



اثر سطوح شیاردار بر انتقال حرارت جوشش استخری آب و نانوسیال اکسید آهن/آب

ساناز نصیری¹، شهرام طالبی^{2*}، محمدرضا سلیمپور³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه یزد، یزد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه یزد، یزد

3- استاد، مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* یزد، صندوق پستی 89195741، talebi_s@yazd.ac.ir

چکیده

بررسی فرایند جوشش به دلیل کاربردهای فراوان در صنعت از جمله مبدل‌های حرارتی و سیستم‌های تهویه مطبوع یکی از زمینه‌های جذاب برای محققان است. یکی از عوامل مهم و مؤثر در انتقال حرارت جوشش استخری، هندسه‌ی سطح گرمکن است. در مقاله‌ی حاضر، جوشش استخری آب دیونیزه و نانوسیال اکسید آهن/آب در فشار اتمسفر بر روی سطوح مسی صاف و شیاردار به طور تجربی بررسی شده است. تأثیر شیادهای مستطیلی، دایره‌ای و مثلثی با گام یکسان بر روی انتقال حرارت جوشش، هدف اصلی مقاله‌ی حاضر است. نتایج نشان داده که ضریب انتقال حرارت جوشش آب دیونیزه در سطح شیاردار دایره‌ای و مستطیلی به ترتیب 92 و 48.9 درصد افزایش و در سطح شیاردار مثلثی 33.1 درصد کاهش نسبت به سطح صاف داشته است. همچنین ضریب انتقال حرارت جوشش نانوسیال اکسید آهن/آب در سطح شیاردار دایره‌ای 40.7 درصد افزایش و در سطح شیاردار مستطیلی و مثلثی به ترتیب 21.8 و 88.7 درصد کاهش نسبت به سطح صاف داشته است. وجود گوشه‌ها در هندسه‌ی مستطیلی و مثلثی باعث افزایش مقاومت حرارتی و کاهش ضریب انتقال حرارت نسبت به هندسه‌ی دایره‌ای می‌شود. همچنین مساحت شیاردار، مکانیزم ایجاد حباب‌ها و میزان تجمع نانوذرات بر روی سطوح مختلف بر انتقال حرارت جوشش مؤثر است. برای بررسی اثر عمق، عمق شیادهای در هندسه‌های مختلف افزوده شد. با افزایش عمق، به دلیل بیشتر شدن سطح انتقال حرارت و چگالی مکان‌های هسته‌زا، ضریب انتقال حرارت جوشش آب و نانوسیال به ترتیب حداکثر تا 43.5 و 40.6 درصد افزایش یافته است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۷ دی ۱۳۹۶

پذیرش: ۱۹ خرداد ۱۳۹۷

ارائه در سایت: ۱۰ خرداد ۱۳۹۷

کلید واژگان:

جوشش استخری

نانوسیال

سطح شیاردار

ضریب انتقال حرارت

The effect of grooved surfaces on pool boiling heat transfer of water and Fe₃O₄/water nanofluid

Sanaz Nasiri¹, Shahram Talebi^{2*}, Mohammad Reza Salimpour²

1- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

* P.O.B. 89195741 Yazd, Iran, talebi_s@yazduni.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 17 January 2017

Accepted 09 June 2018

Available Online 31 May 2018

Keywords:

Pool boiling

Nanofluid

Grooved surface

Heat transfer coefficient

ABSTRACT

Investigating of boiling process is one of the attractive fields for researchers, because of many applications in industry such as heat exchangers and air condition systems. One of the important and effective factors in pool boiling heat transfer is the heating surface geometry. In present article, pool boiling of dionized water and Fe₃O₄/water nanofluid at atmospheric pressure have been analyzed on smooth and grooved copper surfaces, experimentally. The effect of rectangular, circular and triangular grooves with the same pitch on boiling heat transfer is the main aim of present article. The results have showed that the boiling heat transfer coefficient of dionized water in circular and rectangular grooved surfaces has enhanced 92% and 48.9%, respectively, and has reduced 33.1% in triangular grooved surface toward the smooth surface. Also, the boiling heat transfer coefficient of Fe₃O₄/water nanofluid in circular grooved surfaces has increased 40.7% and has decreased 21.8% and 88.7% in rectangular and triangular grooved surfaces, respectively, toward the smooth surface. The corners existence in rectangular and triangular geometries causes thermal resistance increasing and heat transfer coefficient decreasing toward circular geometry. Also, the groove area, the mechanism of bubbles creation and nanoparticles deposition content on different surfaces are effective on the boiling heat transfer. For investigation of depth effect, the grooves depth was increased in different geometries. By adding depth, the boiling heat transfer coefficient of water and nanofluid has increased up to 43.5% and 40.6%, respectively, because of heat transfer surface and nucleation sites density augmentation.

1- مقدمه

هسته‌ای، سرمایه‌ش تراشه‌های الکترونیکی و سیستم‌های تهویه مطبوع. روش‌های مختلفی برای بهبود انتقال حرارت جوشش وجود دارد، مانند افزودن نانوذرات یا فعال کننده‌ی سطح به سیال پایه، گسترش سطح گرمکن، اعمال میدان الکتریکی یا مغناطیسی، ارتعاش سطح حرارتی یا سیال [1].

در چند دهه‌ی اخیر مطالعات بسیاری در زمینه‌ی انتقال حرارت جوشش، به دلیل کاربردهای فراوان آن در صنعت، انجام شده است. رایج‌ترین کاربردهای جوشش عبارت‌اند از: کندانسورها، دیگ‌ها، پمپ‌های گرمایی، راکتورهای

نانوسیال یک محلول کلئیدی است که با معلق کردن نانوذرات با اندازه-ی متوسط کمتر از 100 نانومتر در سیال پایه تهیه می‌شود. محلول کلئیدی از نانوذرات مغناطیسی مانند آهن، کبالت، اکسید آهن، گاما-اکسید آهن¹ و اکسید کبالت، که به صورت کاملاً پایدار در سیال پایه مثل آب حل شده‌اند، فروسیال نامیده می‌شود. ایده‌ی استفاده از نانوسیال در سیستم‌های حرارتی اولین بار توسط چوی مطرح شد [2]. ضریب هدایت حرارتی نانوذرات چندین برابر سیال پایه است، بنابراین استفاده از نانوسیال به بهبود انتقال حرارت جوشش کمک می‌کند. پارامترهایی از قبیل غلظت نانوسیال، نوع و اندازه‌ی نانوذرات، زبری سطح، زاویه تماس حباب‌ها، فشار سیستم و ... مکانیزم جوشش را پیچیده‌تر می‌کند.

شی و همکاران [3] درباره‌ی اثر جوشش نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب بر گرمکن مسی مطالعه کرده‌اند و دریافته‌اند که به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال و کاهش کشش سطح نسبت به سیال پایه، ضریب انتقال حرارت جوشش افزایش یافته است. چاندرا و همکاران [4] جوشش نانوسیال مس/آب با غلظت‌های 0.25، 0.5 و 1 درصد وزنی بر روی سطح مربعی به ضلع 30 میلی‌متر از جنس فولاد را بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده که شار حرارتی بحرانی جوشش نانوسیال بیشتر از آب خالص بوده و ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت نانوذرات کاهش یافته است. وفایی [5] برای تعیین اثر زبری بر جوشش استخری آب و نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب، آزمایش بر روی دو سطح هموار و زبر انجام داده و مشاهده کرده است که ضریب انتقال حرارت جوشش روی سطح زبر به دلیل وجود مکان‌های هسته‌زای بیشتر، بالاتر از سطح هموار است. همچنین برای بررسی اثر غلظت، آزمایش جوشش در دو غلظت 0.1 و 0.01 درصد حجمی را بر روی سطح زبر انجام داده است. طبق نتایج، در شارهای حرارتی بالا با افزایش غلظت ضریب انتقال حرارت به دلیل تمایل ذرات به کلوخه‌ای شدن کاهش یافته است.

بعضی از محققان نیز عدم تغییر ضریب انتقال حرارت جوشش نانوسیال نسبت به سیال پایه را گزارش کرده‌اند. به عنوان مثال، واسالو و همکاران [6] جوشش نانوسیال اکسیدسیلیسیم/آب با غلظت 0.5 درصد حجمی را بر روی سیم افقی نیکل کروم به قطر 0.4 میلی‌متر در فشار اتمسفر مورد مطالعه قرار داده‌اند. در نتایج آن‌ها تغییر چندانی در ضریب انتقال حرارت جوشش دیده نشده است.

به دلیل اهمیت سطح گرمکن بر جوشش استخری، محققان در زمینه‌ی زبری، گسترش سطح، تغییر هندسه و موقعیت سطح مطالعه کرده‌اند. داس و همکاران [7] انتقال حرارت جوشش هسته‌ای آب خالص بر روی سطح صاف و حفره‌دار را مقایسه کرده‌اند. حفره‌ها به قطر 600 میکرومتر و عمق 2 میلی‌متر به روش میکرودریل بر روی سطح گرمکن ایجاد شده است. در نتایج دیده شده که ضریب انتقال حرارت سطح حفره‌دار نسبت به سطح صاف افزایش داشته است. زیرا حفره‌ها تعداد مکان‌های هسته‌زا را افزایش داده و باعث تشکیل حباب در دمای سطح کمتر می‌شود. داس و همکاران [8] در تحقیق دیگری برای افزایش انتقال حرارت جوشش استخری آب از سطوح با ساختارهای متفاوت استفاده کرده‌اند. این سطوح شامل تعدادی شیارهای موازی یا متقاطع بوده‌اند. آن‌ها دریافته‌اند که سطوح شیاردار به دلیل سطح حرارتی بیشتر نسبت به سطح صاف، موجب بهبود جوشش استخری آب خالص می‌گردد. یومش و همکاران [9] جوشش هسته‌ای پنتان و نانوسیال

اکسیدمس/پنتان با غلظت حجمی 0.005 و 0.01 درصد را بر سطح هموار و گسترش‌یافته در فشار اتمسفر بررسی نموده‌اند. سطوح گسترش‌یافته، دو سطح با پره‌های ریز و درشت بوده است. ضریب انتقال حرارت جوشش پنتان بر روی سطح پره ریز 10-15 درصد افزایش و بر سطح پره درشت 5-10 درصد کاهش نسبت به سطح صاف داشته است. آن‌ها بیان کرده‌اند که به دلیل تشکیل شدن ترک بیشتر در هنگام شیارزنی و اثر موینگی سیال، ضریب انتقال حرارت در سطح پره ریز افزایش یافته است و در سطح پره درشت به علت سطح جانبی بیشتر پره‌ها، مقاومت بیشتری در مقابل جدایش حباب‌ها از سطح وجود دارد. همچنین در نتایج آن‌ها دیده شده که ضریب انتقال حرارت نانوسیال اکسیدمس/پنتان با غلظت 0.005 درصد بر روی سطح پره ریز حدود 15-25 درصد افزایش داشته و برای غلظت 0.01 درصد تقریباً برابر جوشش پنتان است. زیرا در غلظت بیشتر یک میکرو لایه در زیر حباب در حال رشد تشکیل می‌شود و مکان‌های هسته‌زایی را مسدود می‌کند. نارایان و همکاران [10] جوشش استخری نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب بر روی سطوح با زبری مختلف را بررسی کرده‌اند. آن‌ها پارامتر اثر متقابل سطح-نانوذرات (ϕ) را معیار نتایج خود قرار داده‌اند که به صورت نسبت زبری سطح به قطر متوسط نانوذرات تعریف می‌شود. وقتی این پارامتر کوچکتر از یک یا برابر با یک باشد، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. زیرا در این حالت نانوذرات مکان‌های هسته‌زایی را مسدود کرده و یک مقاومت حرارتی اضافی ایجاد می‌کند. وقتی این پارامتر بزرگتر از یک باشد، ضریب انتقال حرارت در غلظت-های پایین افزایش می‌یابد. دادجو و همکاران [11] اثر شیب سطح بر جوشش استخری نانوسیال اکسید سیلیسیم/آب بر سطح گرمکن مسی را مطالعه کرده‌اند و یافته‌اند با افزایش شیب سطح، ضریب انتقال حرارت جوشش آب و نانوسیال کاهش می‌یابد. در سطح شیب‌دار، حباب‌ها در امتداد سطح جوشش حرکت کرده، به هم پیوسته و تشکیل حباب‌های بزرگتری می‌دهند که باعث افزایش مقاومت حرارتی می‌گردد. پاستوسکو و همکاران [12] جوشش استخری آب خالص بر روی سطوح پره‌دار را مطالعه کرده‌اند. پره‌هایی با ارتفاع 0.5 و 1 میلی‌متر به‌طور یکنواخت در سطح ایجاد شده و یک پوشش مسی با میکرو حفره‌های به قطر 0.1 میلی‌متر و گام 0.2 تا 0.4 میلی‌متر بر روی پره‌ها متصل شده است. نتایج آن‌ها نشان داده که در شارهای بالا، سطح پره‌دار با ارتفاع پره 1 میلی‌متر بیشترین تأثیر را بر انتقال حرارت جوشش داشته است.

تحقیقاتی نیز در زمینه‌ی استفاده از فروسیال‌ها در جوشش استخری انجام شده است. برای مثال، لی و همکاران [13] شار حرارتی بحرانی جوشش استخری فروسیال با سیال پایه‌ی آب، اکسید آلومینیوم/آب و اکسید تیتانیوم/آب را با هم مقایسه کرده‌اند. در نتایج آن‌ها دیده شده که وجود نانوذرات موجب افزایش شار حرارتی بحرانی جوشش شده و بیشترین شار حرارتی بحرانی مربوط به فروسیال و 2.6 برابر نسبت به آب خالص بوده است. علت این امر را تجمع نانوذرات روی سطح و افزایش ترشوندگی سطح بیان کرده‌اند. عبدالمی و همکاران [14] اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جوشش استخری فروسیال اکسید آهن/آب را به صورت تجربی بررسی کرده‌اند و یافته‌اند حضور میدان مغناطیسی با گرادیان مثبت و منفی به ترتیب باعث کاهش و افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش فروسیال می‌شود. زیرا در حالت گرادیان منفی میدان مغناطیسی، نیروی مغناطیسی وارد بر حباب‌ها رو به بالا بوده و فرکانس تشکیل حباب‌ها را افزایش می‌دهد. آن‌ها زبری سطح را عاملی مهم بر ضریب انتقال حرارت دانسته‌اند. همچنین برای فروسیال یک غلظت بهینه، 0.1 درصد حجمی، پیدا کرده‌اند که موجب 43 درصد افزایش

¹ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$

تست DLS¹ و TEM² که به ترتیب نشان‌دهنده توزیع نانوذرات مغناطیسی و اندازه‌ی نانوذرات است، برای نانوسیال ساخته شده انجام شده است. شکل 1 و 2 به ترتیب نتایج تست‌های DLS و TEM را برای نانوسیال اکسید آهن/آب با غلظت 0.01 درصد حجمی نمایش می‌دهد. با توجه به شکل 1 متوسط قطر نانوذرات در حدود 15 نانومتر است. همچنین تست پتانسیل زتا برای بررسی پایداری نانوسیال انجام شده است. پتانسیل زتا نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی بار الکتریکی در سطح نانوذرت است. محققان بسیاری از جمله وو و همکاران [17] گزارش کرده‌اند که در پتانسیل زتای بیشتر از 30 میلی‌ولت محلول‌های کلئیدی پایدارند. مقدار پتانسیل زتای نانوسیال ساخته شده در غلظت 0.01 درصد حجمی، 31- میلی‌ولت بود که حاکی از پایداری زیاد نانوسیال است.

قبل از انجام هر آزمایش جوشش، محلول رقیق شده با غلظت 0.01 درصد حجمی در دستگاه موجهی فراصوت با توان 400 وات و فرکانس 24

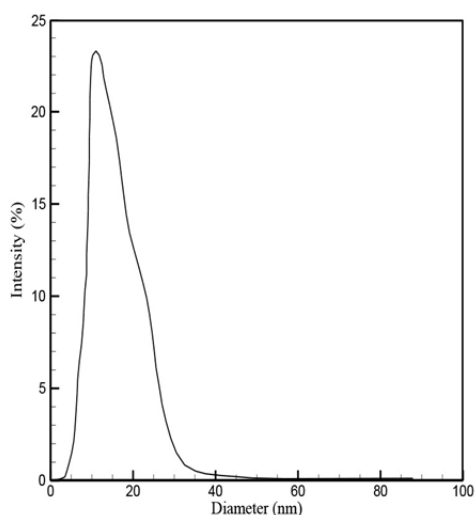


Fig. 1 The Dynamic Light Scattering test result of Fe_3O_4 /water ferrofluid.

شکل 1 نتیجه‌ی تست پخش نور دینامیکی فروسیال اکسید آهن/آب

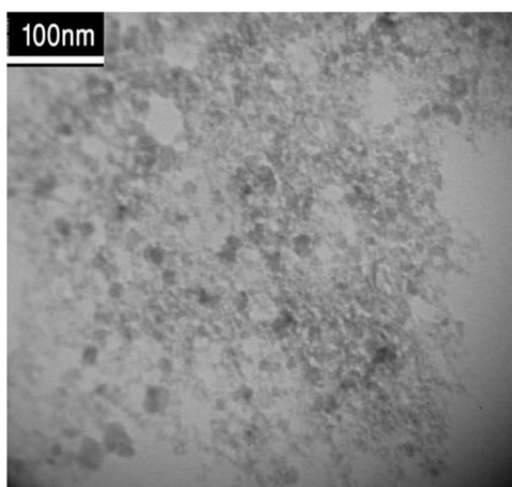


Fig. 2 The Transmission Electron Microscopy picture of Fe_3O_4 /water ferrofluid.

شکل 2 تصویر TEM فروسیال اکسید آهن/آب

ضریب انتقال حرارت شده است. همچنین عبدالهی و همکاران [15] در تحقیق دیگری اثر گذشت زمان و تغییرات زبری سطح در فرایند جوشش استخری اکسید آهن/آب را بررسی کرده‌اند و یافته‌اند انتقال حرارت جوشش روی سطوح رسوب کرده با شار حرارتی پایین کاهش و با شار حرارتی بالا افزایش می‌یابد.

با توجه به تحقیقات گذشته می‌توان گفت، علی‌رغم تحقیقات انجام شده برای استفاده از نانوسیال در جوشش استخری، مطالعه‌ی کمی در زمینه‌ی سطوح گرمکن گسترش یافته و شیاردار انجام شده است. در مقاله‌ی حاضر اثر سطوح شیاردار مستطیلی، دایره‌ای و مثلثی بر جوشش استخری آب دیونیزه و فروسیال اکسید آهن/آب برای اولین بار به صورت تجربی بررسی شده است. در این راستا، آزمایش جوشش استخری آب خالص و فروسیال بر روی سطح هموار و سپس بر روی سطوح شیاردار انجام شده است. در ادامه عمق شیارها افزوده شده و اثر آن بر انتقال حرارت جوشش بررسی شده است.

2- مواد، دستگاه آزمایش و اندازه‌گیری

2-1- آماده سازی نانوسیال

نانوسیال‌ها به دو روش یک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای تهیه می‌شود. در روش یک‌مرحله‌ای نانوذرات به‌طور مستقیم درون سیال تولید می‌گردد. در روش دو مرحله‌ای نانوذرات به صورت پودرهای خشک در داخل سیال پایه پراکنده می‌شود. در روش یک‌مرحله‌ای اندازه و توزیع نانوذرات کنترل می‌شود و پایداری نانوسیال در این روش بیشتر از روش دو مرحله‌ای است.

برای دستیابی به نانوسیال پایدار از روش‌هایی مانند موجهی فراصوت، تغییر اسیدیته و افزودن مواد فعال‌کننده‌ی سطحی استفاده می‌شود. روش موجهی فراصوت باعث شکستن توده‌های نانوذرات و یکنواخت شدن محلول در مدت زمان کم می‌شود. افزودن مواد فعال‌کننده‌ی سطحی به محلول، باعث یکنواختی محلول در مدت زمان طولانی می‌شود، اما بر خواص ترموفیزیکی سیال تأثیرگذار بوده و در کاربردهای با دمای بالا به خوبی عمل نمی‌کند. روش تغییر اسیدیته با ایجاد نیروهای دافعه‌ی الکتروستاتیک بین سطوح نانوذرات از طریق افزایش چگالی بار سطحی، روش مناسبی برای پایدار کردن نانوسیال شناخته شده است.

در این مقاله، نانوسیال اکسید آهن/آب به روش یک مرحله‌ای ابداع شده توسط برگر [16] ساخته شده و برای پایدار کردن آن، ماده فعال‌کننده‌ی سطحی اضافه شده است. ابتدا 1 میلی‌لیتر محلول کلرید آهن II با 4 میلی‌لیتر محلول کلرید آهن III با هم مخلوط شده‌اند. در ادامه 2.64 میلی‌لیتر آمونیاک را با آب دیونیزه به 50 میلی‌لیتر رسانده و با پمپ سرنگی به محلول اضافه می‌شود. هم‌زمان با اضافه کردن آمونیاک، محلول در همزن مغناطیسی با سرعت دوران 1000 دور بر دقیقه قرار دارد. بعد از گذشت چند دقیقه ذرات اکسید آهن ته‌نشین شده و آب بالای ذرات برداشته می‌شود. سپس رسوب حاصل داخل دستگاه سانتیفیوژ به مدت 5 دقیقه قرار داده می‌شود. بعد از این مرحله رسوب سیاه رنگی در انتهای ظرف باقی می‌ماند. سپس ماده فعال‌کننده‌ی سطحی تترامتیل آمونیوم هیدروکساید به رسوب اضافه شده و روی همزن مغناطیسی با سرعت 500 دور بر دقیقه به مدت نیم ساعت قرار داده می‌شود. در نهایت با خارج کردن آمونیاک اضافی نانوسیال اکسید آهن 1 درصد حجمی حاصل می‌گردد. نانوسیال آماده شده حداقل یک ماه پایدار است و هیچ‌گونه ته‌نشینی نانوذرات در آن دیده نمی‌شود.

¹ Dynamic Light Scattering

² Transmission Electron Microscopy

کیلومترز به مدت نیم ساعت قرار داده شده است.

نشان شده است. اجزای اصلی دستگاه آزمایش عبارتند از: مجموعه گرمکن مسی و عایق، مخزن جوشش، کندانسور و سیستم خنک کننده، سیستم کنترل ولتاژ، جریان و نمایشگرها. شکل 4 و 5 به ترتیب نمای برش خورده‌ی گرمکن مسی و مجموعه گرمکن و عایق بسته شده را نشان می‌دهد.

2-2- دستگاه آزمایش جوشش

تصویر مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده برای انجام آزمایش‌ها در شکل 3

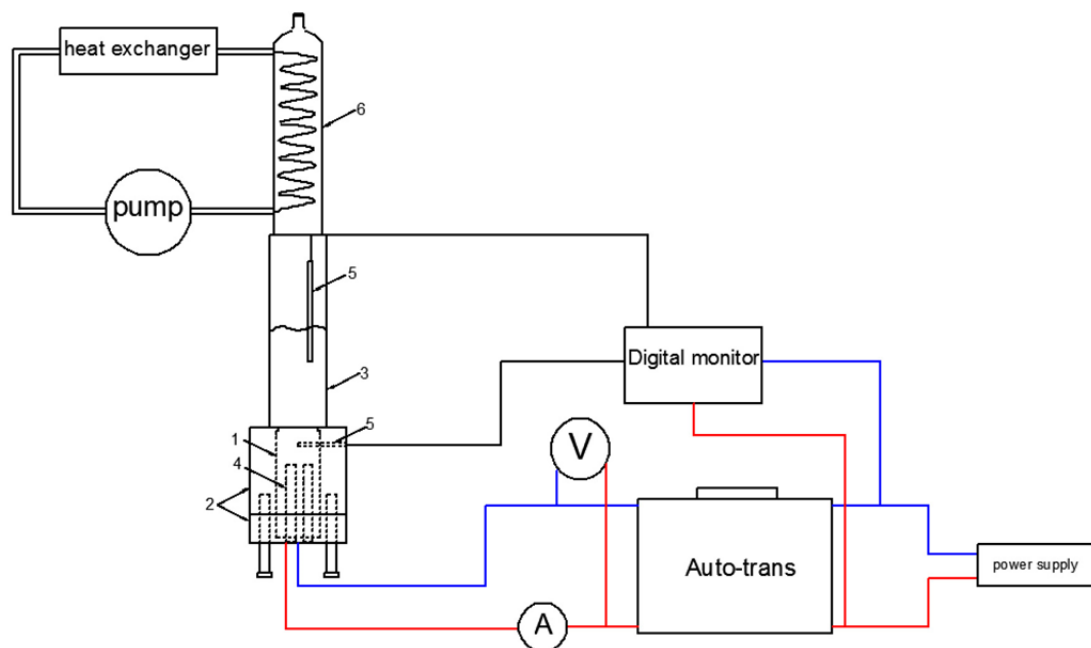


Fig. 3 The boiling experimental setup: 1- copper heater, 2- insulator, 3-boiling reservoir, 4- cartridge elements, 5- thermocouples

شکل 3. مجموعه آزمایشگاهی جوشش: 1- گرمکن مسی، 2- عایق، 3- مخزن جوشش، 4- المنت‌های فشنگی، 5- ترموکوپل‌ها

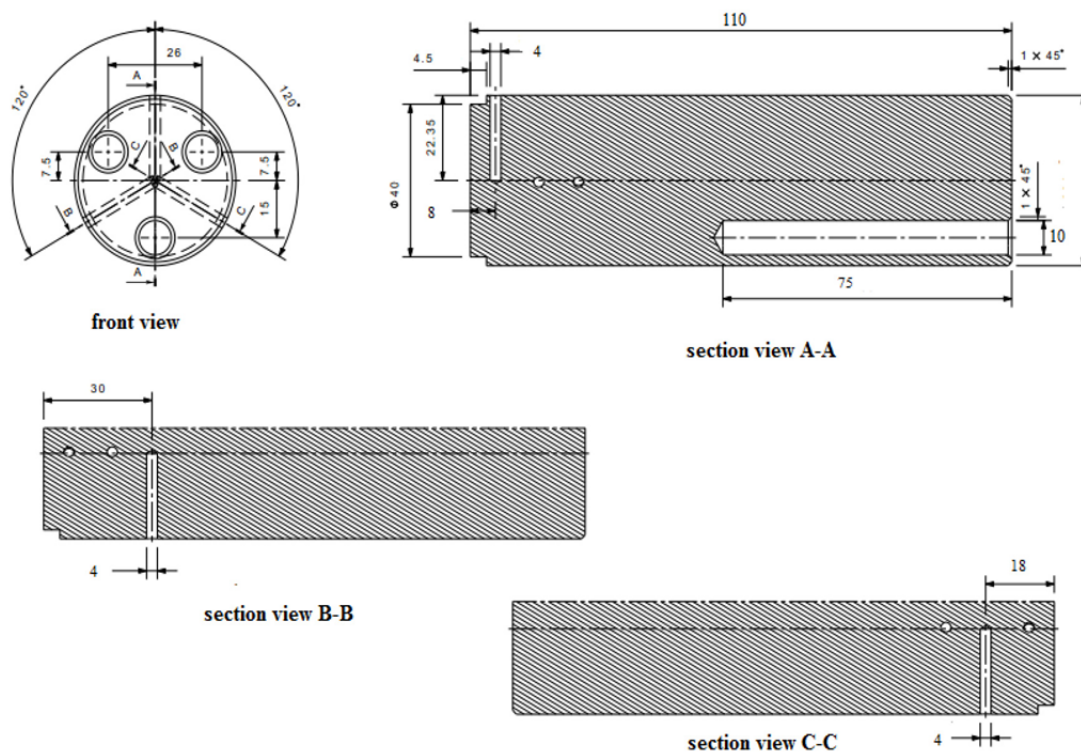


Fig. 4 The section view of copper heater

شکل 4 نمای برشی گرمکن مسی

در حال جوشش از کندانسور استفاده شده است. کندانسور از جنس پیرکس به طول 400 میلی‌متر و قطر 50 میلی‌متر با انتهای مخروطی است. بالای کندانسور به دلیل انجام آزمایشات در فشار اتمسفر باز است. برای آبیند شدن کندانسور نوار تفلون به انتهای آن پیچانده شده است. برای خنک‌کاری سیال در گردش کندانسور، آب با دبی 21 میلی‌لیتر بر ثانیه از داخل مخزن آب و یخ پمپ شده و سپس دوباره به مخزن برمی‌گردد. دمای مخزن آب و یخ 20 درجه سانتی‌گراد بوده و توسط یک دماسنج جیوه‌ای کنترل می‌شود. معمولاً در انتهای هر آزمایش جوشش در شارهای حرارتی بالا، به دلیل افزایش دمای آب در گردش، از قالب‌های یخ بیشتری استفاده می‌گردد.

برای تنظیم ولتاژ و رسیدن به توان مورد نظر در هر مرحله از آزمایش جوشش از یک کنترل کننده ولتاژ³ با حداکثر 300 ولت استفاده شده است. یک آمپر متر برای اندازه‌گیری جریان با دقت 0.1 آمپر و یک ولت‌متر برای اندازه‌گیری ولتاژ با دقت 1 ولت مورد استفاده قرار گرفته است. ترموکوپل‌ها به طول 80 میلی‌متر و قطر 4 میلی‌متر و از نوع پی تی 100⁴ بوده و در آزمایشگاه کالیبراسیون به روش حمام روغن کالیبره شده‌اند. مدل نمایشگرهای دما آتونیکس⁵ بوده و دارای دقت 0.1 درجه است.

2-3- سطح جوشش

سطح جوشش هموار دارای قطر 40 میلی‌متر بوده و قبل از هر آزمایش با ورق سمباده‌ی شماره‌ی 400، 600 و 800 توسط دستگاه تراش سمباده زده شده و سپس زبری آن توسط دستگاه زبری‌سج اندازه‌گیری شده است. زبری متوسط سطح جوشش در تمام آزمایش‌ها 213 نانومتر است (شکل 6). سطوح شیاردار مستطیلی، دایره‌ای و مثلثی توسط دستگاه برش سیمی⁶ ساخته شده و دارای زبری مشابه با سطح هموار است. سطح داخل شیارها با سرعت یکنواخت به طور دستی قبل از هر آزمایش سمباده زده شده است. شکل 7 سطوح شیاردار جوشش را نشان می‌دهد. تعداد شیارها 7 عدد و عمق و گام آن‌ها به ترتیب 1 و 3 میلی‌متر است.

2-4- روابط دمای سطح و شار حرارتی

شروع تمام آزمایش‌ها در شار حرارتی پایین، ولتاژ 53 ولت و جریان 2 آمپر، بوده است. بعد از به جوش آمدن سیال دماها، ولتاژ و جریان خوانده شده و ولتاژ دستگاه توسط دستگاه کنترل کننده ولتاژ 5 ولت اضافه شده و داده‌ها بعد از گذشت 5 دقیقه که دمای ترموکوپل‌ها ثابت می‌شود، ثبت می‌گردد. بعد از رسیدن جریان به 6 آمپر، قبل از پدیده‌ی شار حرارتی بحرانی (CHF⁷)، ولتاژ را آرام آرام کاهش داده و سپس برق سیستم قطع می‌گردد. مقدار شار حرارتی از روابط 1 و 2 محاسبه می‌گردد. میزان اتلاف حرارتی برابر با اختلاف دو مقدار شار حرارتی به دست آمده از روابط 1 و 2 است که در تمام آزمایش‌ها کمتر از 5 درصد بوده است.

$$q = k \frac{T_2 - T_1}{\Delta x_2} \quad (1)$$

$$q = \frac{VI}{\pi \frac{D^2}{4}} \quad (2)$$

در روابط 1 و 2، k ضریب هدایت حرارتی گرمکن مسی، T_1 و T_2 دمای ترموکوپل‌های 1 و 2 در فاصله‌ی به ترتیب 8 و 18 میلی‌متری از سطح

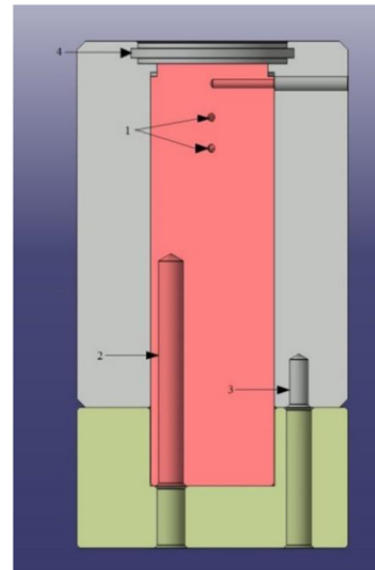


Fig. 5 The assembled heater and insulator set: 1- thermocouples place, 2- cartridge elements, 3- bolts, 4- oring groove

شکل 5 مجموعه‌ی گرمکن و عایق بسته شده: 1- محل قرارگیری ترموکوپل‌ها، 2- المنت‌های فشنگی، 3- پیچ‌ها، 4- شیار اورینگ

گرمکن مسی با خلوص 99.99%، به صورت استوانه‌ای به قطر 45 میلی‌متر و طول 110 میلی‌متر ساخته شده است. سه سوراخ به قطر 10 میلی‌متر و عمق 75 میلی‌متر با زاویه‌ی 120 درجه نسبت به هم، در انتهای گرمکن برای قرار دادن المنت‌های فشنگی ایجاد شده است. المنت‌های حرارتی با توان 650 وات، به قطر 10 میلی‌متر و طول 80 میلی‌متر هستند. همچنین سه سوراخ به قطر 4 میلی‌متر و عمق 22.5 میلی‌متر در فاصله‌ی 8، 18 و 30 میلی‌متر از سطح گرمکن با زاویه‌ی 120 درجه نسبت به هم برای قراردادن ترموکوپل‌ها با استفاده از دستگاه برق‌زنی ایجاد شده است.

عایق، استوانه‌ای از جنس پلی‌تترافلورواتیلن¹ با قطر داخلی 45 میلی‌متر و قطر خارجی 100 میلی‌متر و به صورت دو تکه‌ای است. قسمت پایینی عایق توسط سه پیچ آلن به قسمت بالایی آن بسته شده و باعث نگه داشتن گرمکن مسی می‌شود. برای حذف اثر انبساط پیچ‌های آلن در اثر حرارت و نیز از بین رفتن رزوه‌های سوراخ پیچ‌ها، از سه فنر با طول 38 میلی‌متر استفاده شده است. علاوه بر عایق PTFE، یک عایق الاستومتری به ضخامت 20 میلی‌متر به دور مجموعه‌ی گرمکن و عایق پیچانده شده است. ضریب هدایت حرارتی گرمکن و عایق PTFE و الاستومتری با استفاده از دستگاه کی‌دی 2 اندازه‌گیری شده و به ترتیب 0.25 و 400 وات بر مترکلین است. با توجه به کوچک بودن ضریب هدایت حرارتی عایق‌ها نسبت به گرمکن مسی، می‌توان از انتقال حرارت هدایتی شعاعی صرف‌نظر نموده و هدایت حرارتی منتقل شده به سطح گرمکن را یک بعدی در نظر گرفت.

مخزن جوشش، استوانه‌ای از جنس پیرکس دارای قطر 60 میلی‌متر، ارتفاع 300 میلی‌متر و ضخامت 5 میلی‌متر بوده و توسط چسب پرماتکس به عایق چسبانده شده است. برای آب‌بندی مخزن و عایق و همچنین سطح گرمکن و عایق از دو اورینگ وایتونی به ترتیب به قطر 59 و 40 میلی‌متر با تحمل دمای 250 درجه سانتی‌گراد استفاده شده است.

جهت چگالش بخارهای ایجاد شده‌ی جوشش و ثابت نگه‌داشتن مقدار سیال

³ Auto-trans

⁴ PT100

⁵ Autonics

⁶ wire cut

⁷ Critical Heat Flux

¹ PTFE

² KD₂

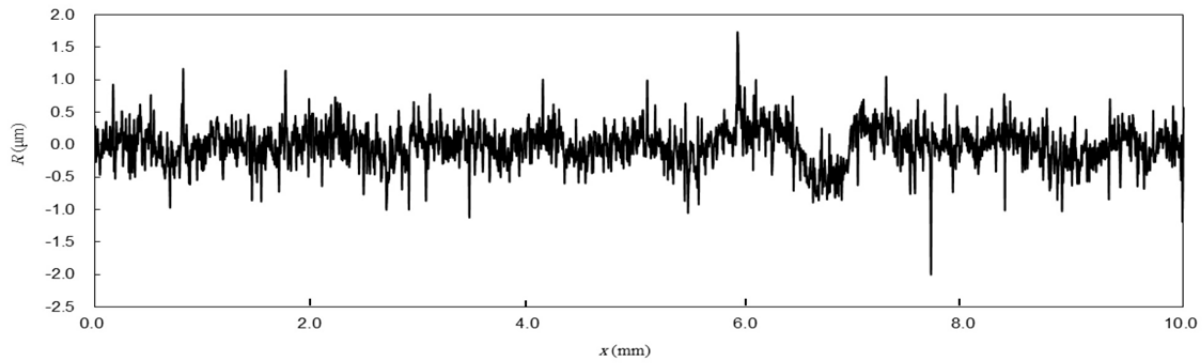


Fig. 6 The roughness profile of heater surface

شکل 6 نمودار زبری سطح گرمکن

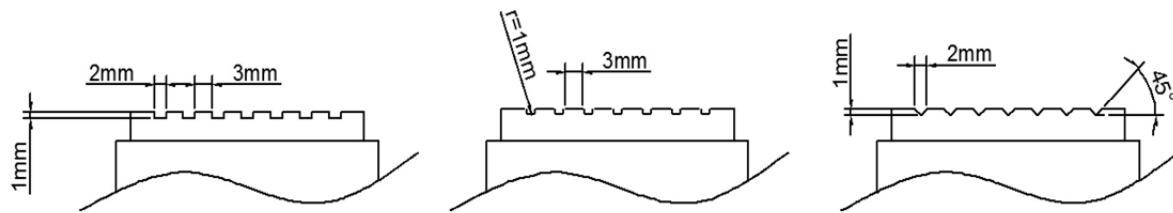


Fig. 7 The heater grooved surfaces geometry

شکل 7 هندسه‌ی سطوح شیاردار گرمکن

3- نتایج و تحلیل آنها

در هر آزمایش 150 میلی‌لیتر آب دیونیزه یا نانوسیال در محفظه‌ی جوشش ریخته می‌شود. آزمایش‌ها در محدوده‌ی قبل از CHF است. دمای آزمایشگاه 20 درجه سانتی‌گراد و فشار محیط 623 میلی‌متر جیوه است. برای اطمینان از دقت و تکرارپذیری، هر آزمایش سه مرتبه و در سه روز با شرایط یکسان انجام شده است. شکل 8 تصویر واقعی مجموعه‌ی آزمایشی جوشش را نشان می‌دهد.

3-1- صحت نتایج

برای اطمینان از صحت نتایج، جوشش آب دیونیزه بر روی سطح هموار انجام شده و داده‌های آن با رابطه‌ی پیشنهادی روزنو [19]، رابطه‌ی 9، مقایسه شده است. در این رابطه، h_{fg} گرمای نهان جوشش، σ کشش سطحی، ρ_v و ρ_l



Fig. 8 The real image of boiling set up

شکل 8 تصویر واقعی مجموعه‌ی آزمایشی جوشش

جوشش، Δx_2 فاصله بین دو سوراخ ترموکوپل‌ها، V و I به ترتیب ولتاژ و جریان الکتریکی و D قطر سطح گرمکن است.

دمای سطح جوشش با توجه به یک بعدی بودن انتقال حرارت هدایتی از برون بایی دماهای T_1 و T_2 به دست می‌آید (رابطه‌ی 3). ضریب انتقال حرارت جوشش از رابطه‌ی 4 حاصل می‌گردد. Δx_1 فاصله‌ی بین ترموکوپل شماره‌ی 1 و سطح جوشش و T_{sat} دمای اشباع سیال است.

$$T_w - T_{sat} = T_1 - \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} (T_2 - T_1) - T_{sat} \quad (3)$$

$$h = \frac{q}{T_w - T_{sat}} \quad (4)$$

2-5- تحلیل عدم قطعیت

در این تحقیق از روش هولمن [18] برای تحلیل عدم قطعیت داده‌های آزمایش استفاده شده است. در این روش اگر پارامتر F تابعی از متغیرهای $x_1, x_2, \dots, x_n$ باشد، آنگاه مقدار عدم قطعیت آن از رابطه‌ی 5 به دست می‌آید. U مقدار خطای اندازه‌گیری است.

$$\frac{U_F}{F} = \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{U_{x_i}}{x_i} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

بنابراین مقدار عدم قطعیت شار حرارتی، اختلاف دمای سطح و سیال و ضریب انتقال حرارت جوشش به ترتیب از روابط 6، 7 و 8 حاصل می‌شود. برای تمام آزمایش‌ها بیشترین عدم قطعیت شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت به ترتیب 5.1 و 6.87 درصد بوده است.

$$\frac{U_q}{q} = \sqrt{\left(\frac{U_k}{k} \right)^2 + \left(\frac{U_{(T_2-T_1)}}{(T_2-T_1)} \right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta x_2}}{\Delta x_2} \right)^2} \quad (6)$$

$$\frac{U_{(T_w-T_{sat})}}{(T_w-T_{sat})} = \sqrt{\left(\frac{U_{\Delta x_1}}{\Delta x_1} \right)^2 + \left(\frac{U_{(T_2-T_1)}}{(T_2-T_1)} \right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta x_2}}{\Delta x_2} \right)^2} \quad (7)$$

$$\frac{U_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{U_q}{q} \right)^2 + \left(\frac{U_{(T_w-T_{sat})}}{(T_w-T_{sat})} \right)^2} \quad (8)$$

دانست. همچنین با توجه به مقدار زبری سطح متوسط (213 نانومتر) و اندازه-ی قطر متوسط نانوذرات (15 نانومتر)، مقدار پارامتر اثر متقابل سطح-نانوذرات (ϕ) بزرگتر از یک بوده که باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش نانوسیال می‌شود.

3-3- جوشش آب دیونیزه بر روی سطوح شیاردار

در این بخش آزمایش جوشش آب دیونیزه بر روی سه نوع سطح شیاردار مستطیلی، دایره‌ای و مثلثی انجام گرفت که در شکل 12 دیده می‌شود. جوشش آب بر روی سطح با شیار دایره‌ای و مثلثی به ترتیب بیشترین و کمترین ضریب انتقال حرارت را داشته است. ضریب انتقال حرارت به طور متوسط در جوشش آب دیونیزه بر سطح با شیار دایره‌ای و مستطیلی به ترتیب 92 و 48.9 درصد افزایش و در سطح با شیار مثلثی 33.1 درصد کاهش نسبت به سطح صاف داشته است.

مساحت شیار مرکزی مستطیلی، دایره‌ای و مثلثی به ترتیب 1.256، 1.6 و 1.12 سانتی‌متر مربع است. با اینکه مساحت سطح شیاردار مستطیلی از دایره‌ای بیشتر است، به دلیل تفاوت هندسه‌ی شیار، انتقال حرارت جوشش بر سطح شیاردار دایره‌ای بهتر شده است. بر طبق نتایج دادجو و همکاران [11]، با تغییر موقعیت سطح گرمکن از افقی به عمودی شدت انتقال حرارت جوشش کمتر می‌شود. در واقع میزان ترشوندگی سطح در دیوار عمودی شیار کمتر از سطح افقی است، زیرا زاویه‌ی تماس حباب بخار در سطح عمودی بیشتر از افقی است. در این مقاله نصف سطح شیار مستطیلی در موقعیت عمودی قرار دارد. همچنین در شیار مستطیلی وجود گوشه‌ها باعث جدایش سخت‌تر حباب‌ها از سطح می‌شود. در شیار مثلثی به دلیل سرخوردن حباب‌ها و تجمع آنها در مرکز شیار، مقاومت حرارتی بیشتر شده و ضریب انتقال

چگالی مایع و بخار، عدد پرانتل مایع، ظرفیت گرمایی ویژه‌ی آب، μ_l لزجت مایع، C_{sf} و n ثابت‌های رابطه‌اند که برای سطح مسی هموار 0.013 و 1 است.

$$T_w - T_{sat} = \frac{h_{fg} C_{sf}}{C_{p,l}} \left[\frac{q}{\mu_l h_{fg}} \left(\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right)^{0.5} \right]^{\frac{1}{3}} pr^n \quad (9)$$

در شکل 9 منحنی جوشش آب دیونیزه و منحنی روزنو دیده می‌شود و تطابق خوبی بین داده‌های جوشش آب دیونیزه و مرجع [19] وجود دارد. همچنین عدم قطعیت شار حرارتی در شکل 9 نشان داده شده است.

3-2- جوشش فروسیال اکسید آهن/آب روی سطح گرمکن هموار

آزمایش جوشش برای فروسیال اکسید آهن/آب 0.01 درصد حجمی بر روی سطح هموار انجام شد. نمودار شار حرارتی بر حسب دمای مازاد و ضریب انتقال حرارت بر حسب شار حرارتی جوشش فروسیال اکسید آهن/آب در مقایسه با آب دیونیزه در شکل 10 و 11 دیده می‌شود.

دمای اشباع نانوسیال 96 درجه سانتی‌گراد است. با توجه به شکل 10 در تمام شارهای حرارتی نمودار جوشش فروسیال به سمت چپ انتقال یافته است، بدین معنا که در یک شار حرارتی یکسان نیاز به اختلاف دمای مازاد کمتری دارد. ضریب انتقال حرارت جوشش نانوسیال نسبت به آب به طور متوسط 26.4 درصد افزایش یافته است. این مقدار، میانگین درصد افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش نتایج به دست آمده از رابطه‌ی 10 است.

$$\Delta h = \frac{h_{nf} - h_w}{h_w} \times 100 \quad (10)$$

در رابطه‌ی 10، h_{nf} و h_w به ترتیب ضریب انتقال حرارت نانوسیال و آب است. علت بهبود انتقال حرارت را می‌توان بالا بودن ضریب هدایت حرارتی نانوذرات

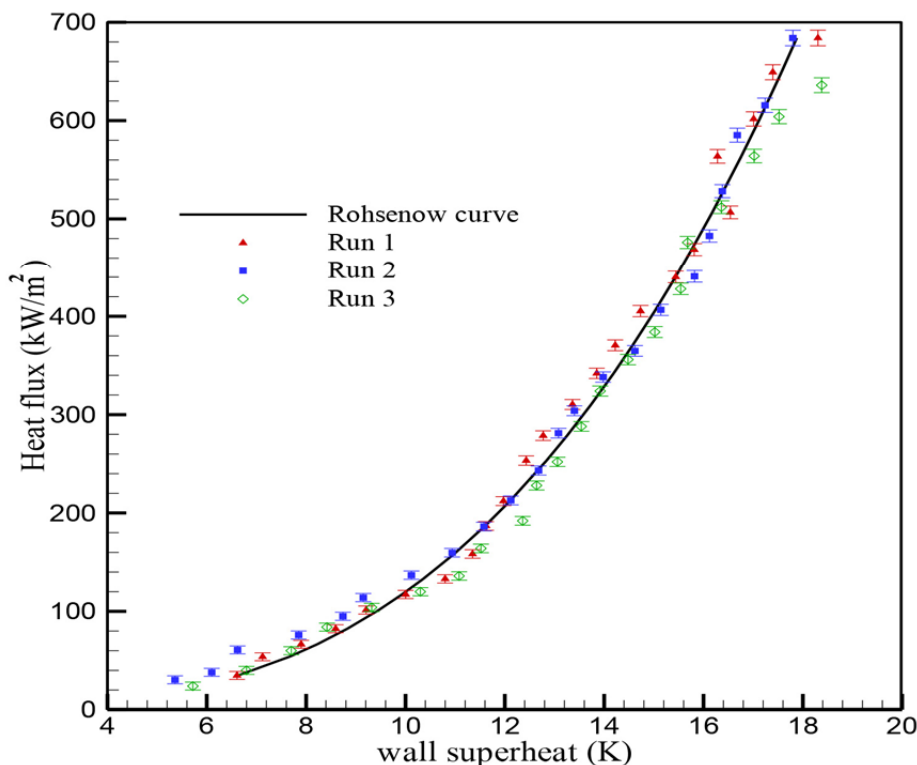


Fig. 9 Comparison of dionized water boiling curve with Rohsenow curve

شکل 9 مقایسه‌ی منحنی جوشش آب دیونیزه و منحنی روزنو

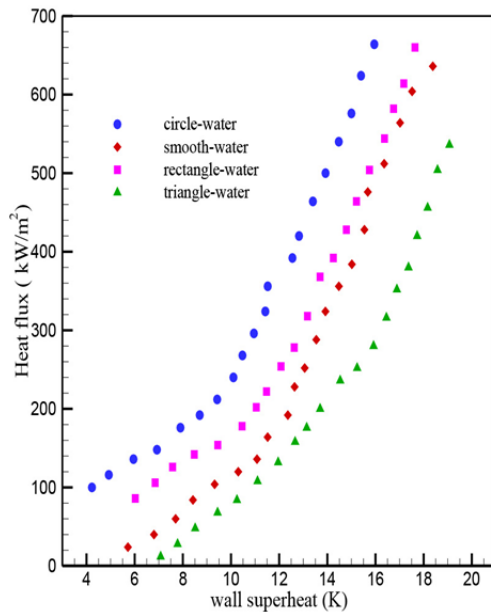


Fig. 12 Boiling curve of dionized water on grooved surface

شکل 12 منحنی جوشش آب دیونیزه بر روی سطوح شیاردار

می‌رود انتقال حرارت جوشش بر سطح شیاردار بهبود یابد، اما در سطوح شیاردار مستطیلی و مثلثی نتایج برخلاف انتظار بوده است. ضریب انتقال حرارت جوشش به طور متوسط در جوشش فروسیال بر سطح با شیاردای 40.7 درصد افزایش و در مستطیلی و مثلثی به ترتیب 21.8 و 88.7 درصد کاهش نسبت به سطح صاف داشته است. علت این نتیجه را می‌توان تجمع بیشتر نانوذرات در گوشه‌های شیاردار مستطیلی و مثلثی و تشکیل میکرو لایه در زیر حباب‌ها دانست که باعث مسدود شدن مکان‌های هسته‌زایی شده و ضریب انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. همچنین جدایش راحت‌تر حباب‌ها در شیاردای انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد.

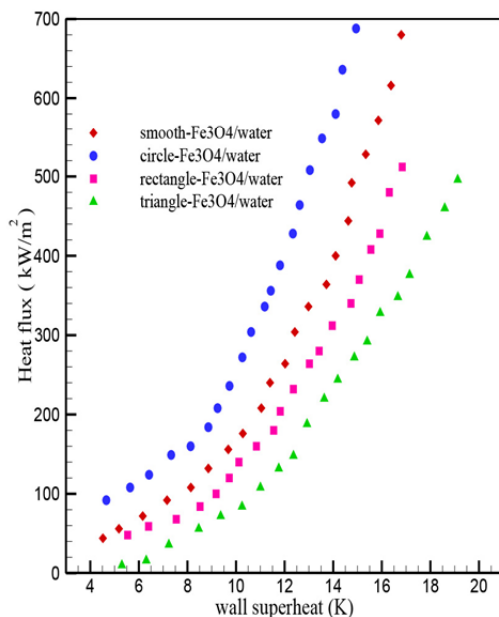


Fig. 13 Boiling curve of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{water}$ on grooved surface

شکل 13 منحنی اکسید آهن/آب بر روی سطوح شیاردار

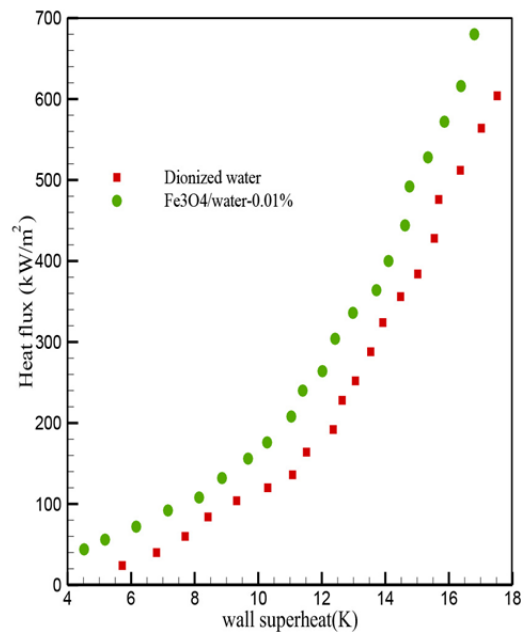


Fig. 10 Boiling curve of dionized water and $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{water}$ nanofluid on smooth surface

شکل 10 منحنی جوشش آب دیونیزه و نانوسیال اکسید آهن/آب بر روی سطح هموار

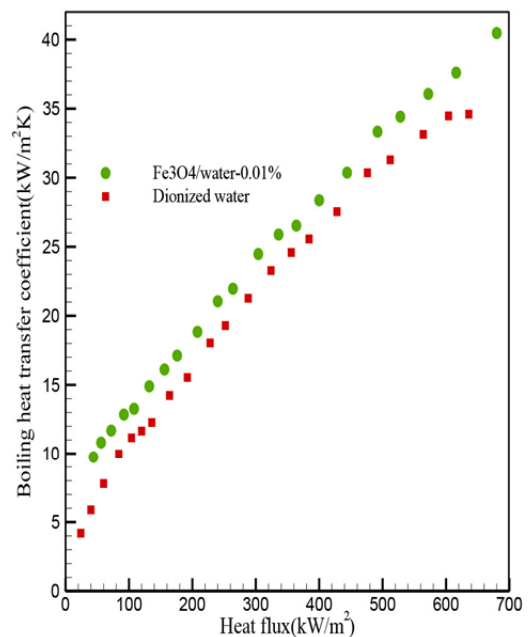


Fig. 11 The boiling heat transfer coefficient-heat flux plot for dionized water and $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{water}$ nanofluid on smooth surface

شکل 11 نمودار ضریب انتقال حرارت جوشش- شار حرارتی آب دیونیزه و نانوسیال اکسید آهن/آب بر روی سطح هموار

حرارت نسبت به آب دیونیزه کاهش می‌یابد.

4-3 جوشش نانوسیال اکسید آهن/آب بر روی سطوح شیاردار

آزمایش جوشش استخری نانوسیال اکسید آهن/آب با غلظت 0.01 درصد بر روی سطوح شیاردار نیز انجام شده است که در شکل 13 نتایج آن دیده می‌شود. با توجه به افزایش سطح در سطوح شیاردار نسبت به سطح صاف انتظار

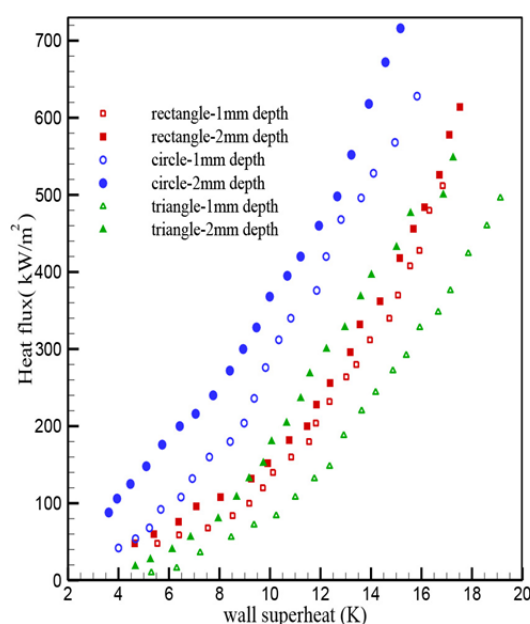


Fig. 15 The effect of groove depth on pool boiling of ferrofluid

شکل 15 اثر عمق شیار بر جوشش استخری فروسیال

مهم‌ترین نتایج حاصل شده از آزمایش‌ها عبارت‌اند از:

- در جوشش آب دیونیزه بر سطوح شیاردار، سطح با شیار دایره‌ای و مستطیلی موجب بهبود انتقال حرارت و سطح با شیار مثلثی موجب کاهش نرخ انتقال حرارت نسبت به سطح صاف شده است. در شیار مثلثی به دلیل تجمع حباب‌ها در مرکز شیار مقاومت حرارتی افزایش می‌یابد.
- ضریب انتقال حرارت در جوشش فروسیال بر سطوح شیاردار دایره‌ای افزایش و بر سطوح شیاردار مستطیلی و مثلثی کاهش داشته است که علت آن رسوب بیشتر نانوذرات در شیار مستطیلی و مثلثی نسبت به دایره‌ای به دلیل وجود گوشه‌های شیار بوده است.
- با افزودن عمق شیارها، به دلیل افزایش سطح گرمکن، نرخ انتقال حرارت جوشش هم آب و هم فروسیال بیشتر شده است.

5- مراجع

- [1] A. E. Bergles, Enhancement of pool boiling, *International journal of refrigeration*, Vol. 20, No. 8, pp. 545-551, 1997.
- [2] S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME-FED*, Vol. 231, No. 1, pp. 99-106, 1995.
- [3] M. Shi, M. Shuai, Z. Chen, Study on pool boiling heat transfer of nanoparticle suspensions on plate surface, *Journal of Enhanced Heat Transfer*, Vol. 14, No. 3, pp. 223-231, 2007.
- [4] R. Chandra, R. Kathiravan, Pool boiling characteristics of multiwalled carbon nanotube based nanofluids over a flat plate heater, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 5, pp. 1289-1296, 2011.
- [5] S. Vafaei, Nanofluid pool boiling heat transfer phenomenon, *Powder Technology*, Vol. 227, No. 1, pp. 181-192, 2015.
- [6] P. Vassallo, R. Kumar, Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 2, pp. 407-411, 2004.
- [7] A. K. Das, P. Saha, Nucleate boiling of water from plain and structured surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, No. 8, pp. 967-977, 2007.
- [8] A. K. Das, P. Saha, Performance of different structured surfaces in nucleate pool boiling, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 17, pp. 3643-3653, 2009.
- [9] V. Umesh, B. Raja, A study on nucleate boiling heat transfer characteristics of pentane and CuO-pentane nanofluid on smooth and milled surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 64, No. 1, pp. 23-29, 2015.
- [10] P. Narayan, A. K. Baby, Survey on nucleate pool boiling of nanofluids: the effect of particle size relative to roughness, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 10, No. 7, pp. 1099-1108, 2008.

3-5- اثر عمق شیار سطوح شیاردار بر جوشش آب و نانوسیال اکسید آهن/آب

در ادامه عمق شیارهای سطوح شیاردار از 1 به 2 میلی‌متر توسط دستگاه وایرکات افزایش داده شد. زبری سطوح همانند سطوح قبلی است. آزمایش جوشش آب دیونیزه و نانوسیال اکسید آهن/آب بر روی سطوح شیاردار با عمق بیشتر انجام شد که به ترتیب در شکل‌های 14 و 15 منحنی جوشش آنها نشان داده شده است. با توجه به شکل 14 و 15 افزایش عمق شیارها باعث بهبود انتقال حرارت جوشش هم آب و هم نانوسیال شده است.

ضریب انتقال حرارت جوشش آب دیونیزه به طور متوسط بر روی سطوح شیاردار با عمق 2 میلی‌متری مستطیلی، دایره‌ای و مثلثی به ترتیب 18.9، 12.8 و 43.5 درصد نسبت به عمق 1 میلی‌متر افزایش یافته است. در جوشش نانوسیال اکسید آهن/آب، ضریب انتقال حرارت جوشش به طور متوسط در سطوح شیاردار مستطیلی، دایره‌ای و مثلثی به ترتیب 40.7، 21.88 و 40.6 درصد با افزودن عمق بیشتر شده است. با اضافه کردن عمق، سطح انتقال حرارت افزایش یافته، چگالی نقاط هسته‌زا و تعداد حباب‌های تشکیل شده بیشتر می‌شود. به علاوه در هنگام افزودن عمق توسط دستگاه وایرکات ترک‌های شیارها افزایش یافته که باعث بیشتر شدن شدن مکان‌های هسته‌زا می‌شود.

4- نتیجه گیری

در این مقاله جوشش آب دیونیزه و نانوسیال اکسید آهن/آب با غلظت 0.01 درصد حجمی بر روی سطح هموار و سطوح شیاردار به طور تجربی بررسی شده است. استفاده از نانوسیال باعث بهبود ضریب انتقال حرارت جوشش می‌گردد، البته به شرط اینکه پارامتر اثر متقابل سطح-نانوذرات بزرگتر از یک بوده و نانوسیال کاملاً پایدار باشد. نوع و عمق شیارها بر نتایج جوشش نیز اثرگذار است.

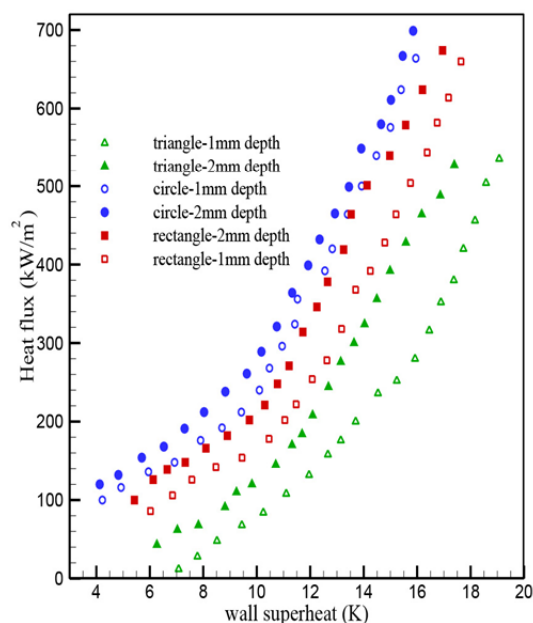


Fig. 14 The effect of groove depth on pool boiling of deionized water

شکل 14 اثر عمق شیار بر جوشش استخری آب دیونیزه

- boiling heat transfer of ferrofluid on surfaces deposited with nanofluid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 19-30, 2016. (in Persian فارسی)
- [16] P. Berger, N. B. Adelman, K. J. Beckman, Preparation and properties of an aqueous ferrofluid, *Journal of Chemical Education*, Vol. 76, No. 7, pp. 943-948, 1999.
- [17] S. Wu, D. Zhu, X. Li, Thermal energy storage behavior of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanofluids, *Thermochimica Acta*, Vol. 483, No. 1, pp. 73-77, 2009.
- [18] J. P. Holman, *Experimental methods for engineers*, Eighth Edition, pp. 63-72, New York: McGraw-Hill, 2012.
- [19] D. Wen, Y. Ding, Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based Y-alumina nanofluids, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 265-274, 2005.
- [11] M. Dadjoo, N. Etesami, M. N. Esfahany, Influence of orientation and roughness of heater surface on critical heat flux and pool boiling heat transfer coefficient of nanofluid, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 124, No. 1, pp. 353-361, 2017.
- [12] R. Pastuszko, M. Piasecka, Pool boiling on surfaces with mini-fins and micro-cavities, *6th European Thermal Sciences Conference*, Poitiers, France, September 4-7, 2012.
- [13] J. H. Lee, T. Lee, Y. H. Jeong, Experimental study on the pool boiling CHF enhancement using magnetite-water nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 10, pp. 2656-2663, 2012.
- [14] A. Abdollahi, M. R. Salimpour, N. Etesami, Experimental analysis of magnetic field effect on the pool boiling heat transfer of a ferrofluid, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 111, No. 1, pp. 1101-1110, 2017.
- [15] A. Abdollahi, M. R. Salimpour, N. Etesami, Experimental analysis of pool