, 3 – sonda pomiarowa, 4 – pojemnik na badaną cieczy, 5 – lepkościomierz, 6 – termostatowana komora lepkościomierza, 7 – urządzenie chłodnicze

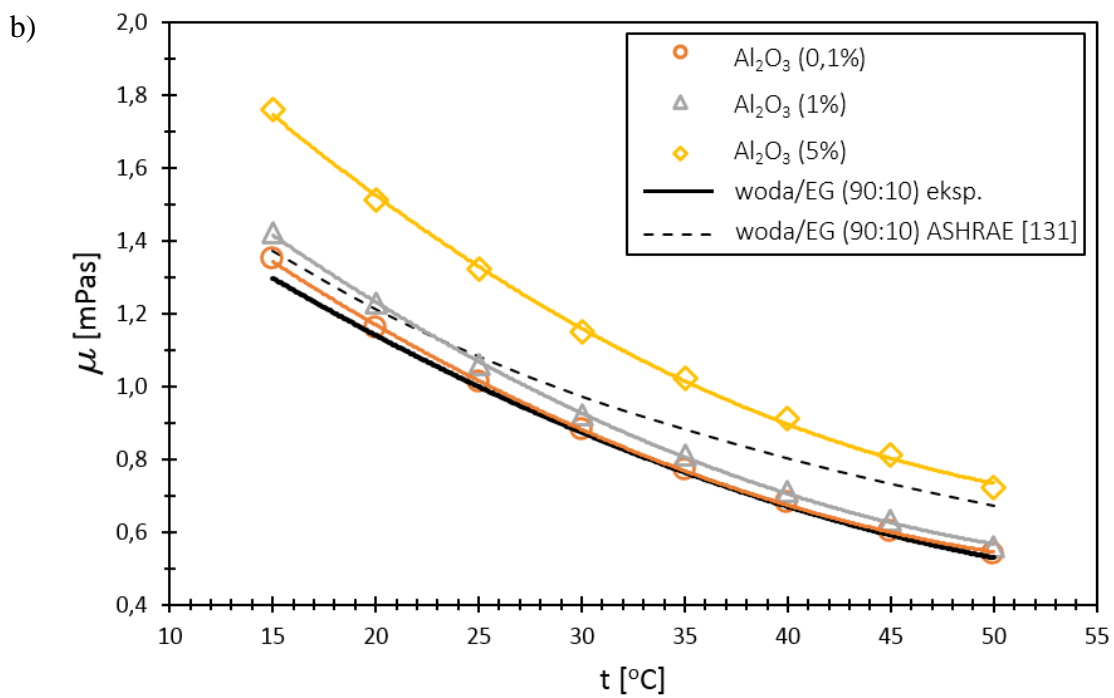
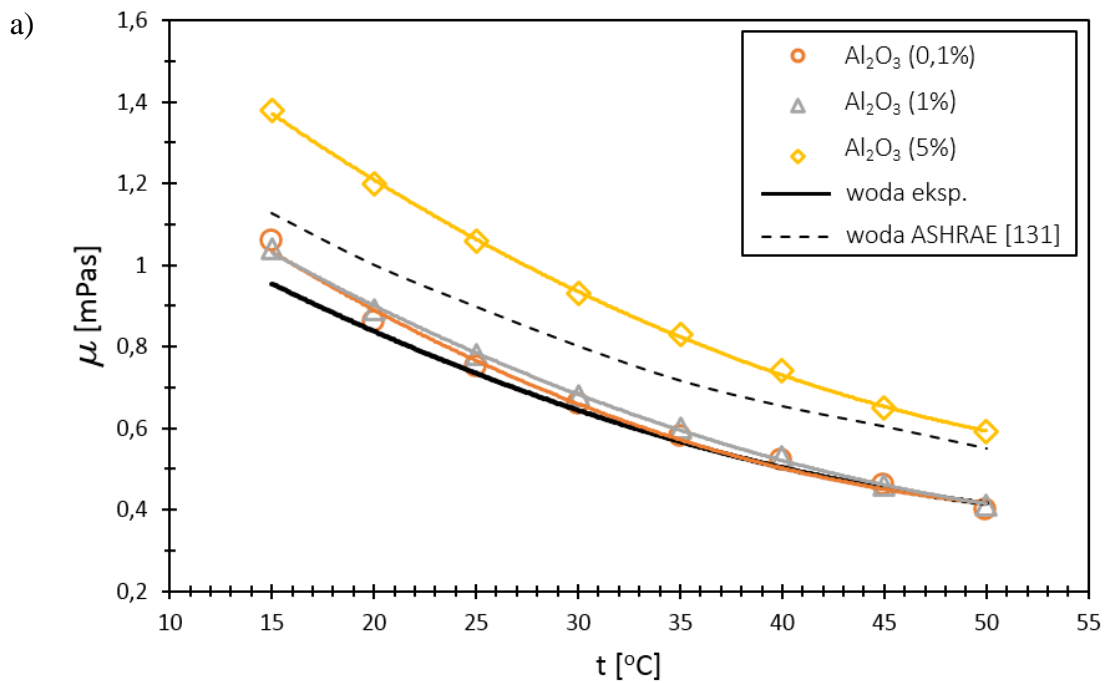


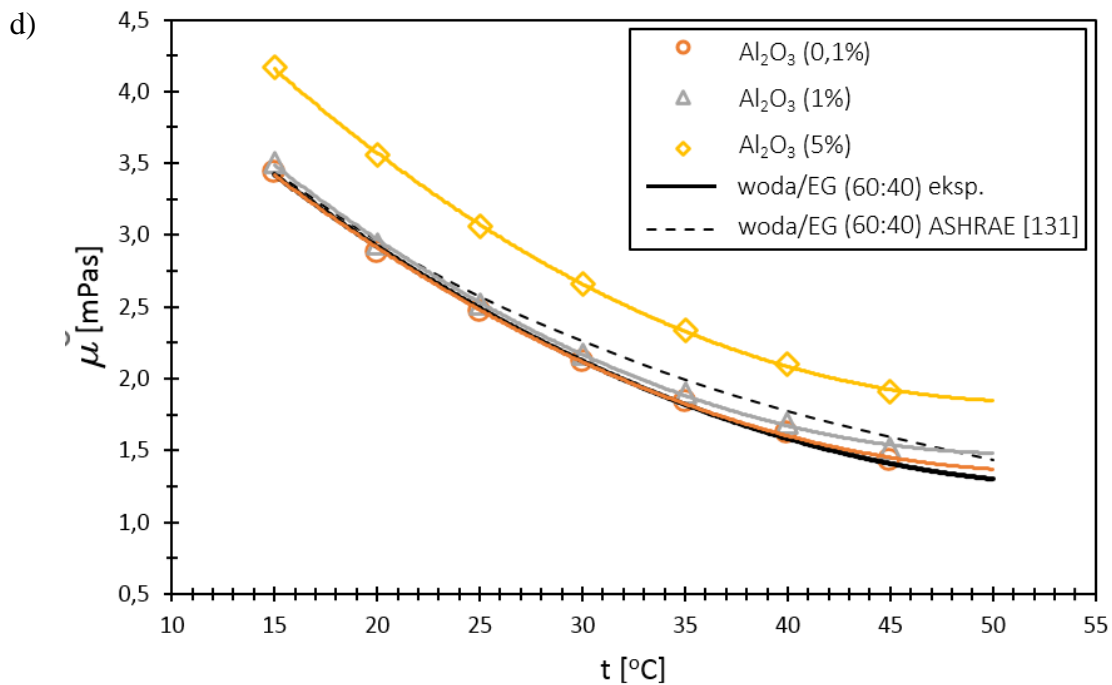
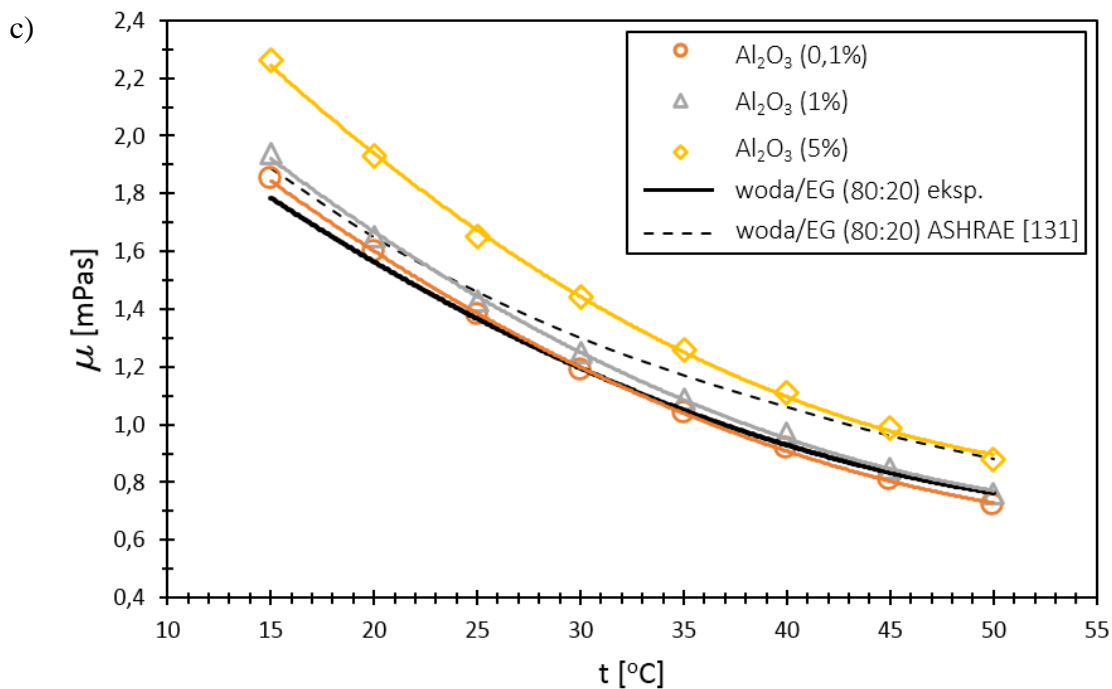


Rys. 6.9. Widok stanowiska do badania własności nanocieczy

1 – miernik współczynnika przewodzenia ciepła, 2 – lepkościomierz, 3 – termostat

Do pomiaru dynamicznego współczynnika lepkości nanocieczy wykorzystano lepkościomierz kapilarny RHEOTEST LK 2.2 MEDINGEN GmbH. Urządzenie to umożliwiało pomiar lepkości w zakresie od 0,6-10000 mPas przy zastosowaniu odpowiedniej kapilary pomiarowej. Termostatowana komora lepkościomierza o pojemności próbki 25 ml umożliwia wykonanie pomiarów w zakresie temperatur od -10°C do +80°C. Komora podłączona została do obiegu cieczy termostatu Alpha A6 LAUDA. Na rys. 6.10 zamieszczono wyniki pomiarów dynamicznego współczynnika lepkości badanych nanocieczy.





Rys. 6.10 Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy: a) woda- Al_2O_3 ; b) woda/EG (90:10)- Al_2O_3 ; c) woda/EG (80:20)- Al_2O_3 ; d) woda/EG (60:40)- Al_2O_3

Na podstawie otrzymanych wyników eksperymentalnych – stosując wielowymiarową analizę regresji, opracowano wzory do obliczania dynamicznego współczynnika lepkości badanych nanocieczy według ogólnej postaci:

$$\mu_{nf} = a e^{b \varphi_m} \mu_{bf} \quad (6.1)$$

W tab. 6.2 umieszczono wyznaczone stałe i wykładniki dla poszczególnych nanocieczy.

Tab. 6.2. Stałe i wykładniki do obliczania dynamicznego współczynnika lepkości nanocieczy

	a	b	Zakres
woda – Al ₂ O ₃	1,01	0,169	0,1% < φ_m < 5%
woda/EG (90:10) – Al ₂ O ₃	1,01	0,52	
woda/EG (80:20) – Al ₂ O ₃	1,022	0,36	
woda/EG (60:40) – Al ₂ O ₃	0,997	0,445	

Dynamiczny współczynnik lepkości cieczy bazowych μ_{bf} określano ze wzorów, które również powstały na podstawie pomiarów własnych:

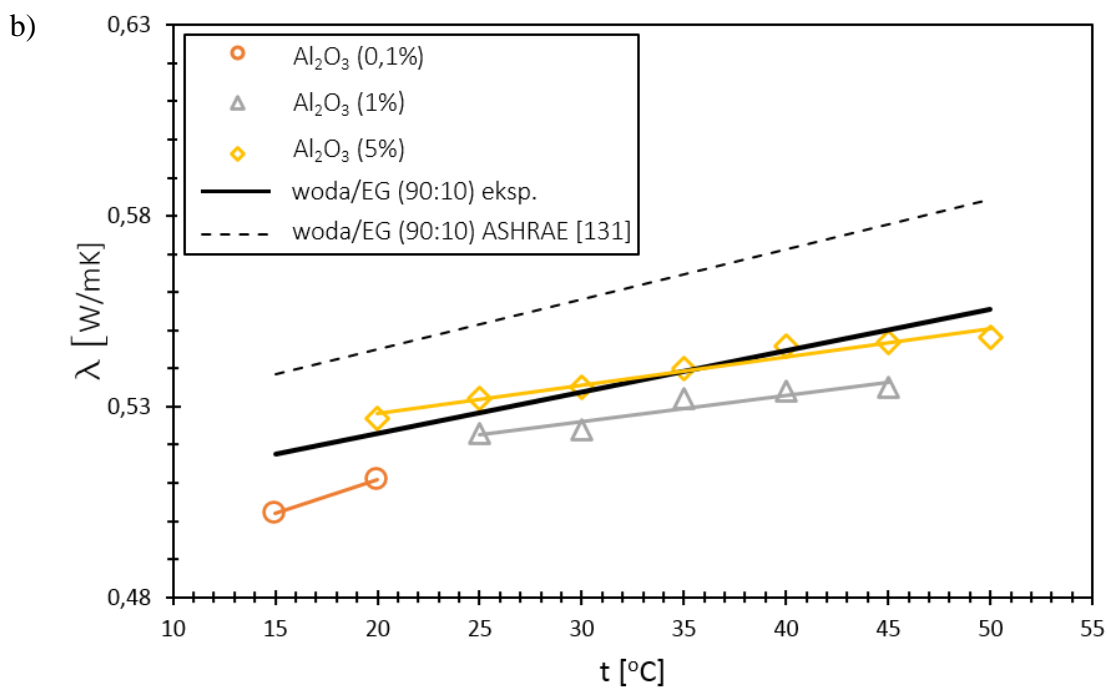
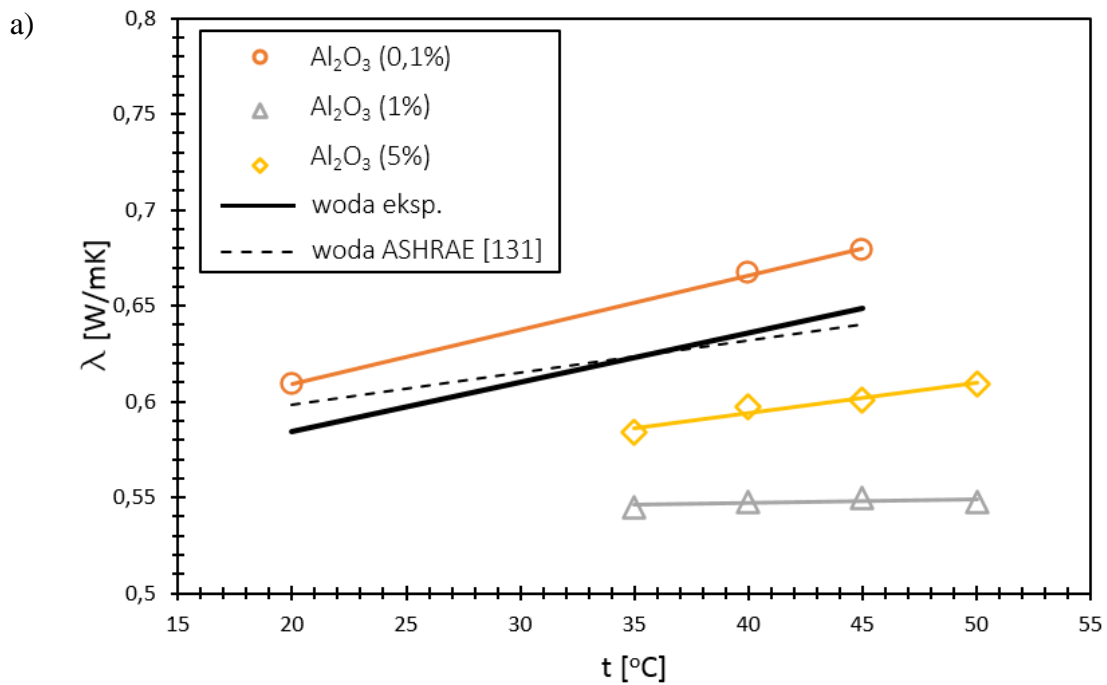
$$\mu_{woda} = 0,000264 \bar{T}_f^2 - 0,032583 \bar{T}_f + 1,383869 \quad (6.2)$$

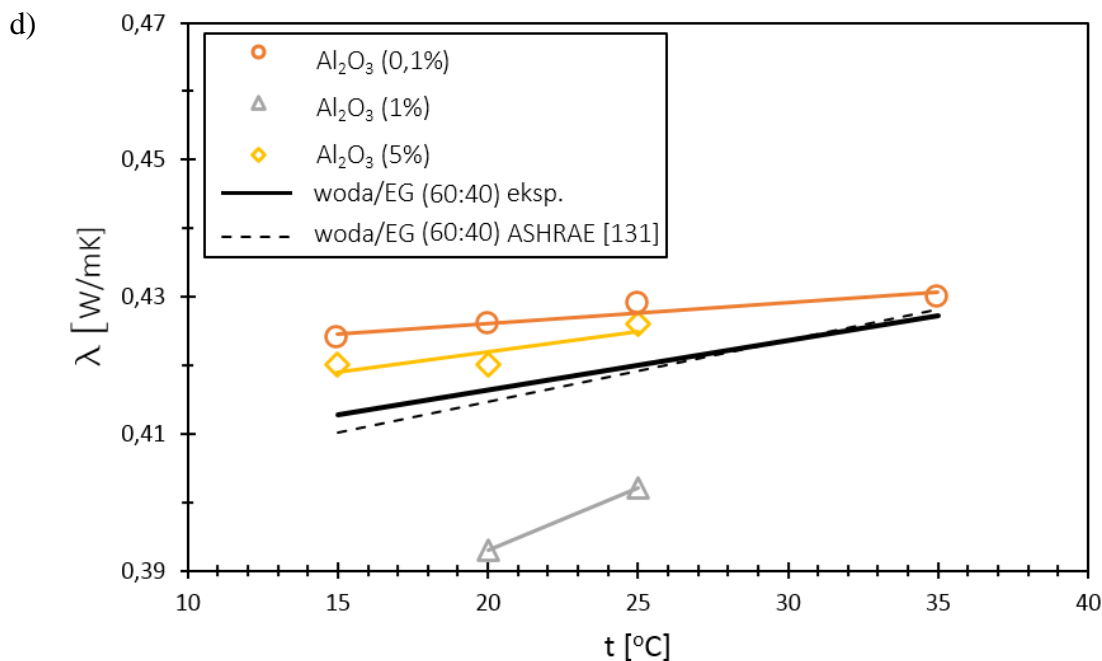
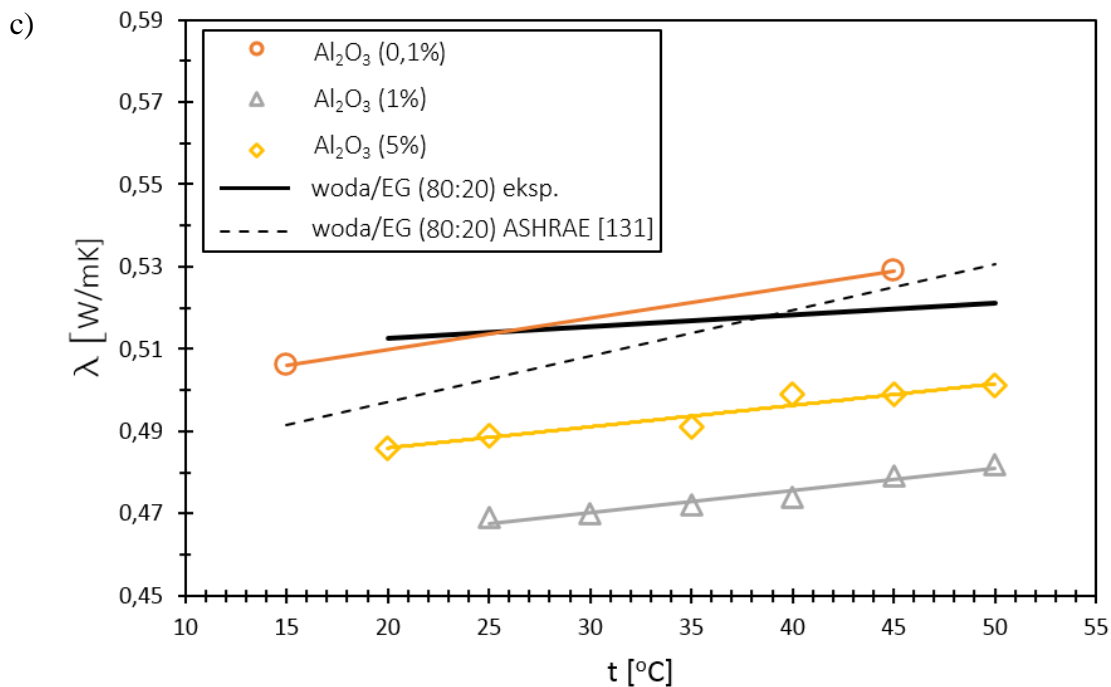
$$\mu_{woda/EG (90:10)} = 0,000314 \bar{T}_f^2 - 0,042381 \bar{T}_f + 1,861667 \quad (6.3)$$

$$\mu_{woda/EG (80:20)} = 0,000507 \bar{T}_f^2 - 0,062179 \bar{T}_f + 2,604821 \quad (6.4)$$

$$\mu_{woda/EG (60:40)} = 0,001292 \bar{T}_f^2 - 0,144508 \bar{T}_f + 5,295516 \quad (6.5)$$

W celu wyznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła użyto miernika KD2 Thermal Properties Analyzer DECAGON. Zakres pomiarowy urządzenia to 0,02 - 2 W/mK, w zakresie temperatur od -20°C do +60°C. Błąd pomiaru miernika wynosi $\pm 5\%$. Badana ciecz była umieszczana w szklanej probówce, która z kolei była zanurzana w wannie termostatu Alpha A6 LAUDA. Na rys. 6.11 zamieszczono wyniki pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła badanych nanocieczy.





Rys. 6.11 Współczynnik przewodzenia ciepła nanociecicy: a) woda- Al_2O_3 ; b) woda/EG (90:10)- Al_2O_3 ; c) woda/EG (80:20)- Al_2O_3 ; d) woda/EG (60:40)- Al_2O_3



Stosując wielowymiarową analizę regresji opracowano wzory do obliczania współczynnika przewodzenia ciepła badanych nanocieczy o ogólnej postaci:

$$\lambda_{nf} = a e^{b \varphi_m} \lambda_{bf} \quad (6.6)$$

W tab. 6.3 zamieszczono stałe i wykładniki dla poszczególnych nanocieczy.

Tab. 6.3. Stałe i wykładniki do obliczania współczynnika przewodzenia ciepła nanocieczy

	a	b	Zakres
woda – Al ₂ O ₃	0,96	-0,097	0,1% < φ_m < 5%
woda/EG (90:10) – Al ₂ O ₃	0,99	0,062	
woda/EG (80:20) – Al ₂ O ₃	0,98	-0,054	
woda/EG (60:40) – Al ₂ O ₃	0,97	-0,056	

Współczynnik przewodzenia ciepła cieczy bazowych λ_{bf} określano ze wzorów, które utworzono na podstawie pomiarów własnych:

$$\lambda_{woda} = 0,002571 \bar{T}_f + 0,53275 \quad (6.7)$$

$$\lambda_{woda/EG (90:10)} = 0,001088 \bar{T}_f + 0,501262 \quad (6.8)$$

$$\lambda_{woda/EG (80:20)} = 0,000285 \bar{T}_f + 0,507038 \quad (6.9)$$

$$\lambda_{woda/EG (60:40)} = 0,00072 \bar{T}_f + 0,402 \quad (6.10)$$

6.5 Opracowanie wyników pomiarów

Gęstość strumienia ciepła

Gęstość strumienia ciepła wyznaczano ze wzoru:

$$\dot{q} = \frac{P - \dot{Q}_{str}}{A_i} \approx \frac{U I}{\pi d_i L} \quad (6.11)$$

gdzie: U [V] – spadek napięcia na rurce,

I [A] – natężenie prądu,

d_i [m] – średnica wewnętrzna rurki,

L [m] – długość czynna rurki.

Oszacowane straty do otoczenia \dot{Q}_{str} były pomijalnie małe w stosunku do dostarczanej mocy elektrycznej i zostały pominięte w obliczeniach \dot{q} .

Średni współczynnik przejmowania ciepła

Średni współczynnik przejmowania ciepła obliczano ze wzoru:

$$\bar{\alpha} = \frac{\dot{q}}{(\bar{T}_w - \bar{T}_f)} \quad (6.12)$$

gdzie: \bar{T}_f [°C] – średnia temperatura cieczy obliczana jako średnia arytmetyczna

temperatury cieczy na wlocie i wylocie z sekcji pomiarowej:

$$\bar{T}_f = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (6.13)$$

\bar{T}_w [°C] – średnia temperatura wewnętrznej powierzchni rurki obliczana ze wzoru

[132]:

$$\bar{T}_w = \bar{T}_o + \frac{U I}{4 \pi \lambda_t L} \left[\frac{2 \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right)}{\left(\frac{d_o^2}{d_i^2} \right) - 1} - 1 \right] \quad (6.14)$$

gdzie: \bar{T}_o [°C] – średnia temperatura zewnętrznej powierzchni rurki obliczana jako średnia arytmetyczna z pomiarów temperatury na zewnętrznej powierzchni rurki w sześciu miejscach wzdłuż długości rurki:

$$\bar{T}_o = \frac{\sum_{j=1}^{j=6} T_{oj}}{6} \quad (6.15)$$

gdzie: T_{oj} [°C] – lokalna temperatura zewnętrznej powierzchni rurki,
 λ_t [W/(mK)] – współczynnik przewodzenia ciepła materiału rurki,
 d_o [m] – średnica zewnętrzna rurki.

Średnia liczba Nusselta

Średnia liczba Nusselta wyznaczona została jako:

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{\alpha} d_i}{\lambda} \quad (6.16)$$

Do obliczania współczynnika przewodzenia ciepła cieczy bazowych wykorzystywano wzory (6.7) do (6.10), natomiast dla nanocieczy stosowano wzór (6.6).

Liczba Reynoldsa

Liczba Reynoldsa była obliczana ze wzoru:

$$Re = \frac{\bar{u} d_i}{\nu} \quad (6.17)$$

gdzie: \bar{u} [m/s] – średnia prędkość cieczy obliczana ze wzoru:

$$\bar{u} = \frac{\dot{V}}{A_{cs}} = \frac{4\dot{V}}{\pi d_i^2} \quad (6.18)$$

gdzie: \dot{V} [m³/s] – strumień objętościowy cieczy,

ν [m²/s] – kinematyczny współczynnik lepkości obliczany ze wzoru:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (6.19)$$

gdzie: μ [Pas] – dynamiczny współczynnik lepkości obliczany dla cieczy bazowych ze wzorów (6.2) do (6.5), natomiast dla nanocieczy ze wzoru (6.1),

ρ [kg/m³] – gęstość, która dla cieczy bazowych obliczana była ze wzorów opracowanych na podstawie [131]:

$$\rho_{woda} = -0,004333 \bar{T}_f^2 - 0,034048 \bar{T}_f + 1000,477381 \quad (6.20)$$

$$\rho_{woda/EG (90:10)} = -0,002436 \bar{T}_f^2 - 0,220512 \bar{T}_f + 1018,725298 \quad (6.21)$$

$$\rho_{woda/EG (80:20)} = -0,002431 \bar{T}_f^2 - 0,248631 \bar{T}_f + 1035,666012 \quad (6.22)$$

$$\rho_{woda/EG (60:40)} = -0,002436 \bar{T}_f^2 - 0,307179 \bar{T}_f + 1066,801964 \quad (6.23)$$

natomiast dla nanocieczy była obliczana ze wzoru (3.21).

Gęstość nanocząstek ρ_p przyjęto na podstawie [86] – zał. 1, natomiast koncentrację objętościową nanocząstek występującą we wzorze (3.21) obliczano ze wzoru [85]:

$$\varphi_v = \frac{1}{\left(\frac{1 - \varphi_m}{\varphi_m}\right) \frac{\rho_p}{\rho_{bf}} + 1} \quad (6.24)$$

Ciepło właściwe nanociecicy wyznaczano ze wzoru (3.22), a potrzebne do obliczeń ciepła właściwe cieczy bazowych $c_{p\ bf}$ obliczano ze wzorów opracowanych na podstawie [131]:

$$c_{p\ woda} = 0,011429 \bar{T}_f^2 - 0,952381 \bar{T}_f + 4222,380952 \quad (6.25)$$

$$c_{p\ woda/EG\ (90:10)} = 0,000714 \bar{T}_f^2 + 1,782143 \bar{T}_f + 3936,553571 \quad (6.26)$$

$$c_{p\ woda/EG\ (80:20)} = 2,304762 \bar{T}_f + 3768,595238 \quad (6.27)$$

$$c_{p\ woda/EG\ (60:40)} = 3,361905 \bar{T}_f + 3400,738095 \quad (6.28)$$

Występujące we wzorze (3.22) ciepło właściwe nanocząstek $c_{p\ p}$ przyjęto na podstawie [86] – zał. 1.

Współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej

Współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej był obliczany ze wzoru:

$$\xi = \frac{\overline{Nu}_{nf} / \overline{Nu}_{bf}}{\Delta P_{nf} / \Delta P_{bf}} \quad (6.29)$$

gdzie: \overline{Nu}_{nf} [-] – średnia liczba Nusselta dla nanociecicy,

\overline{Nu}_{bf} [-] – średnia liczba Nusselta dla cieczy bazowej,

ΔP_{nf} [Pa] – zmierzony spadek ciśnienia dla nanociecicy,

ΔP_{bf} [Pa] – zmierzony spadek ciśnienia dla cieczy bazowej.

6.6 Oszacowanie niedokładności wyników pomiarów

Mając na uwadze wzór (6.11) średni bezwzględny błąd kwadratowy pomiaru gęstości strumienia ciepła $\Delta\dot{q}$ oraz maksymalny błąd pomiaru gęstości strumienia ciepła $\Delta\dot{q}_{max}$ wyrażają się zależnościami:

$$\Delta\dot{q} = \sqrt{\left(\frac{\partial\dot{q}}{\partial U}\Delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial\dot{q}}{\partial I}\Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial\dot{q}}{\partial d_i}\Delta d_i\right)^2 + \left(\frac{\partial\dot{q}}{\partial L}\Delta L\right)^2} \quad (6.30)$$

$$\Delta\dot{q}_{max} = \left|\frac{\partial\dot{q}}{\partial U}\Delta U\right| + \left|\frac{\partial\dot{q}}{\partial I}\Delta I\right| + \left|\frac{\partial\dot{q}}{\partial d_i}\Delta d_i\right| + \left|\frac{\partial\dot{q}}{\partial L}\Delta L\right| \quad (6.31)$$

Pochodne cząstkowe wynoszą:

$$\frac{\partial\dot{q}}{\partial U} = \frac{I}{\pi d_i L} \quad (6.32)$$

$$\frac{\partial\dot{q}}{\partial I} = \frac{U}{\pi d_i L} \quad (6.33)$$

$$\frac{\partial\dot{q}}{\partial d_i} = -\frac{U I}{\pi d_i^2 L} \quad (6.34)$$

$$\frac{\partial\dot{q}}{\partial L} = -\frac{U I}{\pi d_i L^2} \quad (6.35)$$

Bezwzględny błąd pomiaru spadku napięcia wynosi $\Delta U = \pm 1,5\% \text{ ww} + 2A$ (gdzie „ww” oznacza wartość wskazywaną). Bezwzględny błąd pomiaru natężenia prądu wynosi $\Delta I = \pm 0,8\% \text{ ww} + 80c$ (gdzie „ww” oznacza wartość wskazywaną, a „c” oznacza liczbę cyfr najmniej znaczących). Błąd bezwzględny wyznaczenia średnicy wewnętrznej rurki wynosi $\Delta d_i = 0,02 \text{ mm}$, a błąd bezwzględny określenia długości czynnej rurki wynosi $\Delta L = 5 \text{ mm}$.

Średni względny błąd wyznaczenia gęstości strumienia ciepła wynosi:

$$\frac{\Delta\dot{q}}{\dot{q}} = \pm 3,58\% \quad (6.36)$$

Natomiast maksymalny względny błąd wyznaczenia gęstości strumienia ciepła wynosi:

$$\frac{\Delta \dot{q}_{max}}{\dot{q}} = \pm 5,43\% \quad (6.37)$$

Biorąc pod uwagę wzór (6.12) średni bezwzględny błąd kwadratowy pomiaru średniego współczynnika przejmowania ciepła $\Delta \bar{\alpha}$ oraz maksymalny błąd pomiaru średniego współczynnika przejmowania ciepła $\Delta \bar{\alpha}_{max}$ wyznaczono ze wzorów:

$$\Delta \bar{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \dot{q}} \Delta \dot{q}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \Delta T} \delta \Delta T\right)^2} \quad (6.38)$$

$$\Delta \bar{\alpha}_{max} = \left| \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \dot{q}} \Delta \dot{q} \right| + \left| \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \Delta T} \delta \Delta T \right| \quad (6.39)$$

Pochodne cząstkowe wynoszą:

$$\frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \dot{q}} = \frac{1}{\Delta T} \quad (6.40)$$

$$\frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \Delta T} = -\frac{\dot{q}}{\Delta T^2} \quad (6.41)$$

Bezwzględny błąd pomiaru temperatury za pomocą czujników rezystancyjnych Pt100 klasy A wynosi $\delta \Delta T = (\pm 0,1 + 0,0017 \cdot |t|)K$, stąd średni względny błąd wyznaczenia średniego współczynnika przejmowania ciepła wynosi:

$$\frac{\Delta \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} = \pm 0,29\% \quad (6.42)$$

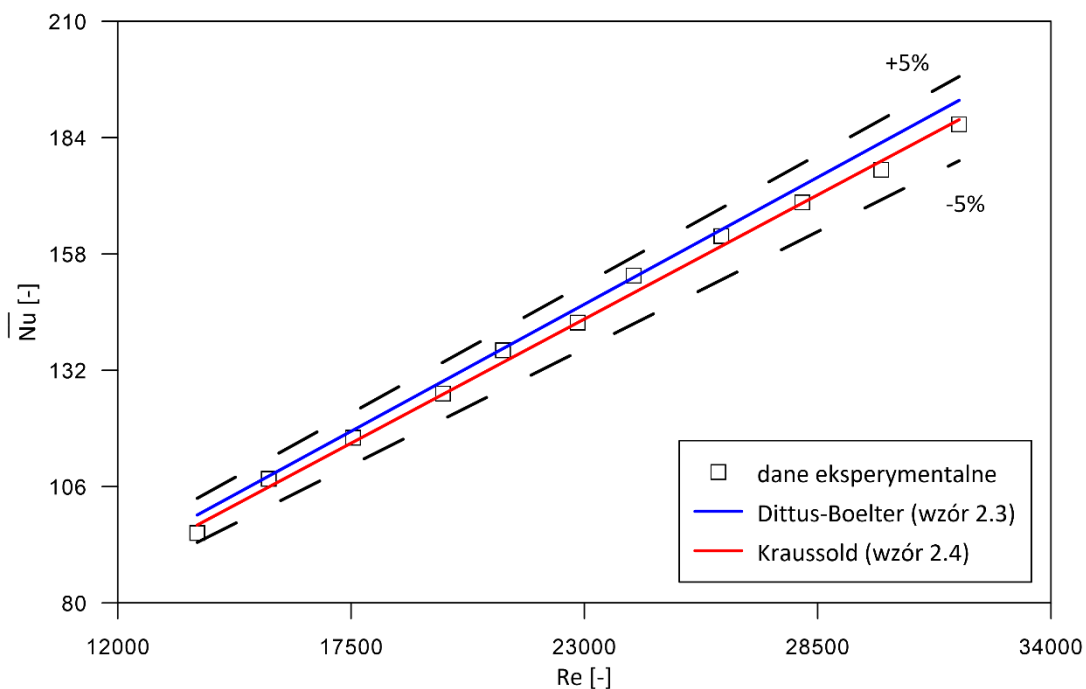
Maksymalny względny błąd wyznaczenia średniego współczynnika przejmowania ciepła jest równy:

$$\frac{\Delta \bar{\alpha}_{max}}{\bar{\alpha}_{max}} = \pm 1,13\% \quad (6.43)$$

7. Wyniki badań eksperymentalnych nanocieczki w warunkach konwekcji wymuszonej

7.1 Wyniki wzorcowania

Na rys. 7.1 przedstawiono porównanie średniej liczby Nusselta od liczby Reynoldsa dla wody destylowanej wyznaczonej eksperymentalnie i obliczonej z korelacji Dittusa-Boeltera (wzór 2.3) oraz Kraussolda (wzór 2.4). Obie korelacje odwzorowują wyniki badań eksperymentalnych w przedziale $\pm 5\%$ w całym zakresie liczby Reynoldsa, co może świadczyć o właściwym doborze aparatury pomiarowej oraz o poprawności zastosowanej procedury pomiarowej i pozwalać na wnioskowanie o wpływie nanocząstek na przejmowanie ciepła w warunkach przepływu turbulentnego.

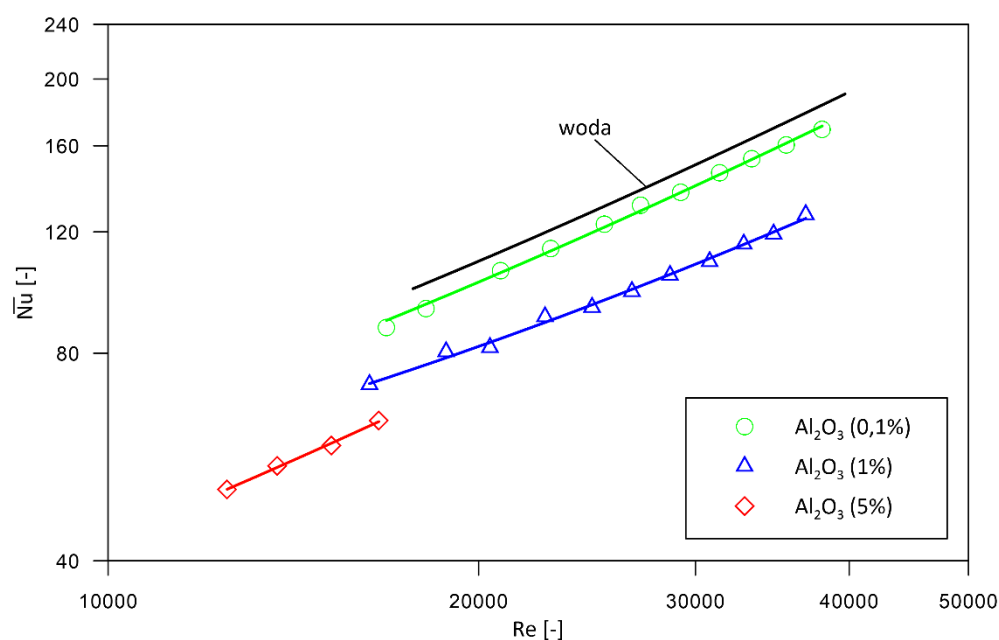


Rys. 7.1. Wyniki wzorcowania dla wody destylowanej



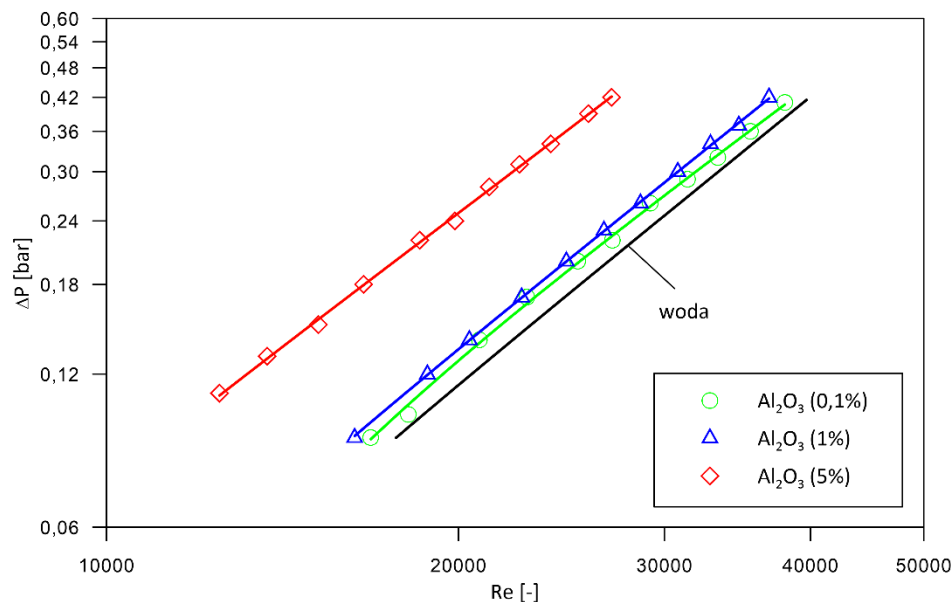
7.2 Wyniki badań cieplno-hydraulicznych

Na rys. 7.2 przedstawiono zależność średniej liczby Nusselta od liczby Reynoldsa dla nanocieczy na bazie wody z dodatkiem nanocząstek Al_2O_3 . Otrzymane wyniki pokazały pogorszenie przyjmowania ciepła po dodaniu nanocząstek, tym wyższe im wyższa była koncentracja nanocząstek. Niższe wartości średniej liczby Nusselta dla nanocieczy mogą wynikać z osadzania się nanocząstek na wewnętrznej powierzchni rurki co prowadzi do powstawania dodatkowego oporu cieplnego wytworzonego przez warstwę nanocząstek. Podobny wpływ nanocząstek na przyjmowanie ciepła zaobserwowano w [133].



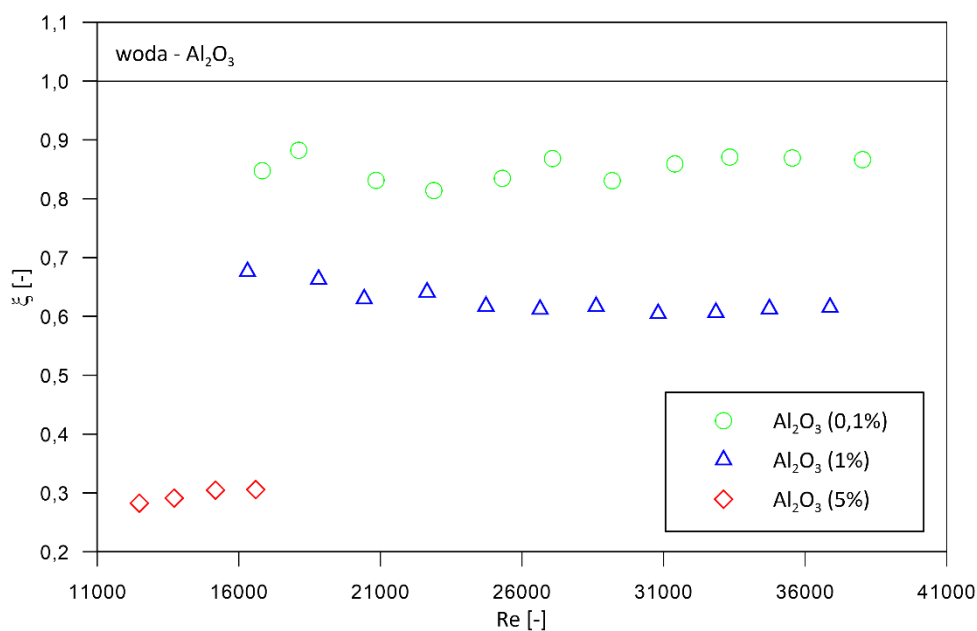
Rys. 7.2. Zależność \overline{Nu} – Re dla nanocieczy woda- Al_2O_3

Rys. 7.3 przedstawia zależność spadku ciśnienia od liczby Reynoldsa dla nanocieczy na bazie wody z dodatkiem nanocząstek Al_2O_3 . Opory przepływu wzrastają wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek, co wynika ze wzrostu lepkości nanocieczy woda- Al_2O_3 (rys. 6.10 a).



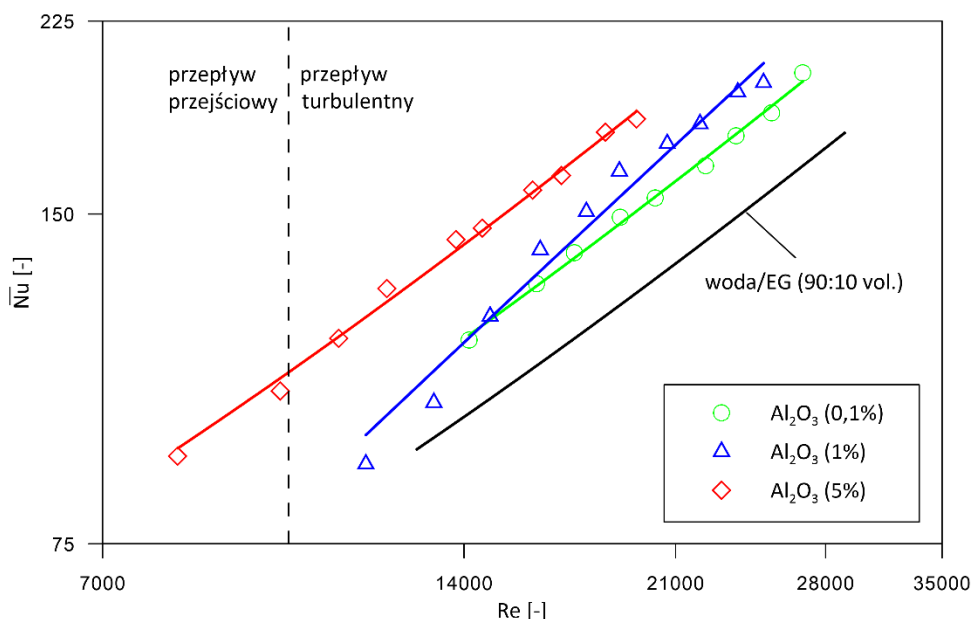
Rys. 7.3. Opory przepływu dla nanocieczki woda- Al_2O_3

Na rys. 7.4 przedstawiono współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej dla nanocieczki woda- Al_2O_3 obliczony ze wzoru (6.29). Niezależnie od koncentracji nanocząstek i liczby Reynoldsa wartości współczynnika intensyfikacji cieplno-hydraulicznej są mniejsze od jedności, co oznacza, że przyrost spadku ciśnienia jest w każdym badanym przypadku większy niż przyrost średniej liczby Nusselta.



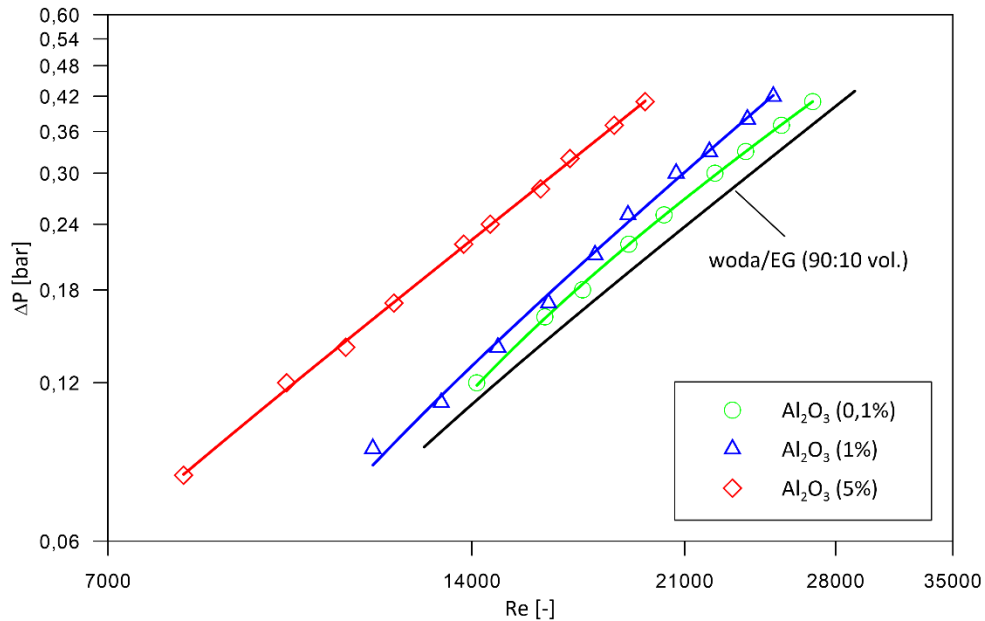
Rys. 7.4. Współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej dla nanocieczki woda- Al_2O_3

Na rys. 7.5 przedstawiono zależność średniej liczby Nusselta od liczby Reynoldsa dla dla nanociecicy na bazie mieszaniny wody z glikolem etylenowym w proporcji objętościowej 90:10. Zaobserwowano wzrost średniej liczby Nusselta, tym większy im większa była koncentracja nanocząstek. Średnia liczba Nusselta jest złożoną funkcją własności termofizycznych cieczy, geometrii układu (tu: d_i) i prędkości cieczy (tu: \bar{u}). Z kolei własności termofizyczne nanociecicy są złożoną funkcją temperatury, koncentracji nanocząstek i ich geometrii. Największy wpływ na średnią liczbę Nusselta dla nanociecicy ma współczynnik przewodzenia ciepła i lepkość, przy czym nie można jednoznacznie ustalić, który z tych parametrów jest istotniejszy. Stąd końcowa wartość średniej liczby Nusselta jest wypadkową wielu czynników i trudno jest wskazać, który z nich miał decydujący wpływ na intensywność przejmowania ciepła.



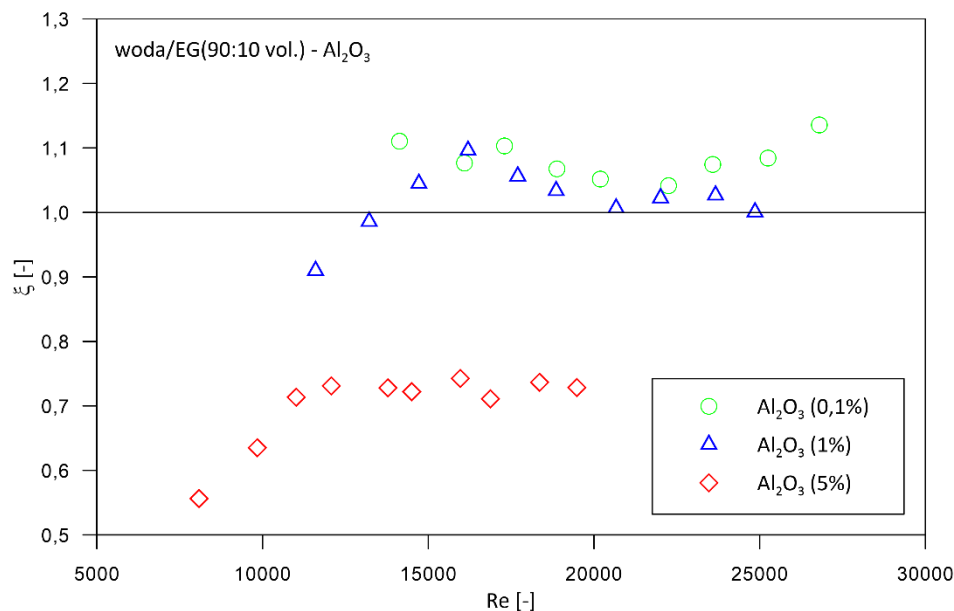
Rys. 7.5. Zależność \bar{Nu} – Re dla nanociecicy woda/EG(90:10 vol.)-Al₂O₃

Na rys. 7.6 przedstawiono zależność spadku ciśnienia od liczby Reynoldsa dla nanociecicy na bazie mieszaniny wody z glikolem etylenowym w proporcji objętościowej 90:10. Po dodaniu nanocząstek opory przepływu wzrosły, największy wzrost zanotowano dla najwyższej koncentracji, co można tłumaczyć znacznym wzrostem lepkości nanociecicy (rys. 6.10 b).



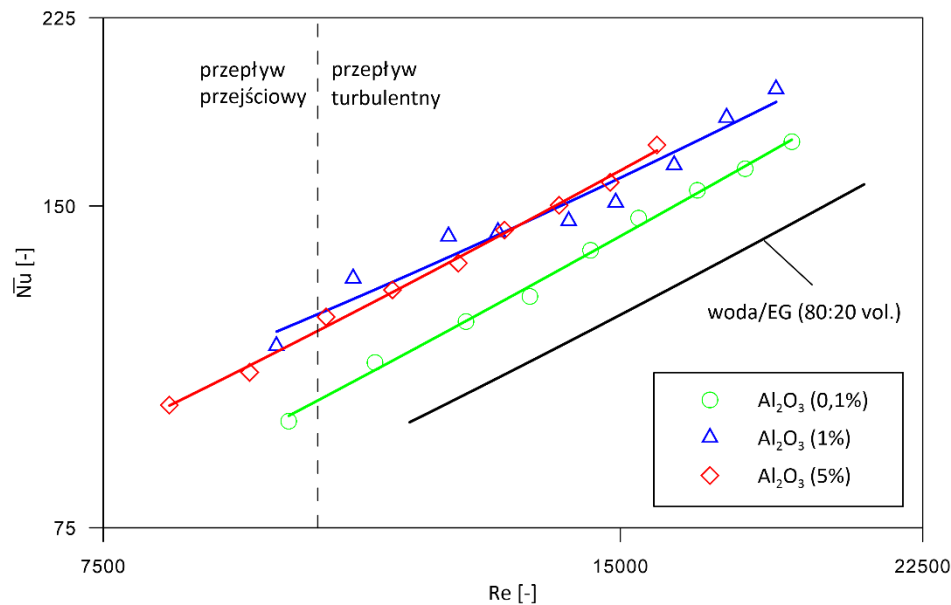
Rys. 7.6. Opory przepływu dla nanocieczy woda/EG(90:10 vol.)-Al₂O₃

Na rys. 7.7 przedstawiono współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej dla nanocieczy na bazie mieszaniny wody z glikolem etylenowym w proporcji objętościowej 90:10 obliczony ze wzoru (6.29). Jak wynika z rys. 7.7 dla $Re > 12000$ i koncentracji 0,1% i 1% wartość współczynnika intensyfikacji cieplno-hydraulicznej jest powyżej 1, co świadczy o większym przyroście średniej liczby Nusselta niż oporów przepływu. Jedynie dla koncentracji masowej 5% wartość współczynnika ξ jest poniżej 1 co wskazuje na dużo wyższy wzrost oporów przepływu niż przyrost średniej liczby Nusselta.



Rys. 7.7. Współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej dla nanocieczy woda/EG(90:10 vol.)-Al₂O₃

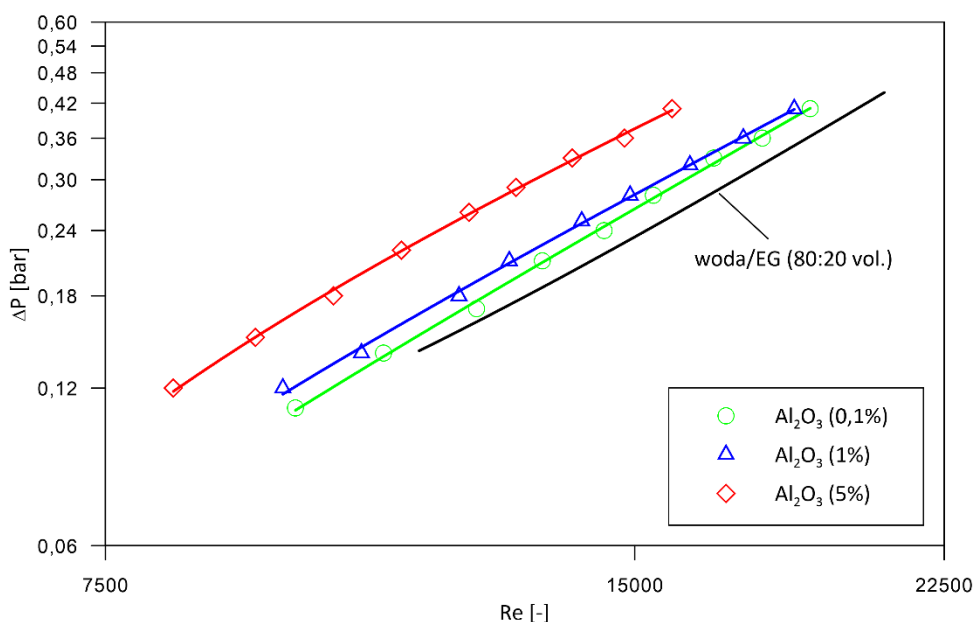
Na rys. 7.8 przedstawiono zależność średniej liczby Nusselta od liczby Reynoldsa dla nanocieczy na bazie mieszaniny wody z glikolem etylenowym w proporcji objętościowej 80:20. Zaobserwowano wzrost średniej liczby Nusselta, tym większy im większa była koncentracja nanocząstek, przy czym dla koncentracji 5% średnia liczba Nusselta była zbliżona do tej dla koncentracji 1%.



Rys. 7.8. Zależność \overline{Nu} – Re dla nanocieczy woda/EG(80:20 vol.)-Al₂O₃

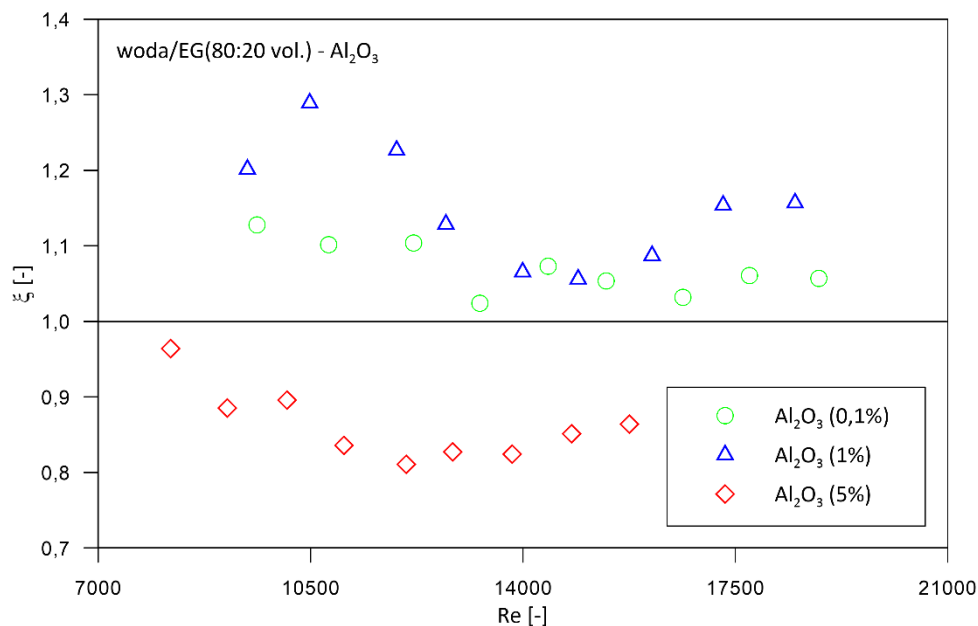


Na rys. 7.9 przedstawiono zależność spadku ciśnienia od liczby Reynoldsa dla nanocieczy na bazie mieszaniny wody z glikolem etylenowym w proporcji objętościowej 80:20. Po dodaniu nanocząstek opory przepływu wzrosły, największy wzrost zanotowano dla najwyższej koncentracji, co wiąże się ze wzrostem lepkości (rys. 6.10 c).



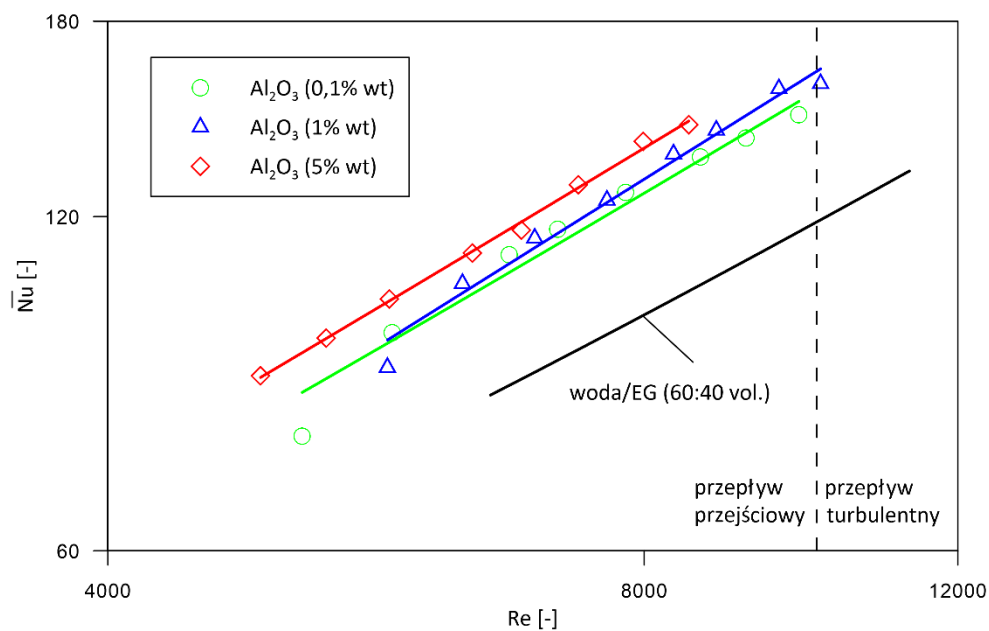
Rys. 7.9. Opory przepływu dla nanocieczy woda/EG(80:20 vol.)- Al_2O_3

Na rys. 7.10 przedstawiono współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej dla nanocieczy na bazie mieszaniny wody z glikolem etylenowym w proporcji objętościowej 80:20 obliczony ze wzoru (6.29). Dla koncentracji nanocząstek 0,1% i 1% otrzymane współczynniki są powyżej jedności, przy czym maksimum zanotowano w obu przypadkach dla liczby $Re \approx 10500$.



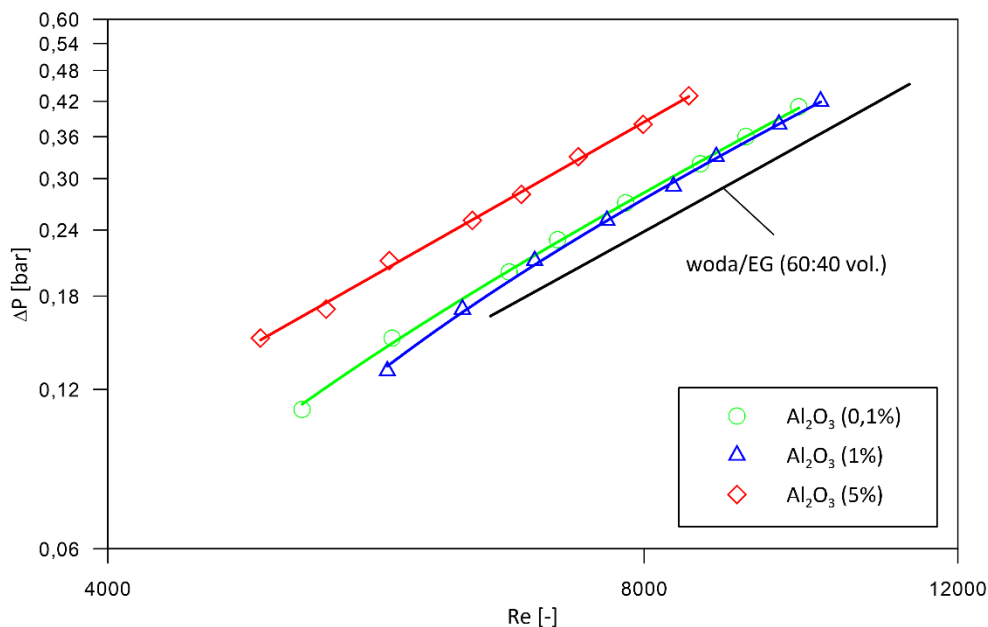
Rys. 7.10. Współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej dla nanocieczy woda/EG(80:20 vol.)-Al₂O₃

Na rys. 7.11 przedstawiono zależność średniej liczby Nusselta od liczby Reynoldsa dla nanocieczy na bazie mieszaniny wody z glikolem etylenowym w proporcji objętościowej 60:40. Zaobserwowano wzrost średniej liczby Nusselta, wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek.



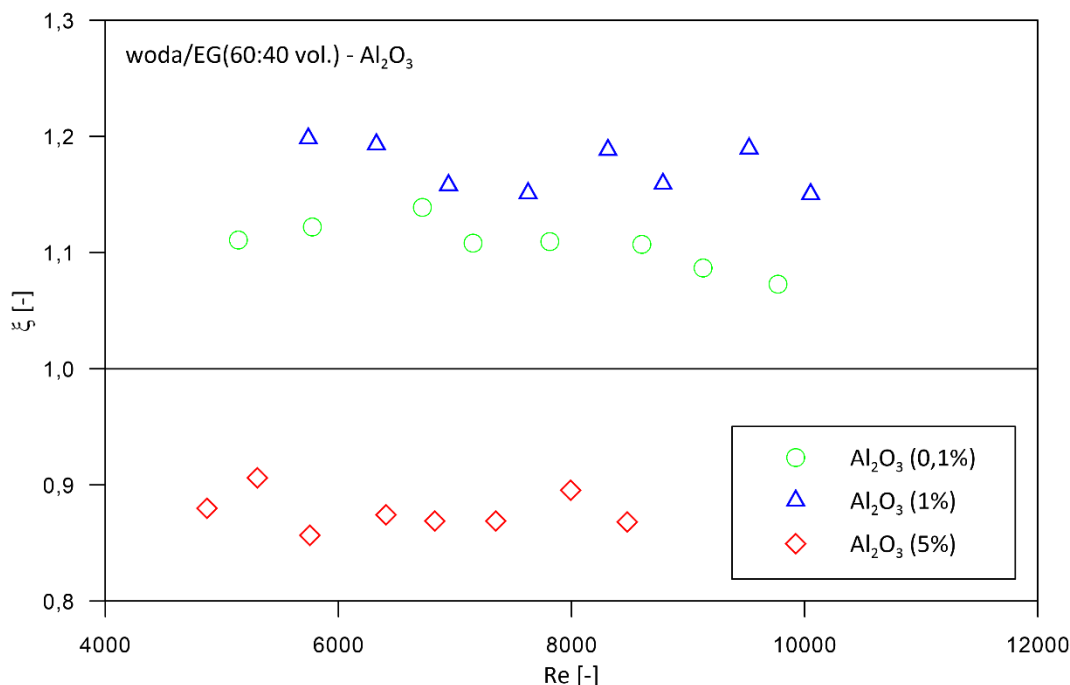
Rys. 7.11. Zależność \overline{Nu} – Re dla nanocieczy woda/EG(60:40 vol.)-Al₂O₃

Na rys. 7.12 przedstawiono zależność spadku ciśnienia od liczby Reynoldsa dla nanociecicy na bazie mieszaniny wody z glikolem etylenowym w proporcji objętościowej 60:40. Dodanie nanocząstek spowodowało wzrost oporów przepływu, co wiąże się ze wzrostem lepkości (rys. 6.10 d).



Rys. 7.12. Opory przepływu dla nanociecicy woda/EG(60:40 vol.)- Al_2O_3

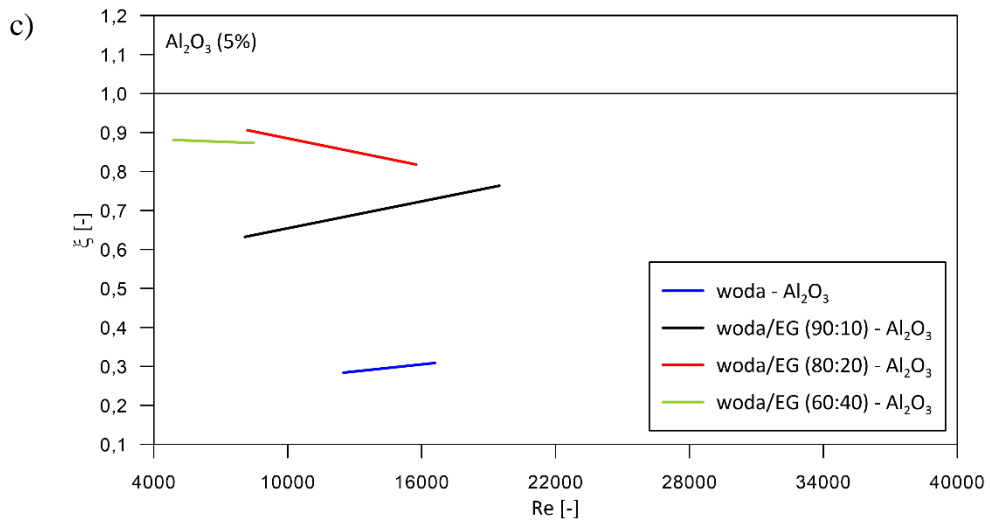
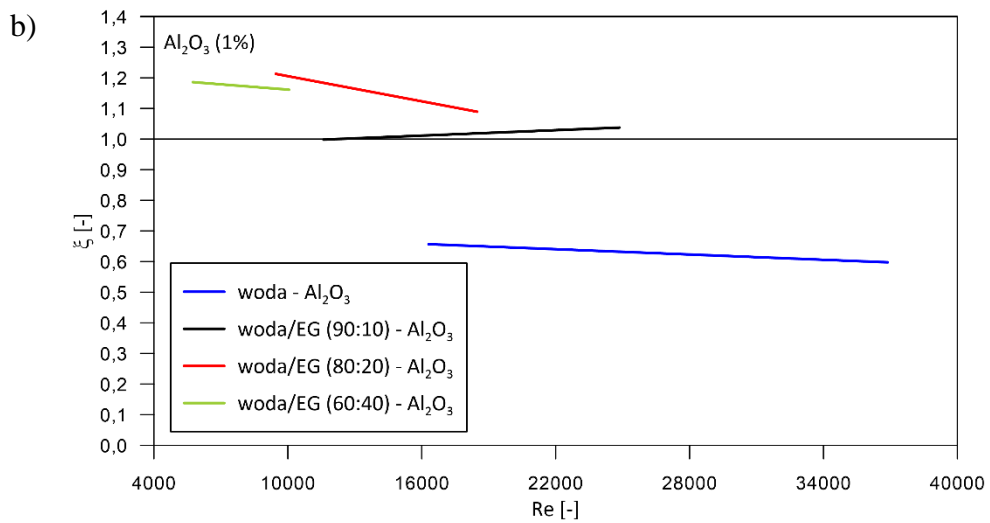
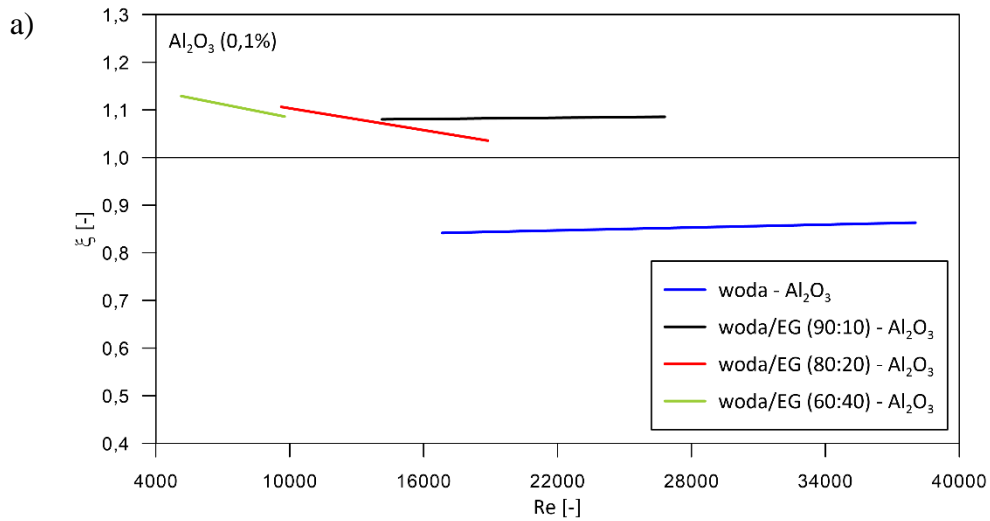
Na rys. 7.13 przedstawiono współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej dla nanociecicy na bazie mieszaniny wody z glikolem etylenowym w proporcji objętościowej 60:40 obliczony ze wzoru (6.29). Dla koncentracji 0,1 i 1% otrzymane współczynniki są powyżej jedności, przy czym wartość współczynnika minimalnie spada wraz ze wzrostem liczby Re . Podobnie jak dla nanociecicy woda/EG (90:10) – Al_2O_3 i woda/EG (80:20) – Al_2O_3 również tym razem dla koncentracji masowej nanocząstek 5% wartość współczynnika ξ była niższa od 1.



Rys. 7.13. Współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej dla nanocieczy woda/EG(60:40 vol.)-Al₂O₃

Na rys. 7.14 przedstawiono współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej dla badanych koncentracji nanocząstek. Jak wynika z rys. 7.14 dla nanocieczy na bazie mieszanin wody z glikolem etylenowym o koncentracji masowej nanocząstek 0,1% oraz 1% współczynnik ξ był wyższy od 1, co może świadczyć o tym, że intensyfikacja przejmowania ciepła jest większa niż przyrost oporów przepływu. W przypadku nanocieczy na bazie wody współczynnik ξ był niższy od 1 – niezależnie od koncentracji nanocząstek, co może wskazywać na brak uzasadnienia stosowania tego typu nanocieczy. Dla koncentracji masowej nanocząstek 5% współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej był poniżej 1 dla wszystkich badanych nanocieczy. Był jednocześnie tym wyższy im mniejszy był udział wody w mieszaninie z glikolem etylenowym co może wskazywać na złożony wpływ własności termofizycznych nanocieczy na badane procesy cieplno-hydrauliczne





Rys. 7.14. Współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej nanocieczu: a) $\varphi_m = 0,1\%$;

b) $\varphi_m = 1\%$; c) $\varphi_m = 5\%$

7.3 Własne równania korelacyjne

Na podstawie wielowymiarowej analizy regresji opracowano własne równania korelacyjne umożliwiające wyznaczenie średniej liczby Nusselta. Korelacja na średnią liczbę Nusselta ma postać zmodyfikowanego równania Dittusa-Boeltera – wzór (2.3):

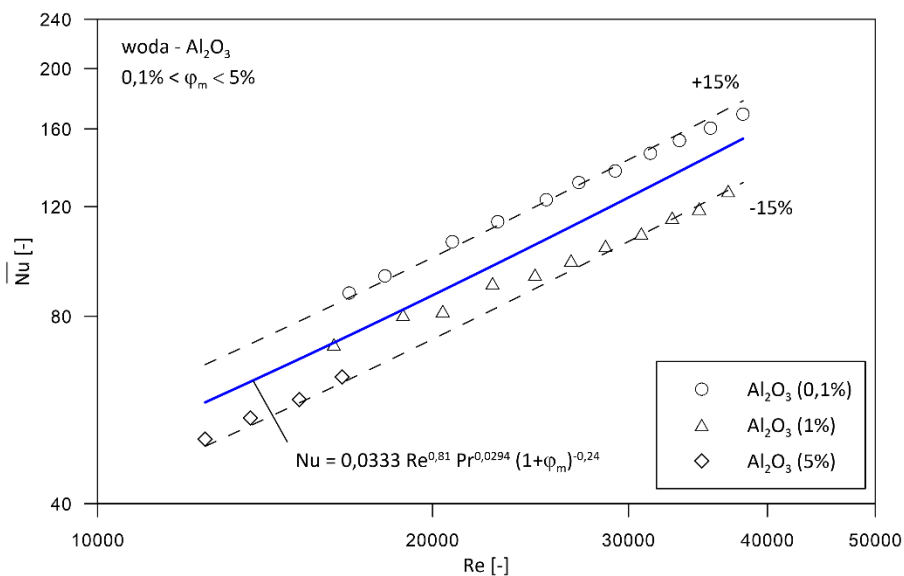
$$\overline{Nu} = a Re^b Pr^c (1 + \varphi_m)^d \quad (7.1)$$

W tab. 7.1 pokazano zestawienie stałych i wykładników wyznaczonych dla poszczególnych cieczy bazowych.

Tab.7.1. Stałe i wykładniki dla korelacji (7.1)

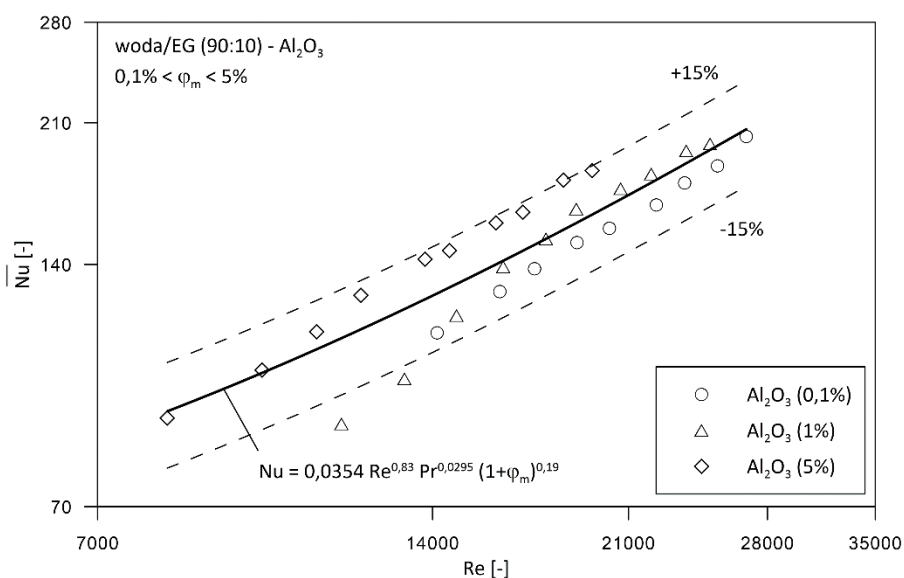
	a	b	c	d	Nr wzoru	Zakres
woda – Al ₂ O ₃	0,0333	0,81	0,0294	-0,24	(7.2)	$1,7 \cdot 10^4 < Re < 3,8 \cdot 10^4$
woda/EG (90:10) – Al ₂ O ₃	0,0354	0,83	0,0295	0,19	(7.3)	$10^4 < Re < 3 \cdot 10^4$
woda/EG (80:20) – Al ₂ O ₃	0,0367	0,84	0,025	0,21	(7.4)	$8 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^4$
woda/EG (60:40) – Al ₂ O ₃	0,0413	0,86	0,035	0,24	(7.5)	$4 \cdot 10^3 < Re < 1,2 \cdot 10^4$

Na rys. 7.15 pokazano wyniki badań eksperymentalnych nanocieczki woda- Al_2O_3 . Linia niebieska przedstawia własne równanie korelacyjne (7.2). Jak wynika z rys. 7.15 zaproponowana korelacja odwzorowuje własne wyniki eksperymentalne w zakresie $\pm 15\%$.



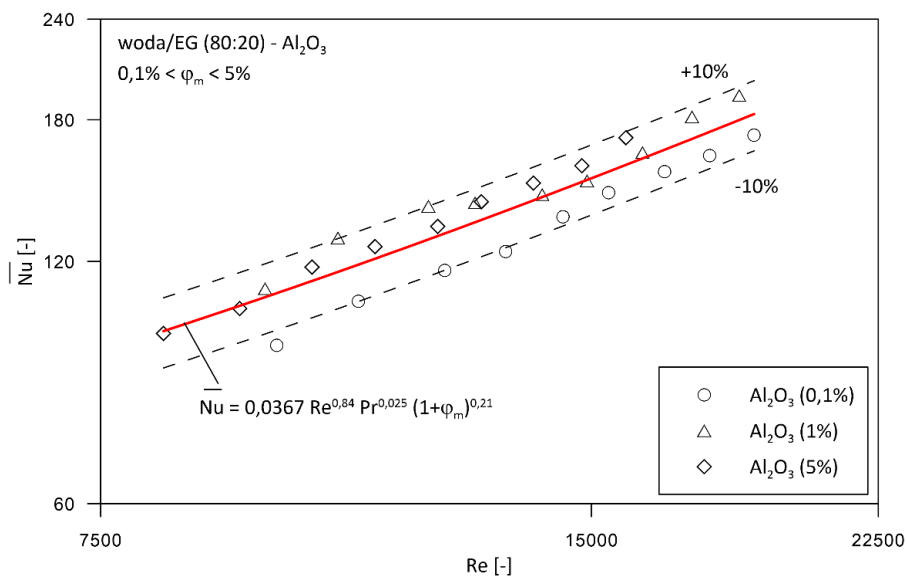
Rys. 7.15. Zależność \overline{Nu} – Re dla nanocieczki woda- Al_2O_3

Na rys. 7.16 pokazano wyniki badań eksperymentalnych nanocieczki woda/EG (90:10)- Al_2O_3 . Linia czarna przedstawia własne równanie korelacyjne (7.3). Jak wynika z rys. 7.16 zaproponowana korelacja odwzorowuje własne wyniki eksperymentalne w zakresie $\pm 15\%$.



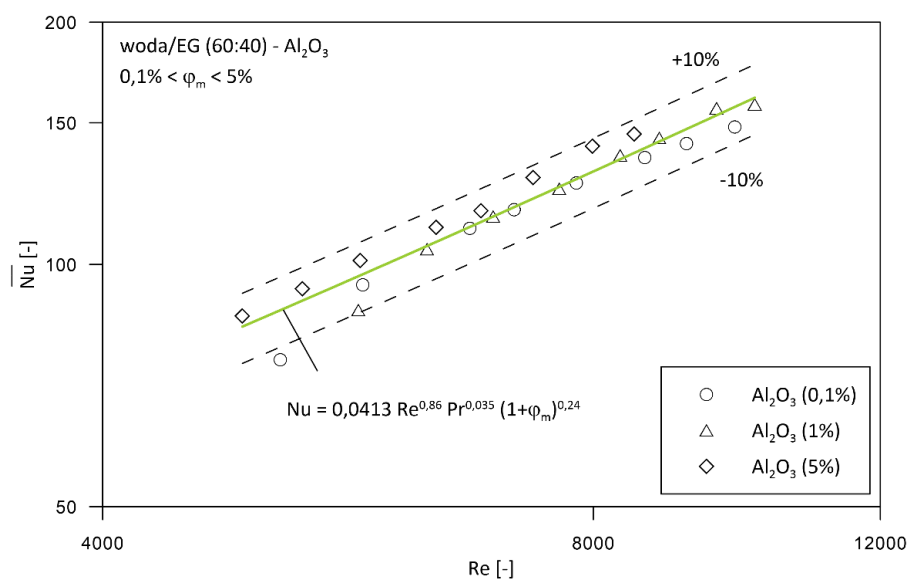
Rys. 7.16. Zależność \overline{Nu} – Re dla nanocieczki woda/EG (90:10)- Al_2O_3

Na rys. 7.17 pokazano wyniki badań eksperymentalnych nanocieczki woda/EG (80:20)-Al₂O₃. Linia czerwona przedstawia własne równanie korelacyjne (7.4). Jak wynika z rys. 7.17 rozrzut wyników mieści się w zakresie ±10%.



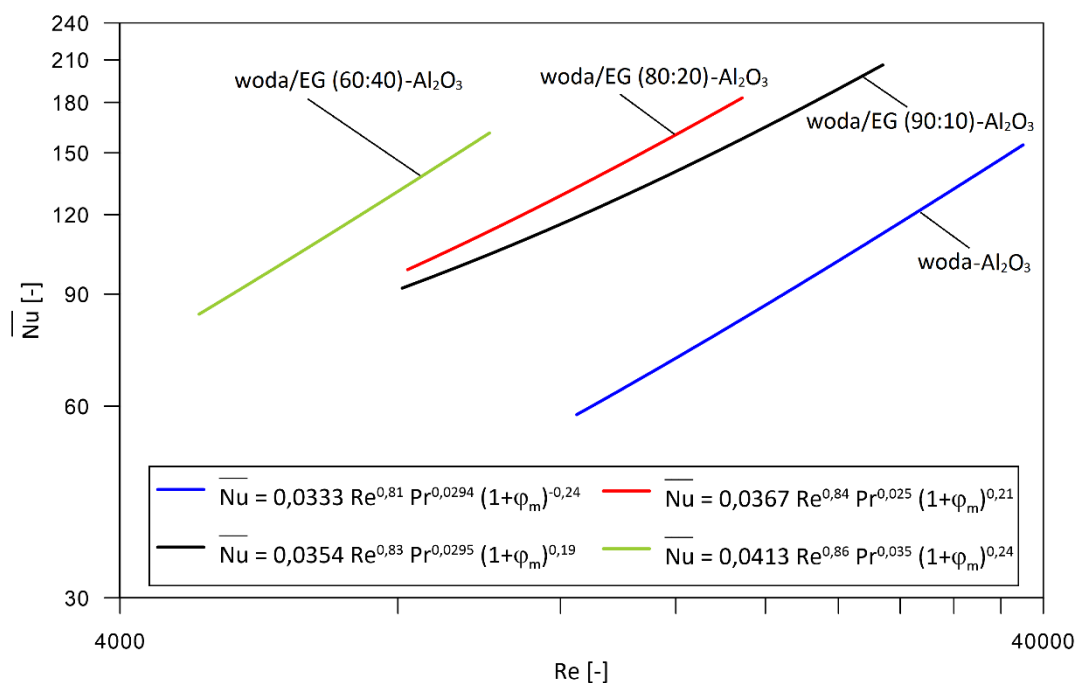
Rys. 7.17. Zależność \overline{Nu} – Re dla nanocieczki woda/EG (80:20)-Al₂O₃

Rys. 7.18 przedstawia wyniki badań eksperymentalnych nanocieczki woda/EG (60:40)-Al₂O₃. Linia zieloną zaznaczono własne równanie korelacyjne (7.5). W tym przypadku zaproponowana korelacja odwzorowuje własne wyniki eksperymentalne w zakresie ±10%.



Rys. 7.18. Zależność \overline{Nu} – Re dla nanocieczki woda/EG (60:40)-Al₂O₃

Na rys. 7.19 przedstawiono zależności średniej liczby Nusselta od liczby Reynoldsa opracowane dla czterech badanych nanociecz. Z rys. 7.19 wynika jednoznacznie, że dla danej liczby Reynoldsa średnia liczba Nusselta jest tym wyższa im większy był udział glikolu etylenowego w mieszaninie z wodą. Jak wynika z rys. 6.11 współczynnik przewodzenia ciepła mieszaniny woda/EG nie tylko, że nie rośnie wraz ze wzrostem udziału glikolu etylenowego, ale wręcz jest coraz niższy. Nie można więc wytłumaczyć wzrostu liczby Nusselta dla nanociecz woda/EG-Al₂O₃ przyrostem współczynnika przewodzenia ciepła wraz z dodaniem nanocząstek. Wydaje się, że w analizie przyjmowania ciepła nanociecz w warunkach konwekcji jednofazowej należy uwzględnić takie zjawiska jak ruchy Browna i termoforeza.

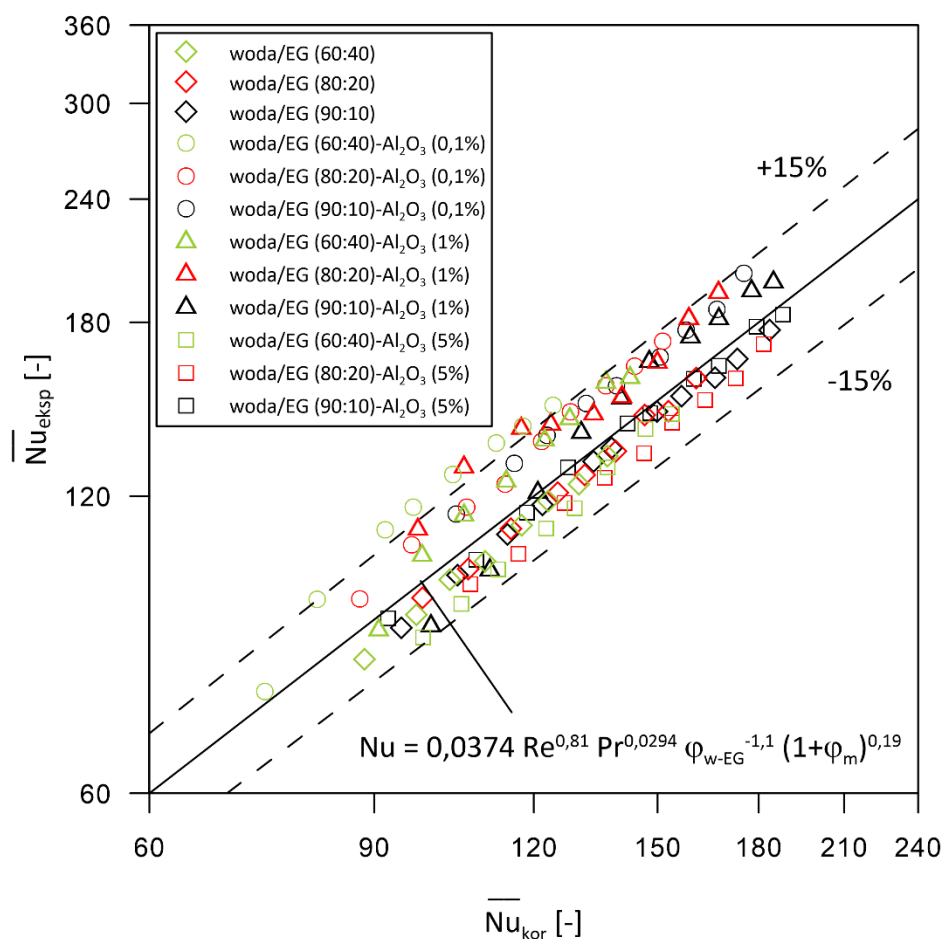


Rys. 7.19. Zestawienie zależności \overline{Nu} – Re dla badanych nanociecz

Na podstawie wielowymiarowej analizy regresji opracowano własne równanie korelacyjne umożliwiające wyznaczenie średniej liczby Nusselta dla nanocieczy na bazie mieszanin wody z glikolem etylenowym o udziale objętościowym wody w zakresie $0,6 \leq \varphi_{w-EG} \leq 0,9$ o postaci:

$$\overline{Nu} = 0,0374 Re^{0,81} Pr^{0,0294} \varphi_{w-EG}^{-1,1} (1 + \varphi_m)^{0,19} \quad (7.6)$$

Na rys. 7.20 pokazano porównanie wyników badań eksperymentalnych dla badanych nanocieczy na bazie mieszanin wody z glikolem etylenowym z obliczeniami wykonanymi z użyciem zaproponowanej korelacji (7.6). Jak wynika z rys. 7.20 dla 93,5% punktów różnica między wartościami zmierzonymi, a obliczonymi nie przekracza $\pm 15\%$. Biorąc pod uwagę złożoność badanego procesu osiągnięty wynik można uznać za satysfakcjonujący.



Rys. 7.20. Porównanie wyników eksperymentalnych i obliczonych z własnej korelacji

Podobnie korzystając z wielowymiarowej analizy regresji opracowano własne równania korelacyjne do obliczania współczynnika oporów przepływu nanociecicy w formie zaproponowanej przez Blasiusa – wzór (2.15) z dodatkowym członem uwzględniającym koncentrację masową nanocząstek:

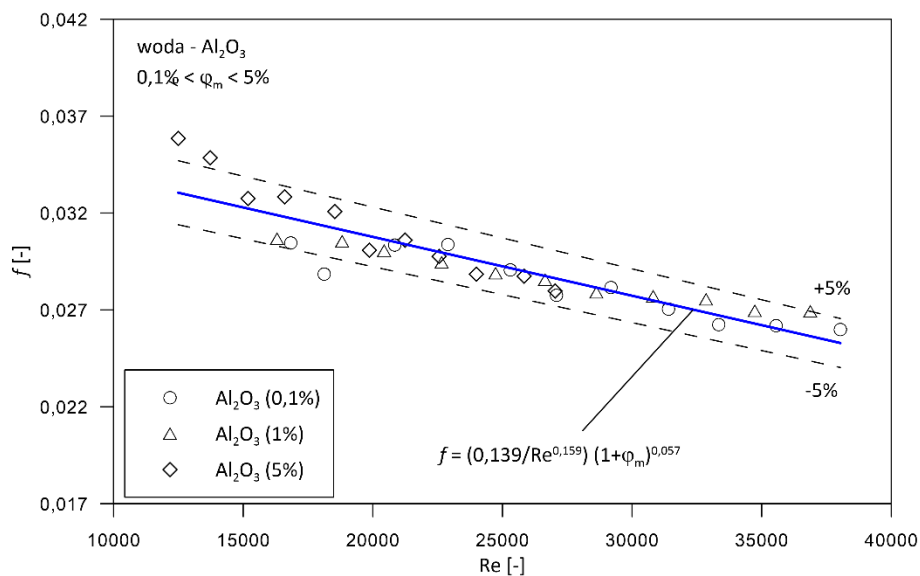
$$f = \frac{a}{Re^b} (1 + \varphi_m)^c \quad (7.7)$$

W tab. 7.2 umieszczono zestaw stałych i wykładników wyznaczonych dla poszczególnych cieczy bazowych.

Tab.7.2. Stałe i wykładniki dla korelacji (7.6)

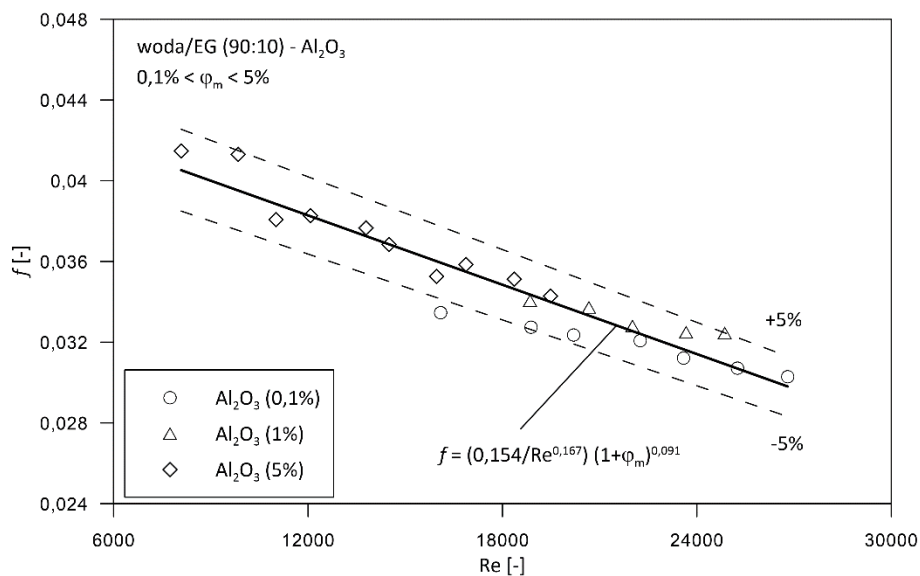
	a	b	c	Nr wzoru	Zakres
woda – Al ₂ O ₃	0,139	0,159	0,057	(7.8)	1,7·10 ⁴ < Re < 3,8·10 ⁴
woda/EG (90:10) – Al ₂ O ₃	0,154	0,167	0,091	(7.9)	10 ⁴ < Re < 3·10 ⁴
woda/EG (80:20) – Al ₂ O ₃	0,172	0,178	0,058	(7.10)	8·10 ³ < Re < 2·10 ⁴
woda/EG (60:40) – Al ₂ O ₃	0,239	0,214	-0,033	(7.11)	4·10 ³ < Re < 1,2·10 ⁴

Na rys. 7.21 pokazano wyniki badań eksperymentalnych nanocieczy woda-Al₂O₃. Linia niebieska przedstawia własne równanie korelacyjne (7.8). Jak wynika z rysunku 7.21 zaproponowana korelacja odwzorowuje własne wyniki eksperymentalne w zakresie ±5%.



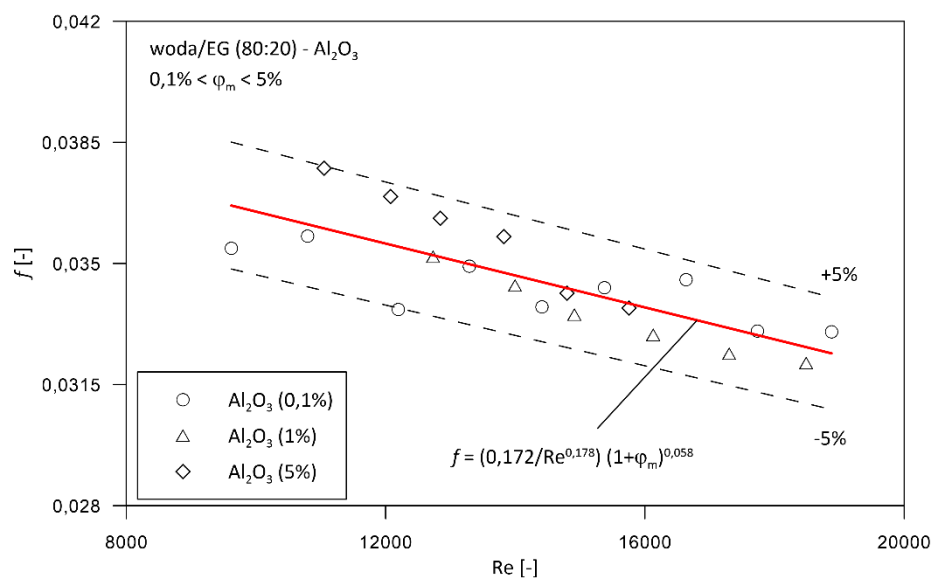
Rys. 7.21. Zależność f – Re dla nanocieczy woda-Al₂O₃

Na rys. 7.22 pokazano wyniki badań eksperymentalnych nanocieczy woda/EG (90:10)-Al₂O₃. Linia czarna przedstawia własne równanie korelacyjne (7.9). Zgodnie z rysunkiem 7.22 rozrzut wyników mieści się w zakresie ±5%.



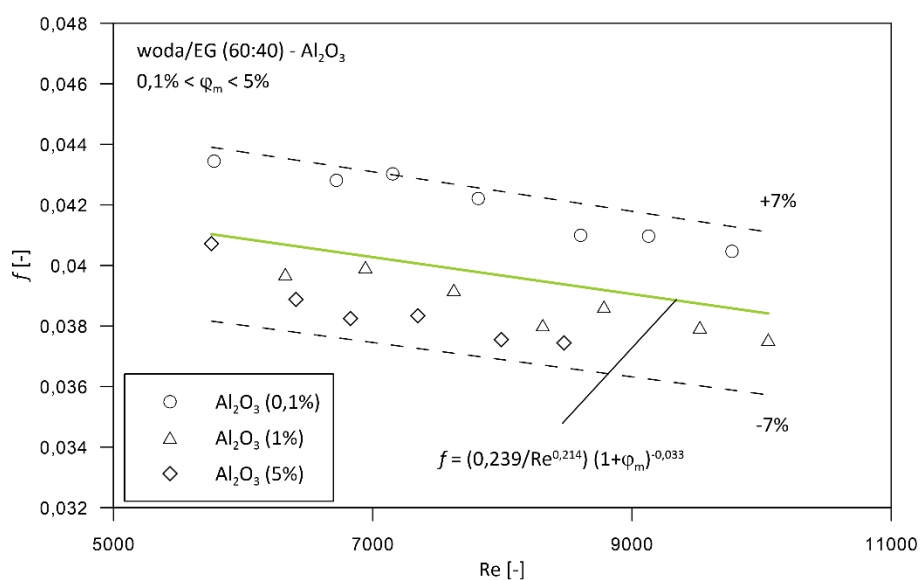
Rys. 7.22. Zależność f – Re dla nanocieczy woda/EG (90:10)-Al₂O₃

Na rys. 7.23 pokazano wyniki badań eksperymentalnych nanocieczy woda/EG (80:20)-Al₂O₃. Linia czerwona przedstawia własne równanie korelacyjne (7.10). Jak wynika z rysunku 7.23 zaproponowana korelacja odwzorowuje własne wyniki eksperymentalne w zakresie ±5%.



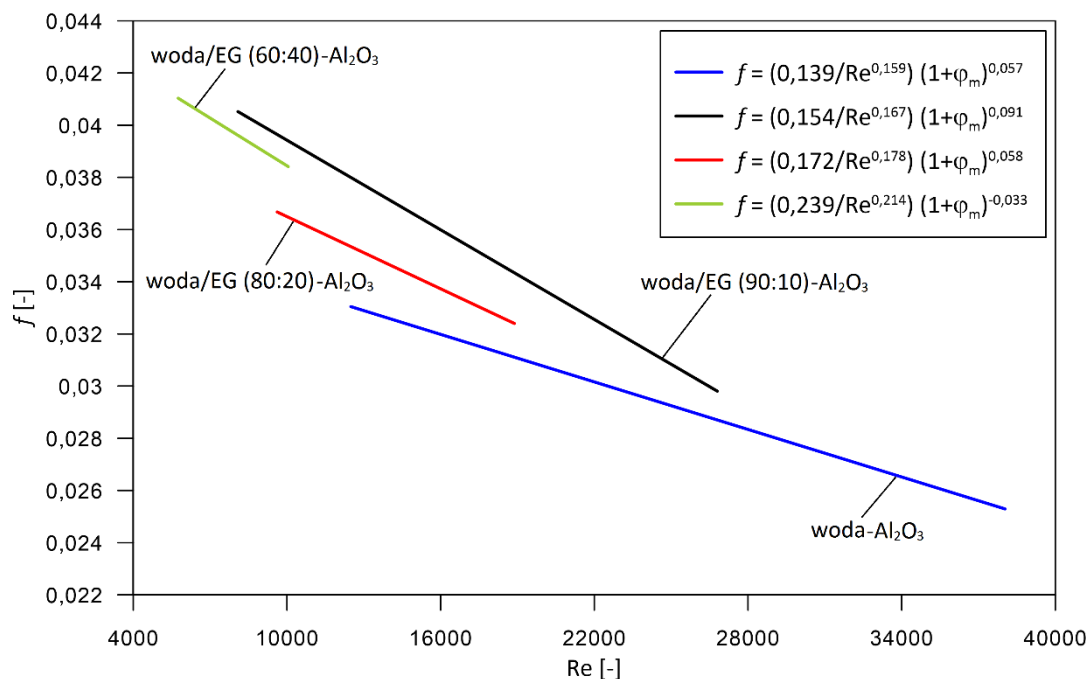
Rys. 7.23. Zależność f – Re dla nanocieczy woda/EG (80:20)-Al₂O₃

Rys. 7.24 przedstawia wyniki badań eksperymentalnych nanocieczy woda/EG (60:40)-Al₂O₃. Linia zieloną zaznaczono własne równanie korelacyjne (7.11). W tym przypadku rozrzut wyników mieści się w zakresie ±7%.



Rys. 7.24. Zależność f – Re dla nanocieczy woda/EG (60:40)-Al₂O₃

Na rys. 7.25 przedstawiono zależności współczynnika oporów przepływu od liczby Reynoldsa opracowane dla czterech badanych nanociecz. Z rys. 7.25 wynika, że podobnie jak dla cieczy bazowych, współczynnik oporów przepływu wszystkich nanociecz maleje wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa. Z rys. 7.25 wynika również, że dla danej liczby Reynoldsa współczynnik oporów przepływu rośnie wraz z udziałem glikolu etylenowego w mieszaninie, co wiąże się ze wzrostem lepkości. Tendencji tej nie potwierdzają jedynie wyniki dla nanociecz woda/EG (90:10), ale biorąc pod uwagę rozrzut wyników przedstawionych na rys.7.21 do 7.24 można przyjąć, że ta anomalia mieści się w zakresie błędu pomiaru.

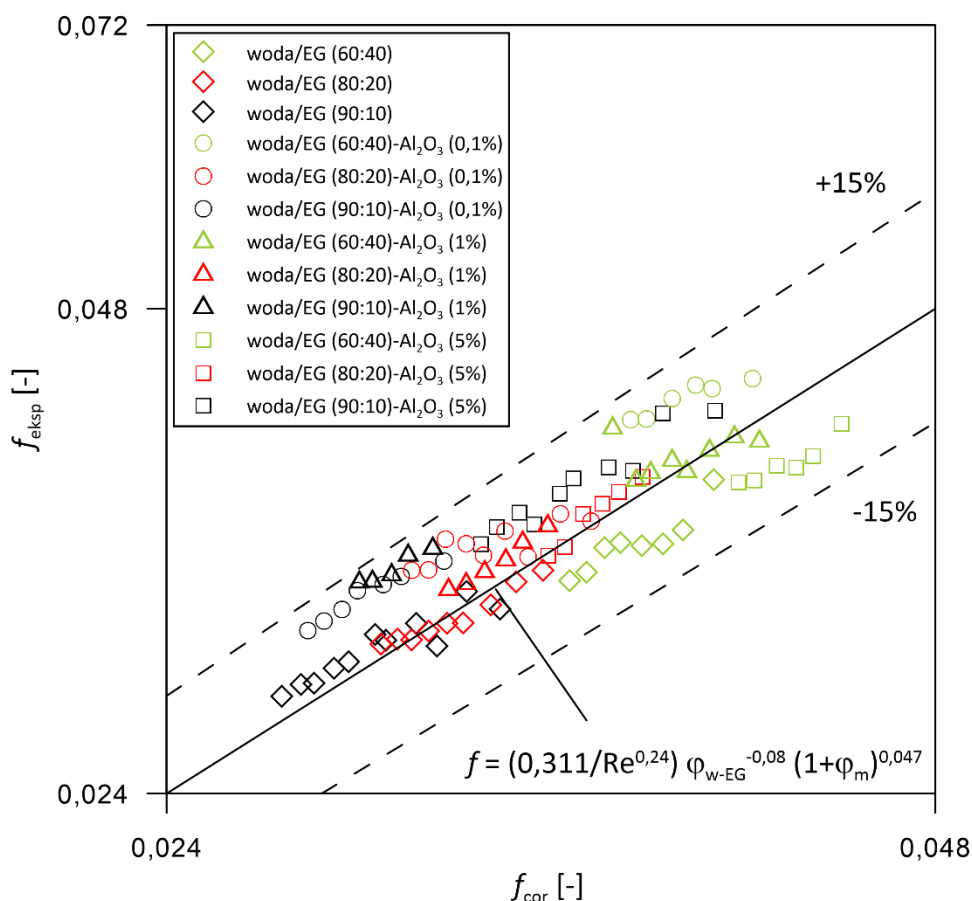


Rys. 7.25. Zestawienie zależności $f - Re$ dla badanych nanociecz

Na podstawie wielowymiarowej analizy regresji opracowano własne równanie korelacyjne umożliwiające wyznaczenie współczynnika oporów przepływu dla nanocieczy na bazie mieszanin wody z glikolem etylenowym o udziale objętościowym wody w zakresie $0,6 \leq \varphi_{w-EG} \leq 0,9$ o postaci:

$$f = \frac{0,311}{Re^{0,24}} \varphi_{w-EG}^{-0,08} (1 + \varphi_m)^{0,047} \quad (7.12)$$

Na rys. 7.26 pokazano porównanie wyników badań eksperymentalnych dla badanych nanocieczy na bazie mieszanin wody z glikolem etylenowym z obliczeniami wykonanymi z użyciem zaproponowanej korelacji (7.12). Jak wynika z rys. 7.26 dla wszystkich punktów różnica między wartościami zmierzonymi, a obliczonymi nie przekracza $\pm 15\%$.



Rys. 7.26. Porównanie wyników eksperymentalnych i obliczonych z własnej korelacji

8. Obliczenia numeryczne

8.1 Równania zachowania i warunki brzegowe

Badany problem to konwekcja wymuszona nanocieczy dla stacjonarnego przepływu turbulentnego w przewodzie o przekroju okrągłym. Dla rozwiązywanego przypadku równanie zachowania masy przyjmuje postać [134]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (8.1)$$

gdzie: ρ – gęstość cieczy,

u_i – składowa prędkości w i -tym kierunku,

$i = x, z$ (rys. 8.1).

Równanie zachowania pędu opisuje wzór [134]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_g^c}{\partial x_j} \quad (8.2)$$

gdzie: $\frac{\partial p}{\partial x_i}$ – gradient ciśnienia,

τ_g^c – całkowity tensor naprężeń lepkich obliczany ze wzoru:

$$\tau_g^c = \tau_{ij} + \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (8.3)$$

gdzie: τ_{ij} – tensor naprężeń lepkich obliczany ze wzoru:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8.4)$$

Równanie zachowania energii wyraża się wzorem [134]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (8.5)$$

gdzie: a_{eff} – efektywny współczynnik wyrównywania temperatury obliczany ze wzoru:

$$a_{eff} = a + a_t \quad (8.6)$$

gdzie: a – molekularny współczynnik wyrównywania temperatury obliczany ze wzoru:

$$a = \frac{\nu}{Pr'} \quad (8.7)$$

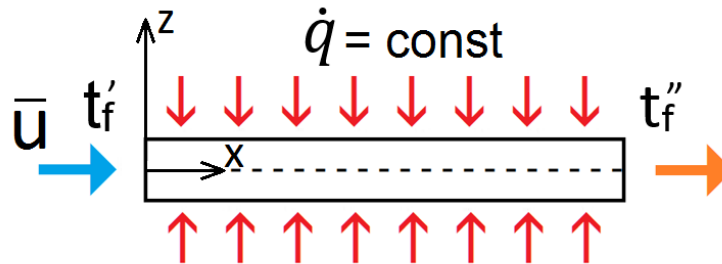
a_t – turbulentny współczynnik wyrównywania temperatury obliczany ze wzoru:

$$a_t = \frac{\nu}{Pr'_t} \quad (8.8)$$

W modelu zastosowano warunek brzegowy drugiego rodzaju czyli stałą gęstość strumienia ciepła na ścianie:

$$\dot{q}|_{z=r} = const \quad (8.9)$$

Założono brak poślizgu na ścianie rurki $u_{z=r} = 0$ oraz stałą, średnią prędkość cieczy na wlocie do rurki. Rys. 8.1 przedstawia założone warunki brzegowe.



Rys. 8.1. Warunki brzegowe przyjęte do obliczeń numerycznych.

8.2 Metoda numeryczna

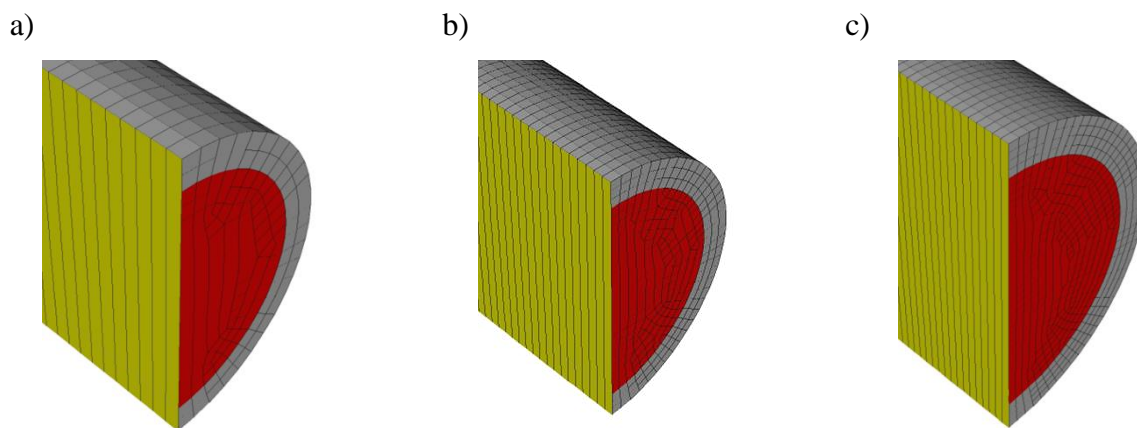
Do przeprowadzenia symulacji numerycznych użyto komercyjnego kodu Ansys Fluent 19.3 [134]. Przyjęto model turbulencji $k-\varepsilon$ z rozwiniętą funkcją warstwy przyściennej. Rozwiązywano zagadnienie modelem 3D. Do dyskretyzacji modelu zastosowano siatkę strukturalną. Obliczenia przeprowadzono dla połowy objętości rurki. Przyjęto homogeniczny model nanocieczy z własnościami termofizycznymi zależnymi od średniej temperatury płynu oraz koncentracji nanocząstek. Nanociecze traktowane były jako nieściśliwa ciecz newtonowska. W obliczeniach pominięto wpływ grawitacji.

8.3 Wpływ geometrii siatki

Modelem geometrycznym była rurka o średnicy wewnętrznej $d_i = 8$ mm oraz długości $L = 2000$ mm, co odpowiada rzeczywistym wymiarom rurki zastosowanej w stanowisku badawczym. Do wygenerowania siatki modelu 3D użyto programu Gambit 2.4.6. W celu sprawdzenia wpływu gęstości siatki na osiągnięte wyniki dokonano obliczeń dla trzech wartości liczby elementów:

- 648 000,
- 2 058 000,
- 4 920 000.

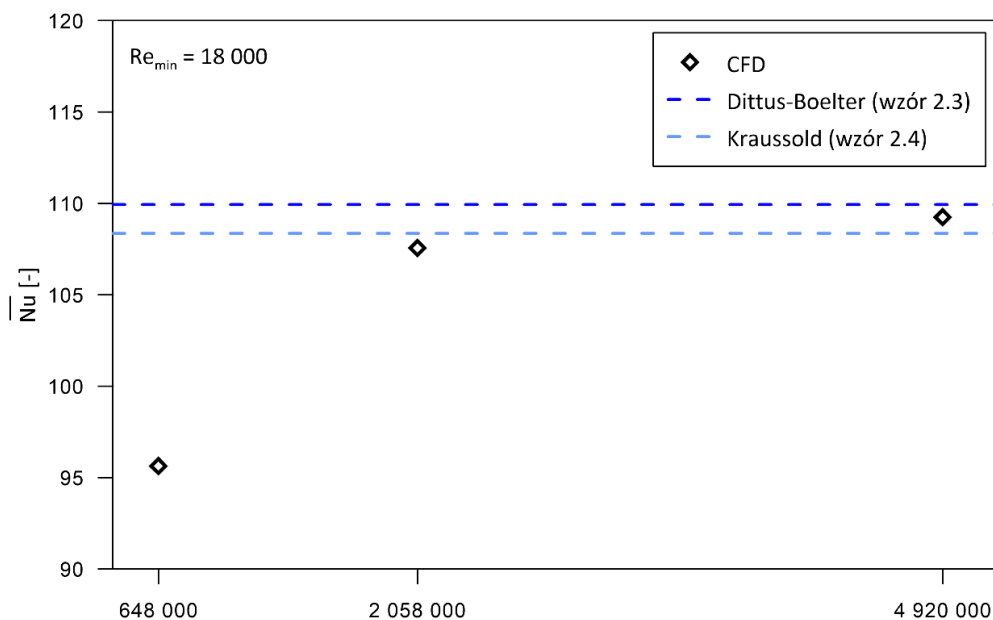
Na rys. 8.2 przedstawiono wycinki generowanych siatek.



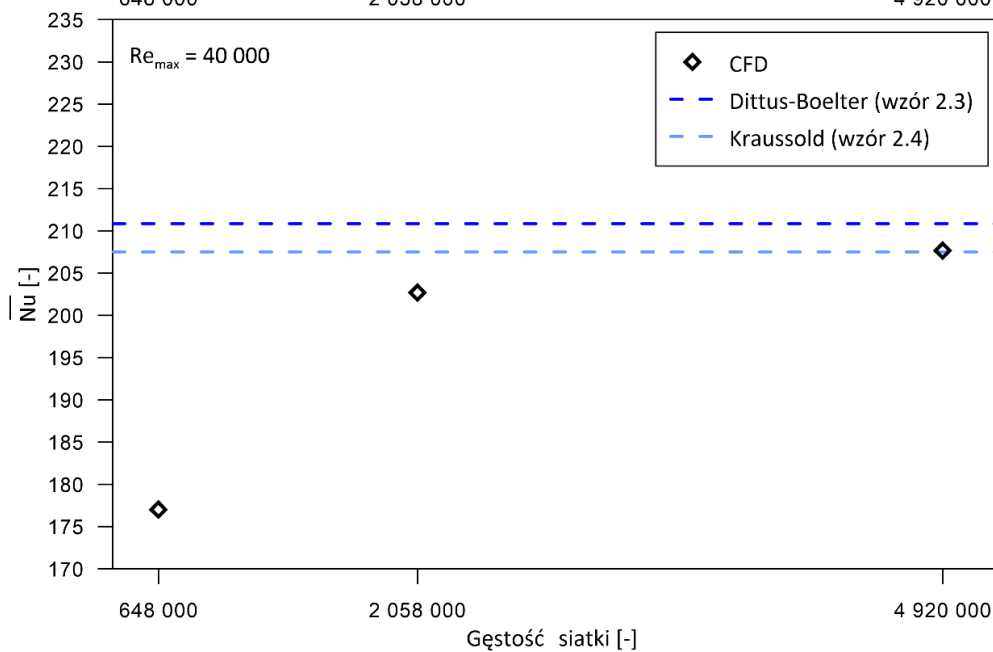
Rys. 8.2 Wycinek siatki obliczeniowej: a) 648 000 elementów; b) 2 058 000 elementów; c) 4 920 000 elementów

Na rys. 8.3 przedstawiono porównanie wyników obliczeń średniej liczby Nusselta otrzymanych dla trzech gęstości siatki z danymi z korelacji Dittusa-Boeltera (wzór 2.3) oraz korelacji Kraussolda (wzór 2.4), uzyskane dla $Re_{\min} = 18000$ oraz $Re_{\max} = 40000$.

a)



b)



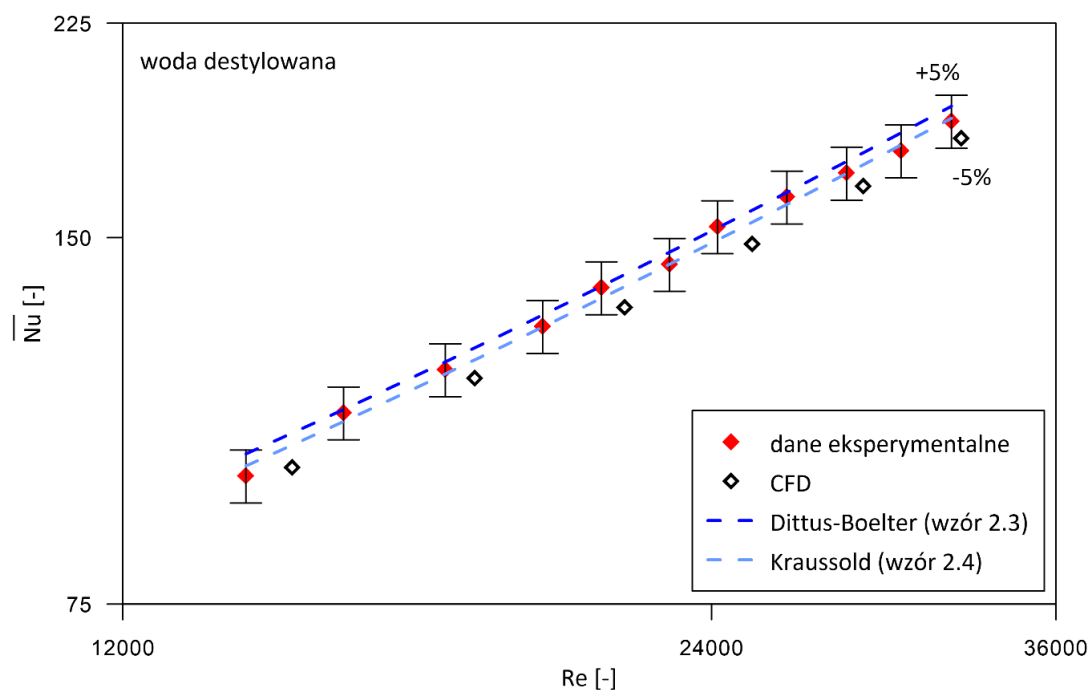
Rys. 8.3 Wpływ gęstości siatki na wartości średniej liczby Nusselta dla:

a) $Re_{\min} = 18000$; b) $Re_{\max} = 40000$

Z rys. 8.3 wynika, że najlepsze dopasowanie, zarówno dla najniższej jak i najwyższej liczby Reynoldsa, otrzymano dla największej gęstości siatki (4 058 000 elementów). Największe różnice pomiędzy obliczoną średnią liczbą Nusselta, a korelacją Dittusa-Boeltera i Kraussolda wynosiły dla najgęstszej siatki odpowiednio 1,5% i 1,4%. Dla siatki o średniej gęstości (2 058 000 elementów) największa różnica między korelacją Dittusa-Boeltera a obliczeniami numerycznymi wynosiła 3,9%, natomiast w porównaniu z korelacją Kraussolda największa różnica wynosiła 2,3%. W celu skrócenia czasu potrzebnego do wykonania symulacji, obliczenia numeryczne wykonane zostały dla średniej gęstości siatki.

8.4 Walidacja modelu numerycznego

Na rys. 8.4 przedstawiono wyniki walidacji modelu numerycznego dla wody destylowanej i liczby Reynoldsa w zakresie $14000 < Re < 35000$. Wyniki obliczeń numerycznych odwzorowują wyniki badań eksperymentalnych oraz wyniki obliczeń uzyskanych z wybranych korelacji w przedziale $\pm 5\%$ co należy uznać za rezultat satysfakcjonujący.

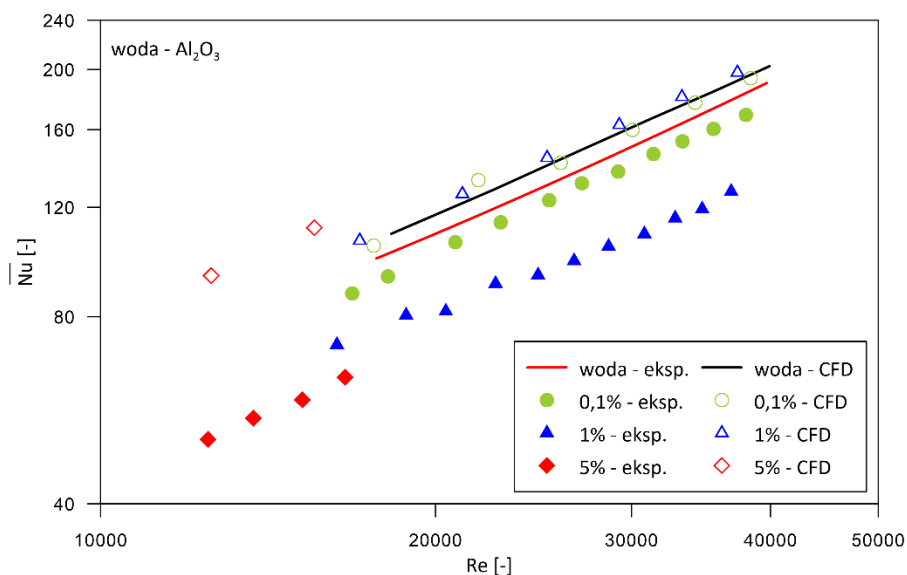


Rys. 8.4 Walidacja modelu obliczeniowego

8.5 Wpływ koncentracji nanocząstek

Nanociecze na bazie wody

Na rys. 8.5 przedstawiono porównanie wyników obliczeń numerycznych z danymi eksperymentalnymi dla nanocieczy na bazie wody. Obliczenia numeryczne wykazują, przeciwnie niż wyniki badań eksperymentalnych, wzrost średniej liczby Nusselta wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek. Taką tendencję pokazuje większość badań literaturowych [94]. O możliwych przyczynach spadku średniej liczby Nusselta wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek w badaniach eksperymentalnych dyskutowano w rozdz. 7.2. Charakterystyczne jest, że dla czystej wody obliczenia numeryczne dają wyższe średnie liczby Nusselta o ok. 4% niż wyniki badań eksperymentalnych. Wzrost średniej liczby Nusselta obliczonej numerycznie dla nanocieczy o koncentracji masowej nanocząstek 5% (puste czerwone romby na rys. 8.5) wyniósł ok. 13% w porównaniu do symulacji numerycznej dla wody (linia czarna na rys. 8.5) i ok. 23% w porównaniu do badań eksperymentalnych dla wody (linia czerwona na rys. 8.5).

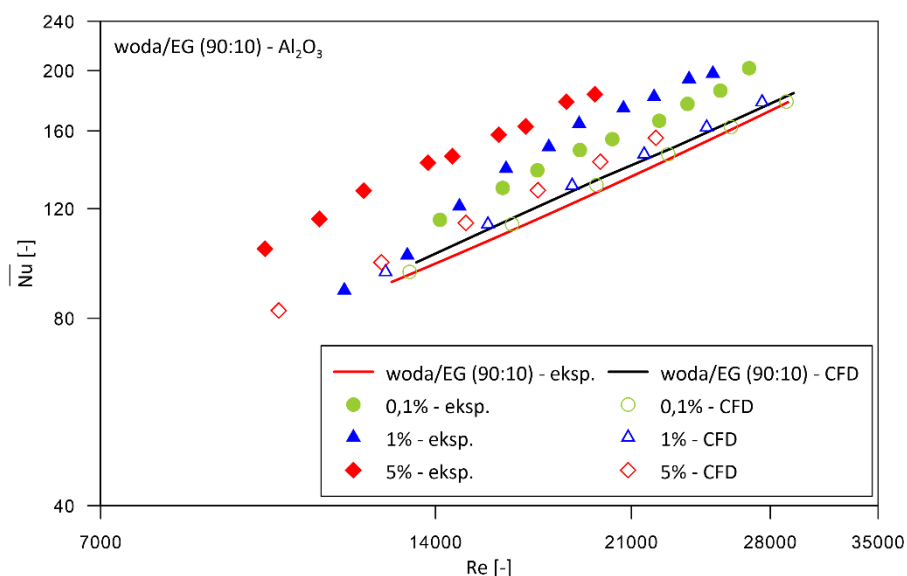


Rys. 8.5 Porównanie wyników obliczeń numerycznych z eksperymentalnymi dla nanocieczy na bazie wody destylowanej



Nanociecze na bazie mieszaniny woda/EG (90:10 vol.)

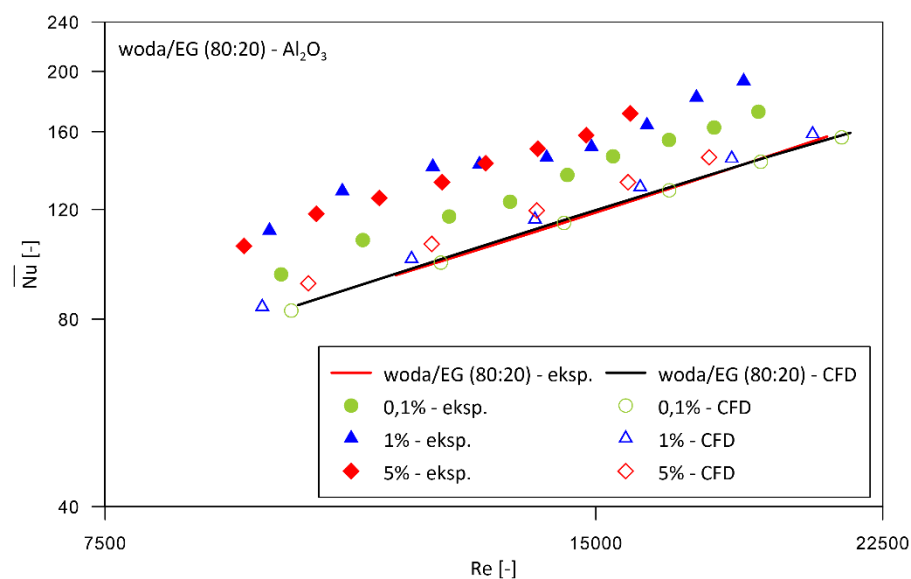
Na rys. 8.6 porównano wyniki obliczeń numerycznych z danymi eksperymentalnymi dla nanocieczy na bazie mieszaniny wody z glikolem etylenowym w proporcji objętościowej 90:10. Jak wynika z rys. 8.6 zarówno wyniki badań eksperymentalnych jak i obliczenia numeryczne wykazują, niezależnie od koncentracji nanocząstek, wyższe średnie liczby Nusselta niż te uzyskane eksperymentalnie dla cieczy bazowej (czerwona linia na wys. 8.6). Za wyjątkiem nanocieczy o koncentracji masowej nanocząstek 0,1%, dla której uzyskano obniżenie średniej liczby Nusselta w porównaniu do obliczeń numerycznych, we wszystkich przypadkach średnia liczba Nusselta rośnie wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek. O ile jednak przyrost średniej liczby Nusselta obliczonej numerycznie dla koncentracji masowej 5% wynosił ok. 11% w porównaniu do wartości eksperymentalnych (czerwona linia na rys. 8.6) o tyle wzrost średniej liczby Nusselta uzyskanej eksperymentalnie dla koncentracji 5% w porównaniu do cieczy bazowej (linia czerwona na rys. 8.6) wynosił aż 32%. Należy podkreślić, że w literaturze zanotowano znacznie wyższe przyrosty średniej liczby Nusselta w porównaniu do cieczy bazowej [94]. W przypadku badań nanocieczy w/EG (90:10)-Al₂O₃ taki przyrost średniej liczby Nusselta może wynikać z relatywnie małego wzrostu lepkości nanocieczy (tylko 10% udziału EG w mieszaninie), a jednocześnie wzrostu współczynnika przewodzenia ciepła nanocieczy.



Rys. 8.6 Porównanie wyników obliczeń numerycznych z eksperymentalnymi dla nanocieczy na bazie woda/EG (90:10 vol.)

Nanociecze na bazie mieszaniny woda/EG (80:20 vol.)

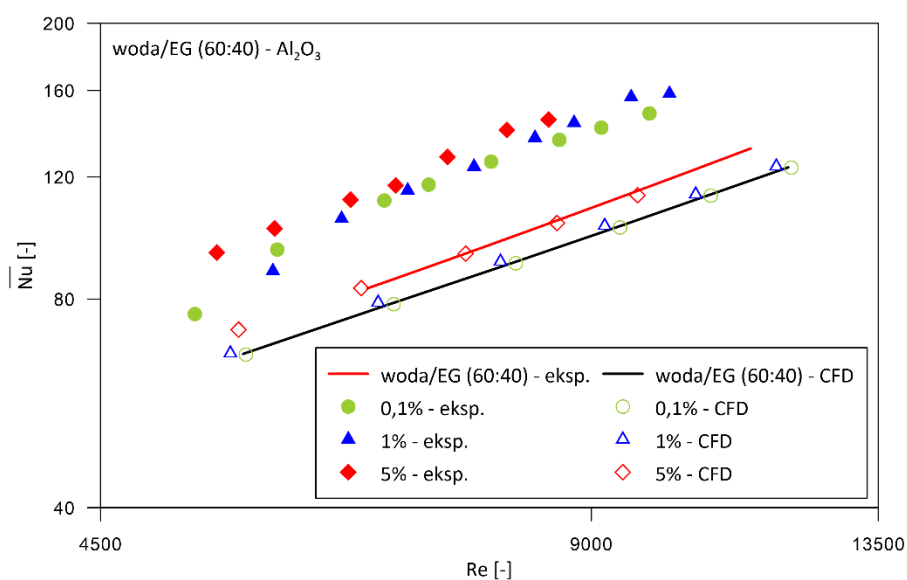
Na rys. 8.7 przedstawiono porównanie wyników obliczeń numerycznych z danymi eksperymentalnymi dla nanocieczy na bazie mieszaniny wody i glikolu etylenowego w proporcji objętościowej 80:20. Jak wynika z rys. 8.7 w tym przypadku uzyskano bardzo dobrą zgodność jakościową i ilościową wyników obliczeń numerycznych z danymi eksperymentalnymi dla cieczy bazowej (linie czarna i czerwona). Przebiegi średniej liczby Nusselta obliczone numerycznie i uzyskane eksperymentalnie są podobne do tych, które otrzymano dla nanocieczy na bazie woda/EG (90:10), z tą różnicą, że badania eksperymentalne nie potwierdziły przyrostu średniej liczby Nusselta dla koncentracji nanocząstek powyżej 1%. Poza tym maksymalny przyrost średniej liczby Nusselta uzyskany eksperymentalnie był niższy i wynosił 27%.



Rys. 8.7 Porównanie wyników obliczeń numerycznych z eksperymentalnymi dla nanocieczy na bazie woda/EG (80:20 vol.)

Nanociecze na bazie mieszaniny woda/EG (60:40 vol.)

Na rys. 8.8 przedstawiono porównanie wyników otrzymanych z obliczeń numerycznych z danymi eksperymentalnymi dla nanocieczy na bazie mieszaniny wody z glikolem etylenowym w proporcji objętościowej 60:40. Jak wynika z rys. 8.8 średnia liczba Nusselta dla cieczy bazowej obliczona numerycznie jest niższa o ok. 10% niż uzyskana eksperymentalnie. Warto przypomnieć, że dla pozostałych cieczy bazowych, tj.: czystej wody – rys. 8.5 i mieszaniny woda/EG (90:10) – rys. 8.6, wartości obliczone numerycznie były wyższe, a dla mieszaniny woda/EG (80:20) – rys. 8.7, prawie identyczne. Wyniki te wskazują na zasadnicze znaczenie własności termofizycznych cieczy bazowych na dokładność zarówno obliczeń numerycznych, jak i opracowanie wyników badań eksperymentalnych. Z analizy danych eksperymentalnych przedstawionych na rys. 8.8 wynika, że wzrost koncentracji nanocząstek z 0,1% do 5% powoduje około 9% wzrost średniej liczby Nusselta. Podobnie niewielki wzrost średniej liczby Nusselta wykazują obliczenia numeryczne – dla koncentracji 5% to ok. 6%, dla koncentracji 1% to ok. 0,5%, a dla koncentracji 0,1% brak zmian średniej liczby Nusselta.



Rys. 8.8 Porównanie wyników obliczeń numerycznych z eksperymentalnymi dla nanocieczy na bazie woda/EG (60:40 vol.)

Na rys. 8.9 pokazano wpływ koncentracji masowej nanocząstek na średnią liczbę Nusselta dla badanych cieczy bazowych i wybranych wartości liczb Reynoldsa.

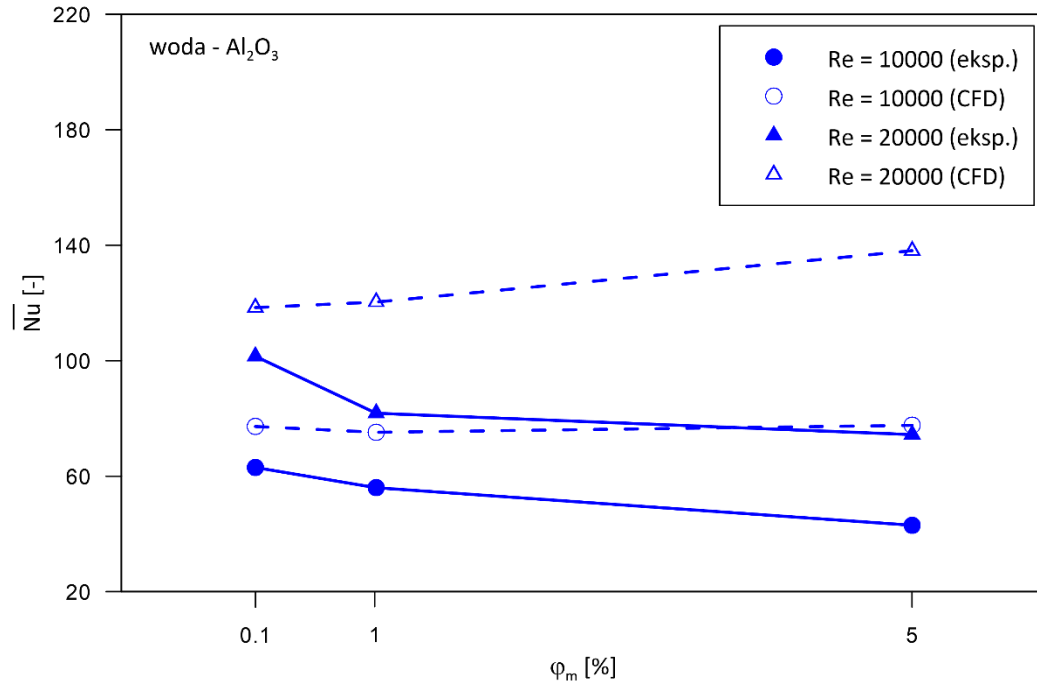
Z rys. 8.9a wynika, że dla nanocieczy woda- Al_2O_3 dane eksperymentalne pokazują spadek średniej liczby Nusselta wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek zarówno dla mniejszej, jak i większej liczby Reynoldsa. Z kolei z obliczeń numerycznych wynika brak wpływu koncentracji nanocząstek na średnią liczbę Nusselta dla mniejszej liczby Reynoldsa i wzrost średniej liczby Nusselta o ok. 17% dla większej liczby Reynoldsa przy zwiększeniu koncentracji z 0,1% do 5%.

Na rys. 8.9b dotyczącym nanocieczy woda/EG(90:10)- Al_2O_3 można zaobserwować podobne tendencje dla obliczeń numerycznych i wyników eksperymentalnych. Dla mniejszej liczby Reynoldsa wpływ koncentracji nanocząstek jest pomijalnie mały. Dla większej liczby Reynoldsa zarówno obliczenia numeryczne jak i dane eksperymentalne wykazują prawie liniowy wzrost średniej liczby Nusselta z koncentracją nanocząstek, przy czym przyrost obserwowany na drodze eksperymentalnej jest większy niż ten uzyskany w obliczeniach numerycznych i wynosi ok. 25%.

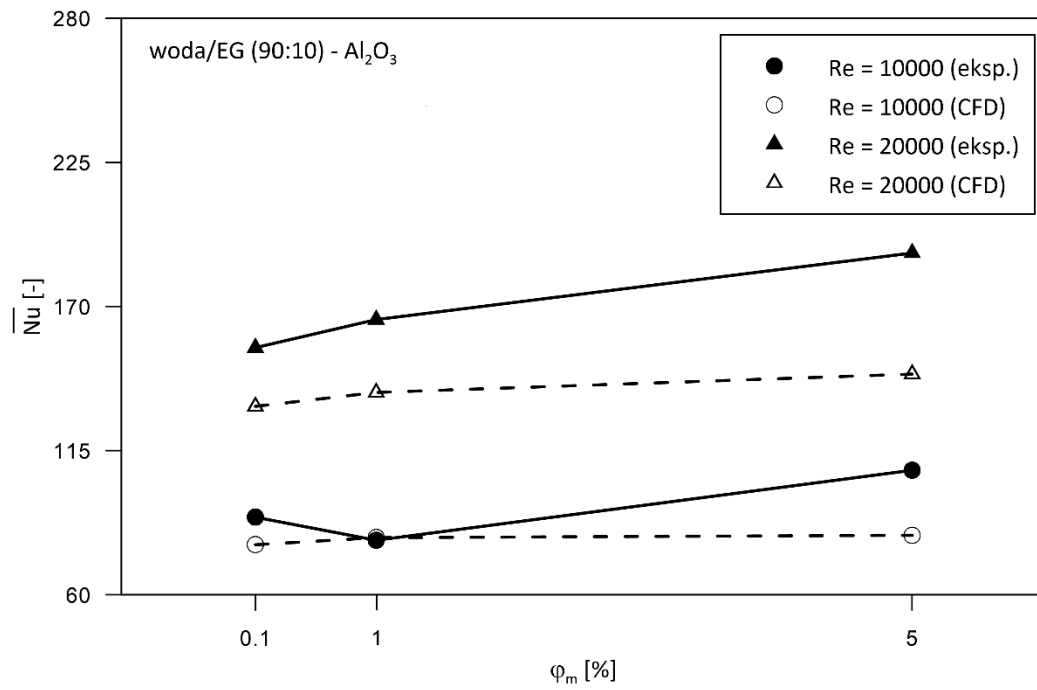
Z rys. 8.9c przedstawiającego wyniki dla nanocieczy woda/EG(80:20)- Al_2O_3 wynika, że zarówno dane eksperymentalne jak i obliczenia numeryczne pokazują przyrost średniej liczby Nusselta przy wzroście koncentracji nanocząstek z 0,1% do 1% i to niezależnie od liczby Reynoldsa oraz praktycznie brak przyrostu średniej liczby Nusselta przy wzroście koncentracji nanocząstek z 1% do 5%.

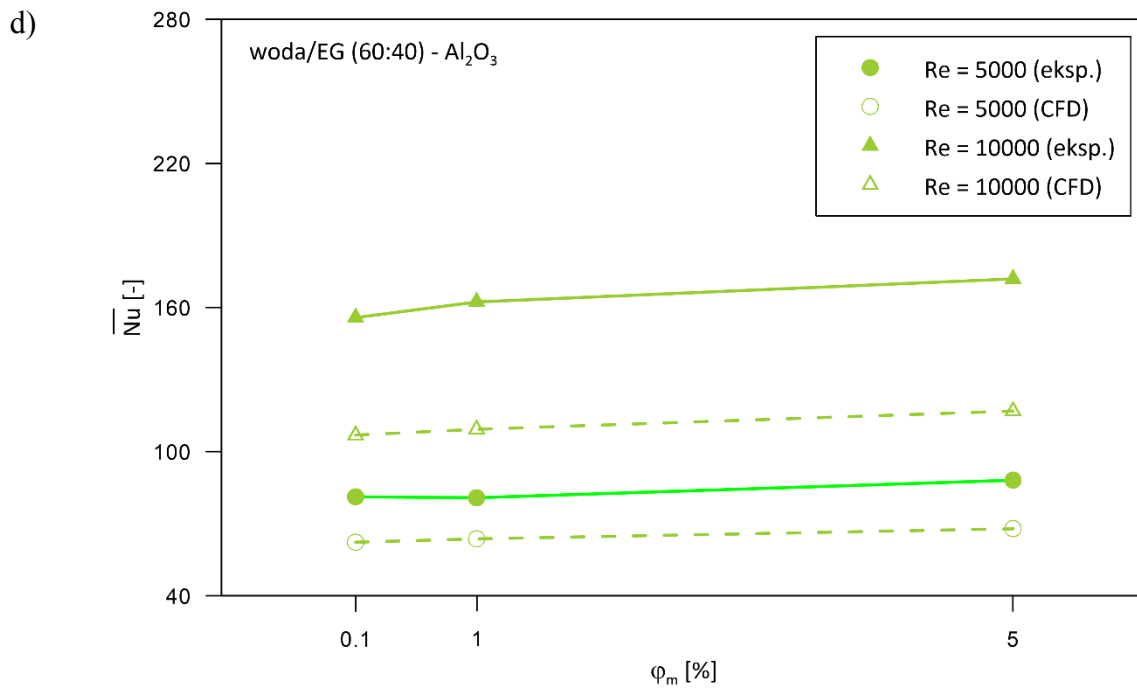
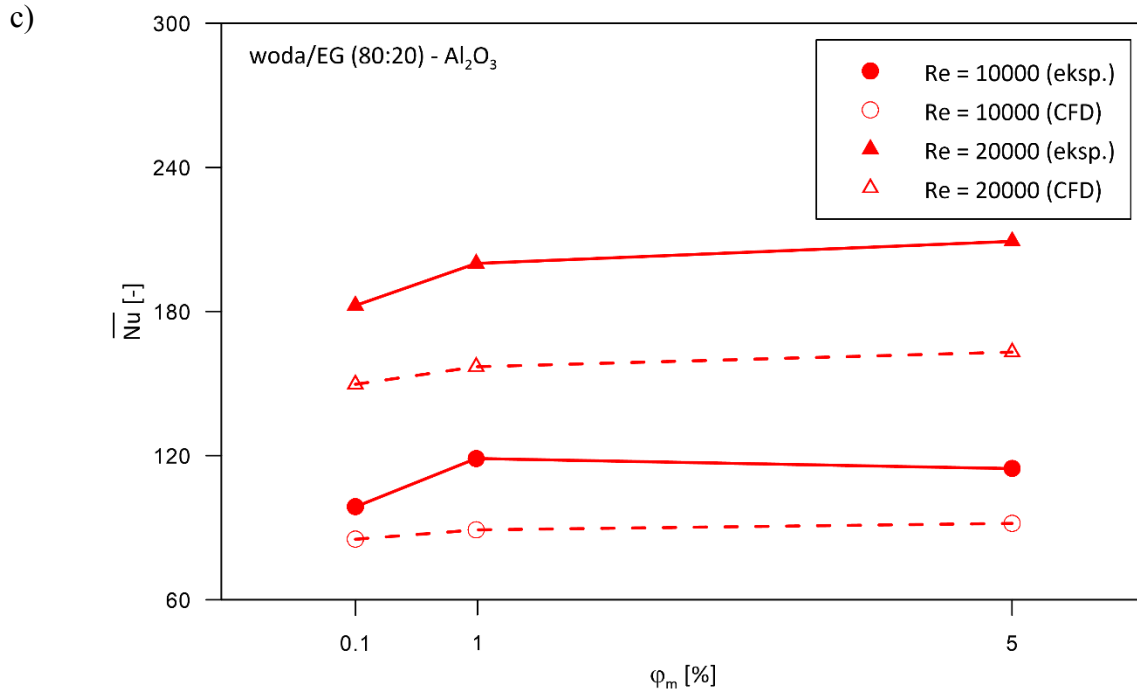
Z kolei dla nanocieczy woda/EG(60:40)- Al_2O_3 zaobserwowano niewielki, prawie liniowy, przyrost średniej liczby Nusselta wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek, zarówno dla obliczeń numerycznych jak i danych eksperymentalnych, niezależnie od liczby Reynoldsa – rys. 8.9d. Maksymalny przyrost średniej liczby Nusselta osiągnięty eksperymentalnie (pełne zielone trójkąty na rys. 8.9d) wyniósł ok. 7% przy wzroście koncentracji masowej nanocząstek z 0,1% do 5%.

a)



b)





Rys. 8.9 Wpływ koncentracji nanocząstek na liczbę \overline{Nu} : a) woda; b) woda/EG (90:10); c) woda/EG (80:20); d) woda/EG (60:40)

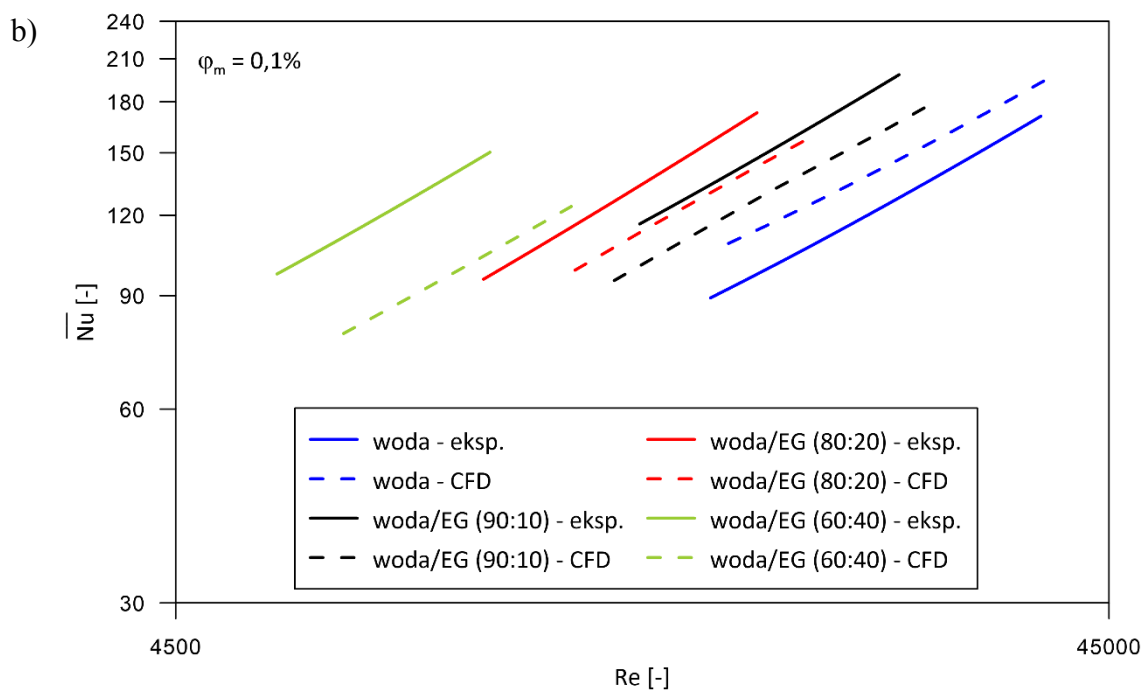
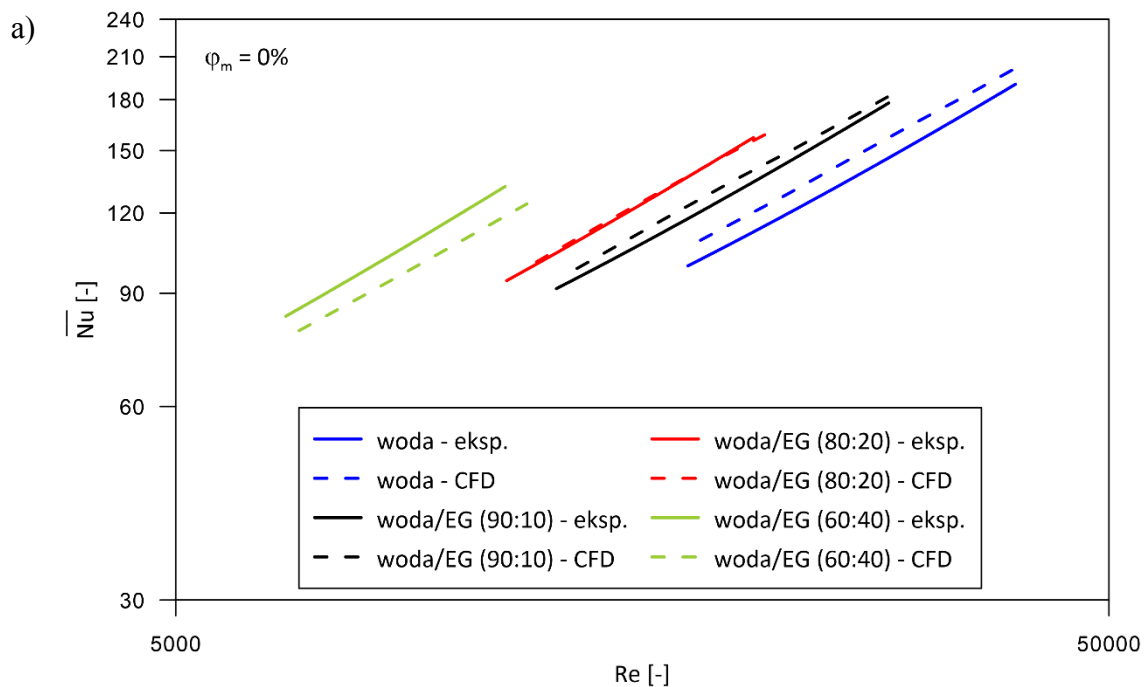
8.6 Wpływ cieczy bazowej

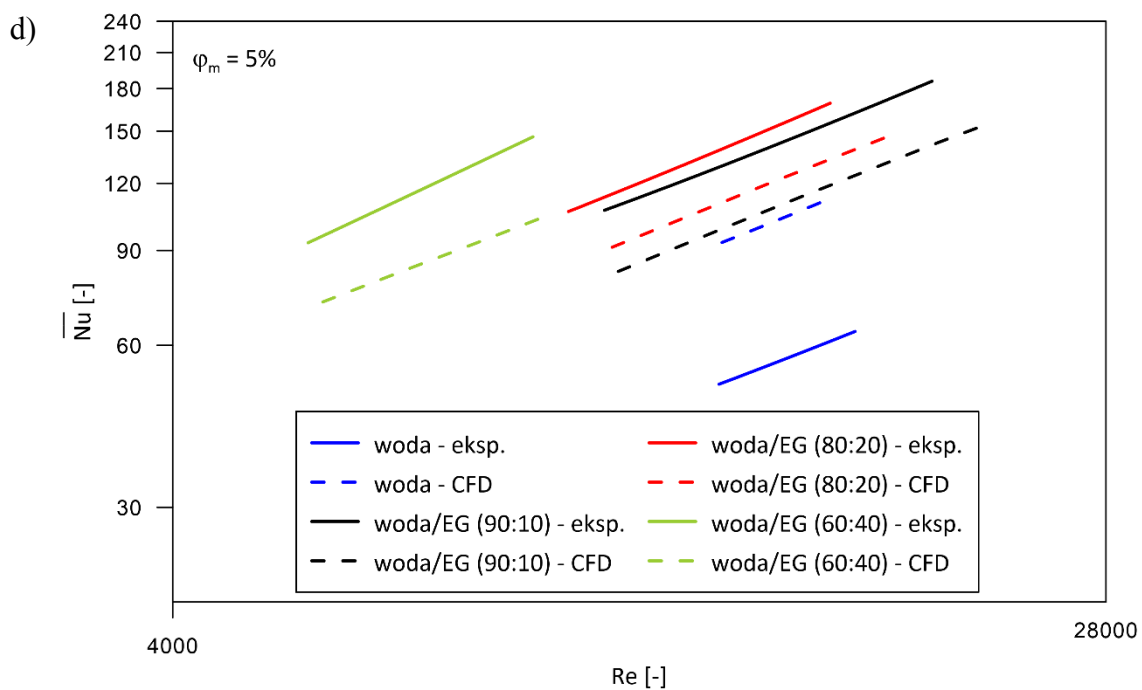
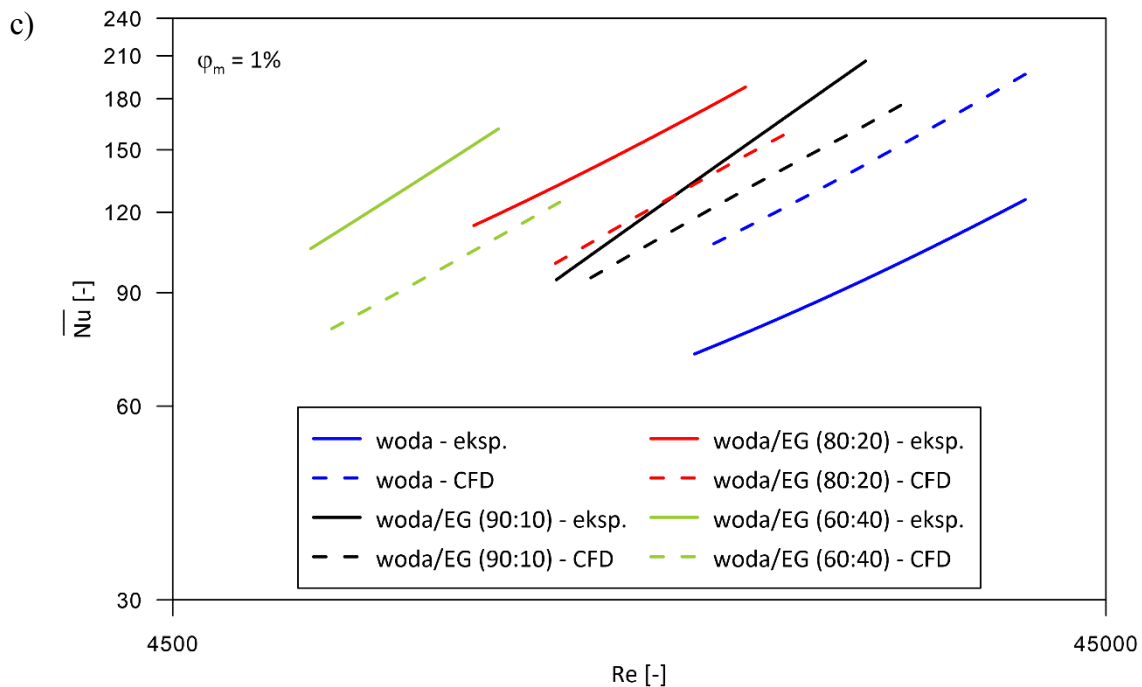
Na rys. 8.10 przedstawiono porównanie wyników obliczeń numerycznych z danymi eksperymentalnymi dla danej koncentracji masowej nanocząstek i cieczy bazowej. Jak wynika z rys. 8.10a, który przedstawia wyniki dla cieczy bazowych, dla czystej wody i mieszaniny woda/EG (90:10) średnia liczba Nusselta obliczona numerycznie była wyższa, dla mieszaniny woda/EG (80:20) prawie identyczna, a dla mieszaniny woda/EG (60:40) niższa od wyników badań eksperymentalnych. Maksymalna różnica między obliczeniami numerycznymi, a danymi eksperymentalnymi wystąpiła dla mieszaniny woda/EG (60:40) i wyniosła ok. 20%.

Z rys. 8.10b wynika również, że dla danej liczby Reynoldsa średnia liczba Nusselta jest tym wyższa im większy jest udział glikolu etylenowego w mieszaninie. Niestety porównanie w całym zakresie liczb Reynoldsa okazało się niemożliwe, gdyż ze względu na wzrost oporów przepływu związanych ze wzrostem lepkości cieczy, zastosowana aparatura badawcza (pompa cyrkulacyjna – rys. 6.1) nie pozwalała na uzyskanie wystarczająco dużej prędkości cieczy.

W przypadku nanocieczy na bazie mieszanin woda/EG średnie liczby Nusselta obliczone numerycznie były niższe niż uzyskane eksperymentalnie – rys. 8.10b do rys. 8.10d. Różnica między obliczeniami a danymi eksperymentalnymi rosła wraz ze wzrostem udziału glikolu etylenowego w mieszaninie. Była też tym większa im mniejsza była koncentracja masowa nanocząstek. Największa różnica wystąpiła dla mieszaniny woda/EG (60:40), koncentracji masowej nanocząstek 0,1%, liczby $Re = 10000$ i wyniosła 46% - rys. 8.10b.

Dla nanocieczy na bazie wody we wszystkich przypadkach wyniki eksperymentalne były zaniżone w porównaniu do obliczeń numerycznych. Różnica była tym większa im wyższa była koncentracja nanocząstek. Dla maksymalnej badanej koncentracji masowej nanocząstek, tj. 5% oraz liczby $Re = 12000$ średnia liczba Nusselta uzyskana eksperymentalnie była niższa od obliczonej numerycznie o 60%. Średnia liczba Nusselta określona eksperymentalnie jest niewątpliwie zaniżona co wynika z braku stabilności badanych nanocieczy na bazie wody.





Rys. 8.10 Wpływ cieczy bazowej na liczbę \overline{Nu} : a) ciecze bazowe; b) 0,1%;
c) 1%; d) 5%

9. Podsumowanie i wnioski końcowe

Praca dotyczy badań konwekcji wymuszonej nanocieczy w poziomych, okrągłych rurkach ogrzewanych strumieniem ciepła o stałej gęstości. Cieczami bazowymi była woda destylowana i mieszaniny wody destylowanej i glikolu etylenowego o stosunkach objętościowych woda/EG (90:10), woda/EG (80:20) oraz woda/EG (60:40). Jako nanocząstki zastosowano nanocząstki tlenku aluminium Al_2O_3 . Wytworzono i zbadano nanociecze o trzech koncentracjach masowych nanocząstek: 0,1%, 1% i 5%.

Głównym celem pracy było wyznaczenie średniej liczby Nusselta oraz oporów przepływu badanych cieczy. W pracy zdecydowano się na wyznaczenie podstawowych własności termofizycznych wytworzonych nanocieczy mających wpływ na procesy ciepłoprzepływowe, tj. współczynnik przewodzenia ciepła oraz dynamiczny współczynnik lepkości. Istotnym aspektem było określenie stabilności wytworzonych nanocieczy, czego dokonano przez bezpośrednią obserwację oraz wykonanie badań mętności nanocieczy.

Wykonane obliczenia numeryczne miały na celu sprawdzenie czy przyjęty model cieczy jednofazowej w wystarczającym stopniu odwzorowuje wpływ dodania nanocząstek do cieczy bazowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Dodanie nanocząstek Al_2O_3 do wody spowodowało spadek średniej liczby Nusselta wyznaczonej eksperymentalnie i to tym większy im wyższa była koncentracja nanocząstek. Jako najbardziej prawdopodobną przyczynę takiego zjawiska należy uznać tworzenie się warstewki nanocząstek stanowiącej dodatkowy opór cieplny, powstałej na powierzchni rurki w wyniku sedymentacji.
2. Dodanie nanocząstek Al_2O_3 do mieszanin woda/EG o proporcjach 90:10, 80:20 i 60:40 skutkowało wzrostem eksperymentalnej średniej liczby Nusselta, tym większym im wyższa była koncentracja nanocząstek.
3. Badania eksperymentalne wykazały, że dla danej liczby Reynoldsa, średnia liczba Nusselta jest tym wyższa im większy był udział glikolu etylenowego w mieszaninie.
4. Dla wszystkich badanych nanocieczy zaobserwowano przyrost spadków ciśnienia, rosnących wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek.

5. Dla celów analitycznych i porównawczych zaproponowano uogólnione korelacje do obliczania średniej liczby Nusselta oraz współczynnika oporów przepływu ważne dla turbulentnego przepływu nanocieczy na bazie wody i mieszanin woda/EG o objętościowym udziale wody powyżej 60%, oraz koncentracji masowej nanocząstek w zakresie $0,1\% \leq \varphi_m \leq 5\%$.
6. Współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej był powyżej jedności w przypadku wszystkich trzech badanych mieszanin woda/EG dla koncentracji nanocząstek 0,1% i 1%. Maksymalną wartość współczynnika intensyfikacji cieplno-hydraulicznej równa $\xi = 1,29$ zaobserwowano dla nanocieczy woda/E(80:20)-Al₂O₃(1%) i liczby Reynoldsa $Re = 10500$. Dla koncentracji masowej nanocząstek 5% współczynnik intensyfikacji cieplno-hydraulicznej był poniżej jedności dla wszystkich badanych nanocieczy.
7. Model nanocieczy jako jednofazowej i homogenicznej przyjęty do obliczeń numerycznych w sposób jakościowy odwzorowywał wyniki badań eksperymentalnych dla nanocieczy na bazie mieszanin woda/EG i to niezależnie od koncentracji nanocząstek. We wszystkich tych przypadkach średnie liczby Nusselta były zaniżone w porównaniu do danych eksperymentalnych z maksymalną różnicą wynoszącą 46%. Należy zauważyć, że o poprawności modelu homogenicznego decyduje dokładność w określeniu własności termofizycznych nanocieczy, w tym szczególnie współczynnika przewodzenia ciepła i dynamicznego współczynnika lepkości. Mimo użycia sprawdzonej aparatury i posiadanego dużego doświadczenia badawczego własne wyniki pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła badanych nanocieczy nie można uznać za zadowalające.
8. O ewentualnym praktycznym zastosowaniu nanocieczy zadecyduje możliwość wytwarzania nanocieczy stabilnych, z nanocząstkami nie podlegającymi sedymentacji. Jak pokazały przeprowadzone pomiary jest to nadal wyzwanie badawcze.

Literatura

- [1] Pudlik W.: Wymiana i wymienniki ciepła. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1983.
- [2] Merker G.P.: Konwektive Wärmeübertragung. Springer-Verlag, Berlin 1987.
- [3] Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki. Wyd. Naukowo Techniczne, Warszawa 1986.
- [4] Dittus F. W., Boelter L. M. K.: Heat transfer in automobile radiators of the tubular type. *University of California Publications in Engineering*, 1930, Vol. 2, 443-461.
- [5] Kraußold H.: Die Wärmeübertragung an Flüssigkeiten in Rohren bei turbulenter Strömung. *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens*, 1933, Band 1, 39-44.
- [6] Sieder E.N., Tate G.E.: Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes. *Industrial and Engineering Chemistry*. 1936, Vol. 28, 1429-1435.
- [7] Michiejew M.A.: Tieplootdacza pri turbulentom dwizenji w trubach. *Izwestija AN SSSR, OTN*, nr 10, 1952
- [8] Petukhov, B.S. Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties. *Advances in Heat Transfer*, 1970, 503-564.
- [9] Notter R.H., Sleicher C.A.: A solution to the turbulent Graetz problem – III fully developed and entry region heat transfer rates. *Chemical Engineering Science*. 1972, Vol. 27, 2073-2093.
- [10] Churchill S.W., Ozoe H.: Correlations for laminar forced convection in flow over an flat plate and in developing and fully developed flow in a tube. *Journal of Heat Transfer*, 1973, Vol. 95, 78-84.
- [11] Hausen H.: Erweiterte Gleichung für den Wärmeübergang in Rohren bei turbulenter Strömung. *Wärme – und Stoffübertragung*, 1974, Band 7, 222-225.
- [12] Gnielinski V.: Neue Gleichungen für den Wärme – und den Stoffübergang in turbulent durchströmten Rohren und Kanälen. *Forschung in Ingenieurwesen*, 1975, Band 41, 8-16.
- [13] Кутателадзе С.С.: Основы Теории Теплообмена. Атомиздат, Москва, 1979.
- [14] Staniszewski B.: Wymiana ciepła – podstawy teoretyczne. PWN, Warszawa, 1979.
- [15] Ciborowski J.: Inżynieria chemiczna. Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1955.
- [16] Blasius H.: Das Aehnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten. *Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, 1913, Heft 131, 1-41.
- [17] Nikuradse J.: Stromungsgesetze in Rauhem Rohren. *VDI Forschungsh*, 1933, Band 361.
- [18] Colebrook C.F.: Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. *Journal of the Institute of Civil Engineers*, 1939, Vol. 11, 133-156.
- [19] Haaland S.E.: Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow. *Journal of Fluids Engineering*, 1983, Vol. 105, 89-90.
- [20] Rohsenow W.M., Hartnett J.P., Ganic E.N.: Handbook of heat transfer applications. McGraw-Hill, New York, 1985.
- [21] Webb R.L., Kim N.H: Principles of enhanced heat transfer. Taylor & Francis, 1994.

- [22] Dagdevir T., Osceyhan V.: An experimental study on heat transfer enhancement and flow characteristics of a tube with plain, perforated and dimpled twisted tape inserts. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, Vol. 159, 1-13.
- [23] Chen X., Han H., Lee K-S., Li B., Zhang Y.: Turbulent heat transfer enhancement in a heat exchanger using asymmetrical outward convex corrugated tubes. *Nuclear Engineering and Design*, 2019, Vol. 350, 78-89.
- [24] Jafari M., Farhadi M., Sedighi K.: Pulsating flow effects on convection heat transfer in a corrugated channel: a LBM approach. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, Vol. 45, 146-154.
- [25] Thianpong C., Eiamsa-ard P., Wongcharee K., Eiamsa-ard S.: Compound heat transfer enhancement of a dimpled tube with a twisted tape swirl generator. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, Vol. 36, 698-704.
- [26] Promvong P.: Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wire coil turbulators. *Energy Conversion and Management*, 2008, Vol. 49, 2949-2955.
- [27] Eiamsa-ard S., Promvong P.: Heat transfer characteristics in a tube fitted with helical screw-tape with/without core-rod inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007, Vol. 34, 176-185.
- [28] Mouromtsef I.E.: A New Water-Cooled Power Vacuum Tube. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 1932, Vol. 20, 783-807.
- [29] Prasher R., Song D., Wang J., Phelan P.: Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications. *Applied Physics Letters*, 2006, Vol. 89, 1-3.
- [30] Suresh S., Chandrasekar M., Sekhar S.C.: Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of CuO / water nanofluid under turbulent flow in a helically dimpled tube. *Experimental Thermal Fluid Science*, 2011, Vol. 35, 542-549.
- [31] Pakdaman M.F., Akhavan-Behabadi Razi P.: An experimental investigation of thermo-physical properties and overall performance of MWCNT/heat transfer oil nanofluid inside vertical helically coiled tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, Vol. 40, 103-111.
- [32] Ferrouillat S., Bontemps A., Poncelet O., Soriano O., Gruss J.A.: Influence of nanoparticle shape factor on convective heat transfer and energetic performance of water-based SiO₂ and ZnO nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 2013, Vol. 51, 839-851.
- [33] Choi S., Eastman J.A.: Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, ASME, 1995, FED-Vol. 231/MD-Vol. 66, 99-105.
- [34] Leong K.Y., Ku Ahmad K.Z., Ong H.C., Ghazali M.J., Baharum A.: Synthesis and thermal conductivity characteristic of hybrid nanofluids – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 75, 868-878.
- [35] Rashmi W., Khalid M., Ong S.S., Saidur R.: Preparation, thermo-physical properties and heat transfer enhancement of nanofluids. *Materials Research Express*, 2014, Vol. 1, 1-47.
- [36] Babu J.A.R., Kumar K.K., Rao S.S.: State-of-art review on hybrid nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 77, 551-565.
- [37] Sundar L.S., Sharma K.V., Singh M.K., A.C.M. Sousa A.C.M.: Hybrid nanofluids preparation, thermal properties, heat transfer and friction factor – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 68, 185-198.

- [38] Babar H., Ali H.M.: Towards hybrid nanofluids: Preparation, thermophysical properties, applications, and challenges. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, Vol. 281, 598-633.
- [39] Yu W., Xie H.: A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications, *Journal of Nanomaterials*, 2012, 1-17.
- [40] Wang L., Chen H., Witharana S.: Rheology of Nanofluids: A Review. *Recent Patents on Nanotechnology*, 2013, Vol. 7, 232-246.
- [41] Sharma A.K., Tiwari A.K., Dixit A.R.: Rheological behaviour of nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, Vol. 53, 779-791.
- [42] Haddad Z., Abid C., Oztop H.F., Mataoui A.: A review on how the researchers prepare their nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 76, 168-189.
- [43] Jama M. i in.: Critical Review on Nanofluids: Preparation, Characterization, and Applications. *Journal of Nanomaterials*, Volume 2016, Article ID 6717624.
- [44] Fuskele V., Sarviya R.M.: Recent developments in Nanoparticles Synthesis, Preparation and Stability of Nanofluids. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4, 4049-4060.
- [45] Dzido G., Chmiel K., Gierczycki A., Jarzębski A.: Zawiesiny nanocząstek. Nowe własności i zastosowania. *Przemysł Chemiczny*, 2007, Vol. 12, 1217-1222.
- [46] Babita, Sharma S.K., Gupta S.M.: Preparation and evaluation of stable nanofluids for heat transfer application: A review. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, Vol. 79, 202-212.
- [47] Ghadimi A., Saidur R., Metselaar H.S.C.: A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, Vol. 54, 4051-4068.
- [48] Witharana S., Palabiyik I., Musina Z., Ding Y.: Stability of glycol nanofluids - The theory and experiment, *Powder Technology*, 2013, Vol. 239, 72-77.
- [49] Yu F., Chen Y., Liang X., Xu J., Lee Ch., Liang Q., Tao P.: Dispersion stability of thermal nanofluids. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2017, Vol. 27, 531-542.
- [50] Abdullah M., Malik S.R., Iqbal M.H., Sajid M.M., Shad N.A., Hussain S.Z., Razzaq W., Jared Y.: Sedimentation and stabilization of nano-fluids with dispersant. *Colloids and Surfaces A*, 2018, Vol. 554, 86-92.
- [51] Mahbulul I.M., Elcioglu E.B., Amalina M.A., Saidur R.: Stability, thermophysical properties and performance assessment of alumina-water nanofluid with emphasis on ultrasonication and storage period. *Powder Technology*, 2019, Vol. 345, 668-675.
- [52] Xia G., Jiang H., Liu R., Zhai Y.: Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of Al₂O₃/de-ionized water nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, Vol. 84, 118-124.
- [53] Ilyas S.U., Pendyala R., Marneni N.: Preparation, sedimentation, and agglomeration of nanofluids. *Chemical Engineering and Technology*, 2014, Vol. 37, 2011-2021.
- [54] Choi S.U.S, Zhang Z.G., Yu W., Lockwood F.E., Grulke E.A.: Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. *Applied Physics Letters*, 2001, Vol. 79, 2252-2254.
- [55] Wang L., Fan J.: Toward nanofluids of ultra-high thermal conductivity. *Nanoscale Research Letters*, 2011, Vol. 6, 1-9.

- [56] Li Y., Zhou J., Luo Z., Tung S., Schneider E., Wu J., Li X.: Investigation on two abnormal phenomena about thermal conductivity enhancement of BN/EG nanofluids. *Nanoscale Research Letters*, 2011, Vol. 6, 2-7.
- [57] Buongiorno J. i in.: A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 2009, Vol. 106, 1-14.
- [58] Taylor R.A., Phelan P.E., Otonicar T., Gunawan A.: Small particles, big impacts: a review of the diverse applications of nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 2013, Vol. 113, 1-60.
- [59] Sajid M.U., Ali H.M.: Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, Vol. 103, 556-592.
- [60] Cieśliński J.T.: Application of nanofluids in thermal technologies. *Contemporary Issues of Heat and Mass Transfer*, Publishing House of the Koszalin University of Technology, 2019, Tom 1, No. 360, 33-48.
- [61] Kleinstreuer C., Feng, Y.: Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: a review. *Nanoscale Research Letters*. 2011, Vol. 6, 1-13.
- [62] Mishra P.C., Nayak S.K., Mukherjee S.: Thermal Conductivity of Nanofluids - An Extensive Literature Review. *International Journal of Engineering Research and Technology*,. 2013, Vol. 2, 1-12.
- [63] Mukherjee S., Mishra P.C., Parashar S.K.S., Chaudhuri P.: Role of temperature on thermal conductivity of nanofluids: a brief literature review. *Heat Mass Transfer*. 2016, 1-11.
- [64] Azmi W.H., Usri N.A., Mamat R., Sharma K.V., Noor M.M.: Forced convection heat transfer of Al₂O₃ nanofluids for different based ratio of water: Ethylene glycol mixture. *Applied Thermal Engineering*, 2017, Vol. 112, 707-719.
- [65] Aybar H.Ş., Sharifpur M., Azizian M.R., Mehrabi M., Meyer J.P.: A Review of Thermal Conductivity Models for Nanofluids. *Heat Transfer Engineering*, 2015, Vol. 36, 1085-1110.
- [66] Corcione M.: Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. *Energy Conversion and Management*, 2011, Vol. 52, 789-793.
- [67] Khanafer K., Vafai K.: A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, Vol. 54, 4410-4428.
- [68] Sundar L.S., Ramana E.V., Singh M.K., Sousa A.C.M.: Thermal conductivity and viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture Al₂O₃ nanofluids for heat transfer applications: An experimental study. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014, Vol. 56, 86-95.
- [69] Hassani S., Saidur R., Mekhilef S., Hepbasli A.: A new correlation for predicting the thermal conductivity of nanofluids; using dimensional analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, Vol. 90, 121-130.
- [70] Chiam H.W., Azmi W.H., Usri N.A., Mamat R., Adam N.M.: Thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃ nanofluids for different based ratio of water and ethylene glycol mixture. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, Vol. 81, 420-429.
- [71] Sawicka D., Cieśliński J., Smoleń S.: A Comparison of Empirical Correlations of Viscosity and Thermal Conductivity of Water-Ethylene Glycol-Al₂O₃ Nanofluids. *Nanomaterials*, 2020, Vol. 10, 1-24.

- [72] Mahbulul I.M., Saidur R., Amalina M.A.: Latest developments on the viscosity of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, Vol. 55, 874–885.
- [73] Yiamsawas T., Mahian O., Dalkilic A.S., Kaewnai S., Wongwises S.: Experimental studies on the viscosity of TiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles suspended in a mixture of ethylene glycol and water for high temperature applications. *Applied Energy*, 2013, Vol. 111, 40–45.
- [74] Esfe M.H., Saedodin S.: An experimental investigation and new correlation of viscosity of ZnO–EG nanofluid at various temperatures and different solid volume fractions. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014, Vol. 55, 1–5.
- [75] Meyer J.P., Adio S.A., Sharifpur M., Nwosu P.N.: The Viscosity of Nanofluids: A Review of the Theoretical, Empirical, and Numerical Models. *Heat Transfer Engineering*, 2016, Vol. 37(5), 387–421.
- [76] Bashirnezhad K., Bazri S., Safaei M.R., Goodarzi M., Dahari M., Mahian O., Dalkılıça A.S., Wongwises S.: Viscosity of nanofluids: A review of recent experimental studies. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, Vol. 73, 114-123.
- [77] Murshed S.M.S., P. Estellé P.: A state of the art review on viscosity of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 76, 1134-1152.
- [78] He Y., Jin Y., Chen H., Ding Y., Cang D., Lu H.: Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, Vol. 50, 2272-2281.
- [79] Lu W., Fan Q.: Study for the particle's scale effect on some thermophysical properties of nanofluids by a simplified molecular dynamics method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2008, Vol. 32(4), 282-289.
- [80] Prasher R., Song D., Wang J., Phelan P.: Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications. *Applied Physics Letters*, 2006, Vol. 89, 1-3.
- [81] Timofeeva E.V., Yu W., France D.M., Singh D., Routbort J.L.: Nanofluids for heat transfer: an engineering approach, *Nanoscale Research Letters*, 2011, Vol. 6, 1-7.
- [82] Timofeeva E.V., Routbort J.L., Singh D.: Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids, *Journal of Applied Physics*, 2009, Vol. 106, 1-10.
- [83] Sahoo B.C., Vajjha R.S., Ganguli R., Chukwu G.A., Das D.K.: Determination of Rheological Behavior of Aluminum Oxide Nanofluid and Development of New Viscosity Correlations. *Petrol Science Technology*, 2009, Vol. 27, 1757-1770.
- [84] Pastoriza-Gallego M.J., Lugo L., Legido J.L., Piñeiro M.M.: Thermal conductivity and viscosity measurements of ethylene glycol-based Al₂O₃ nanofluids. *Nanoscale Research Letters*, 2011, Vol. 6, 2-11.
- [85] Pak B.C., Cho Y.I.: Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 1998, Vol. 11, 151-170.
- [86] Shoghl S.N., Jamali J., Moraveji M.K.: Electrical conductivity, viscosity, and density of different nanofluids: An experimental study. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, Vol. 74, 339-346.
- [87] <https://www.sigmaaldrich.com/PL/pl/sds/sial/nist742>
- [88] Vajjha R.S., Das D.K.: Specific heat measurement of three nanofluids and development of new correlations. *Journal of Heat Transfer*, 2009, Vol. 131, 1-7.



- [89] Riazi H., Murphy T., Webber G.B., Atkin R., Mosfavi Tehrani S.S., Taylor R.A.: Specific heat control of nanofluids: A critical review. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, Vol. 107, 25-38.
- [90] Azmi W.H., Hamid K.A., Usri N.A., Mamat R., Sharma K.V.: Heat transfer augmentation of ethylene glycol: Water nanofluids and applications - A review. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, Vol. 75, 13-23.
- [91] Raja M., Vijayan R., Dineshkumar P., Venkatesan M.: Review on nanofluids characterization, heat transfer characteristics and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, Vol. 64, 163-173.
- [92] Khurana D., Choudhay R., Subudhi S.: A critical review of forced convection heat transfer and pressure drop of Al₂O₃, TiO₂ and CuO nanofluids. *Heat and Mass Transfer*, 2016, 1-19.
- [93] Ganvir R.B., Walke P.V., Kriplani V.M.: Heat transfer characteristics in nanofluid – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 75, 451-460.
- [94] Cieśliński J.T., Kozak P.: Experimental investigations of forced convection of nanofluids in smooth, horizontal, round tubes. A review. *Energies*, 2023, 16, 4415, 1-49.
- [95] Heyhat M.M., Kowsary F., Rashidi A.M., Alem Varzane Esfehiani S., Amrollahi A.: Experimental investigation of turbulent flow and convective heat transfer characteristics of alumina water nanofluids in fully developed flow regime. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2012, Vol. 35, 1272-1278.
- [96] Sahin B., Gültekin G.G., Manay E., Karagoz S.: Experimental investigation of heat transfer and pressure drop characteristics of Al₂O₃-water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, Vol. 50, 21-28.
- [97] Patel B.J., Subhedar D.: Experimental Investigation of Heat Transfer through Circular Tube using Al₂O₃/Water-EG Nanofluid. *International Journal for Innovative Research in Science and Technology*, 2016, Vol. 2, 6-10.
- [98] Kong M., Lee S.: Performance evaluation of Al₂O₃ nanofluid as an enhanced heat transfer fluid. *Advances in Mechanical Engineering*, 2020, Vol. 12, 1-13.
- [99] Chiam H.W., Azmi W.H., Adam N.M., Ariffin M.K.A.M.: Numerical study of nanofluid heat transfer for different tube geometries – A comprehensive review on performance. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2017, Vol. 86, 60-70.
- [100] Javed S., Ali M.H., Babar H., Khan M.S., Janjua M.M., Bashir M.A.: Internal convective heat transfer of nanofluids in different flow regimes: A comprehensive review. *Physica A*, 2020, Vol. 538, 1-28.
- [101] Bayat F., Nikseresht A.H.: Thermal performance and pressure drop analysis of nanofluids in turbulent forced convective flows. *International Journal of Thermal Science*, 2012, Vol. 60, 236-243.
- [102] Saha G., Paul M.: Heat transfer and entropy generation of turbulent convection flow of nanofluids in a heated pipe. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015, Vol. 61, 26-36.
- [103] Mwesigye A., Huan Z.: Thermodynamic analysis and optimization of fully developed turbulent forced convection in a circular tube with water-Al₂O₃ nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, Vol. 89, 694-706.



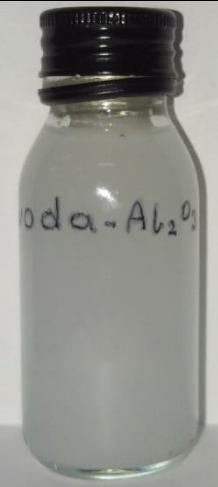
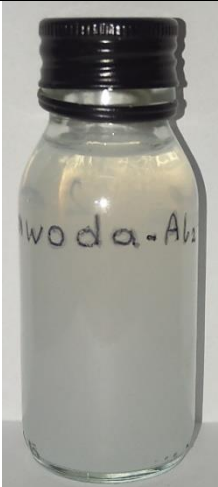
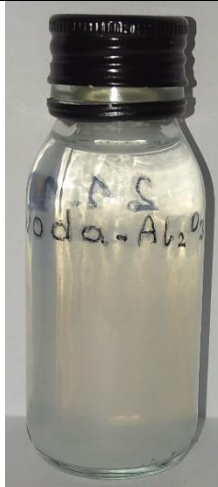
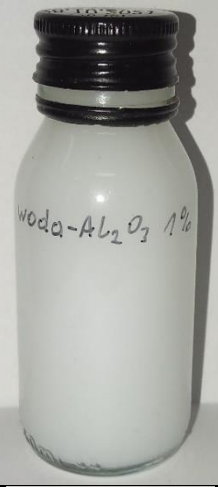
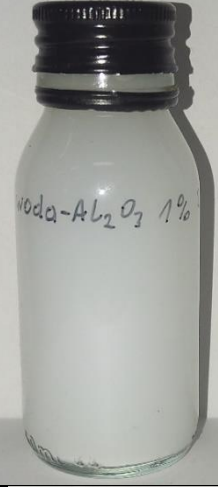
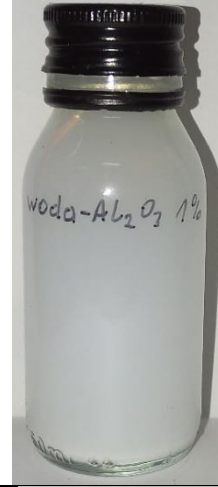
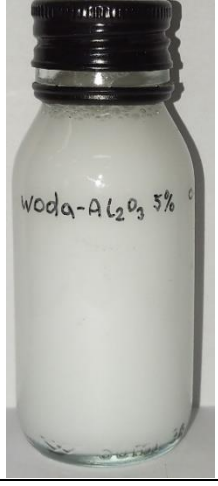
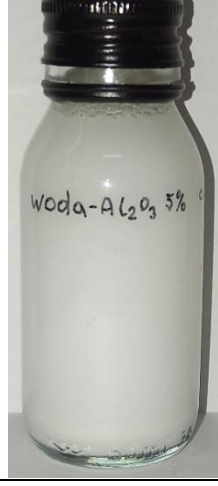
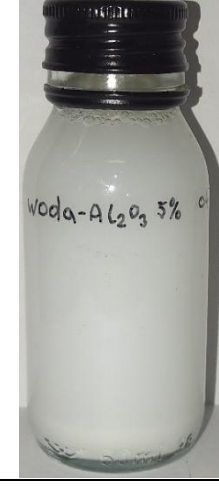
- [104] Minea A.A.: Simulation of Nanofluids Turbulent Forced Convection at High Reynolds Number: A Comparison Study of Thermophysical Properties Influence on Heat Transfer Enhancement. *Flow Turbulence Combust*, 2015, Vol. 94, 555-575.
- [105] Kumar N., Puranik B.P.: Numerical study of convective heat transfer with nanofluids in turbulent flow using a Lagrangian-Eulerian approach. *Applied Thermal Engineering*, 2017, Vol. 111, 1674-1681.
- [106] Uribe S., Zouli N., Cordero M.E., Al-Dahhan M.: Development and validation of a mathematical model to predict the thermal behaviour of nanofluids. *Heat and Mass Transfer*, 2021, Vol. 57, 93-110.
- [107] Xuan Y., Li Q.: Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2000, Vol. 21, 58-64.
- [108] Yildiz M., Akturk A.: Numerical Investigation on Heat Transfer and Hydraulic Performance of Al₂O₃-Water Nanofluids as a Function of Reynolds Number and Flow Velocity. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2021, Vol. 11, 535-547.
- [109] Vasu V., Krishna K.R., Kumar A.C.S.: Analytical prediction of forced convective heat transfer of fluids embedded with nanostructured materials (nanofluids). *PRAMANA – Journal of Physics*. 2007, Vol. 69, 411-421.
- [110] Vajjha R.S., Das D.K., Kulkarni D.P.: Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010, Vol. 53, 4607-4618.
- [111] Asirvatham L.G., Raja B., Lal D.M., Womgwis S.: Convective heat transfer of nanofluids with correlations. *Particuology*. 2011, Vol. 9, 626-631.
- [112] Sajadi A.R., Kazemi M.H.: Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid in circular tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2011, Vol. 38, 1474-1478.
- [113] Abbasian Arani A.A., Amani J.: Experimental study on the effect of TiO₂-water nanofluid on heat transfer and pressure drop. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2012, Vol. 42, 107-115.
- [114] Hussein A.M., Sharma K.V., Bakar R.A., Kadirgama K.: The Effect of Nanofluid Volume Concentration on Heat Transfer and Friction Factor inside a Horizontal Tube. *Journal of Nanomaterials*. 2013, 1-12.
- [115] Zerradi H., Ouaskit S., Dezairi A., Loulijat H., Mizani S.: New Nusselt number correlations to predict the thermal conductivity of nanofluids. *Advanced Powder Technology*. 2014, Vol. 25, 1124-1131.
- [116] Chavan D., Pise A.T.: Experimental investigation of convective heat transfer augmentation using Al₂O₃/water nanofluid in circular pipe. *Heat Mass Transfer*. 2015, Vol. 51, 1237-1246
- [117] Jafarimoghaddam A., Aberoumand S.: An empirical investigation on Cu/Ethylene Glycol nanofluid through a concentric annular tube and proposing a correlation for predicting Nusselt number. *Alexandria Engineering Journal*. 2016, Vol. 55, 1047-1052.
- [118] Saxena R., Gangacharyulu D., Bulasara V.K.: Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Dilute Alumina-Water Nanofluids in a Pipe at Different Power Inputs. *Heat Transfer Engineering*. 2016, 1-45.
- [119] Durga Prasad P.V., Gupta A.: Experimental investigation on enhancement of heat transfer using Al₂O₃/water nanofluid in a u-tube with twisted tape inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016, Vol. 75, 154-161.

- [120] Noghrehabadi A., Pourrajab R.: Experimental investigation of forced convective heat transfer enhancement of γ -Al₂O₃/water nanofluid in a tube. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016, Vol. 30, 943-952.
- [121] Naseema S.N.M., Hussain M.M., Basha S.K., Samad M.A.: Heat Enhancement Of Heat Exchanger Using Aluminium Oxide (Al₂O₃), Copper Oxide (CuO) Nano Fluids With Different Concentrations. *Materials Today: Proceedings*, 2018, Vol. 5, 6481-6488.
- [122] Barzegarian R., Aloueyan A., Yousefi T.: Thermal performance augmentation using water based Al₂O₃-gamma nanofluid in a horizontal shell and tube heat exchanger under forced circulation. *International Communication in Heat and Mass Transfer*, 2017, Vol. 86, 52-59.
- [123] Huang D., Wu Z., Sunden B.: Pressure drop and convective heat transfer of Al₂O₃/water and MWCNT/water nanofluids in a chevron plate heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, Vol. 89, 620-626.
- [124] Cieśliński J.T., Fiuk A., Miciak W., Siemieńczuk B.: Performance of a plate heat exchanger operated with water-Al₂O₃ nanofluid. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol. 831, 188-197.
- [125] Ali M., El-Leathy A., Al-Sofyany Z.: The Effect of Nanofluid Concentration on the Cooling System of Vehicles Radiator. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, Vol. 2014, 1-13.
- [126] Sasank D.S., Naik V.G.: Experimental studies on automotive radiator performance using water and Al₂O₃ nanofluid. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2014, Vol. 3, 1347-1350.
- [127] Subhedar D.G., Ramani B.M., Gupta A.: Experimental investigation of heat transfer potential of Al₂O₃/Water-Mono Ethylene Glycol nanofluids as a car radiator coolant. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2018, Vol. 11, 26-34.
- [128] Cieśliński J., Dawidowicz B., Krzyżak J.: Performance of the PVT solar collector operated with water-Al₂O₃ nanofluid. *Polska Energetyka Słoneczna*, 2016, Nr. 1-4, 5-8.
- [129] Rajput S.N., Shukla D.D., Rajput S.K.: Performance Analysis of Flat Plate Solar Collector using Al₂O₃/Distilled Water Nanofluid: An Experimental Investigation. *Materials Today: Proceedings*, 2019, Vol. 10, 52-59.
- [130] Hosseini S.M.S., Dehaj M.S.: An experimental study on energetic performance evaluation of a parabolic trough solar collector operating with Al₂O₃/water and GO/water nanofluids. *Energy*, 2021, Vol. 234, 1-13.
- [131] ASHRAE 2001 Fundamentals, 2001.
- [132] Cieśliński J.T.: Nucleate pool boiling on porous metallic coatings. *Experimental Thermal Fluid Science*, 2002, vol. 25, 557-564.
- [133] Julia J.E., Hernandez L., Martinez-Cuenca R., Hibiki T., Mondragon R., Segarra C., Jarque J.C.: Measurement and modelling of forced convective heat transfer coefficient and pressure drop of Al₂O₃- and SiO₂-water nanofluids. *Journal of Physics*, 2012, 1-8.
- [134] Ansys Fluent Users Guide 19 R3, Fluent Inc., 2018.

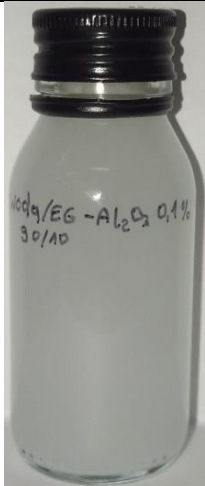
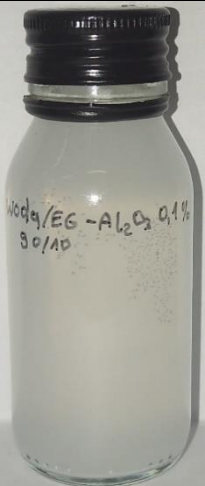
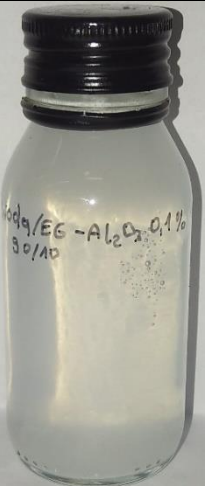
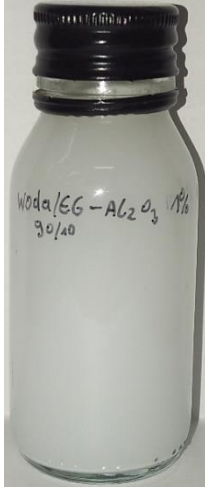
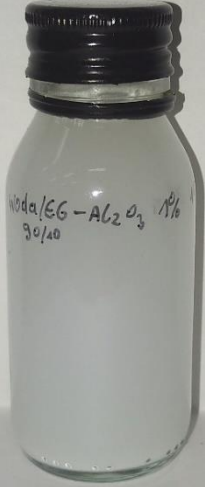
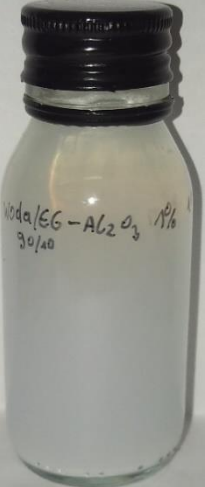
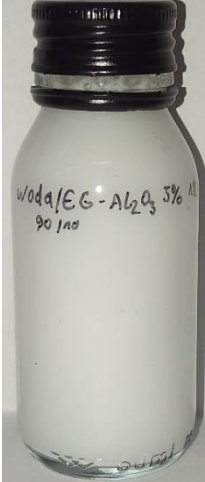
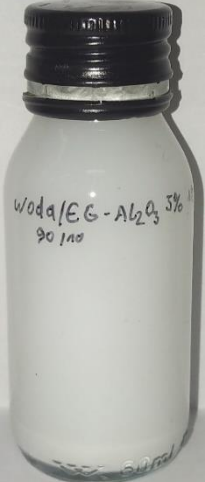
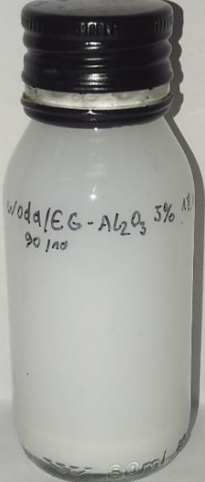
Własności termofizyczne nanocząstek [86] oraz cieczy bazowych w temperaturze 20°C [134].

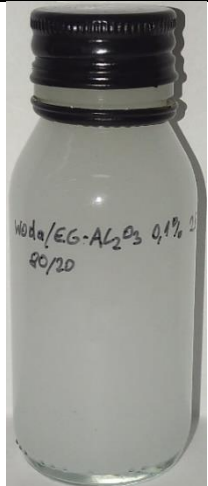
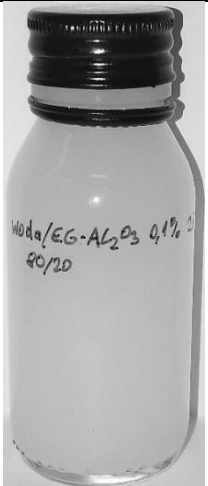
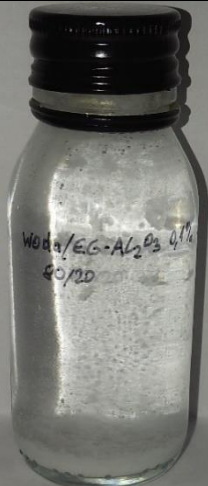
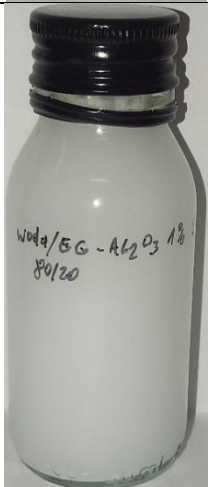
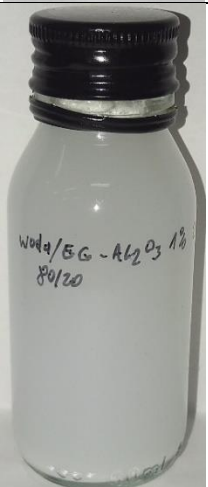
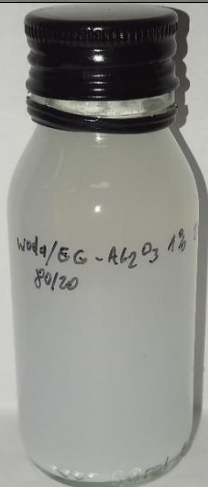
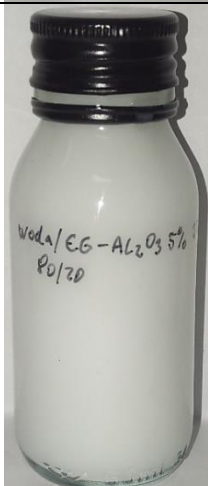
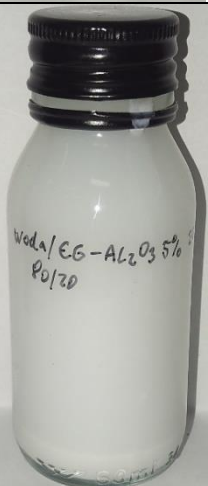
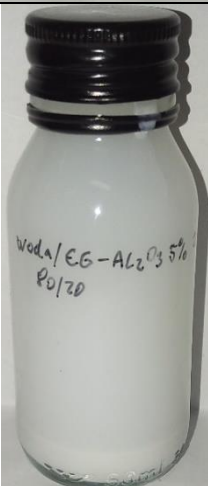
	Al ₂ O ₃	woda	woda/EG 90:10% vol.	woda/EG 80:20% vol.	woda/EG 60:40% vol.
Gęstość [kg/m ³]	3970	998,2	1013,34	1029,72	1059
Dynamiczny współczynnik lepkości [mPas]	-	1,001	1,21	1,65	2,96
Ciepło właściwe [J/(kgK)]	765	4207	3972	3815	3468
Współczynnik przewodzenia ciepła [W/(mK)]	36	0,597	0,545	0,497	0,415

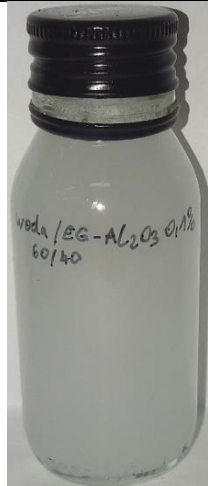
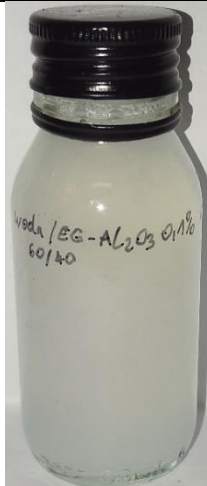
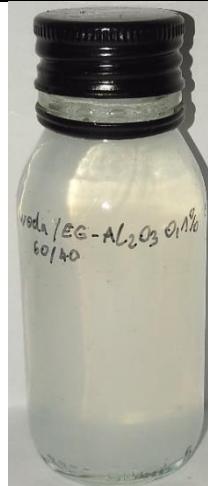
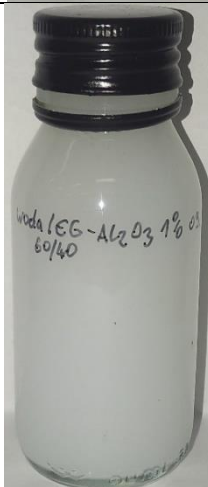
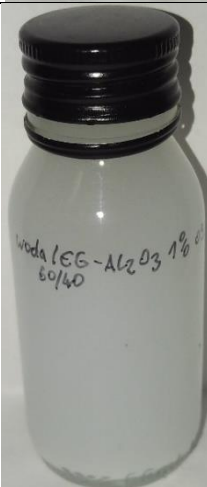
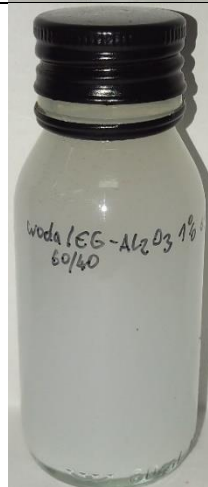
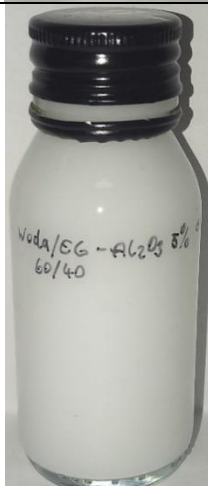
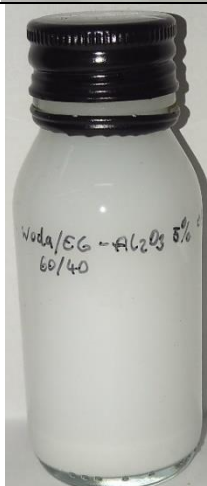
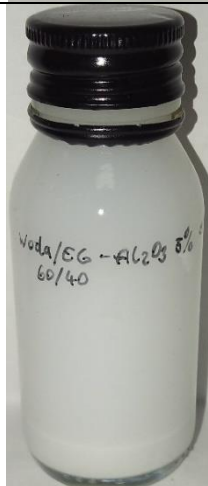
Zdjęcia badanych nanociecz w dniu wytworzenia, 1 oraz 7 dni od wytworzenia.

Ciecz bazowa	Koncentracja masowa	Dzień 0	Dzień 1	Dzień 7
woda	0,1%			
	1%			
	5%			

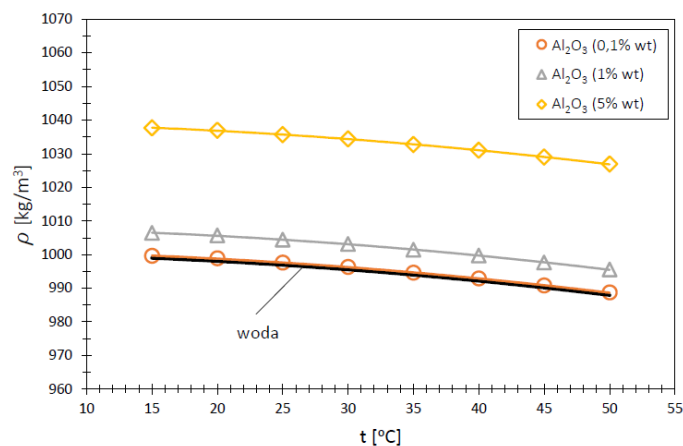


Ciecz bazowa	Koncentracja masowa	Dzień 0	Dzień 1	Dzień 7
woda / EG 90:10 vol.	0,1%			
	1%			
	5%			

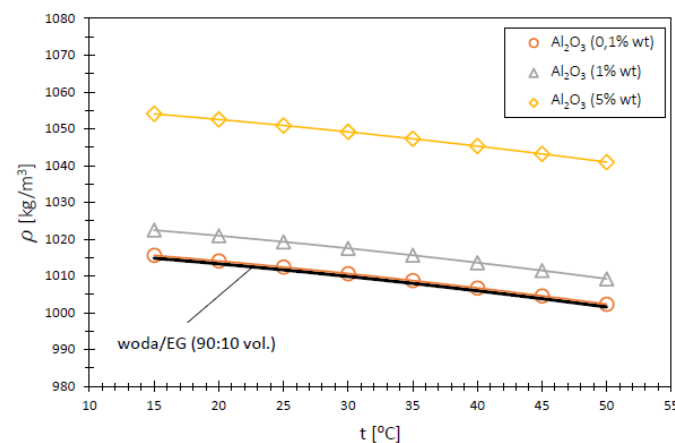
Ciecz bazowa	Koncentracja masowa	Dzień 0	Dzień 1	Dzień 7
woda / EG 80:20 vol.	0,1%			
	1%			
	5%			

Ciecz bazowa	Koncentracja masowa	Dzień 0	Dzień 1	Dzień 7
woda / EG 60:40 vol.	0,1%			
	1%			
	5%			

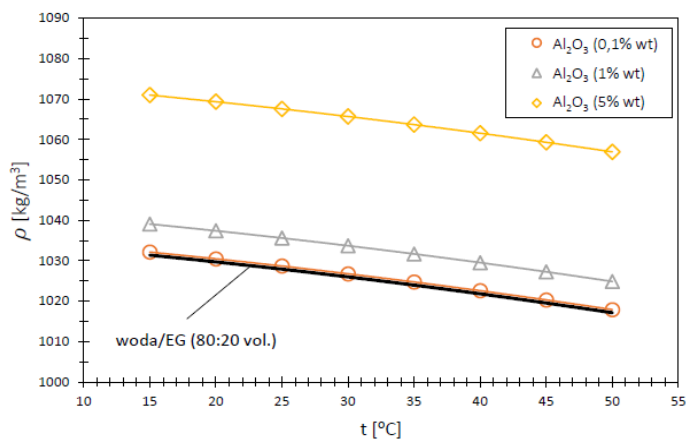
Gęstość nanocieczy obliczona z wzoru (3.21).



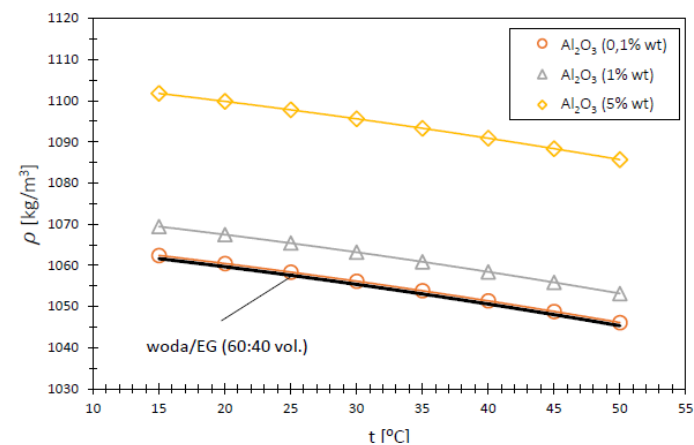
Rys. Z3.1 Gęstość nanocieczy woda-Al₂O₃



Rys. Z3.2 Gęstość nanocieczy woda/EG (90:10)-Al₂O₃

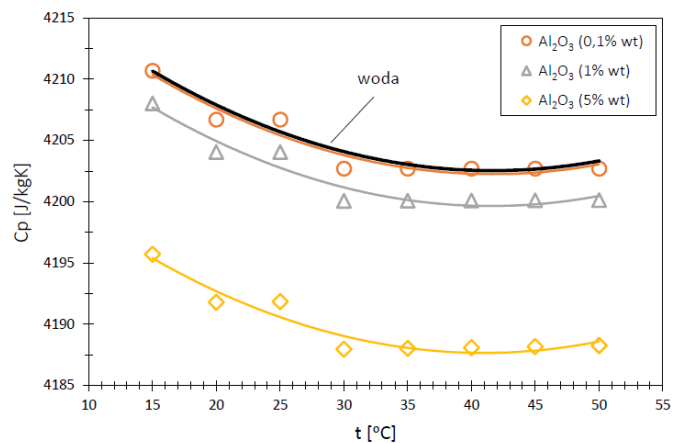


Rys. Z3.3 Gęstość nanocieczy woda/EG (80:20)-Al₂O₃

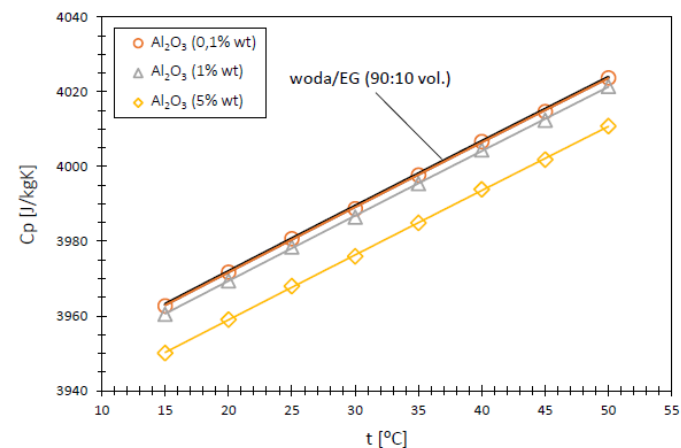


Rys. Z3.4 Gęstość nanocieczy woda/EG (60:40)-Al₂O₃

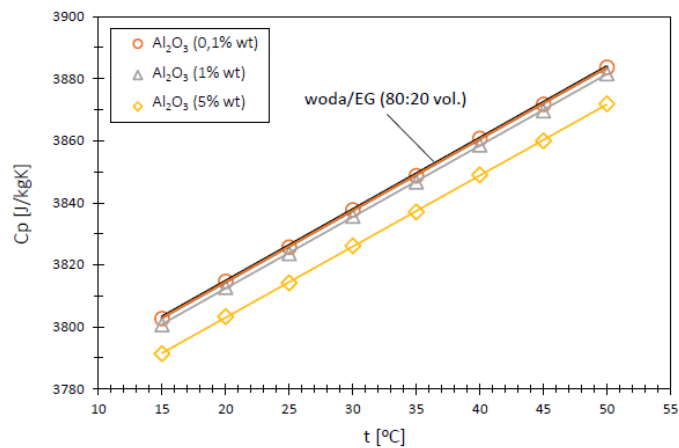
Ciepło właściwe nanociecicy obliczone z wzoru (3.23).



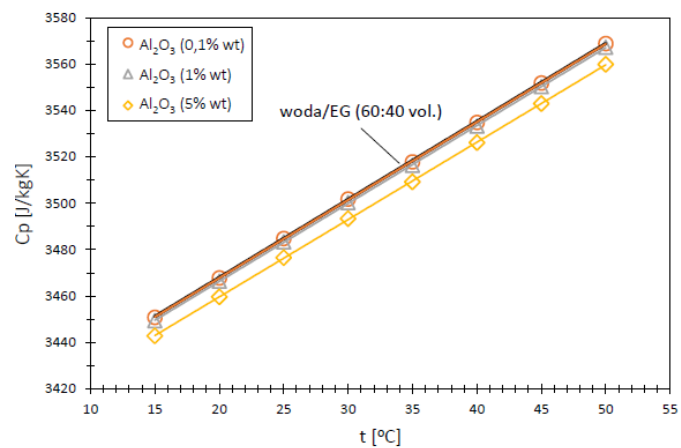
Rys. Z4.1 Ciepło właściwe nanociecicy woda-Al₂O₃



Rys. Z4.2 Ciepło właściwe nanociecicy woda/EG (90:10)-Al₂O₃



Rys. Z4.3 Ciepło właściwe nanociecicy woda/EG (80:20)-Al₂O₃



Rys. Z4.4 Ciepło właściwe nanociecicy woda/EG (60:40)-Al₂O₃

