



Imię i nazwisko autora rozprawy: **Katarzyna A. RONEWICZ**

Dyscyplina naukowa: Mechanika i Budowa Maszyn, wymiana ciepła, wymienniki ciepła

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Badania pierwszego kryzysu wrzenia nanocieczy na poziomych rurkach ze stali nierdzewnej

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Studies of critical heat flux of nanofluids on horizontal stainless steel tubes

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



OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: **Katarzyna A. RONEWICZ**

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/~~nie wyrażam zgody*~~ na bezpłatne korzystanie z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej: Badania eksperymentalne pierwszego kryzysu wrzenia nanocieczy na poziomych rurkach ze stali nierdzewnej do celów naukowych lub dydaktycznych.¹

Gdańsk, dnia 17.09.2015

podpis doktoranta

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r., nr 90, poz. 631) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2012 r., poz. 572 z późn. zm.),² a także odpowiedzialności cywilno-prawnej 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. Janusz 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 art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia 17.09.2015

.....
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, Pomorskiej Bibliotece Cyfrowej oraz poddawania jej procesom weryfikacji i ochrony przed przywłaszczeniem jej autorstwa.

Gdańsk, dnia 17.09.2015

.....
podpis doktoranta

*) niepotrzebne skreślić

¹ Zarządzenie Rektora Politechniki Gdańskiej nr 34/2009 z 9 listopada 2009 r., załącznik nr 8 do instrukcji archiwalnej PG.

² Ustawa z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym: Rozdział 7 Odpowiedzialność dyscyplinarna doktorantów, Art. 226.



OPIS ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy doktorskiej: Katarzyna A. RONEWICZ

Tytuł rozprawy doktorskiej w języku polskim: Badania pierwszego kryzysu wrzenia nanocieczy na poziomych rurkach ze stali nierdzewnej

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Studies of critical heat flux of nanofluids on horizontal stainless steel tubes

Język rozprawy doktorskiej: polski

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

~~**Drugi promotor rozprawy doktorskiej*:**~~

~~**Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej*:**~~

~~**Kopromotor rozprawy doktorskiej*:**~~

Data obrony:

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku polski: pierwszy kryzys wrzenia, nanociecz, kąt zwilżania, lepkość, współczynnik przewodzenia ciepła, konduktywność, pH

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku angielskim: critical heat flux, pool boiling, nanofluid, contact angle, viscosity, thermal conductivity, electrical conductivity, pH

Streszczenie rozprawy w języku polskim: W przedłożonej rozprawie doktorskiej zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych pierwszego kryzysu wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 , woda- TiO_2 oraz woda-Cu na poziomych rurkach ze stali nierdzewnej średnicach zewnętrznych: 1,6 mm, 3 mm oraz 5 mm. Badania przeprowadzono pod ciśnieniem atmosferycznym. Badano nanocieczę o czterech koncentracjach masowych nanocząstek: 0,001%, 0,01%, 0,1% oraz 1%. W celu uzyskania stabilnych nanocieczy zastosowano ultrasonifikację. Dodatkowo w pracy zaprezentowano wyniki pomiarów kąta zwilżania, dynamicznego współczynnika lepkości, współczynnika przewodzenia ciepła, konduktywności oraz pH nanocieczy woda- Al_2O_3 , woda- TiO_2 , woda-Cu, olej termalny- Al_2O_3 , olej termalny- TiO_2 oraz olej termalny-Cu w przedziale koncentracji masowych nanocząstek od 0,001% do 5%, w zakresie temperatury od 20°C do 70°C. Własne wyniki pomiarów własności termofizycznych nanocieczy porównano z wartościami wynikającymi z opublikowanych zależności. Zaproponowano także własną korelację na krytyczną gęstość strumienia ciepła podczas wrzenia nanocieczy.

Streszczenie rozprawy w języku angielskim: This PhD thesis deals with pool boiling and critical heat flux investigation of water- Al_2O_3 , water- TiO_2 and water-Cu nanofluids on smooth, horizontal stainless steel tubes. The experiments were conducted under atmospheric pressure. Nanoparticles were tested at the concentrations of 0.001%, 0.01%, 0,1% and 1% by weight. Ultrasonic vibration was used in order to stabilize the dispersion of the nanoparticles. Although dispersants were not used to stabilize the suspension, the solutions tested exhibited satisfactory stability. Experimental

measurements were performed on smooth, horizontal stainless steel (316) tubes of three outside diameters, i.e. 1.6 mm, 3 mm and 5 mm. Additionally, the results of measurements of contact angle, dynamic viscosity, thermal conductivity, electrical conductivity and pH of nanofluids, i.e. water- Al_2O_3 , water- TiO_2 , water-Cu, thermal oil- Al_2O_3 , thermal oil- TiO_2 and thermal oil-Cu are presented. The thermophysical properties of nanofluids were examined at the concentration of nanoparticles from 0.001% to 5% by weight within temperature range from 20°C to 70 °C, and the results obtained were compared with predictions made by use of existing models for liquid/solid particles mixtures. Own correlation was proposed for the critical heat flux during pool boiling of nanofluids.

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

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

*) niepotrzebne skreślić.

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

POLITECHNIKA GDAŃSKA

Wydział Mechaniczny

**BADANIA PIERWSZEGO KRYZYSU WRZENIA NANOCIECZY
NA POZIOMYCH RURKACH ZE STALI NIERDZEWNEJ**

Rozprawa doktorska

Mgr inż. Katarzyna A. Ronewicz

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

Gdańsk 2015

Kochanemu mężowi Karolowi

*Składam serdeczne podziękowania Panu Promotorowi
prof. dr hab. inż. Januszowi T. Cieślińskiemu za pomysł tematu,
cenne porady, kierownictwo, a także za życzliwą oraz miłą atmosferę,
która umożliwiła szybką realizację celów niniejszej pracy.*

*Składam również podziękowania
Prof. Dr.-Ing. Stawomirowi Smoleniowi
za owocną współpracę, cenne uwagi, udostępnienie laboratorium oraz
serdeczne przyjęcie i wsparcie jakie otrzymałam
podczas każdego pobytu w Bremie.*

*Serdecznie dziękuję także moim rodzicom
za wiarę i wsparcie podczas realizacji niniejszej pracy.*

Wykaz ważniejszych oznaczeń

a [m^2/s] – współczynnik wyrównywania temperatury
 A [m^2] – pole powierzchni
 c [J/kgK] – ciepło właściwe
 d [m] – średnica
 I [A] – natężenie prądu
 L [m] – długość czynna rurki
 p [Pa] – ciśnienie
 P [W] – moc
 r [J/kg] – ciepło parowania
 q [W/m^2] – gęstość strumienia ciepła
 R [Ω] – opór
 R_a [μm] – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości od linii średniej na długości odcinka pomiarowego
 t [$^{\circ}C$] – temperatura
 T [K] – temperatura absolutna
 U [V] – napięcie elektryczne

Ważniejsze litery greckie

α [W/m^2K] – współczynnik przejmowania ciepła
 θ [$^{\circ}$] – kąt zwilżania
 β [$1/K$] – współczynnik rozszerzalności objętościowej
 ϕ [%] – koncentracja objętościowa nanocząstek
 λ [W/mK] – współczynnik przewodzenia ciepła
 ρ [kg/m^3] – gęstość
 σ [N/m] – napięcie powierzchniowe
 μ [Pas] – dynamiczny współczynnik lepkości

Ważniejsze indeksy

bf – cieczy bazowej
cz – czynny
kr1 – krytyczny
l – cieczy
max – maksymalny
min – minimalny
nf – nanocieczy
p – nanocząstki
r – zredukowane
ss – stali nierdzewnej
v – pary
w – wewnętrzna
wp – warstwy porowatej
z – zewnętrzna

SPIS TREŚCI

1.	Wprowadzenie	6
2.	Nanociecze	8
2.1.	Metody wytwarzania nanocieczy	8
2.2.	Właściwości termofizyczne nanocieczy.....	10
2.3.	Zastosowanie nanocieczy.....	22
3.	Wrzenie pęcherzykowe	23
4.	Dotychczasowe badania pierwszego kryzysu wrzenia pęcherzykowego nanocieczy.....	26
5.	Teza pracy	49
6.	Cel i zakres pracy	48
7.	Stanowiska badawcze.....	50
7.1.	Stanowisko do badań pierwszego kryzysu wrzenia.....	50
7.2.	Procedura pomiarowa w badaniach pierwszego kryzysu wrzenia	53
7.3.	Stanowisko badawcze do pomiaru własności termofizycznych nanocieczy.....	55
7.4.	Stanowisko badawcze do pomiaru kąta zwilżania nanocieczy.....	57
7.5.	Charakterystyka badanych powierzchni.....	59
7.6.	Układ przygotowania nanocieczy	58
7.7.	Charakterystyka badanych nanocieczy	58
8.	Opracowanie wyników.....	61
8.1.	Pierwszy kryzys wrzenia nanocieczy	61
8.2.	Kąt zwilżania nanocieczy.....	63
9.	Wyniki badań	67
9.1.	Wyniki badań termofizycznych własności nanocieczy.....	67
9.2.	Wyniki badań kąta zwilżania nanocieczy	86
9.3.	Wyniki badań cieplnych.....	95
9.4.	Dyskusja wyników badań.....	114
10.	Podsumowanie i wnioski.....	110
	Literatura.....	112

1. Wprowadzenie

W literaturze znana jest duża liczba prac eksperymentalnych oraz teoretycznych, w których autorzy starają się określić wartość współczynnika przejmowania ciepła i krytycznej gęstości strumienia ciepła podczas wrzenia. Jednak mimo wieloletnich starań nie udało się do tej pory jednoznacznie opisać procesu wrzenia. Brak nie tylko ogólnego modelu wrzenia, ale również jednego, powszechnie akceptowanego mechanizmu przenoszenia energii cieplnej, co spowodowane jest złożonością i niepowtarzalnością procesu wrzenia. Przede wszystkim wpływ na ten proces mają: gęstość strumienia ciepła, ciśnienie, struktura, materiał oraz geometria powierzchni grzejnej. W procesie wrzenia ważne jest nie tylko uzyskanie jak największych wartości współczynnika przejmowania ciepła, ale także podwyższenie wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła przy jak najmniejszym przegrzaniu. Jest to szczególnie ważne w przypadku reaktorów jądrowych i chemicznych, laserów wysokiej mocy czy układów mikroprocesorowych, które wymagają wysokosprawnych układów chłodzenia.

O intensywności procesu wrzenia decyduje zdolność do generowania pęcherzyków pary, tzn. zdolność nukleacji, która wynika z jednej strony z możliwości generowania stabilnych centrów nukleacji przez powierzchnię grzejną, a z drugiej z termofizycznych właściwości wrzącej cieczy. Intensyfikację procesu wrzenia uzyskuje się więc przez rozwinięcie powierzchni grzejnej, na której zachodzi proces wrzenia, zmianę własności termofizycznych cieczy lub modyfikację powierzchni grzejnej i własności cieczy. Jednym ze sposobów zmiany własności termofizycznych wrzącej cieczy jest dodanie do cieczy bazowej niewielkiej ilości cząstek, o wymiarze poniżej 100 nm, zwanych nanocząstkami, tworząc w ten sposób nanociecze.

Doniesienia literaturowe pokazują, że zastosowanie nanocieczy jako czynnika wrzącego prowadzi zarówno do wzrostu jak i spadku współczynnika przejmowania ciepła. W przypadku pierwszego kryzysu wrzenia uzyskane dotychczas wyniki wskazują na wzrost wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła, niezależnie od rodzaju zastosowanych nanocząstek, ich koncentracji, a także rodzaju cieczy bazowej (rozd. 4). Jednakowoż opublikowane wyniki badań uzyskano na powierzchniach płaskich lub drucikach. Z kolei zarówno ze studiów teoretycznych, jak i badań eksperymentalnych kryzysu wrzenia pęcherzykowego czystych cieczy wiadomo, że geometria powierzchni grzejnej ma wpływ na wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła. Stąd przedstawiona praca dotyczy rozpoznania zjawisk towarzyszących

kryzysowi wrzenia pęcherzykowego wybranych nanocieczy na poziomych rurkach o różnej średnicy. W celu ilościowego opisu przeprowadzonych pomiarów niezbędne było też określenie własności termofizycznych badanych nanocieczy, takich jak: kąt zwilżania, dynamiczny współczynnik lepkości oraz współczynnik przewodzenia ciepła.

2. Nanociecze

W roku 1995 amerykańska grupa badaczy z Argonne National Laboratory opracowała nowy rodzaj cieczy, który nazwano nanocieczami. Są to zawiesiny składające się z fazy bazowej, w której rozproszono metalowe lub niemetalowe cząstki o wymiarach średnic ziaren mniejszych niż 100 nm [1]. Nanocząstkami mogą być zarówno cząstki metaliczne, tj.: Au, Ag, Cu, Ti, Fe, Pt, cząstki sferyczne, nanodruciki, czy niemetaliczne, wśród których wymienić można tlenki: Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , CuO oraz węgiel (grafeny, nanorurki węglowe, wielowarstwowe nanorurki węglowe, pył diamentowy). Najnowszym osiągnięciem są nanocząstki hybrydowe, do których można zaliczyć min.: wielowarstwowe nanorurki węglowe połączone z metalami, np. z żelazem (MWCNT/Fe).

Wśród cech charakterystycznych nanocieczy można wymienić:

- podwyższony współczynnik przewodzenia ciepła w stosunku do cieczy bazowej,
- lepkość zbliżoną do cieczy bazowej,
- brak wyraźnej zmiany napięcia powierzchniowego w stosunku do cieczy bazowej,
- silną zależność kąta zwilżania od koncentracji nanocząstek,
- własności zarówno cieczy newtonowskich jak i cieczy nienewtonowskich [2,3].

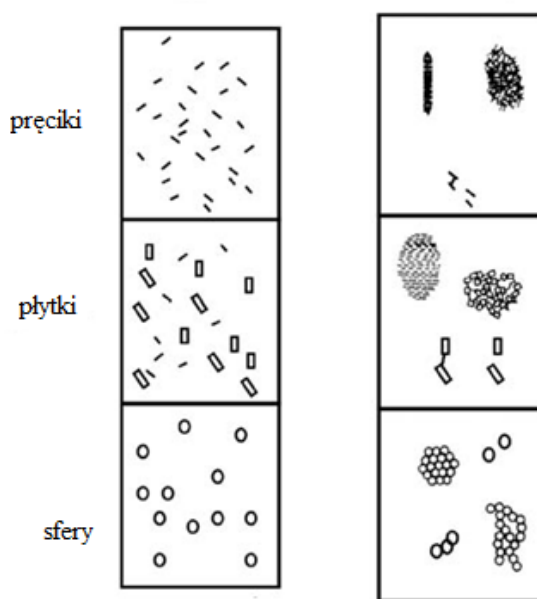
2.1. Metody wytwarzania nanocieczy

Największy problem stwarza dziś otrzymanie stabilnych mieszanin nanoproszków z cieczami bazowymi. Stabilność jest określana jako suma sił przyciągania i odpychania pomiędzy cząstkami zawieszonymi w roztworze. Jeżeli siły zapobiegające przyciąganiu się cząsteczek są mniejsze niż siły van der Waalsa nanocząstki ulegają aglomeracji i sedymentacji w cieczy bazowej (rys. 2.1). Zjawisko sedymentacji, które następuje po jakimś czasie od przygotowania nanocieczy wyklucza ich zastosowanie na skalę przemysłową. W warunkach laboratoryjnych znane są dwie metody wytwarzania nanocieczy:

- metoda jednoetapowa (one – step) – metoda bezpośredniego odparowania, która oparta jest na bezpośrednim formowaniu nanocząstek wewnątrz płynów bazowych,

- metoda dwuetapowa (two – step) – metoda polegająca na wytworzeniu za pomocą dowolnej metody nanoproszku, a następnie na umieszczeniu materiału w cieczy bazowej.

Uzyskanie stabilnych zawiesin wymaga dodatkowo zastosowania odpowiednich czynności fizycznych wykorzystujących mieszadła, płuczki ultradźwiękowe, homogenizatory ultradźwiękowe oraz homogenizatory wysokociśnieniowe. Celem deaglomerowania jest rozbijanie skupisk cząstek tworzących się w nanocieczkach [4].



Rys. 2.1. Proces tworzenia się aglomeratów w nanocieczkach [4]

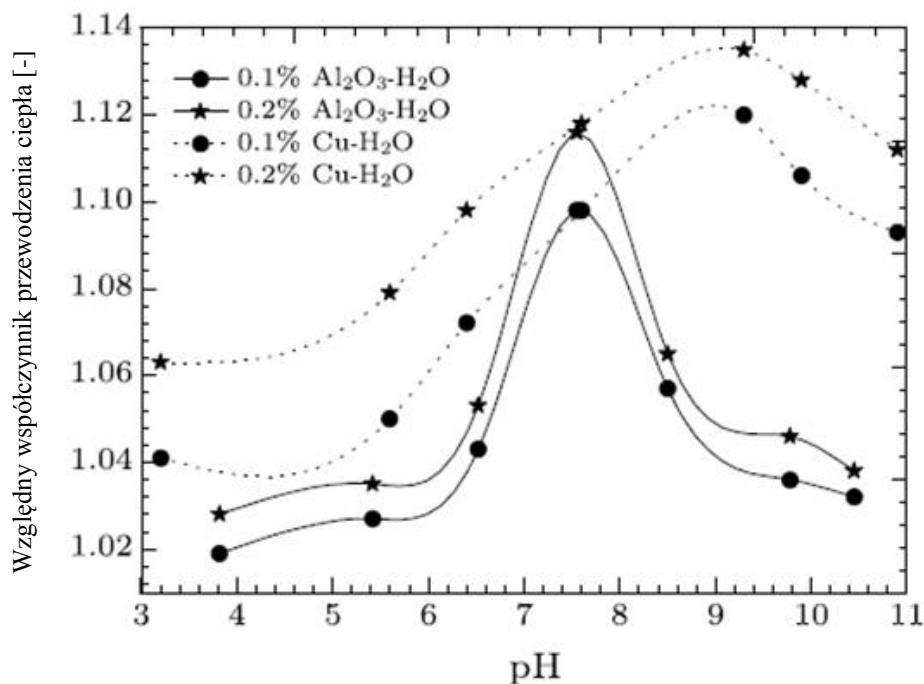
W celu uzyskania stabilnych zawiesin stosowane są różnego rodzaju substancje wspomagające, tzn. substancje powierzchniowo czynne czy regulatory pH. Stosowanie ich jednak ma jedną kluczową dla badań wadę. Do dziś nie zbadano jak substancje te wpływają na proces wrzenia i zjawiska mu towarzyszące. Ze względu na wysokie temperatury procesu może dochodzić do rozpadu zastosowanych stabilizatorów, co z pewnością zmienia właściwości użytych cieczy. Dużą zaletą metody jednoetapowej jest to, że w nanocieczkach uzyskanych tą drogą znajduje się minimalna ilość aglomeratów oraz całkowicie wyeliminowany jest proces utleniania nanocząstek. Niestety jest to dość kosztowny proces, wymagający specyficznych warunków prowadzenia, który umożliwia wytwarzanie w ten sposób bardzo małych ilości nanocieczki. Obecnie większość badaczy skupia się na metodzie dwustopniowej, gdyż w ten sposób, bardzo małym kosztem, można wytwarzać duże ilości nanocieczki [5].

2.2. Właściwości termofizyczne nanocieczy

W ciągu ostatnich lat duży nacisk kładzie się na badania własności termofizycznych nanocieczy, tj.: współczynnik przewodzenia ciepła, lepkość, konduktywność, pH czy kąt zwilżania w celu określenia ich wpływu na proces wymiany ciepła, a także na opracowanie korelacji służących do obliczenia współczynnika przejmowania ciepła czy q_{kr1} . Z racji ograniczonej objętości rozprawy, przy ogromnej liczbie pozycji literaturowych, poniżej zostaną przedstawione tylko nieliczne, wybrane prace.

Współczynnik przewodzenia ciepła

Jak wynika z badań nanociecze charakteryzują się dużo większymi współczynnikami przewodzenia ciepła w porównaniu do cieczy bazowych nawet wówczas, kiedy koncentracja nanocząstek jest bardzo mała. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy zmienia się w zależności od wielkości, kształtu i materiału nanocząstek. Cząstki metaliczne charakteryzują się dużo wyższymi wartościami współczynnika przewodzenia ciepła niż cząstki niemetaliczne, np. tlenki [6]. Dodatkowym czynnikiem jest temperatura, która także wpływa na wartość współczynnika przewodzenia ciepła nanocieczy. Kolejnym czynnikiem wpływającym na wartość współczynnika przewodzenia ciepła jest pH. Wang i Li [7] wykazali, że istnieje optymalna wartość pH nanocieczy, w której wartość współczynnika przewodzenia przyjmuje najwyższe wartości dla badanej zawiesiny. Wykazali, że w przypadku nanocieczy woda- Al_2O_3 oraz woda-Cu o koncentracji masowej wynoszącej 0,4% współczynnik przewodzenia ciepła może wzrosnąć nawet o 15% w stosunku do cieczy bazowej. Ponieważ pH ma kluczowy wpływ na stabilność nanocieczy, należy tak dobrać te parametry, aby własności termofizyczne i stabilność nanocieczy były najbardziej zadowalające dla danego zastosowania (rys. 2.2).

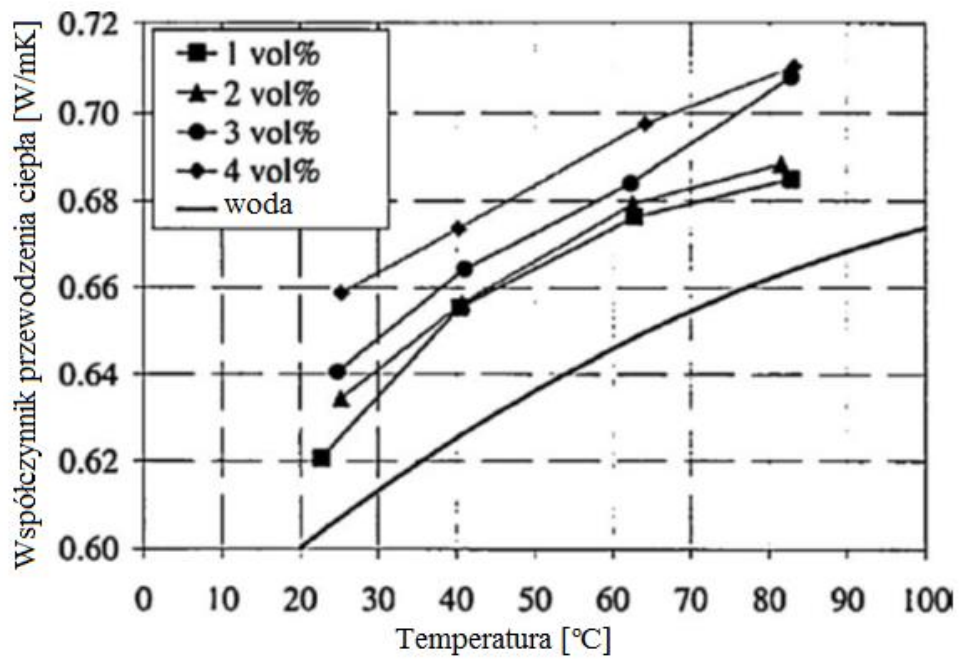


Rys. 2.2. Zależność względnego współczynnika przewodzenia ciepła od pH nanocieczy [7]

Saidur i in. [8] stwierdzili, że współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy miedź-glikol etylenowy wzrasta o 40% w stosunku do czystej cieczy bazowej. Zmierzyli, że wartość współczynnika przewodzenia ciepła w przypadku nanocieczy woda-Cu o koncentracji objętościowej wynoszącej 0,1% wzrosła o 23,8% w stosunku do współczynnika przewodzenia ciepła wody. Za przyczynę tego wzrostu wskazali to, że nanocząstki miedzi charakteryzują się dużą powierzchnią właściwą oraz dużym współczynnikiem przewodzenia ciepła. Zauważyli również, że współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy wzrasta wraz z koncentracją nanocząstek i maleje wraz z upływem czasu mijającego od przygotowania nanocieczy. Znaleźli także ścisłe powiązanie pomiędzy wartością współczynnika przewodzenia ciepła nanocieczy i rodzajem nanocząstek. Okazało się, że współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda-MWCNT jest wyższy niż w przypadku nanocieczy woda-SiO₂. Dodatkowo stwierdzili także wpływ stosunku powierzchni nanocząstek do objętości nanocząstek. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy znacznie wzrastał wraz ze zmniejszaniem promienia nanocząstek.

Lee i in. [9] wykazali, że współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy zależy od pH, temperatury i obecności środków powierzchniowo-czynnych. Przy optymalnej

wartości pH odnotowali wzrost współczynnika przewodzenia ciepła o około 11% w stosunku do cieczy bazowej (rys. 2.3).



Rys. 2.3. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury [9]

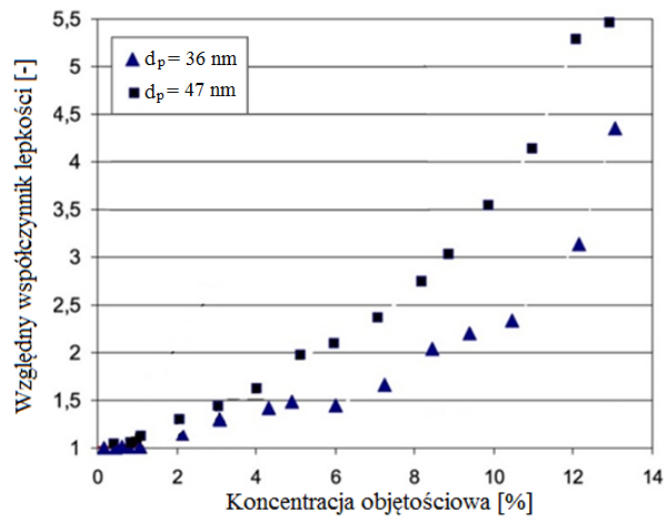
Do obliczenia współczynnika przewodzenia ciepła stosuje się różne klasyczne korelacje dla mieszanin ciecz-cząstki stałe, które przedstawia tab. 2.1.

Tabela 2.1. Zestawienie wybranych korelacji stosowanych do obliczania współczynnika przewodzenia ciepła

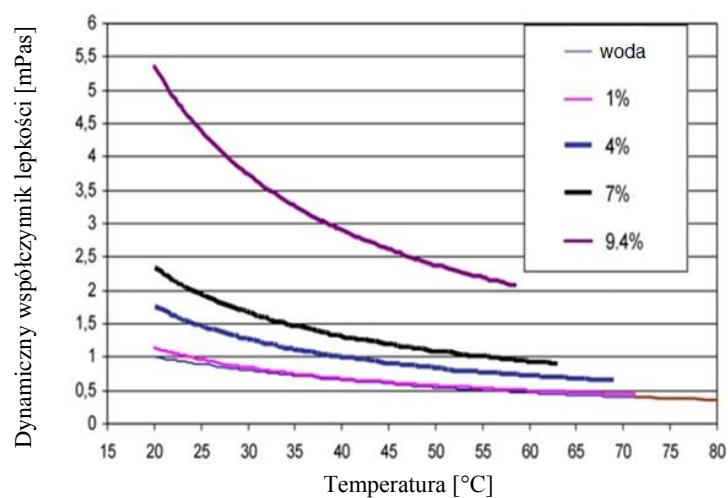
Autor	Wzór	Równanie
Maxwell [10]	$\lambda_{nf} = \lambda_{bf} + 3\phi \frac{\lambda_p - \lambda_{bf}}{2\lambda_{bf} + \lambda_p - \phi(\lambda_p - \lambda_{bf})} \lambda_{bf}$	(2.1)
Timofeeva [11]	$\lambda_{nf} = \lambda_{bf}(1 + 3\phi)$	(2.2)
Hamilton i Crosser [12]	$\lambda_{nf} = \lambda_{bf} \left[\frac{\lambda_p + (n-1)\lambda_{bf} - (n-1)\phi(\lambda_{bf} - \lambda_p)}{\lambda_p + (n-1)\lambda_{bf} + \phi(\lambda_{bf} - \lambda_p)} \right]$ <p>gdzie: $n = \frac{3}{\psi}$ ψ – współczynnik kształtu nanocząstek $\psi = 0,5$ dla kulki, 1 dla rurki</p>	(2.3)
Phuoc [13]	$\lambda_{nf} = \lambda_{bf} \left(1 + \frac{3\phi \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_{bf}} - 1 \right)}{\frac{\lambda_p}{\lambda_{bf}} + 2 - \phi \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_{bf}} - 1 \right)} \right)$	(2.4)
Nanda [14]	$\lambda_{nf} = \lambda_{bf} \left(1 + \frac{\phi p \frac{\lambda_p}{\lambda_{bf}}}{p + \frac{2a_k \lambda_p}{d\lambda_{bf}}} \right)$ <p>gdzie: p – współczynnik kształtu nanorurek a_k – promień Kapitzy</p>	(2.5)
Duangthongsuk i Wongwises [10]	$\lambda_{nf} = (a + b\phi)\lambda_{bf}$ <p>gdzie: a, b – współczynniki zależne od temperatury</p>	(2.6)
You i Choi [5]	$\lambda_{nf} = \lambda_{bf} \left[\frac{\lambda_p + 2\lambda_{bf} + 2(\lambda_p - \lambda_{bf})(1 - \beta)^3 \Phi}{\lambda_p + 2\lambda_{bf} - (\lambda_p - \lambda_{bf})(1 - \beta)^3 \Phi} \right]$ <p>gdzie: $\beta = 0,1$ – stosunek grubości nanowarstwy do promienia nanocząstki</p>	(2.7)

Lepkość

Dotychczasowe badania dowodzą, że dodatek niewielkiej ilości nanocząstek zwiększa lepkość nanocieczy. W przypadkach dużych koncentracji nanocieczy wzrost jest nawet kilkukrotny. Nguyen i in. [15] badali współczynnik lepkości nanocieczy woda- Al_2O_3 dla różnych koncentracji objętościowych, w zakresie od 1% do 13%. Badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej. Pomiar wykazały, że współczynnik lepkości badanej nanocieczy rośnie wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek (rys. 2.4). Dodatkowo wykazali oni również, że na wartość dynamicznego współczynnika lepkości decydujący wpływ ma temperatura, której wzrost powoduje spadek wartości współczynnika lepkości (rys. 2.5).

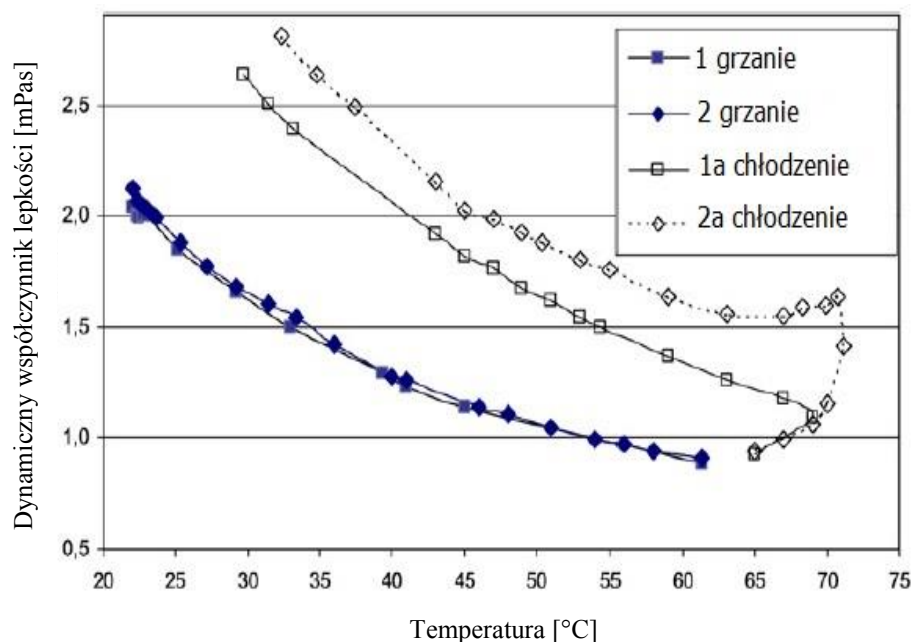


Rys. 2.4. Zależność względnego współczynnika lepkości nanocieczy woda- Al_2O_3 od koncentracji objętościowej nanocząstek [15]



Rys. 2.5. Zależność dynamicznego współczynnika lepkości od temperatury nanocieczy woda- Al_2O_3 [15]

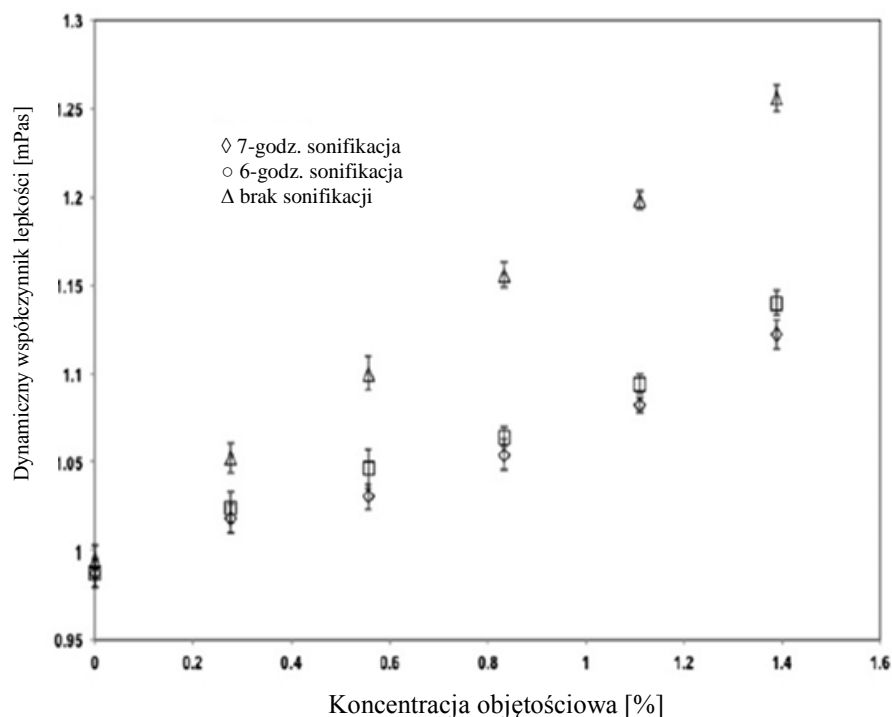
Podczas swoich badań odkryli również zjawisko histerezy współczynnika lepkości [15]. Zjawisko to polega na występowaniu różnicy pomiędzy wartościami współczynnika lepkości uzyskanymi dla tej samej nanocieczy, w tej samej temperaturze, spowodowane grzaniem zawiesiny powyżej pewnej wartości temperatury, zwanej temperaturą krytyczną. Po przekroczeniu tej temperatury wartości współczynnika lepkości, mierzone w trakcie chłodzenia, są o wiele wyższe niż przed jej podgrzaniem (rys. 2.6).



Rys. 2.6. Histereza dynamicznego współczynnika lepkości nanocieczy woda- Al_2O_3 [15]

Na wartość współczynnika lepkości mają wpływ także inne czynniki. Jednym z nich jest aglomeracja cząstek oraz późniejsza sedymentacja nanocieczy. Duan i in. [16] zauważyli, że wartości współczynnika lepkości zmierzone w przypadku świeżych nanocieczy były o wiele niższe niż wartości zmierzone po dwóch tygodniach od przygotowania próbek.

Na współczynnik lepkości nanocieczy duży wpływ ma również sposób dyspersji nanocząstek w cieczy bazowej. Badania Silambarasana i in. [17] nanocieczy woda- TiO_2 wykazały, że ciecze poddane ultrasonifikacji trwającej dłużej niż 6 godzin charakteryzują się niższym współczynnikiem lepkości, niż nanociecze niepoddane ultrasonifikacji (rys. 2.7).



Rys. 2.7. Wpływ czasu ultrasonifikacji na wartość dynamicznego współczynnika lepkości nanocieczonego woda-TiO₂ [17]

Masuda i in. [5] mierzyli współczynnik lepkości nanocieczonego woda-TiO₂ o średnim wymiarze cząstek 27 nm i koncentracji objętościowej wynoszącej 4,3%. Okazało się, że współczynnik lepkości nanocieczonego wzrósł o 60% w stosunku do współczynnika lepkości cieczy bazowej. Wang i in. [18] również zmierzili współczynnik lepkości nanocieczonego woda-Al₂O₃ o średnim wymiarze cząstek wynoszącym 28 nm i również zaobserwowali wzrost wartości współczynnika lepkości nanocieczonego aż o 86% w stosunku do czystej wody. W obu przypadkach do dyspersji nanocząstek zastosowano mieszadła mechaniczne. Pak i Cho [19] zbadali współczynnik lepkości nanocieczonego woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ o średnim wymiarze cząstek odpowiednio 13 nm oraz 27 nm. Zaobserwowali kilkukrotny wzrost współczynnika lepkości badanych nanocieczonego w stosunku do cieczy bazowych. Różnicę tę tłumaczyli wpływem metody dyspersji oraz wymiarem nanocząstek, jak również różnego rodzaju metodami stabilizacji zawiesin. Wyniki, które uzyskali w bardzo dużym stopniu różniły się od wartości teoretycznych, które można uzyskać np. za pomocą modelu Einsteina (tab. 2.2).

Wartość pH nanocieczonego ma także wpływ na ich współczynnik lepkości. Wang i Li [7] zaobserwowali, że dla każdej nanocieczonego istnieje taka wartość pH, w której współczynnik lepkości nanocieczonego przy danej temperaturze jest najniższy.

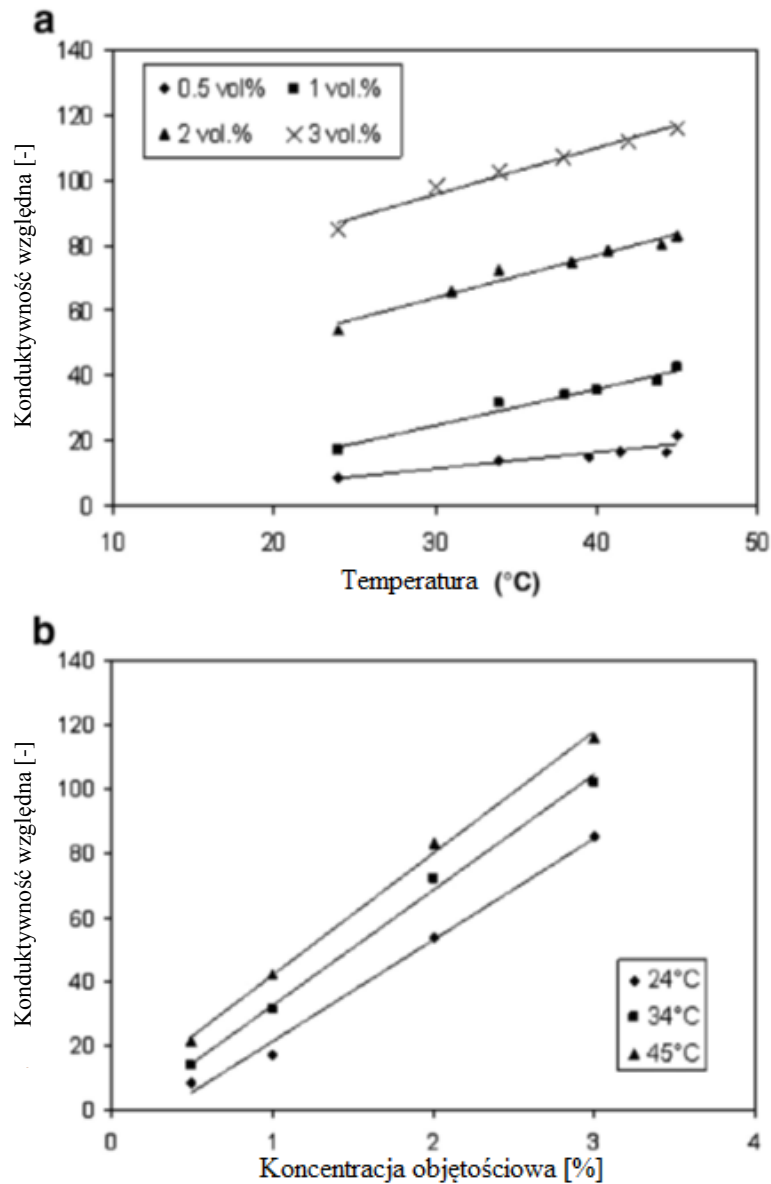
Podobnie jak w przypadku współczynnika przewodzenia ciepła do obliczenia współczynnika lepkości również stosuje się różne klasyczne korelacje dla mieszanin ciec-ząstki stałe. Wybrane korelacje zostały przedstawione w tab. 2.2.

Tabela 2.2. Zestawienie korelacji opisujących dynamiczny współczynnik lepkości

Autor	Wzór	Równanie
Einstein [12]	$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2.5\phi)$	(2.8)
Brinkman [20]	$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 - \phi)^{2.5}$	(2.9)
Nielsen [21]	$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 1.5\phi)e^{\phi/(1-r)}$ gdzie: r – współczynnik maksymalnego upakowania cząstek	(2.10)
Krieger i Dougherty [22]	$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 - \phi/r)^{-2.5r}$	(2.11)
Vajjha i Das [23]	$\mu_{nf} = A_1 e^{(A_2\phi)} \mu_{bf}$ gdzie: A ₁ i A ₂ – współczynniki zależne od rodzaju nanocząstek	(2.12)
Wang [20]	$\mu_{nano} = \mu_{bf} (1 + 7.3\phi + 123\phi^2)$	(2.13)
Duangthongsuk i Wongwises [10]	$\mu_{nano} = \mu_{bf} (a + b\phi + c\phi^2)$ gdzie: a, b i c – współczynniki zależne od temperatury	(2.14)

Konduktywność

Dotychczasowe, nieliczne badania wykazały, że konduktywność nanociec zależy od kilku czynników. Jednym z nich jest koncentracja nanocząstek. Z badań Ganguly i in. [24] wynika, że konduktywność nanociec z cząstkami Al₂O₃ rośnie liniowo wraz ze wzrostem koncentracji objętościowej nanocząstek. Dodatkowo zauważyli, że konduktywność wzrasta również ze wzrostem temperatury (rys. 2.8).



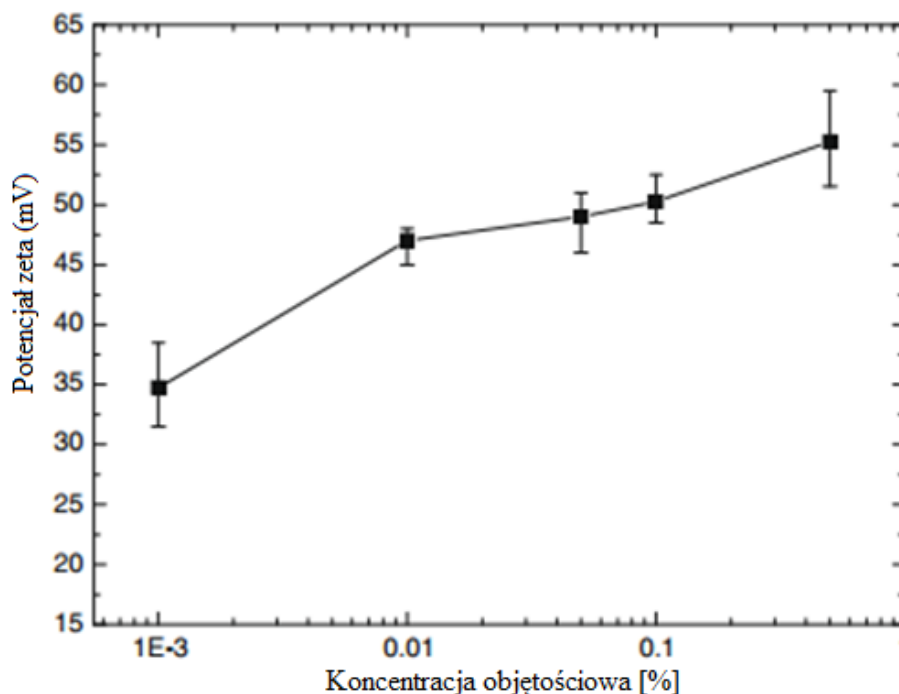
Rys. 2.8. Konduktywność względna nanocieczy w funkcji a) temperatury; b) koncentracji objętościowej nanocząstek [24]

Potencjał zeta

Potencjał zeta to potencjał elektryczny, który istnieje na granicy faz (adsorpcyjnej i dyfuzyjnej) cząsteczki, która znajduje się w małej odległości od powierzchni [25]. Potencjał zeta jest funkcją ładunku na powierzchni cząsteczki, warstwy adsorbowanej do niej przylegającej oraz natury i kompozycji otaczającego medium, w którym zawieszona jest cząsteczka.

Wartości potencjału zeta zawierające się w granicach 30-60 mV świadczą o stabilności cieczy. Kim i in. [26] badali potencjał zeta nanocieczy woda- Al_2O_3 w zależności od koncentracji i pH zawiesin. Wykazali, że potencjał zeta zmienia się

wraz ze zmianą koncentracji, która wyniosła od 0,001% do 0,5% objętościowych. W badanym zakresie koncentracji nanocząstek potencjał zeta mieścił się w obszarze wartości świadczących o stabilności badanej nanocieczy (rys. 2.9).

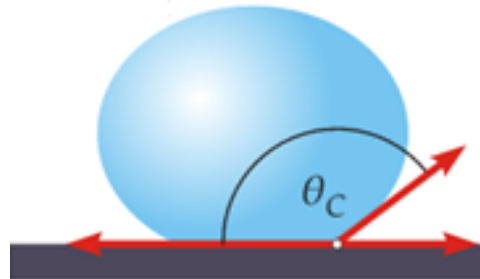


Rys. 2.9. Potencjał zeta nanocieczy woda-Al₂O₃ w funkcji koncentracji objętościowej nanocząstek [26]

Kim i in. wykazali także, że potencjał zeta zmieniał się nieznacznie z czasem upływającym od przygotowania nanocieczy, co również świadczy o stabilności badanej nanocieczy. Poza tym okazało się, że nanociecz jest stabilna w obszarze niskich wartości pH, a wraz ze wzrostem zasadowości stabilność drastycznie spada. Świadczy to o tym, że nanozawiesina jest stabilna tylko w określonym, charakterystycznym dla danego nanoproszku, zakresie pH. Jest to spowodowane zapewne interakcjami, które zachodzą pomiędzy cząstkami cieczy bazowej i nanoproszku, a które odpowiedzialne są za stabilność całego układu [26].

Kąt zwilżania

Kątem zwilżania nazywa się kąt utworzony pomiędzy płaską powierzchnią ciała stałego i płaszczyzną styczną do powierzchni cieczy graniczącej z ciałem stałym [27] - rys. 2.10.

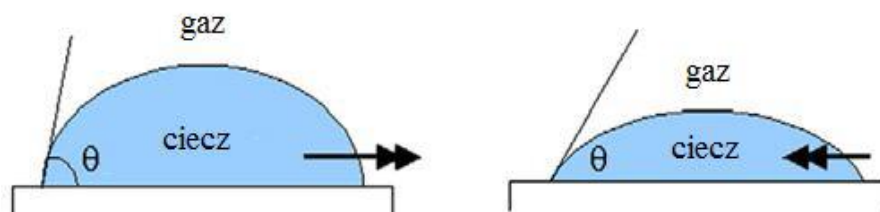


Rys. 2.10. Kąt zwilżania [27]

Wyróżnia się dwa rodzaje kąta zwilżania: kąt statyczny i kąt dynamiczny. Statycznym kątem zwilżania nazywa się kąt utworzony przez kroplę osadzoną na idealnie gładkiej, sztywnej powierzchni, gdy nie zachodzi żaden ruch tej cieczy [28].

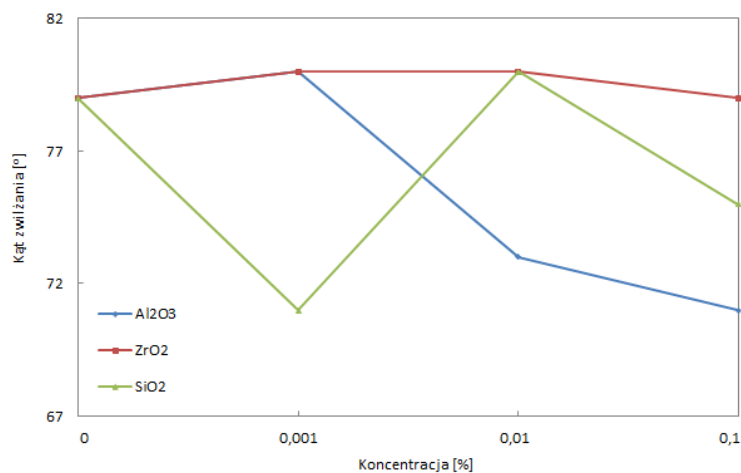
Dynamicznym kątem zwilżania nazywa się natomiast kąt utworzony przez kroplę osadzoną także na płaskiej, sztywnej powierzchni, z tą różnicą, że jej kształt zmienia się w trakcie trwania eksperymentu. Spowodowane to jest brakiem równowagi sił występujących w obrębie układu. Wyróżnia się dwa przypadki dynamicznego kąta zwilżania (rys. 2.11):

- wstępujący kąt zwilżania, gdy linia kontaktu międzyfazowego przesuwa się w stronę fazy gazowej,
- zstępujący kąt zwilżania, kiedy linia kontaktu przesuwa się w stronę fazy ciekłej [28].



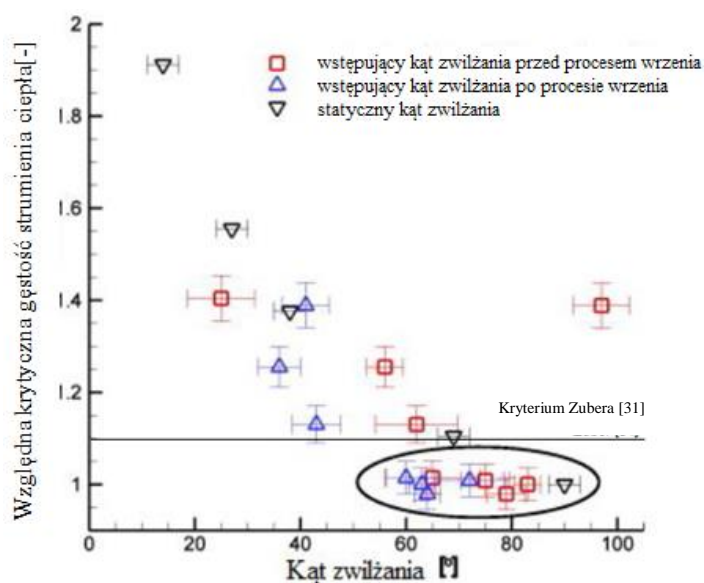
Rys. 2.11. Dynamiczny kąt zwilżania [28]

Dotychczasowe badania kąta zwilżania nanocieczy pozwoliły stwierdzić, że jest on uzależniony od wielu czynników. Kim i in. [29] wykazali, że już niewielki dodatek nanocząstek powoduje zmianę kąta zwilżania nanocieczy (rys. 2.12).



Rys. 2.12. Statyczny kąt zwilżania nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-ZrO₂ oraz woda-SiO₂ na powierzchni stalowej [29]

Coursey i Kim [30] wykazali, że kąt zwilżania zmienia się w trakcie procesu wrzenia. Przed eksperymentem jego wartości były większe niż po przeprowadzeniu procesu wrzenia (rys. 2.13). Spowodowane to jest tworzącą się na powierzchni grzejnej nanowarstwą, która zmienia jej chropowatość, powodując zwiększenie zdolności zwilżania danej powierzchni przez wrzącą ciecz



Rys. 2.13. Zależność krytycznej gęstości strumienia ciepła od wartości kąta zwilżania dla wody na czystej powierzchni miedzianej oraz pokrytej tlenkiem miedzi [30]

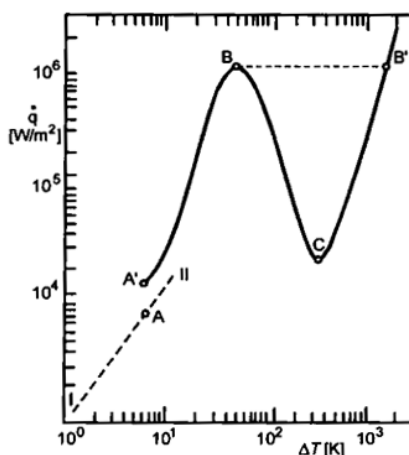
2.3. Zastosowanie nanocieczy

Właściwości termofizyczne nanocieczy umożliwiają zastosowanie ich w wielu gałęziach przemysłu, w których mogą zastąpić konwencjonalne ciecze robocze, charakteryzujące się min. gorszą przewodnością cieplną. Nanociecze pozwalają na przenoszenie większych niż ciecz bazowa strumieni ciepła, a przez to umożliwiają miniaturyzację istniejących układów.

Zastosowanie nanocieczy prowadzi więc do zmniejszenia zużycia energii, materiałów oraz zanieczyszczenia środowiska. Nanociecze mogą być wykorzystywane w transporcie, w chłodnicach samochodowych. Dodatkowo możliwość stosowania nanocieczy zmniejsza ilości stosowanych cieczy, co skutkuje minimalizacją silników, pomp czy wymienników ciepła. Mniejsze spalanie z kolei doprowadzi do zmniejszenia emisji zanieczyszczeń do środowiska. Miniaturyzacja ma duże znaczenie w elektronice i chłodzeniu układów scalonych. Dzięki swym rozmiarom nanocząstki nie zatykają niewielkich kanałów, którymi doprowadzane są chłodziwa. Nanotechnologia może znaleźć także zastosowanie w medycynie. Nanocząsteczki mogą być nośnikami różnych leków, ze względu na ich dużą powierzchnię właściwą. Dodatkowo zauważono, że nanocząstki magnetyczne posiadają większe powinowactwo do komórek nowotworowych niż do komórek zdrowych, co umożliwi sprawną i szybką lokalizację zmian.

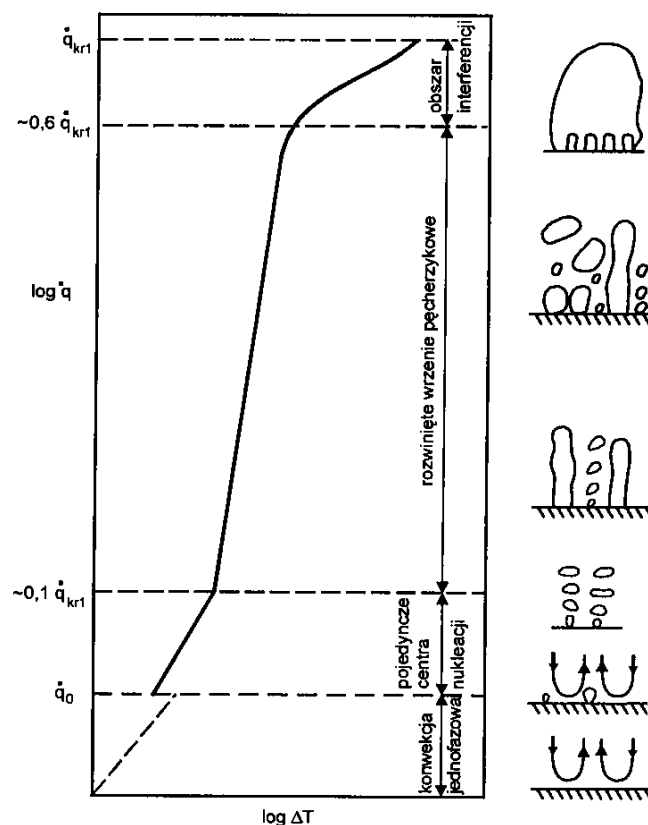
3. Wrzenie pęcherzykowe

Wrzeniem nazywa się proces, w którym w wyniku doprowadzenia ciepła do cieczy, po przekroczeniu temperatury nasycenia, dochodzi do powstania nowej fazy, którą jest para [31]. Wyróżnić można trzy podstawowe rodzaje wrzenia w dużej objętości: pęcherzykowe, przejściowe i błonowe. Z przypadkiem wrzenia w objętości mamy do czynienia, gdy geometria przestrzeni i hydrodynamika przepływu nie wpływa istotnie na proces wymiany ciepła, w przeciwnym przypadku mówimy o wrzeniu w przepływie. Niniejsza praca dotyczy heterogenicznego wrzenia pęcherzykowego w dużej objętości. Występuje ono, gdy na powierzchni grzejnej powstają losowo miejsca, które nazywa się centrami nukleacji, a które generują pęcherzyki pary. W procesie tym odrywają się one od powierzchni grzejnej z różną częstotliwością, a następnie poruszają swobodnie w cieczy równocześnie zwiększając swoją objętość. Jest to spowodowane parowaniem cieczy do wnętrza pęcherzyków. Od pozostałych rodzajów wrzenia, wrzenie pęcherzykowe różni się przede wszystkim tzw. zakresem przegrzania, czyli różnicą temperatur powierzchni grzejnej i temperatury nasycenia cieczy będącej w bezpośrednim kontakcie z powierzchnią grzejną. Na rys. 3.1 przedstawiono zakres występowania rodzajów wrzenia w dużej objętości. Zakres wrzenia pęcherzykowego mieści się pomiędzy punktami A'B'. Punkt A' symbolizuje miejsce, w którym na powierzchni grzejnej pojawia się pierwsze aktywne centrum nukleacji, przy możliwie jak najmniejszym przegrzaniu. Zjawisko to jest bardzo korzystne, gdyż powoduje skokową zmianę intensywności wymiany ciepła w porównaniu do prostej konwekcji jednofazowej, która została oznaczona na wykresie linią I-II.



Rys. 3.1. Krzywa wrzenia wody na powierzchni gładkiej [31]

Na rys. 3.2 przedstawiono krzywą wrzenia pęcherzykowego oraz dodatkowo odpowiadające poszczególnym obszarom struktury parowe. Na wykresie widoczne są trzy odcinki o różnych nachyleniach, które odpowiadają trzem ustrojom wrzenia pęcherzykowego [31].



Rys. 3.2. Krzywa wrzenia pęcherzykowego i struktury parowe [31]

Kryzys wrzenia pęcherzykowego

W szczególnym przypadku, gdy ścianka jest ogrzewana strumieniem o stałej gęstości, może dojść do jej zniszczenia (ang. *burnout*). Samo zjawisko nosi nazwę kryzysu wrzenia pęcherzykowego (ang. *boiling crisis lub departure from nucleate boiling*), a gęstość strumienia ciepła, przy której dochodzi do kryzysu wrzenia, jest określana jako krytyczna gęstość strumienia ciepła (ang. *critical heat flux – CHF*). Wśród istniejących hipotez dotyczących pierwszego kryzysu wrzenia można wymienić [31]:

- niestabilność hydrodynamiczną powierzchni rozdziału faz ciec-z-para,
- kryterium stabilności energii mechanicznej,
- kryterium Dhira i Liawa,

- kryterium równowagi sił na odparowującym pęcherzyku,
- kryterium maksymalnego strumienia ciepła na obszarze suchej plamy,
- kryterium zwilżania suchych plam,
- propagację fali temperatury,
- kryterium niestabilności powierzchni menisku.

Hipotezy dotyczące kryzysu wrzenia

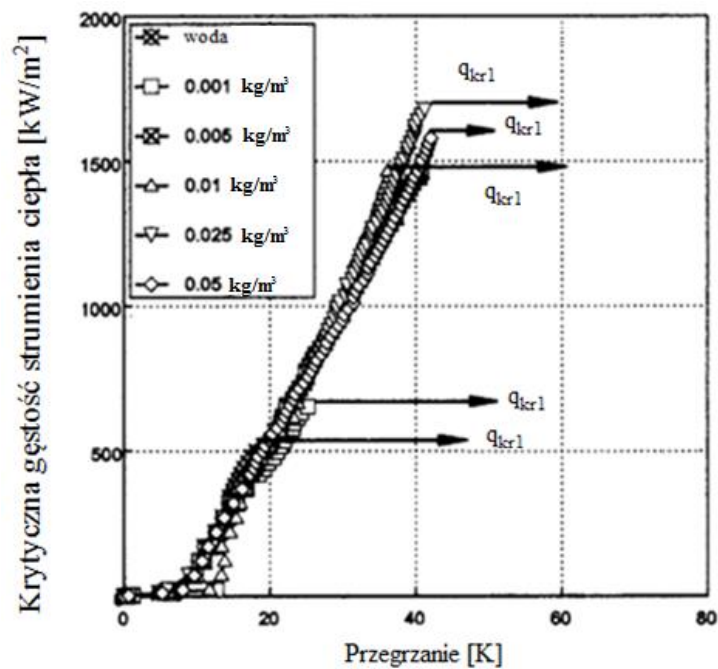
Istnieje kilka różnych hipotez dotyczących istoty i występowania kryzysu wrzenia. Tab. 3.1 przedstawia ich zestawienie na podstawie [31].

Tabela 3.1. Zestawienie hipotez dotyczących kryzysu wrzenia

Hipoteza	Autor	Wzór	Równanie
<i>Hipoteza niestabilności hydrodynamicznej</i>	Kutateladze	$q_{kr1} = Cr\rho_v^{0,5}[\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{0,25}$ gdzie: $C = 0,16$	(3.1)
	Zuber	$q_{kr1} = Cr\rho_v^{0,5}[\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{0,25}$ gdzie: $C = 0,131$	(3.2)
	Lienhard i Dhir	$q_{kr1}^* = q_{kr1} f(L^*)$ gdzie: $L^* = L \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma}}$	(3.3)
	Haramura i Katto	$q_{kr1} = Zr\rho_v^{0,5}[\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{0,25}$ gdzie: $Z = 0,131$	(3.4)
<i>Kryterium stabilności energii mechanicznej</i>	Lienhard i Eichhorn	$q_{kr1} = Cr\rho_v^{0,5}[\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{0,25}$ gdzie: $C = 0,149$	(3.5)
<i>Kryterium Dhira i Liawa</i>	Dhir i Liaw	$q_{kr1} = \bar{\alpha}_l(1 - \phi_w)\Delta T + \bar{\alpha}_v\phi\Delta T_s$ gdzie: ϕ_w – stopień zapelnienia	(3.6)
<i>Kryterium równowagi sił na odparowującym pęcherzyku</i>	Kandlikar	$q_{kr1}^K = r\rho_v^{0,5} \left(\frac{1 + \cos\beta}{16} \right) \left[\frac{2}{\pi} + \frac{\pi}{4} (+\cos\beta) \cos\Phi \right]^{0,5} [\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{0,25}$ gdzie: β – kąt zwilżania Φ – kąt nachylenia powierzchni grzejnej	(3.7)
<i>Kryterium maksymalnego strumienia ciepła na obszarze suchej plamy</i>	Jagow	$q_{kr1} = (q_{kr1}^n + q_{kr1}^w)^{\frac{1}{m}}$ gdzie: n – obszar ciśnień niskich w – obszar ciśnień wysokich $m = 2,5$	(3.8)

4. Dotychczasowe badania pierwszego kryzysu wrzenia pęcherzykowego nanocieczy

You i in. [32] określili krzywe wrzenia (rys. 4.1) i krytyczną gęstość strumienia ciepła przy wrzeniu nanocieczy woda- Al_2O_3 o koncentracji nanocząstek od 0 kg/m^3 do $0,05 \text{ kg/m}^3$, na poziomej miedzianej płytce o wymiarach $10 \times 10 \text{ mm}$. Eksperymenty przeprowadzono przy podciśnieniu w zbiorniku pomiarowym. Niezależnie od koncentracji nanocząstek nie zaobserwowano zmiany współczynnika przejmowania ciepła w porównaniu do wrzenia czystej wody. Jednocześnie ustalono, że w przypadku wrzenia nanocieczy znacznie wzrosła średnica odrywających się pęcherzyków, przy jednoczesnym spadku częstotliwości odrywania się pęcherzyków. Nie podano przyczyn wzrostu krytycznej gęstości strumienia ciepła o 200% w przypadku wrzenia nanocieczy.



Rys. 4.1. Krzywe wrzenia dla różnych stężeń badanych nanocieczy [32]

Vasallo i in. [33] przeprowadzili eksperymenty z wrzeniem nasyconym nanocieczy woda- SiO_2 na cienkich drutach chromonikielinowych o średnicy $0,4 \text{ mm}$ i długości 7 mm , przy ciśnieniu atmosferycznym. Nanociecz o koncentracji objętościowej nanocząstek $0,5\%$ przygotowywano przez dodawanie dejonizowanej wody do wcześniej uzyskiwanych zawiesin o koncentracji 2% i 9% drogą mieszania. Zaobserwowano znaczące zwiększenie krytycznego strumienia ciepła. W przypadku nanocieczy z cząstkami o średnicy 50 nm wzrost był trzykrotny w porównaniu do

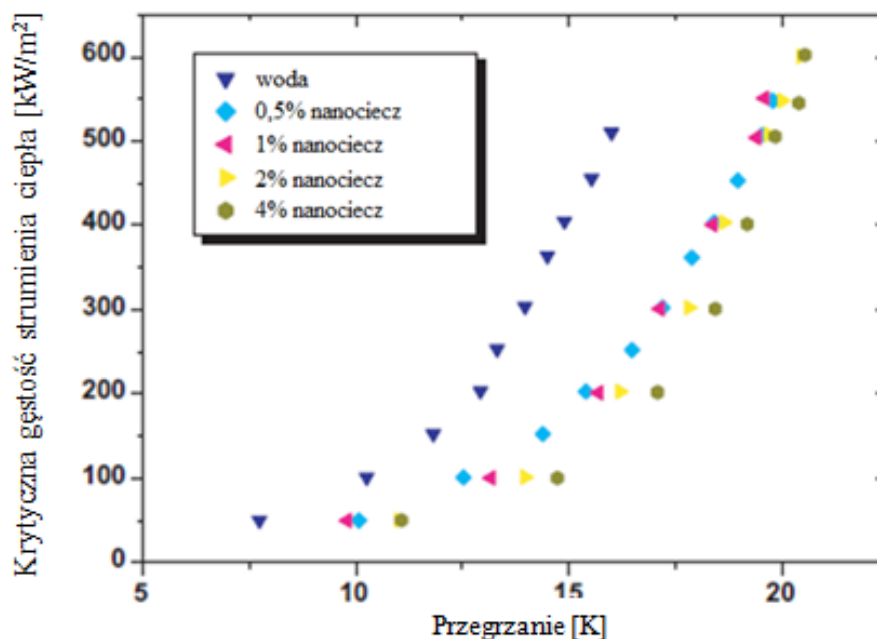
wrzenia czystej wody, natomiast dla zawiesiny z cząstkami o średnicy 15 nm - dwukrotny. Interesujące jest też to, że w przypadku nanocieczy z cząstkami o średnicy 50 nm nastąpiło płynne przejście od wrzenia pęcherzykowego do błonowego, aż do temperatur zbliżonych do temperatury topnienia chromonikieliny.

Dinh i in. [36] badali kryzys wrzenia pęcherzykowego na poziomych warstwach tytanowych o grubości 460 nm naniesionych na szkło borosilikatowe o grubości 130 nm. Powierzchnia grzejna o wymiarach 26,5x40 mm charakteryzowała się nanoskopową chropowatością. W badaniach użyto cieczy woda- Al_2O_3 o koncentracji nanocząstek 37 ppm, przy czym średnia średnica nanocząstek była równa 38 nm. Cieczą bazową była woda o wysokiej jakości (super-clean high-quality). Zaobserwowano znaczące obniżenie przegrzania, a więc przesunięcie krzywej wrzenia w lewo, co oznacza wzrost współczynnika przejmowania ciepła, bardzo dużą częstotliwość odrywania się pęcherzyków, a także bardzo dużą gęstość aktywnych centrów nukleacji, która była prawie stała powyżej gęstości strumienia ciepła $0,8 \text{ MW/m}^2$, mimo że gęstość strumienia ciepła wzrosła do $1,334 \text{ MW/m}^2$ bez przepalenia grzejnika. Dinh i in. podali dwie hipotezy tłumaczące wzrost krytycznej gęstości strumienia ciepła przy wrzeniu nanocieczy. Pierwsza hipoteza jest oparta na dwóch przesłankach: przyroście gęstości aktywnych centrów nukleacji w porównaniu do wrzenia czystej cieczy w wyniku osadzania się nanocząstek na powierzchni grzejnej i po drugie, działaniu nanocząstek jako centrów nukleacji w przegrzanej warstwie cieczy w pobliżu powierzchni grzejnej, co przyczynia się do obniżenia temperatury mikrowarstwy. Druga hipoteza objaśnia wzrost krytycznej gęstości strumienia ciepła przy wrzeniu nanocieczy ich znakomitą zdolnością do zwilżania powierzchni w wyniku powstawania nanostruktur w cienkich meniskach (krawędziach zwilżania).

Moreno i in. [35] badali kryzys wrzenia pęcherzykowego na poziomych, miedzianych płytkach. W badaniu wykorzystano następujące nanociecze: woda- Al_2O_3 zawierającą nanocząstki o wymiarze średnic mieszczącym się w zakresie 70-260 nm, woda-ZnO oraz glikol etylenowy- Al_2O_3 . Zaobserwowali, że w stanie nasycenia ($T_{\text{sat}}=60^\circ\text{C}$), maksymalny wzrost krytycznej gęstości strumienia ciepła w stosunku do przewidywanego q_{kr1} otrzymanego z korelacji Zuber'a wyniósł około 180% dla cieczy woda- Al_2O_3 oraz około 240% dla cieczy woda-ZnO. Dla cieczy glikol etylenowy- Al_2O_3 także zaobserwowano wzrost q_{kr1} , lecz tylko o około 130%.

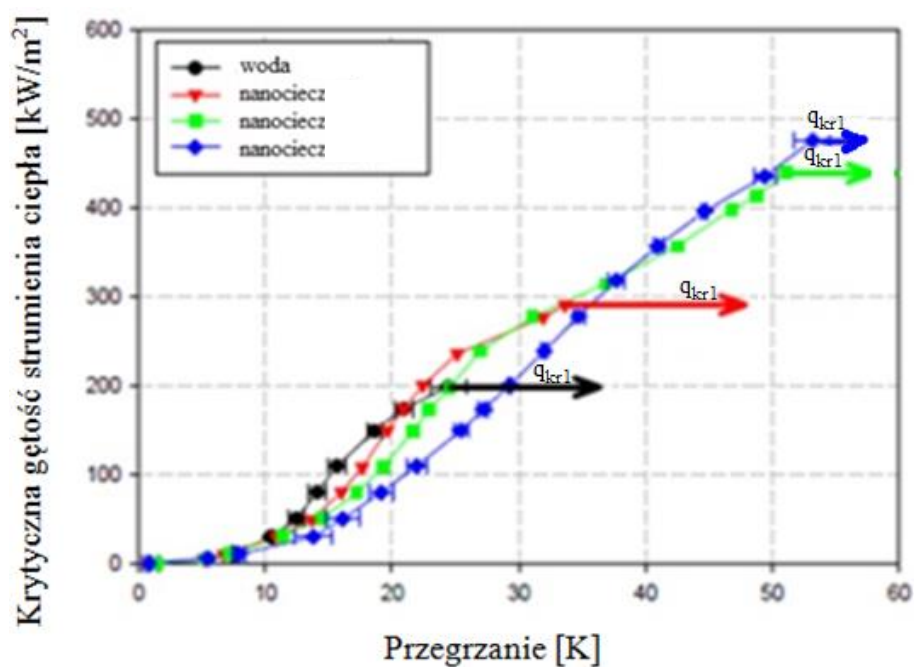
Bang i Chang [36] przeprowadzili eksperymenty z wrzeniem nanocieczy woda- Al_2O_3 na poziomej i pionowej płytce o wymiarach 4x100 mm, przy ciśnieniu

atmosferycznym. Koncentracja objętościowa nanocząstek była równa 0,5%, 1%, 2% oraz 4%, a średnia średnica nanocząstek była równa 47 nm. Nanociecz przygotowywano w płuczce ultradźwiękowej w czasie 8 godzin tuż przed eksperymentem. Krzywe wrzenia uzyskane dla nanociecz, w porównaniu do wrzenia czystej wody, były przesunięte w prawo, ku większym przegrzaniom, co wskazuje na pogorszenie współczynników przejmowania ciepła i to tym bardziej im większa była koncentracja nanocząstek (rys. 4.2). Jako przyczynę pogorszenia się współczynnika przejmowania ciepła Bang i Chang podają zmniejszenie się aktywnych centrów nukleacji w wyniku zmiany chropowatości powierzchni, jako następstwa osadzania się nanocząstek na powierzchni grzejnej. Jednocześnie Bang i Chang zaobserwowali znacznie wyższe krytyczne gęstości strumienia ciepła niż przy wrzeniu czystej wody i to zarówno na płycie poziomej (o około 32%), jak i pionowej (o około 13%), dla wszystkich czterech koncentracji nanocząstek. Jako przyczynę wzrostu krytycznej gęstości strumienia ciepła podają tworzenie się warstwy, która z jednej strony zmniejsza liczbę aktywnych centrów nukleacji, a więc zmniejsza prawdopodobieństwo bocznej koalescencji pęcherzyków parowych prowadzącej do powstania błony parowej, a z drugiej strony opóźnia wystąpienie kryzysu wrzenia w wyniku pułapkowania cieczy w pobliżu powierzchni grzejnej z powodu porowatej struktury warstwy tlenku aluminium.



Rys. 4.2. Krzywe wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 [36]

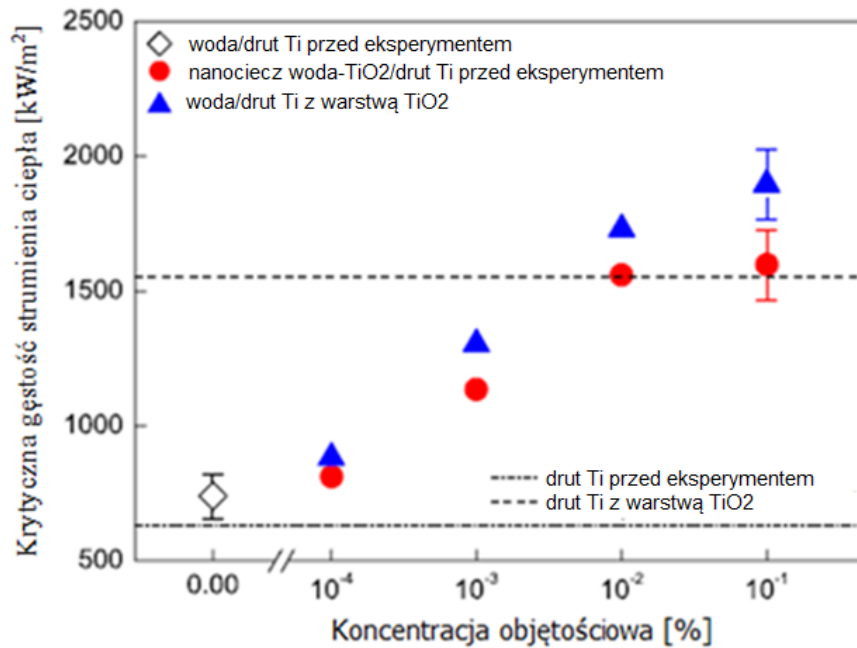
Jackson i in. [37] badali wrzenie nanocieczy woda-Au z nanocząstkami o średnim wymiarze 4,5 nm, na miedzianej płycie o chropowatości $R_a=25\ \mu\text{m}$. Zaobserwowali, że wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła podczas wrzenia nanocieczy wzrosła ponad 2,5 raza w porównaniu do czystej wody (rys. 4.3). Jako przyczynę uzyskanych zmian wskazali tworzącą się na powierzchni grzejnej warstwę nanocząstek.



Rys. 4.3. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-Au [37]

Kim i in. [38,39] badali proces wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 oraz woda- TiO_2 na poziomych drutach: chromoniklowym (NiCr) o średnicy 0,2 mm oraz tytanowym (Ti) o średnicy 0,25 mm pod ciśnieniem atmosferycznym. W przypadku wrzenia nanocieczy woda- TiO_2 i woda- Al_2O_3 na drucie chromoniklowym oraz nanocieczy woda- TiO_2 na drucie tytanowym zaobserwowali duży wzrost wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła, który maksymalnie wynosił ponad 200% wartości uzyskanej dla wody. Dodatkowo udowodnili wpływ tworzącej się warstwy nanocząstek na powierzchni grzejnej, co według nich ma kluczowe znaczenie dla wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła. W tym celu przeprowadzili kolejne trzy eksperymenty, w których zbadali wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła dla czystej wody oraz nanocieczy na drutach pozbawionych warstwy nanocząstek, a następnie powtórzyli to badanie dla tych samych cieczy, jednak jako powierzchnie grzejną wykorzystano druty pokryte warstwą nanocząstek o grubości $6,5\ \mu\text{m}$. Uzyskane rezultaty pozwoliły stwierdzić, że mikrowarstwa, tworząca się w wyniku osadzania się nanocząstek

w trakcie procesu wrzenia na powierzchni grzejnej, ma zasadniczy wpływ na krytyczną gęstość strumienia ciepła (rys. 4.4).



Rys. 4.4. Krytyczna gęstość strumienia ciepła wody na czystym oraz pokrytym warstwą TiO_2 drucie oraz nanocieczy woda- TiO_2 [38]

Kim i in. [29,40] badali kryzys wrzenia pęcherzykowego na poziomych cienkich drutach ze stali nierdzewnej o średnicy 0,381 mm i długości 120 mm, przy ciśnieniu atmosferycznym. Użyte nanociecze to: woda- Al_2O_3 , woda- ZrO_2 oraz woda- SiO_2 , przy czym koncentracja objętościowa nanocząstek była równa 3%, 2% i 1%. Przy wytwarzaniu nanocieczy nie stosowano żadnych substancji stabilizujących. Zarejestrowano znaczący wzrost krytycznej gęstości strumienia ciepła w porównaniu do wrzenia wody, przy czym dla nanocieczy woda- Al_2O_3 wartość ta przekracza 52%, dla nanocieczy woda- ZrO_2 wynosi 75%, natomiast dla nanocieczy woda- SiO_2 jest równa 80%. Uzyskany przyrost krytycznej gęstości strumienia ciepła nie oznacza jednak intensyfikacji współczynnika przejmowania ciepła. Krzywe wrzenia badanych nanocieczy były przesunięte znacząco w prawo, co oznaczało znacznie wyższe przegrzania, a stąd mniejsze współczynniki przejmowania ciepła. Przyczyną wzrostu krytycznej gęstości strumienia ciepła przy wrzeniu nanocieczy wskazali formowanie się warstwy osadu z nanocząstek. Warstwa ta zwiększa zwilżalność powierzchni grzejnej, co zostało potwierdzone pomiarami statycznego kąta zwilżania dla takich warstw. Stwierdzili, że za wzrost krytycznej gęstości strumienia ciepła odpowiedzialny jest stan powierzchni grzejnej. Udowodnili, że podczas wrzenia nanocieczy na powierzchni, na

której zachodzi wrzenie tworzy się mikrowarstwa, która drastycznie zmienia właściwości podłoża. Wpływa przede wszystkim na jego zwilżalność. Zmniejsza wartość kąta zwilżania i co za tym idzie, zwiększa zwilżalność badanej powierzchni. Wykazali, że chropowatość może zwiększyć się w trakcie tego procesu nawet 20-krotnie, a całkowita powierzchnia wymiany ciepła nawet 5-krotnie. Za wszystkie te zjawiska odpowiedzialne jest osadzanie się nanocząstek na powierzchni podczas trwania procesu.

Kashinath [41] badał wpływ wymiaru nanocząstek, ciśnienia oraz orientacji powierzchni grzejnej na wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 zawierającej domieszkę glikolu. Uzyskał wzrost wynoszący około 180-200% w porównaniu do wody. Podczas badań wykorzystał trzy powierzchnie grzejne. Maksymalny wzrost q_{kr1} dla powierzchni płaskiej o wymiarach 1x1 cm wynosił 190%. Ciśnienie również miało kluczowe znaczenie dla procesu i największy wzrost krytycznej gęstości strumienia ciepła wynoszący 240% uzyskał dla najniższego ciśnienia. Sprawdził też wpływ orientacji powierzchni. Wykorzystano w tym celu płytkę o wymiarach 2x2 cm. Najwyższą wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła uzyskał w przypadku położenia płytki wynoszącego (mierzone od poziomu) 150° . Również dodatek glikolu etylenowego i propylenowego do nanocieczy przyniósł wzrost wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła. W pierwszym przypadku było to 120%, w drugim natomiast 70%.

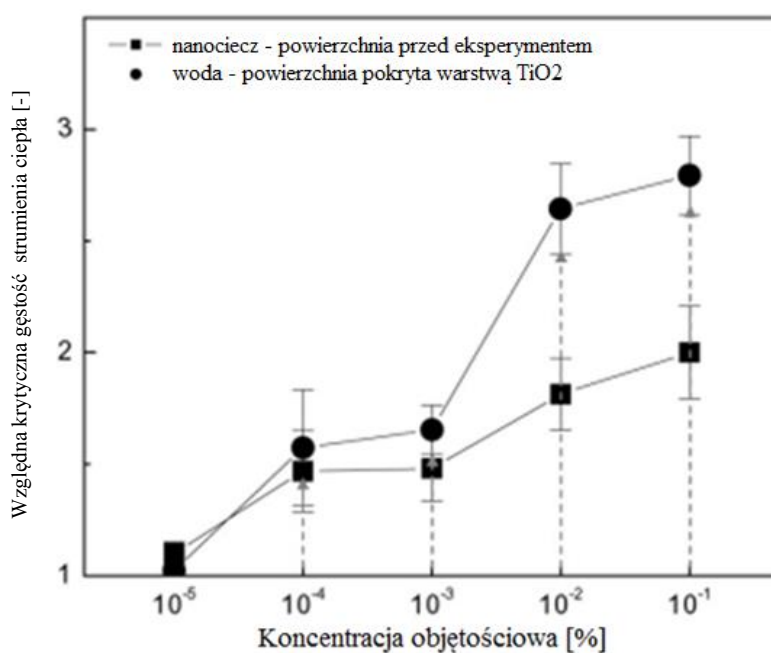
Milanowa i in. [42] badali proces wrzenia nanocieczy zawierających nanocząstki SiO_2 , CeO_2 i Al_2O_3 . Zauważyli, że amorficzny tlenek krzemu wykazuje odmienne właściwości niż krystaliczne tlenki ceru i aluminium. Ta różnica może mieć kluczowe znaczenie w procesie wrzenia. Związane jest to przede wszystkim z upakowaniem atomów w cząsteczce oraz, co z tego wynika, innym rodzajem oddziaływań pomiędzy nanocząstkami a wodą podczas trwania procesu. Znaczny wzrost krytycznej gęstości strumienia ciepła, wynoszący ponad 300%, powodowała także warstwa osadzająca się podczas wrzenia na powierzchni drutów.

Shi i in. [43] badali wrzenie nanocieczy woda-Fe oraz woda- Al_2O_3 na miedzianej, poziomej płytce o średnicy 60 mm. Koncentracja objętościowa nanocząstek była równa 0,1%, 1% oraz 2%. Nanociecze były wytwarzane metodą mechanicznego mieszania, bez zastosowania jakichkolwiek substancji stabilizujących. Zaobserwowano odmienny wpływ nanocząstek Fe i Al_2O_3 na przebieg krzywych wrzenia. W przypadku nanocieczy z nanocząstkami Fe o koncentracji 1% i 2% zarejestrowano znaczny wzrost współczynnika przejmowania ciepła w porównaniu do wrzenia czystej wody. Dla

nanocieczy z nanocząstkami Al_2O_3 i wszystkich trzech koncentracji (0,1%, 1% i 2%) nastąpiło pogorszenie warunków przejmowania ciepła, przy czym największy spadek zaobserwowano dla najwyższej koncentracji nanocząstek. Shi i in. wyróżnili dwa mechanizmy mające wpływ na przejmowanie ciepła przy wrzeniu nanocieczy, tj. efekt termiczny i efekt powierzchniowy. Efekt termiczny związany jest ze wzrostem efektywnej przewodności cieplnej nanocieczy w wyniku dodania nanocząstek metalicznych oraz spadkiem napięcia powierzchniowego, co powoduje, że niższe jest przegrzanie początku nukleacji. Jest to efekt powodujący intensyfikację przejmowania ciepła. Efekt powierzchniowy wynika z pułapkowania nanocząstek przez powierzchnię grzejną i zmniejszania liczby aktywnych centrów nukleacji przez wypierania z nich powietrza (gazów). Efekt ostateczny jest wynikiem sumowania się efektu termicznego i powierzchniowego. W zależności od tego, który z nich jest dominujący następuje polepszenie lub pogorszenie warunków przejmowania ciepła.

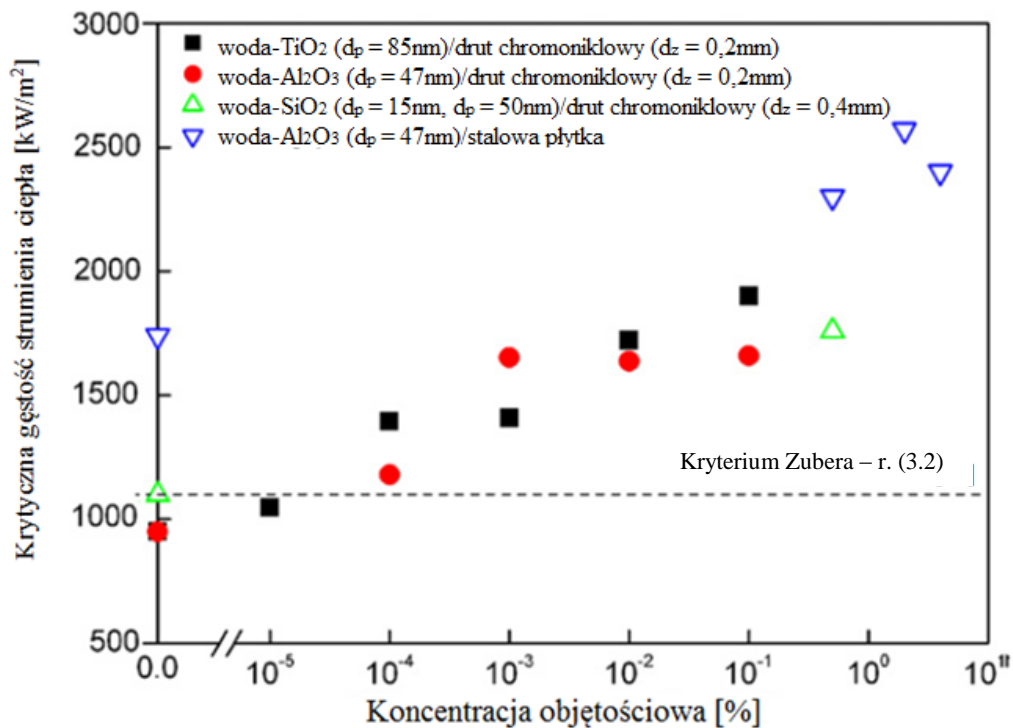
Nguyen i in. [44] przeprowadzili eksperymenty z wrzeniem nanocieczy woda- Al_2O_3 na czołowej powierzchni wałka z miedzi o średnicy 100 mm, która była pokryta, przez platerowanie, chromem w celu uzyskania możliwie gładkiej powierzchni. Badania przeprowadzono przy ciśnieniu atmosferycznym. Koncentracja objętościowa nanocząstek była równa 0,5%, 1% oraz 2%. Nanociecze były wytwarzane metodą mieszania z zastosowaniem substancji stabilizujących. Generalnie, w całym zakresie wrzenia pęcherzykowego, zarejestrowano spadek współczynnika przejmowania przy wrzeniu nanocieczy w porównaniu do wrzenia czystej wody, przy czym spadek był tym większy im wyższa była koncentracja nanocząstek. W przypadku koncentracji nanocząstek 2% spadek wartości współczynnika wyniósł około 60%. Jedynie dla nanocieczy o koncentracji nanocząstek 0,5%, przy przegrzaniu poniżej 12 K, współczynnik przejmowania ciepła był wyższy niż dla wody destylowanej. Podobnie było z krytyczną gęstością strumienia ciepła, gdzie dla nanocieczy o koncentracji nanocząstek 2%, była o około 65% niższa niż w przypadku wrzenia wody. Nguyen i in. przypuszczają, że tak znaczące pogorszenie się współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu nanocieczy w porównaniu do wody destylowanej może wynikać z utraty własności dyspersyjnych samych nanocząstek, gdyż często ich powierzchnie są poddawane obróbce za pomocą środków dyspergujących bezpośrednio przez producentów. Dowodem na to może być zaobserwowane bardzo silne wytrącanie się nanocząstek przy temperaturach powyżej 125°C.

Kim H. i in. [45] badali kryzys wrzenia pęcherzykowego na poziomych cienkich drutach z chromonikieliny o średnicy 0,2 mm, przy ciśnieniu atmosferycznym. W badaniach użyto cieczy woda-TiO₂ o koncentracji objętościowej nanocząstek 5%, 4%, 3%, 2% i 1%. Nanociecze przygotowano w płuczce ultradźwiękowej w czasie 3 godzin, a same nanocząstki były produkowane metodą zol-żel. Kryzys wrzenia badano dla dwóch rodzajów powierzchni: gładkiej (czystej) powierzchni drucików oraz na drucikach, których powierzchnia była pokryta osadem powstałym w wyniku wrzenia na nich nanocieczy o różnej koncentracji nanocząstek. Uzyskane krytyczne gęstości strumienia ciepła przy wrzeniu nanocieczy na gładkich drucikach były wyższe niż przy wrzeniu czystej wody i to tym bardziej, im wyższa była koncentracja nanocząstek. Dla maksymalnej koncentracji nanocząstek, przyrost krytycznej gęstości strumienia ciepła wyniósł 200%. W przypadku wrzenia czystej wody na drucikach z osadem uzyskano wyższe gęstości strumienia ciepła niż w przypadku wrzenia nanocieczy na gładkich drucikach (rys. 4.5), co świadczy o tym, że zmiana charakterystyki powierzchni grzejnej wynikająca z powstania osadu z nanocząstek jest zasadniczą przyczyną wyższych wartości gęstości strumienia ciepła. Modyfikacja powierzchni drucików, tj. mikrostruktura i topografia, była tym większa im większa była koncentracja nanocząstek we wrzącej cieczy. Potwierdziły to obserwacje dokonane za pomocą mikroskopu skaningowego.



Rys. 4.5. Przyrost krytycznej gęstości strumienia ciepła przy wrzeniu nanocieczy woda-TiO₂ [45]

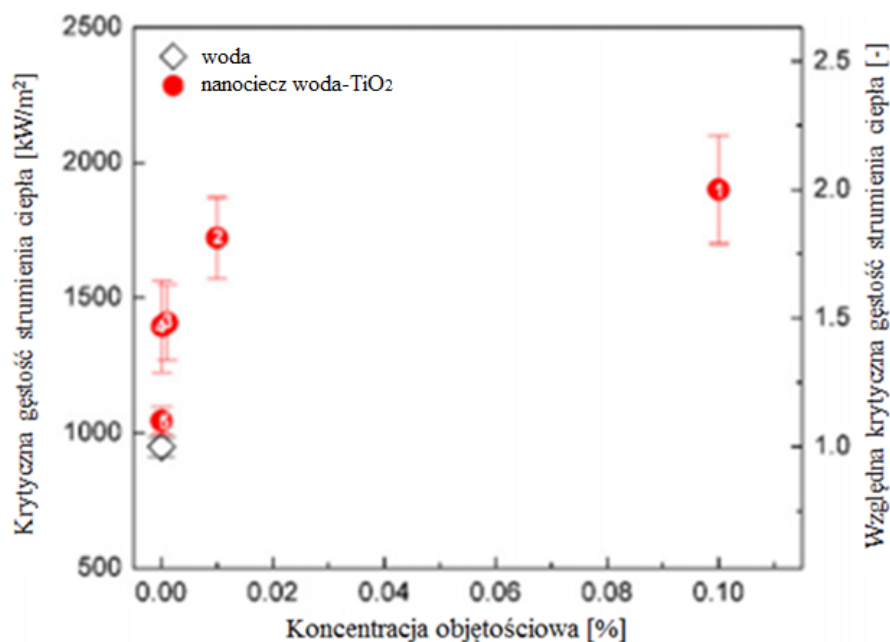
Kim H. i in. [46] przeprowadzili eksperymenty z wrzeniem nanocieczki woda- Al_2O_3 , woda- SiO_2 , woda-Ag oraz woda- TiO_2 , przy czym tak jak poprzednio koncentracja objętościowa była równa 5%, 4%, 3%, 2% i 1%. Nanocząstki w zawiesinie tworzyły aglomeraty, przy czym proces agregacji był najsilniejszy w przypadku nanocząstek TiO_2 . W badaniach szczególną uwagę zwrócono na parametry powierzchni grzejnej mające wpływ na kryzys wrzenia pęcherzykowego, tj. chropowatość, kąt zwilżania i efekt podciągania kapilarnego. W przypadku wszystkich nanocieczki następował wzrost krytycznej gęstości strumienia ciepła w porównaniu do wrzenia wody (rys. 4.6). Bardzo duży wpływ na wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła miał osad wytworzony na powierzchni grzejnej w trakcie wrzenia. Powodował on wzrost krytycznej gęstości strumienia ciepła z 950 kW/m^2 do ponad 1500 kW/m^2 , przy czym zwilżalność powierzchni grzejnej znacząco wzrosła. Kąt zwilżania spadł o około 50° . Dla kąta zwilżania wynoszącego 20° odnotowano wartość q_{kr1} równą 2500 kW/m^2 .



Rys. 4.6. Krytyczna gęstość strumienia ciepła w funkcji koncentracji nanocząstek w odniesieniu do korelacji Zuber [46]

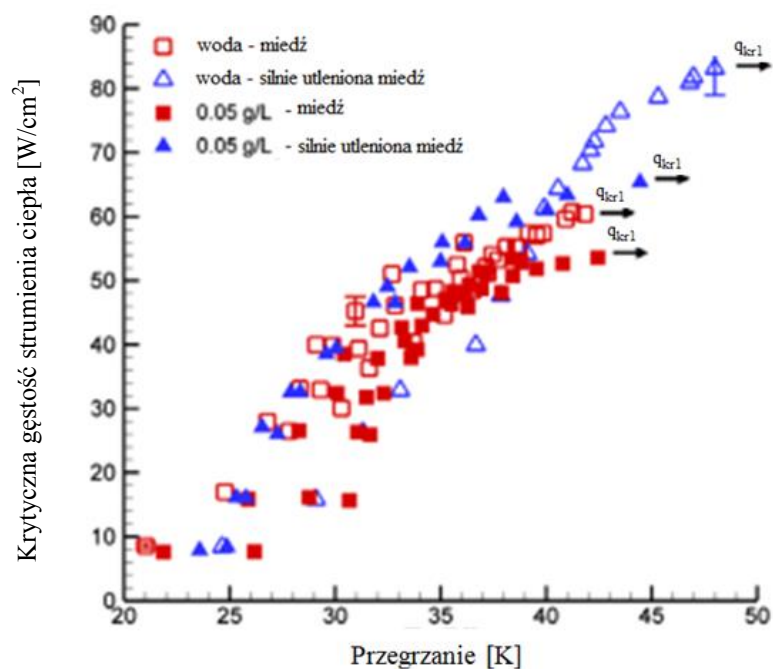
Kim H.D. i in. [29] badali kryzys wrzenia pęcherzykowego na poziomych cienkich drutach chromoniklowych o średnicy $0,2 \text{ mm}$ przy ciśnieniu atmosferycznym. Użyte nanocieczki to woda- Al_2O_3 oraz woda- TiO_2 , przy czym koncentracja

objętościowa nanocząstek była równa 5%, 4%, 3%, 2% i 1%. Zarejestrowano znaczący wzrost krytycznej gęstości strumienia ciepła w porównaniu do wrzenia czystej wody (rys. 4.7). Uzyskany przyrost krytycznej gęstości strumienia ciepła dla nanocieczy woda- Al_2O_3 wyniósł 170%, natomiast dla nanocieczy woda- TiO_2 ponad 180%. Wiąże się to ze zmianą chropowatości, która wzrosła wraz z koncentracją nanocząstek nanocieczy.



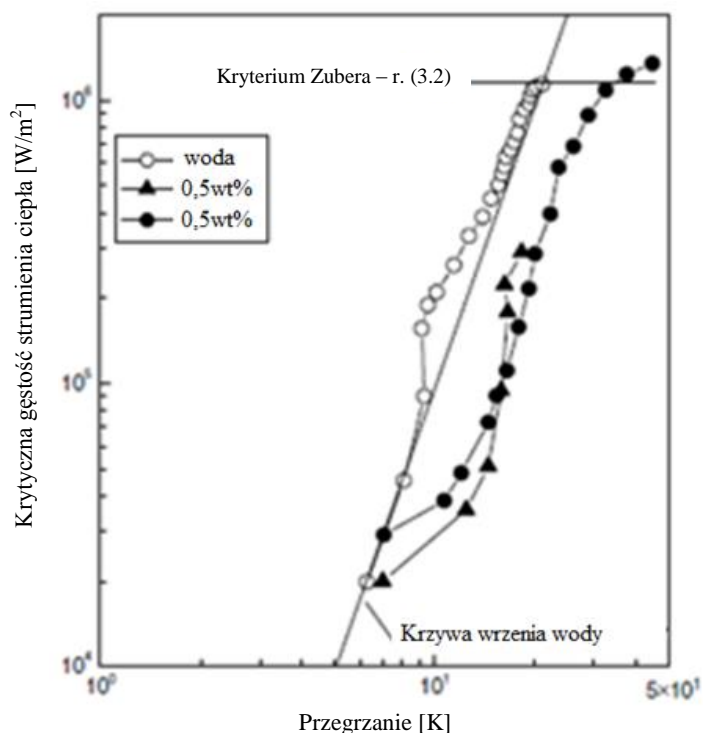
Rys. 4.7. Krytyczna gęstość strumienia ciepła przy wrzeniu nanocieczy woda- TiO_2 [29]

Coursey i Kim [47] badali wrzenie nanocieczy woda- Al_2O_3 oraz etanol- Al_2O_3 o koncentracjach masowych wynoszących od $0,001 \text{ kg/m}^3$ do 10 kg/m^3 na płaskiej powierzchni miedzianej o różnym stopniu utlenienia, pokrytej warstwą złota o grubości 100 nm lub warstwą szkła. Zauważyli, że intensywność przejmowania ciepła jest silną funkcją koncentracji nanocząstek i zwilżalności powierzchni grzejnej. Dla układów o gorszej zwilżalności zastosowanie nanocieczy prowadzi do wzrostu q_{kr1} (nawet o 37%). Układy o lepszej zwilżalności wykazują mniejsze wzrosty q_{kr1} i wymagają przy tym wyższych koncentracji nanocząstek. Wykazali również, że poprawa q_{kr1} odpowiadająca zastosowaniu nanocieczy może być osiągnięta przy użyciu czystej cieczy bazowej na silnie utlenionej powierzchni grzejnej – rys. 4.8.



Rys. 4.8. Krzywe wrzenia dla nanocieczy woda- Al_2O_3 na powierzchni miedzianej o różnym stopniu utlenienia [47]

Liu i Liao [48] badali wrzenie nanocieczy zawierających nanocząstki CuO i SiO_2 . Jako ciecz bazową zastosowali wodę oraz alkohol etylowy. Wrzenie prowadzili na płaskiej, miedzianej płycie. Do sporządzenia badanych cieczy wykorzystali dodatkowo SDBS jako środek powierzchniowo-czynny, w celu uzyskania zadowalającej stabilności. Badano nanociecze o koncentracjach masowych od 0,2% do 2%. Zaobserwowano, że dodatek nanocząstek w większości przypadków nie przyniósł poprawy współczynnika przejmowania ciepła, zaś w każdym przypadku zaobserwowano znaczny wzrost wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła (rys. 4.9). W przypadku nanocieczy zawierającej nanocząstki CuO zaobserwowano wzrost wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła o 31% w porównaniu do cieczy bazowej, natomiast w przypadku nanocząstek SiO_2 wzrost ten wyniósł 20% w odniesieniu do cieczy bazowej.



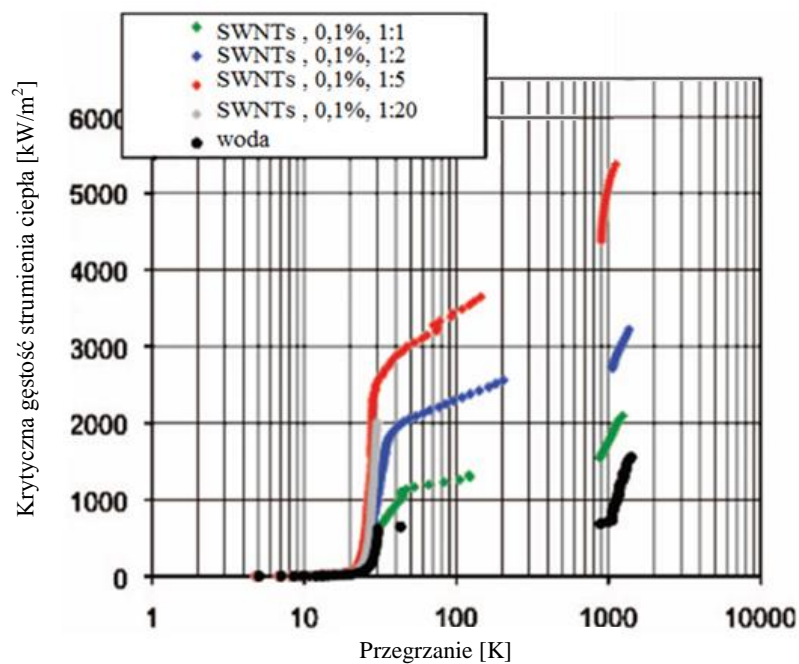
Rys. 4.9. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-SiO₂ [48]

Milanowa i Kumar [49] badali wrzenie nanocieczy woda-SiO₂ na poziomym drucie chromoniklowym o długości 46 mm i średnicy 0,32 mm. W celu uzyskania zadowalających stabilności do zawiesin dodano roztwór tlenku sodu. Koncentracja objętościowa badanej nanocieczy wynosiła 0,5%. Zaobserwowali, że w przypadku wrzenia nanocieczy zawierającej nanocząstki o średnicy 10 nm wartość uzyskanej krytycznej gęstości strumienia ciepła była o 2,67 razy większa niż w przypadku wrzenia dejonizowanej wody, natomiast w przypadku nanocząstek o średnicy 20 nm, ta wartość wyniosła jedynie 1,47 wartości uzyskanej dla wody. Za powód powstałej rozbieżności podali różnicę porowatości powierzchni grzejnej, gdyż zmieniała się ona w trakcie trwania procesu wrzenia. Mniejsze cząstki z łatwością osadzały się na druciku, tworząc warstwę o grubości 0,3 mm, podczas gdy większe nie wytworzyły żadnego osadu. To spowodowało zmianę w wielkości i częstotliwości odrywania się pęcherzyków, co z kolei miało decydujący wpływ na wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła.

Golubovic i in. [50] badali wrzenie nanocieczy woda-Al₂O₃ oraz woda-BiO₂ na poziomych chromoniklowych drutach o średnicy 0,64 mm i długości 50 mm. Zaobserwowali, że maksymalny przyrost q_{kr1} w przypadku wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ wyniósł około 50%, natomiast w przypadku nanocieczy woda-BiO₂ - 33% w stosunku do wrzenia cieczy bazowej. Za zmianę wartości krytycznej gęstości

strumienia ciepła odpowiedzialna była według nich zmiana charakterystyki powierzchni grzejnej, którą można było zauważyć po zmieniającej się wartości kąta zwilżania.

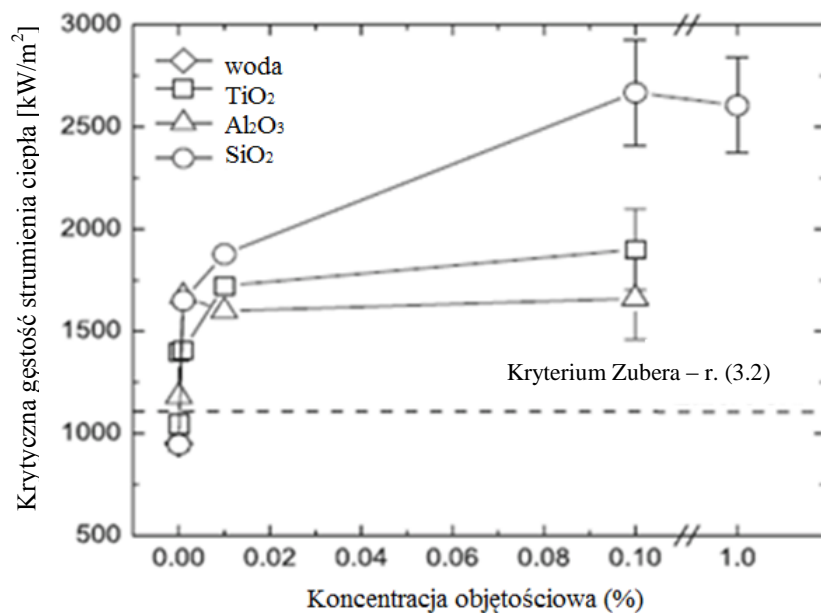
Milanowa i Kumar [51] przeprowadzili badania wrzenia nanocieczy wodajednowarstwowe nanorurki węglowe (SWNTs) o koncentracji objętościowej 0,1% na poziomym drucie chromoniklowym. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 4.10. Badacze zaobserwowali, że w wyniku dodania substancji powierzchniowo-czynnej uzyskuje się dla tego samego przegrzania, wyższe wartości strumienia ciepła. Wzrost ma miejsce jednak do pewnego stężenia surfaktantu. Powyżej dodatku surfaktantu w ilości 1:5 zaobserwowano spadek wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła z 5470 kW/m^2 do 2095 kW/m^2 , który jest jednak nadal dużo wyższy niż w przypadku wartości uzyskanej dla czystej wody, która wyniosła 750 kW/m^2 . Ma to prawdopodobnie związek z napięciem powierzchniowym. Obecność surfaktantu znacznie obniża tę wartość, co jak widać jest korzystne tylko do pewnego stężenia substancji powierzchniowo-czynnej w zawiesinie.



Rys. 4.10. Krzywe wrzenia nanocieczy zawierającej nanorurki węglowe z różnymi ilościami surfaktantu w porównaniu do czystej wody [51]

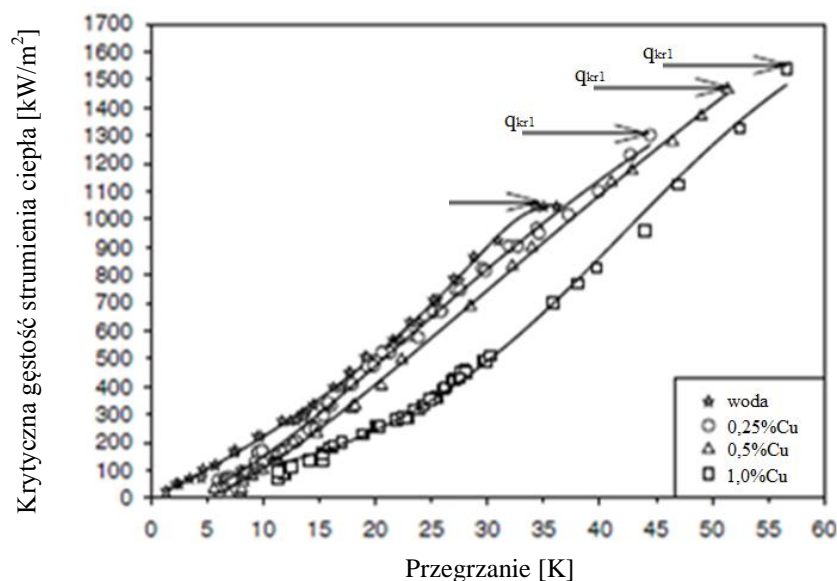
Kim I. i Kim H. [52] badali proces wrzenia na gładkich, poziomych drutach chromoniklowych o średnicy 0,2 mm. Przeprowadzili dwa eksperymenty. Pierwszy polegał na przeprowadzeniu wrzenia czystej wody na czystym, metalicznym drucie NiCr, drugi natomiast na wrzeniu nanocieczy na tym samym drucie, lecz pokrytym

warstwą osadu powstałą w wyniku procesu wrzenia nanocieczy. Wzrost krytycznej gęstości strumienia ciepła uzyskano w drugim z przypadków w zakresie koncentracji nanocząstek od 1% do 5%. Wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła uzyskana podczas wrzenia wody stanowiła 85% wartości przewidzianej przez korelację Zuber. Wzrost koncentracji nanocząstek do 12% spowodował wzrost wartości q_{kr1} o około 170% dla wszystkich badanych nanocieczy w stosunku do czystej wody. Ustalono, że dla koncentracji 0,1% wzrost q_{kr1} dla nanocieczy woda- Al_2O_3 i woda- TiO_2 jest dużo niższy niż w przypadku nanocieczy woda- SiO_2 (rys. 4.11).



Rys. 4.11. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy na bazie wody [52]

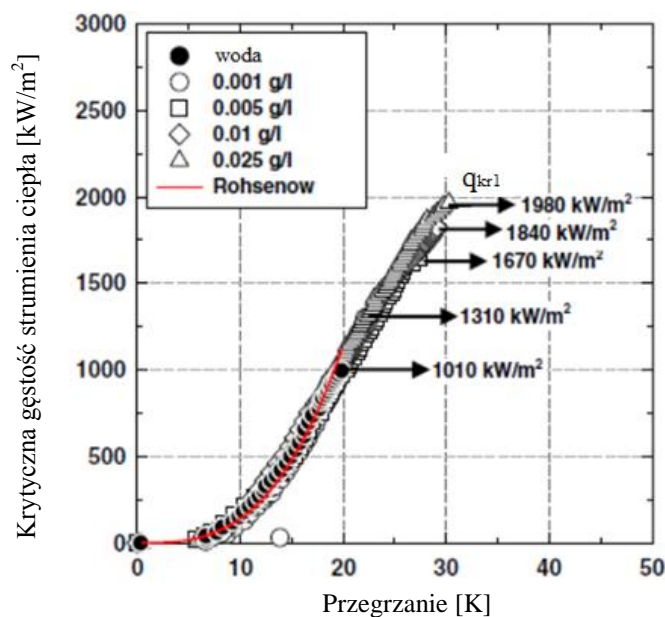
Kathiravan i in. [53] przeprowadzili badania wrzenia nanocieczy woda-Cu o koncentracjach masowych: 0,25%, 0,5% i 1% na kwadratowej płytce ze stali nierdzewnej. Średni wymiar nanocząstek wynosił 10 nm. Do sporządzenia wybranych nanocieczy wykorzystano również środek powierzchniowo-czynny w celu uzyskania zadowalającej stabilności badanych cieczy. Był nim SDS o koncentracji masowej 9%. Wyniki wykazały, że krytyczna gęstość strumienia ciepła podczas wrzenia czystej wody była o około 80% wyższa niż w przypadku wrzenia mieszaniny wody i substancji powierzchniowo-czynnej. Dodatkowo zauważono także, że wartość q_{kr1} podczas wrzenia nanocieczy woda-Cu o koncentracji 0,25%, 0,5% i 1% bez dodatku surfaktantów wzrosła odpowiednio o 25%, 40% i 48% (rys. 4.12).



Rys. 4.12. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-Cu [53]

Kwark i in. [54] badali wrzenie w dużej objętości nanocieczy woda- Al_2O_3 , woda-Cu oraz woda-nanocząstki diamentowe o niskich koncentracjach objętościowych pod ciśnieniem atmosferycznym. Zadowalającą stabilność cieczy uzyskano za pomocą długotrwałej ultrasonifikacji. Nanociecz woda- Al_2O_3 charakteryzowała się pH wynoszącym 6,3, nanociecz woda-Cu miała pH równe 5,35, natomiast pH nanocieczy woda-pył diamentowy wynosiło 4,86. Podczas trwania badań nie zaobserwowano sedimentacji oraz agregacji nanocząstek w zawiesinie. Pozostałe właściwości nanocieczy, takie jak: przewodność cieplna, napięcie powierzchniowe oraz lepkość tylko w niewielkim stopniu różniły się od wartości uzyskanych w tych samych warunkach dla wody. Jako powierzchnię grzejną zastosowano miedzianą płytkę o wymiarach $1 \times 1 \times 0,3$ cm. Wrzeniu poddano nanociecze o bardzo małych koncentracjach objętościowych nanocząstek wynoszących poniżej 1 kg/m^3 . Jako ciecz bazową zastosowano destylowaną i dejonizowaną wodę. Badania przeprowadzono w dwóch przedziałach koncentracji. Dla pierwszego z nich, pomiędzy $2,7 \cdot 10^{-5}\%$ a $2,7 \cdot 10^{-2}\%$, nie zauważono dużych zmian we współczynniku przejmowania ciepła. Wartości uzyskane dla nanocieczy były zbliżone do tych uzyskanych dla czystej wody, natomiast wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła wzrastała wraz ze wzrostem koncentracji objętościowej nanocząstek. Maksymalny wzrost wyniósł prawie 200% w porównaniu do wody (rys. 4.13). Autorzy wykazali także, że podczas wrzenia nanocieczy na powierzchni grzejnej tworzy się mikrowarstwa złożona z osadzających

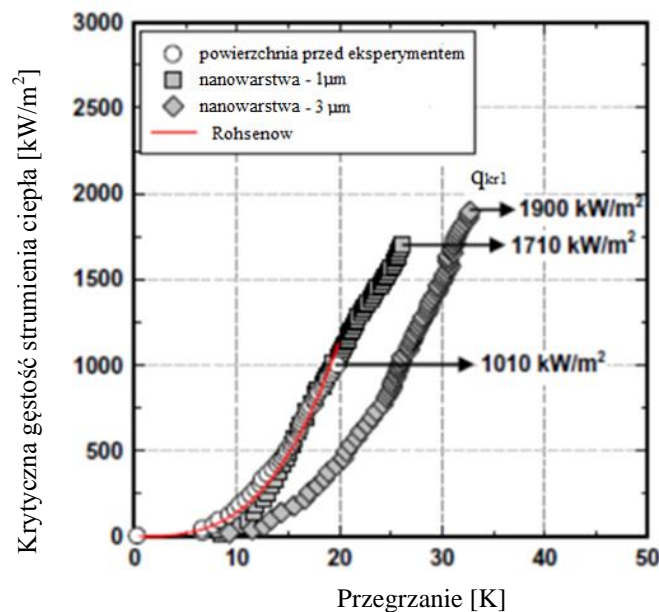
się na niej nanocząstek i udowodnili, że jest ona odpowiedzialna za zmianę wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła.



Rys. 4.13. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃ [54]

Kwark i in. [55] badali wrzenie nanocieczy woda-Al₂O₃ oraz etanol-Al₂O₃. Zawiesiny poddano dwugodzinnej ultrasonifikacji, nie użyto żadnych substancji powierzchniowo-czynnych, a pH nanocieczy wynosiło około 6,3. Wrzenie prowadzono na poziomej płycie miedzianej o wymiarach 1x1x0,3 cm. Badania zostały przeprowadzone w celu wykazania wpływu formującej się podczas wrzenia warstwy osadu na powierzchni grzejnej na intensywność wymiany ciepła. W tym celu zastosowano dwie ciecz bazowe: destylowaną i dejonizowaną wodę oraz etanol. Wskazano na kilka czynników powodujących wzrost q_{kr1} , jednak za najbardziej prawdopodobną przyczynę uznano osadzanie się nanocząstek w trakcie samego procesu wrzenia. Wykazano, że kluczowe znaczenia ma również długość trwania procesu wrzenia. Rys. 4.14 pokazuje krzywe wrzenia wody na drutach pokrytych warstwą osadu nanocząstek. Wszystkie warunki z wyjątkiem czasu wrzenia są identyczne dla obu przypadków. Kim i in. zauważyli, że jeżeli czas osadzania mikrowarstwy jest niedługi to można uzyskać wzrost wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła nawet o 50% w stosunku do wody, bez zmian współczynnika przejmowania ciepła, natomiast jeżeli wydłuży się ten czas, to również następuje przyrost krytycznej gęstości strumienia ciepła, nawet o 70%, jednak wartość współczynnika przejmowania ciepła przy danym przegrzaniu spada. Jest to związane z grubością warstwy, która po 15 minutach procesu wrzenia wynosi 1 μ m, natomiast po upływie 120 minut wzrosła do około 3 μ m. Grubość

warstwy ma znaczący wpływ na oporność powierzchni grzejnej i utrudnia wymianę ciepła pomiędzy nią a płynem. Podobne badania przeprowadzono dla nanocieczy etanol- Al_2O_3 , gdzie koncentracja objętościowa nanocząstek wynosiła 1 kg/m^3 . Zaobserwowano te same zmiany, które miały miejsce gdy cieczą bazową była woda. Jedyną różnicą, która wystąpiła było to, że nie zauważono zmniejszenia wartości współczynnika przejmowania ciepła, jak w przypadku wody. Wskazuje to na to, że na te parametry ma wpływ nie tylko obecność mikrowarstwy, ale również jej struktura. Etanol charakteryzuje się między innymi niższym napięciem powierzchniowym i lepszą zwilżalnością niż woda.



Rys. 4.14. Krzywe wrzenia wody na powierzchni pokrytej nanowarstwą powstałą w wyniku wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 [55]

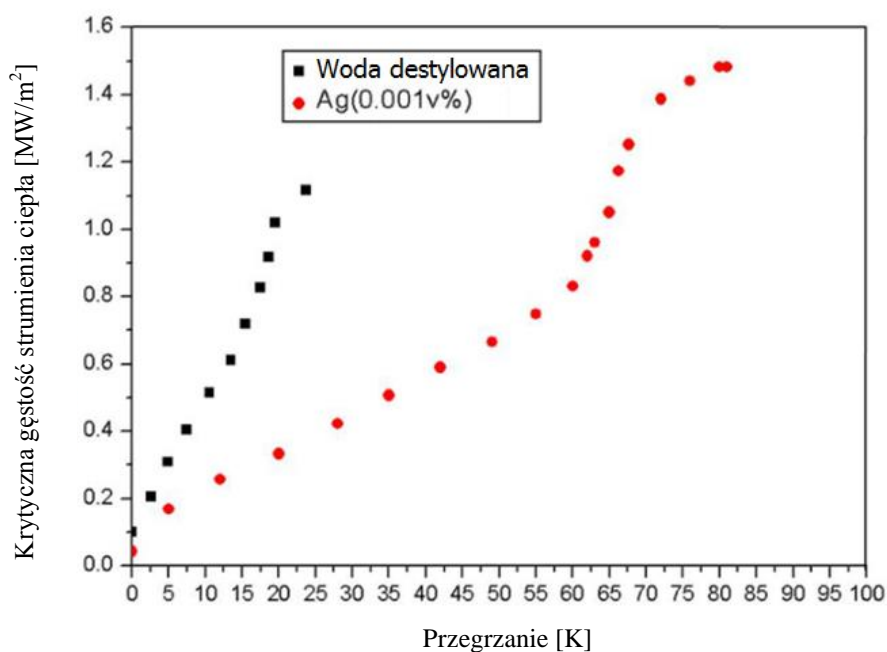
Kwark in. [56] badali wpływ wymiaru nanocząstek, ciśnienia, orientacji grzejnika oraz wymiaru powierzchni grzejnej na krytyczną gęstość strumienia ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 . Koncentracja nanocząstek wynosiła 1 kg/m^3 . Zaobserwowano, że wymiar nanocząstek ma niewielki wpływ na wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła. Ustalono, że wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła wzrasta wraz ze wzrastającym ciśnieniem w zakresie od 20 do 200 kPa, przy czym wartości uzyskane dla powierzchni grzejnej z nanowarstwą osadu są także wyższe w stosunku do wartości uzyskanych na powierzchni czystej. Najwyższą wartość q_{kr1} uzyskano dla powierzchni poziomych. Wraz ze wzrostem nachylenia płyty wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła znacząco spadała. Stwierdzono dodatkowo, że wymiar grzejnika nie ma żadnego wpływu na przebieg krzywych wrzenia.

Liu i in. [57] przeprowadzali doświadczenie potwierdzające wpływ ciśnienia oraz koncentracji nanorurek węglowych na wartość współczynnika przejmowania ciepła oraz krytycznej gęstości strumienia ciepła podczas wrzenia. Jako powierzchnię grzejącą zastosowali płytę miedzianą o wymiarach 40x40 mm. Nanorurki miały średnice rzędu 15 nm, natomiast ich długość wynosiła od 5 do 15 μm . Jako ciecz bazową zastosowano wodę dejonizowaną. Dodatkowo do zawiesiny dodano kwasu azotowego, otrzymując pH roztworu wynoszące 6,5. Badane koncentracje masowe mieściły się w przedziale od 0,5% do 4%. Wrzenie przeprowadzono przy ciśnieniu atmosferycznym (100kPa) oraz przy dwóch podciśnieniach - 20 kPa oraz 7,4 kPa. Zauważono, że lepkość oraz współczynnik przewodzenia ciepła wzrasta wraz z dodatkiem nanocząstek, natomiast kąt zwilżania oraz napięcie powierzchniowe maleją wraz ze wzrostem koncentracji masowej nanocząstek. Stwierdzono także, że wartość współczynnika przejmowania ciepła oraz wartość q_{kr1} wzrasta wraz z koncentracją masową nanorurek, lecz tylko w zakresie koncentracji od 0,5% do 2%. Najwyższe wartości współczynnika przejmowania ciepła oraz krytycznej gęstości strumienia ciepła uzyskano dla koncentracji 2%. Stwierdzono również, że wraz ze spadkiem ciśnienia spadają wartości współczynnika przejmowania ciepła oraz krytycznej gęstości strumienia ciepła.

Kathiravan i in. [58] badali wrzenie nanocieczy woda-Cu na płaskiej, kwadratowej płytce o wymiarach 30x30x0,44 mm. Średni wymiar nanocząstek wynosił 10 nm. Badaniu poddano trzy koncentracje masowe zawiesin wynoszące 0,25%, 0,5% oraz 1%. Jako ciecz bazową zastosowano czystą wodę. Do części nanocieczy dodano surfaktantu, którym był SDS. Eksperymenty pokazały, że wartość współczynnika przejmowania ciepła jak i krytycznej gęstości strumienia ciepła dla roztworu wody i SDS różnią się znacząco od wartości uzyskanych dla czystej cieczy bazowej. Wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła maleje o około 80% w wyniku dodatku substancji powierzchniowo-czynnej. Może to mieć związek ze zmianą charakteru oddziaływań pomiędzy cząsteczkami substancji po wprowadzeniu do roztworu SDS. Odmienna sytuacja ma miejsce w przypadku nanocieczy. Nanociecze o koncentracji 0,25%, 0,5% oraz 1%, zawierające tylko nanocząstki miedzi, charakteryzują się wartościami krytycznej gęstości strumienia ciepła wyższymi o 25%, 40% i 48% w stosunku do czystej wody, podczas gdy współczynnik przejmowania ciepła znacząco spada wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek. W przypadku wrzenia nanocieczy zawierającej dodatkowo związek powierzchniowo-czynny wartości krytycznej gęstości strumienia

ciepła były odpowiednio niższe o 75%, 68% i 62% niż wartości uzyskane dla wody. W tym przypadku współczynnik przejmowania ciepła był także niższy.

Park i in. [59] badali nanociecze z nanocząstkami srebra uzyskanymi w wyniku eksplozji elektrycznej srebrnych drucików w cieczy bazowej, którą była woda dejonizowana. Uzyskane w ten sposób nanocząstki charakteryzowały się średnim wymiarem wynoszącym 118,9 nm, natomiast potencjał zeta uzyskanych nanocieczy wyniósł 42,5 mV. Krytyczna gęstość strumienia ciepła uzyskana w przypadku wrzenia nanocieczy woda-Ag o koncentracji 0,0001%, na cienkim druczku była wyższa niż dla czystej wody dejonizowanej (rys. 4.15). Zmianę przebiegu krzywych wrzenia oraz wzrost wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła tłumaczone są zmianami zachodzącymi w strukturze powierzchni grzejnej oraz nanowarstwą tworzącą się na druczku w trakcie procesu wrzenia.

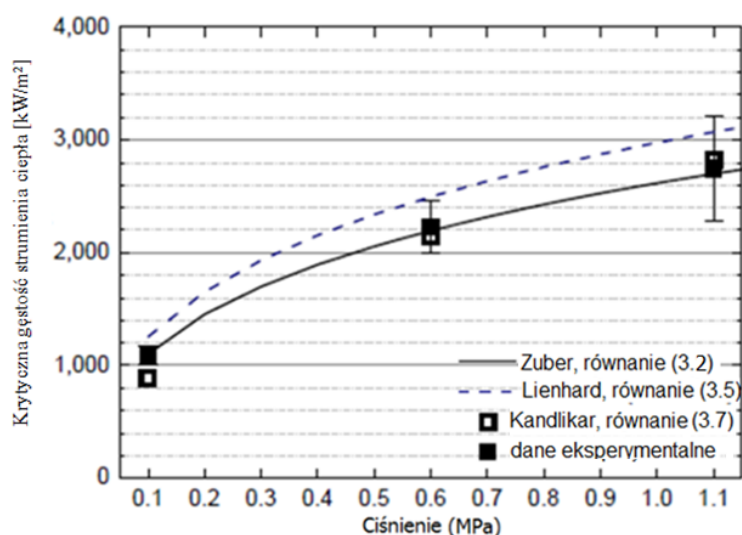


Rys. 4.15. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-Ag [59]

Lee i in. [60] badali nową grupę nanocieczy zawierających nanocząstki magnetyczne o koncentracji 10 ppm. Jako ciecz bazową wykorzystali wodę destylowaną. Obecność nanocząstek magnetycznych spowodowała wzrost wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła badanej nanocieczy. Dodatkową poprawę uzyskano, gdy przeprowadzono ten sam proces pod wpływem pola magnetycznego. Jego obecność spowodowała wzrost wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła o ponad 15% w stosunku do czystej cieczy bazowej. Wzrost ten tłumaczono zwiększoną koncentracją nanocząstek wokół rurki, na której zachodził proces. Z kolei przyrost

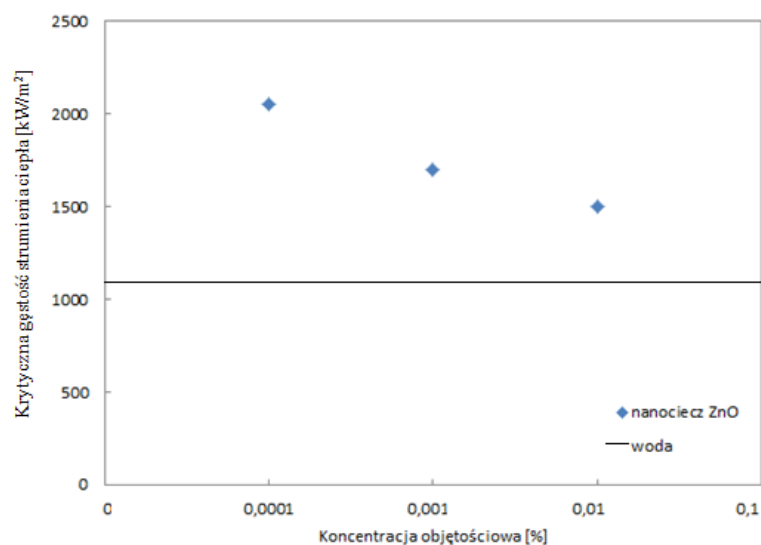
koncentracji spowodowany był przyciąganiem cząstek magnetycznych za pomocą magnesu umieszczonego wewnątrz rurki pomiarowej.

Lee i in. [61] badali wpływ ciśnienia na przebieg procesu wrzenia nanocieczy zawierających nanocząstki aluminiowe (Al_2O_3) oraz nanocząstki magnetytu (Fe_3O_4). Jako ciecz bazową zastosowano czystą wodę, a eksperyment był przeprowadzony na poziomym drucie chromoniklowym (Ni-Cr). Nanociecz przygotowana została metodą dwustopniową, za pomocą płuczki ultradźwiękowej, a pH nanocieczy zawierającej nanocząstki Al_2O_3 wynosiło 6,6-6,8, natomiast nanocząstki Fe_3O_4 - 4,1 - 4,5. Zmierzone wartości potencjału zeta wynosiły około 30 mV i wskazywały na stabilność wytworzonych nanocieczy. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła wzrasta wraz ze wzrostem ciśnienia w układzie (rys. 4.16). Wzrost wartości q_{kr1} tłumaczy się przede wszystkim wpływem ciśnienia na zachowanie oraz ilość pęcherzyków, powstających na druciku w trakcie wrzenia. Wraz ze wzrostem ciśnienia zaobserwowano wzrost częstotliwości ich powstawania oraz zwiększenie gęstości aktywnych centrów nukleacji. Dodatkowo zmierzono także kąt zwilżania nanocieczy. Okazało się, że wzrost ciśnienia ma zasadniczy wpływ na wartość kąta zwilżania i prowadzi do zmniejszenia jego wartości, a zatem do poprawy zwilżalności powierzchni przez nanociecze wykorzystane w doświadczeniu.



Rys. 4.16. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 i woda- Fe_3O_4 [61]

Hiswankar i Kshirsagar [62] badali proces wrzenia oraz pierwszy kryzys wrzenia nanocieczy na bazie wody zawierającej nanocząstki tlenku cynku (ZnO) o koncentracji masowej w zakresie 0,0001% do 0,01% na drucie chromoniklowym o średnicy 0,4 mm, pod ciśnieniem atmosferycznym. Wartości krytycznych gęstości strumienia ciepła uzyskane podczas wrzenia nanocieczy były o około 70%-80% wyższe niż dla czystej wody (rys. 4.17). Za przyczynę wzrostu q_{kr1} wskazali obecność nanowarstwy, która powstaje podczas procesu na powierzchni grzejnej.



Rys. 4.17. Wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła nanocieczy woda-ZnO [62]

Kole i Madhusree [63] badali proces wrzenia nanocieczy woda-Cu na cylindrycznych grzejnikach o średnicy 10 mm i długości ok. 15 mm wykonanych z trzech różnych materiałów: miedzi, mosiądzu oraz aluminium. Krytyczna gęstość strumienia ciepła oraz współczynnik przejmowania ciepła wzrastają wraz z koncentracją nanocieczy podczas wrzenia na wszystkich wymienionych powierzchniach grzejnych. Za przyczynę tego wskazano zmieniającą się chropowatość powierzchni, spowodowaną osadzaniem się nanocząstek na powierzchni grzejnej. To z kolei ma zasadniczy wpływ na gęstość aktywnych centrów nukleacji. Dzięki temu autorzy wywnioskowali, że na wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła oraz współczynnika przejmowania ciepła ma wpływ materiał, z którego wykonana jest powierzchnia grzejna. Współczynnik przejmowania ciepła uzyskany w trakcie wrzenia na powierzchni miedzianej jest o około 45% wyższy niż w przypadku powierzchni mosiężnej. Z kolei najwyższą wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła odnotowano podczas wrzenia badanej nanocieczy o koncentracji masowej 0,5% i wyniosła ona około 160% w odniesieniu wody w tych samych warunkach.

5. Teza pracy

Dodanie nanocząstek Al_2O_3 , TiO_2 i Cu o koncentracji masowej w zakresie od 0,001% do 1% prowadzi do wzrostu krytycznej gęstości strumienia ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 , woda- TiO_2 i woda- Cu w dużej objętości na poziomych, gładkich rurkach ze stali nierdzewnej.

6. Cel i zakres pracy

Zasadniczym celem przedłożonej pracy jest rozpoznanie zjawisk towarzyszących pierwszemu kryzysowi wrzenia wybranych nanocięczy, a w szczególności ustalenie wpływu kąta zwilżania i średnicy rurki na wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła. Uzyskane wyniki eksperymentalne powinny dać odpowiedź czy w przypadku nanocięczy pierwszy kryzys wrzenia ma charakter hydrodynamiczny, czy też decydujące znaczenie ma zdolność nanocięczy do zwilżania powierzchni grzejnej.

Zakres pracy obejmował:

1. modernizację stanowiska badawczego, tak aby można było przeprowadzić badania wrzenia na poziomych rurkach. Należało również zaprojektować cylindryczną sekcję grzejną i układ zasilania elektrycznego, co wymaga pokonania wielu trudności technicznych ze względu na duże natężenie prądu wymagane do osiągnięcia pierwszego kryzysu wrzenia, tj. przepalenia (*ang. burnout*) rurek o konwencjonalnej średnicy. Zastosowanie rurek ze stali nierdzewnej, jako materiału sekcji grzejnej wynikało z dwóch przesłanek. Po pierwsze i najważniejsze, stal nierdzewna jest podstawowym materiałem stosowanym w budowie reaktorów jądrowych czy reaktorów chemicznych, a więc tam gdzie możliwość wystąpienia kryzysu wrzenia pęcherzykowego jest największa. Po drugie, w badaniach własnych rurki były ogrzewane ciepłem Joule'a, w wyniku przepuszczania przez nie prądu elektrycznego o regulowanym natężeniu. Zastosowanie stali nierdzewnej, a więc materiału o stosunkowo małej przewodności elektrycznej prowadzi do ograniczenia natężenia prądu niezbędnego do przepalenia rurek. Badane średnice rurek (1,6 mm, 3 mm i 5 mm) wynikały z możliwości układu zasilania elektrycznego;
2. opanowanie metody wytwarzania stabilnych nanocięczy. Ze względu na nieskomplikowany charakter, do wytworzenia nanocięczy zdecydowano się zastosować metodę dwustopniową, z użyciem płuczki ultradźwiękowej do wymieszania cieczy bazowej i nanoproszku, dostarczonego przez renomowanego producenta, bez stosowania surfaktantów;
3. wyznaczenie krytycznych gęstości strumienia ciepła przy wrzeniu w dużej objętości nanocięczy na bazie wody o różnych koncentracjach, dla rurek o różnej średnicy. Wybór wody destylowanej, jako cieczy bazowej wynika z jej

- powszechnego stosowania w układach chłodzenia, natomiast zastosowanie dwóch rodzajów nanocząstek, tj. ceramicznych (Al_2O_3 , TiO_2) oraz metalicznych (Cu) wynikał zarówno z chęci zbadania wpływu na przebieg kryzysu wrzenia odmiennych własności termofizycznych, w tym szczególnie współczynnika przewodzenia ciepła, jak i oddziaływania nanocząstek z powierzchnią grzejną, tj. np. osadzania się nanocząstek na rurkach. Dotychczasowe doświadczenia (rozd. 4) wskazują, że koncentracja masowa nanocząstek, w przypadku procesu wrzenia powinna być w zakresie 0,01% do 0,4%. Ze względu na koszt nanocząstek powinno się stosować jak najmniejsze koncentracje w celu osiągnięcia zamierzonego efektu termicznego, tj. podwyższenia współczynnika przejmowania ciepła czy krytycznej gęstości strumienia ciepła. W badaniach własnych zastosowano trzy koncentracje masowe nanocząstek: 0,01%, 0,1% oraz 1%. Prócz eksperymentów z wrzeniem nanocieczy zostały też przeprowadzone testy – dla każdej średnicy rurki, z wrzeniem wody destylowanej, wyniki których służyły jako referencyjne dla wrzenia nanocieczy;
4. opracowanie równania korelacyjnego uogólniającego wyniki własnych badań eksperymentalnych, co wymaga znajomości parametrów termofizycznych nanocieczy, które mają zasadniczy wpływ na przebieg procesu wrzenia, a w tym przede wszystkim kąta zwilżania, współczynnika przewodzenia ciepła i kinematycznego współczynnika lepkości. Wyznaczenia wymienionych parametrów – wymagającego zastosowania specjalistycznej aparatury, dokonano we współpracy z Wydziałem Chemicznym Politechniki Gdańskiej i Laboratorium für Energetik Hochschule Bremen (Niemcy);
 5. dyskusję uzyskanych wyników badań, a w tym propozycję kierunków dalszych badań.

7. Stanowiska badawcze

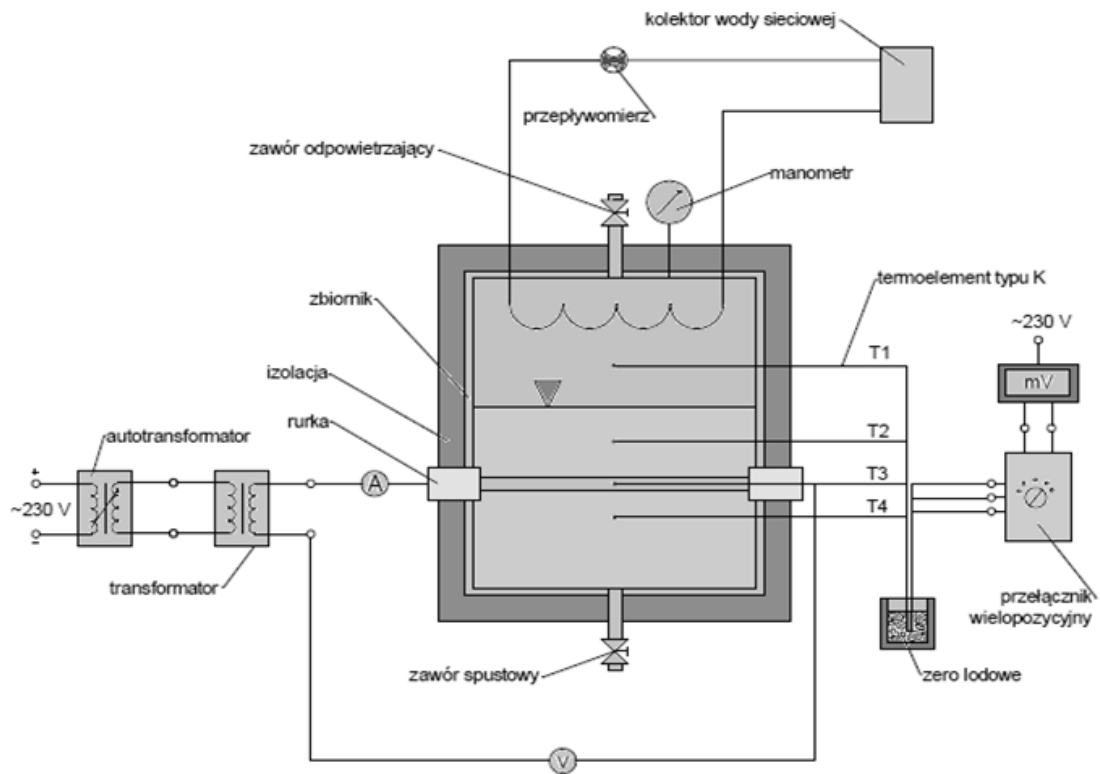
7.1. Stanowisko do badań pierwszego kryzysu wrzenia

Stanowisko do badań pierwszego kryzysu wrzenia nanocieczy składa się z sekcji grzejnej, zbiornika pomiarowego wyposażonego w układ kontroli temperatury oraz układu zasilania i regulacji mocy (rys. 7.1 i 7.2). Dodatkowym wyposażeniem był układ przeznaczony do przygotowania nanocieczy oraz układ do archiwizacji i obróbki danych pomiarowych.

Podstawowym elementem stanowiska był zbiornik pomiarowy, wykonany ze stali nierdzewnej 316l o wymiarach 150x150 mm i całkowitej wysokości 250 mm. Zbiornik wyposażony był w podwójne ściany, z których zewnątrz izolowana była za pomocą waty mineralnej i pianki termoizolacyjnej obudowanej folią aluminiową, która zadawalająco zmniejsza starty ciepła do otoczenia. Na ścianie przedniej i tylnej zbiornik zaopatrzony był w dwa wzierniki o średnicy 65 mm, do budowy których wykorzystano szkło hartowane o grubości 8 mm. Do pozostałych dwóch ścian zbiornika przykręcone były tuleje teflonowe, które umożliwiły prosty montaż sekcji grzejnej.

Temperaturę wody w zbiorniku zmierzono za pomocą 6 termoelementów typu J, umieszczonych w tylnej ścianie zbiornika w sześciu króćcach, na trzech różnych wysokościach. Dodatkowo w pokrywie zbiornika umieszczony został skraplacz zakończony szybkozłączem, umożliwiającym szybkie i łatwe podłączenie węża, za pomocą którego, poprzez zmianę strumienia wody chłodzącej, dokonywano regulacji temperatury wewnątrz zbiornika. Wewnątrz zbiornika umieszczono także dodatkową grzałkę patronową, która ułatwiała utrzymanie wody i nanocieczy w temperaturze nasycenia.

Układ zasilania składał się z dwóch oddzielnych podukładów. Pierwszy składający się z dwóch zasilaczy, zasiliał sekcję grzejną, drugi natomiast pomocniczą grzałkę patronową o mocy 1,2 kW. Regulacja mocy możliwa była poprzez zastosowanie w układach trzech autotransformatorów.



Rys.7.1. Schemat stanowiska badawczego



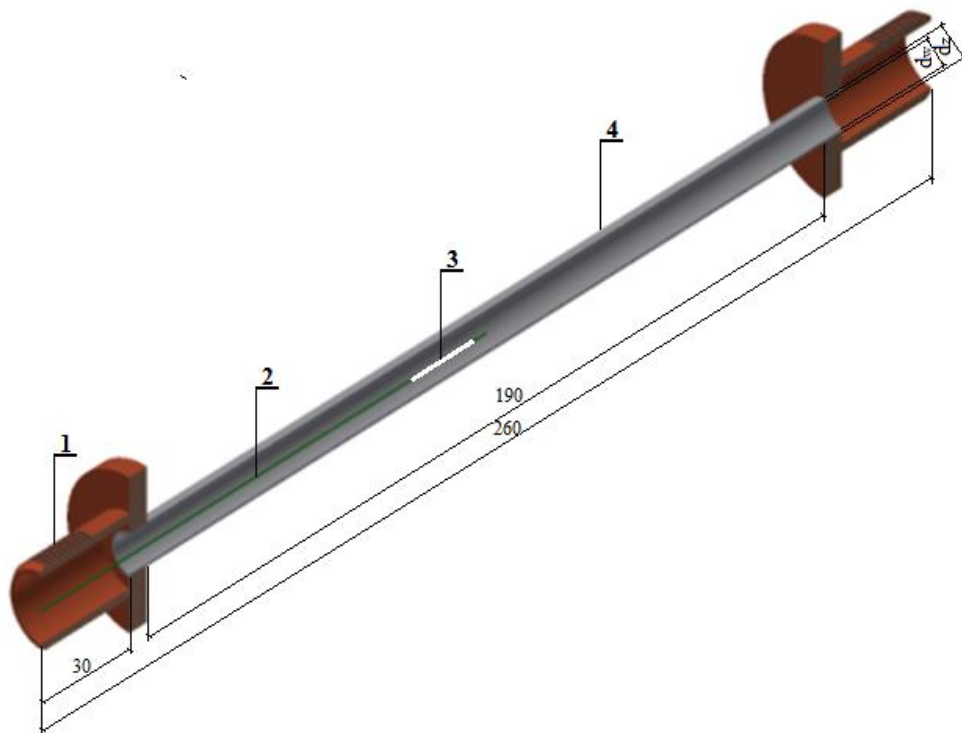
Rys. 7.2. Widok stanowiska badawczego

Sekcja grzejna

Sekcja grzejna składała się z rurki pomiarowej oraz części mocującej ją w zbiorniku pomiarowym, umieszczonej w blokach teflonowych przykręconych szczelnie do przeciwległych ścian zbiornika. W badaniu zastosowano trzy rurki

poziome wykonane ze stali nierdzewnej 316l o średnicach zewnętrznych równych 1,6 mm, 3 mm oraz 5 mm i średnicach wewnętrznych równych 1,1 mm, 2,5 mm oraz 4,3 mm. Chropowatość powierzchni rurek została zmierzona za pomocą urządzenia Hommel Tester T500, a wyniki przedstawiono w tab. 7.1. Na rys. 7.3 przedstawiono schemat sekcji grzejnej.

Wrzenie na zewnętrznej powierzchni rurek uzyskiwano dzięki przepuszczeniu przez ściankę rurki prądu elektrycznego. Źródłem prądu był układ dwóch połączonych wzmacniaczy specjalnie zbudowanych na potrzeby badań. Spadek napięcia na rurce i natężenie prądu mierzono za pomocą multimetru KEWTECH KT200. Wzmacniacze umożliwiły uzyskanie natężenia prądu do 400A oraz mocy 24 kW.



Rys. 7.3. Schemat sekcji grzejnej: 1 – miedziany uchwyt mocujący, 2 – termoelement typu K, 3 – pierścień teflonowy, 4 – badana rurka, d_z – średnica zewnętrzna, d_w – średnica wewnętrzna

Do pomiaru temperatury wewnętrznej powierzchni rurki użyto termoelement typu K, o średnicy 0,5 mm, umieszczony w osi rurki. Temperaturę zewnętrznej powierzchni ścianki rurki obliczano uwzględniając spadek temperatury w ściance (rozdz. 8.1).

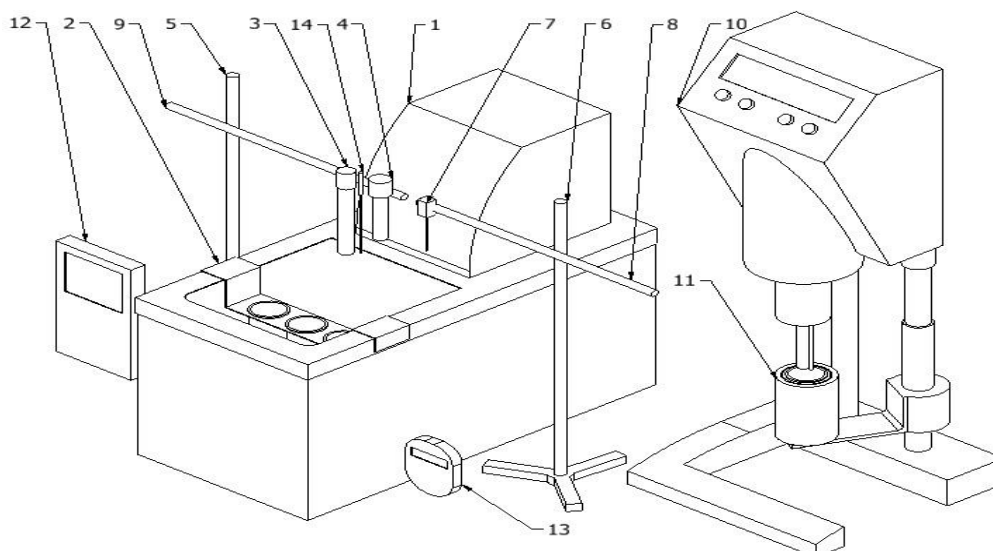
7.2. Procedura pomiarowa w badaniach pierwszego kryzysu wrzenia

Powierzchnia wszystkich rurek przed zamontowaniem w zbiorniku była starannie czyszczona za pomocą pasty polerskiej, a następnie za pomocą płuczki ultradźwiękowej. Kolejnym krokiem było dokładne odtłuszczenie powierzchni za pomocą rozpuszczalnika organicznego i przepłukanie wodą destylowaną. Rurki poddawane były procesowi starzenia, który polegał na utrzymaniu na nich rozwiniętego wrzenia przez około 120 minut. Proces ten prowadził do odgazowania warstwy powierzchniowej rurki, zbiornika oraz wlanej do niego wody destylowanej. Zbiornik za każdym razem także był starannie czyszczony za pomocą papieru ściernego 180, po czym 1000. Następnie był płukany z użyciem wody destylowanej. W celu sprawdzenia czy zbiornik został wystarczająco odczyszczony po wcześniejszym eksperymencie wykonywano pomiar testowy z wodą destylowaną przez okres 60 min. i jeżeli krzywa wrzenia uzyskana z pomiaru testowego pokrywała się z krzywą wrzenia wzorcową wykonaną dla czystego zbiornika podczas wrzenia wody destylowanej, kończono czyszczenie i rozpoczynano nowy eksperyment ze świeżo przygotowaną nanocieczą.

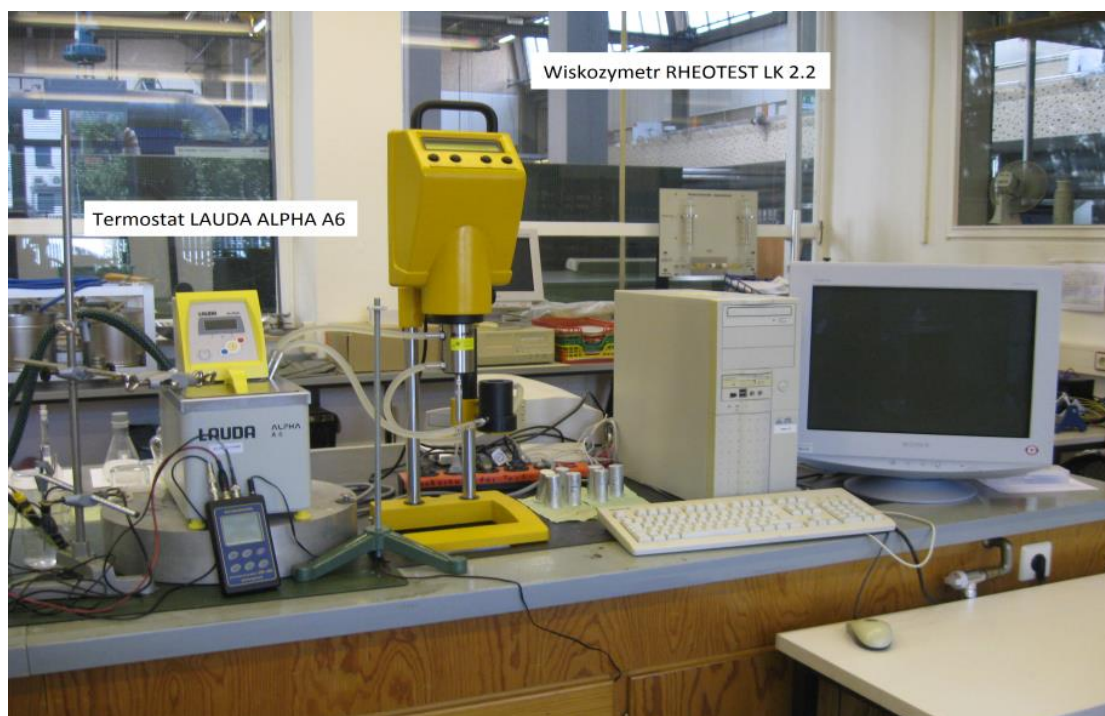
Wszystkie pomiary wykonywane były w stanie ustalonym, za który uważa się stan, w którym zmiana wskazań termoelementu mierzącego temperaturę wewnątrz rurki, po uzyskaniu stanu nasycenia, nie przekracza $\pm 0,01$ mV. Kolejne stany ustalone osiągnano poprzez stopniowe zwiększanie natężenia prądu dostarczanego do sekcji pomiarowej, które było możliwe dzięki regulacji za pomocą autotransformatora. Występowanie pierwszego kryzysu wrzenia objawiało się przepaleniem rurki w losowym przekroju.

7.3. Stanowisko badawcze do pomiaru własności termofizycznych nanocieczy

Stanowisko badawcze do pomiaru własności termofizycznych nanocieczy przedstawione zostało na rys. 7.4 natomiast jego widok na rys. 7.5.



Rys. 7.4. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 - termostat, 2 - podpora, 3 - elektroda miernika konduktywności, 4 - elektroda miernika pH, 5,6-statyw laboratoryjny, 7 - sonda miernika współczynnika przewodzenia ciepła, 10-lepkociomierz, 11 - komora lepkociomierza, 12 – miernik konduktywności i pH, 13- miernik współczynnika przewodzenia ciepła, 14-termometr



Rys. 7.5. Stanowisko badawcze do badań własności termofizycznych nanociecizy

W celu przeprowadzenia pomiarów dynamicznego współczynnika lepkości wykorzystano lepkociomierz RHEOTEST LK 2.2 niemieckiej firmy Medingen GmbH. Urządzenie to umożliwiała pomiar lepkości w zakresie od 1-10000 mPas przy

zastosowaniu różnego rodzaju kapilar. Specjalnie na potrzeby prowadzonych badań została wykonana kapilara, która umożliwiła pomiar lepkości poniżej jego dolnego zakresu, od 0,6 mPas, co pozwoliło na zbadanie lepkości cieczy o charakterze zbliżonym do wody. Urządzenie umożliwiło pomiar lepkości w zakresie temperatur od -10°C do +80°C. W celu przeprowadzenia pomiaru należało starannie przygotować badaną nanociecz w odpowiedniej ilości - 25 ml, a następnie umieścić ją w specjalnym pojemniku, który gwarantował brak reakcji zachodzących między materiałem pojemnika, a badaną cieczą. Pomiar trwał 35 sekund, wynik odczytywano z cyfrowego wyświetlacza urządzenia. Wykonywano 5 pomiarów lepkości, z których za pomocą średniej arytmetycznej obliczano właściwą wartość dynamicznego współczynnika lepkości.

Do przeprowadzenia pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła użyto miernika KD2 Thermal Properties Analyzer firmy Decagon Devices Inc. Umożliwiał on szybki i prosty pomiar współczynnika przewodzenia ciepła w zakresie od 0,02 do 2 W/mK, w zakresie temperatur od -20°C do +60°C. Błąd pomiaru miernika wynosił $\pm 5\%$. W przypadku tego miernika bardzo ważnym było, aby pomiar wykonany był w stabilnych warunkach. W tym celu należało umieścić sondę w uchwycie statywu, tak, aby igła zanurzona była w $\frac{3}{4}$ w badanej cieczy i nie dotykała żadnej ze ścianek i dna naczynka pomiarowego. Współczynnik przewodzenia ciepła wyliczany był na podstawie prędkości zmiany temperatury w czasie trwania pomiaru, który wynosił 2 minuty.

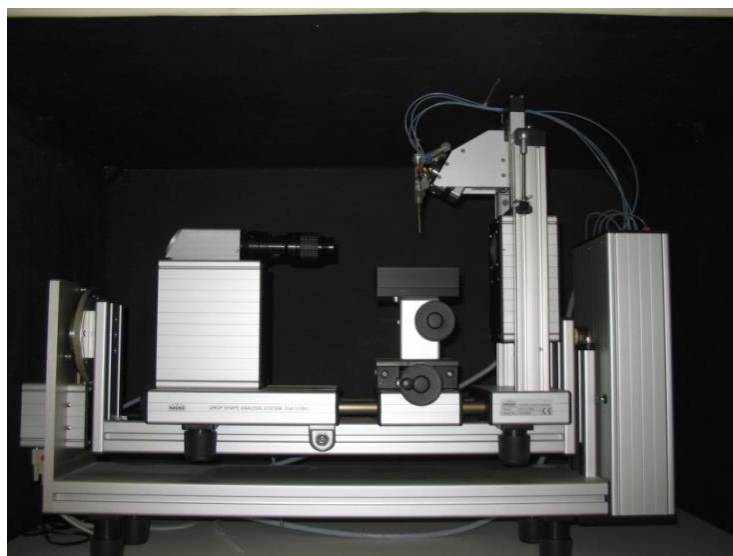
Do przeprowadzenia pomiarów konduktywności oraz pH użyto miernika CPC-401 firmy Elmetron. Miernik pozwalał na pomiar konduktywności w zakresie temperatur od -5°C do +45°C, natomiast błąd wskazań wynosił $\pm 0,1\%$. Konduktywność mierzona była za pomocą sondy Elmetron typu EC-60. Do pomiaru pH użyto natomiast elektrody pH E-2627, która pracuje w zakresie temperatur od -5°C do +50°C z dokładnością do 0,005. Pomiar pH odbywał się w zakresie od 2 do 16. Dodatkowo za pomocą miernika CPC-401 możliwy był pomiar temperatury za pomocą oddzielnej sondy z dokładnością $\pm 0,05^\circ\text{C}$.

7.4. Stanowiska badawcze do pomiaru kąta zwilżania nanociecz

Pomiary przeprowadzone zostały na dwóch stanowiskach badawczych. W pierwszym przypadku do określenia kąta zwilżania użyto goniometru KRÜSS

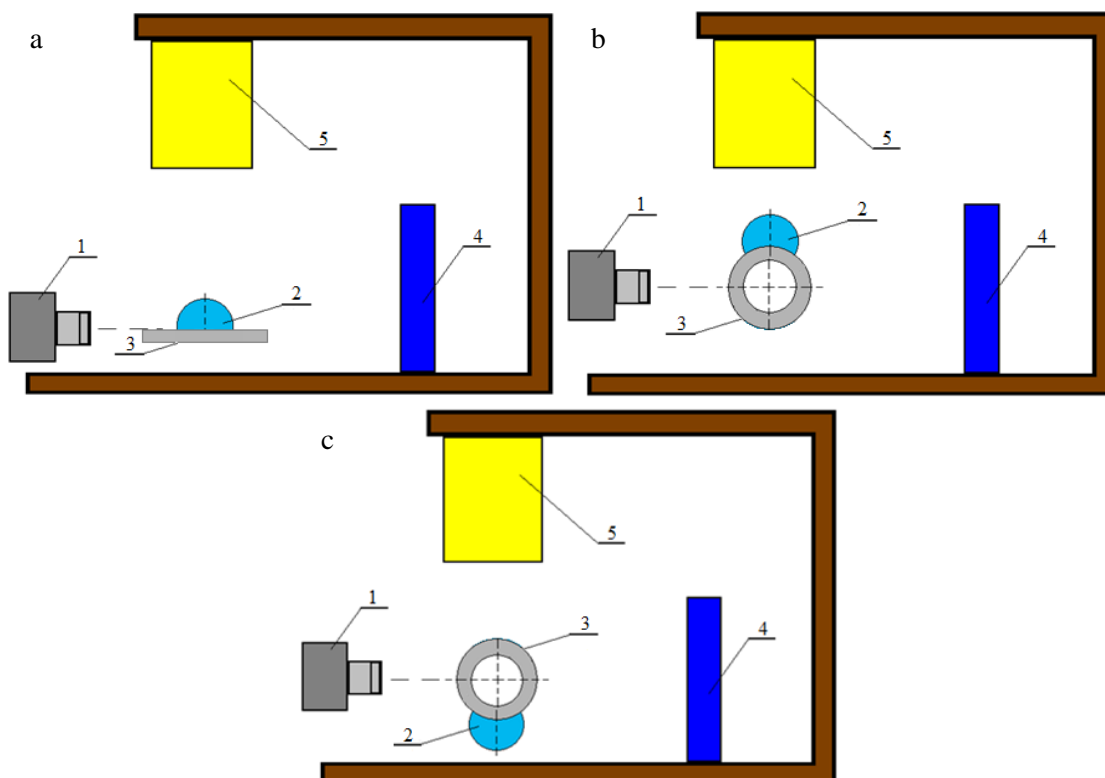
DSA10, natomiast w drugim badaniu przeprowadzone zostały na stanowisku pomiarowym, według własnego projektu. Kąt zwilżania wyznaczano na kilku rodzajach powierzchni: płaskich i walcowych, zbudowanych z kilku materiałów o różnej chropowatości, co możliwe było dzięki wyposażeniu stanowiska w sekcję pomiarową, którą można było w prosty i szybki sposób zdemontować w celu wymiany na kolejną.

Urządzenie KRÜSS DSA10 do określania kąta zwilżania oraz napięcia powierzchniowego wykorzystuje prostą analizę kształtu kropli. Aparat wykonuje pomiar napięcia powierzchniowego na granicach faz: *ciecz/ciecz* oraz *ciecz/gaz* w zakresie 0,01 do 100 mN/m oraz pomiar kąta zwilżania w zakresie 0° do 180° , $\pm 0,1\%$ dla kropli o objętości $2 \mu\text{L}$, dozowanych automatycznie. Podstawowy zestaw pomiarowy zawierał: urządzenie podstawowe z własnym oświetlaczem, stół pomiarowy wykonany z anodowanego aluminium, wysokiej jakości obiektyw zmienneogniskowy, automatyczny system dozujący, sterowany komputerowo oraz lampę halogenową. Widok goniometru jest przedstawiony na rys. 7.6.



Rys. 7.6. Widok aparatu pomiarowego KRÜSS DSA10

Własne stanowisko przeznaczone do wyznaczenia kąta zwilżania przedstawia rys. 7.7, odpowiednio do pomiaru kąta zwilżania kropli osadzonej na płaskiej powierzchni (rys. 7.7a), kropli osadzonej (rys. 7.7b) oraz podwieszanej (rys. 7.7c) na powierzchni walcowej. Dzięki użyciu automatycznej mikropipety na badanych powierzchniach można było umieszczać krople o znanej objętości ($2\mu\text{L}$). Zdjęcia wykonywano za pomocą wysokiej jakości aparatu cyfrowego Casio EX-FH25. Z uzyskanych zdjęć na podstawie analizy kształtu kropli wyznaczano wartość kąta zwilżania badanych nanociecz (rozdz. 8.2).



Rys. 7.7. Schemat stanowiska do wyznaczania kąta zwilżania: 1 – aparat fotograficzny, 2 – osadzona kropla, 3 - powierzchnia osadzania kropli 4 – ekran, 5 – lampa halogenowa

7.5. Charakterystyka badanych powierzchni

W tab. 7.1 przedstawiono charakterystykę powierzchni użytych w trakcie badań pierwszego kryzysu wrzenia oraz pomiarów kąta zwilżania.

Tabela 7.1. Zestawienie powierzchni wykorzystanych w przedstawionych badaniach

Badanie	Rodzaj powierzchni	Materiał	Średnica [mm]	Chropowatość R_a [μm]
pierwszy kryzys wrzenia	rurka	stal nierdzewna	1,6	0,2
			3	0,08
			5	0,2
kąt zwilżania	płytki	stal nierdzewna	-	0,18; 0,12; 0,04; 0,03
		anodyzowane aluminium	-	-
		szkło	-	0,02
	rurka	stal nierdzewna	1,6	0,2
			3	0,08
			5	0,2

7.6. Układ przygotowania nanocieczy

Głównym elementem wchodzącym w skład układu przygotowania nanocieczy była płuczka ultradźwiękowa SONICA firmy Soltec. Urządzenie to umożliwiało przygotowanie 4 litrów nanocieczy, powstającego poprzez umieszczenie kolejno cieczy bazowej oraz nanoproszku w zbiorniku mieszania. Częstotliwość pracy płuczki wynosiła 45 kHz. Urządzenie posiada także możliwość nastawy czasu pracy do 99 minut oraz temperatury w zakresie 15-75°C. Drugim zasadniczym elementem było mieszadło mechaniczne CAT X 1740. Mieszadło posiada 6 programów mieszania, w zakresie od 2500 obr/min do 23500 obr/min. Po wcześniejszym przygotowaniu nanocieczy w płuczce ultradźwiękowej, była ona następnie umieszczana w zbiorniku mieszadła i poddawana dalszemu mieszaniu z określoną prędkością obrotową.

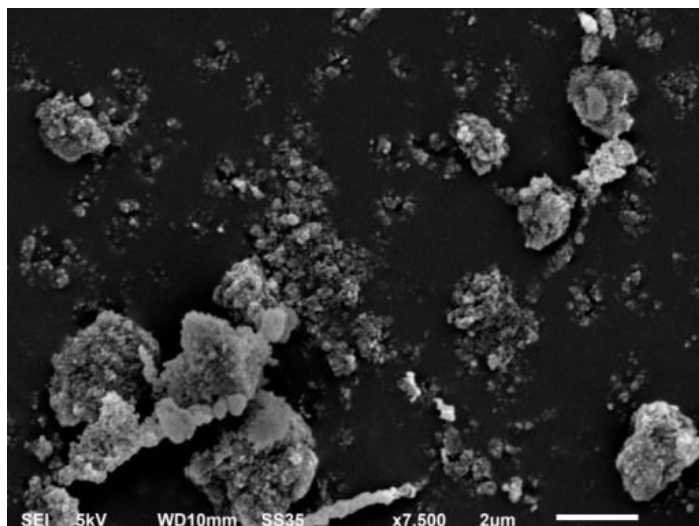
7.7. Charakterystyka badanych nanocieczy

Tab. 7.2 zawiera zestawienie nanocieczy użytych w trakcie pomiarów własności termofizycznych, kąta zwilżania oraz badań pierwszego kryzysu wrzenia nanocieczy.

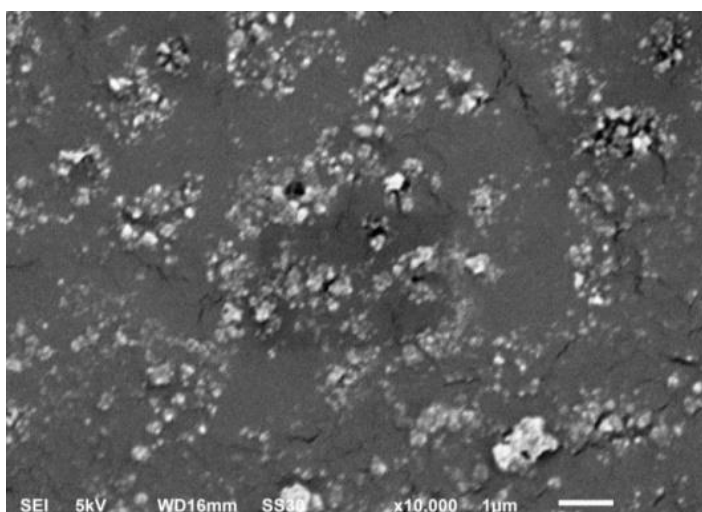
Tabela 7.2. Zestawienie nanocieczy wykorzystanych w badaniach

Badanie	Rodzaj cieczy bazowej	Rodzaj nanocząstek	Koncentracja masowa [%]
własności termofizyczne	woda destylowana	Al ₂ O ₃	0,1; 1; 5
		TiO ₂	
		Cu	
	olej termalny	Al ₂ O ₃	0,1; 1; 5
		TiO ₂	
		Cu	
kąt zwilżania	woda destylowana	Al ₂ O ₃	0,01; 0,1; 1
		TiO ₂	
		Cu	
pierwszy kryzys wrzenia	woda destylowana	Al ₂ O ₃	0,01; 0,1; 1
		TiO ₂	
		Cu	0,001; 0,01; 0,1

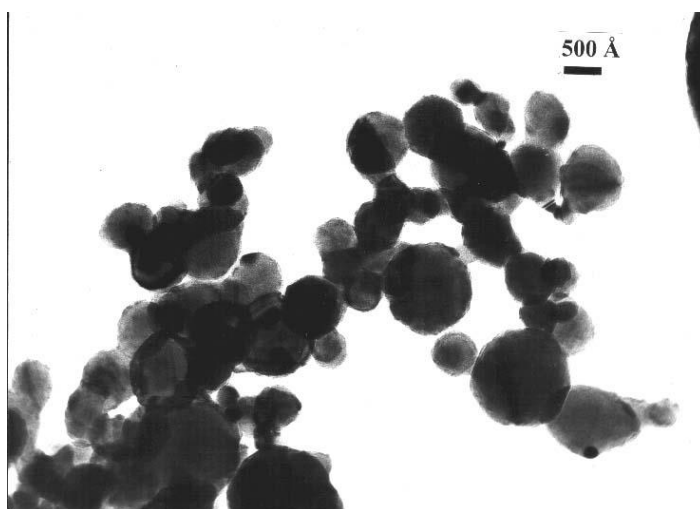
Na rys. 7.8 i 7.9 przedstawione zostały zdjęcia badanych nanocieczy na bazie wody, które uzyskano we współpracy z Centrum Nanotechnologii A Politechniki Gdańskiej za pomocą mikroskopu skaningowego FEI FEG 250, natomiast rys. 7.10 pokazuje zdjęcie SEM nanoproszku Cu dostarczone przez dostawcę.



Rys. 7.8. Aglomeraty nanoproszku TiO_2

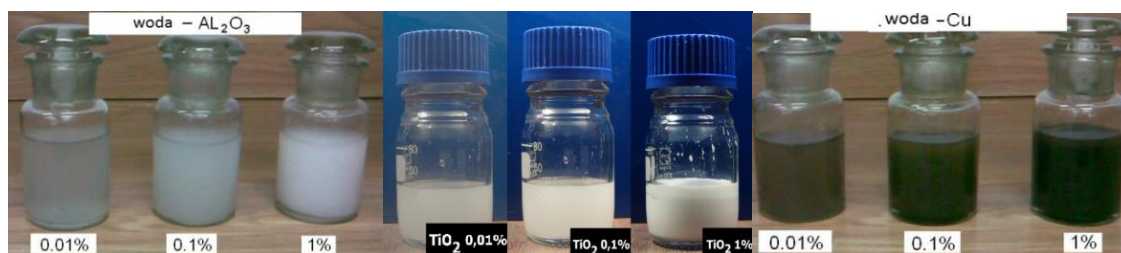


Rys. 7.9. Aglomeraty Al_2O_3

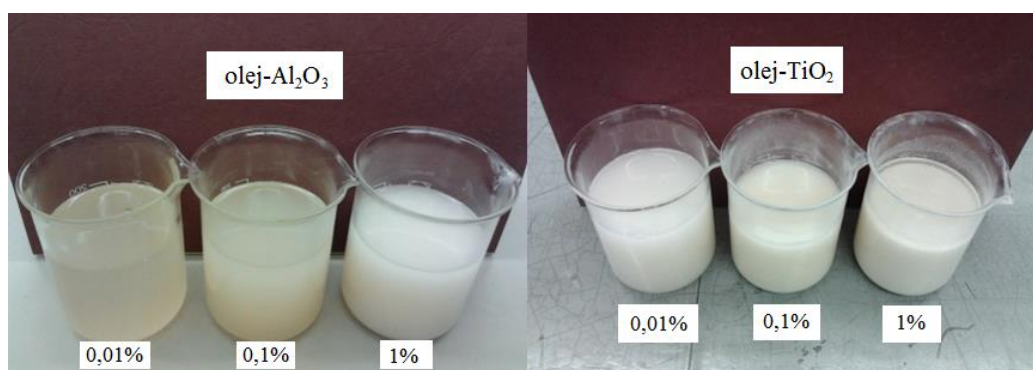


Rys. 7.10. Aglomeraty Cu [Sigma Aldrich Ltd.]

Na rys. 7.11 i 7.12 przedstawiono widok badanych nanocieczy na bazie wody oraz na bazie oleju.



Rys. 7.11. Widok badanych nanocieczy na bazie wody



Rys. 7.12. Widok badanych nanocieczy na bazie oleju

8. Opracowanie wyników

8.1. Pierwszy kryzys wrzenia nanocieczy

Gęstość strumienia ciepła

Gęstość strumienia ciepła określano na podstawie mierzonego spadku napięcia na rurce U , płynącego przez nią prądu I oraz jej powierzchni czynnej:

$$q = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{UI}{\pi d_z L} \quad . \quad (8.1)$$

Temperatura zewnętrznej powierzchni rurki

Temperaturę zewnętrznej powierzchni rurki obliczano ze wzoru:

$$t_o = t_i + \frac{UI}{4\pi\lambda L} \left[\frac{2\ln\left(\frac{d_z}{d_w}\right)}{\left(\frac{d_z^2}{d_w^2}\right) - 1} - 1 \right], \quad (8.2)$$

gdzie:

t_o – temperatura zewnętrznej powierzchni rurki,

t_i – temperatura wewnętrznej powierzchni rurki, mierzona za pomocą termoelementu typu K umieszczonego każdorazowo w osi rurki, w środku jej długości (rys. 7.3),

L - długość czynna rurki.

Przegrzanie

Przegrzanie było obliczane jako różnica temperatur zewnętrznej powierzchni rurki i temperatury cieczy, obliczanej jako średnia arytmetyczna ze wskazań 6 termoelementów typu J według wzoru:

$$\Delta T = t_o - t_l, \quad (8.3)$$

$$t_l = \frac{\sum_{j=1}^{j=6} t_j}{6}, \quad (8.4)$$

gdzie: t_j – temperatura cieczy.

Współczynnik przejmowania ciepła

Współczynnik przejmowania ciepła obliczano ze wzoru:

$$\alpha = \frac{q}{(t_o - t_l)}. \quad (8.5)$$

Oszacowanie błędu pomiaru

Jako miarę błędu pomiaru przyjęto błąd średni kwadratowy gęstości strumienia ciepła. Mając na uwadze równanie (8.1) średni bezwzględny błąd kwadratowy pomiaru oszacowano z zależności:

$$\Delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial U} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial I} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial d} \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial L} \Delta L\right)^2}, \quad (8.6)$$

gdzie pochodne cząstkowe wynoszą odpowiednio:

$$\frac{\partial q}{\partial U} = \frac{I}{\pi d L}, \quad (8.7)$$

$$\frac{\partial q}{\partial I} = \frac{U}{\pi d L}, \quad (8.8)$$

$$\frac{\partial q}{\partial d} = -\frac{IU}{\pi d^2 L}, \quad (8.9)$$

$$\frac{\partial q}{\partial L} = -\frac{IU}{\pi d L^2}. \quad (8.10)$$

Bezwzględne błędy pomiaru napięcia oraz natężenia za pomocą multimetru wynoszą: $\Delta U = 2\%$ rtg oraz $\Delta I = 2\%$ rtg (gdzie: rtg oznacza wskazanie miernika).

Przyjmując bezwzględny błąd wyznaczenia średnicy rurki $\Delta d = 0,02$ mm oraz bezwzględny błąd określenia długości czynnej rurki $\Delta L = 4$ mm, otrzymuje się względny błąd wyznaczenia gęstości strumienia ciepła wynoszący:

$$\frac{\Delta q_{min}}{q_{min}} \cong \pm 0,032 \quad (8.11)$$

oraz

$$\frac{\Delta q_{max}}{q_{max}} \cong \pm 0,330. \quad (8.12)$$

Z uwagi na równanie (8.5) bezwzględny błąd określenia współczynnika przejmowania ciepła wyznaczono ze wzoru:

$$\Delta\alpha = \sqrt{\left(\frac{\partial\alpha}{\partial q}\Delta q\right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial T}\Delta T\right)^2}, \quad (8.13)$$

gdzie pochodne cząstkowe wynoszą odpowiednio:

$$\frac{\partial\alpha}{\partial q} = \frac{1}{\Delta T}, \quad (8.14)$$

$$\frac{\partial\alpha}{\partial T} = -\frac{q}{\Delta T^2}. \quad (8.15)$$

Przyjmując bezwzględny błąd różnicy temperatur – $\Delta T = 0,2$ K, uzyskano względny błąd wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła:

$$\frac{\Delta\alpha_{min}}{\alpha_{min}} \cong \pm 0,014, \quad (8.16)$$

oraz

$$\frac{\Delta\alpha_{max}}{\alpha_{max}} \cong \pm 0,306. \quad (8.17)$$

8.2. Kąt zwilżania nanocieczy

Wartość kąta zwilżania wyznaczano za pomocą trzech metod.

Metoda geometryczna

W metodzie tej do wyznaczania kąta zwilżania wykorzystywano zdjęcia kropli uzyskane za pomocą aparatu cyfrowego, na których mierzono odpowiednie odcinki (wysokość h oraz średnicę d kropli) - rys. 8.1. W przypadku małych kątów zwilżania, nieprzekraczających 30° - rys. 8.1a, do obliczania kąta zwilżania stosowano wzór [64]:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{2h}{d}\right) \quad (8.18)$$

Natomiast dla kątów zwilżania powyżej 30° - rys. 8.1b, wykorzystano zależność [64]:

$$\cos\alpha = \frac{r^2 - h^2}{r^2 + h^2} \quad (8.19)$$

a)

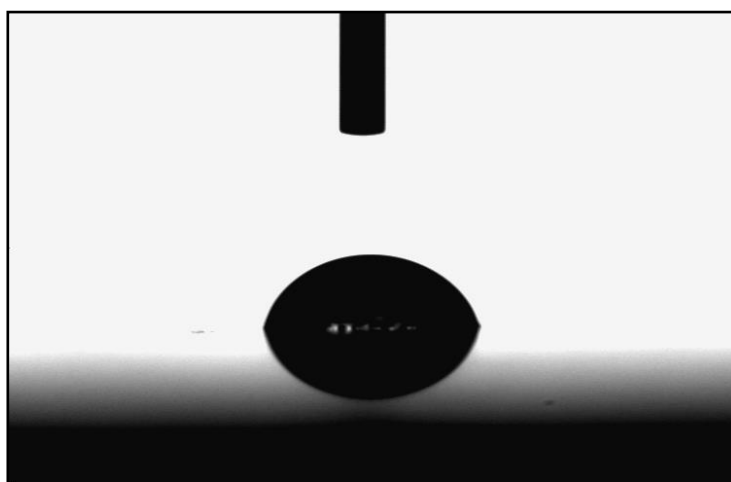


b)



Rys. 8.1. Profil doświadczalny kropli [64]

Przykłady zdjęć służących do wyznaczenia kąta zwilżania metodą geometryczną oraz zdjęcie kropli wiszących pokazano na rys. 8.2 i 8.3.



Rys. 8.2. Obraz kropli uzyskany za pomocą aparatu KRÜSS DSA 10



Rys. 8.3. Zdjęcie kropli wiszących nanocieczy woda-TiO₂
na rurce stalowej o średnicy 3 mm

Metoda aproksymacyjna

Do wyznaczenia kąta zwilżania w tej metodzie także wykorzystano zdjęcia uzyskane za pomocą aparatu cyfrowego. Procedura ta składa się z kilku zasadniczych kroków: 1. wybór punktów znajdujących się na krawędzi kropli, tzn. na granicy międzyfazowej ciec-z-gaz, 2. poprowadzenie przez wyznaczone punkty elipsy, która w najlepszy sposób opisuje kształt badanej kropli, 3. wystawienie stycznej do krawędzi kropli w punkcie, w którym krawędź kropli przecina się z prostą odpowiadającą podłożu, na którym dana kropla została osadzona, 4. wyznaczenie wartości kąta zwilżania z zależności (8.18). Funkcje najlepiej opisujące kształt kropli wyznaczano za pomocą programu APROKSYMACJA v1.5.7.2 [65].

Metoda bezpośrednia

Metoda ta polega na bezpośrednim pomiarze kąta zwilżania na powiększonym zdjęciu kropli za pomocą kątomierza (rys. 8.4).



Rys. 8.4. Zdjęcie oraz schemat pomiaru kąta zwilżania nanocieczi woda- Al_2O_3 o koncentracji 0,01%

Oszacowanie błędu pomiaru kąta zwilżania nanocieczi

Analiza niepewności pomiaru metodą geometryczną

Jako miarę błędu pomiaru w tej metodzie przyjęto błąd średni kwadratowy z kilkunastu niezależnych pomiarów. Wartość błędu bezwzględnego, dla kątów zwilżania poniżej 30° , została oszacowana za pomocą zależności:

$$\Delta \text{tg} \alpha = \sqrt{\left(\frac{\partial \text{tg} \alpha}{\partial d} \Delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{tg} \alpha}{\partial h} \Delta h \right)^2} \quad (8.20)$$

gdzie:
$$\frac{\partial \operatorname{tg} \alpha}{\partial d} = -\frac{2h}{d^2} \text{ oraz } \frac{\partial \operatorname{tg} \alpha}{\partial h} = \frac{2}{d} \quad (8.21)$$

natomiast dla kątów zwilżania powyżej 30° z równania:

$$\Delta \cos \alpha = \sqrt{\left(\frac{\partial \cos \alpha}{\partial r} \Delta r\right)^2 + \left(\frac{\partial \cos \alpha}{\partial h} \Delta h\right)^2} \quad (8.22)$$

gdzie:
$$\frac{\partial \cos \alpha}{\partial r} = \frac{4h^2 r}{r^4 + h^4 + 2r^2 h^2} \text{ oraz } \frac{\partial \cos \alpha}{\partial h} = -\frac{4r^2 h}{r^4 + h^4 + 2r^2 h^2} \quad (8.23)$$

Przyjmując bezwzględne błędy pomiaru wysokości kropli $\Delta h = 0,1$ mm i jej średnicy (promienia) $\Delta d = \Delta r = 0,1$ mm bezwzględny błąd pomiaru kąta zwilżania wyniósł $\pm 1^\circ$.

Analiza niepewności pomiaru metodą aproksymacji

Zakładając, że spośród czterech etapów składających się na metodę aproksymacji decydujący wpływ na błąd pomiaru mają dwa pierwsze, tj.: wybór punktów i poprowadzenie przez nie elipsy, absolutny błąd pomiaru kąta zwilżania można określić ze wzoru:

$$\Delta(\operatorname{tg} \alpha) = \sqrt{[\Delta(\operatorname{tg} \alpha)_{\text{współ}}]^2 + [\Delta(\operatorname{tg} \alpha)_{\text{fit}}]^2} \quad (8.24)$$

gdzie $\Delta(\operatorname{tg} \alpha)_{\text{współ}}$ to absolutny błąd określenia współrzędnych punktów na obrysie kropli, a $\Delta(\operatorname{tg} \alpha)_{\text{fit}}$ to absolutny błąd dopasowania elipsy do wybranych punktów. Dla małych kątów zwilżania $\Delta(\operatorname{tg} \alpha) \approx \alpha$, stąd błędy absolutne $\Delta(\operatorname{tg} \alpha)_{\text{współ}}$ i $\Delta(\operatorname{tg} \alpha)_{\text{fit}}$ są takie same jak błędy pomiaru długości i wynoszą odpowiednio 0,05 mm i 0,05 mm. Ostatecznie błąd absolutny szacowania kąta zwilżania metodą aproksymacji wynosi $\pm 4^\circ$.

Analiza niepewności pomiaru metodą bezpośrednią

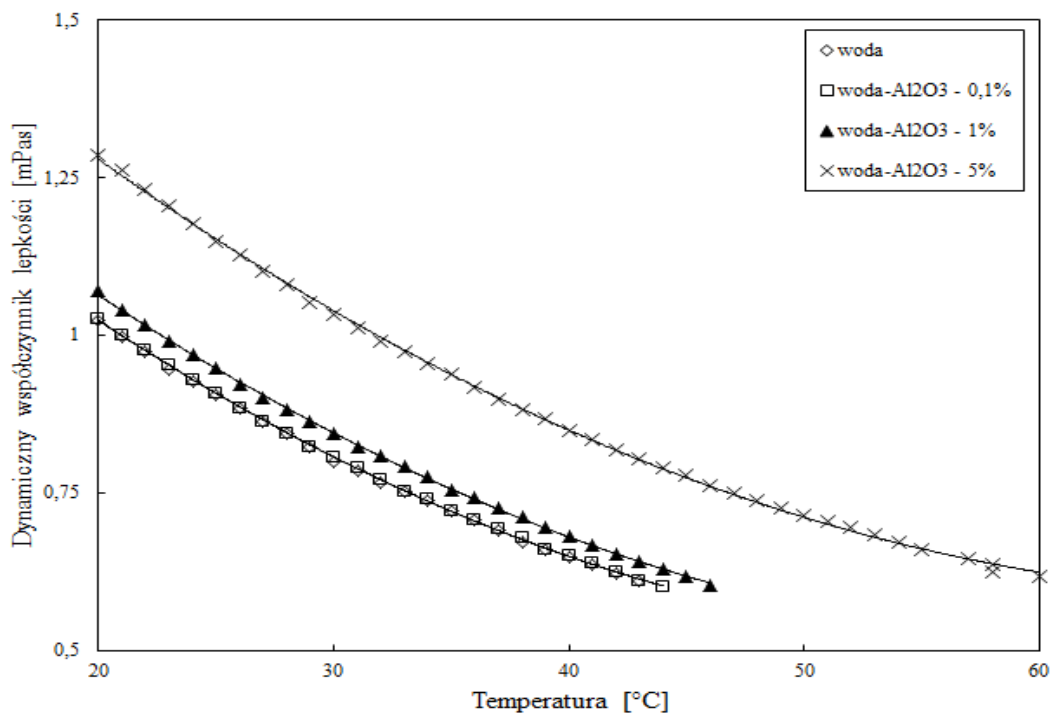
Błąd określenia kąta zwilżania przy użyciu kątomierza oszacowano na $\pm 1^\circ$.

9. Wyniki badań

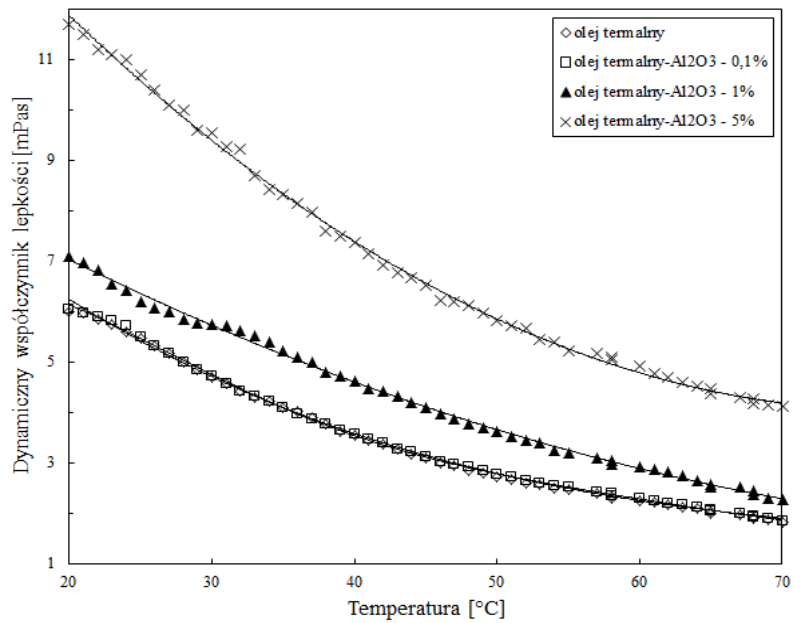
9.1. Wyniki badań termofizycznych własności nanocieczy

Dynamiczny współczynnik lepkości

Na rys. 9.1 oraz rys. 9.2 przedstawiono zależność dynamicznego współczynnika lepkości w funkcji temperatury dla nanocieczy zawierających nanocząstki tlenku aluminium na bazie wody oraz na bazie oleju termalnego o koncentracji masowej 0,1%, 1% oraz 5%. W obu przypadkach lepkość nanocieczy maleje wraz z temperaturą i rośnie wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek. Jednak wzrost lepkości z koncentracją jest inny dla obu rodzajów nanocieczy. Dla maksymalnej koncentracji nanocząstek (5%) wzrost lepkości dla nanocieczy na bazie oleju w stosunku do czystego oleju jest ponad 10-krotny, podczas gdy dla nanocieczy na bazie wody jedynie o ok. 25%.

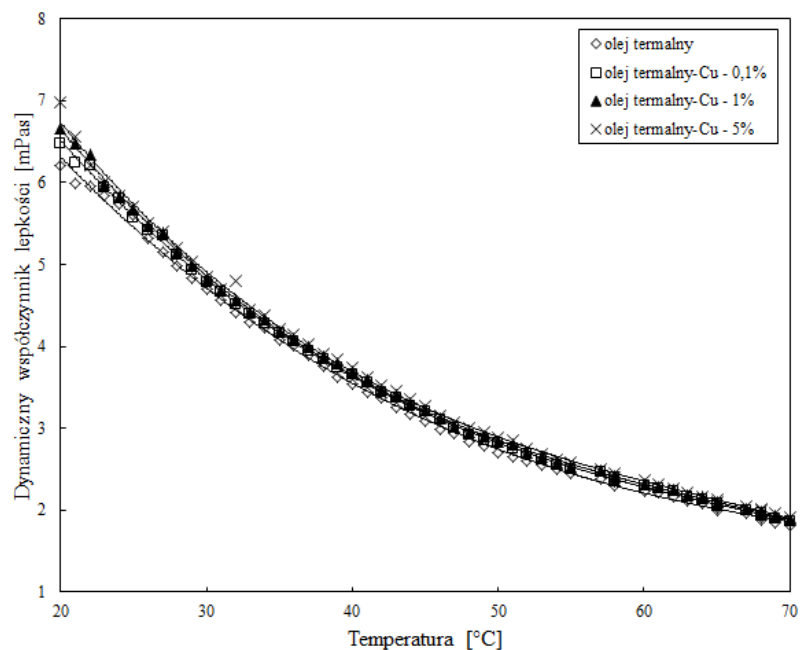


Rys. 9.1. Wpływ temperatury na dynamiczny współczynnik lepkości dla nanocieczy woda-Al₂O₃



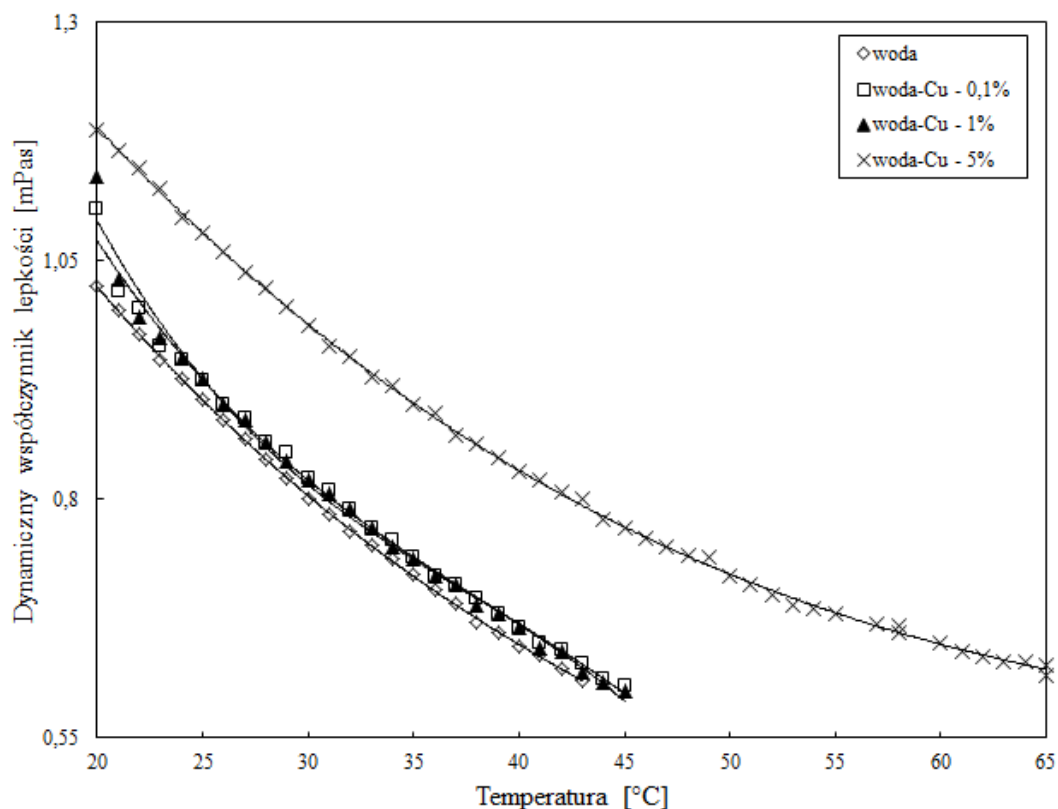
Rys. 9.2. Wpływ temperatury na dynamiczny współczynnik lepkości dla nanocieczy olej termalny-Al₂O₃

W przypadku cieczy zawierających nanocząstki miedzi wzrost dynamicznego współczynnika lepkości wraz z koncentracją masową nanocząstek nie był taki widoczny jak w przypadku pozostałych nanocieczy. Nanociecz na bazie oleju charakteryzowała się praktycznie takim samym dynamicznym współczynnikiem lepkości w całym zakresie koncentracji masowej nanocząstek (rys. 9.3).



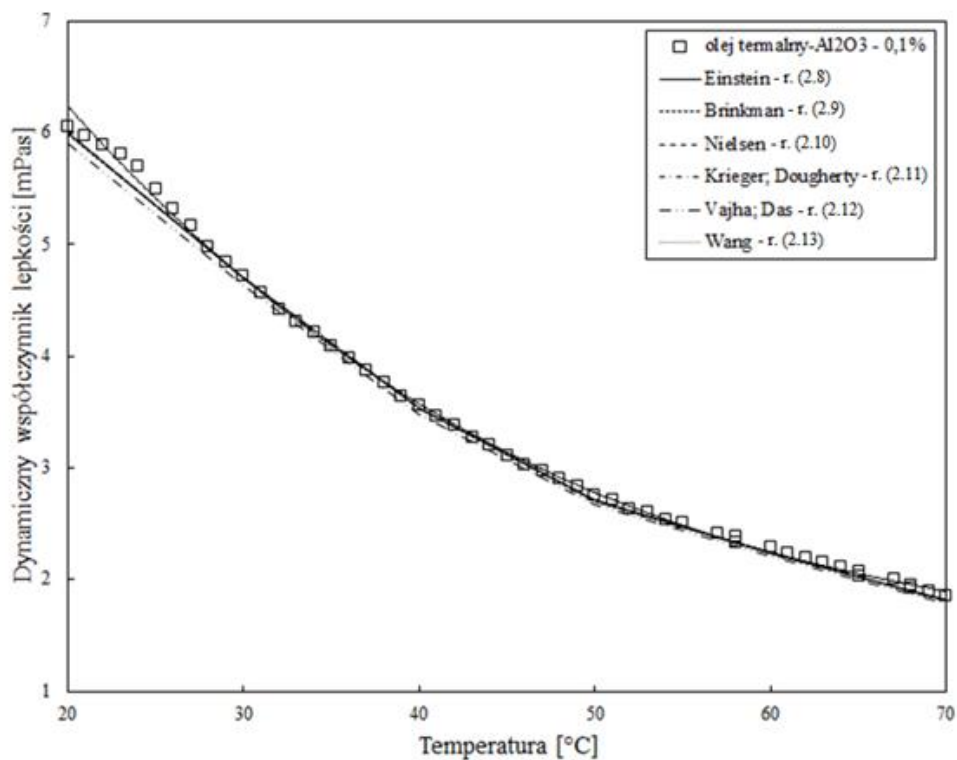
Rys. 9.3. Wpływ temperatury na dynamiczny współczynnik lepkości dla nanocieczy olej termalny-Cu

Wartości uzyskane dla nanocieczy na bazie wody wykazywały podobną tendencję, jednak koncentracja 5% wywołała widoczną zmianę współczynnika lepkości w całym zakresie pomiarowym (9.4).

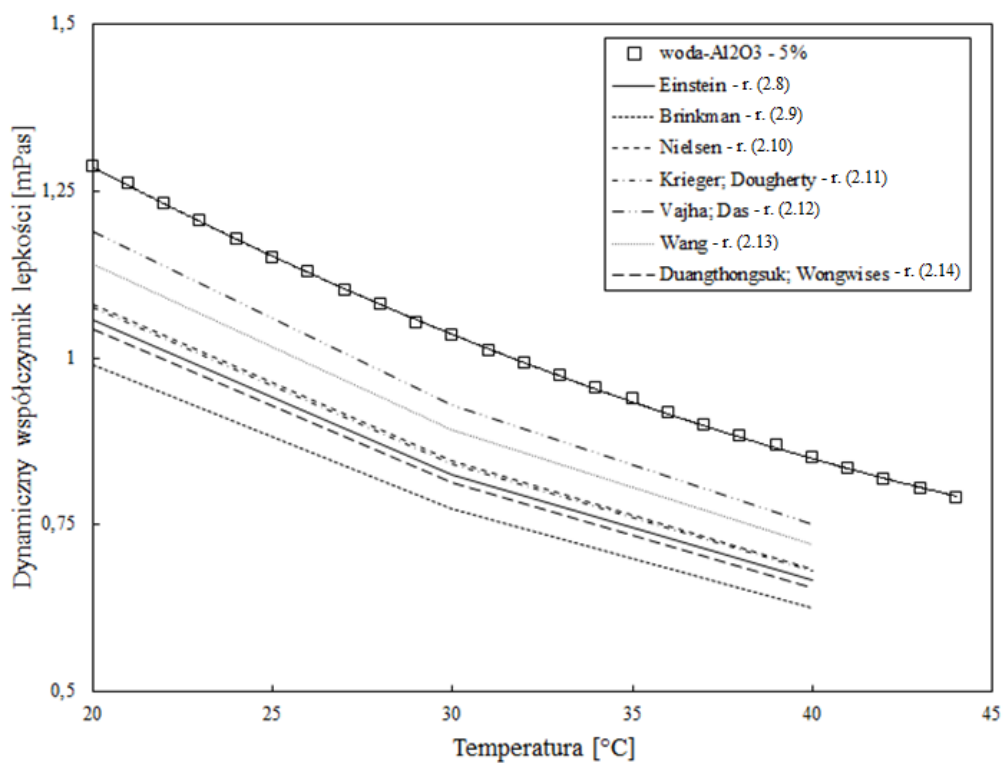


Rys. 9.4. Wpływ temperatury na dynamiczny współczynnik lepkości dla nanocieczy woda-Cu

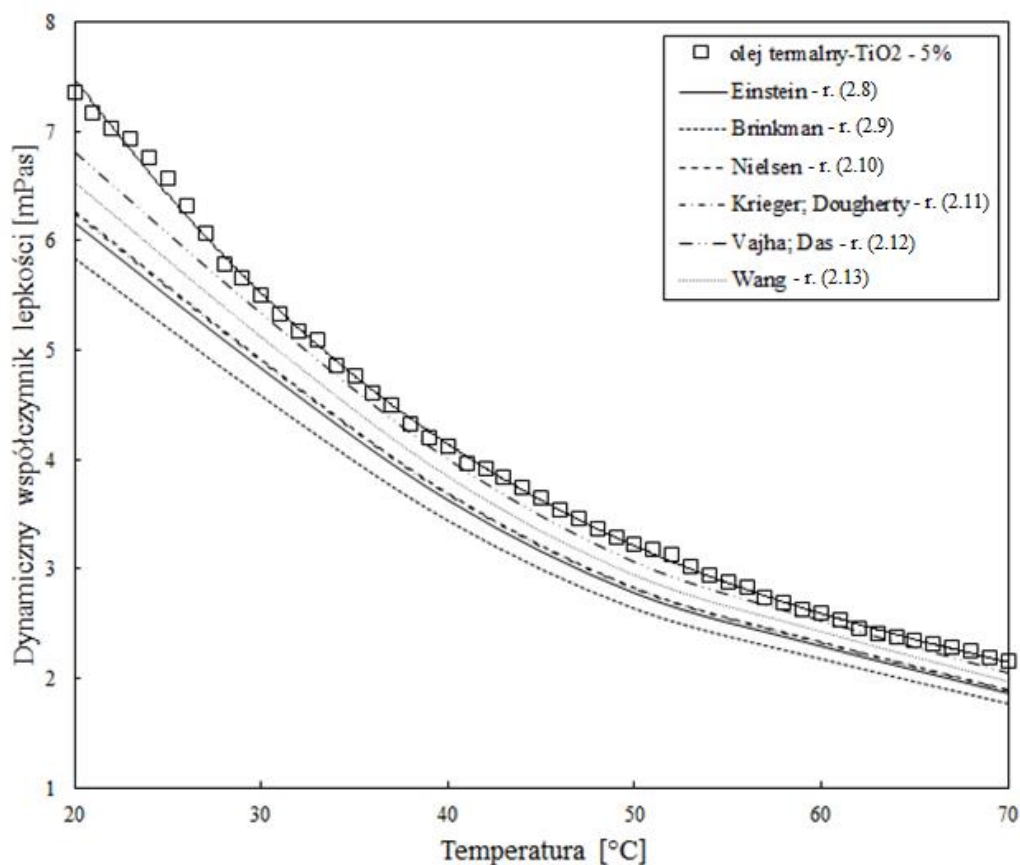
Własne wyniki pomiarów porównano z wartościami wynikającymi z opublikowanych korelacji (tab. 2.2). Wszystkie zastosowane modele poprawnie opisują wartość dynamicznego współczynnika lepkości w przypadku niższych wartości koncentracji masowej nanocząstek niezależnie od rodzaju badanej nanocieczy (rys. 9.5). Dla koncentracji nanocząstek wynoszącej 5% wybrane modele dają wartości zaniżone (rys. 9.6 i rys. 9.7).



Rys. 9.5. Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń dla nanocieczy olej termalny-Al₂O₃



Rys. 9.7. Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń dla nanocieczy woda-Al₂O₃



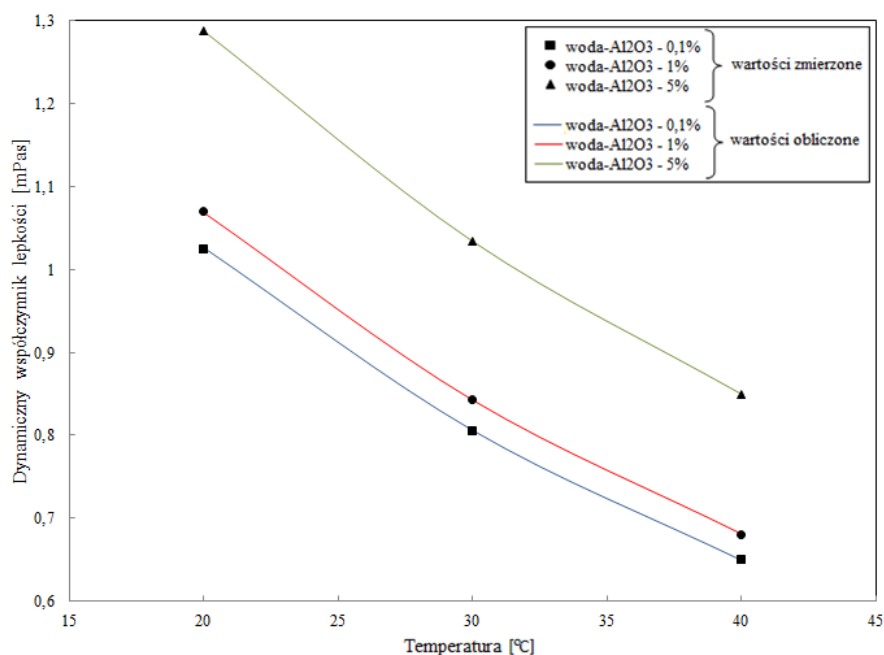
Rys. 9.8. Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń dla nanocieczy olej termalny-TiO₂

Pozostałe wyniki pomiarów lepkości badanych nanocieczy zostały opublikowane w [66-68].

Ze względu na dużą rozbieżność własnych wyników pomiarów i wartości wynikających z przytoczonych korelacji postanowiono stworzyć własne równanie korelacyjne opisujące dynamiczny współczynnik lepkości. W wyniku zastosowania analizy regresji, z użyciem metody najmniejszych kwadratów, ustalono, że korelacja, która najwierniej odwzorowuje własne wyniki badań eksperymentalnych ma postać:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(ae^{b\phi}). \quad (9.1)$$

Na rys. 9.9 przedstawiono porównanie wyników otrzymanych z własnych pomiarów oraz uzyskanych w wyniku zastosowania własnej korelacji (9.1).



Rys. 9.9. Wartości dynamicznego współczynnika lepkości nanocieczy woda-Al₂O₃ w porównaniu z wartościami wynikającymi z własnej korelacji (9.1)

Wartości współczynników a i b dla nanocieczy na bazie wody przedstawione zostały w tab. 9.1, natomiast dla nanocieczy na bazie oleju termalnego w tab. 9.2.

Tabela 9.1. Wartości współczynników a i b dla różnych rodzajów nanocieczy na bazie wody

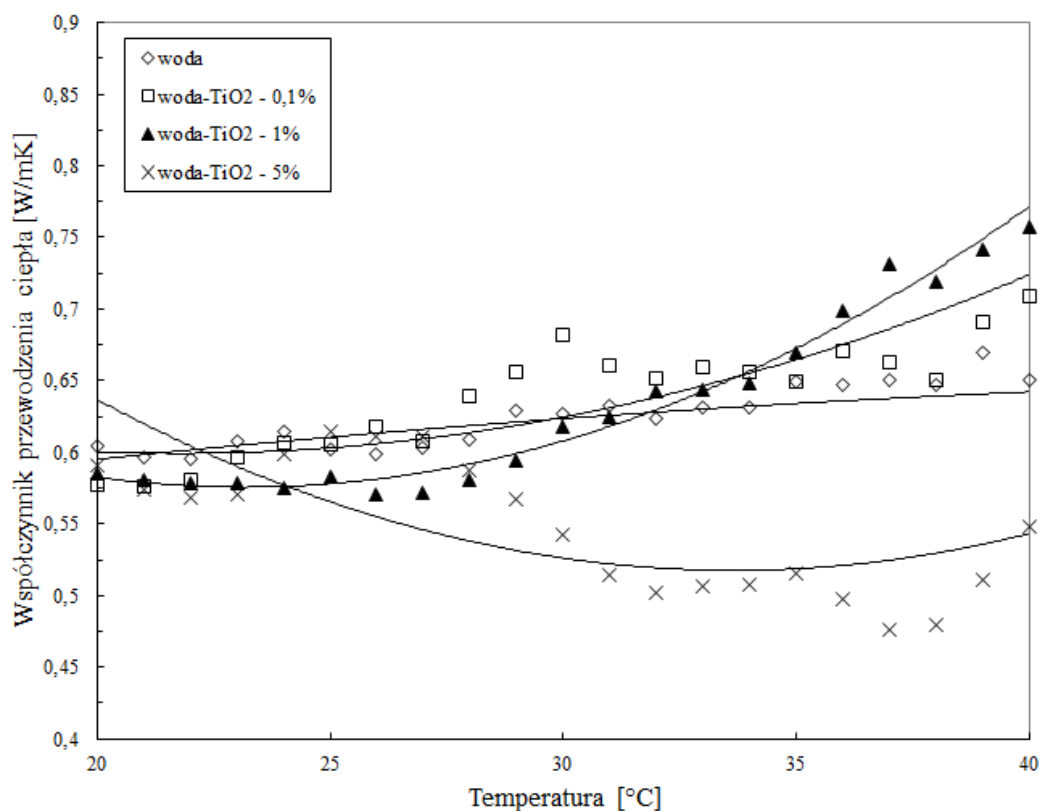
Nanociecz	woda-Al ₂ O ₃		woda-TiO ₂		woda-Cu	
	a	b	a	b	a	b
Temperatura [°C]						
20	0,9987	17,831	1,0023	6,5619	1,0056	39,188
30	1,0028	19,628	1,0214	5,8569	1,0071	31,706
40	0,9988	21,261	1,0166	6,4864	1,0868	11,07

Tabela 9.2. Wartości współczynników a i b dla różnych rodzajów nanocieczy na bazie oleju termalnego

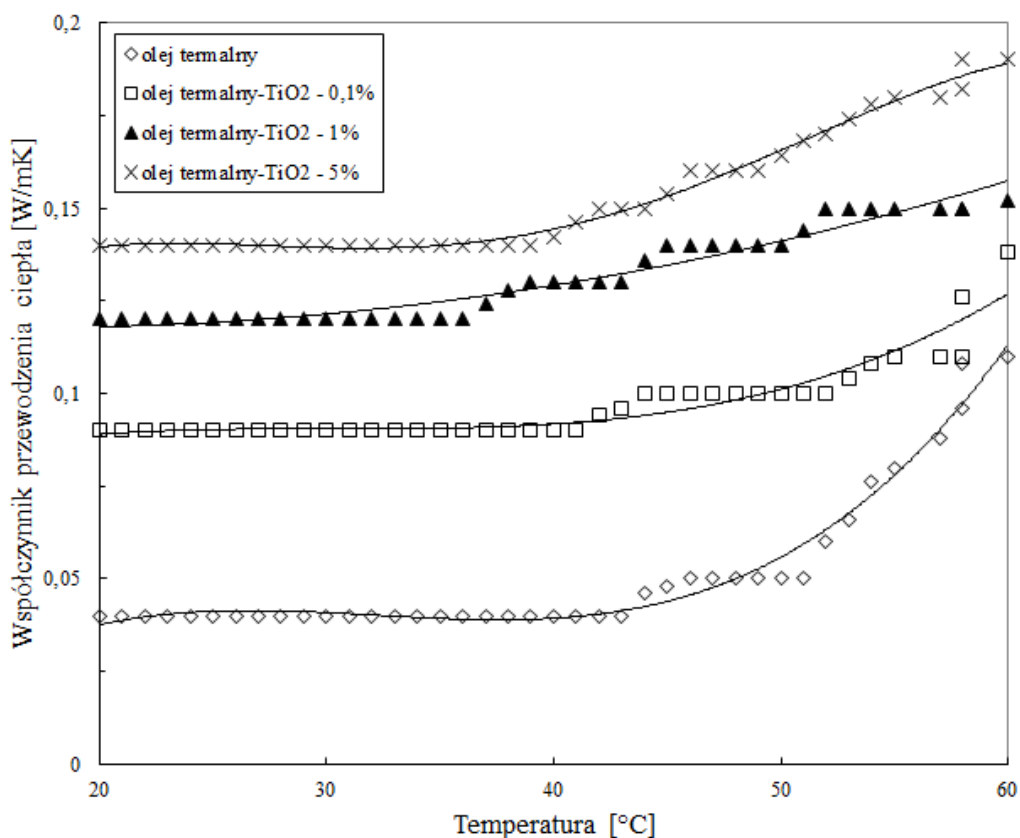
Nanociecz	olej termalny-Al ₂ O ₃		olej termalny-TiO ₂		olej termalny-Cu		olej termalny-MWCNT	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Temperatura [°C]								
20	1,0176	58,762	1,1079	10,142	1,0863	14,001	1,0822	879,98
30	1,0235	62,515	1,0195	13,168	1,019	2,3967	0,9975	954,74
40	1,0591	62,925	1,0384	11,022	1,0379	4,5401	0,9975	1029,9
50	1,0739	65,26	1,0685	10,78	1,0423	4,8893	1,011	1126,9

Współczynnik przewodzenia ciepła

Na rys. 9.10 oraz rys. 9.11 przedstawiono zależność współczynnika przewodzenia ciepła dla nanocieczy woda-TiO₂ oraz olej termalny-TiO₂ w funkcji temperatury. Wszystkie nanociecze na bazie wody charakteryzują się około 4-krotnie wyższą wartością współczynnika przewodzenia ciepła w stosunku do wartości uzyskanych dla nanocieczy na bazie oleju. W przypadku nanocieczy na bazie wody wzrost wartości współczynnika przewodzenia ciepła jest niewielki w stosunku do wody, natomiast w przypadku nanocieczy na bazie oleju termalnego widoczna jest silna zależność współczynnika przewodzenia ciepła od koncentracji masowej nanocząstek. Dodatkowo dla nanocieczy na bazie wody można zaobserwować spadek wartości współczynnika przewodzenia ciepła wraz z koncentracją masową nanocząstek (rys. 9.10). W przypadku nanocieczy na bazie oleju wyraźnie widać wzrost współczynnika przewodzenia ciepła wraz ze wzrostem koncentracji nanocieczy (rys. 9.11).

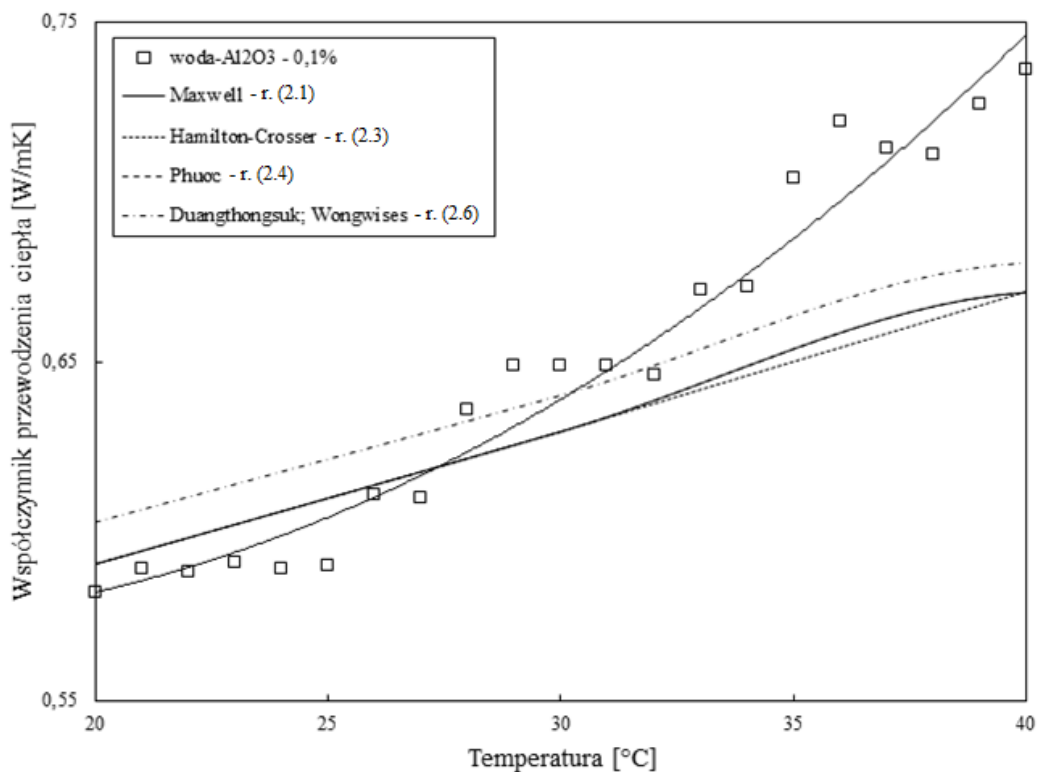


Rys. 9.10. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda-TiO₂



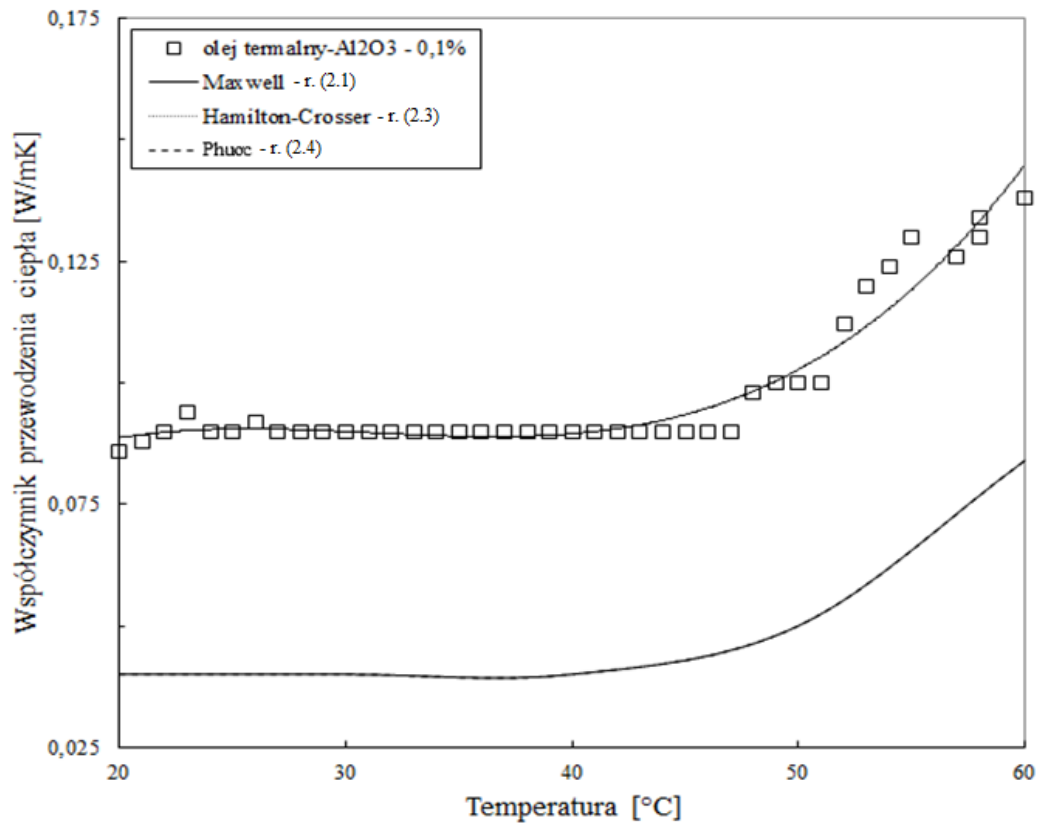
Rys. 9.11. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-TiO₂

Podobnie jak w przypadku dynamicznego współczynnika lepkości własne wyniki pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła porównano z wartościami wynikającymi z opublikowanych korelacji (tab. 2.1). Wszystkie z wybranych modeli poprawnie przewidują wartość współczynnika przewodzenia ciepła dla trzech badanych nanocieczy na bazie wody w zakresie małych koncentracji masowych nanocząstek (0,1% i 1%). Przykładowo na rys. 9.12 pokazano wyniki dla nanocieczy woda-Al₂O₃. W przypadku koncentracji nanocząstek równej 5% rozbieżności są jednak znaczne.



Rys. 9.12. Współczynnik przewodzenia ciepła dla nanocieczy woda- Al_2O_3 w porównaniu z wartościami wynikającymi z korelacji

W przypadku nanocieczy na bazie oleju termalnego wszystkie wybrane modele dają zaniżone wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla wszystkich badanych cieczy w całym badanym zakresie koncentracji nanocząstek. Przykładowo na rys. 9.13 pokazano porównanie wyników badań eksperymentalnych i obliczeń dla nanocieczy olej termalny- Al_2O_3 .



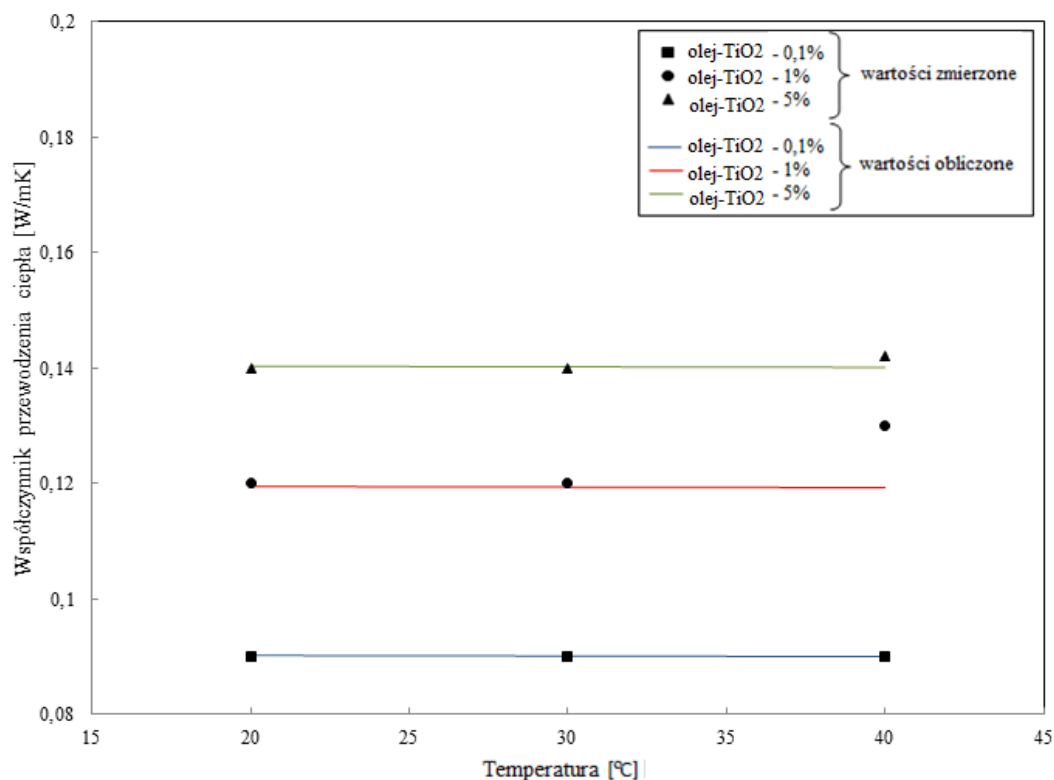
Rys. 9.13. Współczynnik przewodzenia ciepła dla nanocieczy olej termalny-Al₂O₃ w porównaniu z wartościami wynikającymi z korelacji

Pozostałe wyniki pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła badanych nanocieczy zostały opublikowane w [66-68].

Ze względu na dużą rozbieżność własnych wyników pomiarów i wartości wynikających z przytoczonych korelacji postanowiono stworzyć własne równanie korelacyjne opisujące współczynnik przewodzenia ciepła. W wyniku zastosowania analizy regresji, z użyciem metody najmniejszych kwadratów, ustalono, że korelacja, która najwierniej odwzorowuje własne wyniki badań eksperymentalnych ma postać:

$$\lambda_{nf} = \lambda_{bf}(a \ln \phi + b). \quad (9.2)$$

Na rys. 9.14 przedstawiono porównanie wyników otrzymanych z własnych pomiarów oraz uzyskanych w wyniku zastosowania własnej korelacji (9.2).



Rys. 9.14. Wartości współczynnika przewodzenia ciepła nanocieczy olej-TiO₂ w porównaniu z wartościami wynikającymi z własnej korelacji (9.2)

Wartości współczynników a i b dla nanocieczy na bazie wody przedstawione zostały w tab. 9.3, natomiast dla nanocieczy na bazie oleju termalnego w tab. 9.4.

Tabela 9.3. Wartości współczynników a i b dla różnych rodzajów nanocieczy na bazie wody

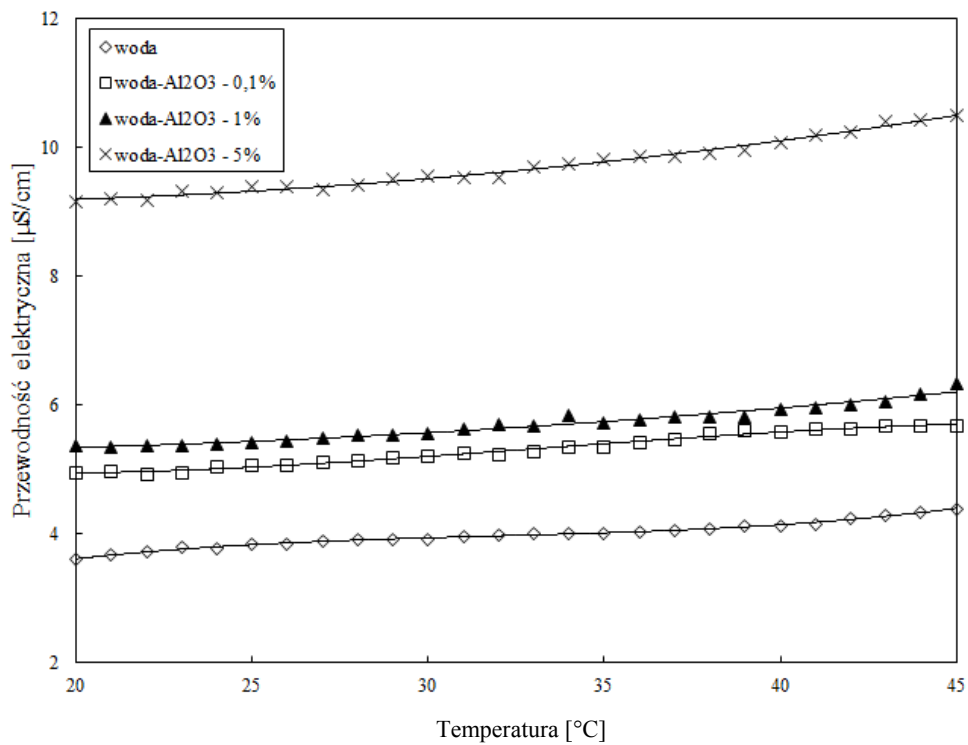
Nanociecz	woda-Al ₂ O ₃		woda-TiO ₂		woda-Cu	
	a	b	a	b	a	b
Temperatura [°C]						
20	4,1427	0,9766	0,006	1,028	0,8917	-7,897
30	-7,31	1,0282	-0,055	0,6306	1,0351	-49,19
40	-3,6386	1,0876	-0,061	0,5506	0,9931	-32,25

Tabela 9.4. Wartości współczynników a i b dla różnych rodzajów nanocieczy na bazie oleju termalnego

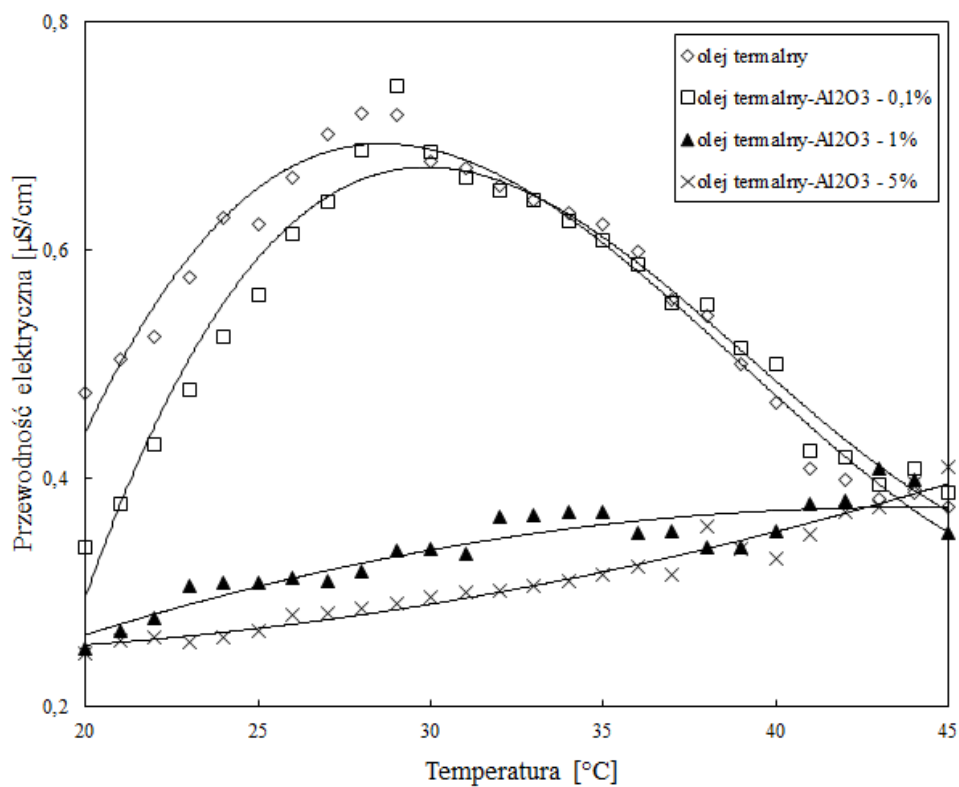
Nanociecz	olej termalny- Al ₂ O ₃		olej termalny- TiO ₂		olej termalny-Cu	
	a	b	a	b	a	b
20	0,1379	3,302	0,3168	4,9518	0,0841	2,6358
30	0,1253	3,2983	0,3168	4,9544	0,055	2,6632
40	0,2048	3,9559	0,349	5,2471	0,0793	2,9693
50	0,1566	3,3734	0,3253	4,7911	0,1541	3,0544

Konduktywność i pH

Na rys. 9.15 i 9.16 przedstawiono wyniki pomiarów konduktywności nanocieczy zawierających nanocząstki tlenku aluminium. Dodatek nanocząstek Al₂O₃ do wody powoduje wzrost wartości konduktywności wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek i dla koncentracji wynoszącej 5% zarejestrowano 3-krotny wzrost konduktywności niezależnie od temperatury. W przypadku nanocieczy na bazie oleju termalnego zaobserwowano spadek konduktywności nanocieczy wraz ze wzrostem koncentracji nanocząstek Al₂O₃.

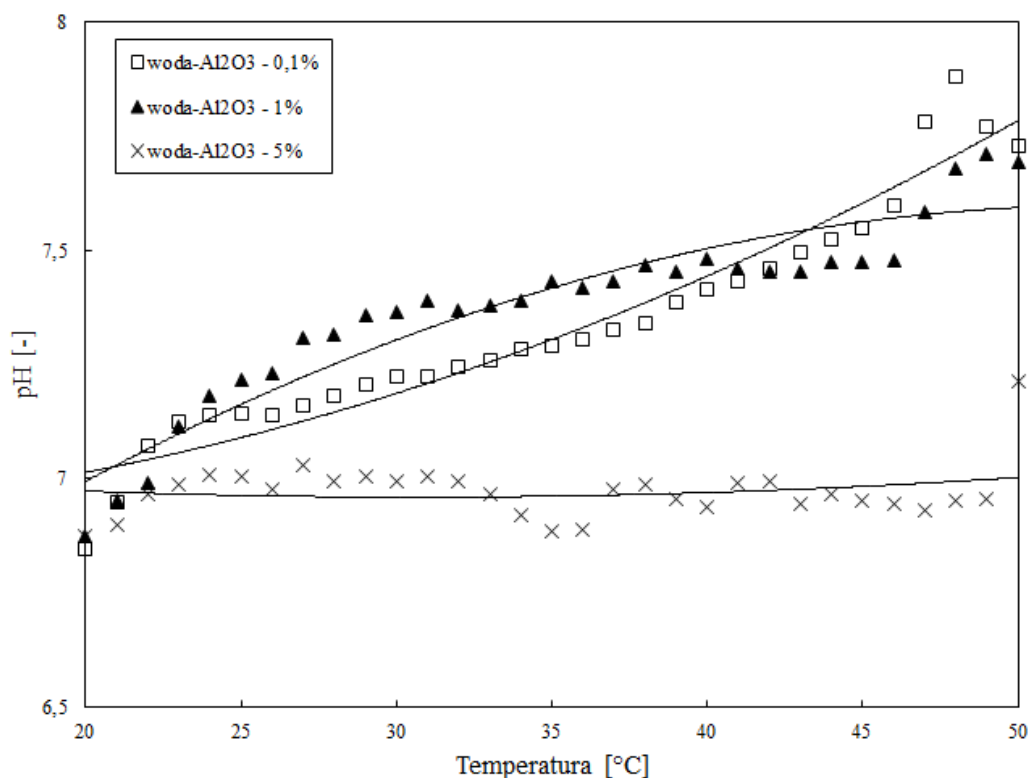


Rys. 9.15. Konduktywność nanocieczy woda- Al_2O_3



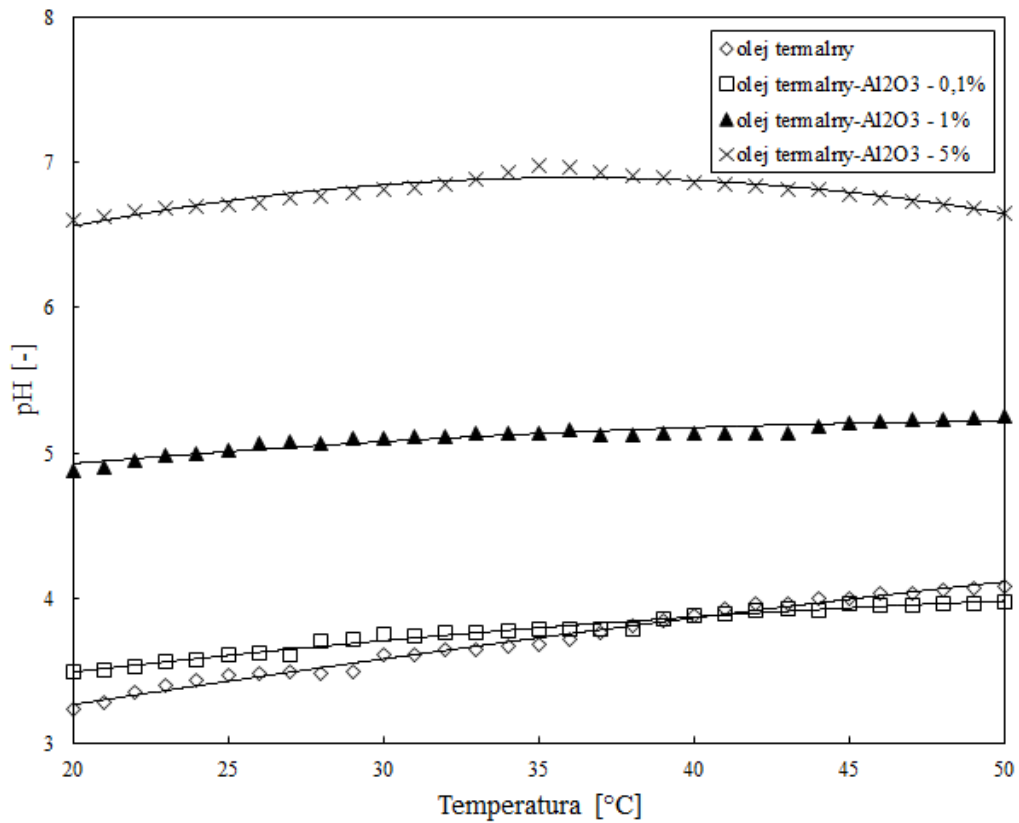
Rys. 9.16. Konduktywność nanocieczy olej termalny- Al_2O_3

Rys. 9.17 oraz 9.18 przedstawiają wartości pH zmierzone w funkcji temperatury dla nanocieczy woda- Al_2O_3 oraz olej termalny- Al_2O_3 . Dla nanocieczy na bazie wody i mniejszych badanych koncentracji nanocząstek pH wzrasta ze wzrostem temperatury, natomiast dla największej badanej koncentracji nanocząstek (5%) pH nie zależy od temperatury i jest niższe niż w przypadku mniejszych koncentracji nanocząstek.



Rys. 9.17. Wpływ temperatury na pH nanocieczy woda- Al_2O_3

W przypadku nanocieczy olej termalny- Al_2O_3 , pH silnie zależy od koncentracji nanocząstek - widoczny jest wyraźny wzrost wartości pH wraz z koncentracją, który praktycznie nie zależy od temperatury. Tę samą tendencję zaobserwowano również w przypadku pozostałych nanocieczy na bazie oleju termalnego.



Rys. 9.18. Wpływ temperatury na pH nanocieczy olej termalny-Al₂O₃

Pozostałe wyniki pomiarów konduktywności oraz pH zostały opublikowane w [66-68].

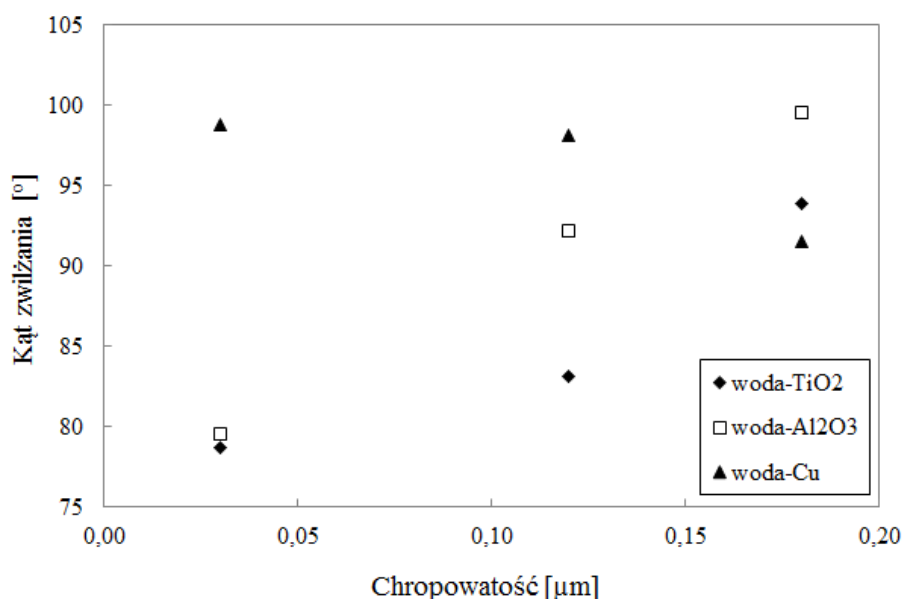
9.2. Wyniki badań kąta zwilżania nanocieczy

Badania kąta zwilżania przeprowadzono na kilku rodzajach podłoży, o różnej strukturze, chropowatości i kącie krzywizny – tab. 7.1. Dodatkowo, w przypadku rurek stalowych wykonano pomiar kąta zwilżania nie tylko dla czystych powierzchni, lecz także dla rurek, wymontowanych ze stanowiska po eksperymencie wrzenia nanocieczy, z wytworzoną nanowarstwą. Badania pozwoliły stwierdzić, że na kąt zwilżania ma wpływ:

- chropowatość powierzchni, na której osadzona zostaje kropla,
- rodzaj materiału podłoża,
- rodzaj materiału nanocząstek,
- koncentracja masowa nanocząstek,
- kąt krzywizny powierzchni osadzania kropli.

Wpływ chropowatości powierzchni na kąt zwilżania nanocieczy

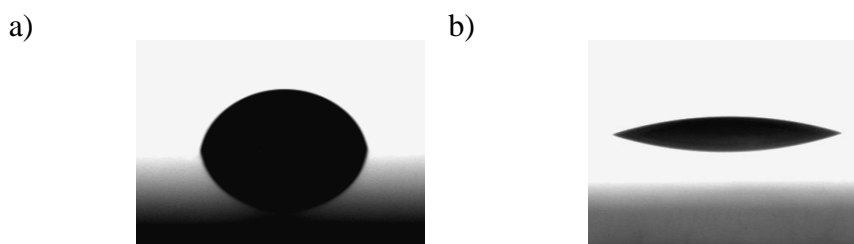
W przypadku nanocieczy dodatek już najmniejszej ilości nanocząstek powoduje wzrost wartości kąta zwilżania, który następnie zmienia się nieznacznie ze wzrostem koncentracji masowej nanocieczy. Wyjątek stanowi nanocieczka woda-Cu, dla której kąt zwilżania wykazuje taką samą tendencję jak w przypadku czystej wody i maleje wraz ze wzrostem chropowatości. Różnice te spowodowane są zapewne występowaniem silniejszego oddziaływania z materiałem podłoża nanocząstek Al_2O_3 i TiO_2 , w porównaniu do nanocząstek Cu (rys. 9.19).



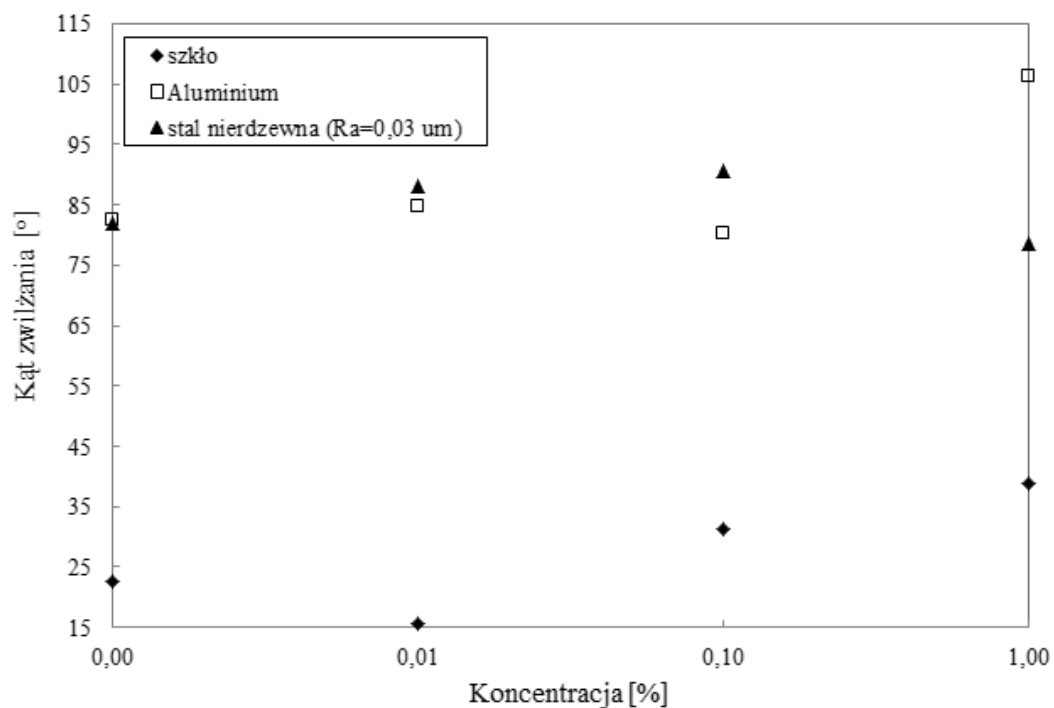
Rys. 9.19. Wpływ chropowatości na wartość kąta zwilżania wszystkich nanocieczek na powierzchni stalowej wyznaczona za pomocą aparatu KRÜSS DSA 10

Wpływ rodzaju podłoża

Wartości kąta zwilżania uzyskane na powierzchniach metalicznych (aluminium i stal nierdzewna) są zbliżone i znacznie większe niż dla szkła, co oznacza gorszą zwilżalność tych powierzchni – rys. 9.20 i 9.21.



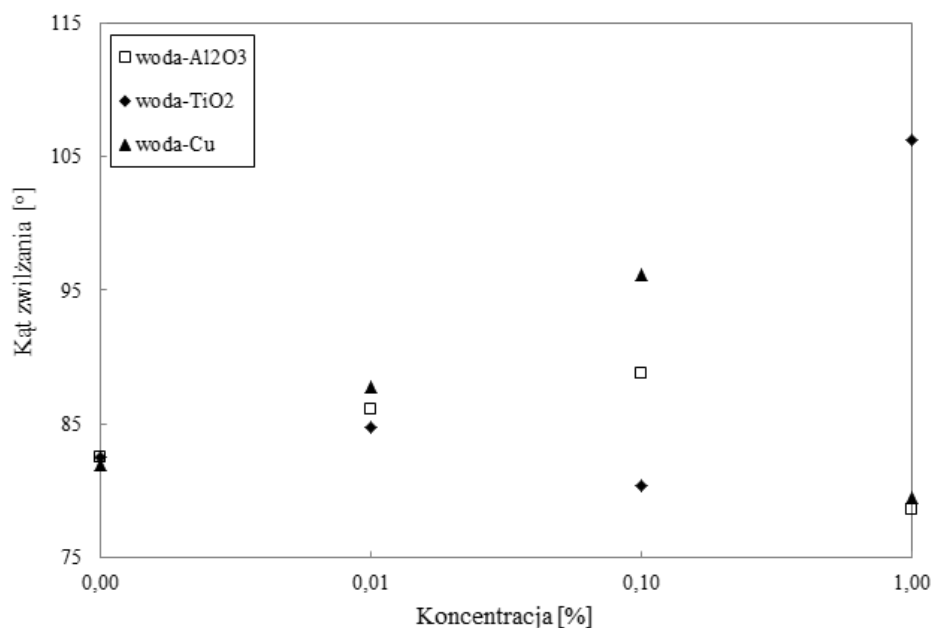
Rys. 9.20. Wpływ rodzaju podłoża na wartość kąta zwilżania nanocieczki woda-TiO₂ o koncentracji masowej cząstek 0,1% na podłożu a) stalowym, b) szklanym



Rys. 9.21. Wpływ rodzaju podłoża na wartość kąta zwilżania uzyskaną za pomocą aparatu KRUSS DSA nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji masowej cząstek: 0,01%, 0,1% oraz 1%

Wpływ koncentracji masowej nanocząstek

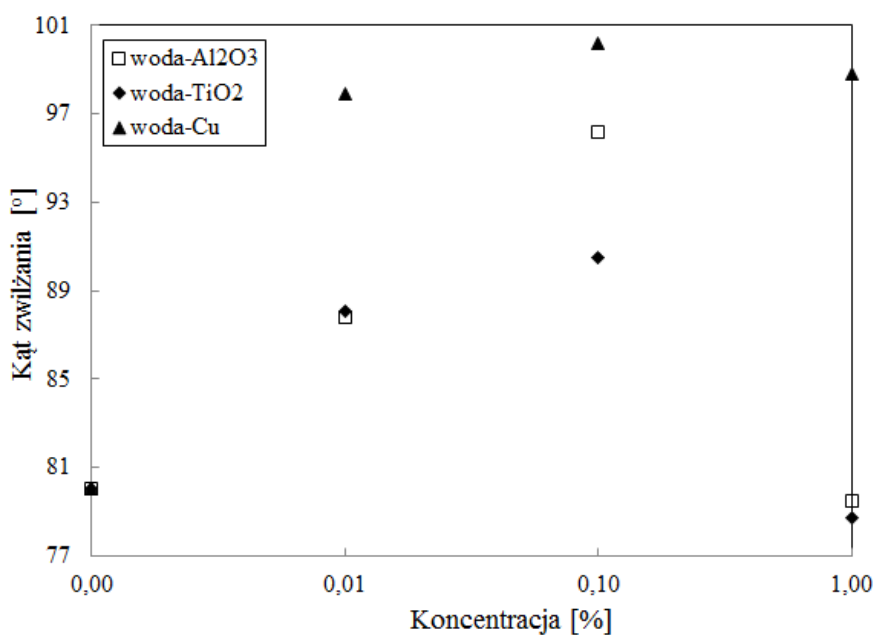
Na rys. 9.22 przedstawiono wpływ koncentracji nanocząstek trzech badanych nanociecz na kąt zwilżania na płytce aluminiowej. W przypadku nanocieczy woda-Cu kąt zwilżania rósł monotonicznie wraz ze wzrostem koncentracji. Dla nanocieczy woda-Al₂O₃ i woda-TiO₂ kąt zwilżania osiąga maksimum odpowiednio dla koncentracji nanocząstek 0,1% i 0,01%.



Rys. 9.22. Zależność kąta zwilżania od koncentracji masowej nanocząstek wszystkich nanocieczy na podłożu aluminiowym

Wpływ rodzaju nanocząstek

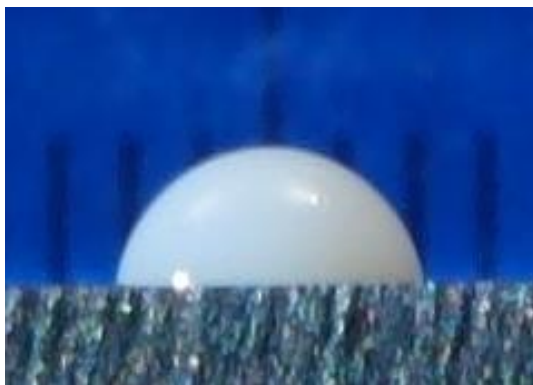
Jak wynika z rys. 9.23 najlepszą zwilżalność powierzchni stalowej wykazuje nanociecz woda-TiO₂, a najgorszą zaś woda-Cu i jest to niezależne od koncentracji nanocząstek. Jest to spowodowane rodzajem i siłą oddziaływań pomiędzy materiałem podłoża i nanocząstkami.



Rys. 9.23. Zależność kąta zwilżania od koncentracji masowej nanocząstek w nanocieczach na powierzchni stalowej ($R_a=0,03 \mu\text{m}$)

Na rys. 9.24 przedstawiono zdjęcia kropli osadzonej nanocieczki woda- Al_2O_3 (a) oraz nanocieczki woda-Cu (b) na płaskiej stalowej powierzchni o koncentracji masowej wynoszącej 1%.

a)



b)



Rys. 9.24. Wpływ rodzaju nanocząstek na wartość kąta zwilżania nanocieczki a) woda- Al_2O_3 oraz b) woda-Cu o koncentracji masowej cząstek wynoszącej 1%

Wpływ krzywizny podłoża

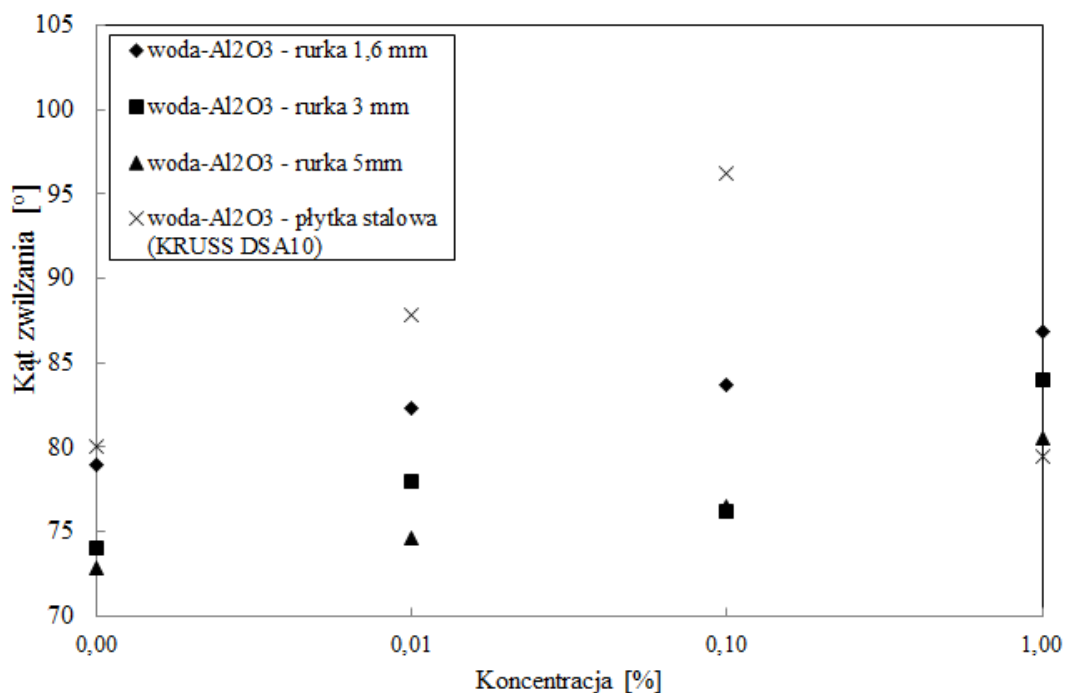
Na rys. 9.25 przedstawiono zdjęcia kropli nanocieczki woda-Cu osadzonej oraz podwieszanej na rurce o średnicy 3 mm.



Rys. 9.25. Kropla osadzona oraz podwieszona nanocieczki woda-Cu na rurce stalowej o średnicy 3 mm

Z kolei rys. 9.26 przedstawia wartości kąta zwilżania kropli nanocieczki woda- Al_2O_3 osadzonych na rurkach o średnicach 1,6 mm, 3 mm oraz 5 mm. Jak wynika z przedstawionego rysunku najwyższe wartości kąta zwilżania uzyskano dla rurki o najmniejszej średnicy, natomiast najmniejsze dla rurki o średnicy 5 mm. Dla porównania na rys. 9.26 zamieszczono także wartości kąta zwilżania na płaskiej stalowej płycie, zmierzone za pomocą goniometru. Dla nanocieczki woda-Cu kąt

zwilżania wykazuje taką samą tendencję, jak w przypadku nanocieczki woda-Al₂O₃. Wyjątek stanowi nanocieczka woda-TiO₂, dla której zaobserwowano tendencją odwrotną, tj. najlepszą zwilżalności odnotowano dla rurki o największej średnicy, natomiast najgorszą dla rurki o średnicy 1,6 mm.



Rys. 9.26. Kąt zwilżania nanocieczki woda-Al₂O₃ w całym zakresie koncentracji dla trzech rurek

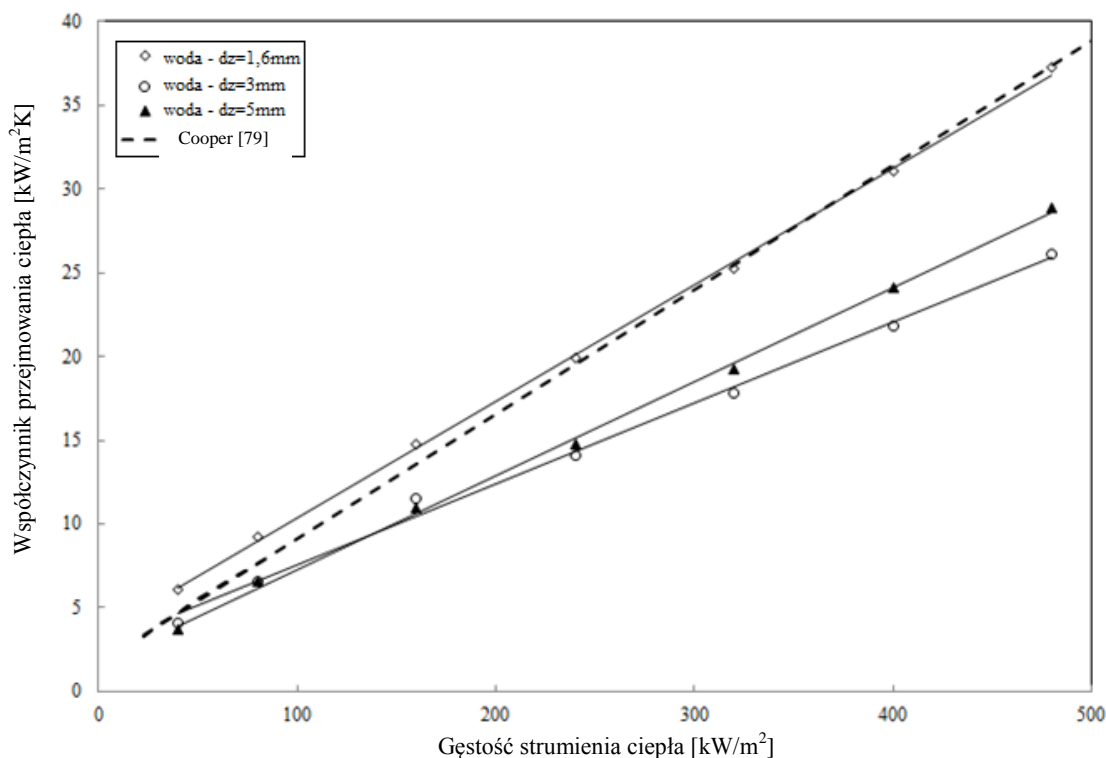
Wszystkie wyniki badań dotyczących kąta zwilżania zostały opublikowane w [69-78].

9.3. Wyniki badań cieplnych

Wzorcowanie stanowiska pomiarowego

W celu walidacji procedury pomiarowej wyniki własnych badań przejmowania ciepła w funkcji gęstości strumienia ciepła podczas wrzenia nasyconego wody destylowanej na trzech rurek pod ciśnieniem atmosferycznym porównano z przewidywanymi wynikającymi z korelacji Coopera [79].

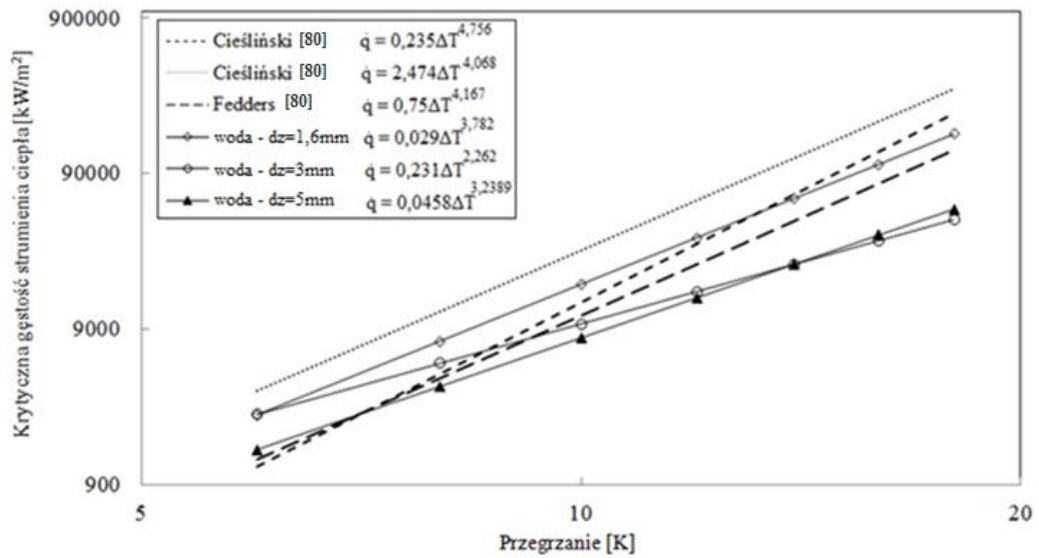
$$\alpha = 55p_r^{0,12-0,434(\log R_p)} [-0,434(\log p_r)]^{-0,55} M^{-0,5} (q)^{0,67} \quad (9.3)$$



Rys. 9.27. Wyniki wzorcowania stanowiska dla wody destylowanej pod ciśnieniem atmosferycznym

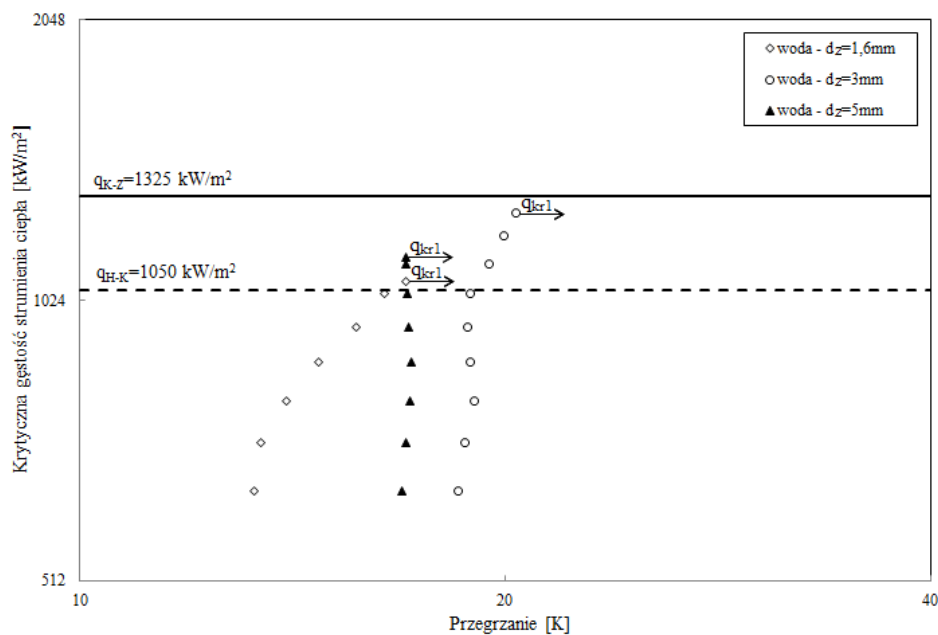
Jak wynika z rys. 9.27 uzyskano bardzo dobrą zgodność z wartościami wynikającymi z korelacji Coopera dla rurki o średnicy zewnętrznej 1,6 mm i zadowalającą zgodność w przypadku dwóch pozostałych rurek.

Dodatkowo wyniki własnych badań przedstawione na rys. 9.28 w postaci zależności gęstości strumienia ciepła w funkcji przegrzania potwierdzają, że nachylenie otrzymanych krzywych wrzenia dla wody destylowanej jest zgodne z wartościami zaczerpniętymi z literatury, a same krzywe wrzenia mieszczą się w obszarze występowania krzywych wrzenia Feddersa [80] i Cieślińskiego [80] - osiągniętych również przy wrzeniu wody destylowanej na rurekach ze stali nierdzewnej, przy ciśnieniu atmosferycznym.



Rys. 9.28. Wyniki wzorcowania stanowiska na rurkach poziomych ze stali nierdzewnej o średnicach zewnętrznych 1,6 mm, 3 mm oraz 5 mm

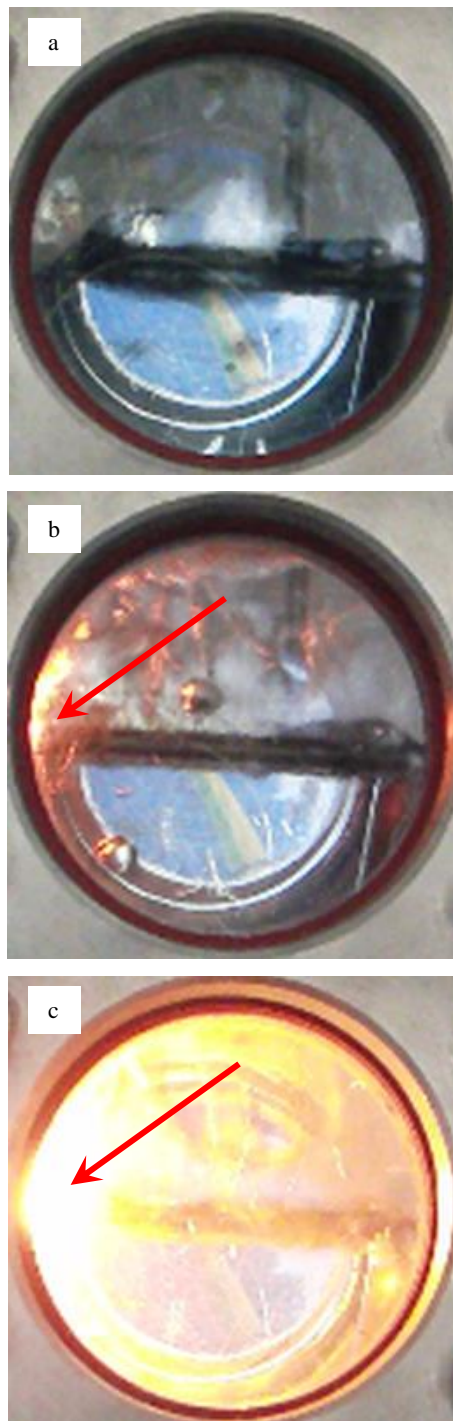
Przeprowadzono także wzorcowanie stanowiska w przypadku eksperymentów mających na celu zbadanie zjawiska pierwszego kryzysu wrzenia na poziomych rurkach ze stali nierdzewnej. Jak widać na rys. 9.29 własne wyniki uzyskane dla wody destylowanej mieszczą się w zakresie wyznaczonym przez wartości wynikające z korelacji Haramury-Katto (q_{H-K} - linia ciągła - wartość q_{kr1} obliczona według równania 3.4) oraz Kutateladze-Zubera (q_{K-Z} - linia przerywana - wartość q_{kr1} obliczona według równania 3.2).

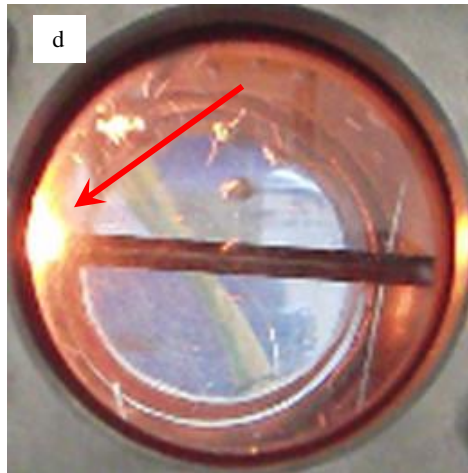


Rys. 9.29. Wyniki wzorcowania stanowiska do badań pierwszego kryzysu wrzenia pod ciśnieniem atmosferycznym

Krytyczny strumień ciepła

Rys. 9.30 przedstawia kolejne fazy kryzysu wrzenia pęcherzykowego, w postaci przepalania się rurki o średnicy 3 mm podczas wrzenia wody destylowanej. Czerwona strzałka zamieszczona na poszczególnych zdjęciach przedstawia miejsce, w którym doszło do przetopienia się ścianki rurki.

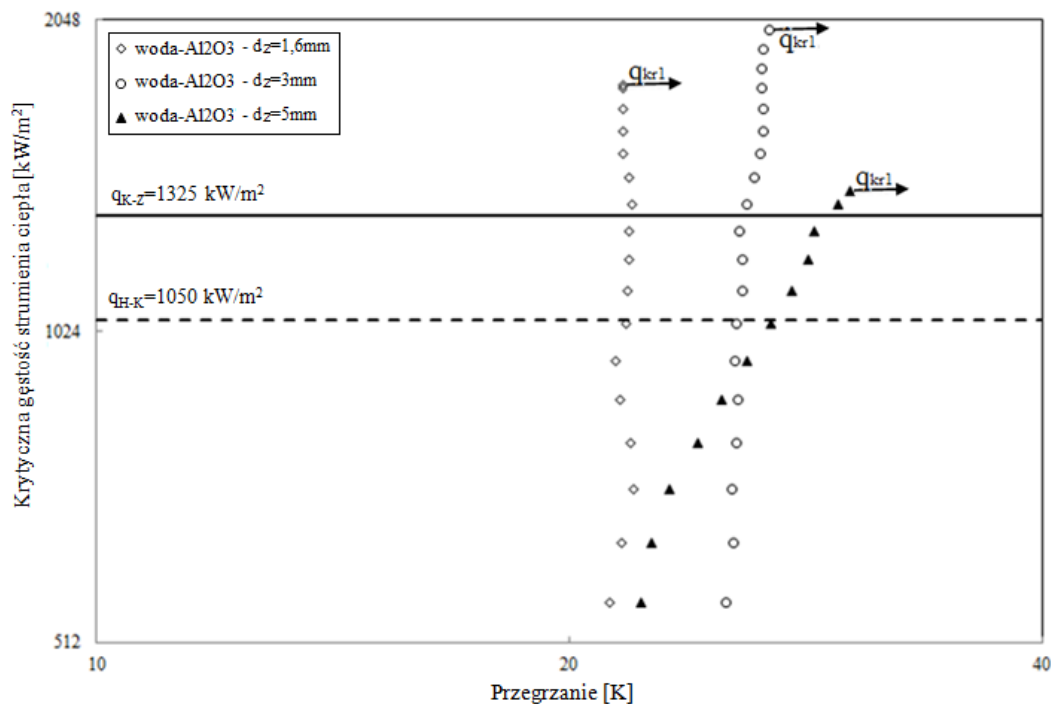




Rys. 9.30. Przebieg pierwszego kryzysu wrzenia na rurce o średnicy 3 mm;
a) rozwinięte wrzenie pęcherzykowe, b), c), d) proces przepalania rurki

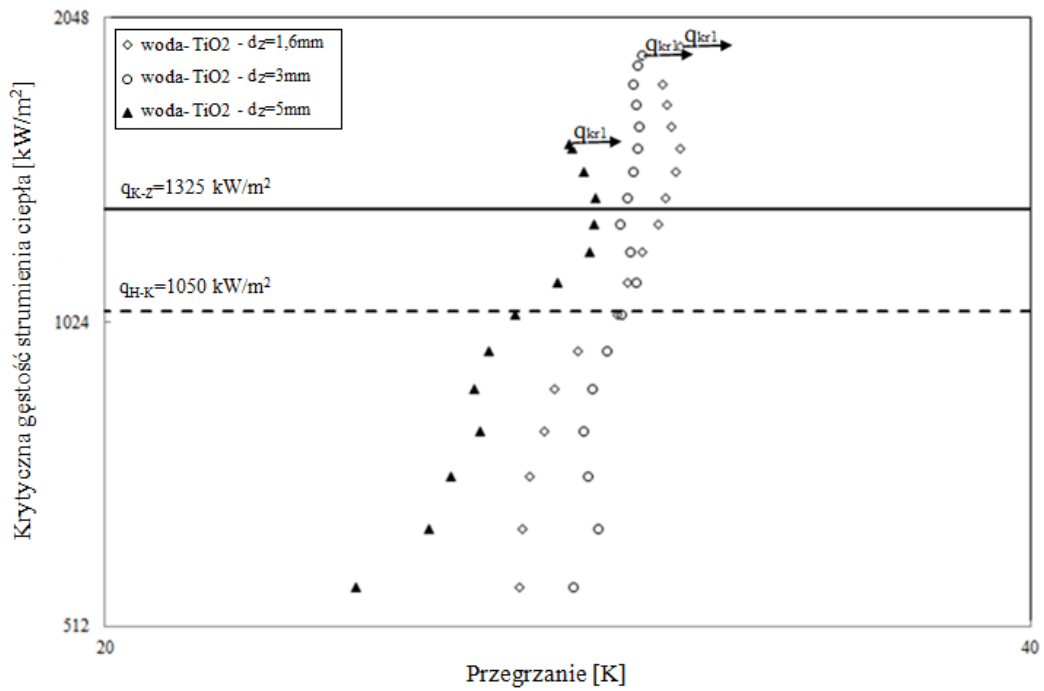
Wpływ średnicy rurek

Rys. 9.31 przedstawia przykładowe krzywe wrzenia w obszarze krytycznej gęstości strumienia ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 o koncentracji nanocząstek 0,1% na rurekach o średnicach 1,6 mm, 3 mm oraz 5 mm. Jak widać średnica rurek ma znaczący wpływ na wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła, która przyjmuje wartość najwyższą w przypadku rurki o średnicy 3 mm i wynosi 2000 kW/m^2 , co stanowi 158% wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła uzyskanej podczas wrzenia czystej wody. Najniższą wartość z kolei uzyskano na rurce o średnicy 5 mm, zaledwie 1398 kW/m^2 , co stanowi 125% w porównaniu do wartości uzyskanej na tej samej rurce w przypadku wody. Rurka o średnicy 1,6 mm została przepalona, gdy wartość strumienia ciepła wyniosła 1760 kW/m^2 , co stanowiło 164% wartości uzyskanej dla czystej wody w tym samych warunkach. Podczas wrzenia na tej rurce zaobserwowano także najwyższą wartość współczynnika przejmowania ciepła. Dla pozostałych rurek krzywe wrzenia przesunięte były w prawo, co świadczyło o pogarszającym się przejmowaniu ciepła podczas wrzenia nanocieczy na tych rurekach. Dla rurki o średnicy 5 mm odnotowano także najwyższe przegrzanie, przy którym doszło do kryzysu wrzenia (27 K).



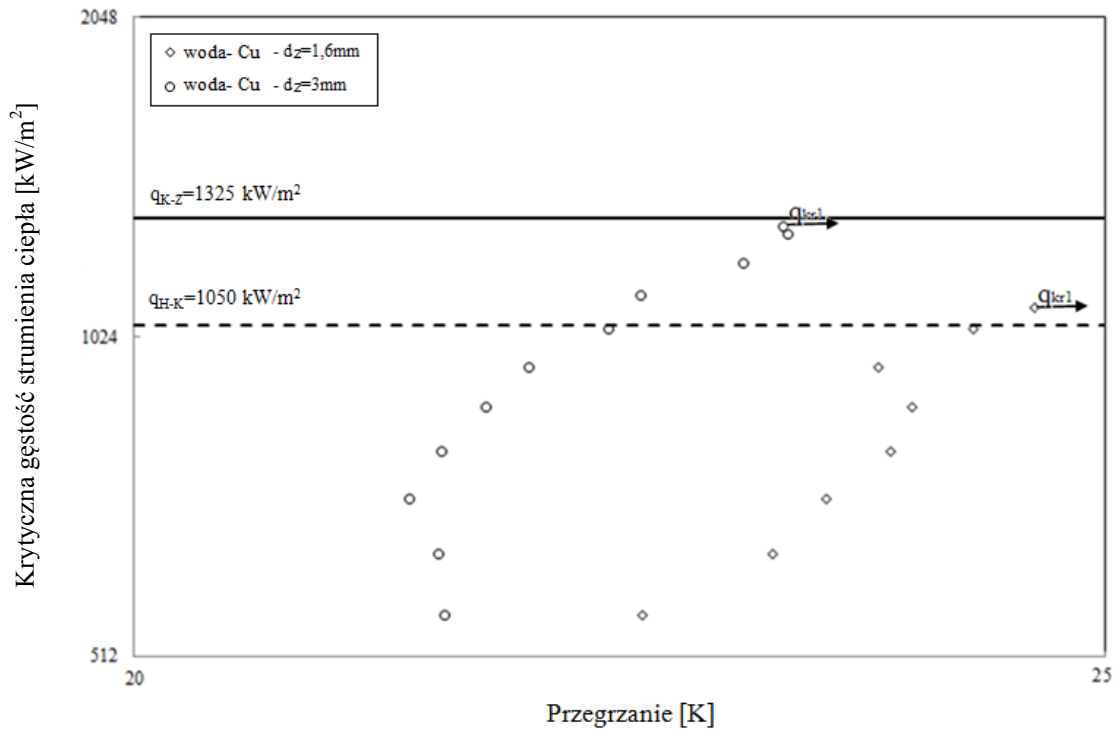
Rys. 9.31. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanociecicy woda-Al₂O₃ o koncentracji nanocząstek 0,1%

Rys. 9.32 przedstawia krzywe wrzenia w obszarze krytycznej gęstości strumienia ciepła podczas wrzenia nanociecicy woda-TiO₂ o koncentracji wynoszącej 1% na rurkach o średnicy 1,6 mm, 3 mm oraz 5 mm. W odróżnieniu od nanociecicy woda-Al₂O₃, najwyższą wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła odnotowano w przypadku wrzenia na rurce o najmniejszej średnicy. Wartość ta wyniosła 1917 kW/m² przy przegrzaniu wynoszącym 31 K. Wskazuje to na wzrost wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła o 178% w stosunku do wartości uzyskanej w przypadku wrzenia czystej wody na rurce o tej samej średnicy (1,6 mm). Wartość uzyskana dla rurki o średnicy 3 mm wyniosła 1881 kW/m², co daje wartość o 48% wyższą niż w przypadku czystej wody destylowanej. Podobnie jak dla nanociecicy woda-Al₂O₃ najniższą wartość uzyskano dla rurki o największej średnicy. Krytyczny strumień ciepła wyniósł dla niej 1520 kW/m². Wartość ta stanowi 136% wartości uzyskanej podczas pomiaru przy wrzeniu wody.

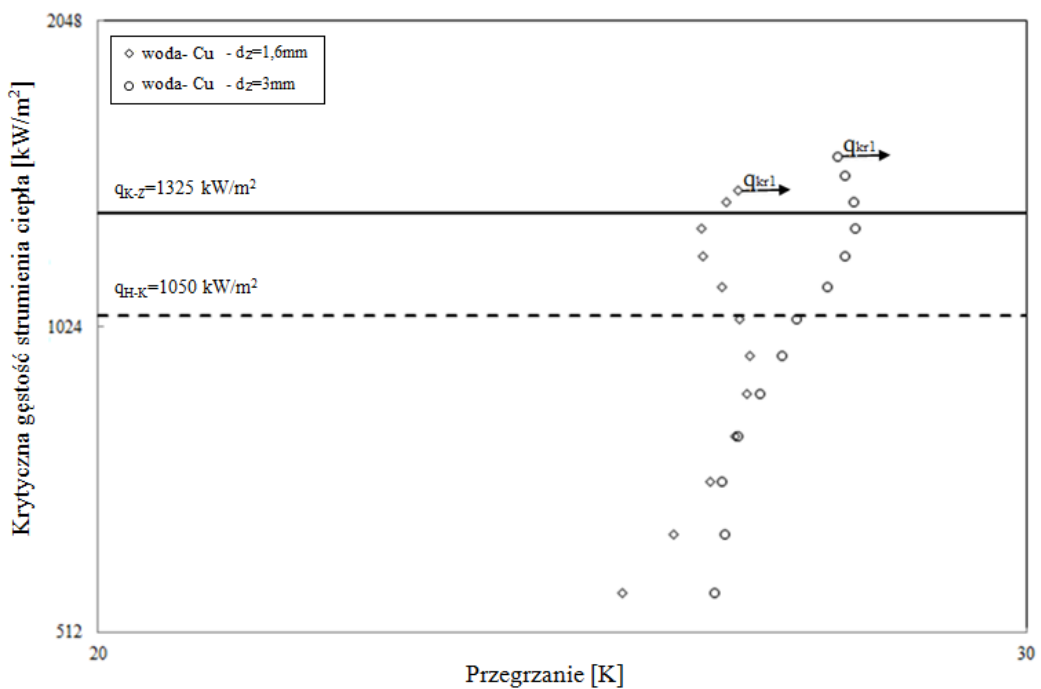


Rys. 9.32. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 1%

Najniższe krytyczne gęstości strumienia ciepła zaobserwowano w przypadku nanocieczy woda-Cu o koncentracji 0,001% podczas wrzenia na rurce o średnicy 1,6 mm. Wartość q_{kr1} , przy której rurka uległa przepaleniu wyniosła 1092 kW/m², co odpowiada 102% wartości uzyskanej przy wrzeniu wody destylowanej. Przy wrzeniu nanocieczy woda-Cu o koncentracji 0,1% na rurce o średnicy 3 mm uzyskano wartość wynoszącą 1507 kW/m², co wskazuje na wzrost krytycznej gęstości strumienia ciepła o 19% w stosunku do q_{kr1} uzyskanego podczas wrzenia wody na rurce o tej samej średnicy (rys. 9.33 i 9.34).



Rys. 9.33. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,001%



Rys. 9.34. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,1%

Po przeprowadzeniu procesu wrzenia na powierzchni rurki zaobserwowano nanowarstwę, której struktura była uzależniona od koncentracji i rodzaju nanocząstek.

Na rys. 9.35 oraz 9.36 przedstawiono widok rurek przed i po eksperymencie wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 o koncentracji nanocząstek wynoszącej 1% .



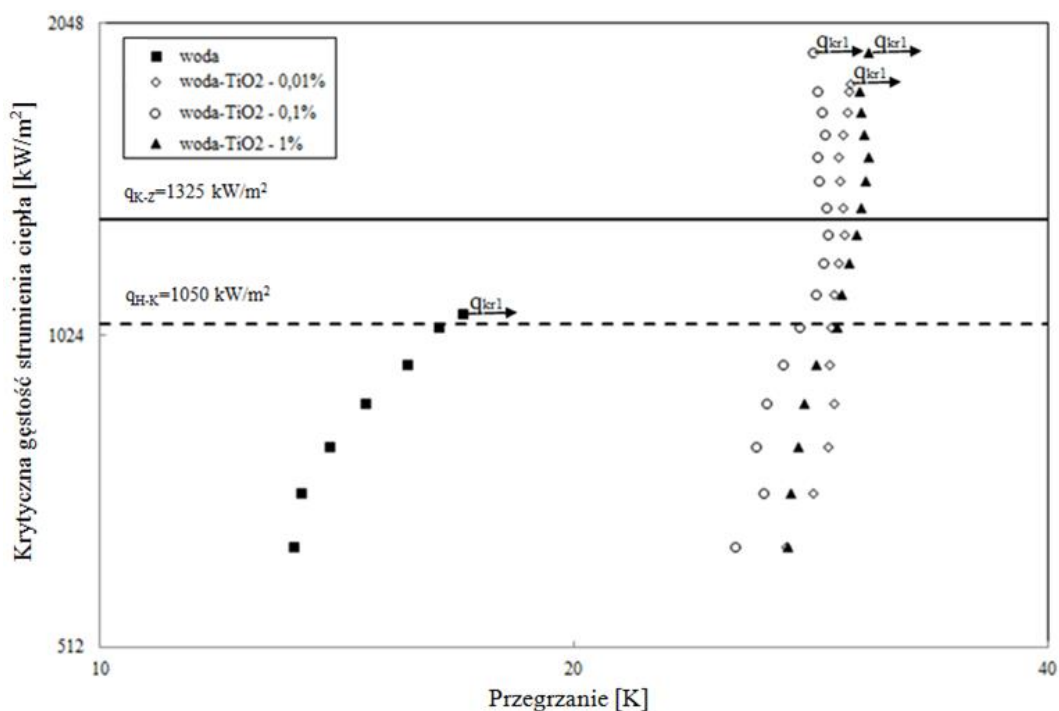
Rys. 9.35. Widok rurek oraz wytworzonej na powierzchni grzejnej warstwy na wszystkich badanych rurkach: 5 mm, 3 mm oraz 1,6 mm odpowiednio przed (a, c i e) i po eksperymencie (b, d, f)



Rys. 9.36. Widok rurek oraz wytworzonej na powierzchni grzejnej warstwy na rurce o średnicy 5 mm podczas wrzenia nanocieczy Al_2O_3 o koncentracjach 1% (a), 0,1% (b) i 0,01% (c) w porównaniu do rurki użytej podczas eksperymentu wrzenia wody (d)

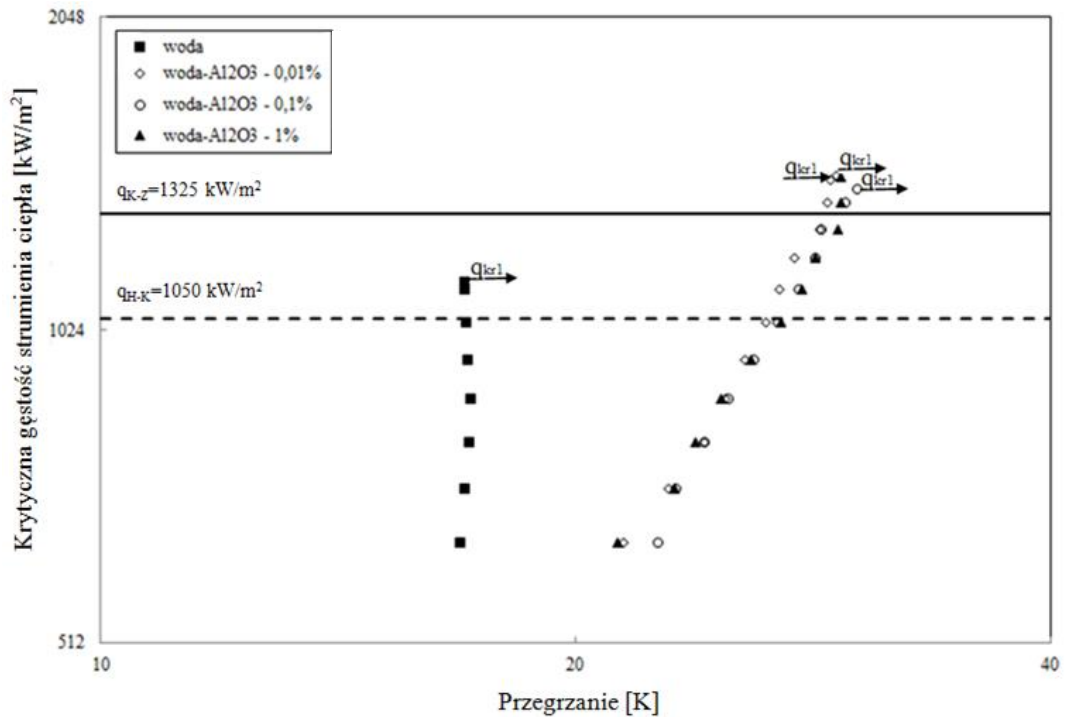
Wpływ koncentracji masowej nanocząstek

Rys. 9.37 przedstawia krzywe wrzenia w obszarze krytycznej gęstości strumienia ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 0,01%, 0,1% oraz 1% na rurce o średnicy 1,6 mm. Zaobserwowano, że koncentracja nanocząstek dla tej nanocieczy nie ma istotnego wpływu na przebieg krzywych wrzenia i wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła.



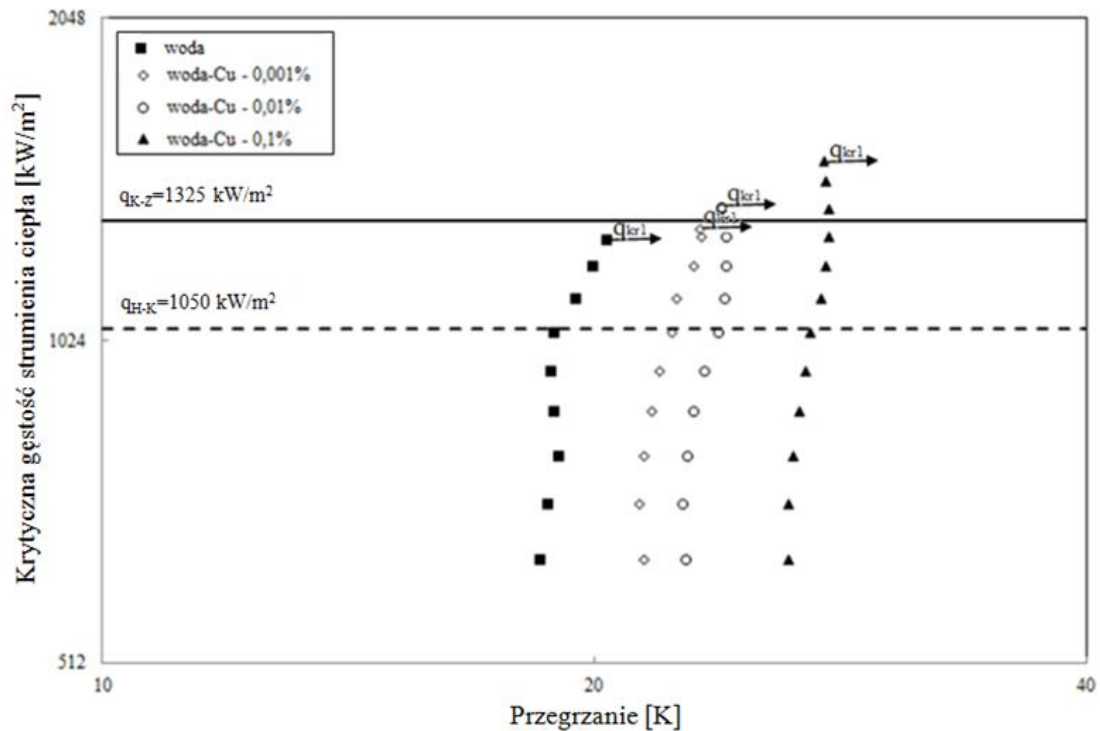
Rys. 9.37. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 1,6 mm

Podobną zależność zaobserwowano również w przypadku nanocieczy woda-Al₂O₃. Przykładowo, rys. 9.38 ilustruje krzywe wrzenia w obszarze krytycznej gęstości strumienia ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ o koncentracji nanocząstek 0,01%, 0,1% oraz 1% na rurce o średnicy 5 mm. Wartość q_{kr1} dla wszystkich koncentracji jest bardzo zbliżona i wynosi 1440 kW/m², 1398 kW/m² oraz 1439 kW/m², odpowiednio dla nanocieczy o koncentracji nanocząstek 0,01%, 0,1% oraz 1% .



Rys. 9.38. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanociecicy woda-Al₂O₃ na rurce o średnicy 5 mm

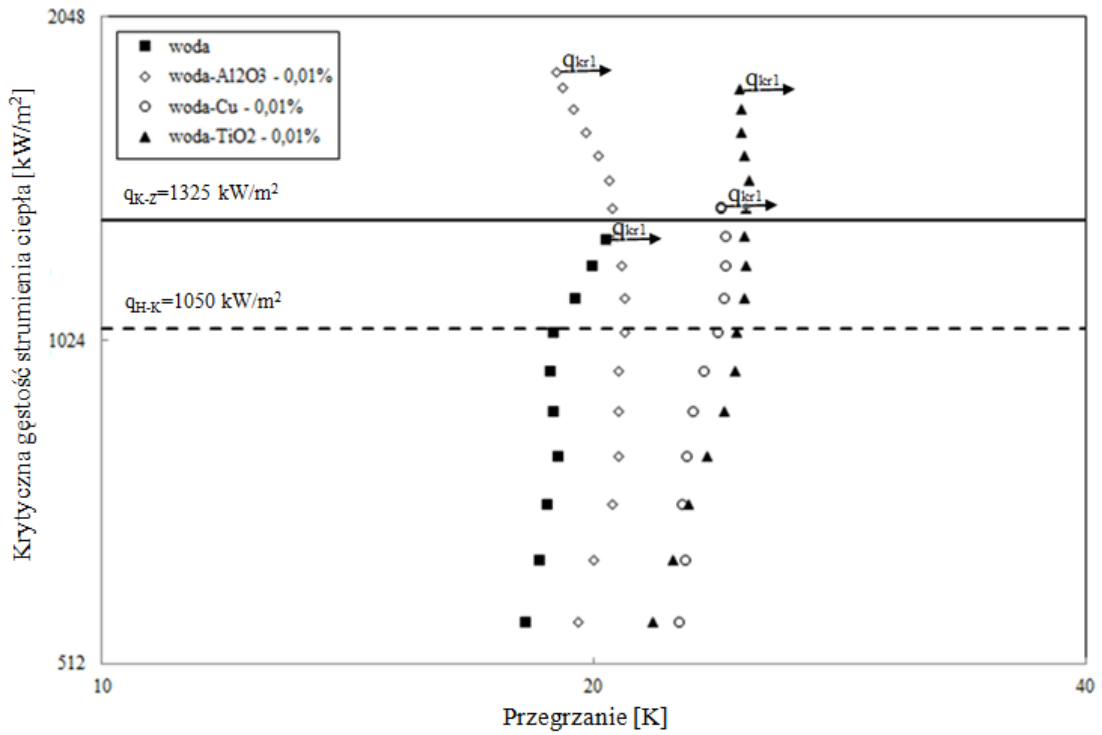
Jedynie w przypadku nanociecicy woda-Cu widać niewielkie różnice w wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła, które rosną wraz z koncentracją nanocząstek – rys. 9.39. Istotne są również różnice w wartościach współczynnika przejmowania ciepła, który maleje również ze wzrostem koncentracji nanocząstek – krzywe wrzenia są przesunięte w prawo, ku większym przegrzaniom.



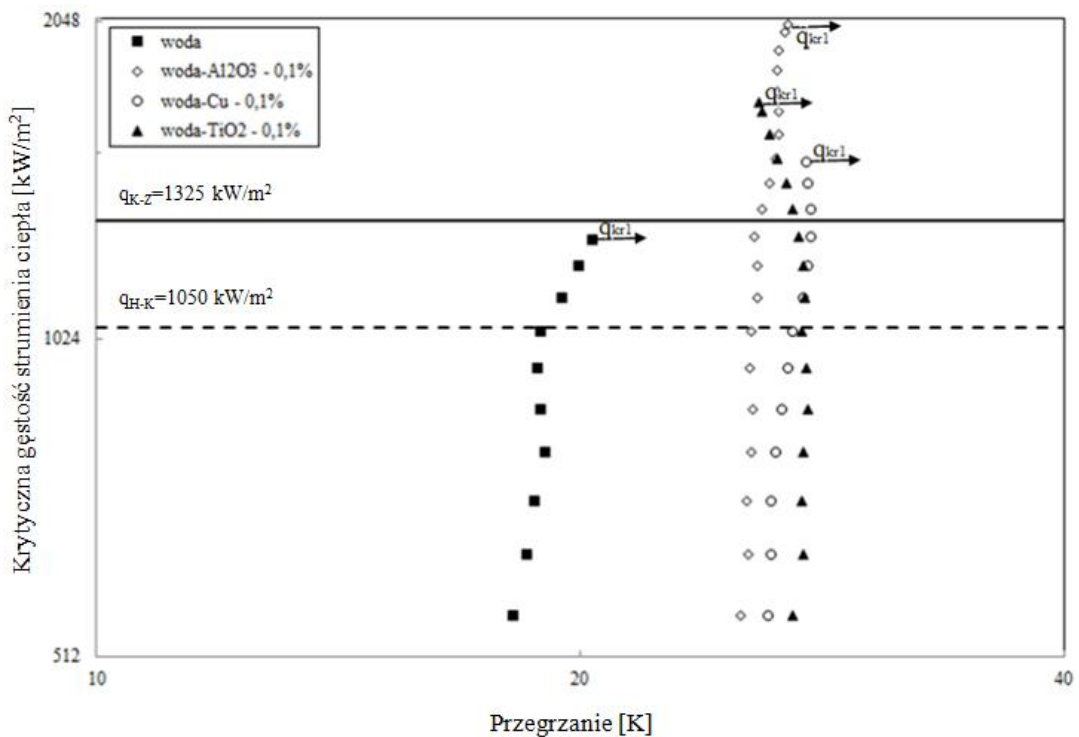
Rys. 9.39. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm

Wpływ rodzaju nanocząstek

Rys. 9.40 oraz 9.41 przedstawiają przykładowe krzywe wrzenia w obszarze krytycznej gęstości strumienia ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 , woda- TiO_2 oraz woda-Cu o koncentracji masowej nanocząstek 0,01% oraz 0,1% na rurce o średnicy 3 mm. Wszystkie krzywe wrzenia przesunięte są w prawo, ku większym przegrzaniom, w odniesieniu do krzywej wrzenia wody, co świadczy o spadku wartości współczynnika przejmowania ciepła. W przypadku obu koncentracji nanocząstek najwyższą wartość wykazuje każdorazowo nanociecz woda- Al_2O_3 (1818 kW/m^2 dla koncentracji 0,01% oraz 2000 kW/m^2 dla koncentracji 0,1%), najniższą wartość natomiast nanociecz woda-Cu (1361,3 kW/m^2 w przypadku koncentracji 0,01% oraz 1506 kW/m^2 dla koncentracji 0,1%). W przypadku nanocieczy woda- TiO_2 o koncentracji 0,01% i 0,1% otrzymano wartości odpowiednio 1757 kW/m^2 oraz 1719 kW/m^2 .

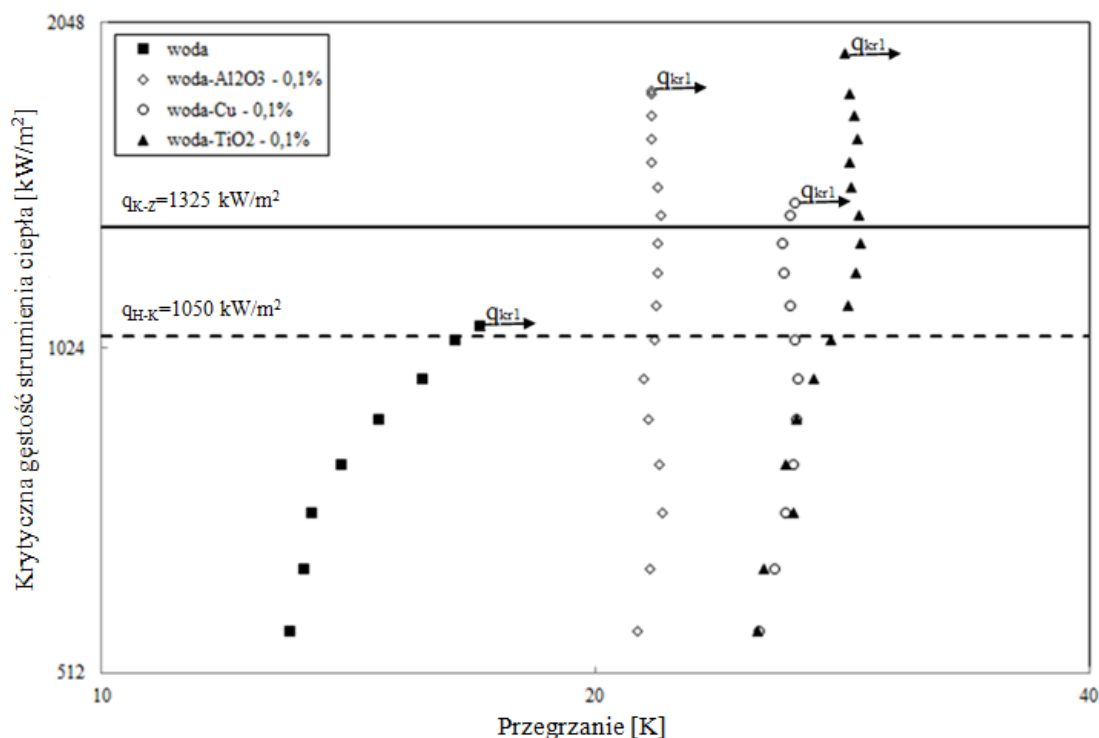


Rys. 9.40. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm



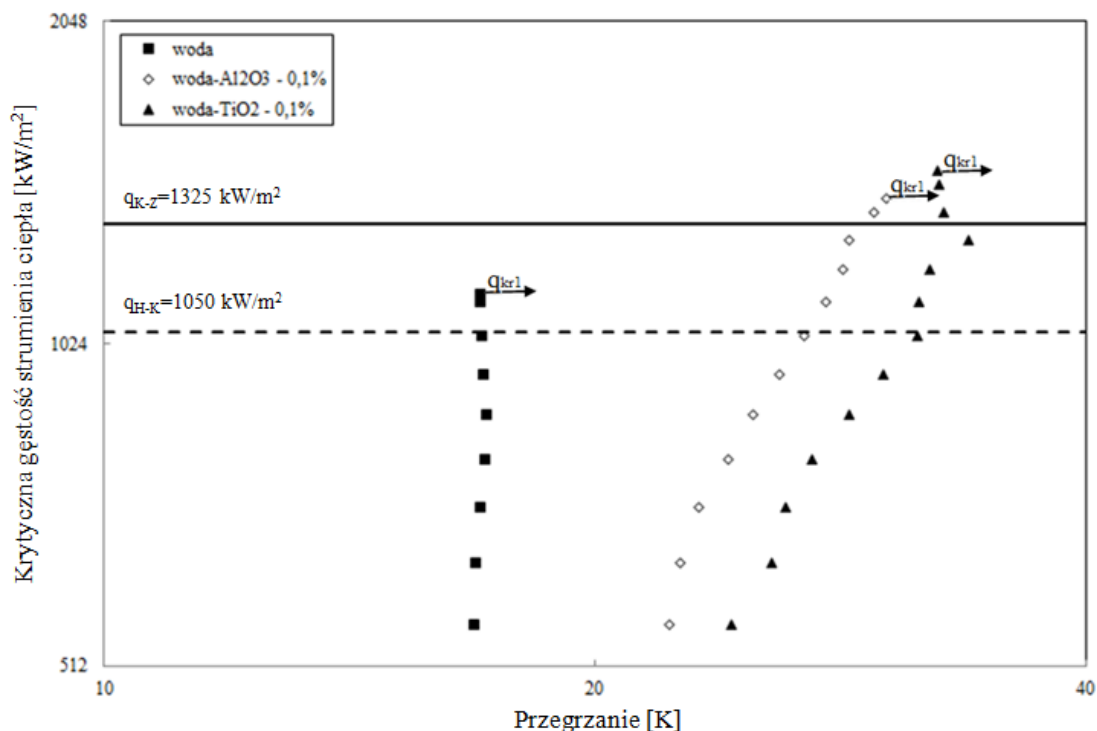
Rys. 9.41. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm

Odmianą zależność zaobserwowano podczas wrzenia badanych nanocieczy na rurce o średnicy 1,6 mm. W tym przypadku najwyższą wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła uzyskano podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji 0,01% i wyniosła ona 1921 kW/m². Podobnie, jak dla rurki o średnicy 3 mm, najniższe wartości q_{kr1} otrzymano dla nanocieczy woda-Cu, które były porównywalne z wartościami otrzymanymi podczas wrzenia wody destylowanej (rys. 9.42).



Rys. 9.42. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm

W przypadku rurki o średnicy 5 mm - niezależnie od rodzaju nanocząstek i ich koncentracji, wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła były dużo niższe w porównaniu z wartościami, które udało się uzyskać na rurkach o mniejszych średnicach. Najwyższą wartość q_{kr1} dla rurki o średnicy 5 mm uzyskano dla nanocieczy woda-TiO₂, - 1520 kW/m², przy przegrzaniu 29 K (rys. 9.43).

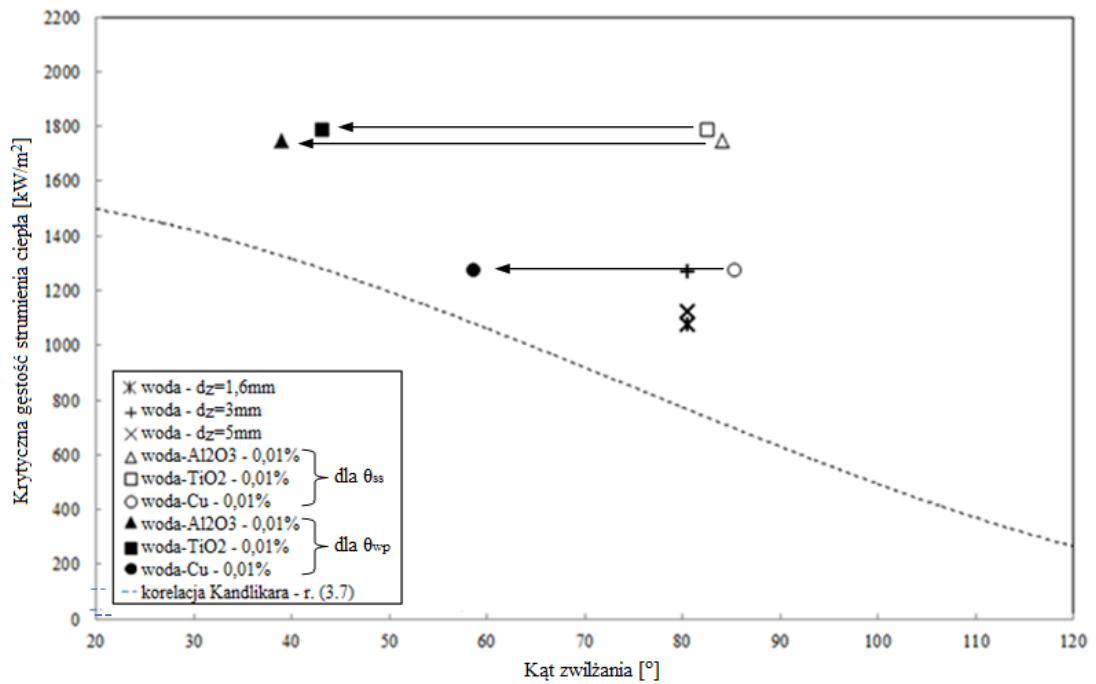


Rys. 9.43. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 oraz woda- TiO_2 na rurce o średnicy 5 mm

Własna korelacja na krytyczną gęstość strumienia ciepła podczas wrzenia nanocieczy

Jak wynika z przedstawionego przeglądu literatury (rodz. 4) decydujący wpływ na przebieg kryzysu wrzenia pęcherzykowego nanocieczy ma formowanie się na powierzchni grzejnej warstwy porowatej, tzw. nanowarstwy. Powstanie nanowarstwy zmienia kąt zwilżania, który jest jednym z podstawowych parametrów mających wpływ na wartość q_{kr1} .

Na rys. 9.44 przedstawiono uzyskane krytyczne gęstości strumienia ciepła w funkcji kąta zwilżania, zmierzonego przed i po eksperymencie, dla wody oraz nanocieczy woda- Al_2O_3 , woda- TiO_2 i woda-Cu o koncentracji 0,01% na rurce o średnicy 1,6 mm. Na wykresie zamieszczono krzywą przedstawiającą przewidywania według korelacji Kandlikara – równanie (3.7) w tabeli 3.1. Uwzględnienie w korelacji Kandlikara kąta zwilżania nanocieczy powierzchni rurki z nanowarstwą, zamiast kąta zwilżania nanocieczy rurki ze stali nierdzewnej, powoduje, że różnica między wartościami obliczonymi, a własnymi wynikami pomiarów maleje z 185% do 51% dla nanocieczy woda- Al_2O_3 , z 145% do 30% dla nanocieczy woda- TiO_2 , oraz z 151% do 51% dla nanocieczy woda-Cu.



Rys. 9.44. Krytyczna gęstość strumienia ciepła w funkcji kąta zwilżania, zmierzonego przed i po eksperymencie na rurce o średnicy 1,6 mm

Korelacja Kandlikara - równanie (3.7) została opracowana dla cieczy czystych. Dzięki otrzymanym własnym wynikom pomiarów możliwe było zmodyfikowanie korelacji Kandlikara w taki sposób, aby można było ją stosować do obliczeń krytycznej gęstości strumienia ciepła nanocieczy z uwzględnieniem koncentracji nanocząstek:

$$q_{kr1} = Bq_{kr1}^K \phi^n, \quad (9.4)$$

gdzie: q_{kr1}^K - korelacja Kandlikara (równanie 3.7),

B – stała zależna od materiału rurki i rodzaju nanocieczy,

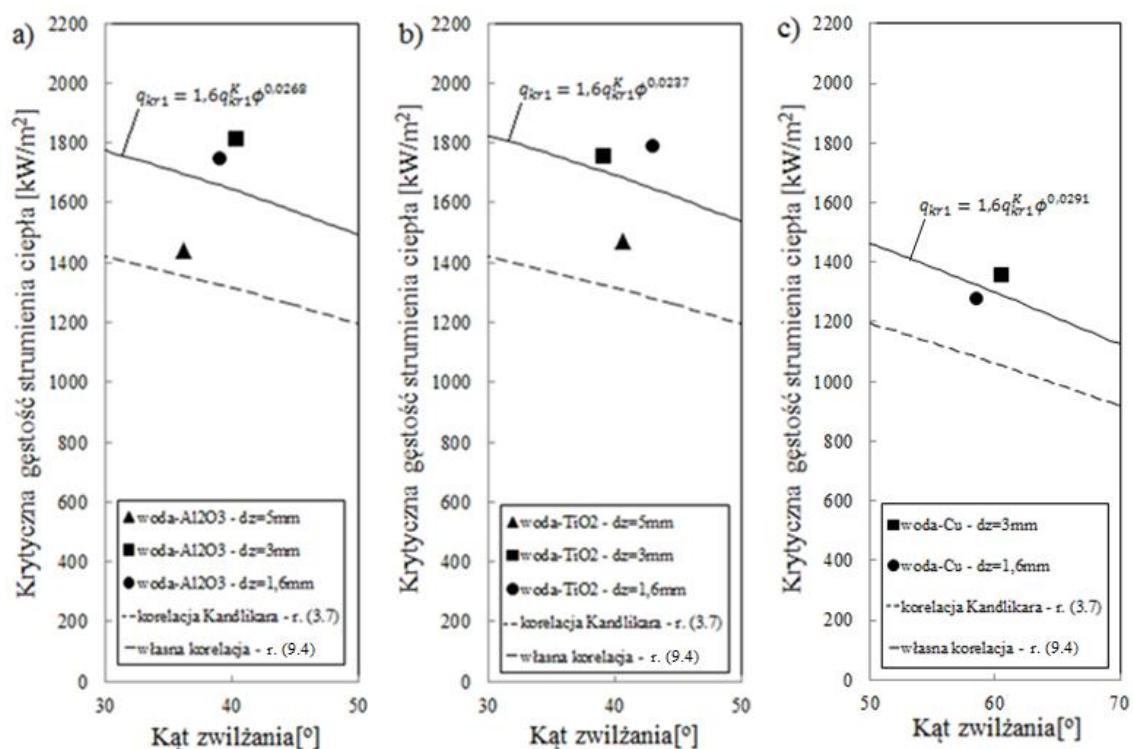
n – wykładnik zależy od rodzaju i koncentracji nanocząstek.

W wyniku zastosowania wielowymiarowej analizy regresji ustalono, że dla rurek ze stali nierdzewnej oraz badanej nanocieczy wartość stałej B wynosi 1,6, natomiast uzyskane wartości wykładnika n przedstawiono w tab. 9.5.

Tabela 9.5. Wartości wykładnika n dla wszystkich badanych koncentracji masowych nanocząstek.

Koncentracja masowa [%]	Wykładnik n		
	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cu
0,001	-	-	0,0313
0,01	0,0268	0,0237	0,0291
0,1	0,0273	0,0284	0,0256
1	0,0361	0,0348	-

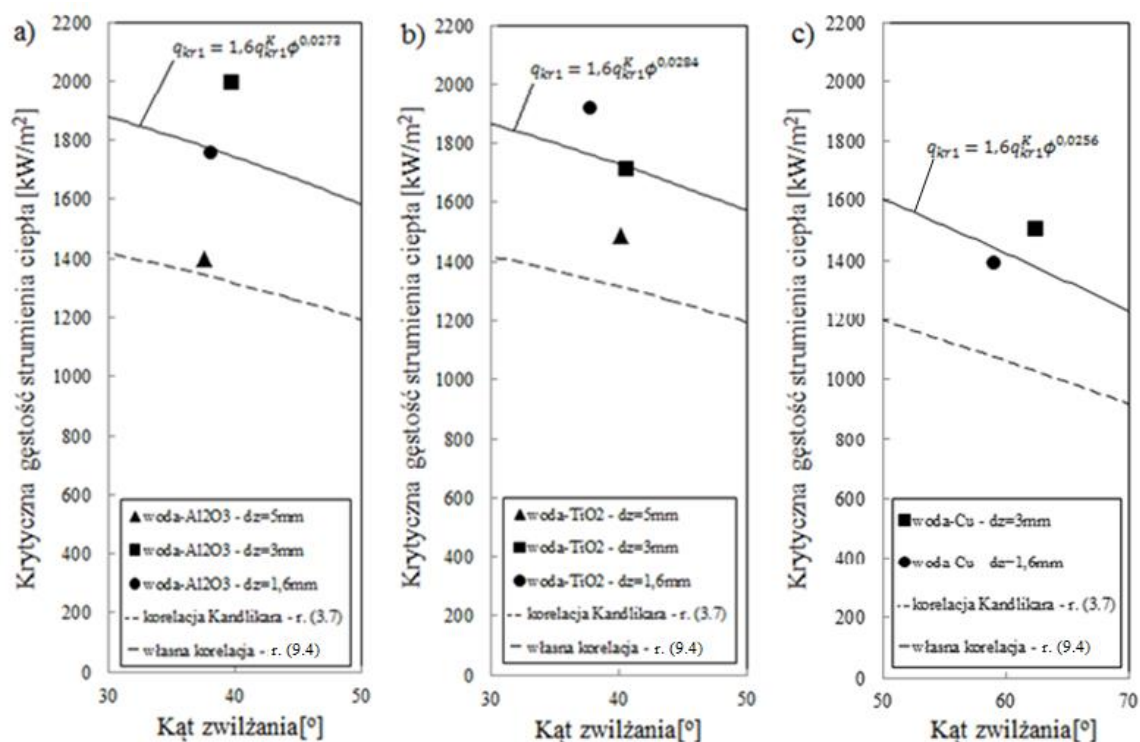
Przykładowo rys. 9.45 przedstawia punkty pomiarowe uzyskane dla trzech średnic rurek na tle własnej korelacji dla nanocieczy woda-Al₂O₃ (rys. 9.45a), woda-TiO₂ (rys. 9.45b) oraz woda-Cu (rys. 9.45c) o koncentracji 0,01% i kątów zwilżania wyznaczonych po eksperymencie. Różnica między wynikami obliczonymi z własnej korelacji, a wynikami pomiarów wynosi maksymalnie 25% dla nanocieczy woda-Al₂O₃, 23% dla nanocieczy woda-TiO₂ oraz 3% dla nanocieczy woda-Cu.



Rys. 9.45. Krytyczna gęstość strumienia w funkcji kąta zwilżania wszystkich badanych nanocieczy o koncentracji nanocząstek 0,01%

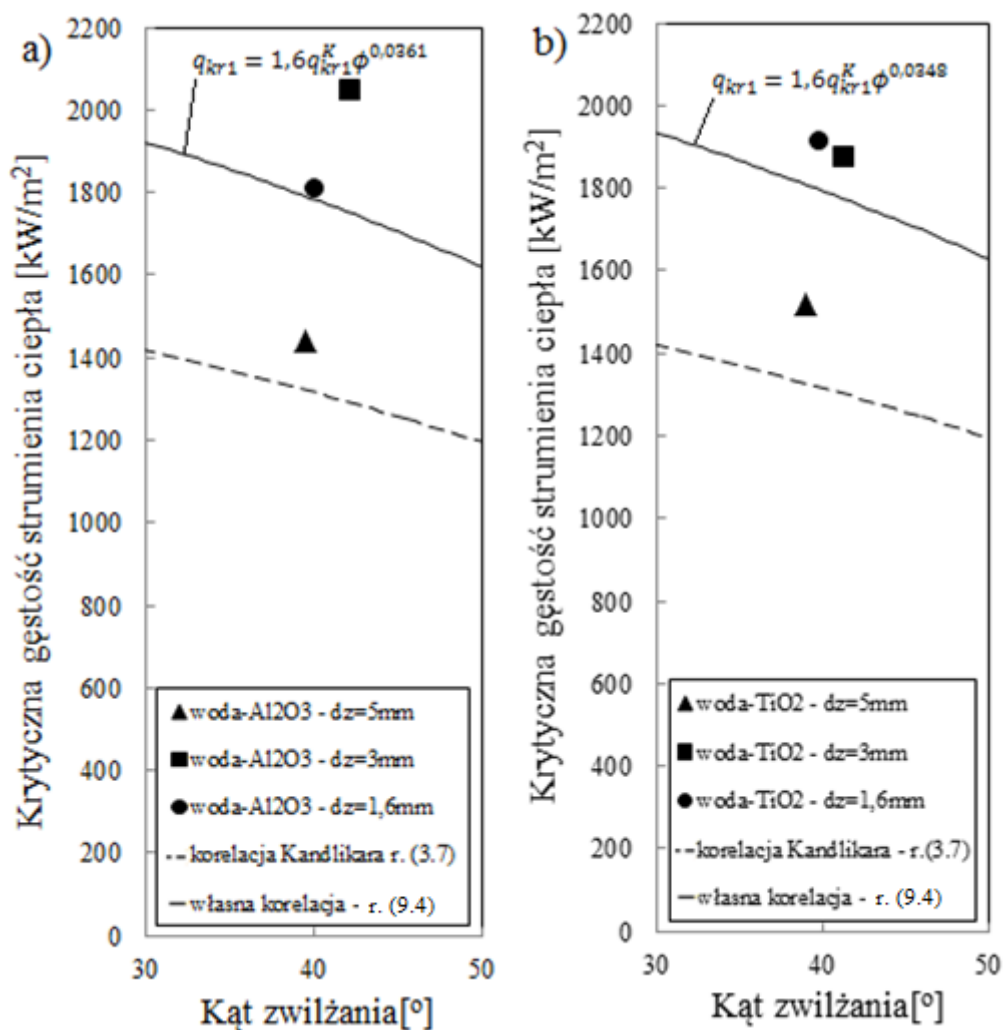
Dla badanych nanocieczy o koncentracji 0,1% różnice pomiędzy wartościami obliczonymi z własnej korelacji, a wynikami pomiarów wynoszą maksymalnie 21% dla

nanocieczy woda-Al₂O₃ (rys. 9.46a), 14% dla nanocieczy woda-TiO₂ (rys. 9.46b) oraz 3% dla nanocieczy woda-Cu (rys. 9.46c).



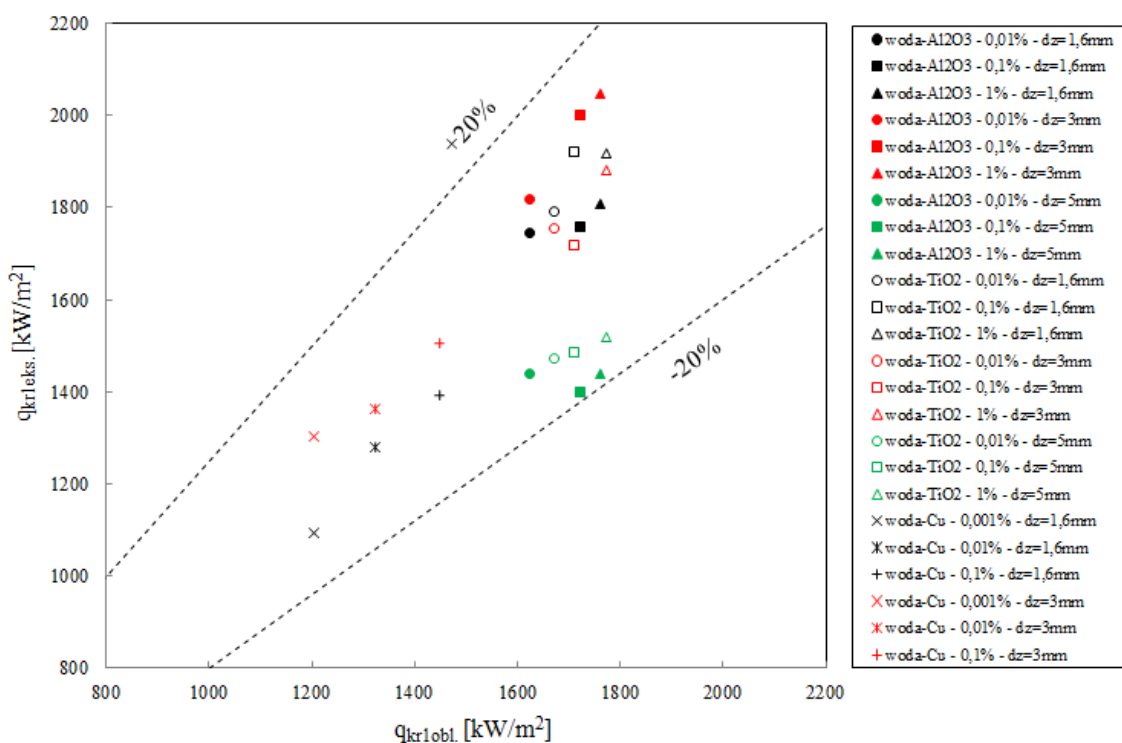
Rys. 9.46. Krytyczna gęstość strumienia w funkcji kąta zwilżania wszystkich badanych nanocieczy o koncentracji nanocząstek 0,1%

Z kolei dla badanych nanocieczy o koncentracji 1% różnice pomiędzy wartościami obliczonymi z własnej korelacji, a wynikami pomiarów wynoszą maksymalnie 20% dla nanocieczy woda-Al₂O₃ (rys. 9.47a) oraz 16% dla nanocieczy woda-TiO₂ (rys. 9.47b).



Rys. 9.47. Krytyczna gęstość strumienia w funkcji kąta zwilżania nanocieczy o koncentracji nanocząstek 1%

Porównanie krytycznej gęstości strumienia ciepła otrzymanej z badań eksperymentalnych z krytyczną gęstością strumienia ciepła wyznaczoną za pomocą zaproponowanej korelacji - równanie (9.4), przedstawiono na rys. 9.48. Wszystkie punkty eksperymentalne mieszczą się w zakresie $\pm 20\%$, co jak na złożoność procesu wrzenia nanocieczy na poziomych rurkach ze stali nierdzewnej należy uznać za wynik zadowalający.



Rys. 9.48. Zestawienie danych eksperymentalnych z wynikami obliczeń według korelacji (9.4) dla nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu na rurkach poziomych ze stali nierdzewnej

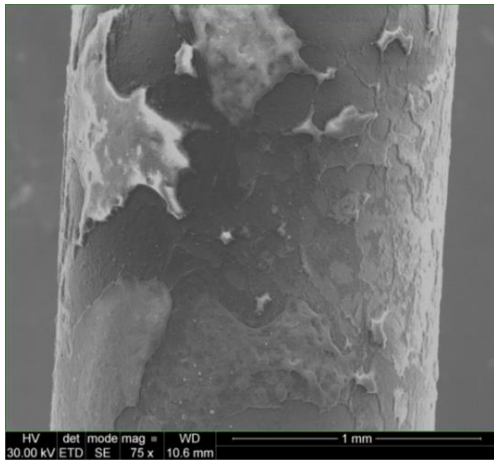
Częściowe wyniki badań opublikowano w [81]. Pełne zestawienie otrzymanych wyników znajduje się w zał. 1.

9.4. Dyskusja wyników badań

Dobra zgodność wyników pomiarów z obliczeniami według własnej korelacji - uwzględniającej wartość kąta zwilżania powierzchni grzejnej z nanowarstwą przez nanociecz, wydaje się potwierdzać słuszność hipotezy mówiącej o decydującym wpływie zwilżalności na wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła.

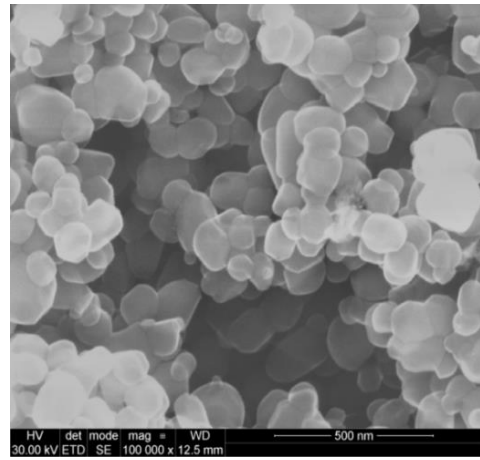
Powstaje jednak pytanie, dlaczego nanowarstwa – tworząca się w trakcie procesu wrzenia, tak zasadniczo zmienia zwilżalność powierzchni grzejnej. W tym celu wykonano zdjęcia powierzchni grzejnej – po eksperymencie, przy użyciu mikroskopu skaningowego FEI FEG 250. Zdjęcia uzyskane przy małym powiększeniu – rys. 9.49a, pokazują, że nanowarstwa ma strukturę niejednorodną i nierównomiernie pokrywa powierzchnię rurki. Jednak zdjęcia wykonane przy dużym powiększeniu (x100000) – rys. 9.49b, ujawniają dużą porowatość nanowarstwy, a także pewną jej regularność.

a)



powiększenie (x75)

b)



powiększenie (x100000)

Rys. 9.49. Zdjęcia SEM powierzchni rurki o średnicy 1,6 mm pokrytej nanowarstwą podczas wrzenia nanocieczki woda-TiO₂ o koncentracji 0,01%

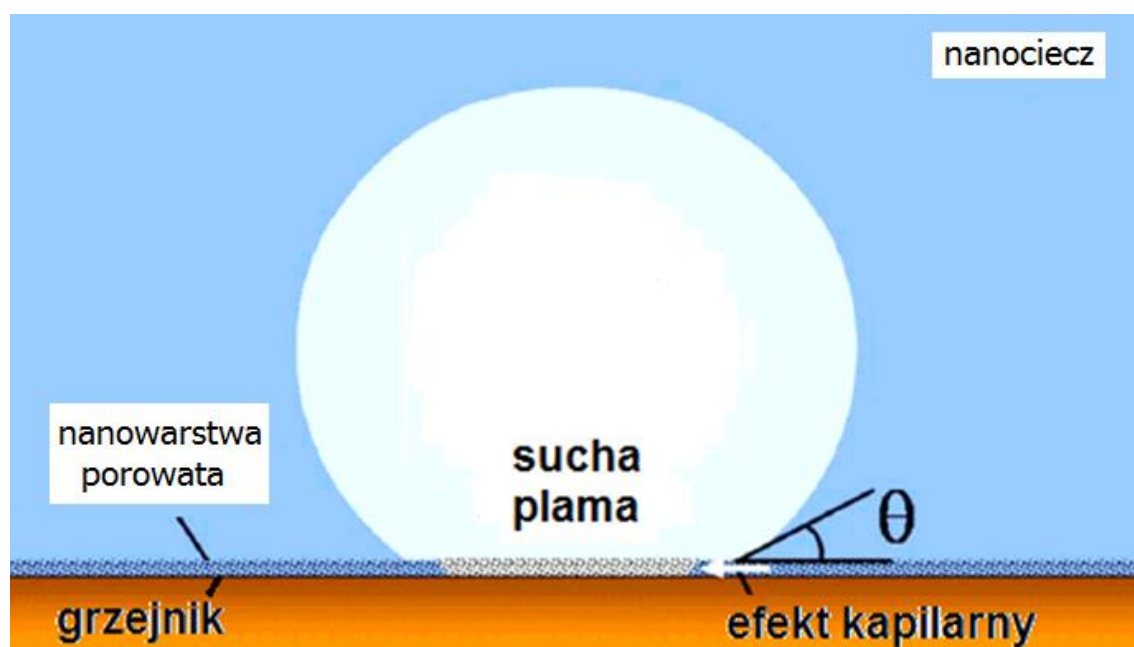
Skoro nanowarstwa ma tak zasadniczy wpływ na przebieg procesu wrzenia, istotnym zagadnieniem jest wyjaśnienie mechanizmu jej powstawania. Obecny stan wiedzy pozwala na stwierdzenie, że to odparowanie mikrowarstwy, a więc cienkiej warstewki cieczy pod wzrastającym pęcherzykiem – rys. 9.50, prowadzi do osadzania się na powierzchni grzejnej nanocząstek, które znajdują się w mikrowarstwie. Mechanizm ten został zasugerowany przez Kima i in. [29], natomiast potwierdzenie eksperymentalne przedstawili Kwark i in. [54].



Rys. 9.50. Proces tworzenia nanowarstwy na powierzchni grzejnej [54]

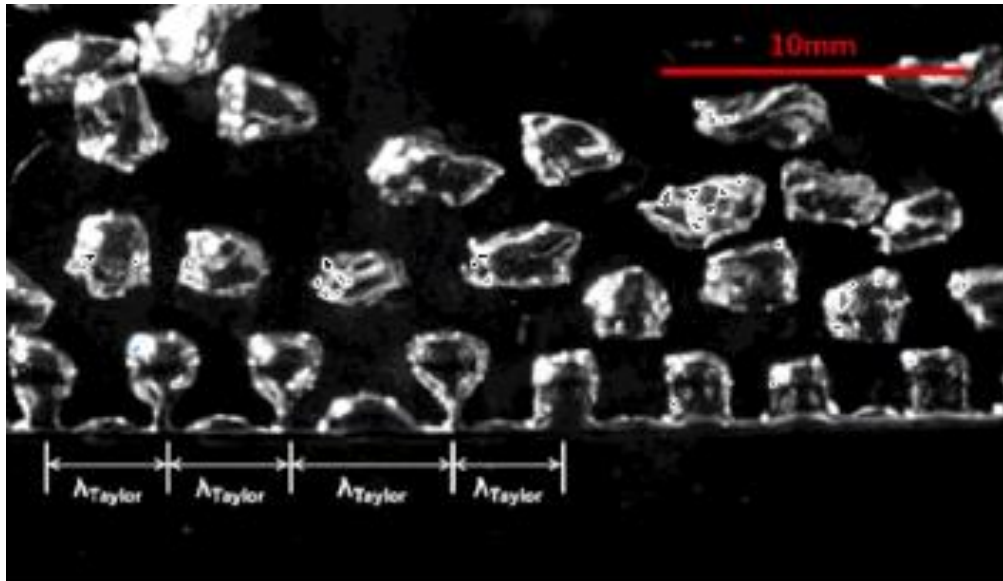
Innym wytłumaczeniem powstawania nanowarstwy na powierzchni grzejnej jest wzajemne oddziaływanie nanocząstek z powierzchnią grzejną w wyniku działania sił adhezji oraz procesu aglutynacji [48].

Poza zmianą zwilżalności powierzchni grzejnej – w wyniku tworzenia się nanowarstwy, wskazuje się jeszcze na inne mechanizmy, które mogą prowadzić do podwyższenia krytycznej gęstości strumienia ciepła podczas wrzenia nanocieczy. I tak Kim H.D. i Kim M.H. [82] uważają, że wzrost krytycznej gęstości strumienia ciepła podczas wrzenia nanocieczy jest rezultatem przesuwania się linii kontaktu w kierunku gorącej, suchej plamy pod wzrastającym pęcherzykiem parowym – rys. 9.51. Przesuwanie się linii kontaktu jest wynikiem działania sił kapilarnych w porowatej nanowarstwie, dzięki czemu świeża ciecz jest dostarczana do obszaru suchej plamy i w ten sposób zostaje opóźniony proces nieodwracalnego rozprzestrzeniania się gorącej suchej plamy, a więc pierwszy kryzys wrzenia.



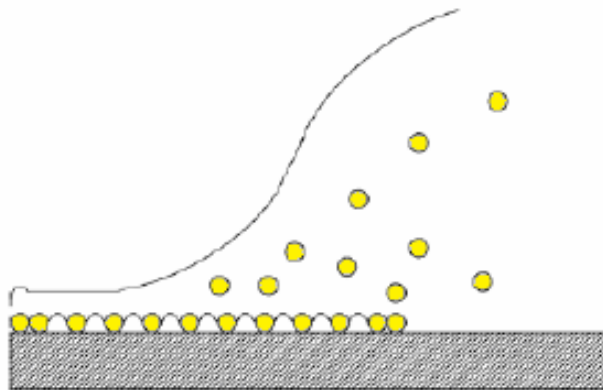
Rys. 9.51. Efekt kapilarny towarzyszący procesowi wrzenia nanocieczy [82]

Z kolei Park i Bang [83] wskazują, że porowata nanowarstwa, tworząca się na powierzchni grzejnej podczas wrzenia nanocieczy, ma wpływ na odległość między tworzącymi się w trakcie procesu wrzenia kolumnami parowymi – rys. 9.52, a co za tym idzie zmienia się krytyczna długość fali, przy której dochodzi do niestateczności Helmholtza, a więc pierwszego kryzysu wrzenia [31].



Rys. 9.52. Krytyczna długość fali [83]

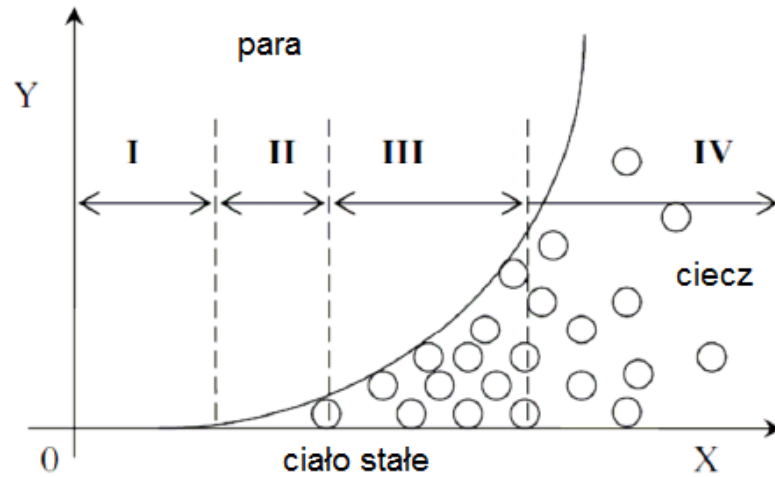
Sefiane [84] tłumaczy wzrost krytycznej gęstości strumienia ciepła późniejszym oderwaniem się linii kontaktu (ang. *depinning*) nanocieczy niż cieczy bazowej. Dłuższy - niż dla cieczy bazowej, stan przyłączenia pęcherzyka parowego do powierzchni grzejnej (ang. *pinning*) w przypadku nanocieczy, powoduje zahamowanie rozprzestrzeniania się suchej plamy pod pęcherzykiem, a stąd opóźnienie występowania pierwszego kryzysu wrzenia. Przyczyną trwalszego zaczepienia się pęcherzyka parowego nanocieczy na powierzchni grzejnej (*pinning*) w porównaniu do cieczy bazowej jest strukturalne ciśnienie adhezyjne (ang. *structural disjoining pressure*), które wynika z gromadzenia się w sposób uporządkowany (ang. *ordering*) nanocząstek w klinie w pobliżu linii kontaktu – rys. 9.53.



Rys. 9.53. Proces osiadania nanocząstek w pobliżu linii kontaktu [84]

Bazując na idei strukturalnego ciśnienia adhezyjnego Wen [85] opracował model pierwszego kryzysu wrzenia oparty na rozprzestrzenianiu się suchej plamy (ang.

dry patch model). Z jego obliczeń wynika, że obecność nanocząstek w cieczy powoduje znaczące przesunięcie linii kontaktu w kierunku fazy parowej (suchej plamy – obszar I na rys. 9.54). Występowanie strukturalnego ciśnienia adhezyjnego w obszarze III (rys. 9.54) powoduje znacznie lepszą zwilżalność nanocieczy niż cieczy bazowej, co ogranicza rozprzestrzenienie się suchej plamy, a więc opóźnia pierwszy kryzys wrzenia.



Rys. 9.54. 4-obszarowy model mikrowarstwy nanocieczy [85]

Jak wynika z przedstawionej dyskusji wyników badań nie ma zgodności odnośnie mechanizmu pierwszego kryzysu wrzenia nanocieczy, podobnie jak w przypadku wrzenia czystych cieczy (rozdz. 4). Niezbędne są więc dalsze wnikliwe badania tego problemu.

10. Podsumowanie i wnioski

Niniejsza praca jest poświęcona badaniom wrzenia w dużej objętości oraz pierwszego kryzysu wrzenia na poziomych rurkach ze stali nierdzewnej o trzech średnicach: 1,6 mm, 3 mm oraz 5 mm. Badanymi cieczami były nanociecze woda- Al_2O_3 i woda- TiO_2 o koncentracjach masowych nanocząstek 0,01%, 0,1% i 1% oraz nanociecz woda-Cu o koncentracjach 0,001%, 0,01% oraz 0,1%. Ze względu na złożoność procesu wrzenia praca wymagała także zbadania kąta zwilżania i własności termofizycznych nanocieczy tj.: lepkości, współczynnika przewodzenia ciepła, przewodności elektrycznej i pH.

Głównym celem pracy było wyznaczenie gęstości strumienia ciepła podczas wrzenia nanocieczy, przy której dochodziło do zniszczenia sekcji grzejnej. Doświadczenia przeprowadzono przy ciśnieniu atmosferycznym.

Wszystkie nanociecze zostały wytworzone w laboratorium Zakładu Ekoinżynierii i Silników Spalinowych za pomocą metody dwustopniowej. Homogenizacji dokonano za pomocą płuczki ultradźwiękowej oraz mieszadła mechanicznego. Zadawalająca stabilność wytwarzanych nanocieczy pozwoliła uniknąć dodawania do zawiesin środków stabilizujących czy powierzchniowo-czynnych, które mogłyby mieć wpływ na przebieg procesu wrzenia. Pomiary kąta zwilżania zostały przeprowadzone w laboratorium ZEiSS oraz we współpracy z Wydziałem Chemicznym Politechniki Gdańskiej. Pomiary własności fizykochemicznych wykonano w Laboratorium für Energetik, "JRM Institut für Energietechnik der Hochschule Bremen". W wyniku współpracy z Centrum Nanotechnologii PG uzyskano zdjęcia SEM badanych nanocieczy oraz powierzchni rurek.

Wszystkie założone cele pracy zostały osiągnięte, a przeprowadzone badania pozwoliły sformułować następujące wnioski:

1. Niezależnie od rodzaju nanocząstek obecnych w cieczy bazowej, lepkość nanocieczy rośnie wraz z koncentracją nanocząstek oraz maleje wraz ze wzrostem temperatury.
2. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła badanych nanocieczy nieznacznie zmienia się wraz ze wzrostem temperatury. W przypadku nanocieczy na bazie wody współczynnik przewodzenia ciepła jest zbliżony dla wszystkich badanych koncentracji nanocieczy. Podczas badań nanocieczy na bazie oleju termalnego

zauważono wzrost współczynnika przewodzenia ciepła wraz z koncentracją nanocząstek.

3. Przewodność elektryczna badanych nanocieczy rośnie nieznacznie ze wzrostem temperatury i wzrostem koncentracji masowej nanocząstek. Wartość pH badanych nanocieczy nieznacznie wzrasta wraz z temperaturą. W przypadku większości nanocieczy nie zauważono wpływu koncentracji nanocząstek na wartość pH.
4. Zaproponowano własne równania korelacyjne do obliczania dynamicznego współczynnika lepkości oraz współczynnika przewodzenia ciepła badanych nanocieczy.
5. Na wartość kąta zwilżania nanocieczy mają wpływ: rodzaj i chropowatość powierzchni, na której została osadzona kropla, oraz rodzaj użytych nanocząstek. Zaobserwowano nieznaczny wpływ koncentracji masowej nanocząstek na kąt zwilżania nanocieczy.
6. Obecność nanocząstek w cieczy bazowej ma zasadniczy wpływ na wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła. Podczas wrzenia na powierzchni grzejnej tworzy się nanowarstwa, powodująca zmniejszenie chropowatości powierzchni oraz degradację wartości kąta zwilżania nanocieczy. W przypadku niektórych badanych nanocieczy uzyskano prawie 200% wzrostu wartości krytycznej gęstości strumienia ciepła w stosunku do wrzenia cieczy bazowej, tj. wody destylowanej.
7. Rodzaj nanocząstek ma duży wpływ na wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła. Najwyższą wartość q_{kr1} otrzymano w przypadku wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 na rurce o średnicy 3 mm.
8. Koncentracja masowa nanocząstek ma nieznaczny wpływ na wartość krytycznej gęstości strumienia ciepła.
9. Zaproponowano własne równanie korelacyjne na krytyczną gęstość strumienia ciepła podczas wrzenia nanocieczy, które w zadowalający sposób opisywało własne wyniki badań eksperymentalnych.

Literatura

- [1] Choi S.: *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, ASME, FED-Vol. 231/MD-Vol. 66, 1995, pp. 99-105.
- [2] Cieśliński J.T., Kaczmarczyk T.: *Pool boiling of water-Al₂O₃ and water-Cu nanofluids on horizontal smooth tubes*, Nanoscale Research Letters, 2011.
- [3] Barber J., Brutin D., Tadriss L.: *A review on boiling heat transfer enhancement with nanofluids*, Nanoscale Research Letters, 2011, 6:280.
- [4] Rao Y.: *Nanofluids: Stability, phase diagram, rheology and applications*, Particuology 8, 2010, 549–555.
- [5] Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C.: *Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – A critical review*, Applied Thermal Engineering 28, 2008, 2109–2125.
- [6]] Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C.: *Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids*, International Journal of Thermal Sciences 47, 2008, 560–568.
- [7] Wang X.-J., Li X.-F.: *Influence of pH on Nanofluids' Viscosity and Thermal Conductivity*, Chin. Phys. Lett. Vol. 26, No. 5, 2009, 056601.
- [8] Saidur R., Leong K.Y., Mohammad H.A.: *A review on applications and challenges of nanofluids*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 2011, 1646–1668.
- [9] Lee J.-H., Hwang K.S., Jang S.P., Lee B.H., Kim J.H., Choi S.U.S.: *Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles*, Int. J. Heat Mass Transfer 51, 2008, 11–12:2651–6.
- [10] Duangthongsuk W., Wongwises S.: *Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids*, Experimental Thermal and Fluid Science 33, 2009, 706–714.
- [11] Timofeeva E.V., Gavrilov A.N., McCloskey J.M., Tolmachev Y.V., Sprunt S., Lopatina L.M., Selinger J.V.: *Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory*. Phys Rev E, 2007, 76:061203-061216.
- [12] Hamilton R.L., Crosser O.K.: *Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems*, Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals 1 (3), 1962, pp. 187–191.

- [13] Phuoc Tran X., Massoudi M., Chen R.-H.: *Viscosity and thermal conductivity of nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes stabilized by chitosan*, International Journal of Thermal Sciences 50, 2011, 12e18.
- [14] Nanda J., Maranville C., Bollin S.C., Sawall D., Ohtani H., Remillard J.T., Ginder J. M.: *Thermal Conductivity of Single-Wall Carbon Nanotube Dispersions: Role of Interfacial Effects*, The Journal of Physical Chemistry Letters, 112, 2008, 654-658.
- [15] Nguyen C.T., Desgranges F., Galanis N., Roy G., Mare T., Boucher S., Angue Mintsa H.: *Viscosity data for Al₂O₃-water nanofluid-hysteresis: Is heat transfer enhancement using nanofluids reliable*, International Journal of Thermal Sciences 47, 2008, 103-111.
- [16] Duan F., Kwek D., Crivoi A.: *Viscosity affected by nanoparticle aggregation in Al₂O₃-water nanofluids*, Nanoscale Research Letters 2011, 6:248.
- [17] Silambarasan M., Manikandan S., Rajan K.S.: *Viscosity and thermal conductivity of dispersion of sub-micron TiO₂ particles in water prepared by stirred bead milling and ultrasonication*, Int. J. of Heat Mass Transfer, 2012.
- [18] Wang X., Xu X., Choi S.U.S.: *Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture*, Journal of Thermophysics and Heat Transfer 13, 1999, 474–480.
- [19] Pak B.C., Cho Y.I.: *Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles*, Experimental Heat Transfer 11, 1998, 151–170.
- [20] Brinkman H.C.: *The viscosity of concentrated suspensions and solution*, Journal of Chemical Physics 20, 1952, 571–581.
- [21] Nielsen L.E.: *Generalized equation for the elastic moduli of composite materials*, J. Appl. Phys. 41 (11), 1970, 4626–4627.
- [22] Mahbubul I.M., Saidur R., Amalina M.A.: *Latest developments on the viscosity of nanofluids*, International Journal of Heat and Mass Transfer 55, 2012, 874–885.
- [23] Vajjha R.S., Das D.K.: *A review and analysis on influence of temperature and concentration of nanofluids on thermophysical properties, heat transfer and pumping power*, Int. J. Heat and Mass Transfer 55, 2012, pp. 4063–4078.
- [24] Ganguly S., Sikdar S., Basu S.: *Experimental investigation of the effective electrical conductivity of aluminium oxide nanofluids*, Powder Technology 196, 2009, 326–330.
- [25] Bursa S.: *Chemia fizyczna*, Wyd. Wyd. 2 popr. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1979, s. 577–582.

- [26] Kim T.I., Jeong Y.H., Chang S.H.: *An experimental study on CHF enhancement in flow boiling using Al_2O_3 nano-fluid*, International Journal of Heat and Mass Transfer 53, 2010, 1015–1022.
- [27] Atkins P.W.: *Chemia fizyczna*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2001, s. 150. ISBN 83-01-13502-6.
- [28] Sefiane K., Skilling J., MacGillivray J.: *Contact line motion and dynamic wetting of nanofluid solutions*, Advances in Colloid and Interface Science 138, 2008, 101–120.
- [29] Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W.: *Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux*, International Journal of Heat and Mass Transfer 50, 2007, 4105-4116.
- [30] Coursey J.S., Kim J.: International Journal of Heat and Fluid Flow 29, 2008, 1577-1585.
- [31] Cieśliński J.T.: *Modelowanie wrzenia pęcherzykowego*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005.
- [32] You M., Kim J.H., Kim K.H.: *Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer*, Applied Physics Letters, vol. 83, 2003, 3374-3376.
- [33] Vasallo P., Kumar R., Amico S.: *Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano-fluids*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 47, 2004, 407-411.
- [34] Dinh N., Tu J., Theofanous T.: *Hydrodynamic and Physico-Chemical Nature of Burnout in Pool Boiling*, 5th International Conference on Multiphase Flow, Yokohama, 2004, 296.
- [35] Moreno G., Oldenburg S.J., You S.M., Kim J.H.: *Pool boiling heat transfer of alumina-water, zinc oxide-water and alumina-water+ethylene glycol nanofluids*, Paper no. HT2005-72375 pp. 625-632. <http://dx.doi.org/10.1115/HT2005-72375>.
- [36] Bang I.C., Chang S.H.: *Boiling heat transfer performance and phenomena of Al_2O_3 – water nano-fluids from a plain surface in a pool*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 48, 2005, 2407-2419.
- [37] Jackson J.E., Borgmeyer B.V., Wilson C.A., Cheng P., Bryan J.E.: *Characteristics of Nucleate Boiling with Gold Nanoparticles in water*, In IMECE2006; November 5-10, 2006; Chicago, Illinois, USA, 2006.
- [38] Kim H., Kim J., Kim M.H.: *Effect of nanoparticles on CHF enhancement in pool boiling of nano-fluids*, International Journal of Heat and Mass Transfer 2006, 49:5070-5074.

- [39] Kim H., Kim J., Kim M.: *CHF enhancement in pool boiling of water-TiO₂ nanofluids: effect of nanoparticle-coating on heating surface*, 13th Int. Heat Transfer Conference, Sydney, 2006, paper NAN-22 (CD-ROM).
- [40] Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W.: *Effects of nanoparticle deposition on surface wettability influencing boiling heat transfer in nanofluids*, Applied Physics Letters 2006, 89:153107.
- [41] Kashinath M.R.: *Parameters affecting critical heat flux on nanofluids: heater size, pressure orientation and anti-freeze addition*, MSc, University of Texas at Arlington, 2006.
- [42] Milanova D., Kumar R., Kuchibhatla S., Seal S.: *Heat transfer behavior of oxide nanoparticles in pool boiling experiment*, In Fourth International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels (ICNMM2006); June 19-21, 2006; Limerick, Ireland. 2006.
- [43] Shi M. H., Shuai M. Q., Lai Y. E., Li Q., Xuan Y. M.: *Experimental study of pool boiling heat transfer for nanoparticle suspensions on a plate surface*, 13th Int. Heat Transfer Conference, Sydney, 2006, paper BOI-06 (CD-ROM).
- [44] Nguyen C. T., Galanis N., Roy G., Divoux S., Gilbert D.: *Pool boiling characteristics of water Al₂O₃ nanofluid*, 13th Int. Heat Transfer Conference, Sydney, 2006, paper NAN-02 (CD-ROM).
- [45] Kim H., Kim J., Kim M.: *CHF enhancement in pool boiling of water-TiO₂ nanofluids: effect of nanoparticles-coating on heating surface*, 13th Int. Heat Transfer Conference, Sydney, 2006, paper NAN-22 (CD-ROM).
- [46] Kim H. D., Kim J., Kim M. H.: *Experimental studies on CHF characteristics of nanofluids at pool boiling*, Int. Journal of Multiphase Flow, vol. 33, 2007, 691-706.
- [47] Coursey J., Kim J.: *Nanofluid boiling: The effect of surface wettability*. Int. J. Heat and Fluid Flow 2008, 29:1577-1585.
- [48] Liu Z., Liao L.: *Sorption and agglutination phenomenon of nanofluids on a plain heating surface during pool boiling*, Int. J. Heat and Mass Transfer 2008, 51:2593-2602.
- [49] Milanova D., Kumar R.: *Heat transfer behavior of silica nanoparticles in pool boiling experiment*, ASME J. Heat Transfer 2008, 130:042401.
- [50] Golubovic M.N., Madhawa Hettiarachchi H.D., Worek W.M., Minkowycz W.J.: *Nanofluids and critical heat flux, experimental and analytical study*, Applied Thermal Engineering 2009, 29:1281-1288.

- [51] Kumar R., Milanova D.: *Effect of surface tension on nanotube nanofluids*, Applied Physics Letters 2009, 94:073107.
- [52] Kim H., Kim M.: *Experimental study of the characteristics and mechanism of pool boiling CHF enhancement using nanofluids*, Heat and Mass Transfer 2009, 45:991-998.
- [53] Kathiravan R., Kumar R., Gupta A., Chandra R.: *Preparation and pool boiling characteristics of copper nanofluids over a flat plate heater*, Int. J. Heat and Mass Transfer 2010, 53:1673-1681.
- [54] Kwark S.M., Kumar R., Moreno G., Yoo J., You S.M.: *Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids*, Int. J. Heat and Mass Transfer, 2010, 53:972-981
- [55] Kwark S.M., Moreno G., Kumar R., Moon H., You S.M.: *Nanocoating characterization in pool boiling heat transfer of pure water*, Int. J. Heat and Mass Transfer 2010, 53:4579-4587.
- [56] Kwark S.M., Amaya M., Kumar R., Moreno G., You S.M.: *Effects of pressure, orientation, and heater size on pool boiling of water with nanocoated heaters*, Int. J. Heat and Mass Transfer 2010, 53:5199-5208.
- [57] Liu Z.-H., Yang X.-F., Xiong J.-G.: *Boiling characteristics of carbon nanotube suspensions under sub-atmospheric pressures*, Int. J. Thermal Sciences 2010, 49:1156-1164.
- [58] Kathiravan R., Kumar R., Gupta A., Chandra R.: *Preparation and pool boiling characteristics of copper nanofluids over a flat plate heater*, Heat Transfer Engineering, vol. 33, 2012, pp. 69-78.
- [59] Park E.J., Lee S.W., Bang I.Ch., Park H.W.: *Optimal synthesis and characterization of Ag nanofluids by electrical explosion of wires in liquids*, Nanoscale Research Letters 2011, 6:223.
- [60] Lee T., Lee J.H., Jeong Y.H.: *Flow Boiling CHF Characteristics of Magnetic Nanofluid under the Magnetic Field Condition*, Proceedings of ICAPP, 2013, Paper No. KF129.
- [61] Lee J.H., Lee T., Jeong Y.H.: *Experimental investigation on the CHF enhancement of pool boiling using water-based nanofluid at higher pressure*, Proc. Of ICAPP, 2013, Paper No. 131.
- [62] Hiswankar S.C., Kshirsagar J.M.: *Determination Of Critical Heat Flux In Pool Boiling Using ZnO Nanofluids*, Int. Journal of Engineering Research & Technology, 2013, vol. 2 Issue 7.

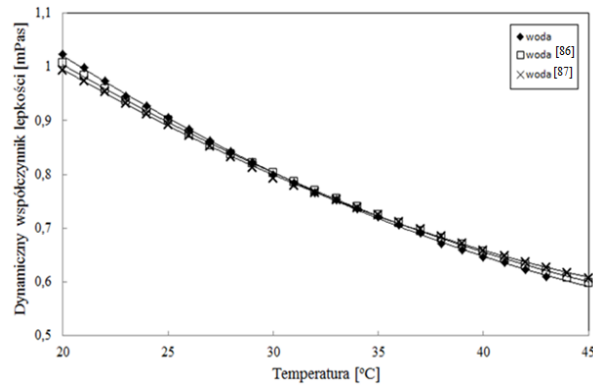
- [63] Kole, Madhusree, Dey T.K.: *Pool Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux Enhancement of Copper Nanoparticles Dispersed in Distilled Water*, Journal of Nanofluids, vol. 3, Number 2, 2014, pp. 85-96(12).
- [64] Adamson A.W.: *Physical Chemistry of Surfaces*, 5th ed. New York: Wiley, John Wiley&Sous, Inc. 1990.
- [65] Michał Babik (www.eureka_pile.republika.pl/bcc_aprox.html)
- [66] Cieśliński J., Krygier K., Smoleń S.: *Measurement of temperature dependent viscosity and thermal conductivity of alumina and titania thermal oil nanofluids*, Proceedings of the XVth International Conference : Heat Transfer and Renewable Sources of Energy HTRSE-2014/ ed. A.A. Stachel, D. Mikielewicz Szczecin: Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, 2014, s.145-152.
- [67] Cieśliński J., Krygier K., Smoleń S.: *Wpływ koncentracji nanocząstek na własności termofizyczne nanocieczy woda- Al_2O_3 i woda- TiO_2* , Termodynamika i wymiana ciepła w badaniach procesów cieplno-przepływowych/ ed. Robert Smusz Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2014, s.87-108, XXII Zjazd Termodynamików, 23-27 września, 2014, Polańczyk.
- [68] Cieśliński J., Krygier K., Smoleń S.: *Influence of concentration of nanoparticles on thermal properties of thermal oil-MWCNT nanofluid*, XI Workshop „Modelling of Multiphase Flows in Thermo-Chemical Systems”, 18-20.06.2015, Gdańsk-Jantar.
- [69] Cieśliński J., Krygier K.: *Sessile droplet contact angle of water- Al_2O_3 , water- TiO_2 and water-Cu nanofluids*, EXPERIMENTAL THERMAL AND FLUID SCIENCE. - Vol. 59., 2014, s.258-263.
- [70] Cieśliński J.T., Krygier K.: *Wettability of horizontal stainless steel tube by nanofluid droplets*, Key Engineering Materials, 12, 2013; 597:21-27.
- [71] Cieśliński J.T., Krygier K.: *Influence of surface curvature on sessile droplet contact angle of nanofluids*, Transactions of the IFFM, No. 125, 3-12, 2013, ISSN 0079-3205.
- [72] Cieśliński J.T., Kaczmarczyk T., Krygier K.: *Przejmowanie ciepła przy wrzeniu nanocieczy w dużej objętości. Część 1. Metody wytwarzania i własności termofizyczne nanocieczy*, Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, 2012, nr 11, 494-499, ISSN 1231-188X.
- [73] Cieśliński J.T., Krygier K.: *Influence of surface curvature on sessile droplet contact angle of nanofluids*, X Workshop & Summer School Experimental Methods for Multiphase Flows, June 20th – 22th, 2013, Gdansk – Wieżyca

- [74] Cieśliński J.T., Krygier K.: *Measurements of droplet contact angle of nanofluids*, Heat Transfer and Renewable Sources of Energy: Proceedings of the XIVth International Symposium, eds. A.A. Stachel, D. Mikielwicz. - Szczecin : Wyd. Uczelniane ZUT, 2012, ISBN 978-83-7663-121-9.
- [75] Krygier K.: *Kąt zwilżania nanocieczy*, Współczesne Technologie i Konwersja Energii, Praca zbiorowa pod redakcją J. Szantyra, 229-234, Gdańsk, 2012, ISBN 978-83-88579-13-4.
- [76] Krygier K.: *Badania kąta zwilżania nanocieczy*, Współczesne Technologie i Konwersja Energii, Praca zbiorowa pod redakcją J. Szantyra, 51-58, Tom II – Gdańsk, 2013, ISBN 978-83-88579-28-8.
- [77] Cieśliński J.T., Krygier K.: *Sessile droplet contact angle of water- Al_2O_3 , water- TiO_2 and water-Cu nanofluids*, 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, June 16-20, 2013, Lisbon, Portugal.
- [78] Cieśliński J.T., Krygier K.: *Wettability of horizontal stainless steel tube by nanofluid droplets*, XXI International Symposium, Research-Education-Technology, May 23th – 24th, 2013, Gdansk
- [79] Cooper M.G.: *Heat Flow in Saturated Nucleate pool Boiling – A Wide-Ranging Examination Using Reduced Properties*, Advances in Heat transfer, vol. 16, 1984, 157-239.
- [80] Cieśliński J. T. : *Studium wrzenia pęcherzykowego na metalicznych powierzchniach porowatych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej 1996, nr 547, Mechanika 76.
- [81] Cieśliński J., Krygier K.: *Augmentation of the critical heat flux in water- Al_2O_3 , water- TiO_2 and water-Cu nanofluids*, EURO THERM SEMINAR 101, „TRANSPORT PHENOMENA IN MULTIPHASE SYSTEMS” Krakow, Poland, 30 June -3 July, 2014. Kraków, s.1-9.
- [82] Kim H.D., Kim M.H.: *Effect of nanoparticle deposition on capillary wicking that influences the critical heat flux in nanofluids*, Applied Physics Letters, 2007, 91:014104.
- [83] Park S.D., Bang I. Ch.: *Experimental study of a universal CHF enhancement mechanism in nanofluids using hydrodynamic instability*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014.

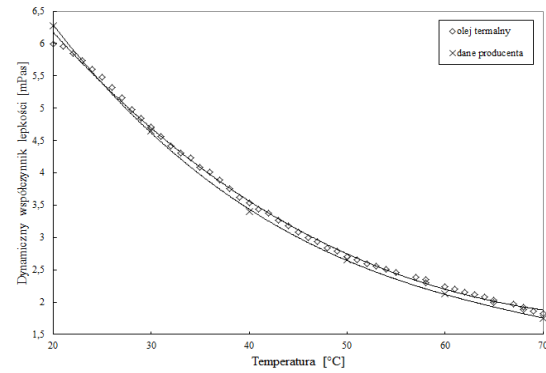
[84] Sefiane K.: *On the role of structural disjoining pressure and contact line pinning in critical heat flux enhancement during boiling of nanofluids*, Applied Physics Letters, 2006, 89(4).

[85] Wen D.: *Mechanisms of thermal nanofluids on enhanced critical heat flux (CHF)*, Int. J. Heat Mass Transfer, 2008.

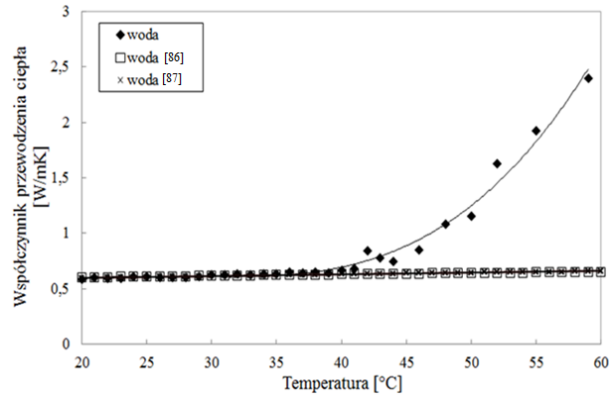
Załącznik 1. Wyniki badań własności termofizycznych nanocieczy oraz badań pierwszego kryzysu wrzenia nanocieczy



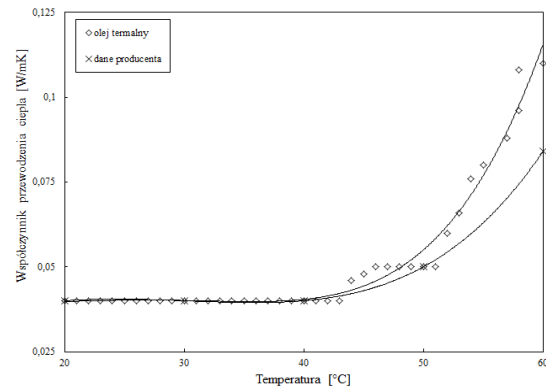
Rys. 1. Dynamyczny współczynnik lepkości wody destylowanej



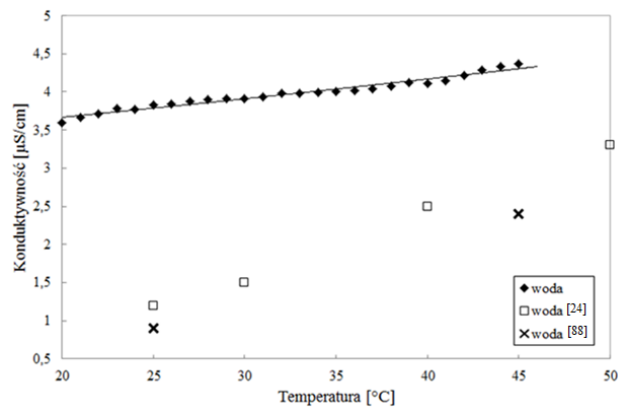
Rys. 2. Dynamyczny współczynnik lepkości oleju termalnego



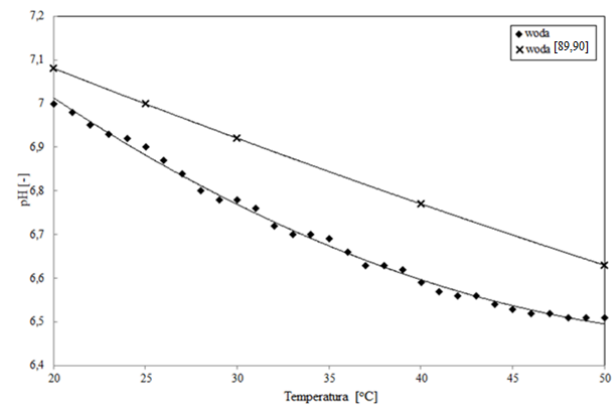
Rys. 3. Współczynnika przewodzenia ciepła wody destylowanej



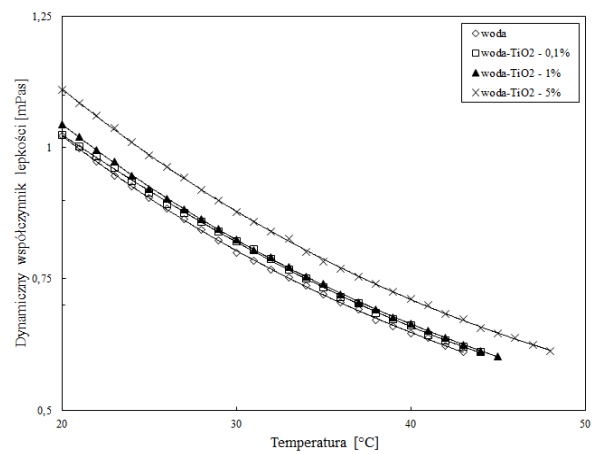
Rys. 4. Współczynnika przewodzenia ciepła oleju termalnego



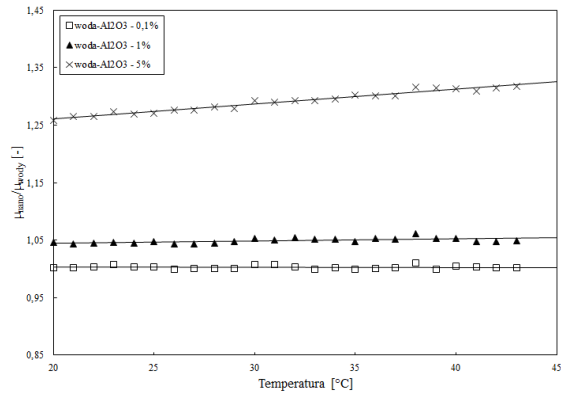
Rys. 5. Konduktywności wody destylowanej



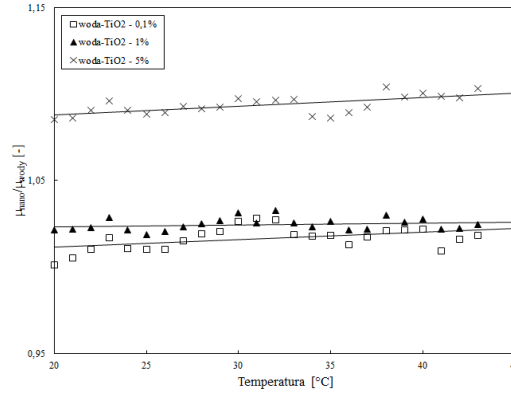
Rys. 6. pH wody destylowanej



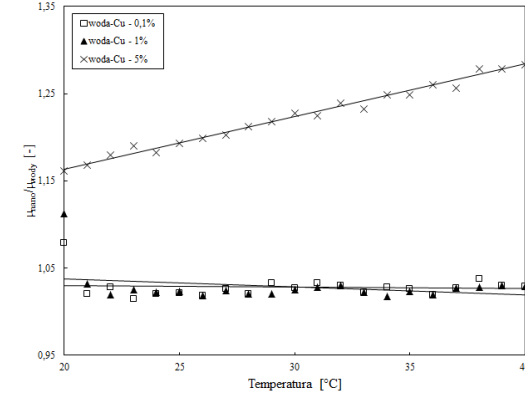
Rys. 7. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda-TiO₂



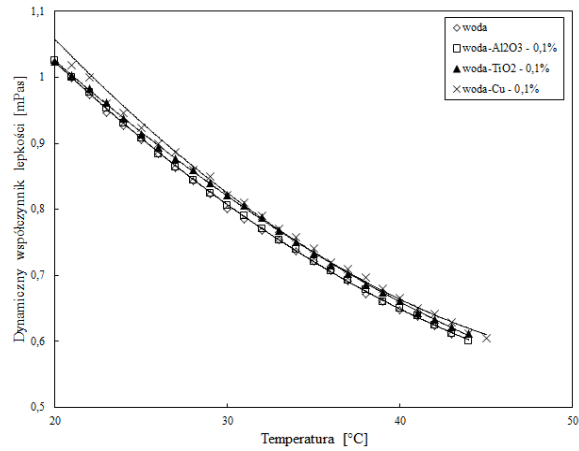
Rys. 8. Względny dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda- Al_2O_3



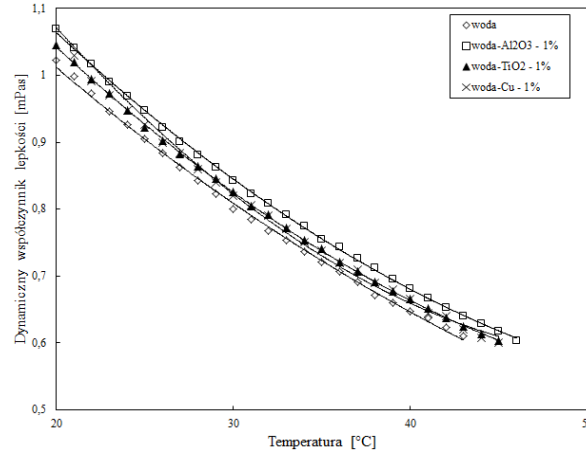
Rys. 9. Względny dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda- TiO_2



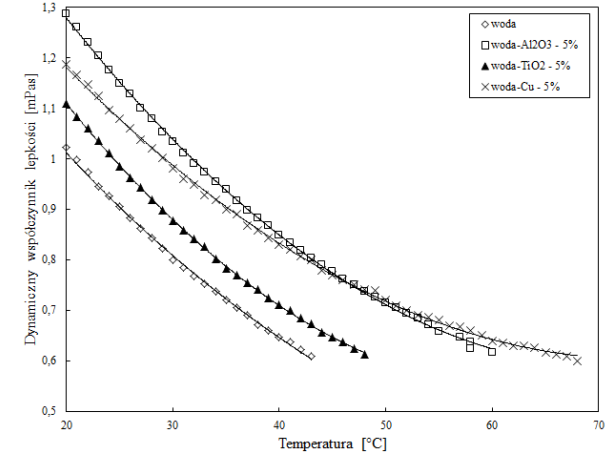
Rys. 10. Względny dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda- Cu



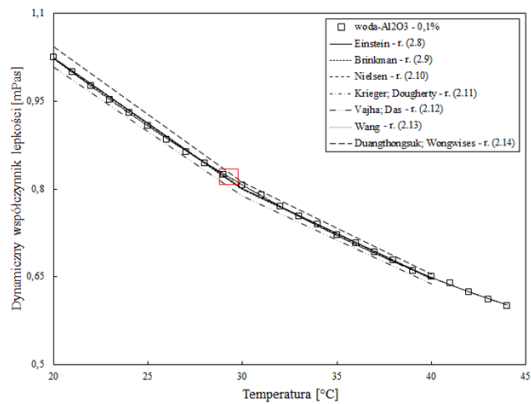
Rys. 11. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda- Al_2O_3 , nanocieczy woda- TiO_2 oraz woda- Cu



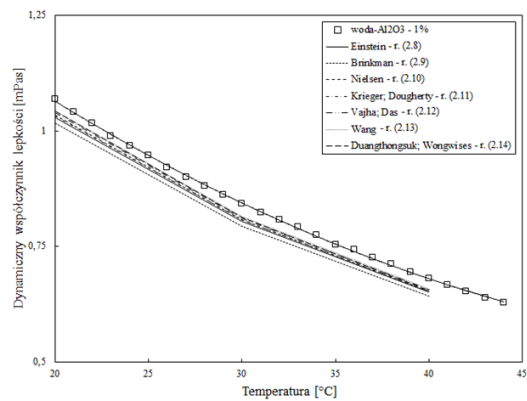
Rys. 12. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda- Al_2O_3 , nanocieczy woda- TiO_2 oraz woda- Cu



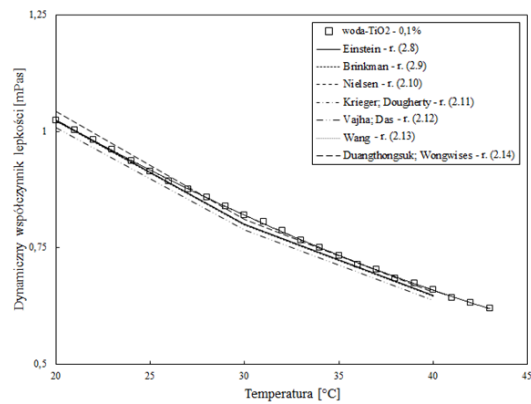
Rys. 13. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda- Al_2O_3 , nanocieczy woda- TiO_2 oraz woda- Cu



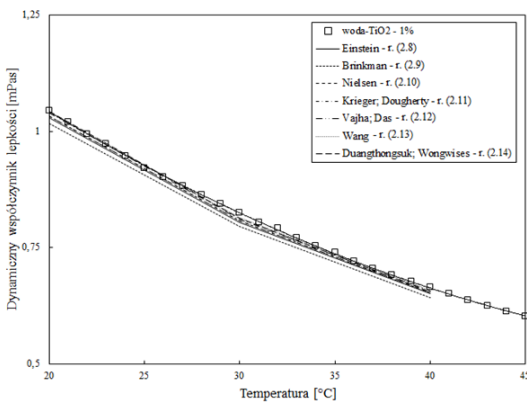
Rys. 14. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda- Al_2O_3



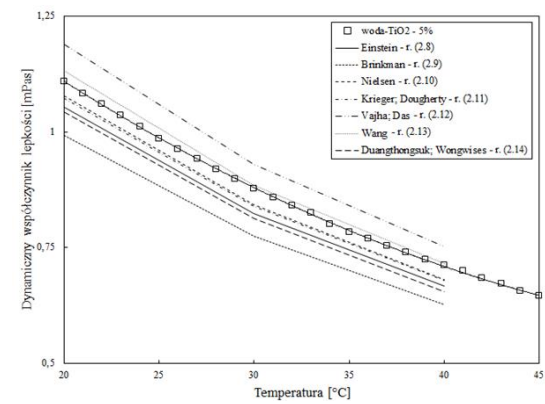
Rys. 15. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda- Al_2O_3



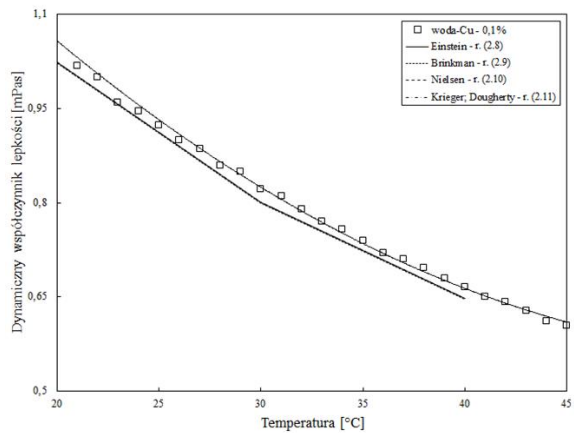
Rys. 16. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda- TiO_2



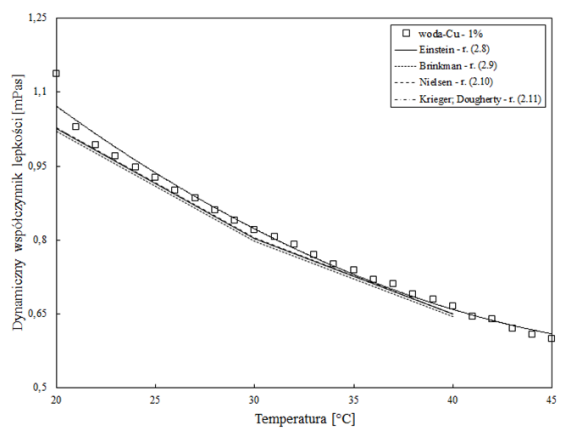
Rys. 17. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda- TiO_2



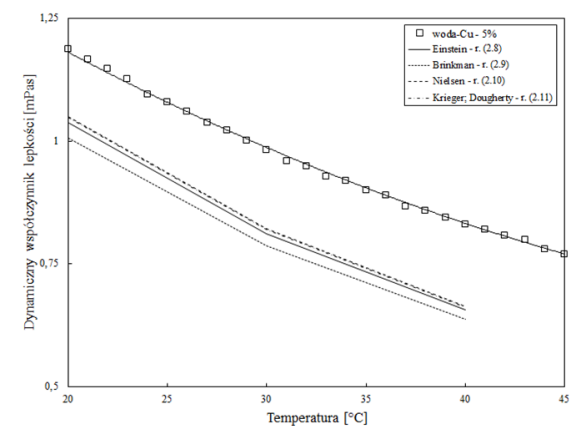
Rys. 18. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda- TiO_2



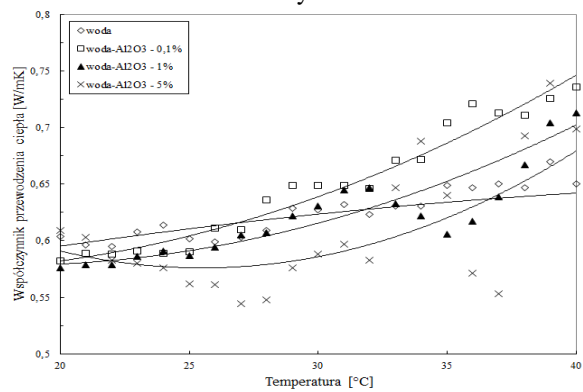
Rys. 19. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda-Cu



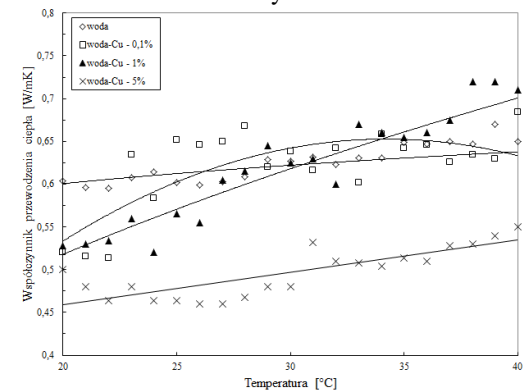
Rys. 20. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda-Cu



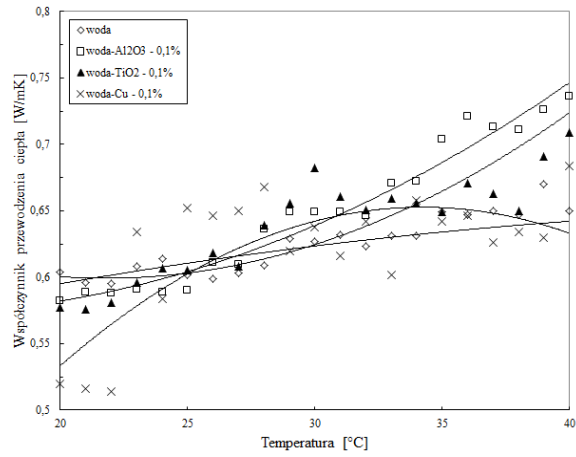
Rys. 21. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy woda-Cu



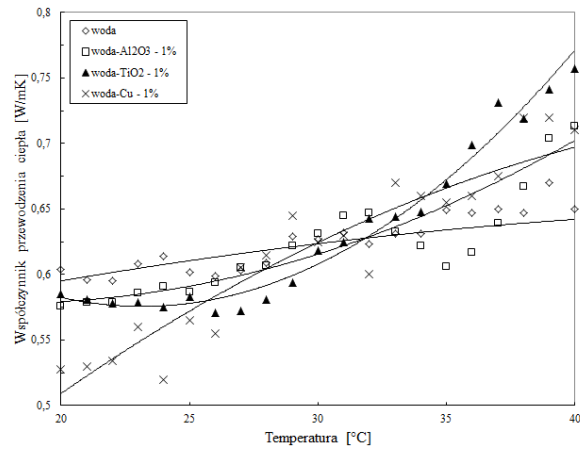
Rys. 22. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃



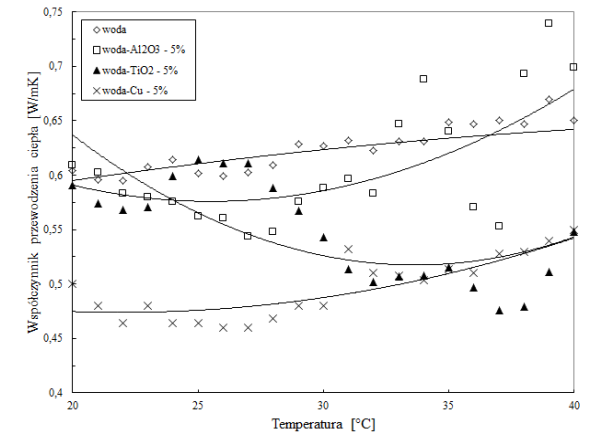
Rys. 23. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda-Cu



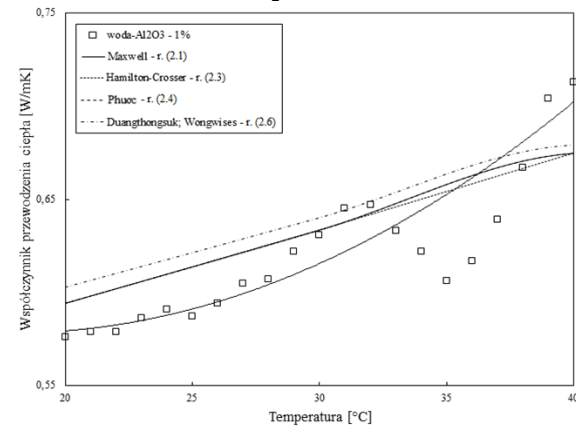
Rys. 24. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 , nanocieczy woda- TiO_2 oraz woda-Cu



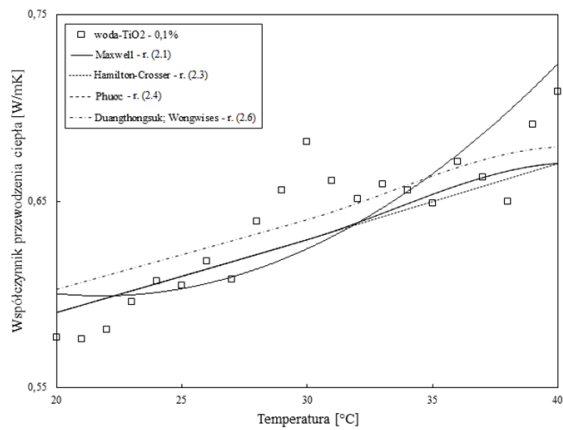
Rys. 25. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 , nanocieczy woda- TiO_2 oraz woda-Cu



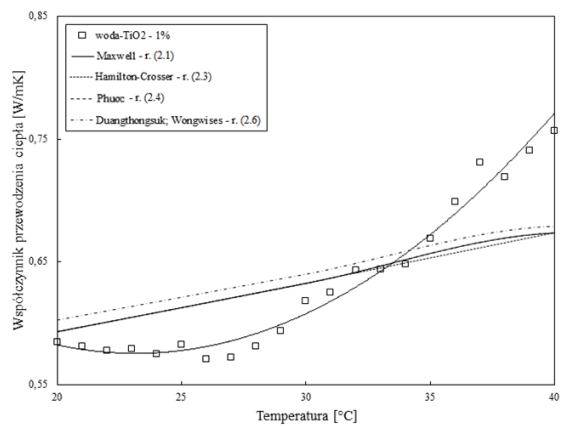
Rys. 26. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 , nanocieczy woda- TiO_2 oraz woda-Cu



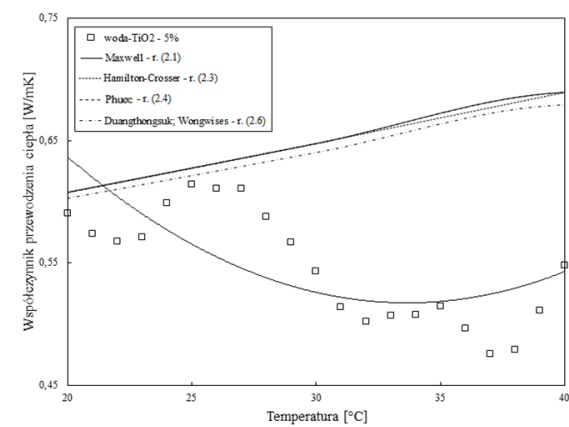
Rys. 27. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3



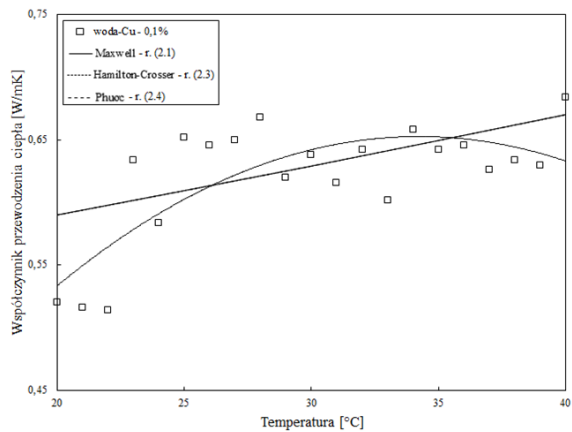
Rys. 28. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda-TiO₂



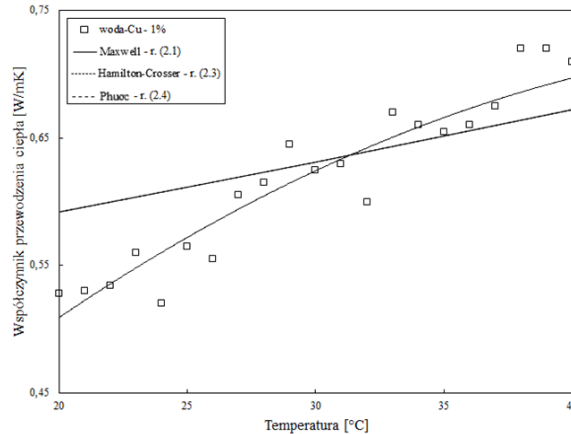
Rys. 29. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda-TiO₂



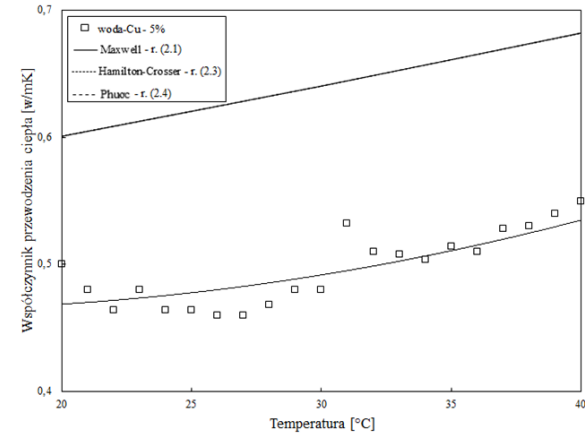
Rys. 30. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda-TiO₂



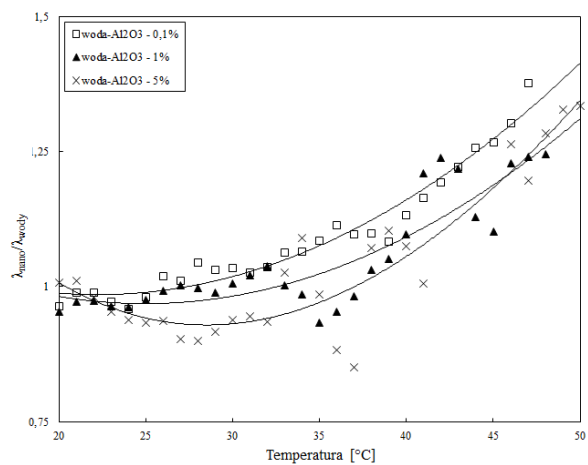
Rys. 31. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda-Cu



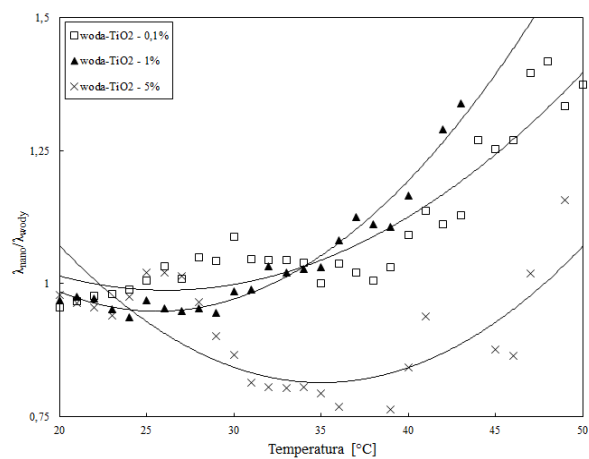
Rys. 32. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda-Cu



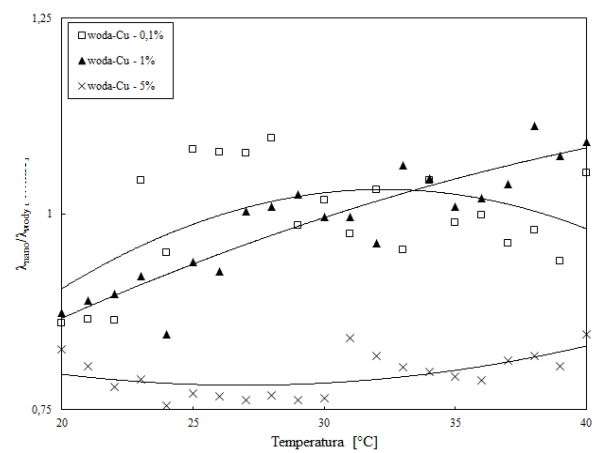
Rys. 33. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy woda-Cu



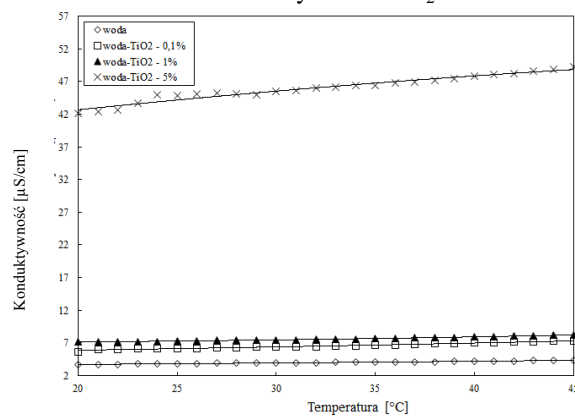
Rys. 34. Względny współczynnik przewodzenia ciepła nanociecicy woda- Al_2O_3



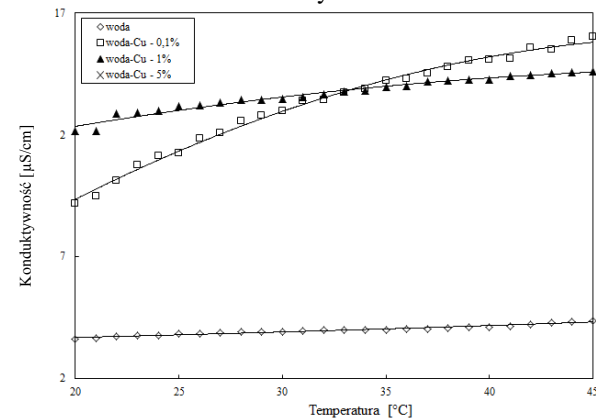
Rys. 35. Względny współczynnik przewodzenia ciepła nanociecicy woda- TiO_2



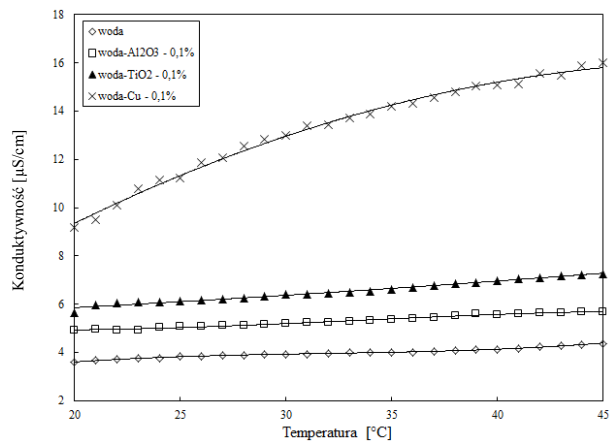
Rys. 37. Względny współczynnik przewodzenia ciepła nanociecicy woda-Cu



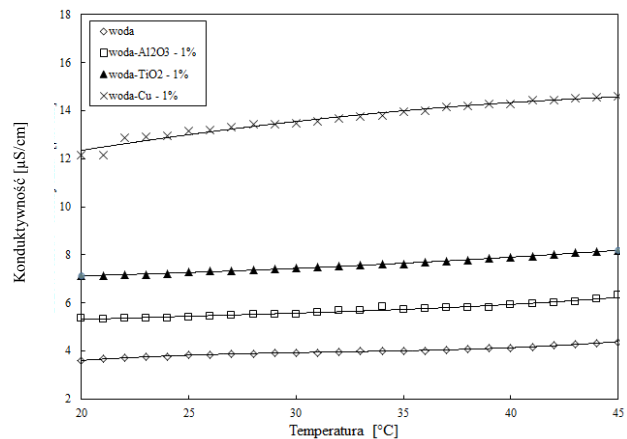
Rys. 38. Konduktywność nanociecicy woda- TiO_2



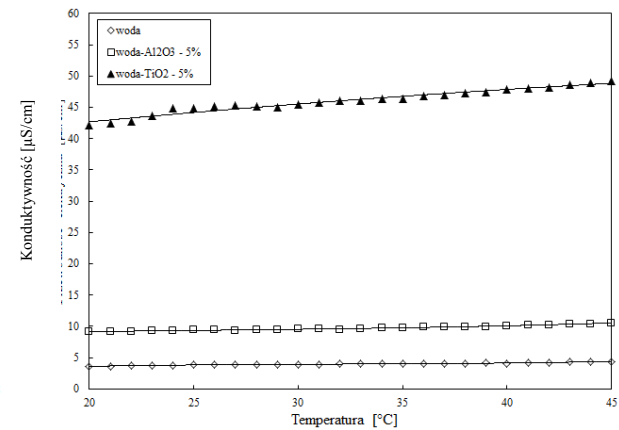
Rys. 39. Konduktywność nanociecicy woda-Cu



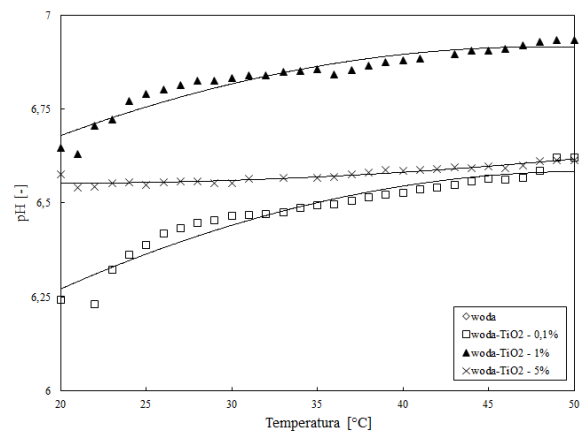
Rys. 40. Konduktywność nanocieczy woda-Al₂O₃, nanocieczy woda-TiO₂ oraz woda-Cu



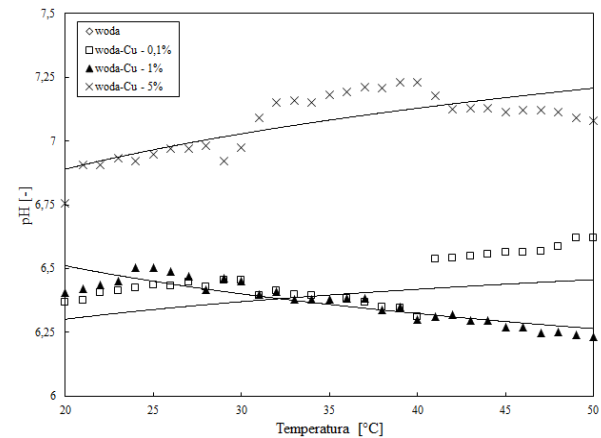
Rys. 41. Konduktywność nanocieczy woda-Al₂O₃, nanocieczy woda-TiO₂ oraz woda-Cu



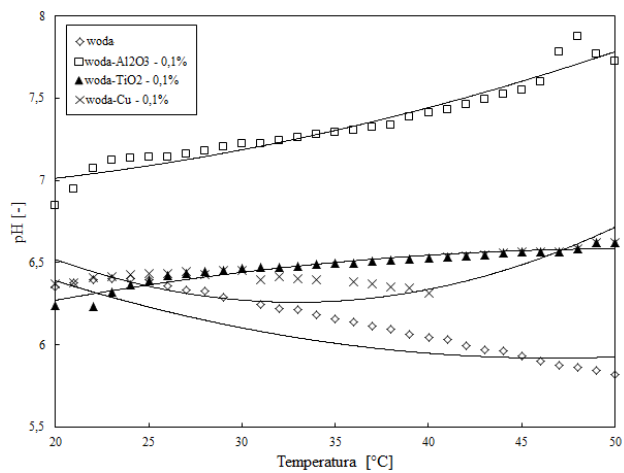
Rys. 42. Konduktywność nanocieczy woda-Al₂O₃, nanocieczy woda-TiO₂ oraz woda-Cu



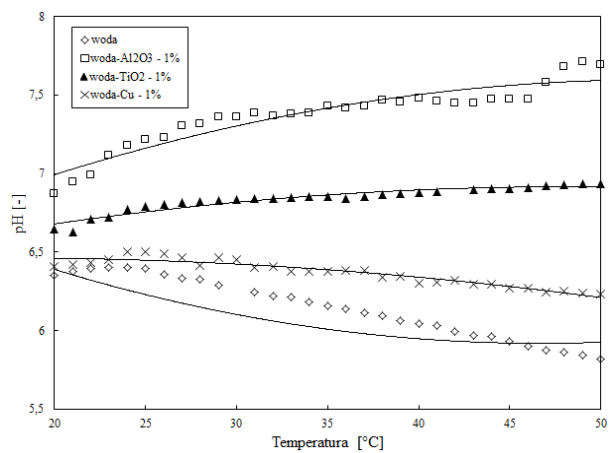
Rys. 43. pH nanocieczy woda-TiO₂



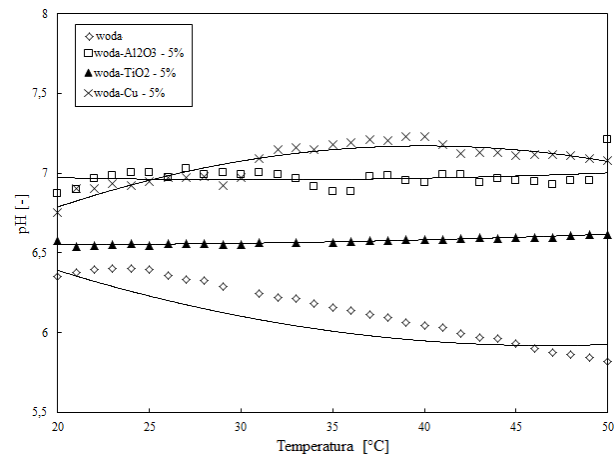
Rys. 44. pH nanocieczy woda-Cu



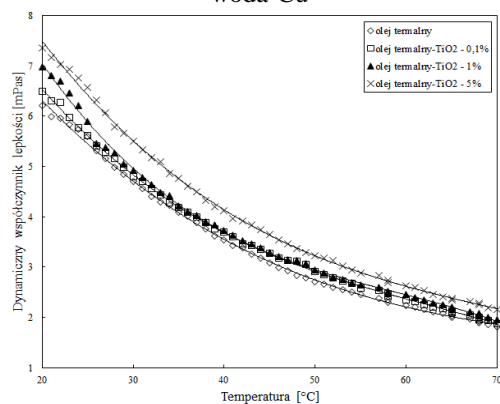
Rys. 45. pH nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu



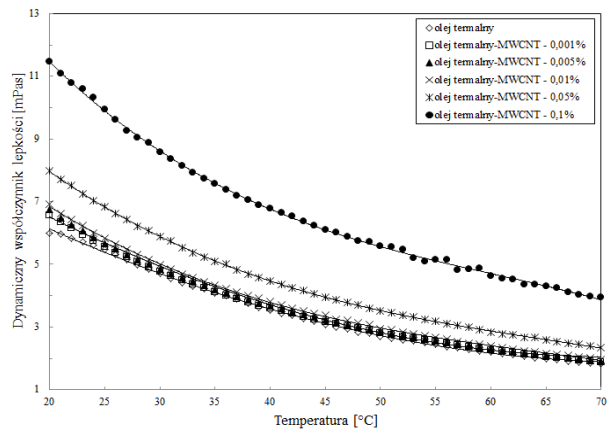
Rys. 46. pH nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu



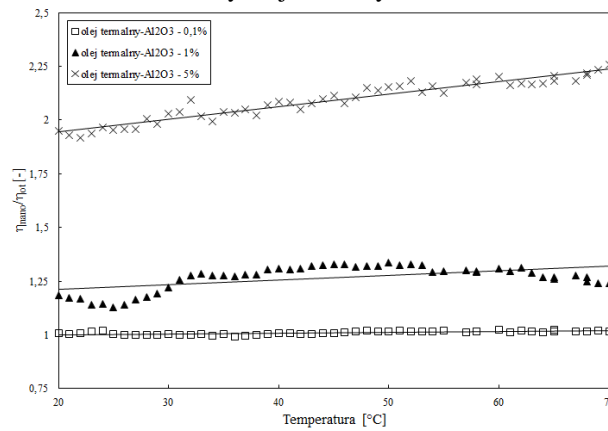
Rys. 47. pH nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu



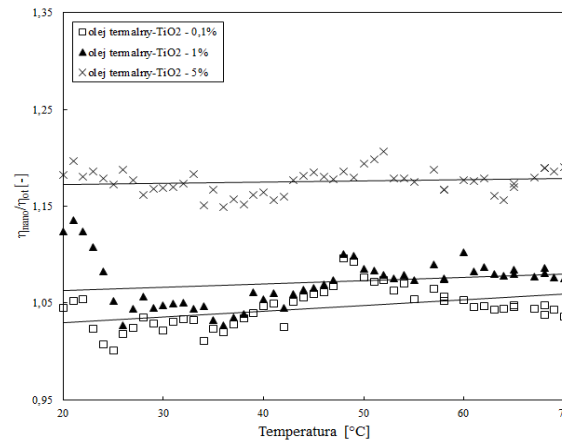
Rys. 48. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny-TiO₂



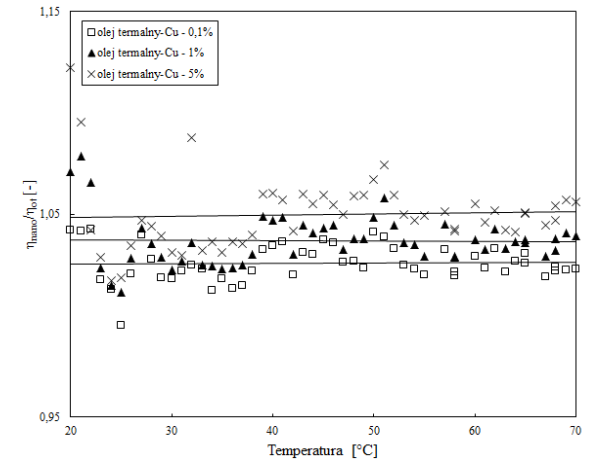
Rys. 49. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny-MWCNT



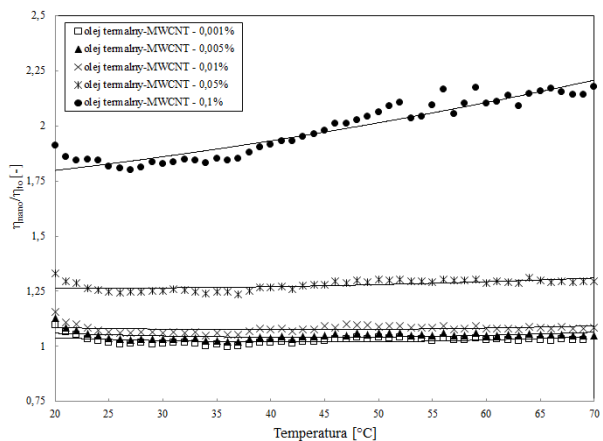
Rys. 50. Względny dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny- Al_2O_3



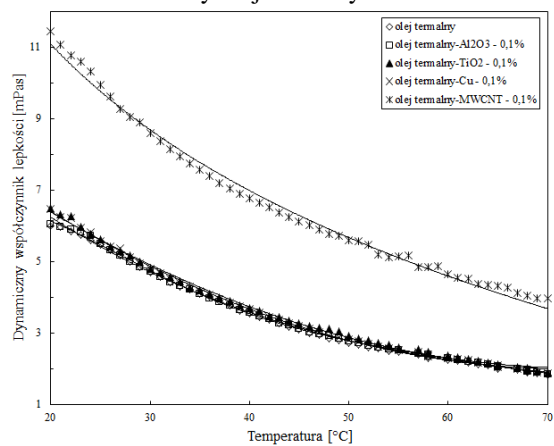
Rys. 51. Względny dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny- TiO_2



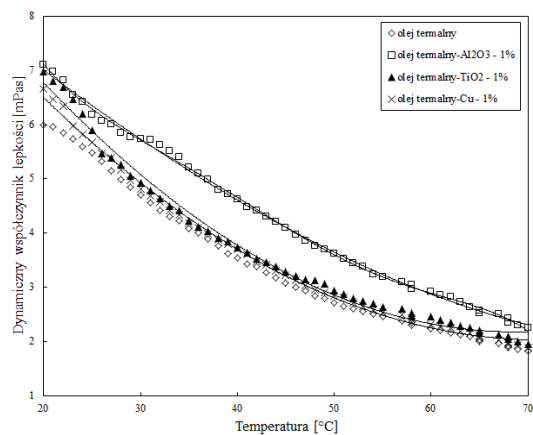
Rys. 52. Względny dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny-Cu



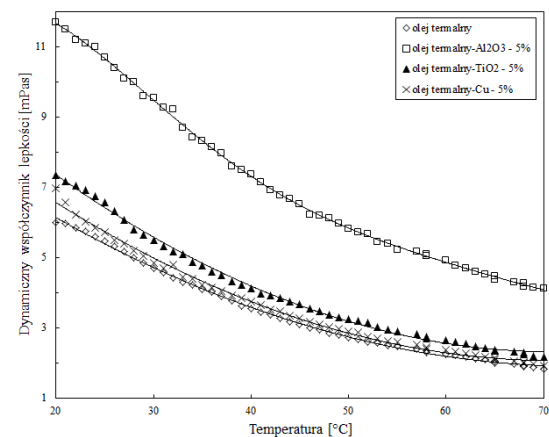
Rys. 53. Względny dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny-MWCNT



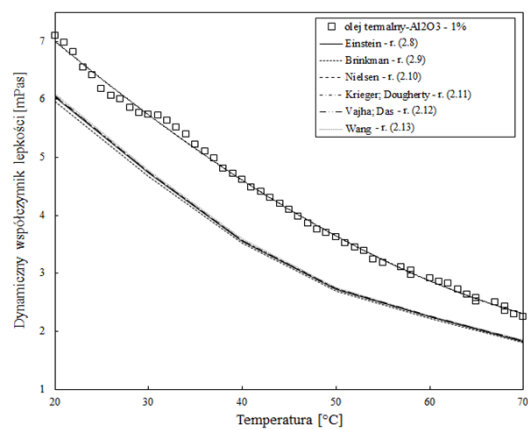
Rys. 54. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny- Al_2O_3 , olej termalny- TiO_2 , olej termalny-Cu oraz olej termalny-MWCNT



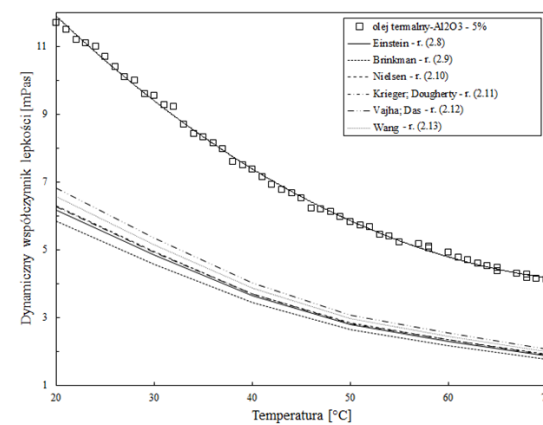
Rys. 55. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny- Al_2O_3 , olej termalny- TiO_2 oraz olej termalny-Cu



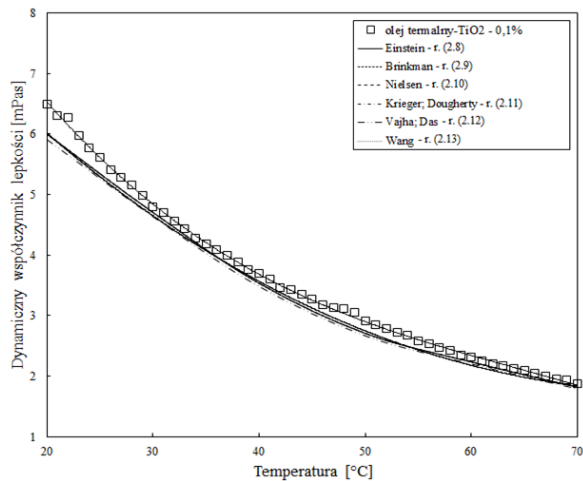
Rys. 56. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny- Al_2O_3 , olej termalny- TiO_2 oraz olej termalny-Cu



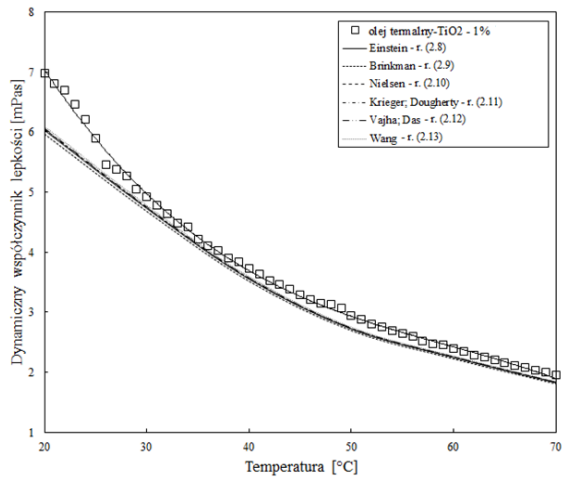
Rys. 57. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny- Al_2O_3



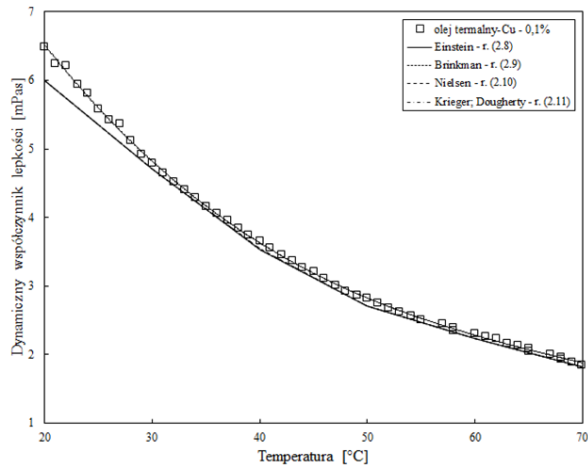
Rys. 58. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny- Al_2O_3



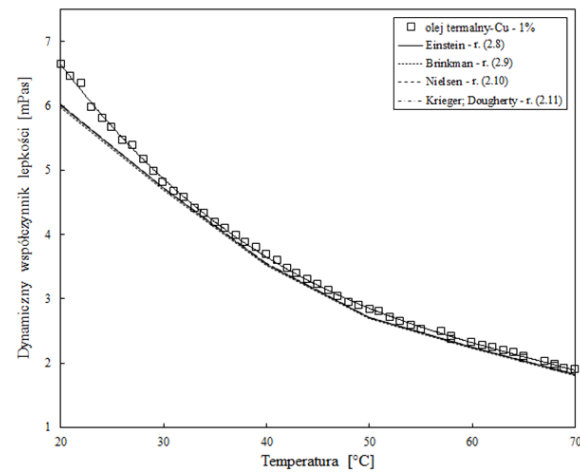
Rys. 59. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny- TiO_2



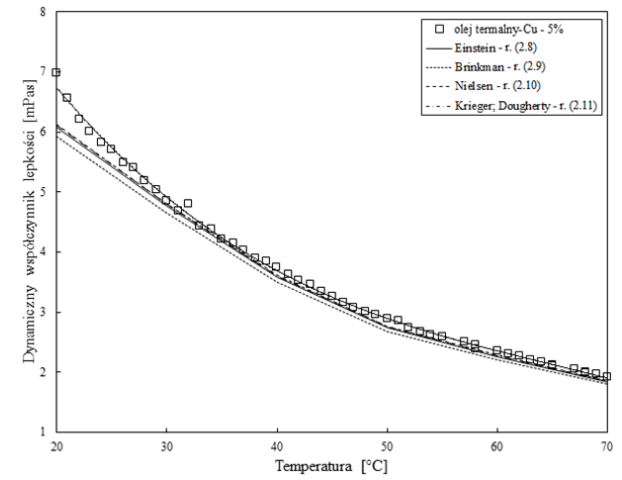
Rys. 60. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny- TiO_2



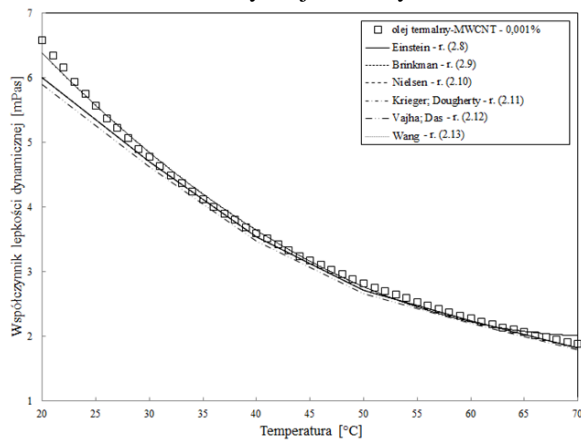
Rys. 61. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny-Cu



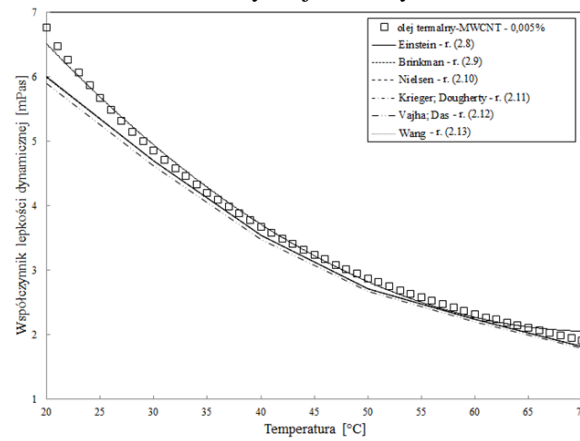
Rys. 62. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny-Cu



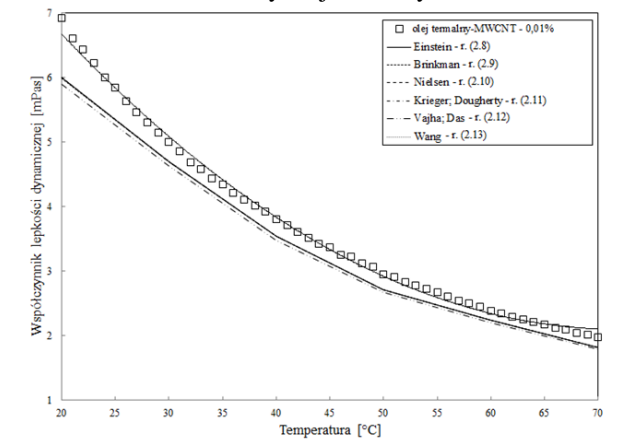
Rys. 63. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny-Cu



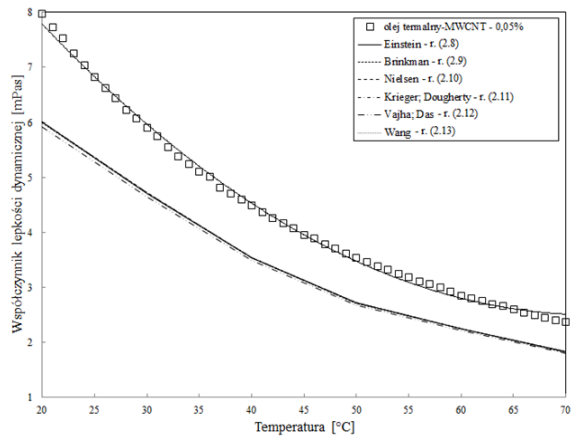
Rys. 64. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny-MWCNT



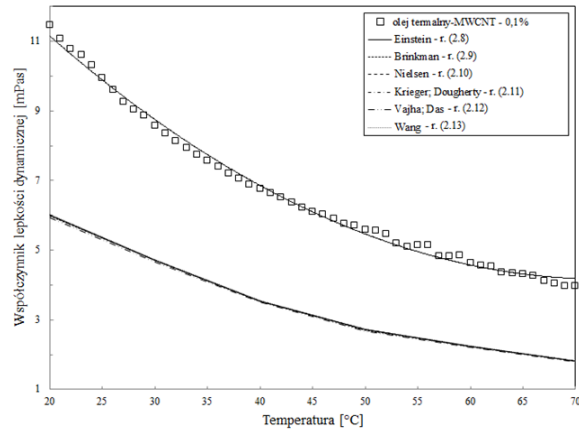
Rys. 65. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny-MWCNT



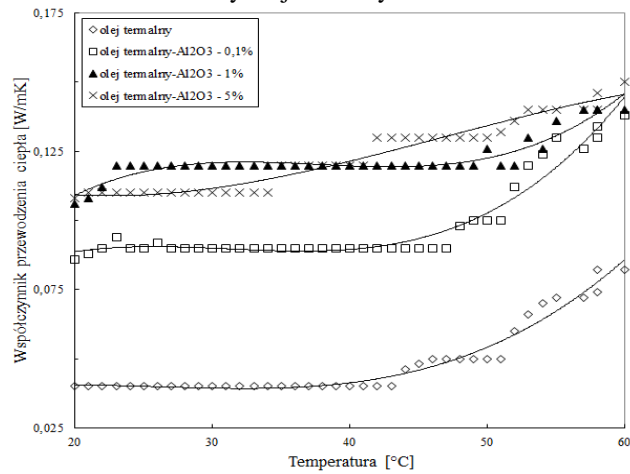
Rys. 66. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny-MWCNT



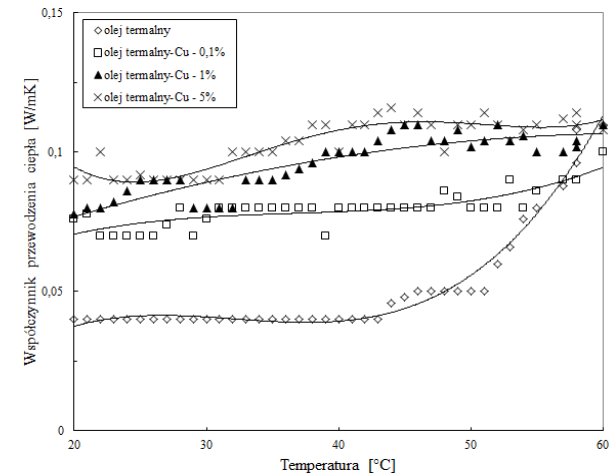
Rys. 67. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny-MWCNT



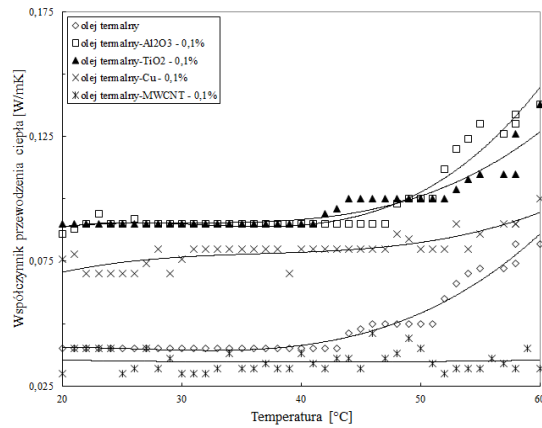
Rys. 68. Dynamiczny współczynnik lepkości nanocieczy olej termalny-MWCNT



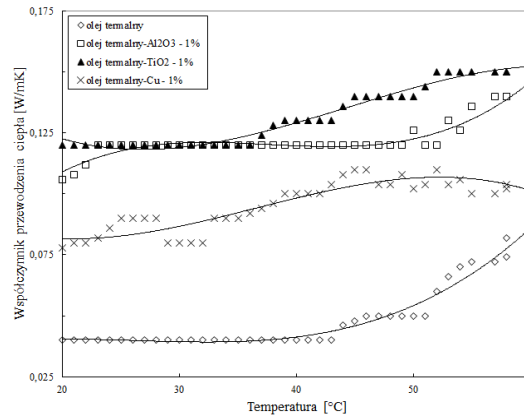
Rys. 69. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-Al₂O₃



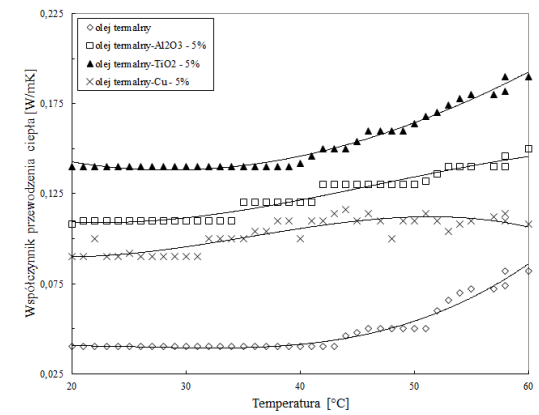
Rys. 70. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-Cu



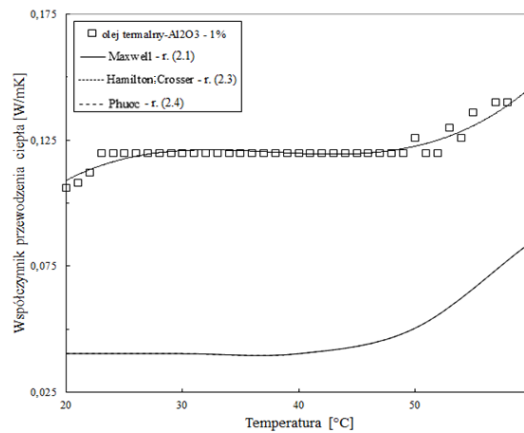
Rys. 71. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-Al₂O₃, olej termalny-TiO₂, olej termalny-Cu oraz olej termalny-MWCNT



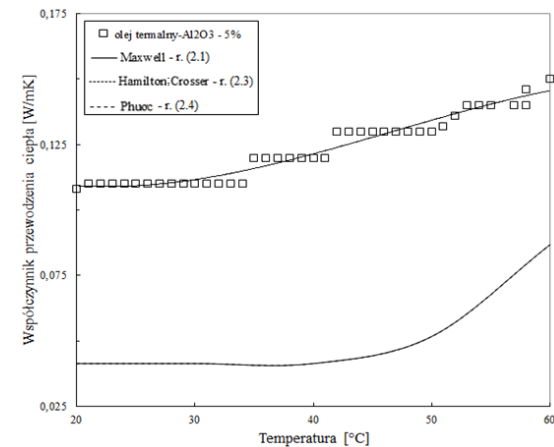
Rys. 72. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-Al₂O₃, olej termalny-TiO₂ oraz olej termalny-Cu



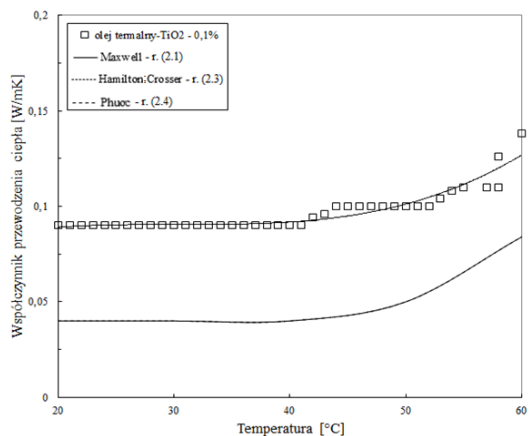
Rys. 73. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-Al₂O₃, olej termalny-TiO₂ oraz olej termalny-Cu



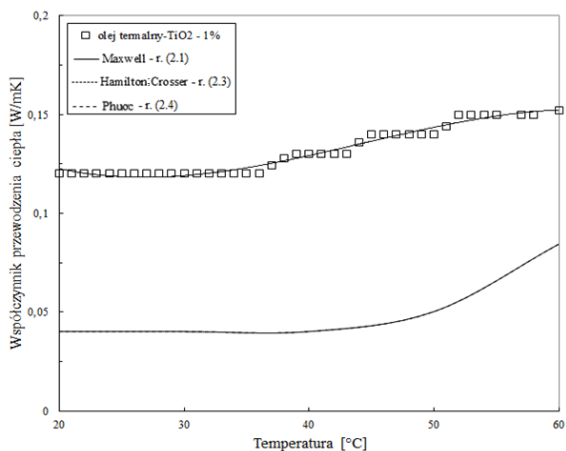
Rys. 74. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-Al₂O₃



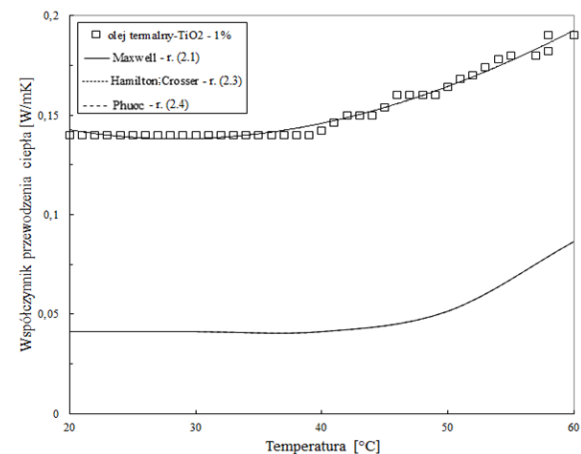
Rys. 75. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-Al₂O₃



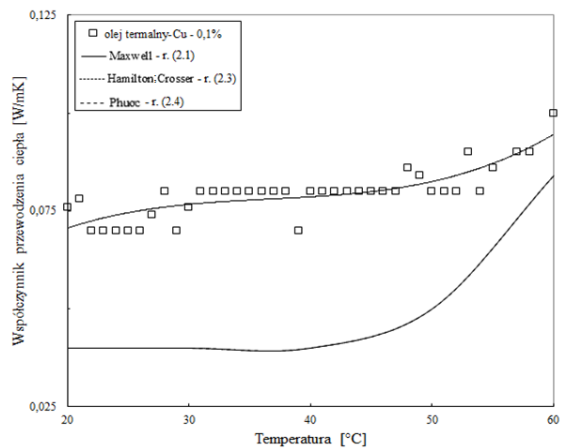
Rys. 76. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-TiO₂



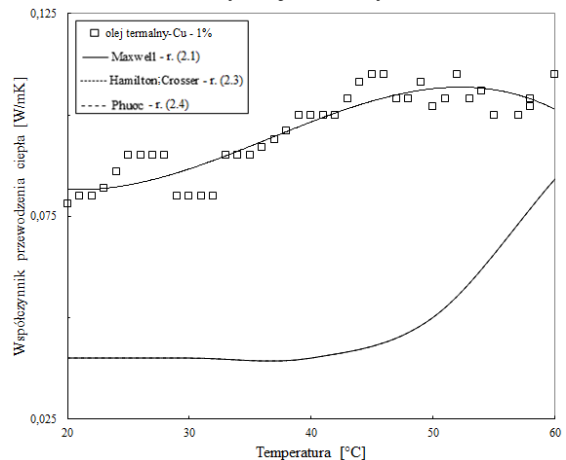
Rys. 77. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-TiO₂



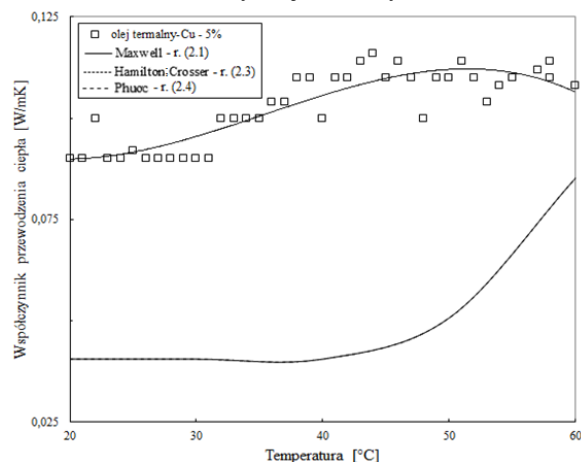
Rys. 78. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-TiO₂



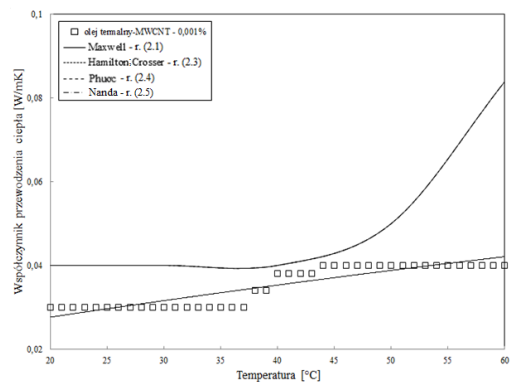
Rys. 79. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-Cu



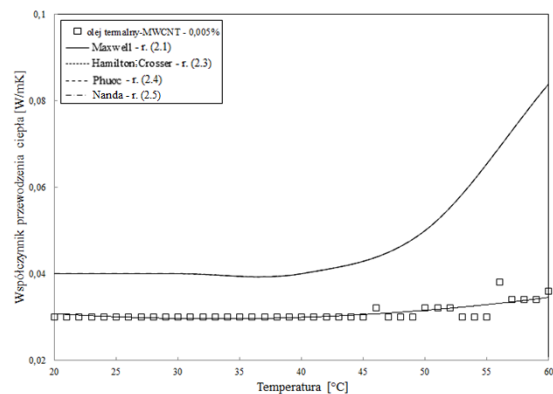
Rys. 80. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-Cu



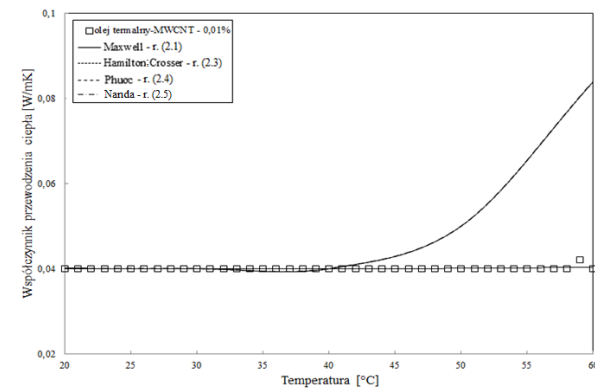
Rys. 81. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-Cu



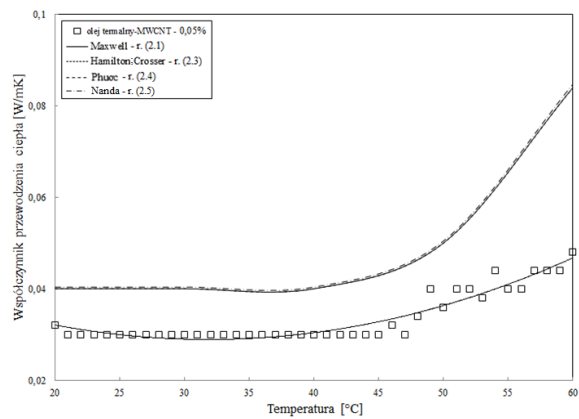
Rys. 82. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-MWCNT



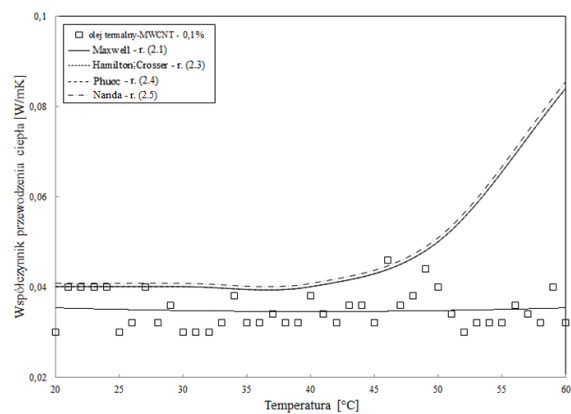
Rys. 83. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-MWCNT



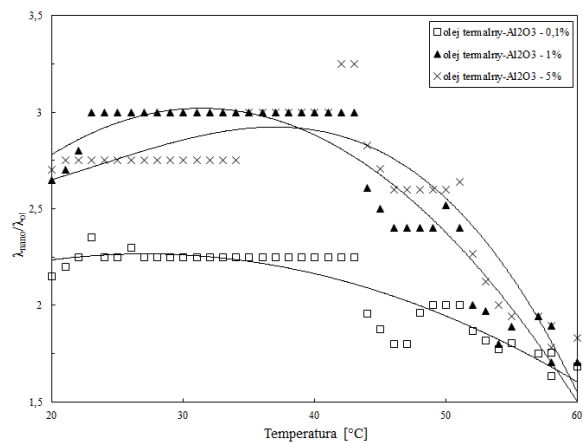
Rys. 84. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-MWCNT



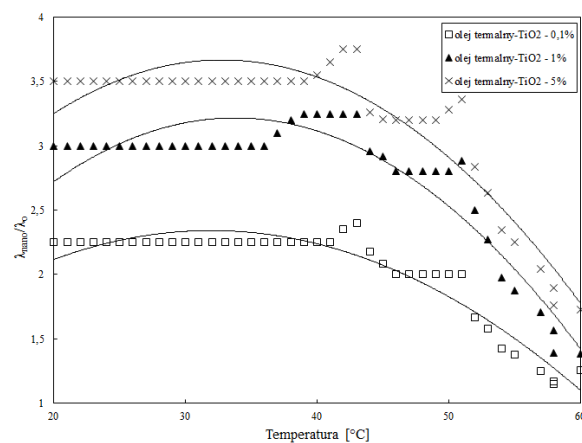
Rys. 85. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-MWCNT



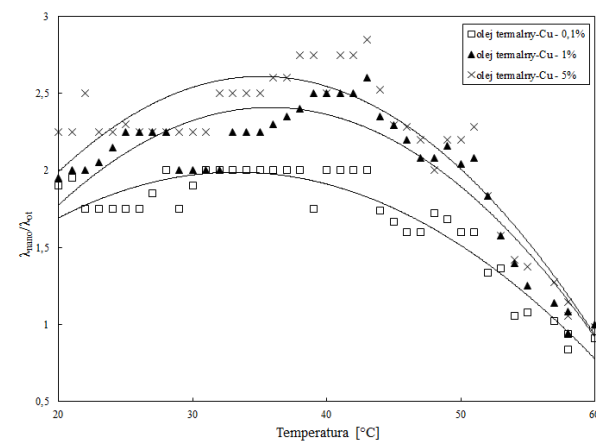
Rys. 86. Współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-MWCNT



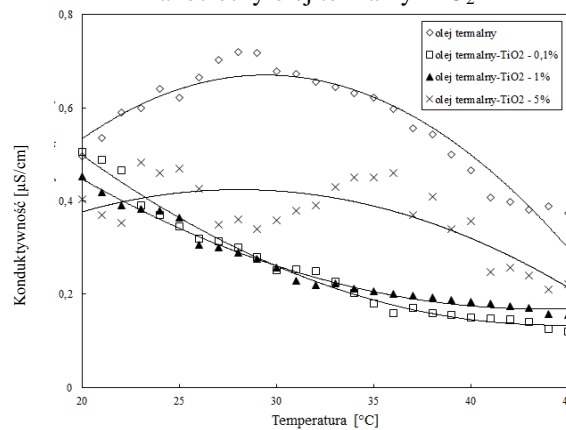
Rys. 87. Względny współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny- Al_2O_3



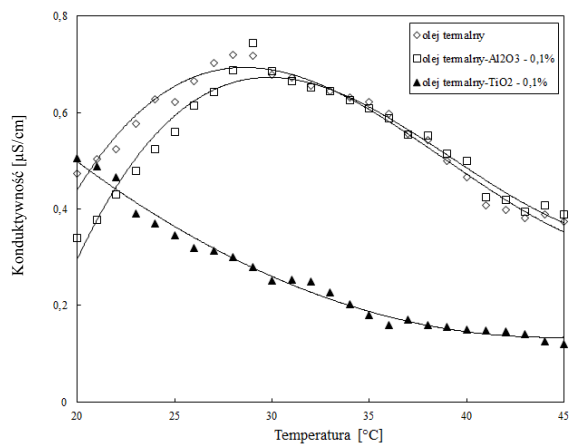
Rys. 88. Względny współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny- TiO_2



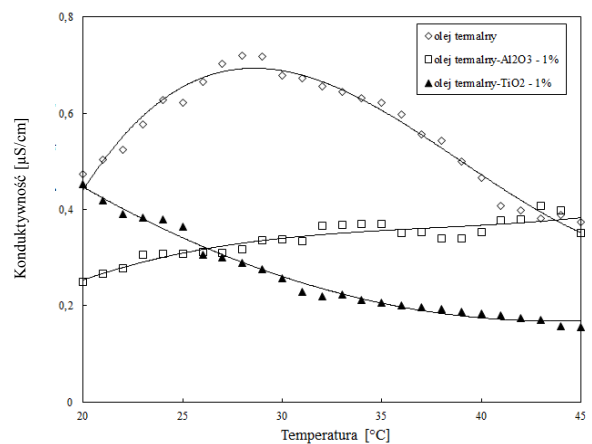
Rys. 89. Względny współczynnik przewodzenia ciepła nanocieczy olej termalny-Cu



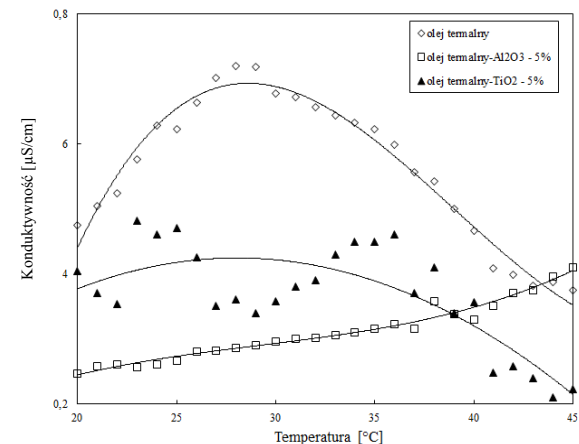
Rys. 90. Konduktywność nanocieczy olej termalny- TiO_2



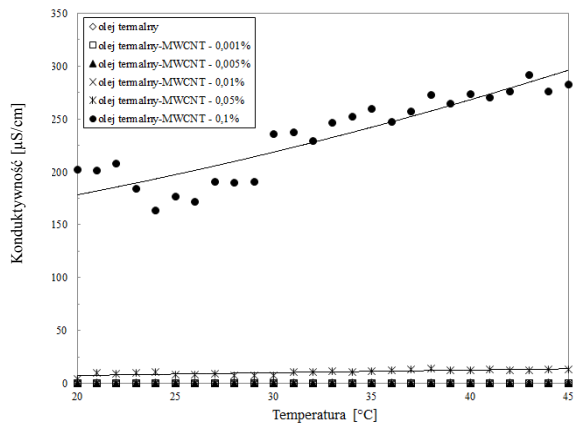
Rys. 91. Konduktywność nanocieczechy olej termalny- Al_2O_3 oraz olej termalny- TiO_2



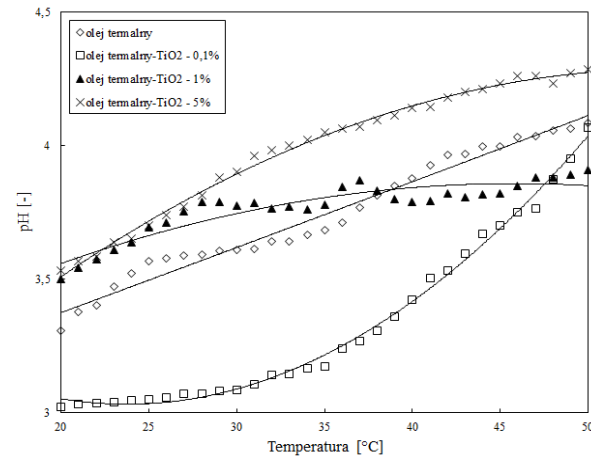
Rys. 92. Konduktywność nanocieczechy olej termalny- Al_2O_3 oraz olej termalny- TiO_2



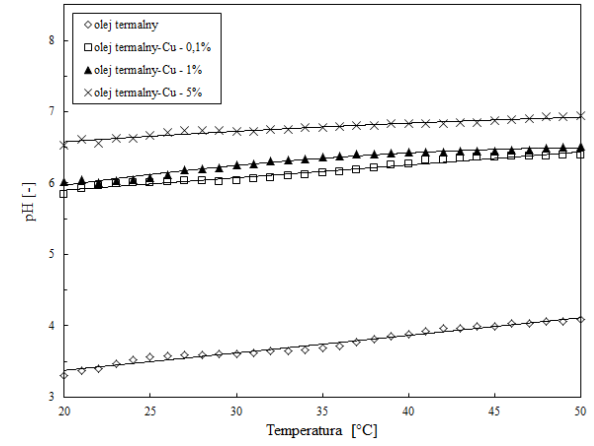
Rys. 93. Konduktywność nanocieczechy olej termalny- Al_2O_3 oraz olej termalny- TiO_2



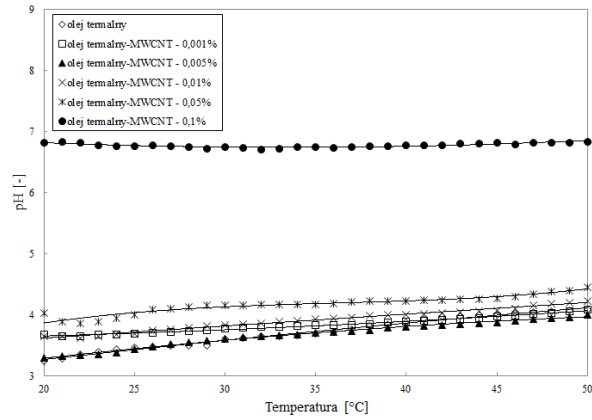
Rys. 94. Konduktywność nanocieczechy olej termalny-MWCNT



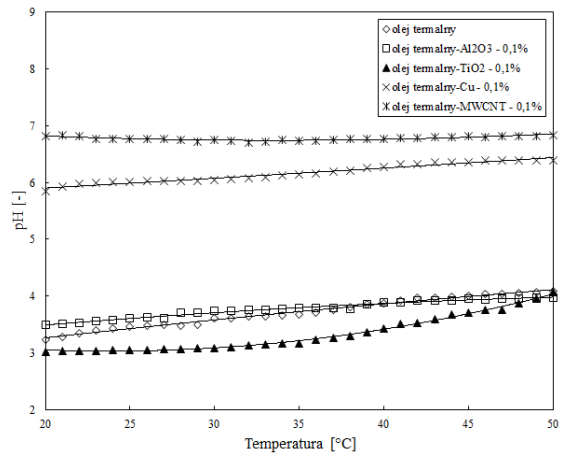
Rys. 95. pH nanocieczy olej termalny-TiO₂



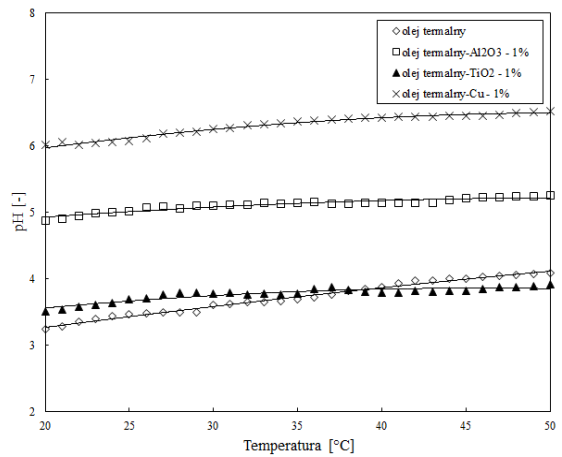
Rys. 96. pH nanocieczy olej termalny-Cu



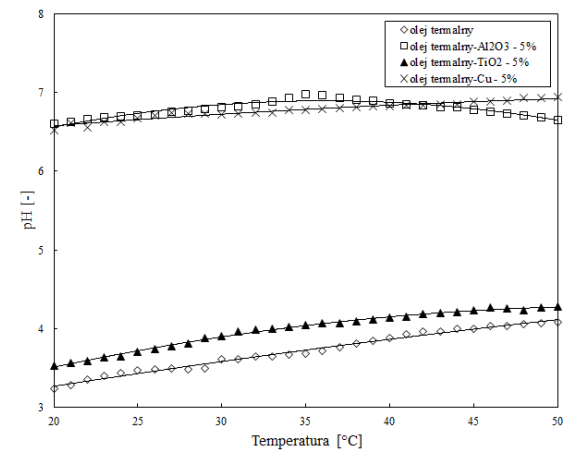
Rys. 97. pH nanocieczy olej termalny-MWCNT



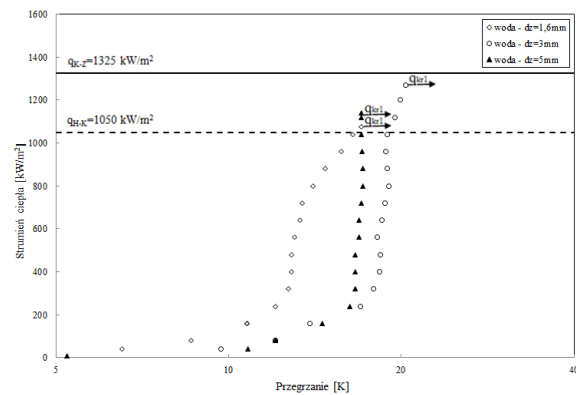
Rys. 98. pH nanocieczy olej termalny- Al_2O_3 , olej termalny- TiO_2 , olej termalny-Cu oraz olej termalny-MWCNT



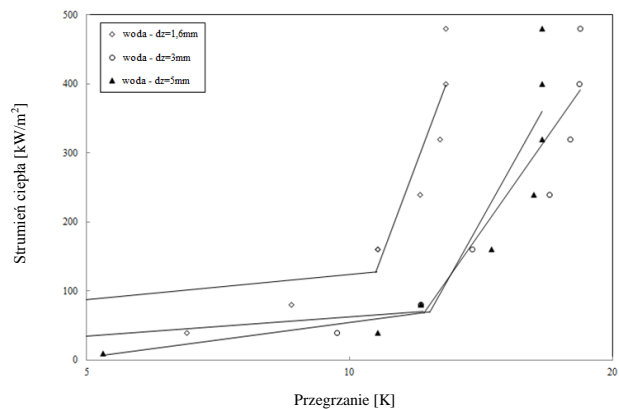
Rys. 99. pH nanocieczy olej termalny- Al_2O_3 , olej termalny- TiO_2 oraz olej termalny-Cu



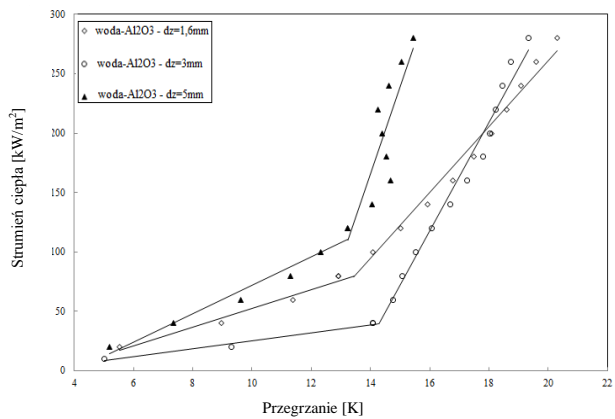
Rys. 100. pH nanocieczy olej termalny- Al_2O_3 , olej termalny- TiO_2 oraz olej termalny-Cu



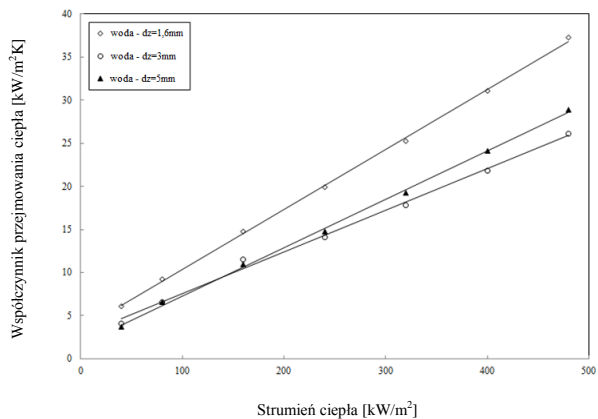
Rys. 101. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła podczas wrzenia wody na rurkach o średnicy 1,6 mm, 3 mm oraz 5 mm



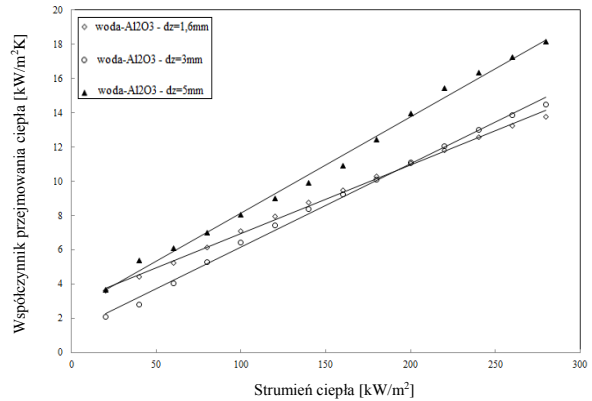
Rys. 102. Krzywe wrzenia wody



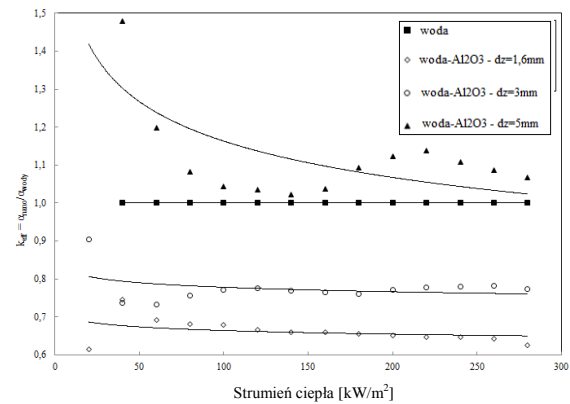
Rys. 104. Krzywe wrzenia nanocieczonego woda- Al_2O_3 o koncentracji nanocząstek 0,01%



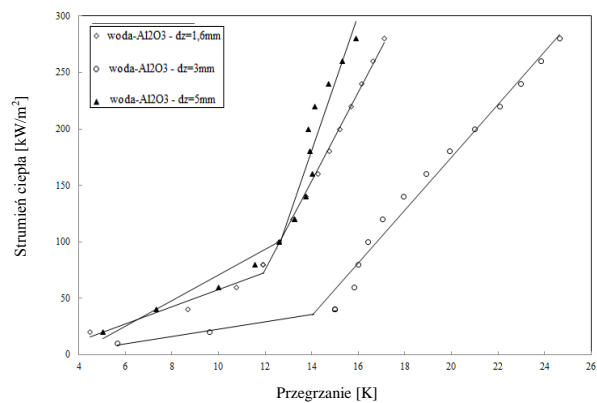
Rys. 103. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia wody



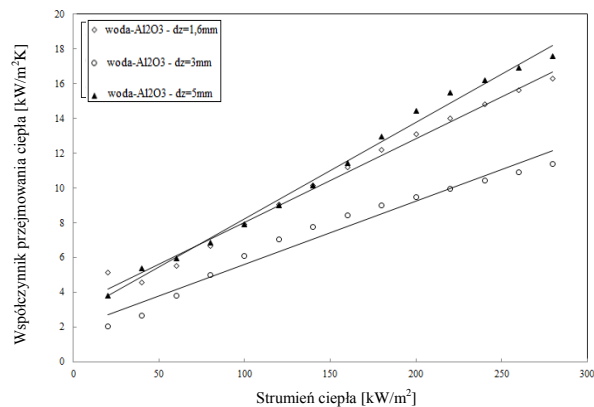
Rys. 105. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczonego woda- Al_2O_3 o koncentracji nanocząstek 0,01%



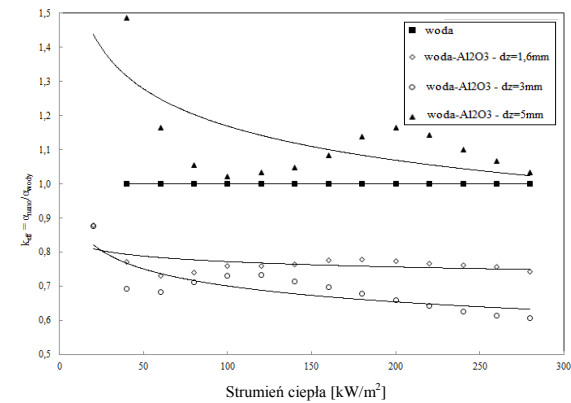
Rys. 106. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczonego woda- Al_2O_3 o koncentracji nanocząstek 0,01%



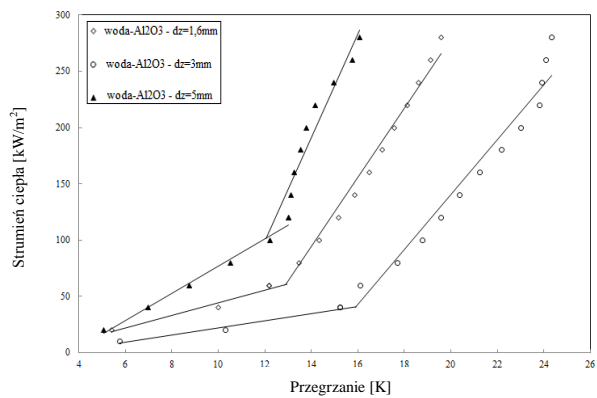
Rys. 107. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ o koncentracji nanocząstek 0,1%



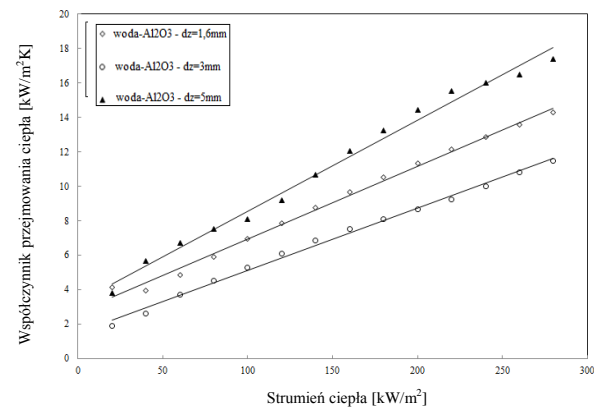
Rys. 108. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ o koncentracji nanocząstek 0,1%



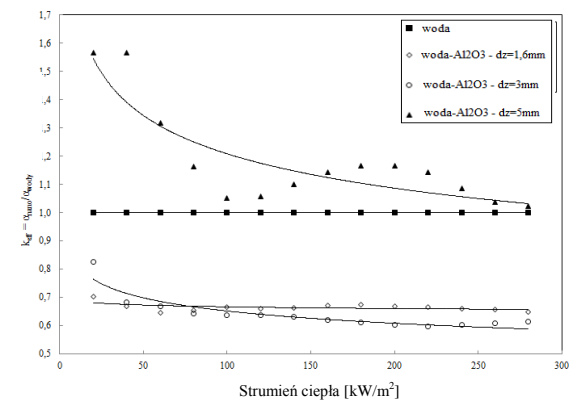
Rys. 109. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ o koncentracji nanocząstek 0,1%



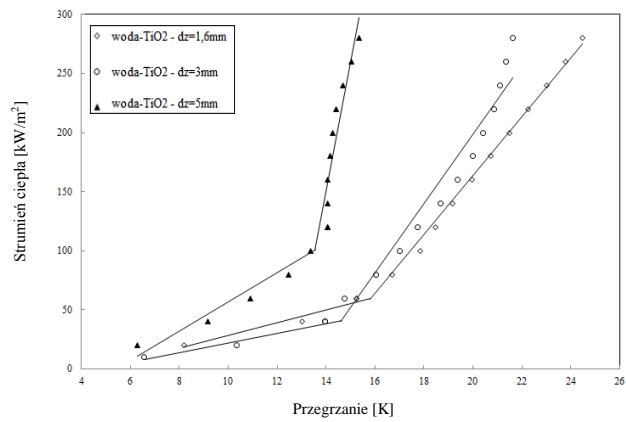
Rys. 110. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ o koncentracji nanocząstek 1%



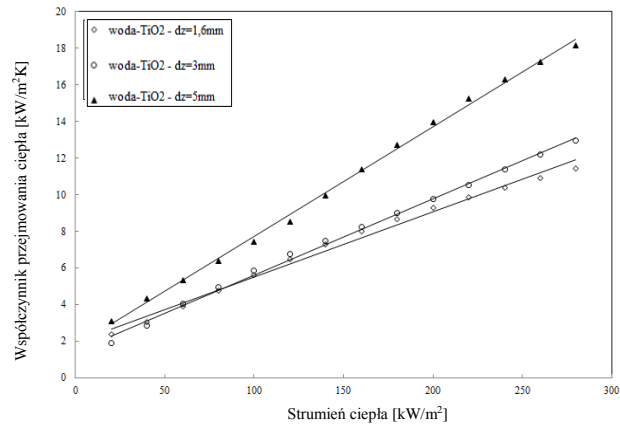
Rys. 111. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ o koncentracji nanocząstek 1%



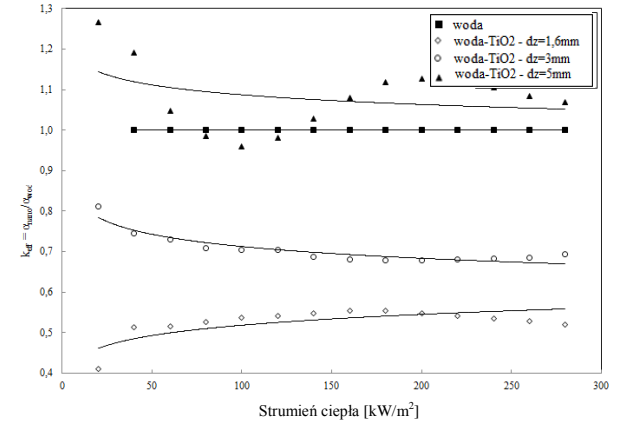
Rys. 112. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ o koncentracji nanocząstek 1%



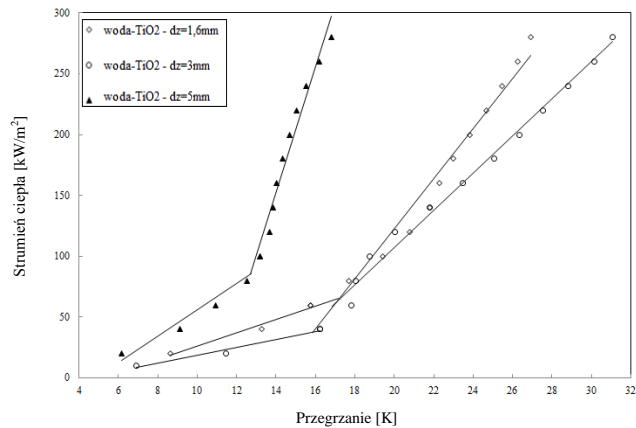
Rys. 113. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 0,01%



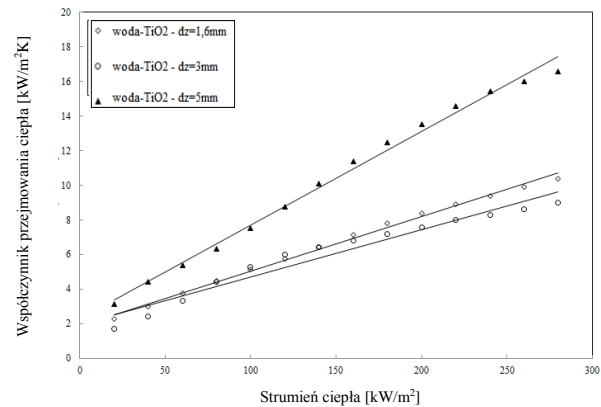
Rys. 114. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 0,01%



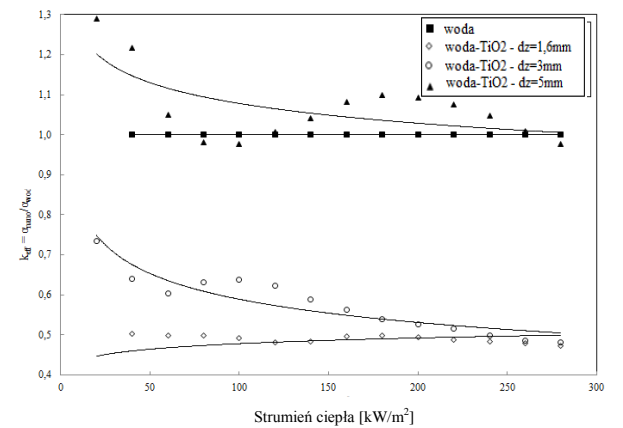
Rys. 115. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 0,01%



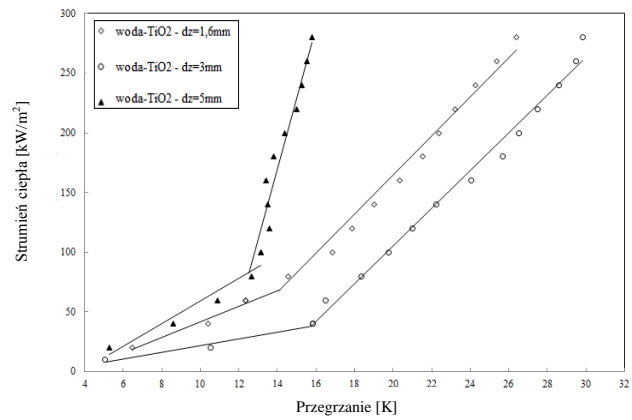
Rys. 116. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 0,1%



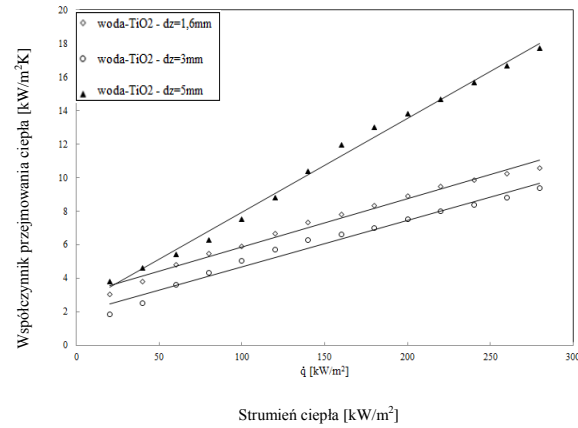
Rys. 117. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 0,1%



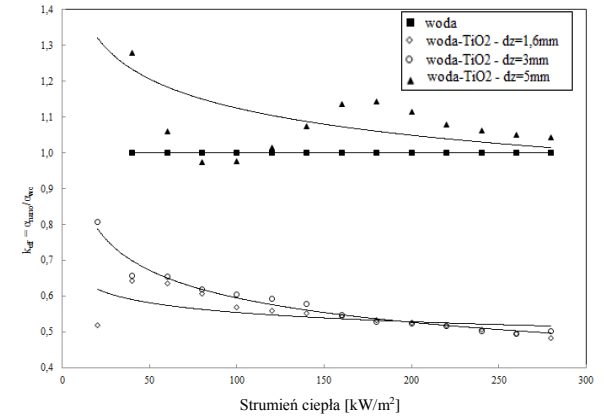
Rys. 118. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 0,1%



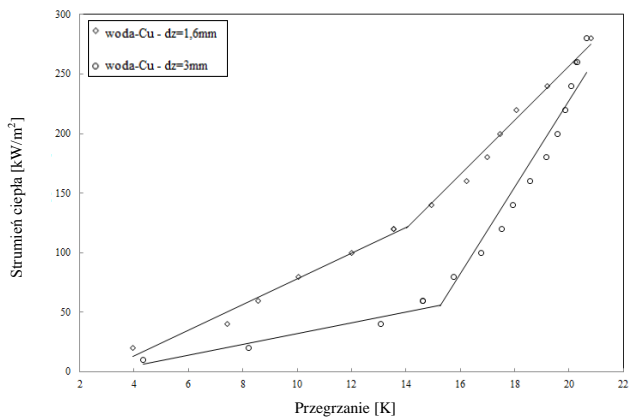
Rys. 119. Krzywe wrzenia nanocieczki woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 1%



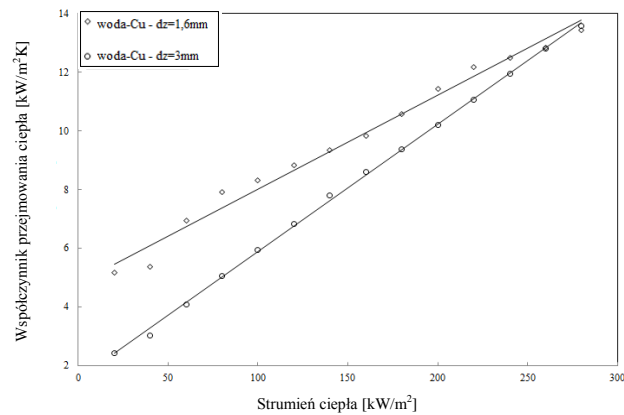
Rys. 120. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczki woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 1%



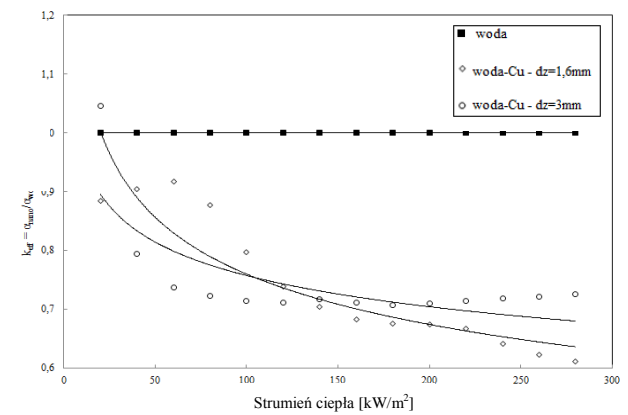
Rys. 121. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczki woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 1%



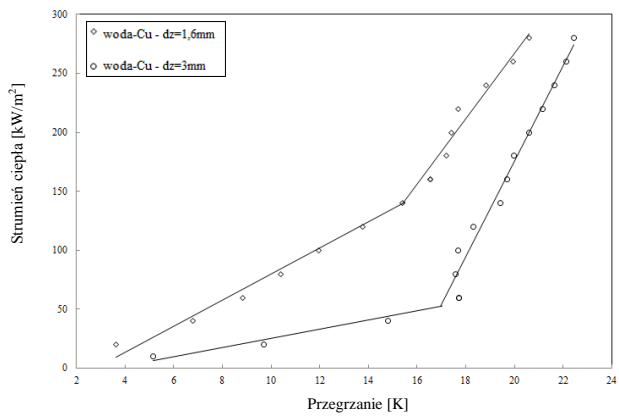
Rys. 122. Krzywe wrzenia nanocieczki woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,001%



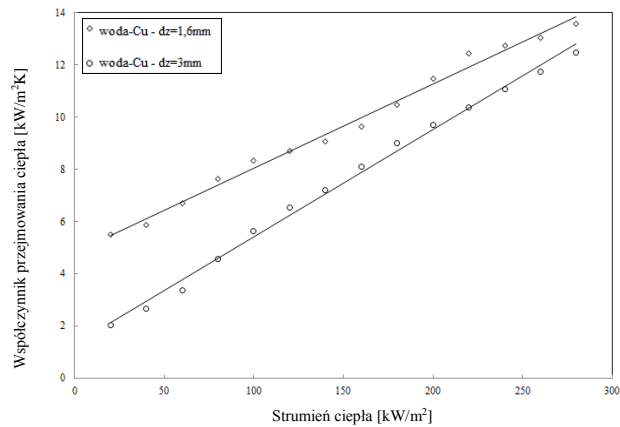
Rys. 123. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczki woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,001%



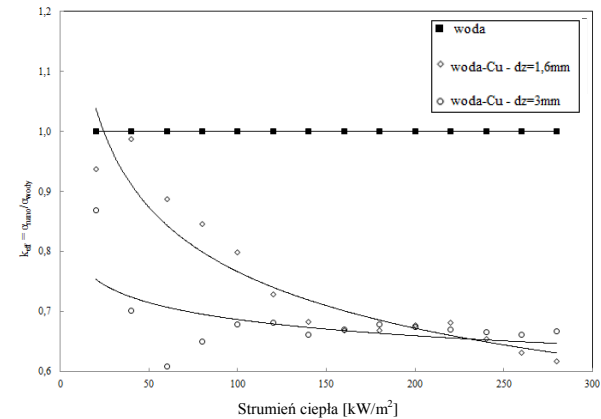
Rys. 124. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczki woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,001%



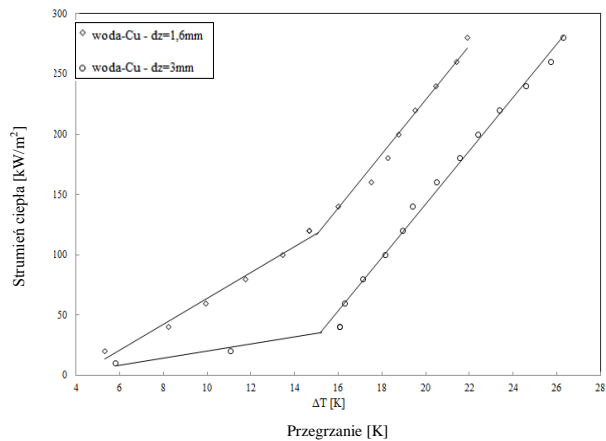
Rys. 125. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,01%



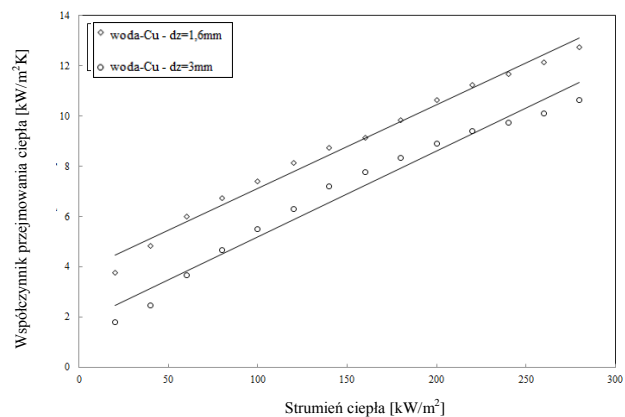
Rys. 126. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,01%



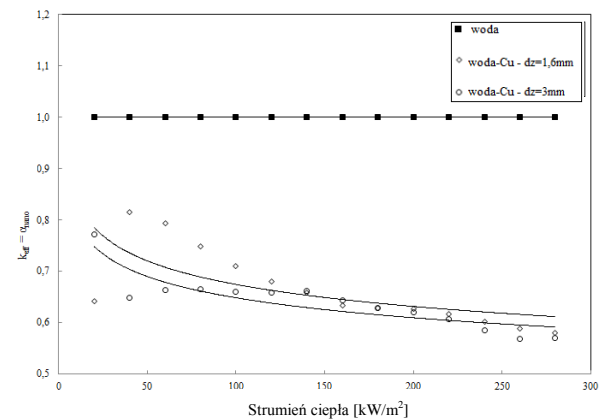
Rys. 127. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,01%



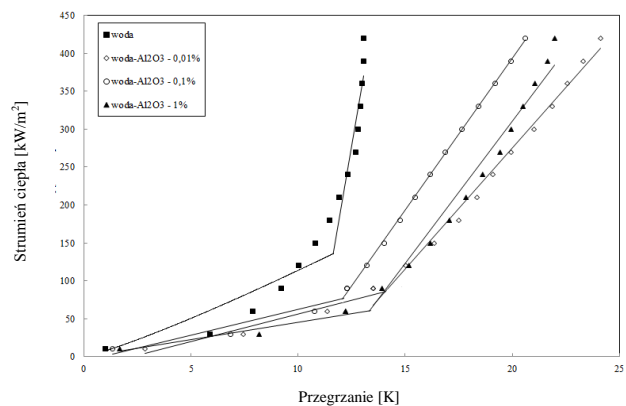
Rys. 128. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,1%



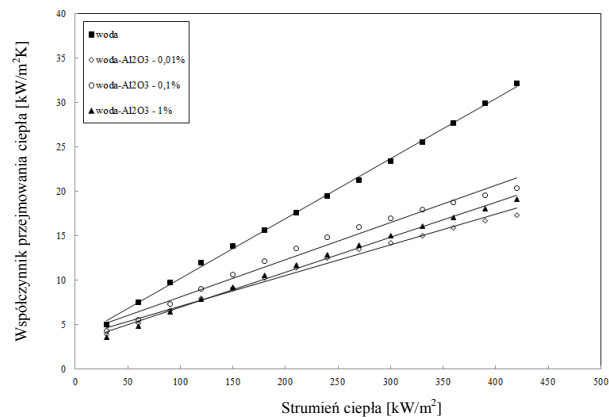
Rys. 129. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,1%



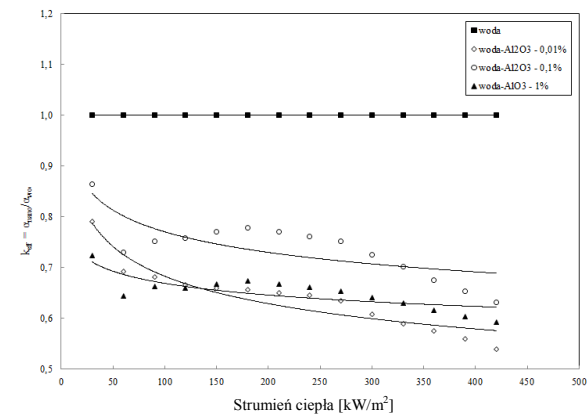
Rys. 130. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,1%



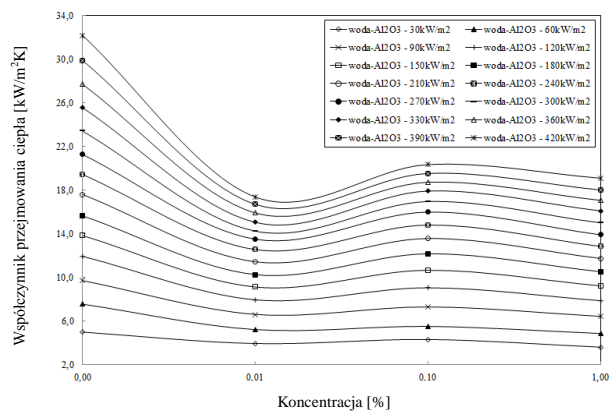
Rys. 131. Krzywe wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃ na rurce o średnicy 1,6 mm



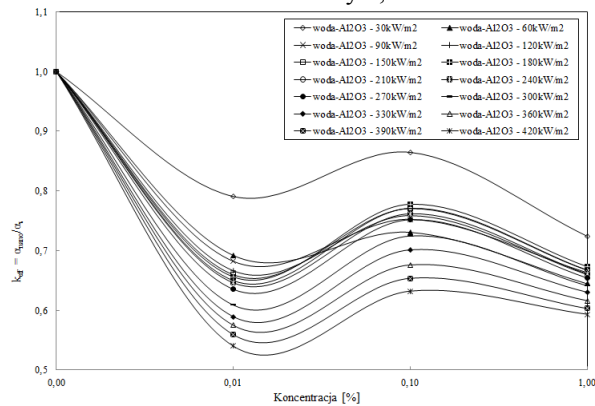
Rys. 132. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃ na rurce o średnicy 1,6 mm



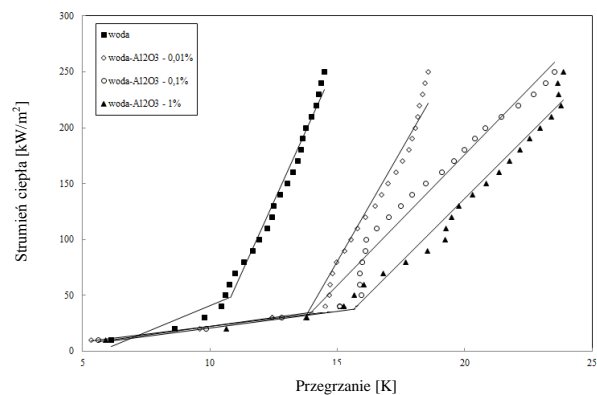
Rys. 133. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃ na rurce o średnicy 1,6 mm



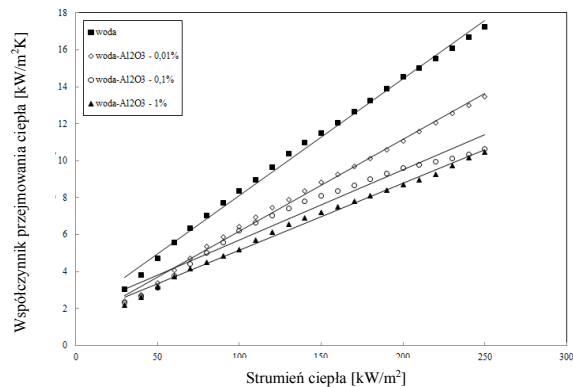
Rys. 134. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃ na rurce o średnicy 1,6 mm



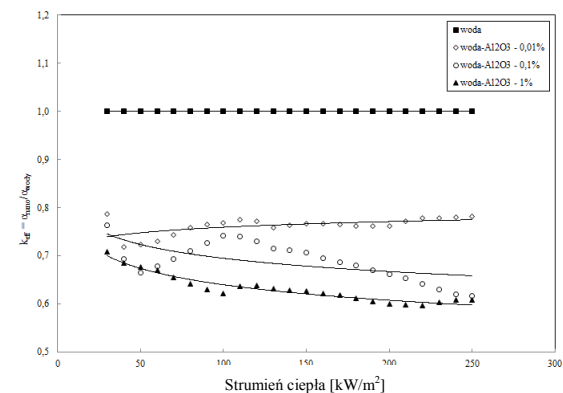
Rys. 135. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃ na rurce o średnicy 1,6 mm



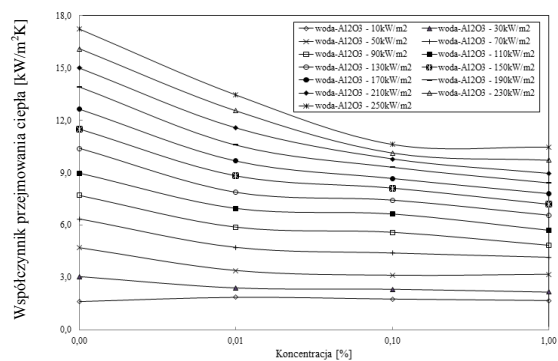
Rys. 136. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ na rurce o średnicy 3 mm



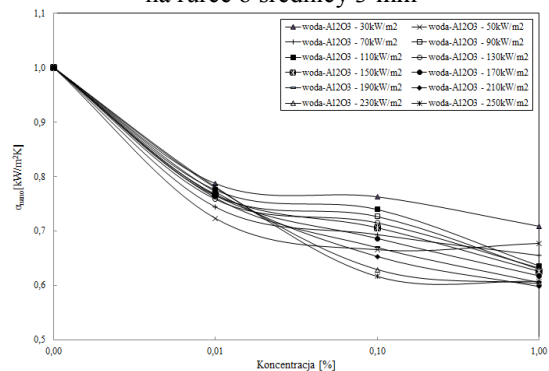
Rys. 137. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ na rurce o średnicy 3 mm



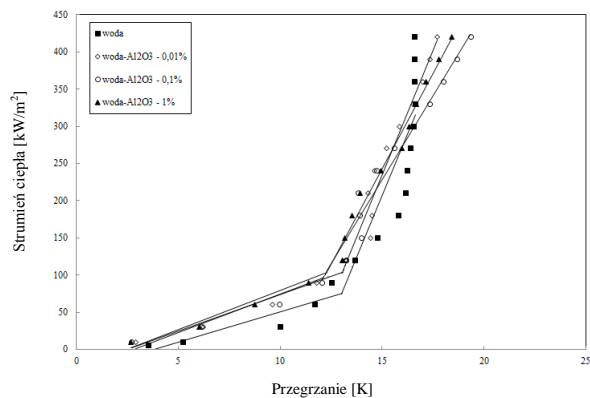
Rys. 138. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ na rurce o średnicy 3 mm



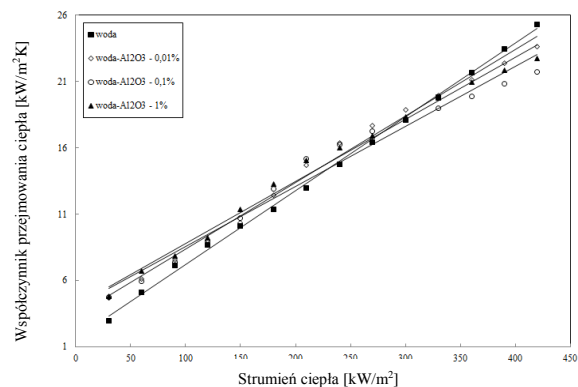
Rys. 139. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ na rurce o średnicy 3 mm



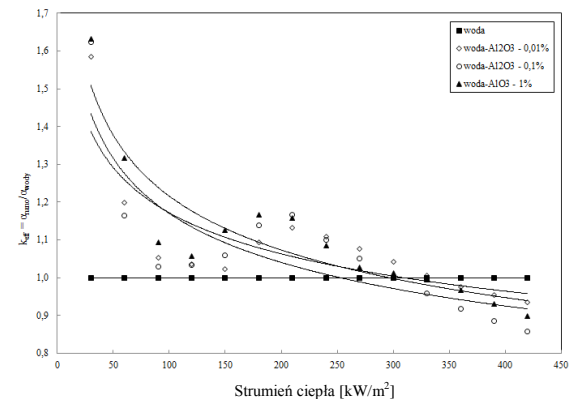
Rys. 140. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ na rurce o średnicy 3 mm



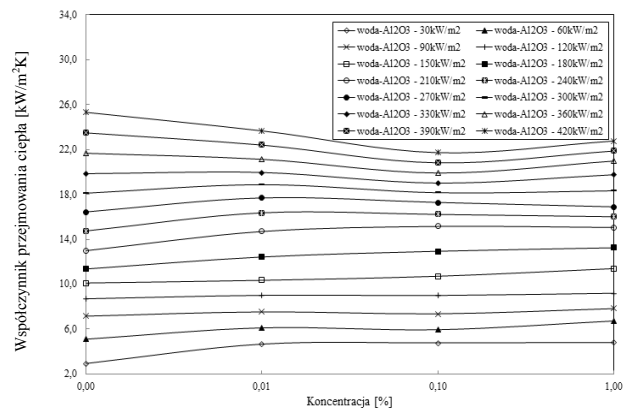
Rys. 141. Krzywe wrzenia nanocięczy woda- Al_2O_3 na rurce o średnicy 5 mm



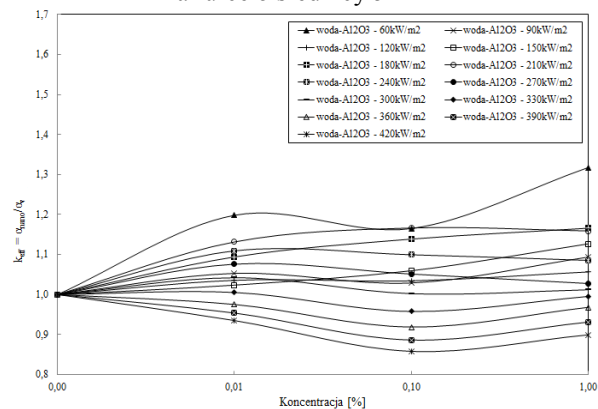
Rys. 142. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda- Al_2O_3 na rurce o średnicy 5 mm



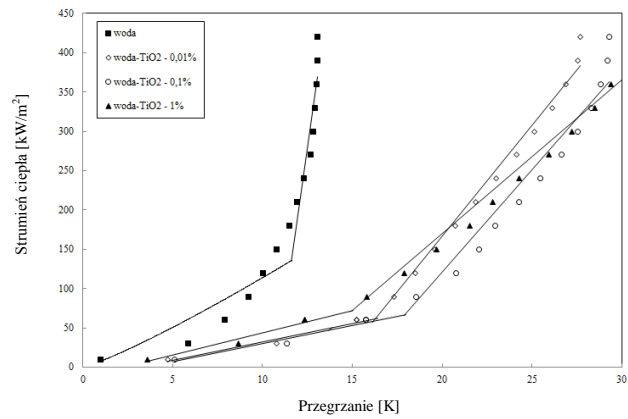
Rys. 143. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda- Al_2O_3 na rurce o średnicy 5 mm



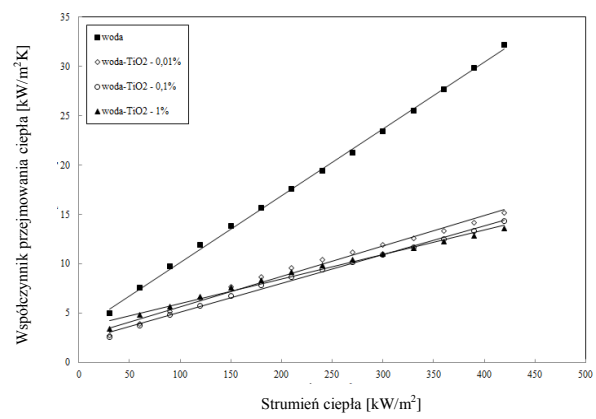
Rys. 144. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda- Al_2O_3 na rurce o średnicy 5 mm



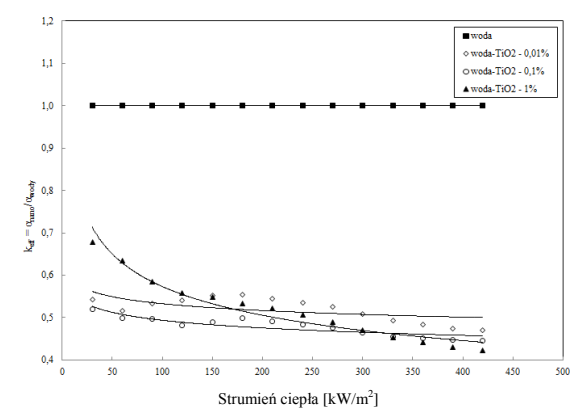
Rys. 145. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda- Al_2O_3 na rurce o średnicy 5 mm



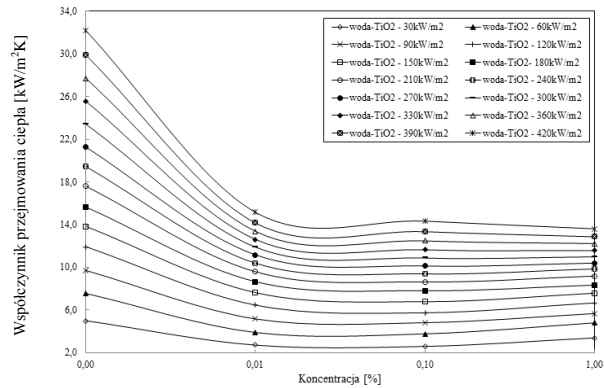
Rys. 146. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 1,6 mm



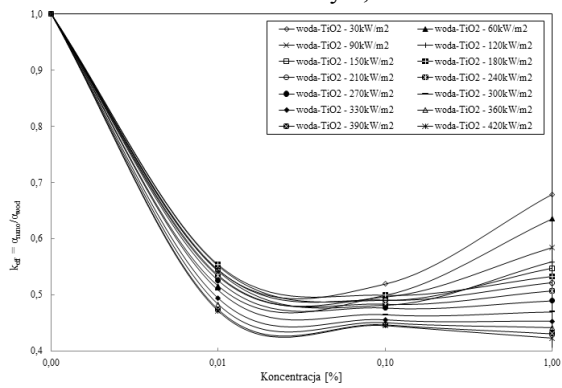
Rys. 147. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 1,6 mm



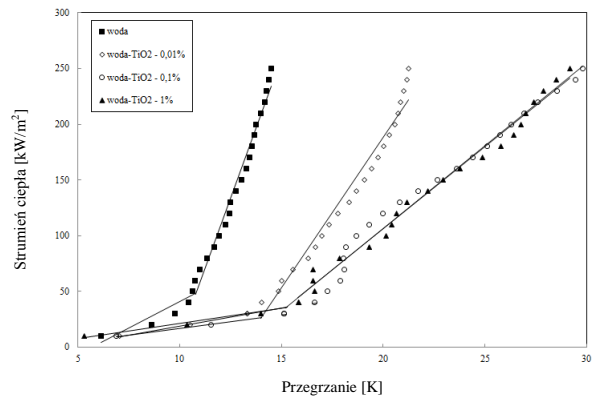
Rys. 148. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 1,6 mm



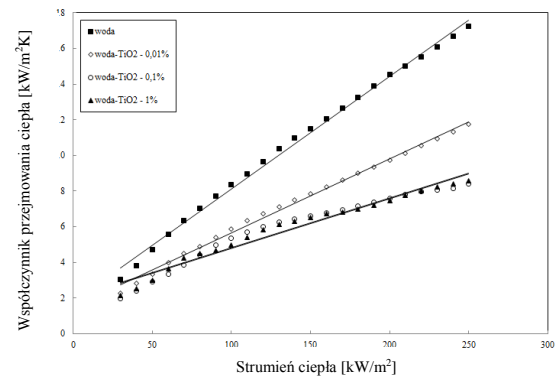
Rys. 149. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 1,6 mm



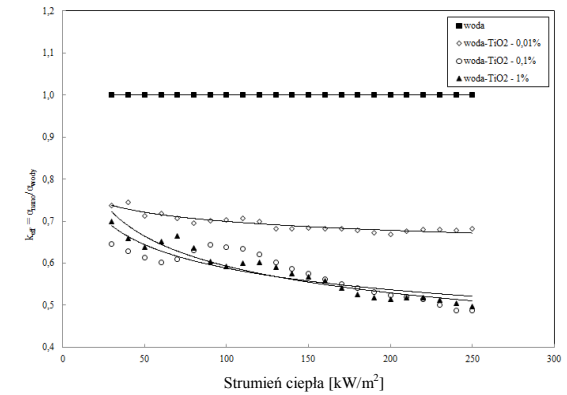
Rys. 150. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 1,6 mm



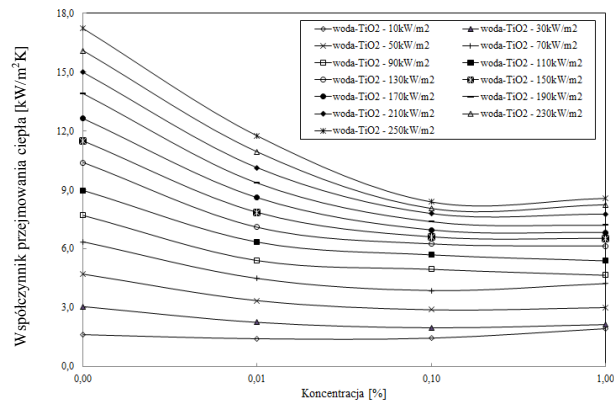
Rys. 151. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 3 mm



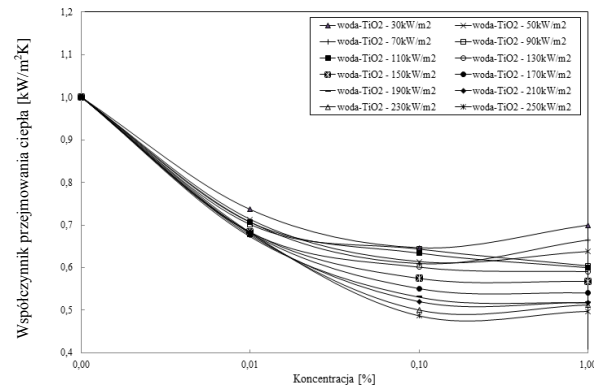
Rys. 152. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 3 mm



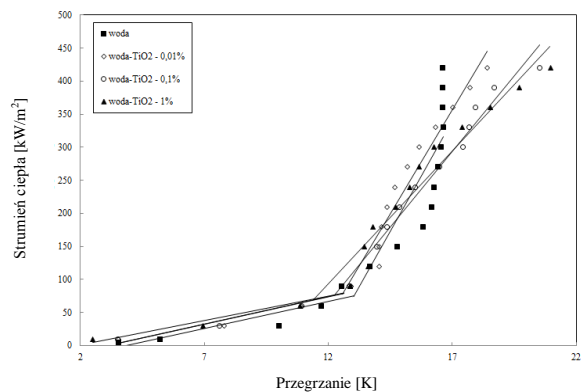
Rys. 153. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 3 mm



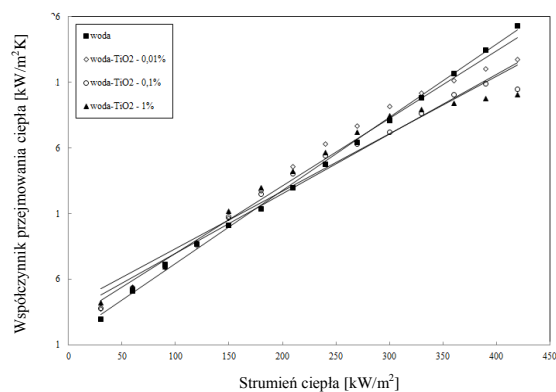
Rys. 154. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 3 mm



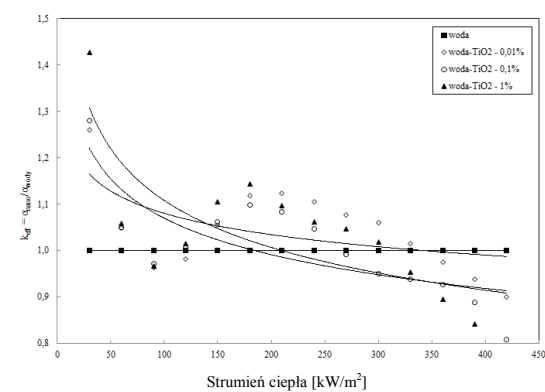
Rys. 155. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 3 mm



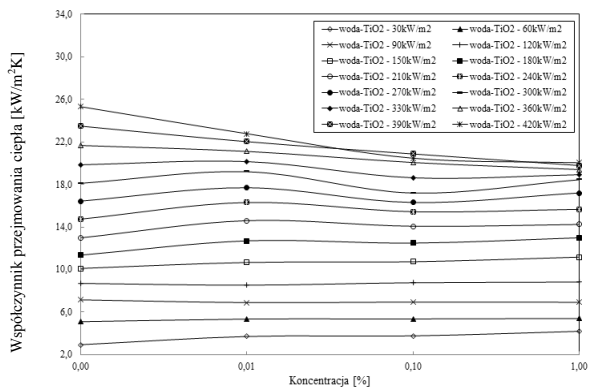
Rys. 156. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 5 mm



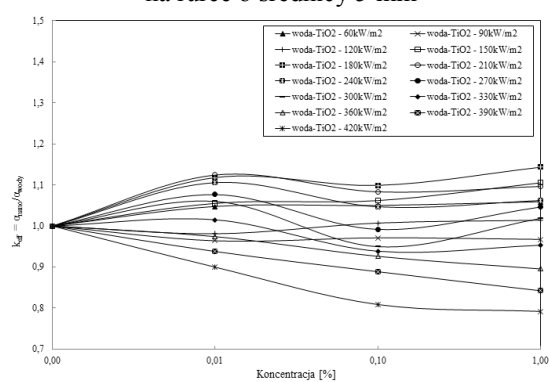
Rys. 157. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 5 mm



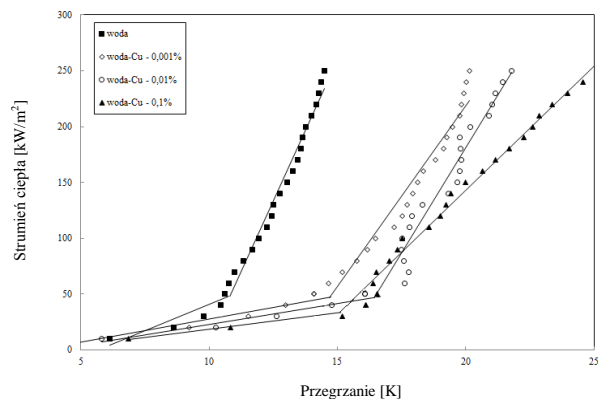
Rys. 158. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 5 mm



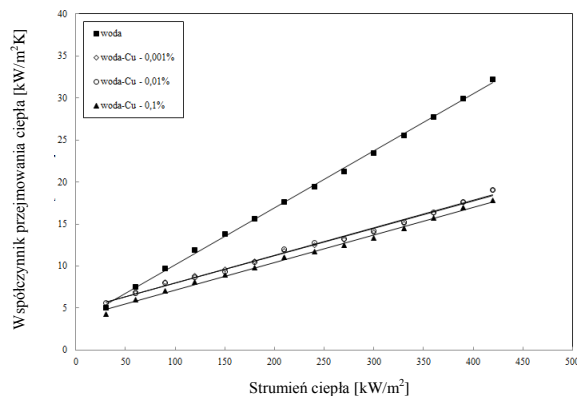
Rys. 159. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 5 mm



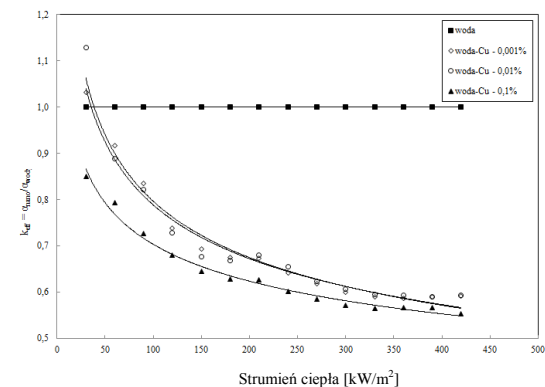
Rys. 160. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 5 mm



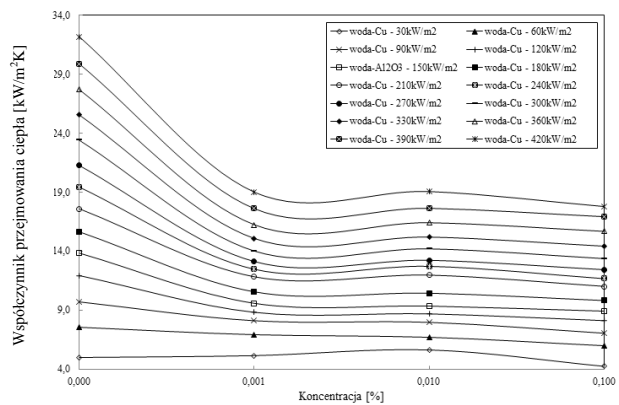
Rys. 161. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



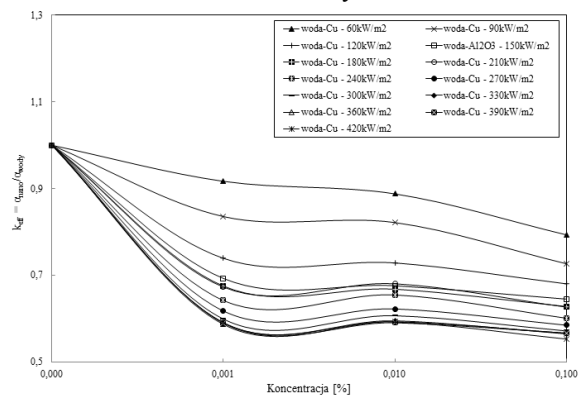
Rys. 162. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



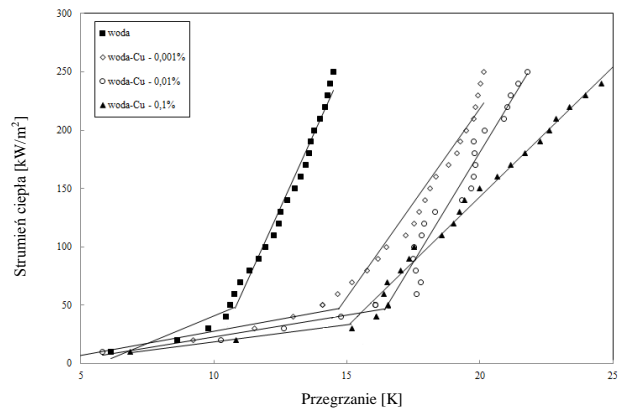
Rys. 163. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



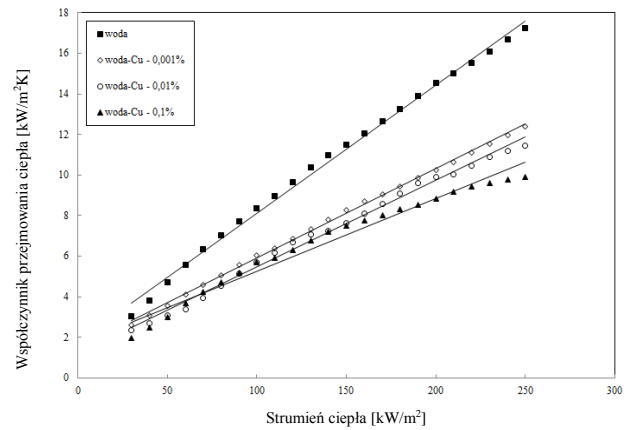
Rys. 164. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



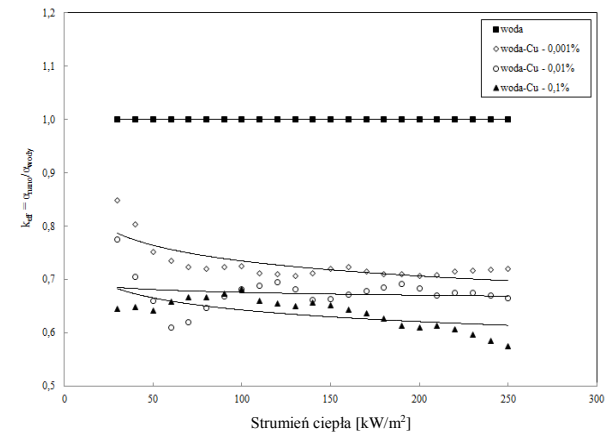
Rys. 165. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



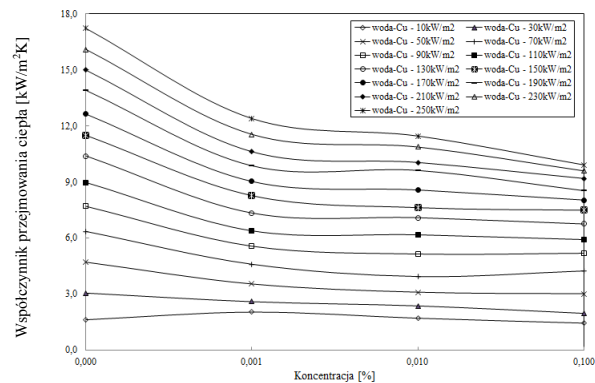
Rys. 166. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm



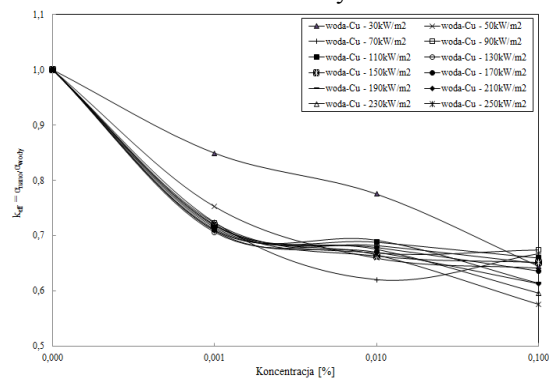
Rys. 167. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm



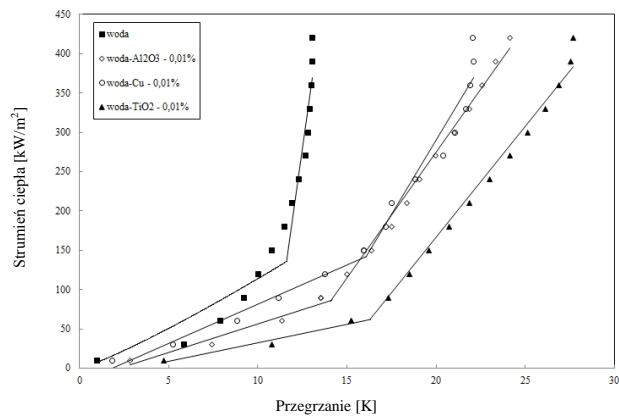
Rys. 168. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm



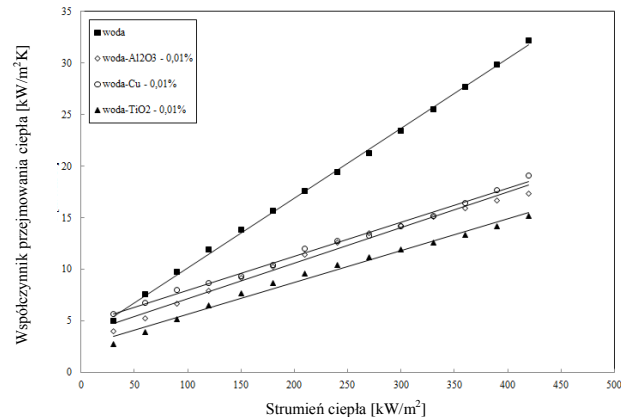
Rys. 169. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm



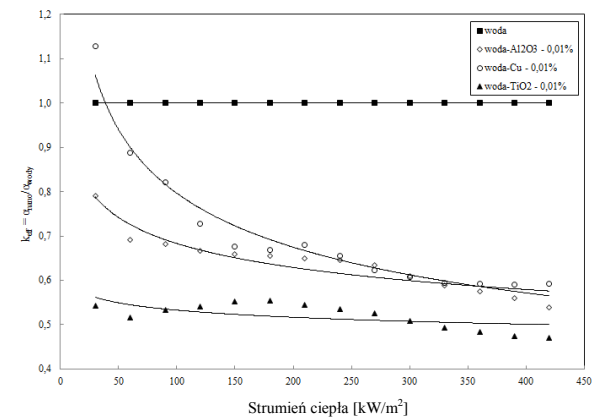
Rys. 170. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm



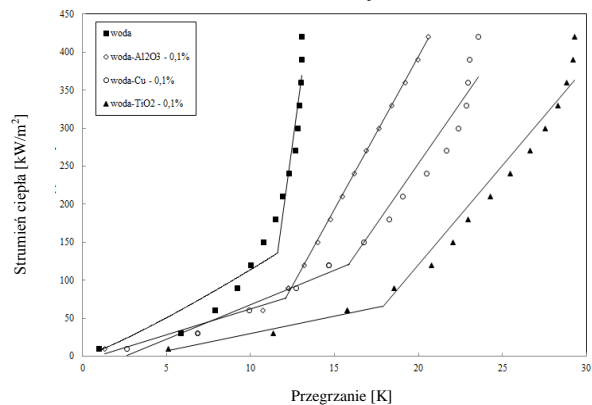
Rys. 171. Krzywe wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 , woda- TiO_2 oraz woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



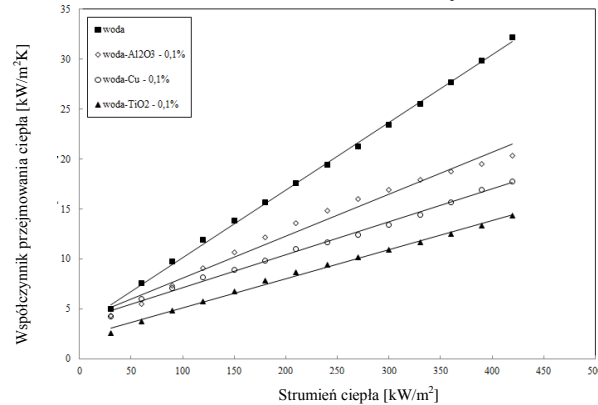
Rys. 172. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 , woda- TiO_2 oraz woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



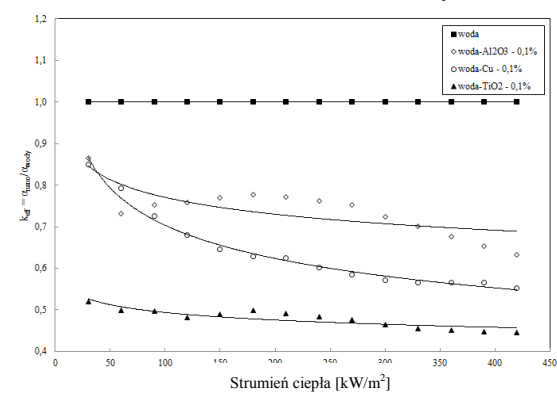
Rys. 173. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 , woda- TiO_2 oraz woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



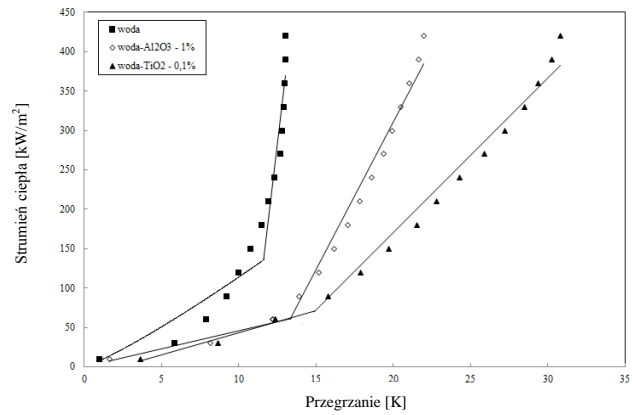
Rys. 174. Krzywe wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 , woda- TiO_2 oraz woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



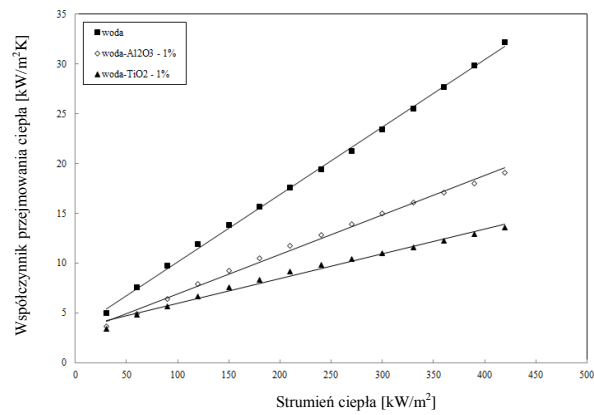
Rys. 175. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 , woda- TiO_2 oraz woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



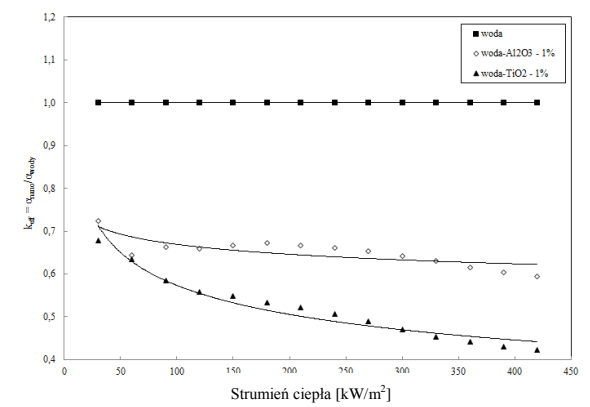
Rys. 176. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 , woda- TiO_2 oraz woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



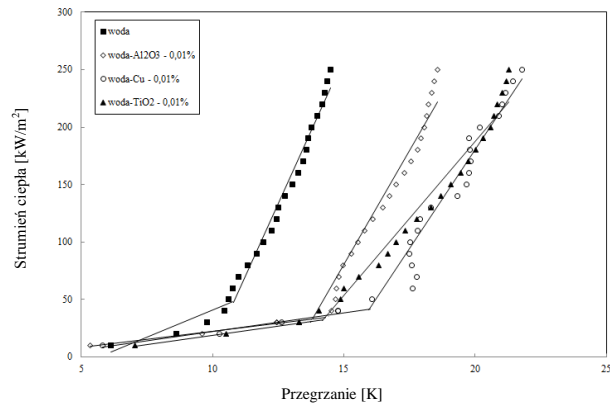
Rys. 177. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ na rurce o średnicy 1,6 mm



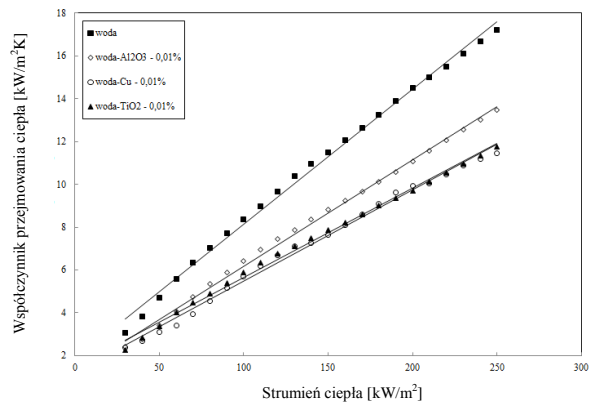
Rys. 178. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ na rurce o średnicy 1,6 mm



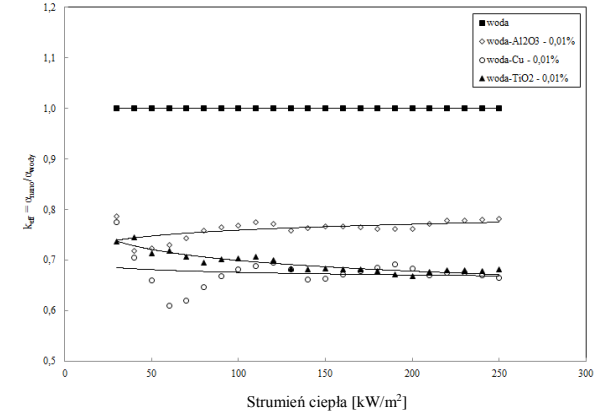
Rys. 179. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ na rurce o średnicy 1,6 mm



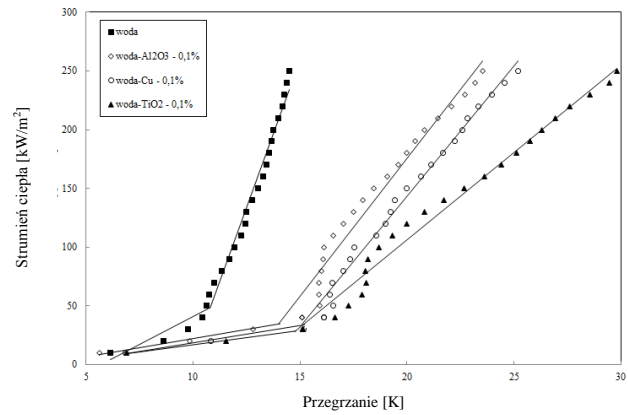
Rys. 180. Krzywe wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu oraz na rurce o średnicy 3 mm



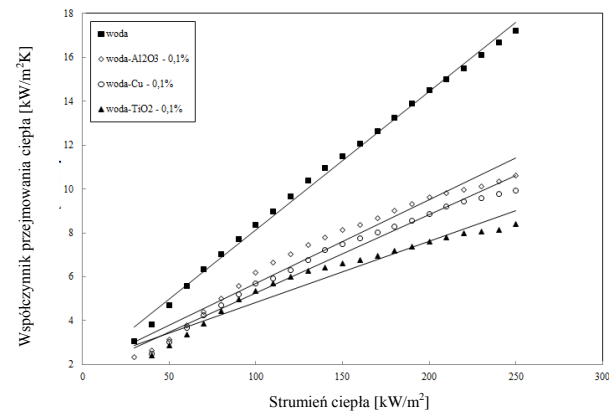
Rys. 181. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm



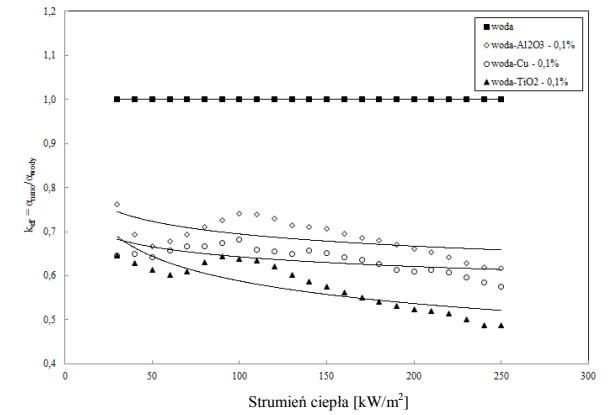
Rys. 182. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm



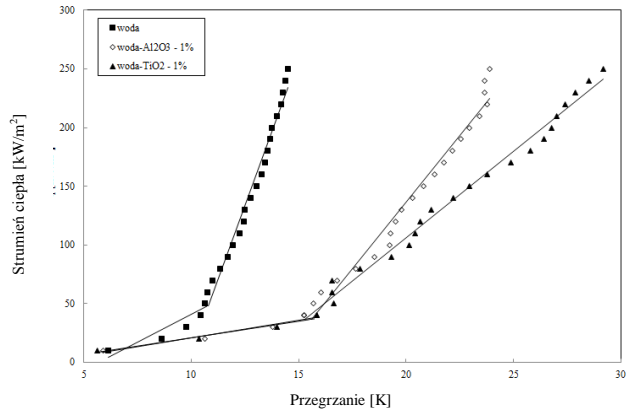
Rys. 183. Krzywe wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu oraz na rurce o średnicy 3 mm



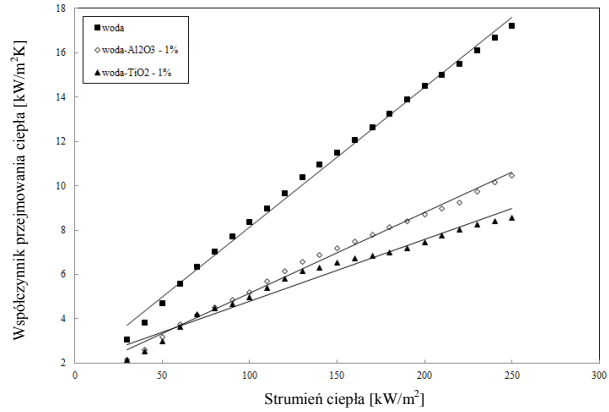
Rys. 184. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm



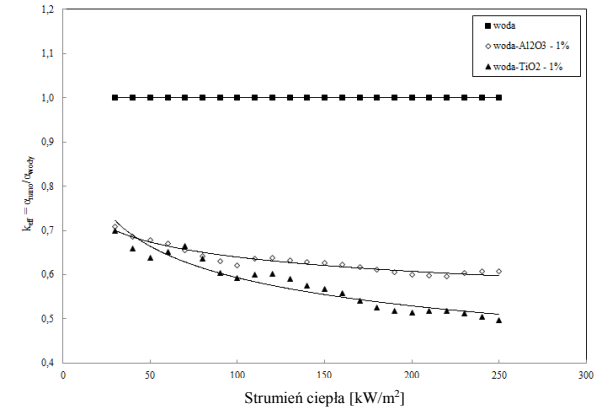
Rys. 185. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm



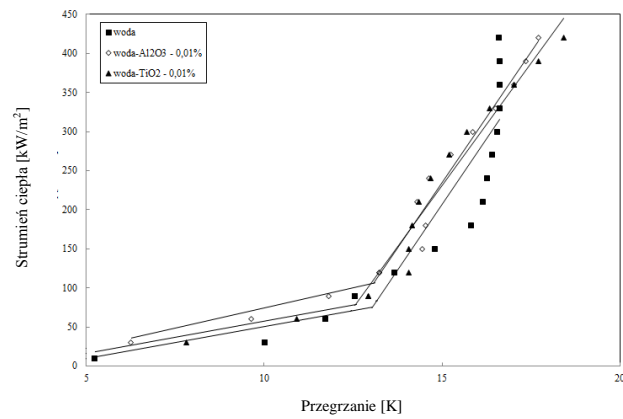
Rys. 186. Krzywe wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ na rurce o średnicy 3 mm



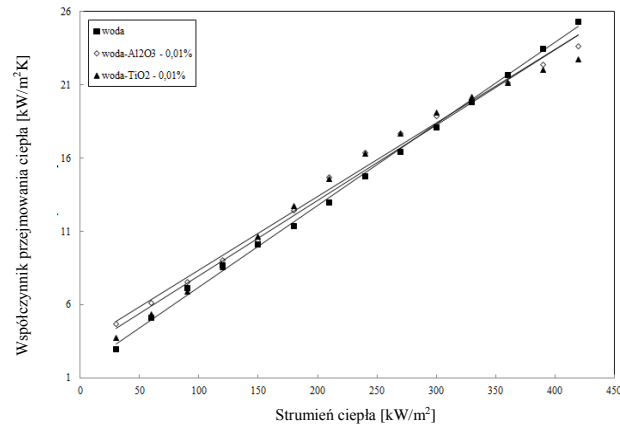
Rys. 187. Współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ na rurce o średnicy 3 mm



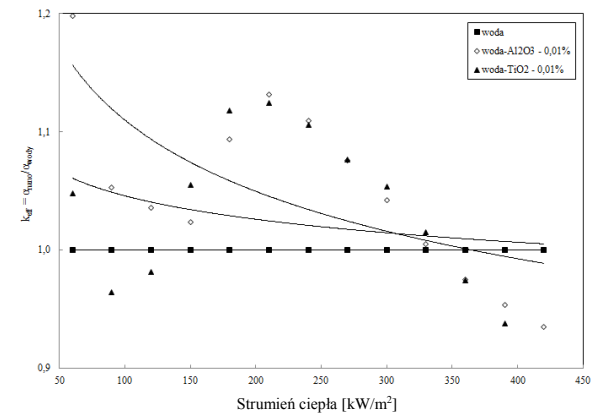
Rys. 188. Współczynnik intensyfikacji przejmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ na rurce o średnicy 3 mm



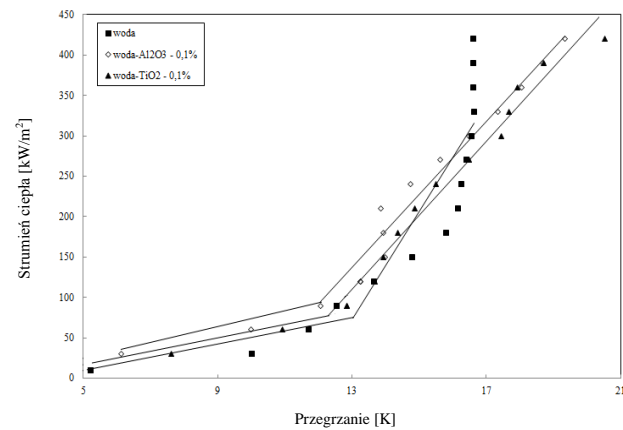
Rys. 189. Krzywe wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ na rurce o średnicy 5 mm



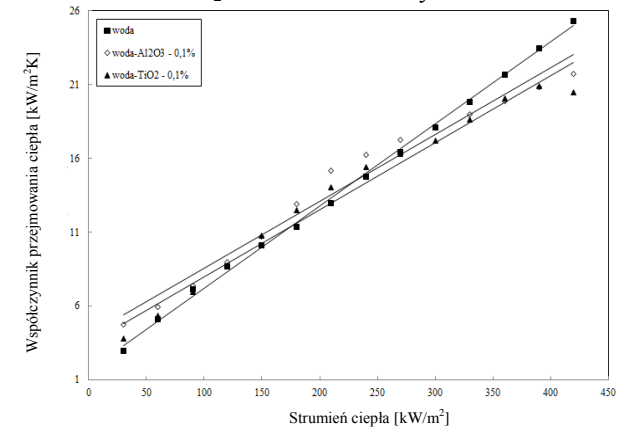
Rys. 190. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ na rurce o średnicy 5 mm



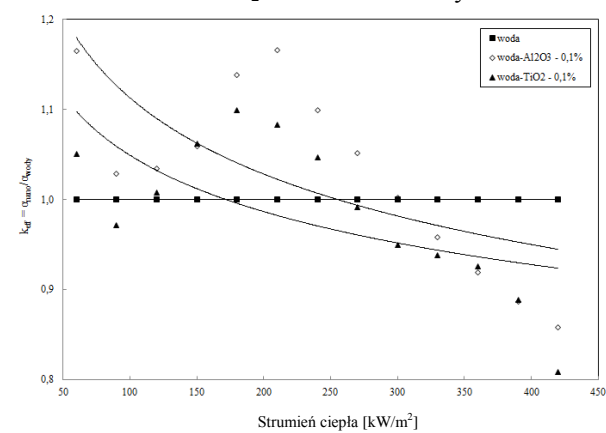
Rys. 191. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ na rurce o średnicy 5 mm



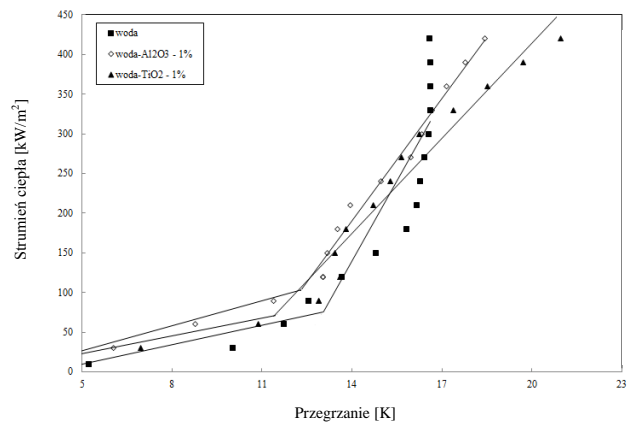
Rys. 192. Krzywe wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ na rurce o średnicy 5 mm



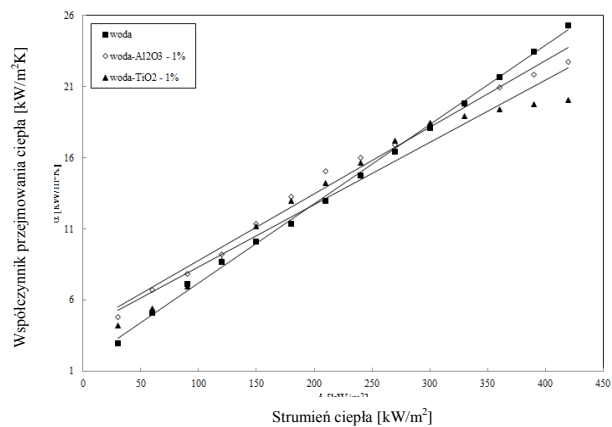
Rys. 193. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ na rurce o średnicy 5 mm



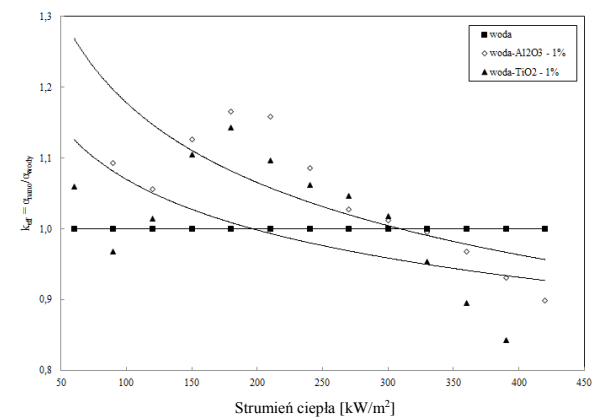
Rys. 194. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocięczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ na rurce o średnicy 5 mm



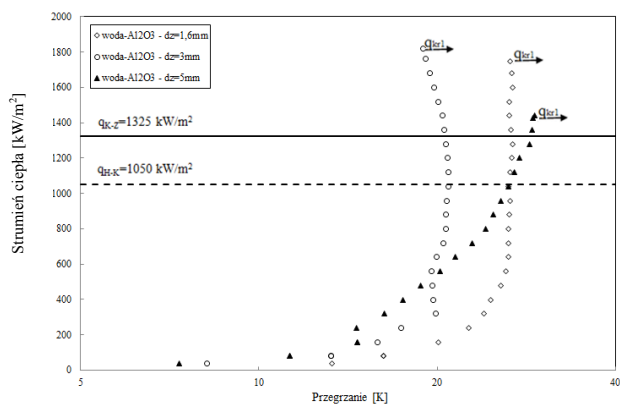
Rys. 195. Krzywe wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 oraz woda- TiO_2 na rurce o średnicy 5 mm



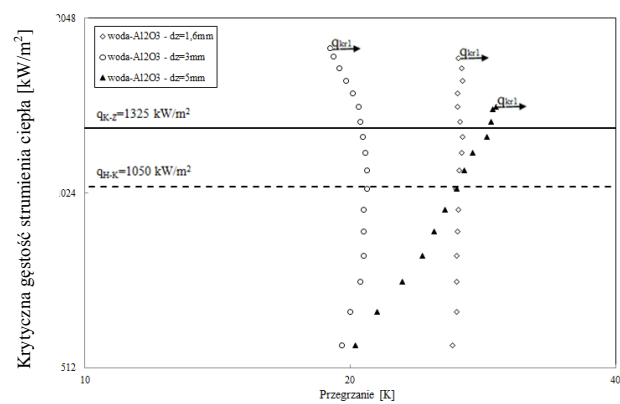
Rys. 196. Współczynnik przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 oraz woda- TiO_2 na rurce o średnicy 5 mm



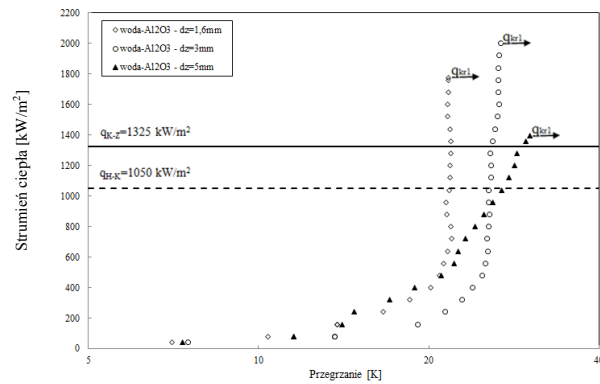
Rys. 197. Współczynnik intensyfikacji przyjmowania ciepła podczas wrzenia nanocieczy woda- Al_2O_3 oraz woda- TiO_2 na rurce o średnicy 5 mm



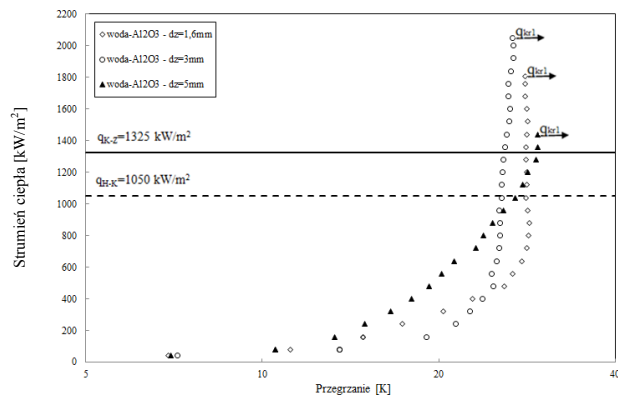
Rys. 198. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 o koncentracji nanocząstek 0,01%



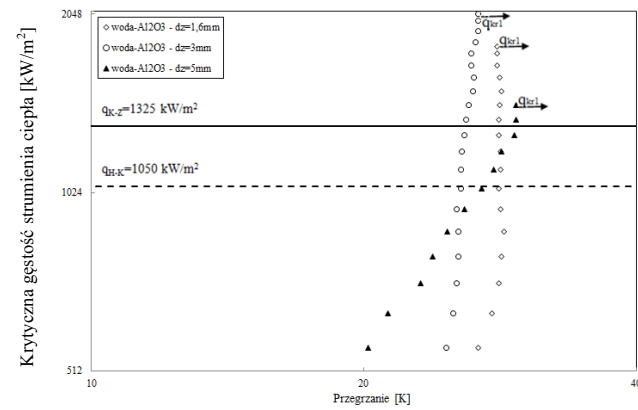
Rys. 199. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 o koncentracji nanocząstek 0,01%



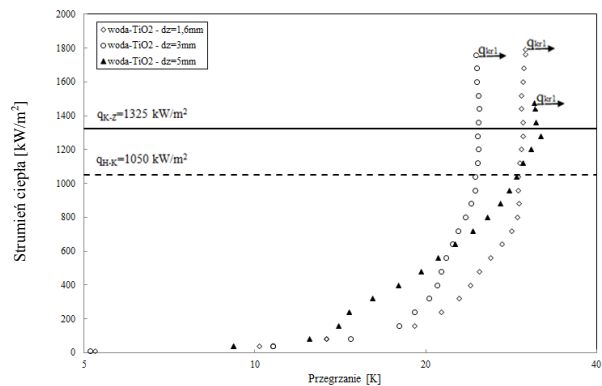
Rys. 200. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 o koncentracji nanocząstek 0,1%



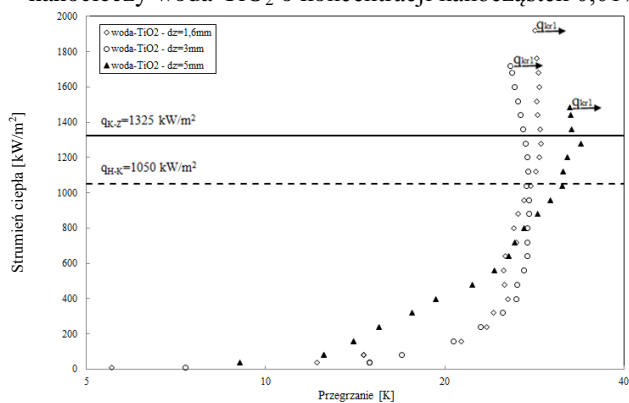
Rys. 201. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 o koncentracji nanocząstek 1%



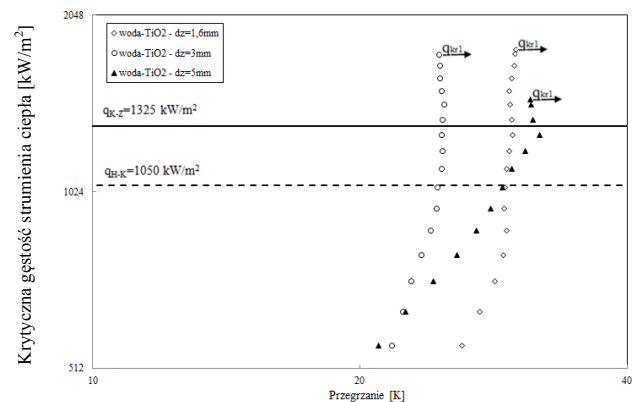
Rys. 202. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 o koncentracji nanocząstek 1%



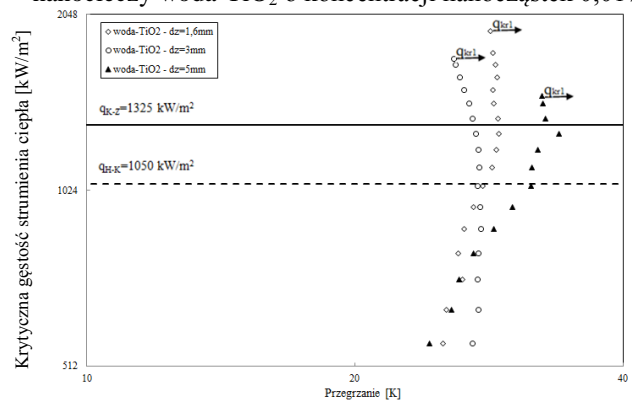
Rys. 203. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 0,01%



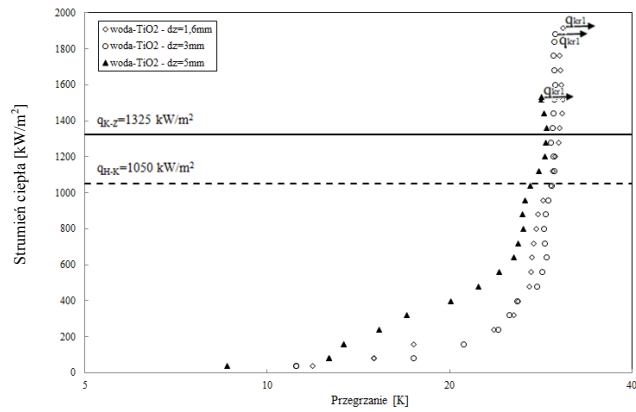
Rys. 205. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 0,1%



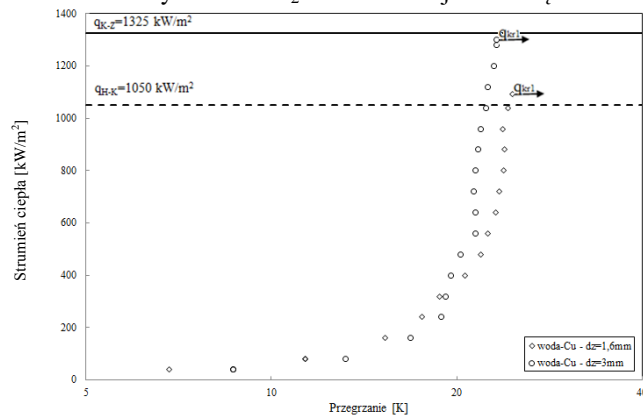
Rys. 204. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 0,01%



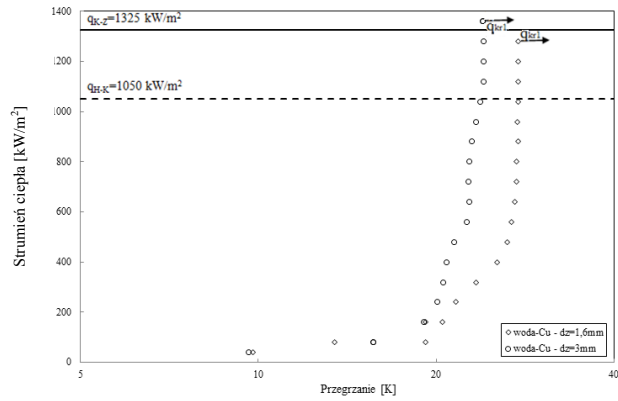
Rys. 206. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 0,1%



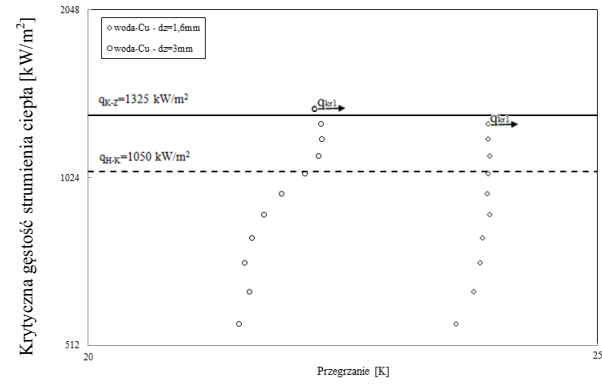
Rys. 207. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-TiO₂ o koncentracji nanocząstek 1%



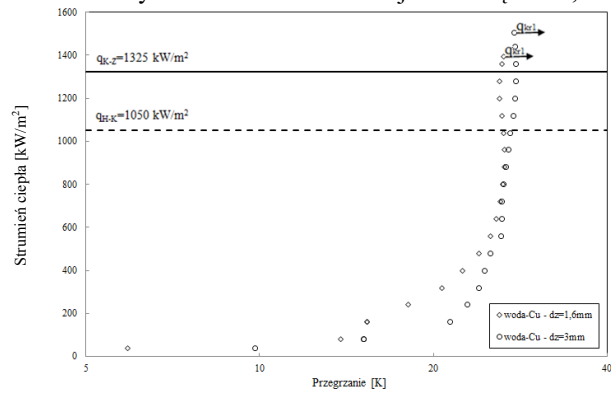
Rys. 208. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,001%



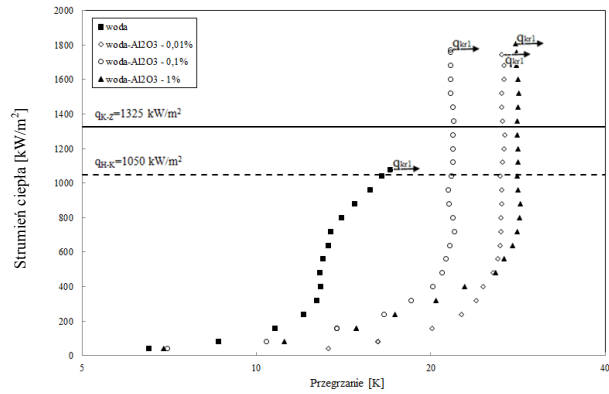
Rys. 209. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,01%



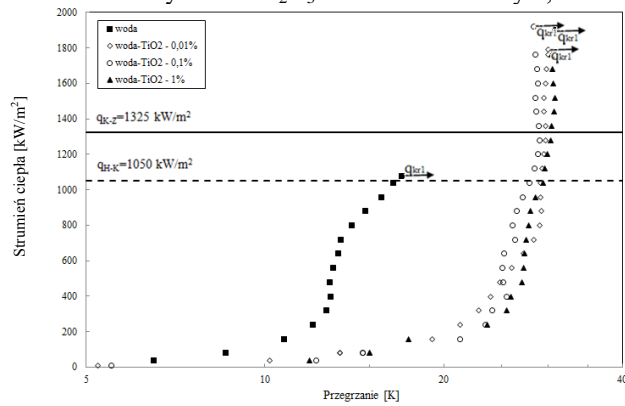
Rys. 210. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,01%



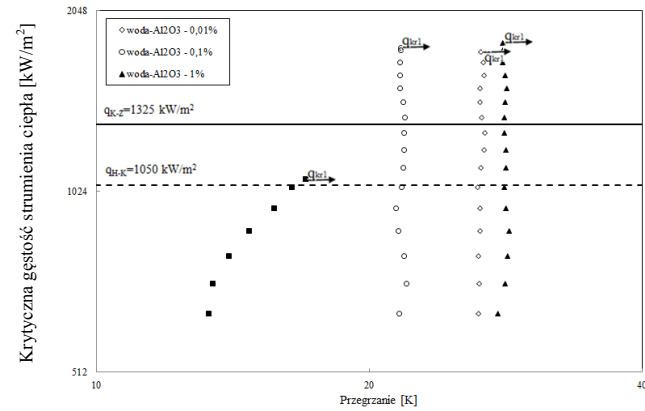
Rys. 211. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Cu o koncentracji nanocząstek 0,1%



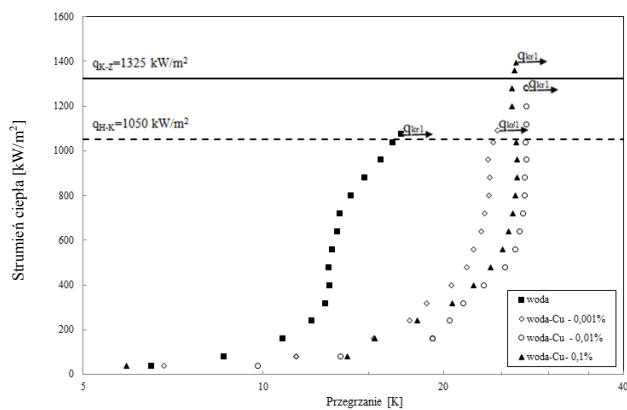
Rys. 212. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 na rurce o średnicy 1,6 mm



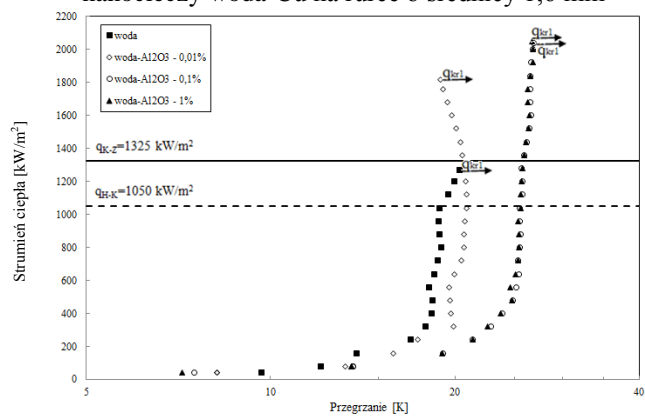
Rys. 214. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- TiO_2 na rurce o średnicy 1,6 mm



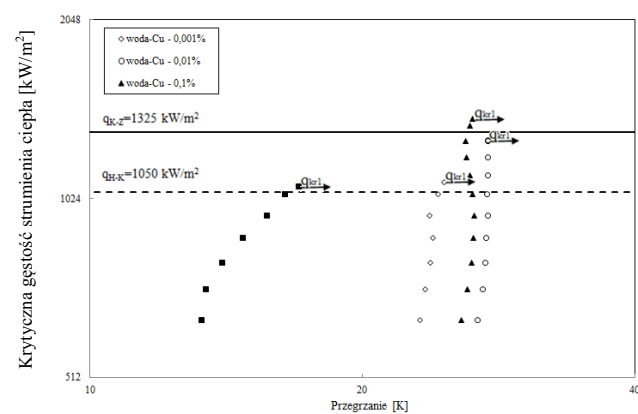
Rys. 213. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 na rurce o średnicy 1,6 mm



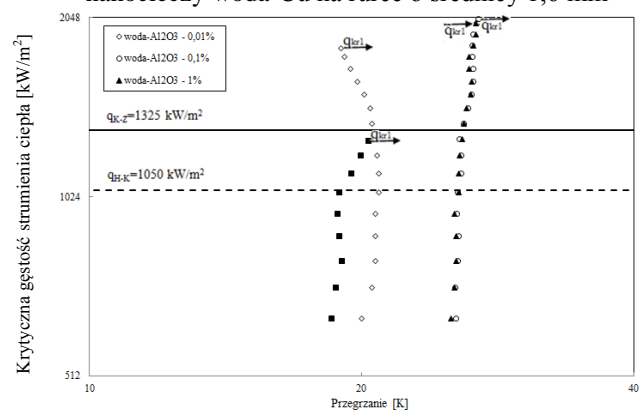
Rys. 215. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



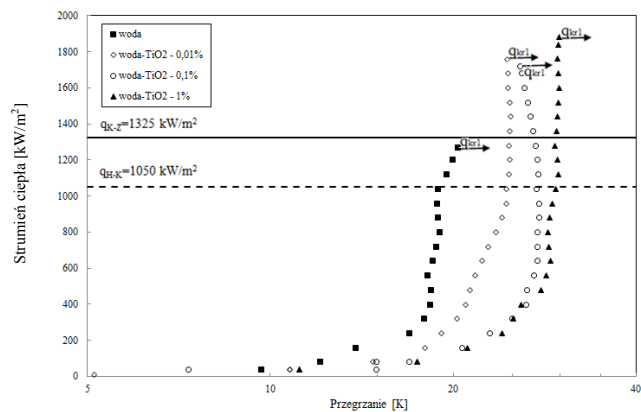
Rys. 217. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃ na rurce o średnicy 3 mm



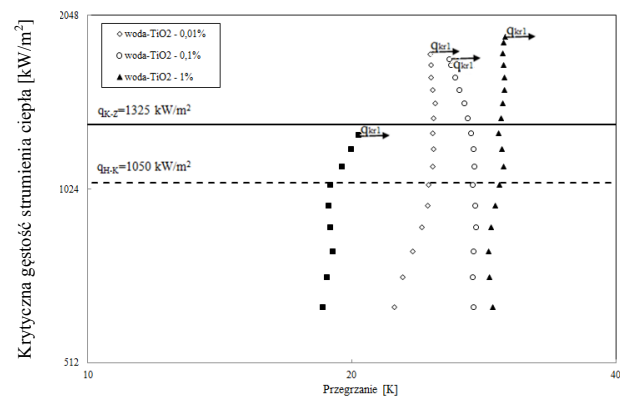
Rys. 216. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



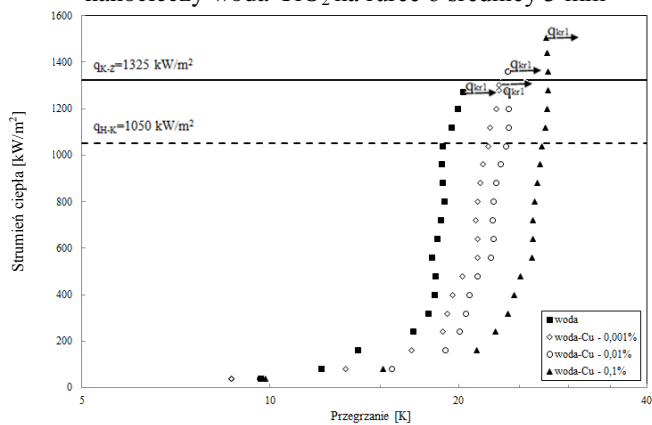
Rys. 218. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃ na rurce o średnicy 3 mm



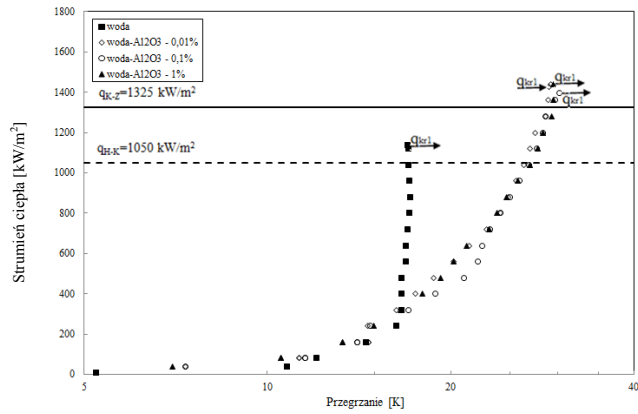
Rys. 219. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 3 mm



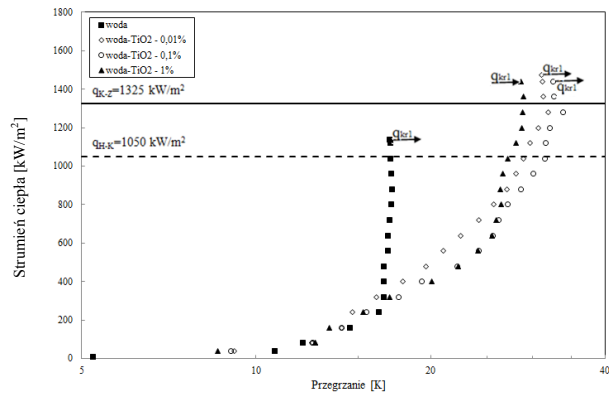
Rys. 220. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 3 mm



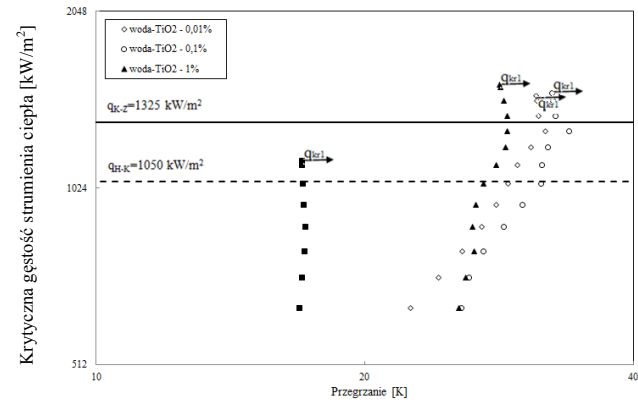
Rys. 221. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm



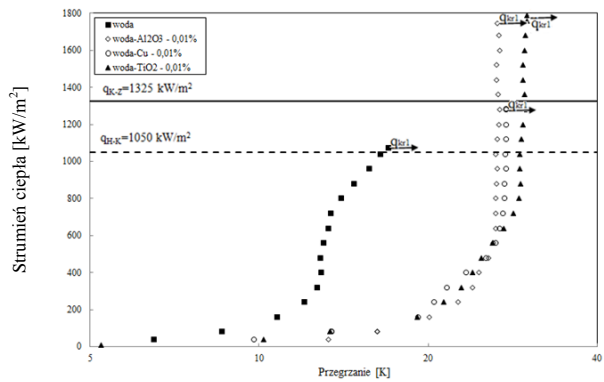
Rys. 222. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃ na rurce o średnicy 5 mm



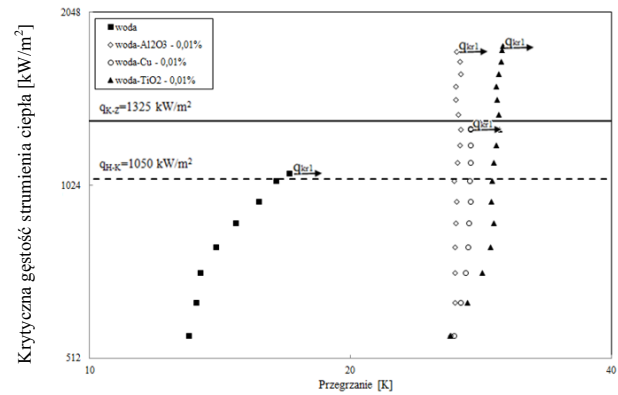
Rys. 223. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 5 mm



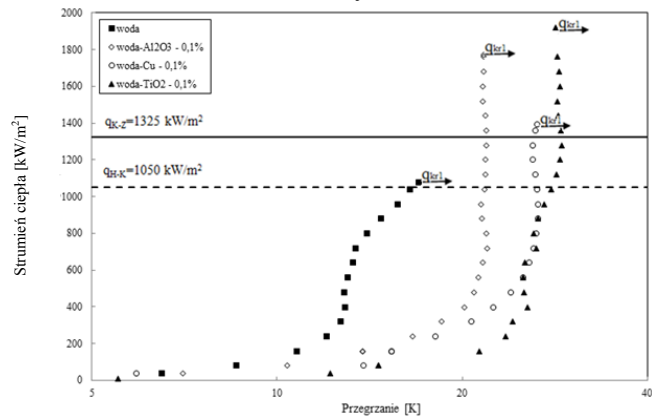
Rys. 224. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-TiO₂ na rurce o średnicy 5 mm



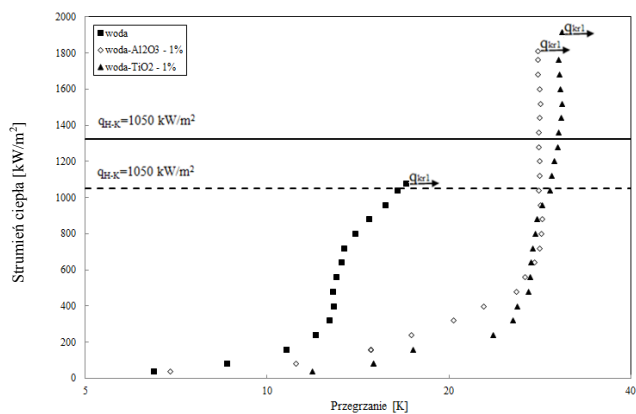
Rys. 225. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



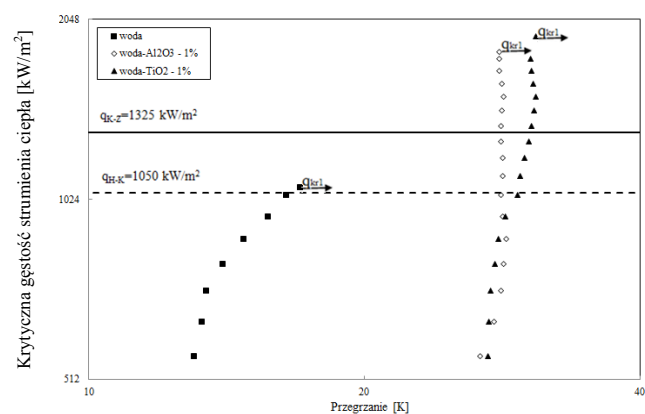
Rys. 226. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



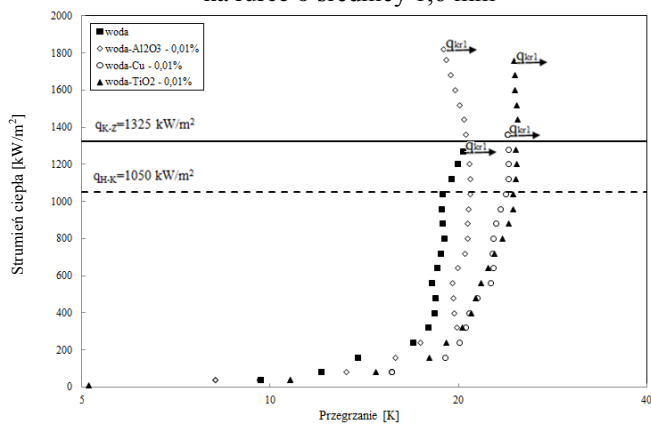
Rys. 227. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



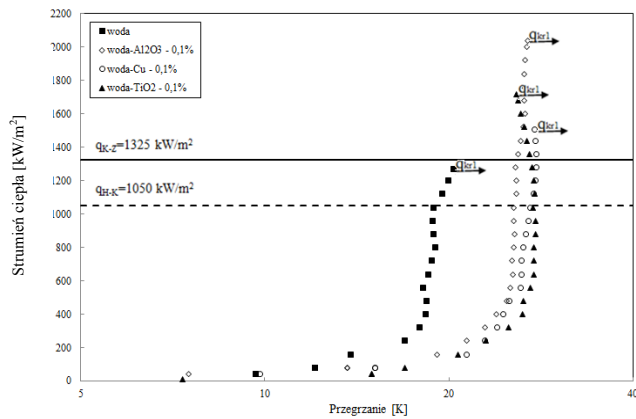
Rys. 228. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 , woda- TiO_2 oraz woda-Cu na rurce o średnicy 1,6 mm



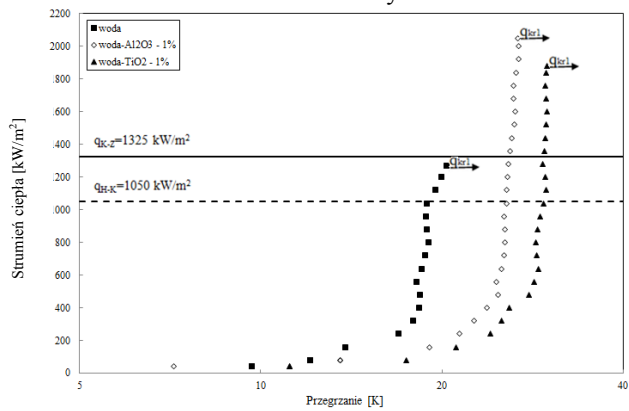
Rys. 229. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 oraz woda- TiO_2 na rurce o średnicy 1,6 mm



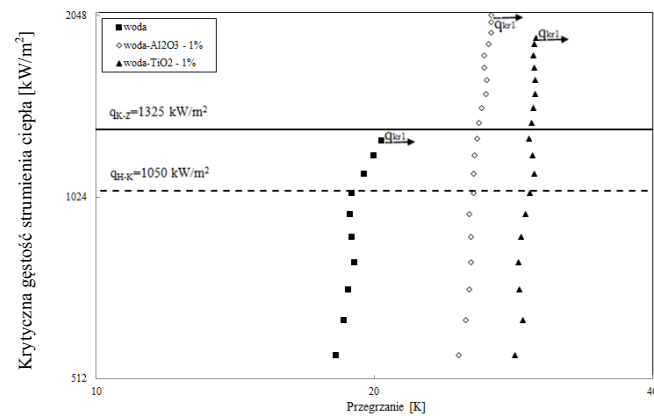
Rys. 230. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 , woda- TiO_2 oraz woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm



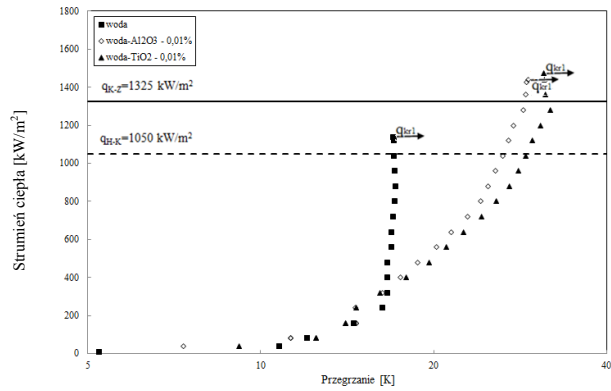
Rys. 231. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm



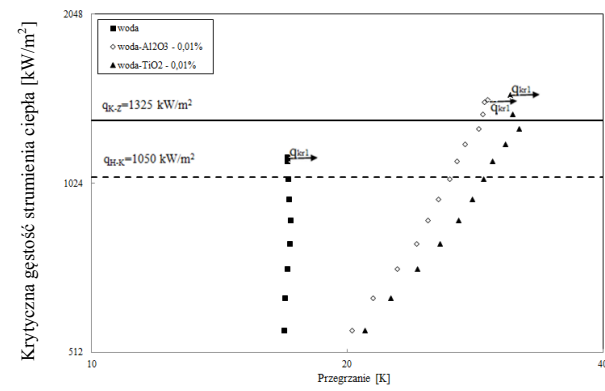
Rys.232. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃, woda-TiO₂ oraz woda-Cu na rurce o średnicy 3 mm



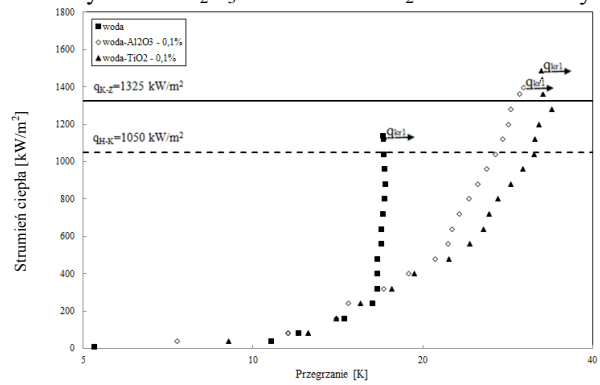
Rys.233. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ na rurce o średnicy 3 mm



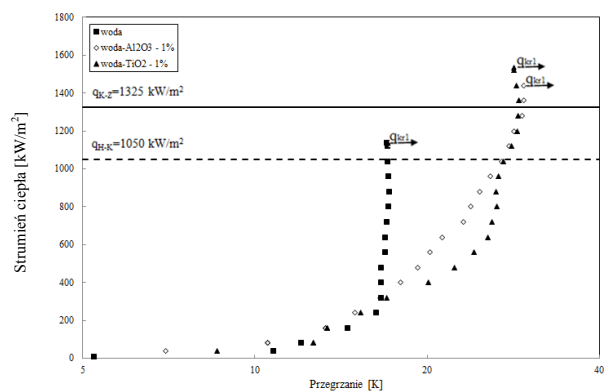
Rys. 234. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 oraz woda- TiO_2 rurce o średnicy 5 mm



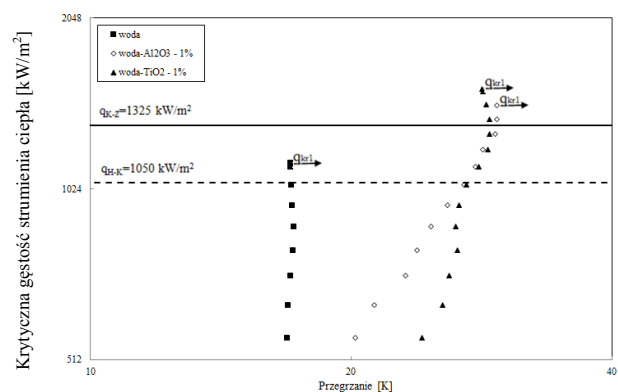
Rys. 235. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 oraz woda- TiO_2 na rurce o średnicy 5 mm



Rys. 236. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda- Al_2O_3 oraz woda- TiO_2 rurce o średnicy 5 mm



Rys. 237. Krzywe wrzenia oraz krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ rurce o średnicy 5 mm



Rys. 238. Krytyczna gęstość strumienia ciepła nanocieczy woda-Al₂O₃ oraz woda-TiO₂ na rurce o średnicy 5 mm