مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1395، دوره 16، شماره 2، ص‌ص 19-30

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی انتقال حرارت جوشش استخری فروسیال بر روی سطوح رسوب‌گذاری شده توسط نانوسیال

علی عبدالهی[1]، محمد رضا سلیم‌پور[2*]، نسرین اعتصامی[3]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
3-استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
* اصفهان، صندوق پستی 8415683111، salimpour@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 16 آبان 1394
پذیرش: 24 آذر 1394
ارائه در سایت: 05 بهمن 1394

کلید واژگان:
جوشش استخری
فروسیال
زبری سطح
رسوب نانوذرات

چکیده

انتقال حرارت جوشش یکی از پرکاربردترین فرایندهای انتقال حرارت در صنعت به شمار می‌آید. در این مقاله انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال اکسید آهن– آب (فروسیال) در فشار اتمسفر به صورت تجربی بررسی شده است. نانوسیال استفاده شده در این تحقیق به‌صورت تک‌مرحله‌ای سنتز شده است و پایداری بسیار بالایی دارد. تکرارپذیری و دقت دستگاه آزمایش در سه مرتبه برای آب بدون یون انجام شده است که تطبیق بسیار خوبی با روابط موجود در تاریخچه دارد. با بررسی غلظت‌های حجمی متفاوت از نانوسیال، انتقال حرارت جوشش در غلظت‌های بالا با افزایش غلظت کاهش و در غلظت‌های پایین با افزایش غلظت افزایش می‌یابد. بنابراین ضریب انتقال حرارت جوشش در 0.1 درصد حجمی از نانوسیال دارای مقدار بهینه بوده و حداکثر به میزان 43 درصد افزایش می‌یابد. زبری سطح جوشش با رسوب نانوذرات در اثر شرایط مختلف غلظت نانوسیال و شار حرارتی سطح جوشش در طول زمان تغییر می‌کند.لازم به‌ذکر است که در این پژوهش اثر تغییرات زبری سطح به دلیل رسوب نانوذرات و تاثیر گذشت زمان در فرایند جوشش برای نخستین بار مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین جهت بررسی تغییر رسوب نانوذرات در اثر تغییر غلظت نانوسیال و شار حرارتی سطح جوشش آزمایش‌هایی طرح شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که انتقال حرارت جوشش روی سطوح رسوب کرده با شارحرارتی پایین کاهش و روی سطوح رسوب کرده با شار حرارتی بالا افزایش می‌یابد.

Experimental analysis of pool boiling heat transfer of ferrofluid on surfaces deposited with nanofluid

Ali Abdollahi[1], Mohammad Reza Salimpour[1*], Nasrin Etesami[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
2- Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
* P.O.B. 841568311, Isfahan, Iran, salimpour@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 November 2015
Accepted 15 December 2015
Available Online 25 January 2016

Keywords:
Pool boiling
Ferrofluid
Surface roughness
Nanoparticles deposition

ABSTRACT

Boiling heat transfer is one of the most applicable heat transfer processes within the industry. In this paper, the pool boiling heat transfer of Fe3O4 /water nanofluid (ferrofluid) in atmospheric pressure has been analyzed experimentally. The nanofluid in this study has been synthesized in a single step and retains high stability. The replication and accuracy of the testing machine has been studied for deionized water three times, indicating an appropriate concordance with the literature. Considering different volume concentrations of the nanofluid has revealed that boiling heat transfer in high concentrations decreases with an increase of concentration, while it rises with the increase of concentration in low concentrations. Hence, boiling heat transfer coefficient in 0.1% volume concentration nanofluid has been measured to be the optimum value which increases up to 43%. The roughness of boiling surface was varied with the deposition of nanoparticles in various conditions of nanofluid concentration, and heat flux. It is noteworthy that in the present research, the effects of surface roughness change due to nano particles deposition and the impact of passing time on boiling process have been investigated for the first time. Therefore, several experiments have been designed in order to study the change of nanoparticles deposition due to the change of nanofluid concentration and boiling surface heat flux. The results indicate that boiling heat transfer of deposited surfaces at low heat fluxes decreases, while it rises at high heat fluxes.

1- مقدمه

انتقال حرارت جوشش به‌عنوان یکی از انواع موثر و کارآمد انتقال حرارت می‌باشد، که در کاربردهای مختلف مهندسی شناخته شده است. افزایش انتقال حرارت جوشش یکی از موضوعات مورد علاقه محققان در قرن اخیر

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
A. Abdollahi, M. R. Salimpour, N. Etesami, Experimental analysis of pool boiling heat transfer of ferrofluid on surfaces deposited with nanofluid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 19-30, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-11-01]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.24.9]

بوده است. روش‌های مختلف برای افزایش انتقال حرارت به دو دسته فعال و غیر فعال تقسیم می‌شوند. روش‌های غیرفعال مانند سطوح زبر، سطوح گسترش یافته و افزودن مواد به سیال و روش‌های فعال مانند بکار بردن میدان الکترواستاتیک و ارتعاش سطح یا سیال می‌باشند [1-3].

نانوسیال به عنوان سوسپانسیون نانوذرات جامد (با اندازه کوچکتر از 100 نانومتر) در مایعات معمولی شناخته شده است. اضافه کردن نانوذرات یک روش غیرفعال برای افزایش انتقال حرارت جوشش در نظر گرفته شده است. تحقیقات بسیاری در زمینه انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال‌ها انجام شده است که در زیر مرور مختصری انجام شده است [4].

سوریاونگ و ونگ‌وایسس انتقال حرارت جوشش نانوسیال آب/اکسید تیتانیوم را روی دو سطح مسی و آلومینومی بررسی کردند. ضریب انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال روی سطح مسی بالاتر از سطح آلومینیوم بود. این تفاوت در ضریب انتقال حرارت جوشش احتمالا ناشی از ویژگی‌های سطح گرمکن ها و نانوسیال با تغییر در نیروی تعادل در خط سه‌گانه، تشکیل حباب و جدایش آن‌ها می‌باشد [5].

کیم و همکاران ویژگی‌های انتقال حرارت جوشش استخری سوسپانسیون نانوذرات آلومینیوم، اکسید زیرکونیوم و سیلیکون در آب در غلظت‌های حجمی کم (کوچکتر از 0.1 درصد حجمی) را بررسی کرده‌اند. از یک سیم به جنس فولاد زنگ نزن با قطر 0.381 میلی‌متر و طول 120 میلی‌متر به عنوان منبع حرارتی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در حین جوشش هسته‌ای برخی نانوذرات روی سطح گرمکن رسوب می‌کنند. این لایه رسوب ترشوندگی سطح را از طریق کاهش زاویه تماس استاتیکی روی سطح گرمکن افزایش می‌دهد. بنابراین با افزایش ترشوندگی سطح احتمال پر شدن حفره‌ها با نانوسیال افزایش، چگالی سایت‌های هسته‌زایی کاهش و ضریب انتقال حرارت جوشش کاهش می‌یابد [6].

داس و همکاران ویژگی‌های انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال آب/اکسید آلومینا را روی سیلندرهای افقی با زبری‌های متفاوت سطح بررسی کرده‌اند. در این آزمایش‌ها از نانوسیال با 4 تا 16 درصد وزنی استفاده شده است. این محققان زبری سطح را 0.37 تا 0.45 میکرومتر گزارش کردند که زبری سطح یک مرتبه نسبت به اندازه ذرات بزرگتر بود. نتایج نشان داد که رسوب نانوذرات بر روی سطح باعث پر شدن حفره‌ها و کاهش انتقال حرارت می‌شود. ضریب انتقال حرارت جوشش با افزایش غلظت نانوذرات کاهش پیدا می‌کرد. بنابراین کاهش انتقال حرارت به زبری سطح و درصد وزنی نانوذرات وابسته بود [8,7].

چوپکار و همکاران آزمایش‌های انتقال حرارت جوشش استخری را روی یک گرمکن زبر (0.5- 0.7 میکرومتر) با نانوسیال اکسید زیرکونیوم در آب (با متوسط اندازه قطر نانوذرات 20-25 نانومتر) در غلظت‌های کم (کمتر از 0.15 درصد حجمی) انجام داده‌اند. آن‌ها مشاهده کردند با این‌که زبری سطح گرمکن برای جوشش نانوسیال (0.005 درصد حجمی) کاهش می‌یابد ولی ضریب انتقال حرارت جوشش افزایش می‌یابد [9].

بانگ و چانگ انتقال حرارت جوشش نانوسیال آب /اکسید آلومینا را روی یک سطح صاف‌تر مطالعه کرده‌اند. این آزمایش بر روی یک سطح مستطیل شکل با مساحت 400 میلی‌متر مربع انجام شده است. زبری سطح (37.22 نانومتر) در این آزمایش حدود 10 نانومتر از متوسط اندازه نانو ذرات (47 نانومتر) کوچکتر بوده است. این آزمایش‌ها برای نانوسیال با 2 تا 14 درصد وزنی انجام شد. آن‌ها مشاهده کردند با این‌که زبری سطح گرمکن افزایش می‌یابد، با افزایش غلظت نانوسیال ضریب انتقال حرارت جوشش کاهش می‌یابد. در ضمن نتایج نشان می‌دهد که عملکرد انتقال حرارت نانوسیال در مقایسه با آب هم برای انتقال حرارت جابجایی آزاد و هم برای جوشش هسته‌ای کاهش می‌یابد. آن‌ها با افزایش غلظت، کاهش ضریب انتقال حرارت و بالعکس افزایش شار حرارتی بحرانی را گزارش کردند [10].

ناریان و همکاران جوشش نانوسیال آب /اکسید آلومینا (با قطر متوسط نانوذرات 47 و 150 نانومتر) را بر گرمکن‌های لوله‌ای عمودی با زبری مختلف بطور تجربی آزمایش کردند. زبری گرمکن‌های بکار رفته در اندازه‌های 48، 49 و 524 نانومتر گزارش شد.آن‌ها در این گزارش اعلام کردند که برای درصدهای وزنی بالا (4-16 درصد وزنی) از نانوسیال، انتقال حرارت جوشش با افزایش غلظت نانوسیال کاهش می‌یابد. در این تحقیق به بررسی نانوسیال‌ها با درصد وزنی کم (0.32- 1.25 درصد وزنی) پرداخته شده است. ضریب انتقال حرارت جوشش استخری برای متوسط سایز نانوذرات 48 نانومتر، در زبری سطح 524 نانومتر تا حدود 70% برای غلظت 0.5 درصد وزنی و در زبری 48 نانومتر تا حدود 45% برای غلظت 2 درصد وزنی کاهش یافت. آن‌ها پارامتر برهم‌کنش سطح که نسبت زبری سطح تقسیم بر قطر متوسط ذرات می‌باشد را تعریف کردند. با استفاده از این پارامتر استدلال کردند، زمانی که این پارامتر بیشتر از یک باشد زبری سطح بسیار بیشتر از اندازه ذرات بوده و انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در این حالت نانوذرات در حفره‌های بزرگ می‌نشینند، سایت‌های هسته‌زایی به چندین سایت هسته‌زایی تقسیم می‌شوند، چگالی سایت‌های هسته‌زایی افزایش یافته و مکان‌های تشکیل حباب بیشتر و انتقال حرارت افزایش می‌یابد. طبق نتیجه‌گیری آن‌ها در صورتی که ابعاد ذرات کوچکتر از ابعاد زبری سطح باشند مکان‌های هسته‌زایی تا حد زیادی کاهش می یابند، سبب انسداد این نقاط شده و انتقال گرما کاهش می‌یابد [11]. محققانی دیگری نیز موارد زبری سطح و غلظت نانوسیال را بطور جداگانه بررسی کردند. به‌عنوان نمونه سلیمانی و همکاران تاثیر زبری سطح را بر فرایند جوشش بصورت آزمایشگاهی بررسی نمودند و افزایش زبری سطح را دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش گزارش کردند [12]. ملک پور و همکاران تاثیر غلظت و جنس نانوسیال را بر جوشش استخری مورد بررسی قرار دادند و در این تحقیق دو نوع نانوسیال آلومینا و تیتانیا در غلظت‌های مختلف با هم مقایسه شدند. نانوسیال تیتانیا رفتار بدتری از خود نشان دادند [13].

شاه‌مرادی و همکاران جوشش استخری نانوسیال آب /اکسید آلومینا با غلظت‌های متفاوت کمتر از 0.1 درصد حجمی را روی صفحه تخت بررسی کردند. در این تحقیق پارامترهای مختلف مانند ضریب انتقال حرارت، شار حرارتی بحرانی، چگونگی تغییر ساختار سطح جوشش و نیز ترشوندگی سطح مورد بررسی قرار گرفت. با پارامتر برهم‌کنش سطح کوچکتر از واحد، ضریب انتقال حرارت کاهش یافته در حالی که شار حرارتی بحرانی افزایش می‌یابد. دلیل اصلی این کاهش ضریب انتقال حرارت را پر شدن سایت‌های هسته‌زایی در هنگام جوشش توسط نانوذرات رسوب کرده و ایجاد مقاومت حرارتی لایه رسوب گزارش کردند و افزایش شار حرارتی بحرانی بدلیل افزایش خاصیت ترشوندگی سطح عنوان شد. تصاویر AFM[1] سطح نشان داد که زبری سطح بعد از جوشش به‌دلیل شرایط اولیه سطح ممکن است افزایش یا کاهش یابد [14].

روشی و همکاران انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال آب- اتیلن

1- Atomic Force Microscopy(AFM)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-11-01]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.24.9]

گلیکول/آلومینا با غلظت‌های متفاوت کمتر از 1 درصد حجمی را روی گرمکن استوانه‌ای بررسی کرده‌اند. زبری سطح گرمکن بیشتر از دو مرتبه از متوسط سایز نانوذرات بزرگتر بوده است، بنابراین پارامتر برهم کنش سطح بزرگتر از واحد است. روش اندازه گیری دمای سطح در این مقاله برخلاف دیگر محققان که بصورت مستقیم بوده بصورت برونیابی بوده است. آن‌ها گزارش کردند که با افزایش غلظت، چگالی سایت‌های هسته‌زایی بیشتر و زبری سطح افزایش و میزان ضریب انتقال حرارت جوشش نیز افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت از 0.75 درصد حجمی به 1 درصد حجمی انتقال حرارت کاهش می‌یابد. بنابراین میزان درصد غلظت حجمی نانوسیال دارای یک مقدار بهینه می‌باشد [3].

تغییر زبری سطح، چگالی سایت‌های هسته‌زایی و محدوده شار حرارتی از جمله عوامل اثر گذار در تغییر ضریب انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال می‌باشند. از طرفی زبری سطح بعد از رسوب نانوسیال به غلظت و ویژگی نانوسیال، زبری و جنس سطح اولیه، ضخامت و ساختار نانوذرات رسوب کرده، دما و شار حرارتی سطح بستگی دارد. از آن‌جایی که نانوذرات رسوب کرده می‌توانند زبری سطح و چگالی سایت‌های فعال جوشش را تغییر دهند، بنابراین ویژگی‌های زیر لایه سطح جوشش با افزایش ضخامت رسوب نانوذرات در طول زمان تغییر می‌کند. با توجه به تاریخچه، بررسی تغییر زبری سطح بعد از رسوب نانوسیال با غلظت نانوسیال، محدوده شار حرارتی و تاثیر گذشت زمان در فرایند جوشش به ندرت انجام شده است. در این مطالعه بررسی انتقال حرارت جوشش نانوسیال اکسید آهن/آب بدون یون بر روی یک سطح تخت مسی، در فشار اتمسفریک انجام شده است. در ابتدا تاثیر افزایش درصد حجمی غلظت نانوسیال بر مشخصات جوشش بررسی شده است. از آن‌جا که زبری سطح بعد از رسوب نانوسیال به غلظت نانوسیال و شار حرارتی سطح بستگی دارد، با انجام آزمایش‌هایی به بررسی این عوامل پرداخته شده است. ابتدا تغییر ضریب انتقال حرارت جوشش نانوسیال در اثر رسوب نانوسیال روی سطح، توسط آزمایش انتقال حرارت جوشش بررسی شده است. در ادامه آزمایش‌هایی برای بررسی تغییر انتقال حرارت جوشش نانوسیال روی سطح با نانوسیال رسوب کرده در همان غلظت ولی در شارهای حرارتی کم و زیاد بررسی شده است. آن‌چه به عنوان سوال مطرح می‌باشد این است که آیا میان ویژگی‌های انتقال حرارت جوشش روی سطح صیقلی در هر آزمایش جوشش و روی یک سطح با نانوسیال رسوب کرده بعد از آزمایش جوشش یا روی یک سطح با نانوسیال رسوب کرده با یک شار حرارتی یکسان (کم یا زیاد) تفاوتی وجود دارد؟

2- مواد و روش‌ها

2-1- تهیه نانوسیال

نانوسیال با استفاده از روش تک‌مرحله‌ای توضیح داده شده توسط برگر و همکاران [15] سنتز شده است. تمام مواد استفاده شده در این سنتز از شرکت مرک[1] خریداری شده و معادله شیمیایی سنتز نانوسیال بصورت زیر می‌باشد:

$$FeCl_2 + 2FeCl_3 + 8NH_3 + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 8NH_4Cl \quad (1)$$

ابتدا یک میلی‌لیتر محلول کلرید آهن II (محلول دو مولار $FeCl_2$ در HCl دومولار) با4 میلی‌لیتر محلول کلرید آهن III (محلول یک مولار $FeCl_3$ در HCl دومولار) با هم ترکیب شده‌اند. در ادامه 50 میلی‌لیتر محلول 0.7 مولار آمونیاک با سرعت 375 میلی‌لیتر بر ساعت بوسیله پمپ سرنگی به آن اضافه شد. در حین اضافه کردن آمونیاک، محلول تیره شده و ذرات Fe_3O_4 تشکیل می‌شوند. با سانتریفیوژ کردن محلول، رسوب بسیار تیره در انتهای ظرف باقی می‌ماند. در نهایت 8 میلی‌لیتر تترامتیل‌آمونیوم هیدروکساید 25 درصد به رسوب اضافه شده تا سوسپانسیون جامد در مایع با هم‌زدن مناسب ایجاد شود. با قرار دادن محلول نهایی در همزن به مدت 30 دقیقه آمونیاک اضافی از محلول جدا خواهد شد [15].

تست TEM[2] برای بررسی اندازه نانوذرات استفاده می‌شود. شکل 1 نتیجه این تست را برای غلظت 0.1 درصد حجمی از نانوسیال نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، اندازه متوسط نانوذرات با استفاده از مقیاس نشان داده شده در شکل و اندازه‌گیری چند نانوذره حدود 25 نانومتر به‌دست می‌آید.

تست XRD[3] برای تشخیص نتیجه سنتز با توجه به الگوهای شناخته شده از ذرات مختلف بکار برده می‌شود. شکل 2 نمودار الگوی XRD مربوط به نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) سنتز شده بدون سورفاکتانت را نمایش می‌دهد. نمودار الگوی XRD نشان می‌دهد که شکست‌های پیک‌ها در (220)، (311)، (222)، (400)، (422)، (511) و (440) اتفاق می افتد که با الگوی اکسید آهن (Fe_3O_4) همخوانی بسیار خوبی دارد. در ضمن این الگو درجه خلوص بسیار بالای این محصول را نشان می‌دهد.

جهت بررسی پایداری نانوسیال سنتز شده از آزمایش پتانسیل زتا استفاده می‌شود. پتانسیل زتا، بار الکتریکی (ζ) در سطح ذرات را اندازه

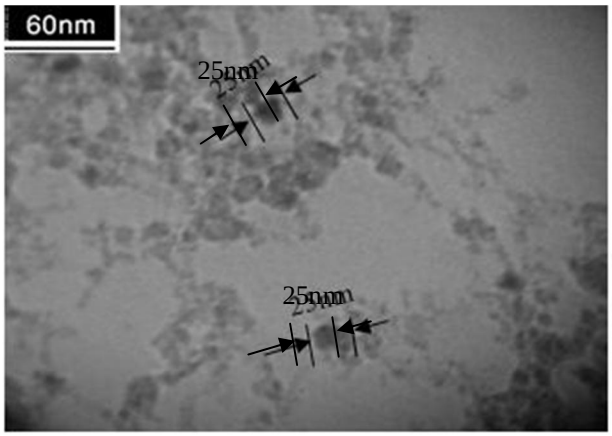


Fig. 1 Transmission electron microscopy picture of synthesized Iron Oxide/Water nanofluid

شکل 1 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوسیال اکسید آهن/ آب سنتز شده

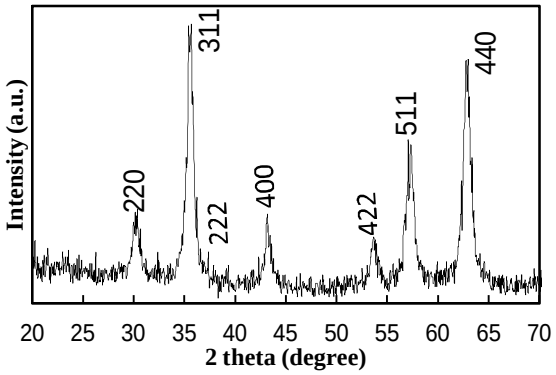


Fig. 2 X-Ray Diffraction pattern of synthesized Fe_3O_4 nanoparticles

شکل 2 نمودار الگوی XRD برای نمونه نانوذرات سنتز شده Fe_3O_4

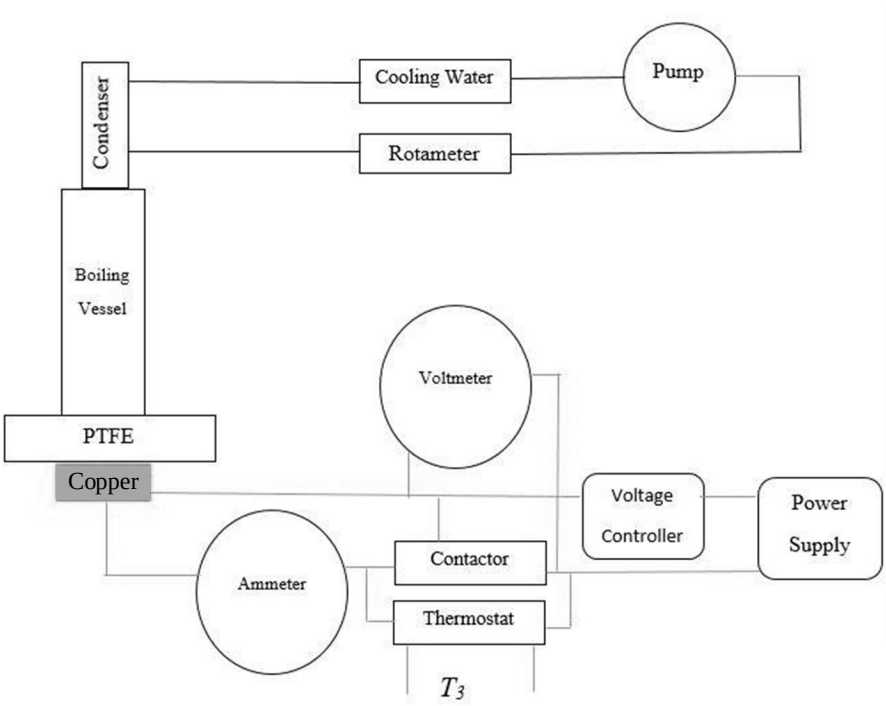
1- Merck

2- Transmission Electron Microscopy(TEM)

3- X-Ray Diffraction(XRD)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-11-01]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.24.9]



a

b

Fig. 3 Experimental setup, a) Schematic view, b) Actual image

شکل 3 دستگاه آزمایش، الف- طرح‌واره، ب- تصویر واقعی

می‌گیرد و پایداری فیزیکی سیستم‌های کلوئیدی را نشان می‌دهد. در مطالعات پیشین گزارش شده است که سوسپانسون‌های نانوذرات در مقادیر قدر مطلق زتا بزرگتر از 30 میلی‌ولت کاملا پایدار می‌شوند [16]. در کار حاضر مقدار پتانسیل زتا نانوسیال با غلظت 0.1 درصد حجمی در pH 7 تا 8، 44.1- میلی ولت بود، که نشان از پایداری بسیار زیاد آن است.

2-2- دستگاه آزمایش

دستگاه کلی انتقال حرارت جوشش از چهار قسمت بلوک مسی استوانه‌ای، محفظه اصلی جوشش، سیستم خنک‌کننده و سیستم کنترل توان، تشکیل شده است. شکل 3 نمایی از این دستگاه را نشان می‌دهد.

محفظه اصلی جوشش مطابق شکل 4 یک ظرف پیرکس استوانه‌ای با ارتفاع 250 میلی‌متر و قطر خارجی 55 میلی‌متر و ضخامت شیشه 5 میلی‌متر می‌باشد. انتهای شیشه به یک استوانه تفلونی چسب شده است. استوانه تفلونی با ضخامت 90 میلی‌متر و قطر 300 میلی‌متر جهت عایق‌کاری بلوک مسی استفاده شده است. جنس استوانه تفلونی PTFE [1](پلی تترا فلوراتیلن) استفاده شده است.

ضریب انتقال حرارت PTFE با استفاده از دستگاه Kd2 Pro (با دقت 0.01)، 0.29 W/mK اندازه‌گیری شده که نشان دهنده هدایت گرمایی بسیار پایین آن است. در مرکز این استوانه تفلونی برای قرار گرفتن بلوک مسی سوراخی به قطر خارجی 45 میلی‌متر رزوه شده است. بلوک مسی به صورت استوانه از جنس مس، با قطر 45 میلی‌متر و طول 100 میلی‌متر می‌باشد. ضریب انتقال حرارت مس 401 W/mK اندازه گرفته شده است. از آن‌جا که ضریب انتقال حرارت مس چندین مرتبه بزرگ‌تر از ضریب انتقال حرارت

1- Polytetrafluoroethylene

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-11-01]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.24.9]

PTFE است، انتقال حرارت در جهت شعاعی به کمترین مقدار خود می‌رسد. در مس سه المنت به قطر 9 میلی‌متر و طول 50 میلی‌متر از جنس استیل با توان 800 وات از کف جاسازی شده است. با استفاده از انتقال گرما هدایتی، انرژی گرمایی به سطح بلوک مسی منتقل می‌شود.

شکل 5 هندسه بلوک مسی با مکان‌هایی که هیترها تغذیه می‌شوند را نشان می‌دهد. سطح انتقال حرارت جوشش، در سطح بالایی مس که در تماس با سیال است قرار دارد. همان‌طور که در شکل 5 دیده می‌شود بلوک مسی دارای سه سوراخ در بدنه و سه سوراخ در زیر آن می‌باشد. سه سوراخ در بدنه محل قرار گیری ترمومتر مقاومتی PT-100 جهت اندازه‌گیری دما می‌باشد. عمق سوراخ ها 22.5 میلی‌متر و تا وسط استوانه مسی می‌باشد. قطر آن‌ها 3 میلی‌متر و در فواصل 7 ، 19 و 30 میلی‌متر (با عدم قطعیت 0.1 میلی‌متر) از سطح بالایی مس و با زاویه 120 درجه از هم قرار دارند. در ضمن جهت سنجش یک بعدی بودن انتقال حرارت، اندازه‌گیری دما در فاصله 30 میلی‌متری از سطح و در چند زاویه مختلف انجام شده است. عمق این سوراخ‌ها در زوایای مختلف نیز متفاوت بوده است. اختلاف دماهای اندازه‌گیری شده در این حالت کمتر از 0.1 کلوین است. سه سوراخ در زیر استوانه مسی جهت قرار گیری المنت های 800 واتی می‌باشند. این سوراخ‌ها دارای قطر 9 میلی‌متر، عمق 50 میلی‌متر بوده با زاویه 120 درجه نسبت به یکدیگر قرار دارند. سطح جوشش در هر آزمایش با ورق شماره 320 سنباده خورده است و با استفاده از استون و آب بدون یون تمیز می‌شود تا شرایط سطح در تمام آزمایش‌ها یکسان باشد. متوسط زبری سطح جوشش در این حالت با دستگاه زبری‌سنج (مدل: SJ210) برابر R_a=0.48μm اندازه گرفته شده است. عدم قطعیت استاندارد اندازه گیری زبری سطح در حدود 10 درصد است. جهت جلوگیری از اتلاف حرارتی قسمت پایینی مس کاملا با عایق حرارتی پشم سنگ پوشانده شده است.

سیستم خنک‌کننده جهت ثابت نگه داشتن سطح سیال داخل محفظه جوشش به کار می‌رود. همان‌طور که در شکل 3 دیده می‌شود این سیستم شامل یک کندانسور شیشه‌ای به طول 150 میلی‌متر می‌باشد، که روی شیشه

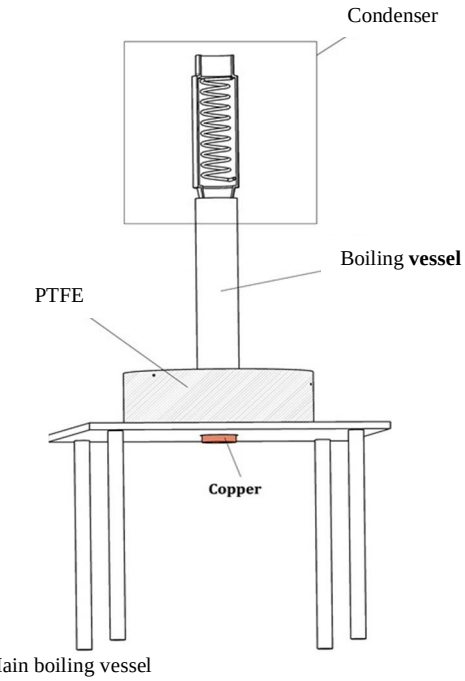


Fig. 4 Main boiling vessel

شکل 4 محفظه اصلی جوشش

پیرکس قرار می‌گیرد. لوله انتهایی کندانسور که روی شیشه پیرکس قرارمی‌گیرد، به صورت مخروطی می‌باشد و از قطر 30 میلی‌متر تا قطر 60 میلی‌متر زیاد می‌شود. بنابراین با استفاده از نوار تفلونی که در این قسمت پیچیده می‌شود، کاملا ناحیه بین محفظه شیشه‌ای و کندانسور آب‌بندی می‌شود. آب مخصوص خنک‌کاری کندانسور از داخل ظرف خنک‌کاری پمپ شده و با گذشتن از روتامتر وارد کندانسور می‌شود. آب خنک بخارهای جوشش را کندانس می‌کند و سپس بخار کندانس شده به محفظه جوشش برمی‌گردد. آب خروجی از کندانسور نیز وارد ظرف خنک کاری می‌شود. از آنجا که طرف بخار کندانسور رو به اتمسفر باز است بنابراین فشار محفظه جوشش با فشار اتمسفر یکسان است. با مقایسه توان ورودی و میزان افزایش انرژی در سیستم خنک کننده میزان اتلاف انرژی در شرایط کاری کمتر از 10 درصد است.

جهت بدست آوردن نقاط مختلف منحنی جوشش از سیستم کنترل توان مانند شکل 3 استفاده می‌شود. این سیستم شامل یک کنترلر ولتاژ (اتوترانس) جهت تغییر ولتاژ و فراهم کردن توان‌های متفاوت ورودی، یک آمپرمتر جهت اندازه‌گیری جریان الکتریکی، یک ولت‌متر جهت اندازه‌گیری ولتاژ و یک کنداکتور جهت کنترل جریان ورودی به المنت‌ها می‌باشد.

جهت بدست آوردن دما در نقاط مختلف بلوک مسی ، دمای اشباع سیال و دمای ورودی و خروجی آب خنک کننده در کندانسور از ترمومتر مقاومتی PT-100 استفاده شده است. تمام ترمومترهای PT-100 در محدوده دمایی مورد نظر کالیبره شده‌اند و دقت آن‌ها در حد 0.1K می‌باشد. جهت نمایش دما از نمایشگر های آتونیکس مدل TC4Y استفاده می‌شود.

3-2- اندازه گیری

جهت بدست آوردن منحنی جوشش نیاز به خواندن دمای سطح جوشش، دمای اشباع سیال و محاسبه شار حرارتی منتقل شده به سیال می‌باشد. خواندن دمای سطح جوشش با استفاده از اتصال مستقیم ترموکوپل بر روی سطح، ایجاد مکان هسته‌زایی اضافی می‌کند، در نهایت در جواب خطای قابل توجهی بوجود می‌آورد. اکثر محققان به طور مستقیم دما را اندازه‌گیری کرده اند و مطالعات کمی در این زمینه وجود دارد که دمای سطح را به‌صورت برونیابی اندازه می‌گیرند [3]. مطابق شکل 6 در محور عمودی بلوک مسی دو ترمومتر مقاومتی PT-100 در فاصله‌های متفاوت از سطح جوشش جاسازی شده‌اند. دمای سطح جوشش در این تحقیق به صورت غیرمستقیم یا به‌صورت برونیابی اندازه گرفته خواهد شد. ترمومتر مقاومتی شماره 3(T_3) جهت کنترل دما توسط ترموستات برای جلوگیری از آسیب رسیدن به سیستم به کار برده شده است.

در هر آزمایش 200 سی‌سی نانوسیال با غلظت‌های موردنظر وارد محفظه اصلی جوشش شده است. سپس نانوسیال برای توان‌های مختلف گرم می‌شود تا به شرایط پایدار برسد، دماها بعد از 10 دقیقه پایداری ثبت می‌شوند ($\frac{dT}{dt} = 0.01 \frac{\mathrm{K}}{\mathrm{min}}$).

همان‌طور که قبلا ذکر شد، از آن‌جایی که بلوک مسی از جنس مس با گرید بالا تهیه شده است و اطراف آن از تفلون PTFE استفاده شده است. بزرگی هدایت حرارتی مس سه مرتبه بزرگتر از PTFE می‌باشد. بنابراین می‌توان از افت حرارتی شعاعی به‌طور کامل صرف‌نظر کرد. شار حرارتی منتقل شده روی سطح جوشش را می‌توان کاملا یک بعدی فرض کرد. میزان شار حرارتی منتقل شده به سطح جوشش با توجه به شکل 6 عبارتست از:

$$q'' = K\frac{T_2 - T_1}{d_2 - d_1} \qquad (2)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-11-01]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.24.9]

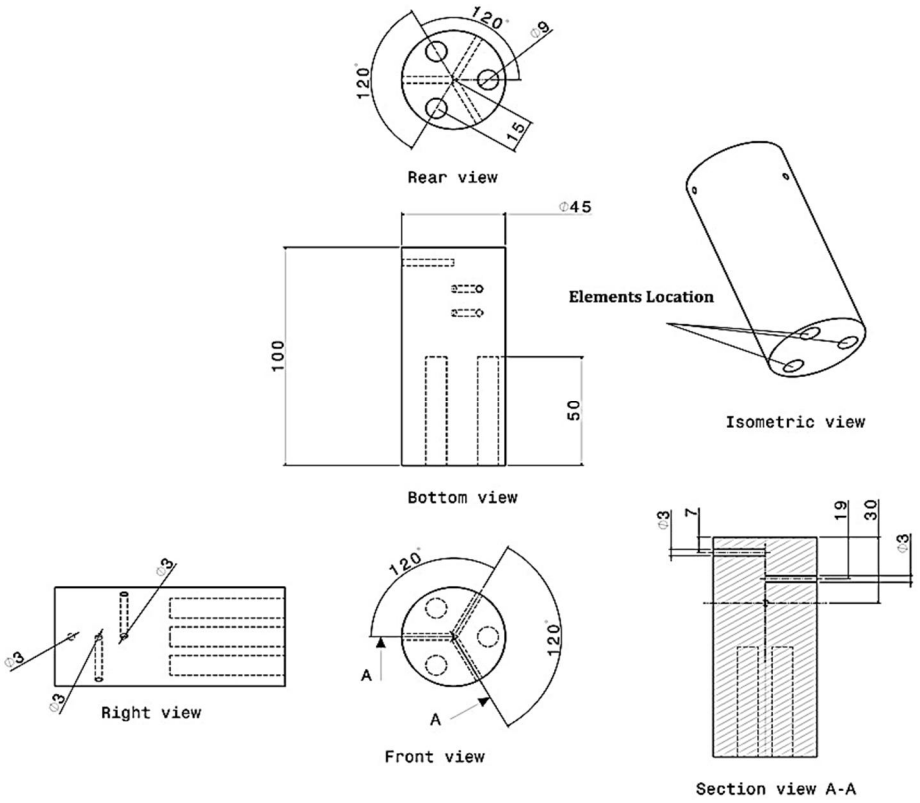


Fig. 5 Geometry of copper cylindrical block (mm)

شکل 5 هندسه بلوک استوانه‌ای مسی (میلی متر)

و دمای سطح جوشش با استفاده از برون‌یابی و با استفاده از شار حرارتی معادله (2) بدست می‌آید. بنابراین اختلاف دمای سطح جوشش و دمای اشباع از معادله (3) بدست می‌آید:

$$\Delta T_S = T_S - T_{\mathrm{sat}} = (T_1 - \frac{q'' d_1}{K}) - T_{\mathrm{sat}} \quad (3)$$

و میزان ضریب انتقال حرارت از شار حرارتی و دمای سوپرهیت دیوار مطابق معادله (4) محاسبه می‌شود.

$$h = \frac{q''}{\Delta T_S} \quad (4)$$

3- نتایج و بحث روی آن‌ها

3-1- منحنی جوشش و تکرار پذیری آزمایش

شکل 7 تکرار پذیری نتایج تجربی شار حرارتی برحسب اختلاف دمای مازاد انتقال حرارت جوشش برای آب بدون یون در فشار اتمسفر و رابطه تجربی روزنو (معادله 5) را نشان داده است [17,14]:

$$\Delta T_S = \frac{h_{fg}}{C_{p,l}} C_{sf} [\frac{q''}{\mu_l h_{fg}} (\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)})^{0.5}]^{\frac{1}{3}} \mathrm{Pr}^n \quad (5)$$

که h_{fg} گرمای نهان سیال، σ کشش سطحی، ρ_l و ρ_v چگالی مایع و بخار، Pr عدد پرانتل، C_{sf} و n ثابت‌هایی هستند که 0.013 و 1 برای سطح مسی صیقلی در نظر گرفته می‌شود.

آنالیز عدم قطعیت براساس روش پیشنهادی موفات [18] مطابق معادلات (6-8) انجام شده است.

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left((\frac{U_{\mathrm{T_2-T_1}}}{T_2 - T_1})^2 + (\frac{U_{\mathrm{d_2-d_1}}}{d_2 - d_1})^2 \right)} \quad (6)$$

$$\frac{U_{\Delta \mathrm{T_s}}}{\Delta T_{\mathrm{s}}} = \sqrt{\left((\frac{U_{T_1 - T_{\mathrm{sat}}}}{T_1 - T_{\mathrm{sat}}})^2 + (\frac{U_{\mathrm{d_1}}}{d_1})^2 + (\frac{U_{q''}}{q''})^2 \right)} \quad (7)$$

$$\frac{U_{\mathrm{h}}}{h} = \sqrt{\left((\frac{U_{q''}}{q''})^2 + (\frac{U_{\Delta \mathrm{T_s}}}{\Delta T_{\mathrm{s}}})^2 \right)} \quad (8)$$

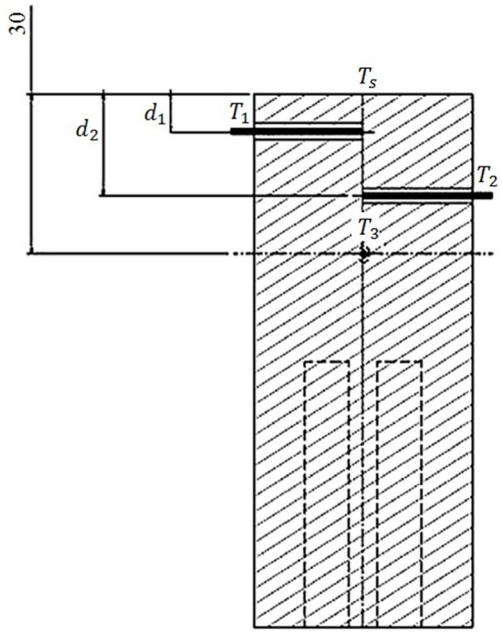


Fig. 6 Arrangement of the PT-100 type thermometers

شکل 6 آرایش ترمومترهای مقاومتی PT-100

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-11-01]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.24.9]

عدم قطعیت برای اندازه‌گیری دما 0.1 کلوین و عدم قطعیت برای اندازه‌گیری فواصل 0.1 میلی‌متر می باشد. نتایج نشان می دهد که بیش‌ترین عدم قطعیت در محاسبه شارحرارتی و ضریب انتقال حرارت جوشش به ترتیب برابر 4 درصد و 5.8 درصد می‌باشد. همانطور که در شکل 7 مشاهده می‌شود نتایج آزمایش‌های تجربی تطبیق بسیار خوبی با رابطه تجربی روزنو دارد. از طرفی با توجه به اهمیت تکرارپذیری، آزمایش‌ها در سه مرتبه با شرایط یکسان در روزهای متفاوت انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های اصلی آزمایش انتقال حرارت جوشش در دفعات بعدی ثابت مانده است. دراین شکل برای جلوگیری از شلوغ شدن شکل عدم قطعیت فقط برای شار حرارتی نشان داده شده است.

3-2- اثر درصد غلظت حجمی روی منحنی جوشش نانوسیال

شکل‌های 8 و 9 نمودارهای انتقال حرارت جوشش نانوسیال‌ها با غلظت‌های حجمی متفاوت در مقایسه با آب بدون یون را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش غلظت نانوسیال تا 0.1 درصد حجمی، ضریب انتقال حرارت جوشش حداکثر تا 43 درصد نسبت به سیال پایه افزایش یافته است. با افزایش درصد حجمی از 0.1 درصد، این مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش نسبت به سیال پایه، کاهش یافته تا اینکه در غلظت حجمی 0.4 درصد حجمی مقدار ضریب انتقال جوشش نسبت به سیال پایه کاهش می‌یابد. بنابراین 0.1 درصد حجمی غلظت نانوسیال مقدار بهینه‌ای است که در آن مقدار ضریب انتقال حرارت ماکزیمم می‌شود. این پدیده توسط محققان دیگرنیز گزارش شده است [19,3-22]. بیشتر محققان جهت توجیه نتایج آزمایشگاهی مشاهده شده، رسوب نانوذرات را روی سطح توصیف کرده اند [14,11,3]. در این تحقیقات پارامتر φ به عنوان نسبت زبری سطح به قطر متوسط ذرات در نظر گرفته شده است. مطابق نتایج این تحقیقات زمانی که پارامتر زبری عدد بزرگتری از یک باشد شار حرارتی در غلظت‌های پایین افزایش و در غلظت‌های بالا کاهش می‌یابد و زمانی که این پارامتر برابر یک یا کمتر از یک باشد شار حرارتی کاهش می‌یابد [11].

در آزمایش‌ها تمام سطوح با ورق شماره 320 سنباده خورده‌اند و زبری تمام آن‌ها مطابق شکل 10- الف برابر480 نانومتر (0.48 میکرومتر) می‌باشد. متوسط زبری سطح جوشش در این حالت با دستگاه زبری‌سنج (مدل SJ210) اندازه گرفته شده است که عدم قطعیت این دستگاه 10 درصد می باشد. با توجه به شکل 1 متوسط قطر ذرات نانو نیز در حدود 25 نانومتر می‌باشد. بنابراین زبری سطح از متوسط قطر ذرات بزرگتر بوده، ذرات کوچکتر در سایت‌های هسته‌زایی می‌نشیند و تشکیل سایت‌های هسته‌زایی جدید می‌دهند. در نتیجه در غلظت‌های کمتر از 0.1 درصد حجمی نانوسیال سایت‌های هسته‌زایی افزایش می‌یابد و انتقال حرارت جوشش افزایش می‌یابد.

با افزایش غلظت نانوذرات انتقال حرارت جوشش کاهش می‌یابد. بنابراین همان‌طور که کسر جزیی افزایش می‌یابد ذرات بیشتری در محدوده اندازه سایت‌های هسته‌زایی قرار می‌گیرند و نیروی چسبدگی با افزایش قطر ذرات زیاد می‌شوند [23]. بنابراین ذرات بزرگتر جذب مکان هسته‌زایی می‌شوند و به خاطر اتصال ذرات، مکان‌های هسته‌زایی غیرفعال می‌شوند و انتقال حرارت کاهش می‌یابد [14,11,3]. از طرفی با افزایش غلظت حجمی نانوسیال لزجت سیال بیشتر شده و جدایش حباب‌های جوشش را مهار می‌کند و باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود.

3-3- انتقال حرارت جوشش بر روی سطوح رسوب کرده با نانوسیال

جهت بررسی اثر زبری سطح ایجاد شده بوسیله نانوذرات رسوب کرده بر

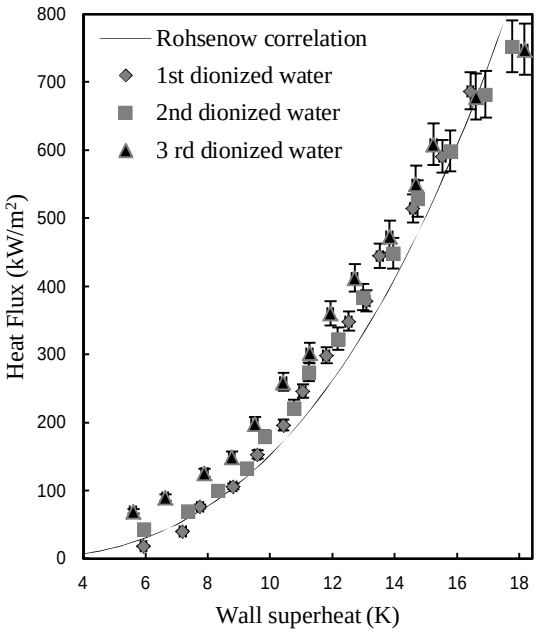


Fig. 7 Heat flux versus wall superheat of the deionized water compared with Rohsenow's correlation

شکل 7 شار حرارتی برحسب اختلاف دمای مازاد آب بدون یون در مقایسه با رابطه روزنو

پارامترهای جوشش یک دسته آزمایش انتقال حرارت جوشش به شرح جدول یک طراحی و انجام شد. مقادیر زبری قبل از هر آزمایش توسط دستگاه زبری سنج (مدل: SJ210) اندازه گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل 11 نتایج مربوط به آزمایش 1 و 2 دیده می‌شود، این آزمایش‌ها برای نانوسیال با دو غلظت حجمی 0.1 و 0.5 درصد انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثر رسوب سطح در غلظت‌های بالای نانوسیال متمایزتر است. در غلظت های پایین (0.1 درصد حجمی) تغییر هندسه سطح کمتر از غلظت‌های بزرگ اتفاق می‌افتد و تشکیل مکان‌های هسته‌زایی در غلظت‌های بزرگتر باعث افزایش انتقال حرارت شده و این تفاوت بهتر مشاهده می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از شلوغ شدن در ارائه نتایج، نتایج آزمایش‌های فوق را برای غلظت 0.5 درصد حجمی آورده شده است.

با توجه به شکل 11 مشاهده می‌شود از آن‌جا که در شارهای حرارتی پایین حفره‌های بزرگتر فعال می‌شوند، بنابراین در این شارها حفره‌ها توسط نانوذرات مسدود شده و با افزایش مقاومت حرارتی سطح، انتقال حرارت جوشش کاهش می‌یابد. اما در شارهای حرارتی بالا حفره‌های کوچکتر فعال می‌شوند بنابراین رسوب نانوذرات باعث افزایش سایت‌های هسته‌زایی، آسانتر جدا شدن حباب‌ها از روی سطح و افزایش انتقال حرارت جوشش نانوسیال شده است. بنابراین ضریب انتقال حرارت جوشش در شارهای حرارتی پایین کاهش و در شارهای حرارتی بالاتر افزایش می‌یابد [24].

شکل 12 نتایج آزمایش‌های 1 تا 4 را برای غلظت 0.5 درصد حجمی نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود با انجام آزمایش 2 روی سطح بدست آمده از آزمایش 1 انتقال حرارت افزایش می‌یابد. علت این افزایش را می‌توان ناشی از افزایش زبری و افزایش مکان‌های هسته‌زایی در آزمایش 2 دانست. نتیجه دیگری که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود افزایش انتقال حرارت در شارهای حرارتی بالاتر که علت این افزایش را می توان ناشی از

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-11-01]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.24.9]

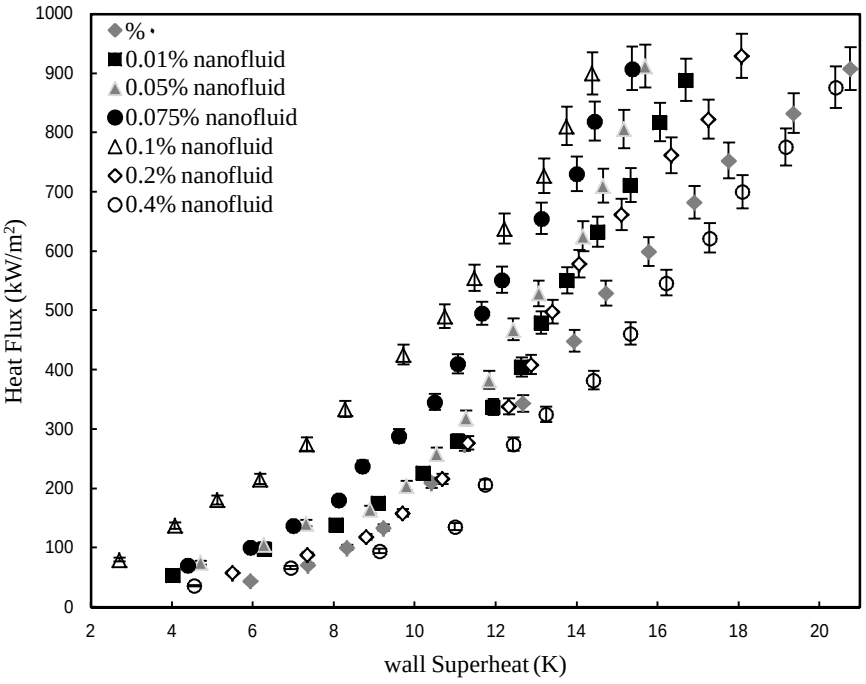


Fig. 8 Heat flux versus wall superheat for different volume concentrations of the nanofluid

شکل 8 شار حرارتی بر حسب اختلاف دمای مازاد برای غلظت های حجمی متفاوت نانوسیال

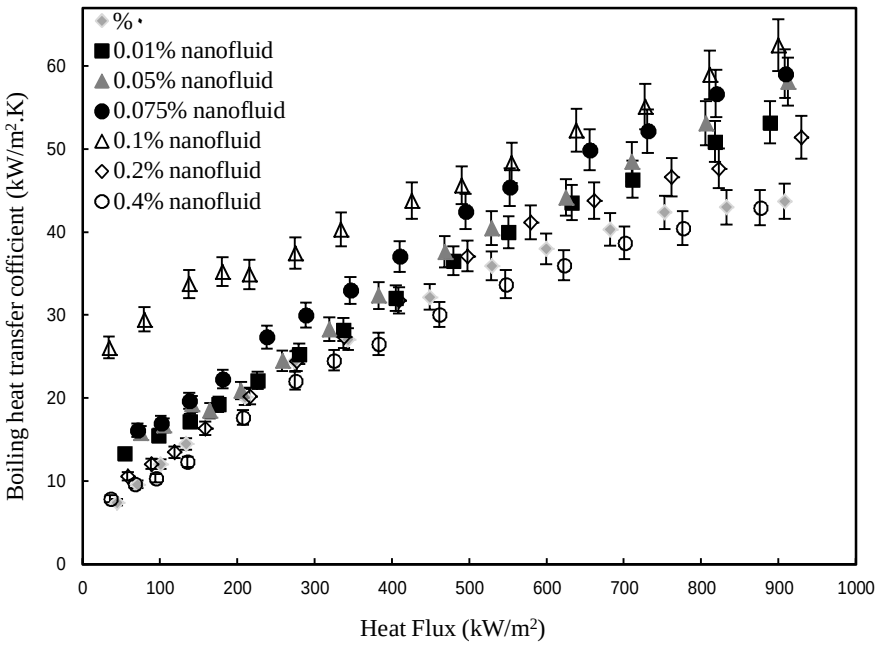


Fig. 9 Boiling heat transfer coefficient versus heat flux for different volume concentrations of the nanofluid

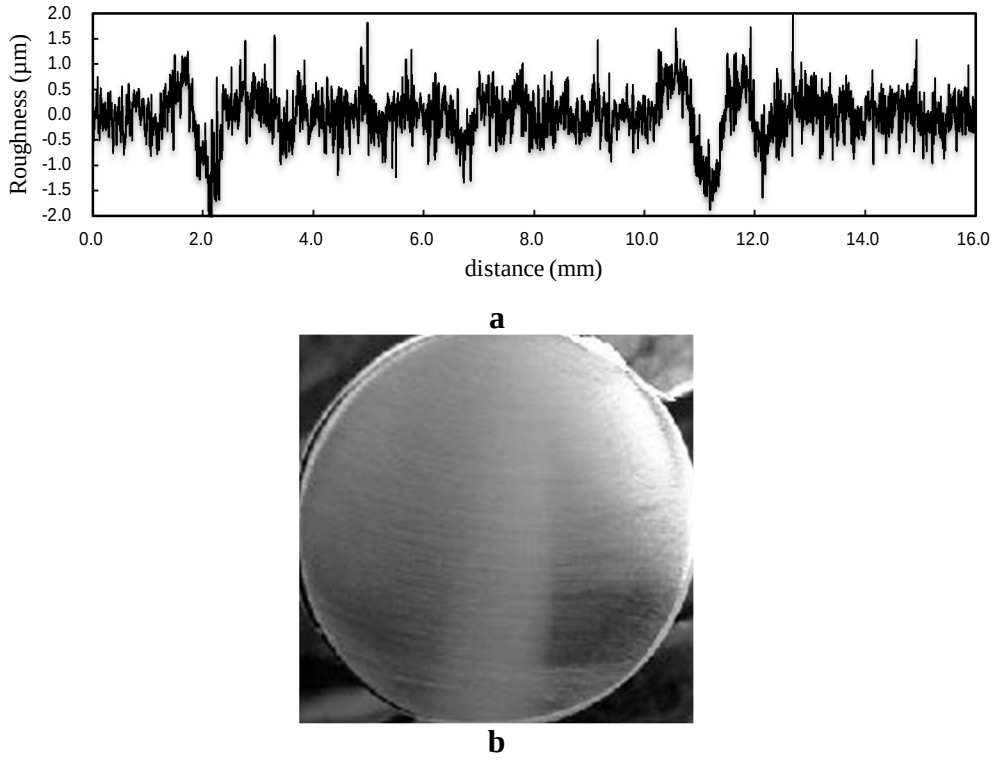
شکل 9 ضریب انتقال حرارت جوشش بر حسب شار حرارتی برای غلظت های حجمی متفاوت نانوسیال

انتقال ناحیه جوشش از ناحیه جابجایی آزاد به ناحیه جوشش هسته‌ای دانست. از آن‌جا که در ناحیه جابجایی آزاد (شارهای پایین) خواص سیال ثابت است بنابراین شار حرارتی در این ناحیه تغییر چندانی نمی‌کند. در ناحیه جوشش هسته‌ای (شارهای بالا) شکل سطح، تعداد مکان‌های هسته‌زایی، نحوه جدایش حباب از سطح بسیار مهم است، بنابراین ضریب انتقال حرارت جوشش بخاطر افزایش زبری و مکان‌های هسته‌زایی افزایش قابل توجهی دارد.

با انجام دوباره آزمایش 3 مقدار انتقال حرارت افزایش می‌یابد، که ناشی از افزایش مکان‌های هسته‌زایی و جدایش حباب در شارهای حرارتی بالا می‌باشد. آزمایش 4 در مقایسه با آزمایش 3 افزایش قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با تکرار این آزمایش در دفعات بعدی در مقدار انتقال حرارت تغییر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نخواهد شد. نتایج متوسط زبری سطح جوشش قبل از آزمایش‌های 1 تا 4 در جدول یک نشان می‌دهد که زبری سطح قبل از آزمایش 2 نسبت به آزمایش 1 تغییر قابل ملاحظه‌ای داشته، زبری سطح قبل از آزمایش 3 نسبت به آزمایش 2

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-11-01]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.24.9]



(الف)

Fig. 10 a) Profile of surface roughness, b) Image of surface

شکل 10 الف- پروفیل زبری سطح، ب- تصویر سطح

افزایش یافته، اما این زبری قبل از آزمایش 4 نسبت به آزمایش 3 تغییر قابل ملاحظه‌ای نکرده است.

بنابراین ضریب انتقال حرارت جوشش آزمایش 2 افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد و ضریب انتقال حرارت آزمایش 3 افزایش ولی ضریب انتقال حرارت آزمایش 4 در حد آزمایش 3 خواهد بود. قابل توجه است تکرار این آزمایش‌ها در مرتبه‌های بعدی نیز تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان انتقال حرارت ایجاد نخواهد کرد زیرا تاثیر میزان افزایش زبری که منجر به افزایش انتقال حرارت می‌شود در مقابل افزایش ضخامت رسوب که به افزایش مقاومت حرارتی و کاهش انتقال حرارت می‌انجامد خنثی می‌شود. بنابراین به علت شلوغ شدن نمودار تکرارهای بعدی آزمایش نیاورده شده است.

شکل 13 نتایج آزمایش‌های 5 و 6 را در مقایسه با نتایج آزمایش 1 برای غلظت 0.5 درصد حجمی نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول یک آورده شده است با استفاده از آزمایش‌های 5 و 6 تغییر زیادی در زبری سطح ایجاد نمی‌شود. در این حالت مقاومت حرارتی سطح با افزایش رسوب نانوذرات روی سطح، افزایش می‌یابد. با جوشش در شارهای حرارتی پایین مقدار مقاومت حرارتی سطح افزایش و باعث کاهش انتقال حرارت جوشش در هر دو ناحیه جابجایی آزاد و جوشش هسته‌ای خواهد شد.

در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که جوشش سطح در شار پایین هم یک ساعت و هم دو ساعت به یک میزان مقدار انتقال حرارت را کاهش می‌دهد.

بنابراین به نظر می‌رسد با جوشش بیشتر از دو ساعت باز همین نتایج

جدول 1 آزمایش های رسوب نانوسیال با غلظت حجمی 0.5 درصد و متوسط زبری سطح قبل از آزمایش

Table 1 Nanofluid sedimentation tests with 0.5% volume concentration and average surface roughness before test

شماره آزمایش	عنوان آزمایش	متوسط زبری قبل از آزمایش(میکرومتر)
یک	آزمایش انتقال حرارت جوشش نانوسیال روی سطح سنباده خورده با ورق شماره 320	0.48
دو	آزمایش انتقال حرارت جوشش نانوسیال روی سطح بدست‌آمده از آزمایش یک	1.528
سه	آزمایش انتقال حرارت جوشش نانوسیال روی سطح بدست‌آمده از آزمایش دو	1.824
چهار	آزمایش انتقال حرارت جوشش نانوسیال روی سطح بدست‌آمده از آزمایش سه	1.912
پنج	آزمایش انتقال حرارت جوشش روی سطح، بعد از جوشش سطح با شار حرارتی 180 کیلووات بر متر مربع به مدت یک ساعت	0.49
شش	آزمایش انتقال حرارت جوشش روی سطح، بعد از جوشش سطح با شار حرارتی 180 کیلووات بر متر مربع به مدت دو ساعت	0.495
هفت	آزمایش انتقال حرارت جوشش روی سطح، بعد از جوشش سطح با شار حرارتی 600 کیلووات بر متر مربع به مدت یک ساعت	1.612
هشت	آزمایش انتقال حرارت جوشش روی سطح، بعد از جوشش سطح با شار حرارتی 600 کیلووات بر متر مربع به مدت دو ساعت	1.790

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-11-01]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.24.9]

حاصل می‌شود.

شکل 14 نتایج آزمایش‌های 7 و 8 را در مقایسه با نتایج آزمایش 1 برای غلظت 0.5 درصد حجمی نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول یک آورده شده است با استفاده از آزمایش 7 زبری به میزان قابل توجهی تغییر می‌کند، با افزایش زبری مکان‌های هسته‌زایی و تشکیل حباب افزایش و میزان انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش ضخامت رسوب میزان مقاومت حرارتی نیز افزایش یافته و به کاهش انتقال حرارت منجر خواهد شد. اما میزان افزایش زبری و انتقال حرارت بر میزان افزایش مقاومت حرارتی و کاهش انتقال حرارت غلبه کرده و انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

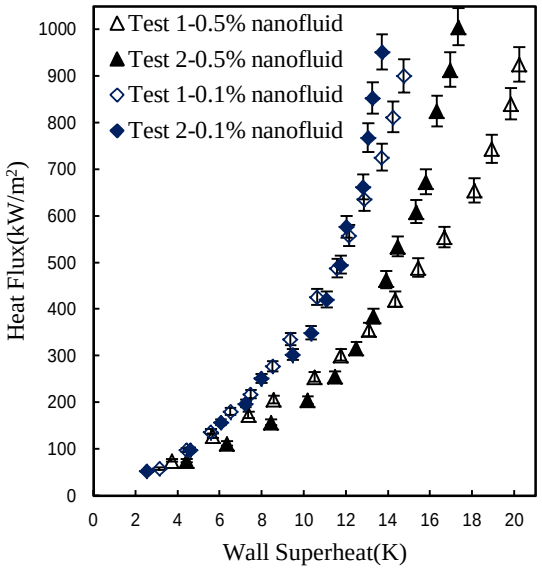


Fig. 11 Heat flux versus wall superheat for tests 1 and 2 with two different volume concentrations of the nanofluid

شکل 11 شار حرارتی برحسب اختلاف دمای مازاد برای آزمایش 1 و 2 با دو غلظت حجمی متفاوت نانوسیال

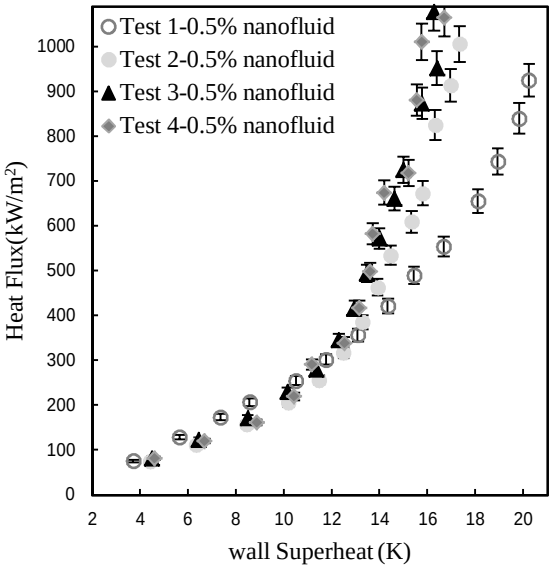


Fig. 12 Heat flux versus wall superheat for tests 1 to 4 with 0.5% volume concentration of the nanofluid

شکل12 شار حرارتی بر حسب اختلاف دمای مازاد آزمایش‌های 1 تا 4 با غلظت 0.5 درصد حجمی از نانوسیال

بنابراین در آزمایش 7 که بعد از رسوب نانوذرات در جوشش سطح با شار حرارتی بالا است، باز در ناحیه جوشش هسته ای به علت افزایش مکان‌های هسته‌زایی و تشکیل حباب، انتقال حرارت افزایش قابل توجهی داشته است. با توجه به این‌که در طول زمان، زبری قبل از آزمایش 8 نسبت به زبری قبل از آزمایش 7 زیاد می‌شود که باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود اما از طرفی با افزایش ضخامت رسوب باز میزان مقاومت حرارتی نیز افزایش یافته و به کاهش انتقال حرارت منجر خواهد شد. باز در این‌جا میزان افزایش انتقال حرارت ناشی از زبری بر کاهش انتقال حرارت ناشی از افزایش ضخامت رسوب غلبه کرده و میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. از آن‌جایی که مقدار زبری آزمایش 7 و آزمایش 8 تفاوت قابل ملاحظه‌ای با هم ندارند مقدار زیادی از این افزایش زبری و انتقال حرارت جهت غلبه بر افزایش ضخامت رسوب و کاهش انتقال حرارت به‌کار رفته است و مقدار افزایش انتقال حرارت هم بسیار زیاد نمی‌باشد. با توجه به شکل 14 مشاهده شده است که نتایج آزمایش 7 و 8 تفاوت چندانی ندارد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با سطح جوشیده با شار حرارتی 600 کیلو وات بر متر مربع در بیشتر از دو ساعت نیز همین افزایش انتقال حرارت ملاحظه خواهد شد. از آن‌جا که در غلظت‌های بالاتر از 0.1 درصد با افزایش غلظت انتقال حرارت کاهش می‌یابد، می توان با ایجاد رسوب روی سطح در شار حرارتی بالا این مقدار کاهش انتقال حرارت را جبران کرد.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله انتقال حرارت جوشش نانوسیال اکسید آهن/آب بدون یون جهت درک بهتر مکانیزم جوشش و اثر رسوب نانوذرات با توجه به غلظت نانوسیال و محدوده شار حرارتی روی سطح به طور تجربی بررسی شده است. تغییر زبری سطح بعد از آزمایش جوشش به فاکتورهایی ازجمله غلظت و ویژگی نانوسیال، زبری و جنس سطح اولیه و ضخامت رسوب نانوذرات و شار حرارتی بستگی دارد. بنابراین می‌توان گفت که زبری سطح جوشش با رسوب نانوذرات در اثر شرایط مختلف در طول زمان تغییر می کند.

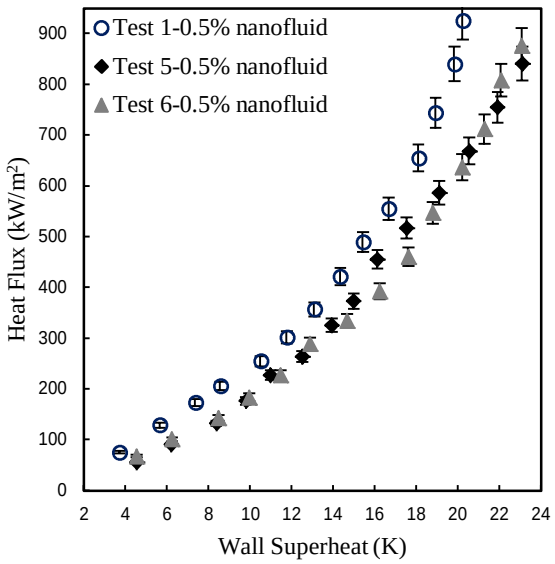


Fig. 13 Heat flux versus wall superheat for tests 5 and 6 with 0.5% volume concentration of the nanofluid

شکل13 شار حرارتی برحسب اختلاف دمای مازاد آزمایش‌های 5 و 6 برای غلظت 0.5 درصد حجمی از نانوسیال

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-11-01]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.24.9]

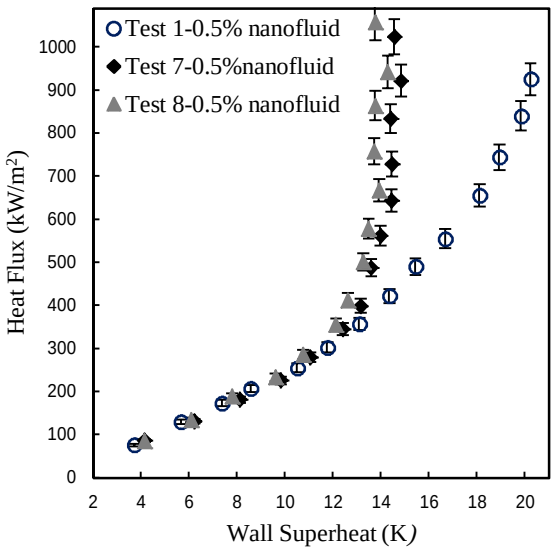


Fig. 14 Heat flux versus wall superheat for tests 7 and 8 with 0.5% volume concentration of the nanofluid

شکل 14 شار حرارتی برحسب اختلاف دمای مازاد آزمایش‌های 7 و 8 برای غلظت 0.5 درصد حجمی از نانوسیال

بنابراین جهت بررسی رسوب نانوذرات روی سطح در شار حرارتی و غلظت متفاوت روی یک سطح با زبری مشخص و تاثیر آن روی پارامترهای جوشش آزمایش هایی انجام شد. موارد زیر مهم ترین نتایج حاصل از این تحقیق است:

- مقداربهینه ضریب انتقال حرارت جوشش برای این نانوسیال در مطالعه حاضر 0.1 درصد حجمی می باشد. مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش در این غلظت نانوسیال، به اندازه 43 درصد افزایش یافته است.
- انتقال حرارت جوشش نانوسیال، روی سطح رسوب کرده با نانوسیال بعد از آزمایش جوشش، در شارهای حرارتی پایین کاهش و در شارهای حرارتی بالا افزایش می‌یابد.
- انتقال حرارت جوشش روی سطوح رسوب کرده با شار حرارتی پایین به خاطر افزایش مقاومت حرارتی سطح کاهش می‌یابد.
- انتقال حرارت جوشش روی سطوح رسوب کرده با شار حرارتی بالا به‌خاطر افزایش زبری و غلبه بر افزایش مقاومت حرارتی افزایش می‌یابد.

از آن‌جا که در غلظت‌های بالا با افزایش غلظت، انتقال حرارت جوشش کاهش می‌یابد، می‌توان با ایجاد رسوب روی سطح با شار حرارتی بالا این روند را تغییر داد.

5- فهرست علائم

C_p	گرمای ویژه (J/kgK)
C_{sf}	ضریب در رابطه روزنو
d	فاصله (mm)
h	ضریب انتقال حرارت (W/m^2K)
h_{fg}	گرمای نهان سیال (J/kg)
K	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)
n	توان در رابطه روزنو
Pr	عدد پرانتل
q''	شار حرارتی (W/m^2)
R_a	متوسط زبری سطح (mμ)
T	دما (K)
t	زمان (min)
U	عدم قطعیت (%)

علائم یونانی

μ	لزجت دینامیکی (N/m^2)
ρ	چگالی (kg/m^3)
σ	کشش سطحی (N/m)
ς	بار الکتریکی
φ	پارامتر بر هم برکنش سطح

زیرنویس‌ها

l	مایع
s	سطح
sat	اشباع
v	بخار

6- مراجع

[1] A. E. Bergles, Enhancement of pool boiling, *International journal of refrigeration*, Vol. 20, No. 8, pp. 545-551, 1997.

[2] L. Cheng, D. Mewes, A. Luke, Boiling phenomena with surfactants and polymeric additives: a state-of-the-art review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 13, pp. 2744-2771, 2007.

[3] M. R. Raveshi, A. Keshavarz, M. S. Mojarrad, S. Amiri, Experimental investigation of pool boiling heat transfer enhancement of alumina–water–ethylene glycol nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 805-814, 2013.

[4] S. Chol, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME-Publications-Fed*, Vol. 231, pp. 99-106, 1995.

[5] A. Suriyawong, S. Wongwises, Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO 2–water nanofluids at very low concentrations, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, No. 8, pp. 992-999, 2010.

[6] S. Kim, I. C. Bang, J. Buongiorno, L. Hu, Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 19, pp. 4105-4116, 2007.

[7] S. K. Das, N. Putra, W. Roetzel, Pool boiling characteristics of nano-fluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 5, pp. 851-862, 2003.

[8] S. K. Das, N. Putra, W. Roetzel, Pool boiling of nano-fluids on horizontal narrow tubes, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 29, No. 8, pp. 1237-1247, 2003.

[9] M. Chopkar, A. Das, I. Manna, P. Das, Pool boiling heat transfer characteristics of ZrO 2-water nanofluids from a flat surface in a pool, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 8, pp. 999-1004, 2008.

[10] I. C. Bang, S. H. Chang, Boiling heat transfer performance and phenomena of Al 2 O 3–water nano-fluids from a plain surface in a pool, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 12, pp. 2407-2419, 2005.

[11] G. P. Narayan, K. Anoop, S. K. Das, Mechanism of enhancement/deterioration of boiling heat transfer using stable nanoparticle suspensions over vertical tubes, *Journal of Applied Physics*, Vol. 102, No. 7, pp. 074317/1-07317/7, 2007.

[12] B. Soleimani, A. Keshavarz Valian, T. Malek Pour, Experimental investigation of velocity and roughness effects on subcooled flow boiling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 327-334, 2015 (in persian فارسی).

[13] T. Malek Pour, A. Keshavarz Valian, M. Zia Bashar Hagh, B. Soleimani, Experimental investigation of nanofluid concentration and material type effect on pool boiling *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 165-172, 2015 (in persian فارسی).

[14] Z. Shahmoradi, N. Etesami, M. N. Esfahany, Pool boiling characteristics of nanofluid on flat plate based on heater surface analysis, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 113-120, 2013.

[15] P. Berger, N. B. Adelman, K. J. Beckman, D. J. Campbell, A. B. Ellis, G. C. Lisensky, Preparation and properties of an aqueous ferrofluid, *Journal of Chemical Education*, Vol. 76, No. 7, pp. 943-948, 1999.

[16] M. Abareshi, E. K. Goharshadi, S. M. Zebarjad, H. K. Fadafan, A. Youssefi, Fabrication, characterization and measurement of thermal conductivity of Fe 3 O 4 nanofluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, No. 24, pp. 3895-3901, 2010.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-11-01]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.24.9]

[17] D. Wen, Y. Ding, Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based γ-alumina nanofluids, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 7, No. 2-3, pp. 265-274, 2005.
[18] R. J. Moffat, Describing the uncertainties in experimental results, *Experimental thermal and fluid science*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-17, 1988.
[19] S. You, J. Kim, K. Kim, Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer, *Applied Physics Letters*, Vol. 83, No. 16, pp. 3374-3376, 2003.
[20] S. M. Kwark, R. Kumar, G. Moreno, J. Yoo, S. M. You, Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 5, pp. 972-981, 2010.
[21] M. Kole, T. Dey, Investigations on the pool boiling heat transfer and critical heat flux of ZnO-ethylene glycol nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 37, pp. 112-119, 2012.
[22] M. Kole, T. Dey, Thermophysical and pool boiling characteristics of ZnO-ethylene glycol nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 62, pp. 61-70, 2012.
[23] Y. I. Rabinovich, J. J. Adler, A. Ata, R. K. Singh, B. M. Moudgil, Adhesion between nanoscale rough surfaces: I. Role of asperity geometry, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 232, No. 1, pp. 10-16, 2000.
[24] S. Vafaei, T. Borca-Tasciuc, Role of nanoparticles on nanofluid boiling phenomenon: Nanoparticle deposition, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 92, No. 5, pp. 842-856, 2014.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-11-01]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.24.9]