

بررسی آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت در جوشش استخری با استفاده از دینامیک حباب‌ها در سه محلول آبی، الکترولیتی و نانوسیال

این پژوهش به بررسی تغییرات ضریب انتقال حرارت در جوشش استخری در سه محلول آبی، الکترولیتی و نانوسیال پرداخته است. یک ظرف شیشه‌ای عایق بندی شده با یک استوانه مسی در درون آن به عنوان سطح انتقال حرارت با زبری ثابت لحاظ گردید. پارامترهای دینامیکی حباب تاثیر بسزایی بر ضریب انتقال حرارت داشت. رسوب ناشی از نانوذرات و نمک در نهایت موجب تعویق فرآیند تبدیل جوشش هسته‌ای به جوشش فیلمی شد. نتایج نشان داد که نانوسیال اکسید مس میزان ضریب انتقال حرارت را در حدود ۳۸/۴۴٪ بیشتر از آب دی‌یونیزه و ۳۹/۷۶٪ بیشتر از محلول نمک ارتقا داد.

محسن خوشه چین^۱
دانشجوی دکترا

سمیرا قطبی نسب^۲
کارشناسی ارشد

اکبر محمدی دوست^۳
استادیار

واژه‌های راهنما: ضریب انتقال حرارت جوشش، قطر خروج حباب، فرکانس جدایش حباب، محلول

۱- مقدمه

جوشش هسته‌ای به عنوان یکی از کارآمدترین حالت‌های انتقال حرارت است که به طور گسترده در صنعت برای کاربردهای گسترده‌ای مانند راکتورهای هسته‌ای، برج‌های تقطیر، سیستم‌های تهویه و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. وجود گرمای نهان تبخیر بالا در این فرآیند، از ویژگی‌های خاص دینامیک حباب (فرکانس جدایش حباب، تراکم نقاط مولد حباب، قطر جدایش حباب) و پارامترهای مهم حرکتی است که باعث برتری جوشش هسته‌ای بر سایر حالت‌های انتقال حرارت می‌شود [۱]. تقویت انتقال حرارت در فرآیند جوشش باعث می‌شود تا سیستم‌هایی که از جوشش به عنوان فرآیند انتقال حرارت استفاده می‌کنند از انرژی بیشتری بهره‌مند شوند و اندازه و حجم دستگاهی آن‌ها کاهش و عملکرد حرارتی آن‌ها را بهبود یابد [۲]. عملکرد دستگاه‌ها در بسیاری از کاربردها به طور فزاینده‌ای وابسته به توانایی کاهش مقادیر زیادی از حرارت می‌باشد که شامل سوپر کامپیوترها، مراکز داده کامپیوتری^۴، وسایل الکترونیکی هیبریدی خودرو^۵، مبدل‌های

^۱ دانشجوی دکترا، گروه مهندسی شیمی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران mohsen.khooshehchin@yahoo.com
^۲ کارشناسی ارشد، گروه صنایع شیمیایی، مرکز علمی کاربردی دهلران، ایلام، ایران samiraghotbinasab@yahoo.com
^۳ نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی شیمی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران mohammadidoust@gmail.com
تاریخ دریافت: ۹۹/۰۱/۰۴، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۵/۰۵

^۴ computer data centers

^۵ hybrid vehicle power electronics

حرارتی برای ذخیره سازی هیدروژن^۱، رادار پیشرفته، تجهیزات پزشکی اشعه ایکس^۲، هواپیما، ماهواره و فضاییهای آویونیک^۳ و سلاح های انرژی لیزر و مایکروویو^۴ و غیره که به طور کلی در کاربردهای نسبتاً کم دمایی دسته بندی شده اند [۳-۷]. هنگام استفاده از انتقال حرارت فرآیندهای دو فازی در کاربردهای عملی، تعیین دقیق میزان انتقال حرارت جوشش هسته ای و محدودیت آن بسیار مهم است. این کار را می توان با تعریف شار انتقال حرارت در مقابل میزان تغییرات دما (ΔT_{sat}) بررسی نمود. ΔT_{sat} تفاوت بین دمای دیواره گرمایش (T_w) و دمای آب اشباع (T_{sat}) است. تعیین حد بالایی انتقال حرارت جوشش هسته ای، شار حرارت بحرانی^۵ نامیده می شود که پارامتری بسیار مهم است [۸]. شار حرارت بحرانی نقطه ای است که در آن منحنی جوشش، از جوشش هسته ای به جوشش فیلمی منتقل می شود. این ناحیه با خشک شدن در سطح گرم شده مشخص شده، که موجب صدمه دیدن سطح انتقال حرارت می شود. بنابراین پیش بینی شار حرارت بحرانی برای عملکرد انتقال حرارت و ایمنی تجهیزات حرارتی بسیار مهم است [۹]. افزایش ضریب انتقال حرارت^۶ و شار حرارت بحرانی با افزایش نقاط مولد حباب و فعال ماندنشان جهت تولید هر چه بیشتر حبابها برای ایجاد تلاطم و اغتشاش در محلول در حال جوشش میسر می شود [۱۰].

در نتیجه ای این امر، محققین را به دنبال بررسی خواص محلول های مختلف و اثر آنها بر افزایش ضریب انتقال حرارت و شار حرارت بحرانی سوق داده است [۱۱، ۱۲]. این مواد شامل محلول های خالص (مانند آب) [۱۳، ۱۴]، چند جزییها [۱۵، ۱۶]، الکترولیتی [۱۷]، الکلی [۱۸، ۱۹]، نانوسیالات [۲۰، ۲۲]، مبردها [۲۳، ۲۴] و غیره شده است. در میان بررسی محلول های مختلف، محلول های نمکی [۲۵] که به علت حضور همیشگی در محلول های پایه در صنعت مانند آب و در نتیجه رسوب آنها و همچنین استفاده از نانوذرات فلزی به علت وجود ضریب رسانش حرارتی بالا [۲۶]، موجب شده تا بررسی ها در این دو محلول از اهمیت بالایی برخوردار باشد. مطالعات زیادی در رابطه با خواص ترموفیزیکی و انتقال حرارت نانوسیالها در گرمایش جوشش استخری انجام شده است [۲۷-۳۹].

هدف از انجام این پروژه، بررسی اثرات محلول های خالص، نمکی و نانوسیالات بر ضریب انتقال حرارت و شار حرارت بحرانی می باشد. در واقع با بررسی رفتار این محلولها بر سطح انتقال حرارت، به بررسی تغییر خواص سطح انتقال حرارت و تاثیرشان بر دو پارامتر ضریب انتقال حرارت و شار حرارت بحرانی پرداخته خواهد شد. نکته مهم افزایش هر چه بیشتر شار حرارتی بحرانی می باشد، که با پایدار ماندن هر چه بیشتر جوشش هسته ای فرآیند دیرتر به جوشش فیلمی تبدیل شده در نتیجه انتقال حرارت بیشتر و صدمه کمتر بر سطح انتقال حرارت حاصل می گردد. علاوه بر این تأثیر مهم نانوذرات در افزایش انتقال حرارت در فرآیند جوشش استخری از دیگر برجستگی های کار می باشد.

¹ heat exchangers for hydrogen storage

² X-ray medical equipment

³ satellite and spacecraft avionics

⁴ microwave directed energy weapons

⁵ Critical heat flux

⁶ Heat transfer coefficient

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- دستگاه آزمایشگاهی

دستگاه جوشش مورد استفاده در این پژوهش، نسخه ارتقاء یافته‌ای از دستگاه گارنفلو^۱ می‌باشد [۴۰]. سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده از یک استوانه مسی توخالی به ابعاد ۲۴، ۱۳ و ۱۶۰ میلی‌متر ترتیب برابر قطر خارجی، قطر داخلی و طول و با زبری متوسط سطح ۱/۱۴ میکرومتر به عنوان سطح انتقال حرارت (گرمکن) در مرکز یک ظرف شیشه‌ای ایمن و ضد حرارتی به ابعاد ۸۶، ۱۵۰ و ۱۸۰ میلی‌متر به ترتیب برابر عرض و ارتفاع و طول قرار داده شده است. برای تولید حرارت در این استوانه مسی از یک لامپ مدادی به قطر و طول ۱۱ و ۱۶۰ میلی‌متری با توان ۱ kW استفاده شده است. همچنین برای ایجاد تغییر در ولتاژ ورودی به لامپ از یک اتوترانسفرماتور با قدرت ۱ kW و توان تغییر ولتاژ از ۰.۷ تا ۳۰۰.۷ به کار گرفته شد. میزان ولتاژ ورودی ۱۰۰.۷ تا ۲۲۰.۷ و بصورت پلکانی ۲۰.۷ تغییر می‌کند. جهت ثابت ماندن حجم و غلظت محلول در حال جوشش، از یک کندانسور در بالای ظرف شیشه‌ای برای تقطیر بخار تعبیه شده است. این کندانسور دست‌ساز بوده که شامل یک مخزن جهت ورود بخار تولیدی از فرآیند جوشش می‌باشد. در داخل مخزن میزان ۱۰ متر لوله آلومینیومی بصورت مارپیچ در آمده و آب سرد در آن جریان دارد تا بخارات را کندانس کرده و به محلول در حال جوشش برگرداند.

۲-۲- سیستم اندازه‌گیری

سیستم اندازه‌گیری شامل یک مولتی‌متر در محدوده $1000V \sim 1 mV$ و $20A \sim 0.1 \mu A$ بر سر جریان الکتریکی ورود به لامپ و چهار عدد ترموکوپل نوع K (عملکرد $180^{\circ}C$ تا $750^{\circ}C$) جهت اندازه‌گیری دمای سطح استوانه و محلول در حال جوشش می‌باشد. سه عدد از ترموکوپل‌ها در در سه سوراخ با زاویه 120° نسبت به هم ایجاد شده‌اند که در نزدیکترین فاصله ممکن به قطر خارجی استوانه (شکل ۲) یعنی ۱ میلی‌متر قرار داده شده‌اند. قطر هر سوراخ ۲ میلی‌متر و عمق آن نیز ۵۰ میلی‌متر (به اندازه طول سنسور ترموکوپل) می‌باشد. ترموکوپل چهارم جهت اندازه‌گیری دمای محلول، مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر ترموکوپل به یک صفحه نمایش دمایی تک کاناله و مدل HANYOUNG ED6-FKMAP4 با دقت خواندن دما بصورت اعشاری و با خروجی ۵A وصل می‌باشند. اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی محلول نانوسیال از دستگاه KD2 pro مدل DECAGON ساخت آمریکا که امکان اندازه‌گیری در محدوده $50^{\circ}C$ تا $150^{\circ}C$ دارا می‌باشد.

۲-۳- شرح آزمایش‌ها

آزمایش‌ها با سه محلول شامل: آب دی‌یونیزه شده، محلول آب نمک به غلظت $20 g.l^{-1}$ و نانوسیال اکسید مس (CuO) (ساخت کمپانی platonicananotech کشور هند، شکلی نزدیک به کروی) با اندازه ذرات ۲۰ نانومتر و غلظت $0.25 wt. \%$ با حجم ۲۱ انجام گرفت. قبل از استفاده از نانوسیال جهت پراکندگی یکنواخت ذرات حدود نیم ساعت در حمام التراسونیک دیجیتالی Elmasonic EP20H ساخت آلمان با توان ۳۷ kHz

¹ Gorenflo, D.

قرار داده می‌شود. در هر مرحله از آزمایشات با استفاده از دوربین فیلم برداری پرسرعت SonyPMW-300K1 از تغییرات رخ داده در سطح گرمکن و محلول در حال جوشش فیلم گرفته، تا اثرات و تغییرات دینامیک حباب را ضبط و سپس این فیلم را با استفاده از نرم افزار EDIUS (جهت ویرایش فیلم) آهسته کرده تا تغییرات دینامیک حباب که شامل فرکانس جدایش، قطر جدایش و همچنین تعداد هسته‌زاهای فعال در واحد سطح است مشاهده و محاسبه شوند. تعداد حباب‌های خروجی در یک ثانیه به عنوان فرکانس، شمارش تعداد حباب‌ها در واحد سطح به عنوان تعداد هسته‌زاهای فعال و در نهایت حباب‌هایی که کاملاً کروی بوده با کولیس نرم افزار اندازه‌گیری شده و میانگین قطرهای محاسبه شده به عنوان قطر متوسط در هر شار حرارتی اندازه‌گیری شدند. لازم به ذکر است که هر آزمایش حداقل ۵ بار تکرار و میانگین داده‌های آزمایشی لحاظ می‌شود. جدول (۱) برخی از مشخصات فیزیکی نانوذره CuO آورده شده است.

۳- عدم قطعیت

در این دستگاه، برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت از قانون سرمایش نیوتن که به صورت زیر است استفاده می‌شود:

$$h = \frac{q/A}{(T_w - T_b)} \quad (1)$$

که در آن T_w دمای سطح انتقال حرارت، A سطح انتقال حرارت، h ضریب انتقال حرارت، q/A شار حرارتی و T_b دمای توده سیال است که روش اندازه‌گیری هر کدام بررسی می‌شود. از آنجا که گرمکن موجود در سیستم توان الکتریکی را به انرژی حرارتی تبدیل می‌کند، مقدار شار حرارتی را می‌توان با استفاده از معادله‌ی زیر محاسبه کرد [۴۱].

$$q = I \cdot V \cdot (\cos\varphi) \quad (2)$$

همچنین سطح گرمکن از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$A = \pi \cdot d \cdot L \quad (3)$$

که در آن I, V و φ به ترتیب معرف اختلاف پتانسیل الکتریکی بر حسب ولت، شدت جریان بر حسب آمپر، φ اختلاف فاز بین اختلاف پتانسیل الکتریکی و شدت جریان (که اختلاف فاز بین اختلاف پتانسیل الکتریکی و شدت جریان ناچیز بوده عملاً می‌توان φ را برابر واحد در نظر گرفت).

معادلات (۴) تا (۶) توسط Macleon به ترتیب برای محاسبه کشش سطحی محلول‌های خالص و چند جزئی پیشنهاد شده است [۴۲].

$$\sigma = P_C^{0.67} T_C^{0.33} Q(1 - T_r)^{1.2} \quad (4)$$

که در آن Q ضریب معادله و به صورت :

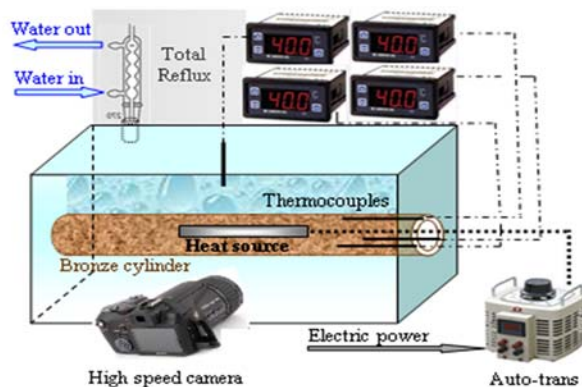
$$Q = 1.1207 \left(+ \frac{T_r \ln P_C}{1 + T_r} \right) - 0.28 \quad (5)$$

$$\sigma_{mix}^{1/4} = \sum_{i=1}^n P_i (\rho_{l,mix} X_i - \rho_{v,mix} Y_i) \quad (6)$$

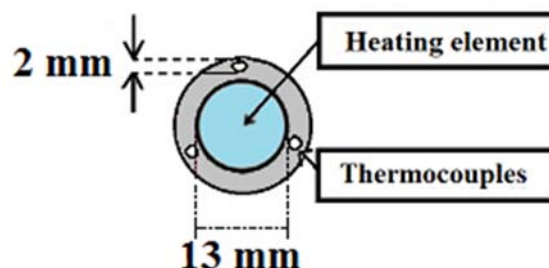
در این معادله برای سیستم‌های غیرقطبی، خطایی معادل ۰.۵٪-۱۰٪ و برای سیستم‌های قطبی-قطبی خطایی معادل ۰.۵٪-۱۵٪ قابل انتظار می‌باشد.

جدول ۱- خواص فیزیکی نانوذره مورد مطالعه

ماده	فرمول شیمیایی	خلوص %	رنگ	چگالی (g. cm^{-3})	وزن مولکولی (g. mol^{-1})
نانوذره	CuO	۹۹/۹۹	پودر سیاه	۶/۴	۷۹/۵۵



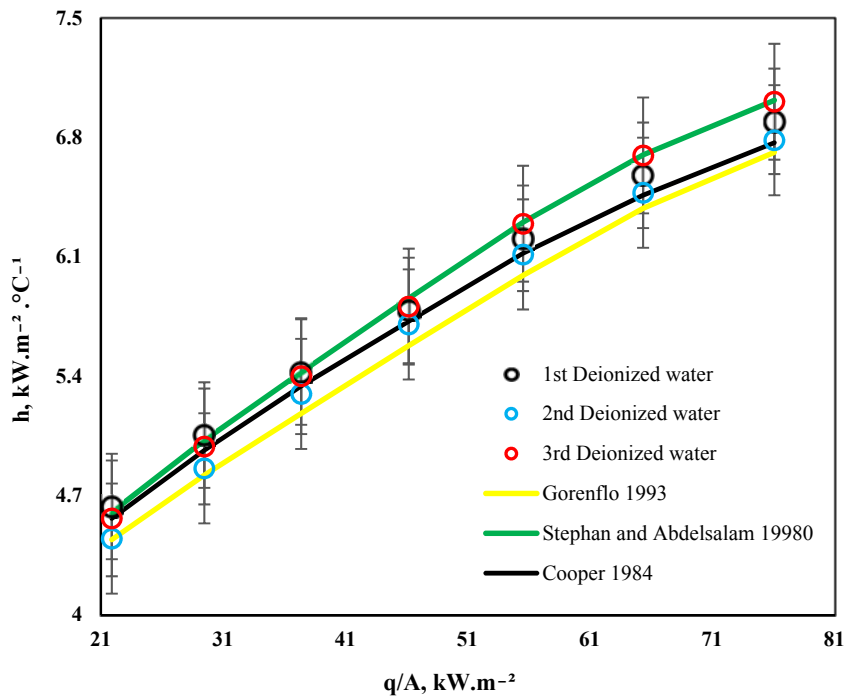
شکل ۱- دستگاه آزمایشگاهی مورد مطالعه در فرآیند جوشش استخری.



شکل ۲- اندازه مکان های ترموکوپل و فواصل آن ها در گرمکن مسی.

۴- نتایج و بحث

همانطور که گفته شد فعال سازی نقاط مولد حباب، رشد حباب بر ضریب انتقال گرما جوشش تأثیر می گذارند [۴۳]. در این بخش ابتدا به بررسی ضریب انتقال حرارت و عوامل موثر بر آن یعنی دینامیک حباب (تعداد هسته زاهای فعال در واحد سطح، قطر جدایش حباب و فرکانس جدایش حباب) و همچنین خواص سیالاتی مانند کشش سطحی، ویسکوزیته، میزان رسوب بر سطح انتقال حرارت و غیره پرداخته می شود. یادآوری می شود که بهترین مساله در افزایش ضریب انتقال حرارت حضور حباب و رشد آن و در نتیجه میزان تولید اغتشاشات و تلاطم در محلول در حال جوشش می باشد. زیرا در جوشش استخری مهمترین عامل اغتشاشات و افزایش ضریب انتقال حرارت وجود همین حباب می باشد. خاطر نشان می شود وجود زیاد و بیش از حد بهینه در تولید حباب، نیز ممکن است به علت ایجاد توده های از فاز بخار به علت به هم پیوستن بر روی سطح انتقال حرارت و عدم دسترسی محلول به سطح انتقال حرارت باعث کاهش ضریب انتقال حرارت گردد.



شکل ۳- مقایسه نتایج ضریب انتقال حرارت جوشش حاصل از عملکرد دستگاه مورد آزمایش با مدل‌های پیشین.

۴-۱- عملکرد صحیح دستگاه آزمایش

برای اطمینان (اعتبارسنجی) از عملکرد درست دستگاه، قبل از شروع به آزمایش، چند تست با آب دی‌یونیزه به عنوان سیال پایه انجام شد. سپس نتایج با سه مدل معروف استفان و عبدالسلام [۴۴] کوپر [۴۵] و گارنفلو [۴۶] مقایسه گردید. نتیجه در شکل (۳) نشان داده شده است. نتایج حاکی از خطای ناچیز دستگاه در مقایسه با مدل‌ها دارد.

۴-۲- تاثیر سه محلول آب دی‌یونیزه، محلول آب نمک و محلول نانوذره اکسید مس بر ضریب انتقال حرارت

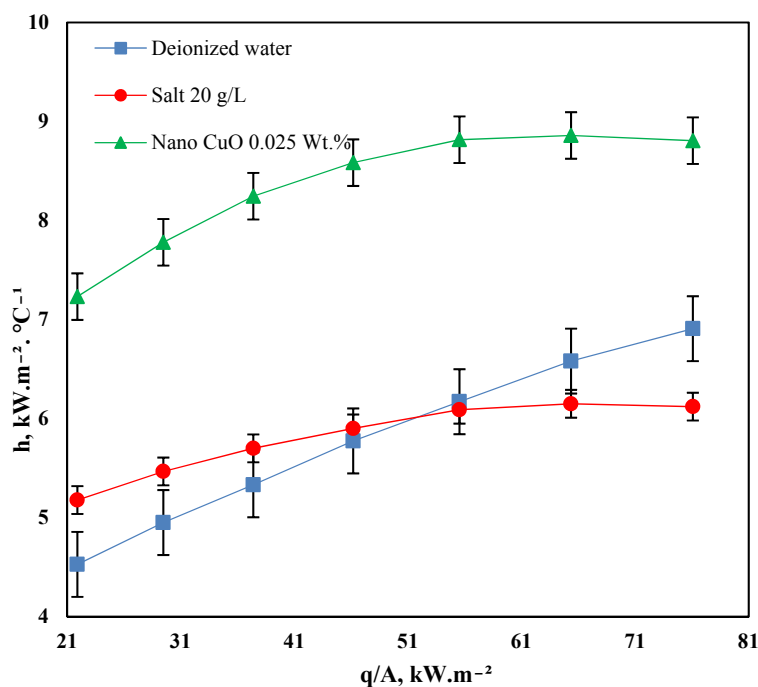
در اولین قدم به بررسی تاثیرات سه محلول مورد استفاده بر روی ضریب انتقال حرارت پرداخته شد. تعداد هسته‌زاهای فعال در واحد سطح، رشد حباب و دینامیک حباب بر ضریب انتقال گرما جوش تأثیر می‌گذارند [۴۳]. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود نانوسیال اکسید مس موجب افزایش چشم‌گیری در ضریب انتقال حرارت شده است، به طوری که با متوسط افزایشی در حدود ۳۸/۴۴٪ بیشتر از آب دی‌یونیزه و ۳۹/۷۶٪ بیشتر از محلول نمک بدست آورده است. نکته مهم و قابل توجه در رفتارهای متفاوتی است که این سه محلول در زمان جوشش از خود نشان می‌دهند، چنانچه آب دی‌یونیزه شده در تمام زمان جوشش با شیبی یکنواخت باعث افزایش ضریب انتقال حرارت شده در حالی که محلول آب نمک در ابتدا، ضریب انتقال حرارت بالاتری از آب خالص داشته ولی در ادامه در حدود شار حرارتی $37 \text{ kW.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ روند رو به

کاهش را شروع کرده، به نحوی که از شار حرارتی حدود $51 \text{ kW.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$ این روند بیشتر شده و حتی به ضریب انتقال حرارتی کمتر از آب دی‌یونیزه شده دست یافته است. در مورد نانوسیال اکسید مس نیز در ابتدا با افزایش بالاتری از دو محلول جوشش را شروع کرده ولی در ادامه کم‌کم این روند کاهش پیدا کرده است. برای علت این تغییر می‌توان گفت که رسوب نمک بر سطح انتقال حرارت در ابتدا چشمه‌های مولد حباب جدیدی پدیدار می‌کند که موجب افزایش ضریب انتقال حرارت به علت تولید حباب می‌شود. اما در ادامه با بیشتر شدن رسوب اولیه بر سطح انتقال حرارت، موجب غیرفعال شدن نقاط فعال مولد حباب شده و در نتیجه روند کاهش را به دنبال خواهد داشت.

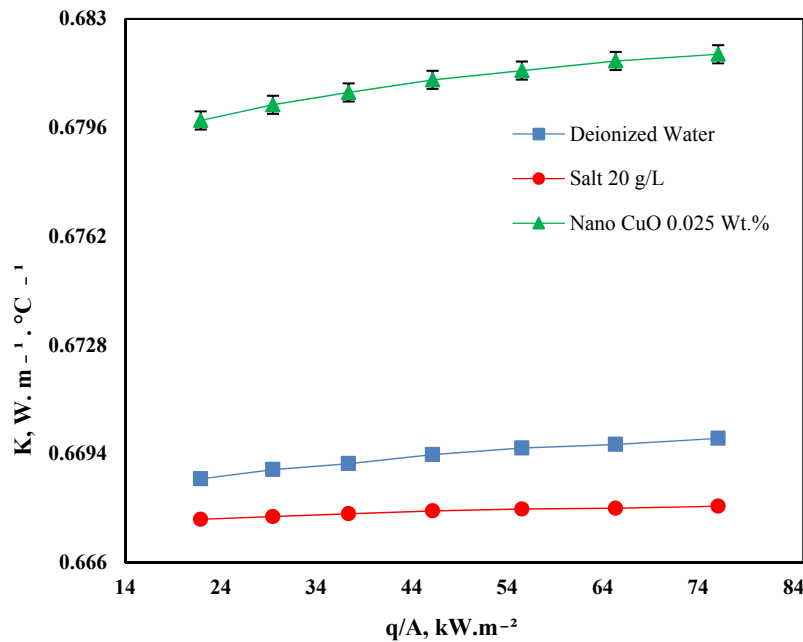
۳-۴- بررسی خواص سیالاتی بر رفتار ضریب انتقال حرارت

۳-۴-۱- تاثیر ضریب رسانش حرارتی

در بخش اول نشان داده شد که حضور نانوذرات در سیال، موجب افزایش چشمگیری در ضریب انتقال حرارت شده است. یکی از مهم‌ترین امتیازات نانوذرات فلزی، بالا بودن ضریب رسانش حرارتی آن‌ها می‌باشد. با توجه به شکل (۵) کاملاً واضح است که ضریب رسانش حرارتی نانوذرات اکسید مس از دو محلول دیگر خیلی بالاتر می‌باشد. بسیاری از دانشمندان تلاش کرده‌اند تا هدایت حرارتی محیط مایع را با تعلیق نانوذرات با هدایت گرمایی بالا مانند فلزات، اکسید فلزی، الماس، نانو لوله‌ها، شیشه‌ها و یا انواع دیگر نانوذرات بهبود بخشند [۲۶].



شکل ۴- مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت در سه محلول آب دی‌یونیزه، محلول نمک و محلول اکسید مس.

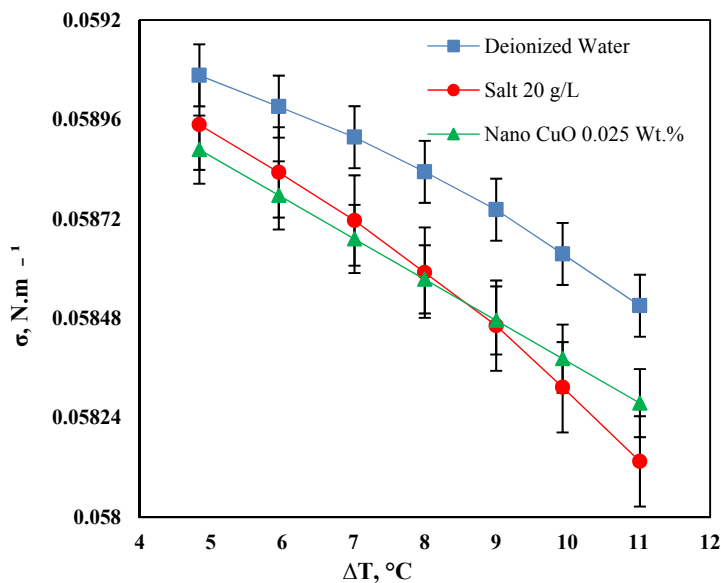


شکل ۵- مقایسه تغییرات ضریب رسانش حرارت در سه محلول آب دی‌یونیزه، محلول نمک و محلول اکسید مس.

در مورد کاهش هدایت حرارتی نمک نسبت به آب می‌توان در دو مورد ذکر کرد: اول اینکه پیوند رسوب و لخته‌های (توده رسوبی) هم در محلول و هم سطح انتقال حرارت به علت ماهیت یونی (پیوند یونی نسبت به پیوند فلزی مانند ذرات نانو اکسید مس هدایت حرارتی خیلی کمتری دارد) هدایت حرارتی کمتری نسبت به آب خالصی که رسوب گذاری نمی‌کند دارد و دوم اینکه پیوند هیدروژنی آب خالص نسبت به پیوند الکتروولانسی ذرات نمک حرارت را راحت تر انتقال می‌دهند.

۴-۳-۲- بررسی تاثیر کشش سطحی

تجزیه و تحلیل نیرو نشان داده است که نیروی کشش سطحی نقش مهمی در دینامیک حباب ایفا می‌کند [۴۷]. نیروی کشش سطحی یک پارامتر تاثیر گذار بر اندازه قطر جدایش حباب و همچنین فرکانس جدایش حباب می‌باشد زیرا این دو پارامتر رابطه عکس با یکدیگر دارند. شکل (۶) مقایسه نیروی کشش سطحی بین سه محلول مورد آزمایش را نشان می‌دهد. میزان کشش سطحی بر اساس روابط و پارامتر تغییر دما بدست آمده است و اینکه چرا میزان آن در محلول نمک از اختلاف دمای ۹ درجه سانتیگراد به بعد کم شده است می‌توان به پیوند قوی الکترواستاتیکی در نمک نسبت به نیروهای واندروالسی بین نانوذرات نسبت داد. نتایج نشان می‌دهد که نیروی کشش سطحی با متوسط اختلاف ۰/۴۰٪ و ۰/۴۲٪ به ترتیب نسبت به محلول آب نمک و نانوسیال به بیشترین نیروی کشش سطحی دست پیدا کرده است. این نیروی کشش سطحی بیشتر آب دی‌یونیزه شده موجب شده تا حباب‌های تولیدی، در هنگام فرآیند جوشش دیرتر نسبت به دو محلول دیگر، از سطح انتقال حرارت جدا شده و بیشتر رشد نمایند. هر چند رشد حباب‌ها بیشتر شده ولی فرکانس جدایش کمتری نسب به دو محلول دیگر بدست می‌آورده، که در شکل‌های (۸) و (۹) کاملاً مشخص است.



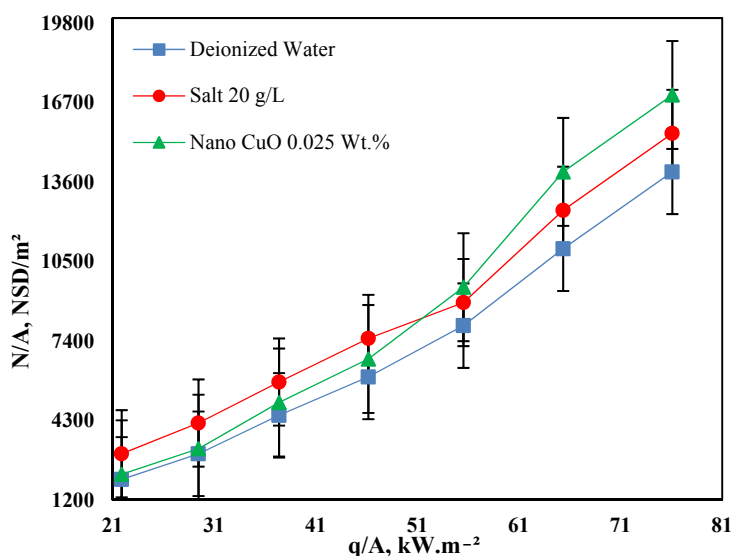
شکل ۶- تغییرات کشش سطحی در سه محلول مورد استفاده

همین امر دلیل کوچک شدن قطر جدایش حباب‌ها در محلول نانوسیال می‌باشد. شایان ذکر است که در کوچک بودن قطر جدایش حباب، نیروی کشش سطحی یک پارامتر بسیار مهم می‌باشد. البته پارامترهای دیگری مانند رسوبات سطحی و میزان فراریت محلول نیز در این زمینه نقش بسزایی در رشد حباب دارند.

۴-۴- بررسی تاثیر دینامیک حباب بر ضریب انتقال حرارت

۴-۴-۱- بررسی تاثیر نقاط مولد حباب

همان طور که در بالا اشاره شد دینامیک حباب از مهمترین عوامل بر رشد حباب در جوشش می‌باشد. نمودارهای زیر به بررسی این سه پارامتر در محلول‌های مورد آزمایش می‌پردازد.



شکل ۷- اثر محلول‌ها بر نقاط فعال مولد حباب

در شکل‌های (۷) مشاهده می‌شود، پارامتر تعداد هسته‌زاهای فعال در واحد سطح، همانند ضریب انتقال حرارت بجز در آب دی‌یونیزه شده یک روند ثابت را دنبال نکرده‌اند. تعداد هسته‌زاهای فعال در واحد سطح در هر سه محلول روند افزایشی را با افزایش شار حرارتی در پی داشته‌اند. علت این افزایش در فعال شدن نقاط یا چشمه‌های غیرفعال مولد حباب است که با افزایش انرژی وارد شده به سطح انتقال حرارت به واسطه افزایش شار حرارتی فعال شده‌اند. در مطالعات گذشته نشان داده شده است که رسوب نانوذرات بر روی بخش گرما می‌تواند ویژگی‌های سطح را تغییر دهد که بر زبری و پس از آن تعداد هسته‌زاهای فعال در واحد سطح تأثیر می‌گذارد [۴۸-۵۲]. همچنین با افزایش چگالی هسته‌زاهای فعال در واحد سطح، شار گرمای بحرانی کاهش می‌یابد (در بخش بعدی توضیح داده خواهد شد) [۵۳]. اما افزایش شار حرارتی، فقط یکی از عوامل افزایش تعداد هسته‌زاهای فعال در واحد سطح می‌باشد، عامل دوم رسوب سطحی می‌باشد که در ادامه توضیح داده خواهد شد. نانوذرات به علت ناپایداری خود در محلول بعد از مدتی از شروع فرآیند به سمت ناپایداری و رسوب بر سطح انتقال حرارت تمایل پیدا می‌کنند. از طرفی دیگر، محلول‌های نمکی به طور ذاتی با افزایش حرارت به سمت کاهش حلالیت پیش می‌روند. تشکیل رسوبات کریستالی روی سطوح انتقال حرارت یک اتفاق رایج است که محلول‌های آبی با حلالیت معکوس در آن دخیل هستند [۵۴]. به غیر از عدم ناپایداری نانوذرات و کاهش حلالیت، موضوع مهم دیگر در رسوب ذرات چه نمکی و چه نانوذرات، وجود خود حباب‌های تولیدی و جدایش آن‌ها بر سطح انتقال حرارت می‌باشد. زیرا به سبب تبخیر مایع، تولید حباب و جدایش‌ها آن از سطح انتقال حرارت، غلظت ذرات (نانو و نمکی) در مرزبندی زیرحباب‌ها یعنی میکرو لایه افزایش می‌یابد [۱]. چرا که با جدایش هر حباب از سطح انتقال حرارت ذرات موجود در سیال در حال جوشش، در ناحیه زیر حباب جدا شده از سطح، رسوب می‌کنند.

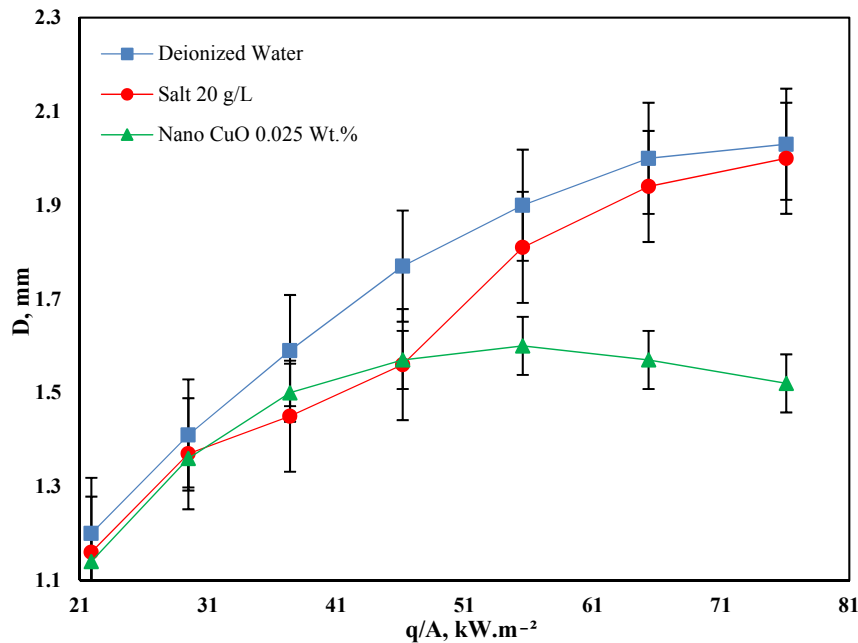
رسوب به دو طریق باعث افزایش در نقاط مولد حباب می‌شود: ۱- با نشستن هر ذره بر سطح انتقال حرارت و نفوذ به داخل چشمه‌های فعال یک چشمه فعال رو به دو چشمه تبدیل می‌کند. ۲- با تشکیل یک لایه روی سطح انتقال حرارت خود موجب تشکیل یک لایه با تعداد فراوانی چشمه فعال شده (اما چشمه‌های کوچکتر نسبت به حالت بدون لایه رسوب).

امتیازی که افزایش یا چشمه‌های فعال مولد حباب به ما می‌دهد، افزایش تولید حباب است که هر چه حباب بیشتر و بیشتر تولید شود در نتیجه اغتشاشات و تلاطم در محلول در حال جوشش افزایش یافته و به دنبال آن افزایش ضریب انتقال حرارت را در پی خواهد داشت. حال سوال مهم اینست که با توجه به نقش مهم افزایش نقاط مولد حباب در افزایش اغتشاشات، چرا محلول نمکی نتوانسته با بیشتر بودن نقاط فعال مولد حباب نسبت به آب دی‌یونیزه شده، موجب افزایش ضریب انتقال حرارت شود؟ و یا چرا نانو سیال بعد از عبور شار حرارتی حدوداً $51 \text{ kW.m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ ضریب انتقال حرارتش رو به افول نهاده است؟

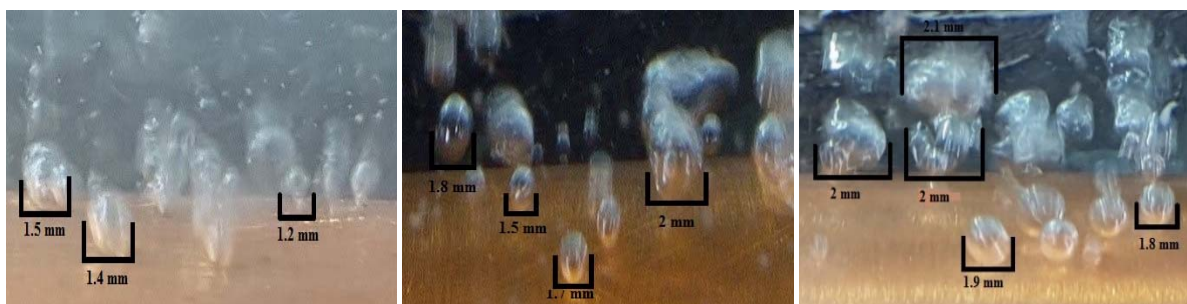
جواب سوالات را باید در بررسی دو پارامتر دیگر که در ادامه توضیح داده خواهند شد بدست آورد.

۴-۴-۲- بررسی تاثیر قطر جدایش حباب

در دومین قدم به بررسی تغییرات قطر جدایش حباب پرداخته شد. قطر جدایش حباب یک پارامتر مهم در تعیین شدت انتقال حرارت در طی فرآیند جوشش می‌باشد [۵۵-۵۷].



شکل ۸- اثر محلول‌های مورد مطالعه بر قطر جدایش حباب



ج

ب

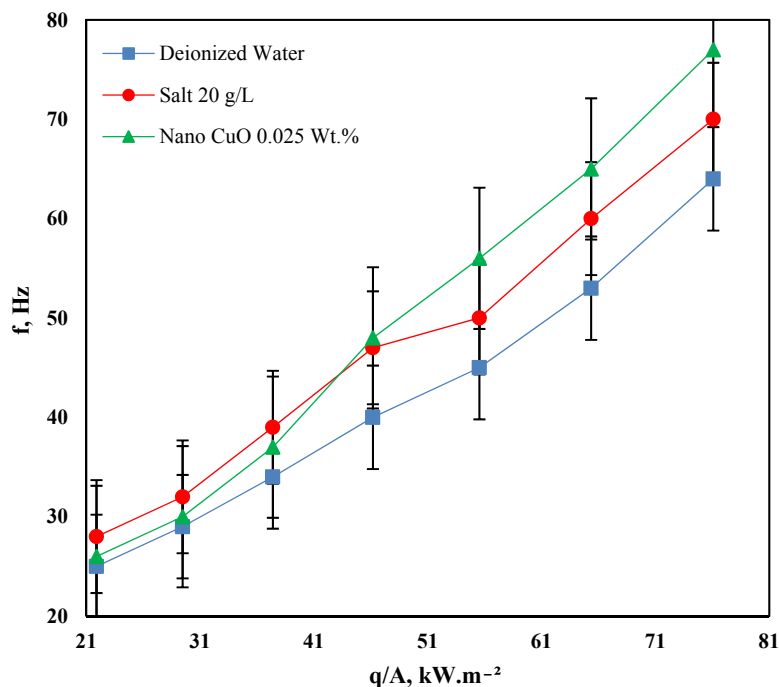
الف

شکل ۹- مقایسه قطر جدایش حباب الف- آب دی‌یونیزه ب- محلول نمک ۲۰ g.l⁻¹ ج- نانوسیال ۰.۰۲۵wt.٪

شکل (۸) نشان می‌دهد که برخلاف روند تغییرات در نقاط مولد حباب، در اینجا قطر جدایش حباب برای آب دی‌یونیزه نسبت به دو محلول دیگر در تمام مدت زمان فرآیند، به بیشترین مقادیر دست پیدا کرده و روند ثابتی را در افزایش نمودار پیش گرفته است. به طوری که محلول نمکی حدود ۱۵/۵٪ و محلول نانوسیال حدود ۱۲/۸۱٪ کاهش در تولید قطر جدایش حباب (شکل (۹)) نسبت به آب دی‌یونیزه شده داشته‌اند. در شکل (۸) به مقدار کاهش و افزایش قطرهای حباب اشاره شده است. کاهش در قطر حباب تولیدی، موجب می‌شود که حباب‌ها هنگام حرکت در محلول، تلاطم کمتری ایجاد کرده و در نتیجه اثر مستقیم بر کاهش ضریب انتقال حرارت بگذارند. کاهش در قطر جدایش حباب را در دو عامل باید دانست، عامل اول وجود همان ذرات و رسوب بر سطح در دو محلول نانوسیال و نمکی می‌باشد که موجب می‌شود یا چشمه‌های فعال مولد حباب را به دو چشمه کوچکتر تبدیل کنند و یا خود باعث تولید چشمه‌های جدید ولی کوچکتر شود. عامل دوم خواص خود سیال مانند کشش سطحی می‌باشد که در تعیین زمان ماند حباب بر سطح انتقال حرارت در هنگام رشد نقش اساسی ایفا می‌کند.

۳-۴-۴- بررسی تاثیر فرکانس تولید حباب

در بررسی سومین پارامتر دینامیک حباب در این قسمت به بررسی فرکانس جدایش حباب پرداخته می‌شود. همان طور که در شکل (۱۰) نیز مشاهده می‌شود، فرکانس جدایش رفتار کاملاً برعکسی از خود نسبت به قطر جدایش حباب نشان می‌دهد. ایوی^۱ نشان داد که قطر جدایش حباب با فرکانس جدایش حباب رابطه عکس دارد [۵۸]. در بررسی قطر جدایش در شکل (۸) نشان داده شد که نانوسیال به کمترین میزان رشد در تولید قطر حباب رسیده، در حالی که با $14/82\%$ به بیشترین میزان فرکانس تولیدی حباب دست پیدا کرده است. همچنین با کاهش قطر جدایش حباب، فرکانس جدایش حباب در سطح پوشش داده شده با نانوذرات نسبت به سطح بدون رسوب افزایش یافته است [۵۹]. این نشان دهنده رابطه عکس فرکانس جدایش با قطر جدایش حباب می‌باشد. چرا که هر چه حباب هنگام جدایش از سطح انتقال حرارت با قطر بزرگتر جدا شود، یعنی مدت زمان بیشتری بر روی سطح قرار گرفته است، در نتیجه قطر جدایش بزرگتر ولی فرکانس جدایش کمتر می‌شود. افزایش و یا کاهش در قطر تولیدی حباب به شدت تابع نیروی کشش سطحی می‌باشد. از طرفی میزان رسوب نیز تاثیر بسزایی دارد، زیرا وجود رسوب باعث تولید چشمه‌های مولد حباب کوچکتر می‌شود. نکته مهمی که در مورد ذرات (مخصوصاً فلزی) در محلول در حال جوشش وجود دارد اینست که، هر چند ذرات به علت ضریب رسانش بالا موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شوند، اما به علت رسوب کردن و افزایش ویسکوزیته در طول فرآیند موجب کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شوند. اما در مورد ذرات با قطر در حدود نانو مقدار ویسکوزیته و رسوب کاهش می‌یابد [۶۰].

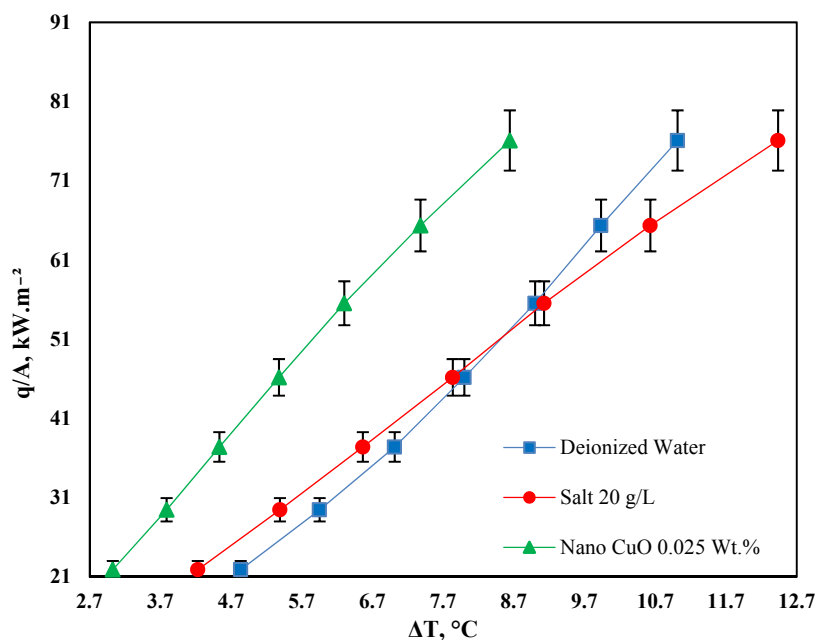


شکل ۱۰- اثر محلول‌های مورد مطالعه بر فرکانس جدایش حباب

¹ Ivey

۴-۵- بررسی تغییرات سوپرهیتی سطح انتقال حرارت

برای بررسی بیشتر اثرات سه محلول به بررسی تغییرات دمایی پرداخته می‌شود. در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، که در شرایط شار حرارتی ثابت برای هر سه محلول تحت آزمایش، محلول حاوی نانوذرات توانسته منحی را بیشتر از دومحلول دیگر به سمت چپ حرکت دهد، یعنی فرآیند جوشش را در سوپرهیتی کمتری از سطح انتقال حرارت $(\Delta T = T_W - T_{sat})$ نسبت به آب دی‌یونیزه شده و محلول نمک انجام دهد. هر چه فرآیند در اختلاف دمایی کمتری انجام گیرد، یعنی سطح انتقال حرارت تحت دمایی کمتری فرآیند را انجام داده و از صدمات احتمالی بالارفتن دما ایمن می‌باشد. به طور کلی نانوسیال CuO با اختلاف دمایی متوسط $3\%/1/0.2$ کمتر نسبت به آب دی‌یونیزه و $3\%/0/11$ نسبت محلول نمکی توانسته میزان شار حرارتی مورد نظر را انتقال دهد. از طرفی هم با کمتر شدن مقدار سوپرهیتی سطح باعث به تاخیر انداختن شار حرارت بحرانی می‌شود (نقطه ورود به جوشش فیلمی). همان طور که گفته شد، در نقطه شار حرارت بحرانی سطح انتقال حرارت به علت اختلاف دمایی بسیار بالایی که با محلول در حال جوشش دارد، خشک شده و موجب کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شود. مطالعات اخیر نشان داده است که کاربرد نانوسیال‌ها برای افزایش انتقال حرارت در سیستم‌های حرارتی مختلف کاربرد اساسی دارند [۶۱-۶۶]. ساختار نانو باعث افزایش میزان خیس شدن سطح انتقال حرارت شده و حرکت آب در نزدیکی سطح گرمکن به دلیل نیروهای موئینگی تسهیل می‌کند. هنگامی که یک ساختار نانو/ میکرو در سطح گرمایش وجود دارد، شار حرارت بحرانی می‌تواند به طور قابل توجهی افزایش یابد [۶۷، ۲۷]. در پایان ذکر این نکته لازم است که وجود رسوب به مرور زمان بر روی سطح انتقال حرارت موجب ایجاد مقاومت حرارتی شده که در نهایت موجب کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شود. لذا باید از تکنیک‌های مختلف و رایج مانند تغییر pH، تابش امواج التراسونیک و اضافه کردن مواد فعال کننده سطحی مانند انواع سورفکتانت‌های رایج در جهت پایداری نانوذره استفاده شود.



شکل ۱۱- اثر محلول‌ها بر میزان سوپرهیتی سطح انتقال حرارت

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش آزمایشگاهی به بررسی تغییرات ضریب انتقال حرارت در جوشش استخری با استفاده از دینامیک حباب‌ها در سه محلول آب دی‌یونیزه، الکترولیتی و نانوسیال پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد که اثر سه پارامتر دینامیک حباب یعنی، قطر جدایش، فرکانس جدایش و تعداد هسته‌زاهای فعال در واحد سطح تاثیر بسزایی به واسطه افزایش در ایجاد اغتشاش و تلاطم در محلول بر ضریب انتقال حرارت دارند. تولید حباب بیشتر و با قطر جدایش بزرگتر و فرکانس بیشتر، تولید اغتشاشات بیشتر در محلول در حال جوشش را به همراه دارد. اما نکته مهم این است که همیشه افزایش این سه پارامتر به سود سیستم نمی‌باشد. زیرا افزایش بیش از حد نقاط مولد یا قطر جدایش حباب باعث بهم پیوستن حباب‌ها شده و با پوشاندن سطح انتقال حرارت با لایه‌ای از بخار موجب کاهش انتقال حرارت از سطح به محلول در حال جوشش می‌شوند. در نتیجه وجود یک مقدار بهینه در دینامیک حباب لازم است. از طرف دیگر نشان داده شد که وجود رسوبات تا حدودی بر روی سطح انتقال حرارت موجب بهبود و به تعویق افتادن شار حرارت بحرانی به واسطه دیر خشک شدن سطح انتقال حرارت به دلیل وجود نیروی موینگی در جذب محلول و رسیدن به سطح انتقال حرارت می‌شود. این مسئله موجب پایدار ماندن بیشتر جوشش هسته‌ای می‌شود.

نتایج این پژوهش بصورت زیر خلاصه می‌گردد:

- ۱- نانوسیال اکسید مس به علت بالاتر بودن فرکانس جدایش، نقاط فعال مولد حباب و رسانش حرارتی توانسته است ضریب انتقال حرارت را از $6/2 \text{ kW.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$ در آب دی‌یونیزه به میزان $8/8 \text{ kW.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$ برساند. این مقدار در حدود $38/44\%$ بیشتر از آب دی‌یونیزه و $39/76\%$ بیشتر از محلول نمک می‌باشد.
- ۲- بیشتر بودن ضریب هدایت حرارتی نانوذرات در کنار کم بودن کشش سطحی که باعث افزایش فرکانس جدایش حباب می‌شود، موجب بیشتر بودن ضریب انتقال حرارت جوشش نانوسیال شده است.
- ۳- به علت رسوب نانوذرات به علت ناپایداری، موجب افزایش شار حرارت بحرانی نسبت به آب و محلول نمکی شده است.
- ۴- وجود رسوب در نانوسیال و محلول نمکی موجب شده که قطر جدایش حباب روند متفاوتی در طول آزمایش‌ها داشته باشد.
- ۵- افزایش ضریب انتقال حرارت موجب می‌شود که در یک روند افزایش شار، میزان انتقال حرارت در سوپرهیتی کمتری انجام شود و در نتیجه سطح انتقال حرارت صدمه کمتری از افزایش دما ببیند.

مراجع

- [1] Esawy, M., and Malayeri, M., "Modeling of CaSO₄ Crystallization Fouling of Finned Tubes during Nucleate Pool Boiling", Chemical Engineering Research and Design, Vol. 118, pp. 51-60, (2017).
- [2] Zonouzi, S.A., Aminfar, H., and Mohammadpourfard, M., "A Review on Effects of Magnetic Fields and Electric Fields on Boiling Heat Transfer and CHF", Applied Thermal Engineering, Vol. 151, pp. 11-25, (2019).
- [3] Mudawar, I., "Assessment of High-Heat-Flux Thermal Management Schemes", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 24, pp. 122-141, (2001).

- [4] Mudawar, I., "Two-phase Microchannel Heat Sinks: Theory, Applications, and Limitations", *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 133, pp. 041002, (2011).
- [5] Mudawar, I., "Recent Advances in High-flux, Two-phase Thermal Management", *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 5, pp. 021012, (2013).
- [6] Liang, G., and Mudawar, I., "Review of Spray Cooling—Part 1: Single-phase and Nucleate Boiling Regimes, and Critical Heat Flux", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 115, pp. 1174-1205, (2017).
- [7] Bahreini, M., Ramiar, A., and Ranjbar, A.A., "Development of a Phase-Change Model for the Volume-of Fluid Method in Open FOAM", *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, Vol. 3, pp. 131-143, (2016).
- [8] Godinez, J.C., Fadda, D., Lee, J., and You, M.S., "Development of a Stable Boehmite Layer on Aluminum Surfaces for Improved Pool Boiling Heat Transfer in Water", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 156, pp. 541-549, (2019).
- [9] Wang, J., Diao, M., and Liu, X., "Numerical Simulation of Pool Boiling with Special Heated Surfaces", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 130, pp. 460-468, (2019).
- [10] Chen, X., and Qiu, H., "Bubble Dynamics and Heat Transfer on a Wettability Patterned Surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 88, pp. 544-551, (2015).
- [11] Emery, T.S., Jaikumar, A., Raghupathi, P., Joshi, I., and Kandlikar, S.G., "Dual Enhancement in HTC and CHF for External Tubular Pool Boiling—A Mechanistic Perspective and Future Directions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 122, pp. 1053-1073, (2018).
- [12] Mei, Y., Shao, Y., Gong, S., Zhu, Y., and Gu, H., "Effects of Surface Orientation and Heater Material on Heat Transfer Coefficient and Critical Heat Flux of Nucleate Boiling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 121, pp. 632-640, (2018).
- [13] Righetti, G., Doretto, L., Sadafi, H., Hooman, K., and Mancin, S., "Water Pool Boiling Across Low Pore Density Aluminum Foams", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 41, pp. 1673-1682, (2020).
- [14] Mohammadi, N., Fadda, D., Choi, C.K., Lee, J., and You, S., "Effects of Surface Wettability on Pool Boiling of Water using Super-polished Silicon Surfaces", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 127, pp. 1128-1137, (2018).
- [15] Khoshechin, M., Salimi, F., and Jahangiri, A., "The Influence of Surface Roughness and Solution Concentration on Pool Boiling Process in Diethanolamine Aqueous Solution", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 2963-2973, (2018).
- [16] Li, Y. Y., Chen, Y. J., and Liu, Z. H., "A Uniform Correlation for Predicting Pool Boiling Heat Transfer on Plane Surface with Surface Characteristics Effect", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 77, pp. 809-817, (2014).

- [17] Fazel, S.A.A., and Shafae, S.B., "Bubble Dynamics for Nucleate Pool Boiling of Electrolyte Solutions", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 132, pp. 081502, (2010).
- [18] Wenzel, U., Balzer, F., Jamialahmadi, M., and Müller-Steinhagen, H., "Pool Boiling Heat Transfer Coefficients for Binary Mixtures of Acetone, Isopropanol, and Water", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 16, pp. 36-43, (1995).
- [19] Das, M.K., and Kishor, N., "Determination of Heat Transfer Coefficient in Pool Boiling of Organic Liquids using Fuzzy Modeling Approach", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 31, pp. 45-58, (2010).
- [20] Shen, G., Ma, L., Zhang, S., Zhang, S., and An, L., "Effect of Ultrasonic Waves on Heat Transfer in Al_2O_3 Nanofluid under Natural Convection and Pool Boiling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 138, pp. 516-523, (2019).
- [21] Rishi, A.M., Kandlikar, S.G., and Gupta, A., "Improved Wettability of Graphene Nanoplatelets (GNP)/Copper Porous Coatings for Dramatic Improvements in Pool Boiling Heat Transfer", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 132, pp. 462-472, (2019).
- [22] Mahmoodi, M., and Hemmat Esfe, M., "Buoyancy Driven Heat Transfer of a Nanofluid in a Differentially Heated Square Cavity under Effect of an Adiabatic Square Baffle", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 1, pp. 1-13, (2015).
- [23] Ji, W. T., Zhao, E. T., Zhao, C. Y., Zhang, H., and Tao, W. Q., "Falling Film Evaporation and Nucleate Pool Boiling Heat Transfer of R134a on the Same Enhanced Tube", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 147, pp. 113-121, (2019).
- [24] Dewangan, A.K., Kumar, A., and Kumar, R., "Experimental Study of Nucleate Pool Boiling of R-134a and R-410A on a Porous Surface", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 40, pp. 1249-1258, (2019).
- [25] Dooly, R., and Glater, J., "Alkaline Scale Formation in Boiling Sea Water Brines", *Desalination*, Vol. 11, pp. 1-16, (1972).
- [26] Ebrahimi-Dehshali, M., Najm-Barzanji, S.Z., and Hakkaki-Fard, A., "Pool Boiling Heat Transfer Enhancement by Twisted-tape Fins", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 135, pp. 170-177, (2018).
- [27] Ahn, H.S., Jo, H.J., Kang, S.H., and Kim, M.H., "Effect of Liquid Spreading Due to Nano/Microstructures on the Critical Heat Flux during Pool Boiling", *Applied Physics Letters*, Vol. 98, pp. 071908, (2011).
- [28] Hegde, R.N., Rao, S.S., and Reddy, R., "Flow Visualization and Study of Critical Heat Flux Enhancement in Pool Boiling with Al_2O_3 -water Nanofluids", *Thermal Science*, Vol. 16, pp. 445-453, (2012).
- [29] Aminfar, H., Mohammadpourfard, M., and Sahraro, M., "Numerical Simulation of Nucleate Pool Boiling on the Horizontal Surface for Nano-fluid using Wall Heat Flux Partitioning Method", *Computers & Fluids*, Vol. 66, pp. 29-38, (2012).

- [30] Ahn, H.S., Lee, Kim, C.J., and Kim, M.H., "The Effect of Capillary Wicking Action of Micro/Nano Structures on Pool Boiling Critical Heat Flux", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 89-92, (2012).
- [31] Shoghl, S.N., Bahrami, M., and Moraveji, M.K., "Experimental Investigation and CFD Modeling of the Dynamics of Bubbles in Nanofluid Pool Boiling", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 58, pp. 12-24, (2014).
- [32] Ignácio, I., Cardoso, E.M., Gasche, J.L., and Ribatski, G., "in ASME 2015 13th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels Collocated with the ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems", (American Society of Mechanical Engineers), pp. V001T004A018-V001T004A018, (2015).
- [33] Hamda, M., and Hamed, M., "Bubble Dynamics in Pool Boiling of Nanofluids", 12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Malta, Valletta, 16-18 July (2016).
- [34] Kim, S. J., McKrell, T., Buongiorno, J., and Hu, L.W., "Experimental Study of Flow Critical Heat Flux in Alumina-water, Zinc-oxide-water, and Diamond-water Nanofluids", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 131, 043204, (2009).
- [35] Kim, S.J., McKrell, T., Buongiorno, J., and Hu, L.W., "Subcooled Flow Boiling Heat Transfer of Dilute Alumina, Zinc Oxide, and Diamond Nanofluids at Atmospheric Pressure", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, pp. 1186-1194, (2010).
- [36] Lee, S. W., Park, S. D., Kang, S. R., Kim, S. M., Seo, H., Lee, D. W., and Bang, I. C., "Critical Heat Flux Enhancement in Flow Boiling of Al₂O₃ and SiC Nanofluids under Low Pressure and Low Flow Conditions", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 44, pp. 429-436, (2012).
- [37] Kim, T.I., Chang, W.J., and Chang, S.H., "Flow Boiling CHF Enhancement using Al₂O₃ Nanofluid and an Al₂O₃ Nanoparticle Deposited Tube", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 2021-2025, (2011).
- [38] Lee, S.W., Kim, K.M., and Bang, I.C., "Study on Flow Boiling Critical Heat Flux Enhancement of Graphene Oxide/Water Nanofluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 65, pp. 348-356, (2013).
- [39] Abedini, E., Behzadmehr, A., Rajabnia, H., Sarvari, S., and Mansouri, S., "Experimental Investigation and Comparison of Subcooled Flow Boiling of TiO₂ Nanofluid in a Vertical and Horizontal Tube", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 227, pp. 1742-1753, (2013).
- [40] Gorenflo, D., Knabe, V., and Bieling, V., "Bubble Density on Surfaces with Nucleate Boiling-its Influence on Heat Transfer and Burnout Heat Flux at Elevated Saturation Pressures", in: *International Heat Transfer Conference Digital Library*, Begel House Inc, Laboratorium für Wärme- und Kältetechnik, Universität -GH- Paderborn, D-4790 Paderborn, Pohlweg 55, Germany, (1986).
- [41] Fazel, S.A.A., "A Genetic Algorithm-based Optimization Model for Pool Boiling Heat Transfer on Horizontal Rod Heaters at Isolated Bubble Regime", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 2731-2744, (2017).

- [42] P. t.Perry's., "*Chemical Engineering*", Handbook 6th Edition, McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights Reserved, Manufactured in the United States of America, (1994).
- [43] Wen, D., and Wang, B., "Effects of Surface Wettability on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer for Surfactant Solutions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 1739-1747, (2002).
- [44] Stephan, K., and Abdelsalam, M., "Heat-transfer Correlations for Natural Convection Boiling", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 23, pp. 73-87, (1980).
- [45] Cooper, M., "Saturation Nucleate Pool Boiling A Simple Correlation", in: *ICHEME Symp. Ser*, Vol. 86, pp. 786-793, (1984).
- [46] Gorenflo, D., "Pool Boiling, VDI Heat Atlas", Dusseldorf, Berlin, Heidelberg Germany, (1993).
- [47] Zhou, J., Zhang, Y., and Wei, J., "A Modified Bubble Dynamics Model for Predicting Bubble Departure Diameter on Micro-pin-finned Surfaces under Microgravity", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 132, pp. 450-462, (2018).
- [48] Sarafraz, M., and Hormozi, F., "Scale Formation and Subcooled Flow Boiling Heat Transfer of CuO–water Nanofluid Inside the Vertical Annulus", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 52, pp. 205-214, (2014).
- [49] Sarafraz, M., and Hormozi, F., "Convective Boiling and Particulate Fouling of Stabilized CuO-ethylene Glycol Nanofluids inside the Annular Heat Exchanger", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 116-123, (2014).
- [50] Sarafraz, M., and Hormozi, F., "Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Characteristics of Dilute Al₂O₃–ethyleneglycol Nanofluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 58, pp. 96-104, (2014).
- [51] Sarafraz, M.M., and Hormozi, F., "Forced Convective and Nucleate Flow Boiling Heat Transfer to Alumina Nanofluids", *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, Vol. 58, pp. 37-46, (2014).
- [52] Salari, E., Peyghambarzadeh, M., Sarafraz, M.M., and Hormozi, F., "Boiling Heat Transfer of Alumina Nano-fluids: Role of Nanoparticle Deposition on the Boiling Heat Transfer Coefficient", *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, Vol. 60, pp. 252-258, (2016).
- [53] Wang, C., and Dhir, V., "Effect of Surface Wettability on Active Nucleation Site Density During Pool Boiling of Water on a Vertical Surface", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 659-669, (1993).
- [54] Evangelidou, M., Esawy, M., and Malayeri, M., "Impact of Thermal Shock on Fouling of Various Structured Tubes During Pool Boiling of CaSO₄ Solutions", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 34, pp. 776-785, (2013).
- [55] Zuber, N., "Hydrodynamic Aspects of Boiling Heat Transfer", (United States Atomic Energy Commission, Technical Information Service), Ramo-Wooldridge Corp., Los

Angeles, CA (United States); Univ. of California, Los Angeles, CA (United States) Sponsoring Org.: USDOE OSTI Identifier: 4175511, (1959).

- [56] Gerardi, C., Buongiorno, J., Hu, L.W., and McKrell, T., "Study of Bubble Growth in Water Pool Boiling through Synchronized, Infrared Thermometry and High-speed Video", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 4185-4192, (2010).
- [57] Pioro, I., Rohsenow, W., and Doerffer, S., "Nucleate Pool-boiling Heat Transfer I: Review of Parametric Effects of Boiling Surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 5033-5044 (2004).
- [58] Ivey, H., "Relationships between Bubble Frequency, Departure Diameter and Rise Velocity in Nucleate Boiling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 10, pp. 1023-1040, (1967).
- [59] Kangude, P., and Srivastava, A., "Performance of SiO₂-water Nanofluids for Single Bubble-based Nucleate Pool Boiling Heat Transfer", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 138, pp. 612-625, (2019).
- [60] Jamal-Abad, T.M., Dehghan, M., Saedodin, S., Valipour, M.S., and Zamzamian, A., "An Experimental Investigation of Rheological Characteristics of Non-Newtonian Nanofluids", *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, Vol. 1, pp. 17-23, (2014).
- [61] Manetti, L.L., Stephen, M.T., Beck, P.A., and Cardoso, E.M., "Evaluation of the Heat Transfer Enhancement during Pool Boiling using Low Concentrations of Al₂O₃-water Based Nanofluid", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 87, pp. 191-200, (2017).
- [62] Khooshehchin, M., Mohammadidost, A., and Ghotbinasab, S., "An Optimization Study on Heat Transfer of Pool Boiling Exposed Ultrasonic Waves and Particles Addition", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 114, pp. 104558 (2020).
- [63] Kim, T., Kim, J.M., Kim, J.H., Park, S.C., and Ahn, H.S., "Orientation Effects on Bubble Dynamics and Nucleate Pool Boiling Heat Transfer of Graphene-modified Surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 108, pp. 1393-1405, (2017).
- [64] Lotfi, R., Rashidi, A.M., and Amrollahi, A., "Experimental Study on the Heat Transfer Enhancement of MWNT-water Nanofluid in a Shell and Tube Heat Exchanger", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 108-111, (2012).
- [65] Cheng, L., and Liu, L., "Boiling and Two-phase Flow Phenomena of Refrigerant-based Nanofluids: Fundamentals, Applications and Challenges", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 36, Vol. 421-446, (2013).
- [66] Yao, S., and Teng, A., "Effect of Nanofluids on Boiling Heat Transfer Performance", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 9, No. 14, pp. 2818, (2019).
- [67] Jun, S., Wi, H., Gurung, A., Amaya, M., and You, S.M., "Pool Boiling Heat Transfer Enhancement of Water using, Brazed Copper Microporous Coatings", *Journal of Heat Transfer* Vol. 138, pp. 071502, (2016).

فهرست نمادهای انگلیسی

A	سطح مقطع، m^2
D	قطر جدایش حباب، mm
d	قطر خارجی لوله، mm
f	فرکانس جدایش حباب، Hz
h	ضریب انتقال حرارت، $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$
K	ضریب رسانش حرارتی، $W \cdot K^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
N/A	نقاط مولد حباب، NSD/ m^2
I	جریان الکتریکی، A
L	طول لوله، mm
Pc	فشار بحرانی
Pi	ضریب پاراکور
Pr	فشار کاهیده
q/A	شار گرمایی، $W \cdot m^{-2}$
T	دما، $^\circ C$
Tc	دمای بحرانی
Tr	دمای کاهیده
V	اختلاف پتانسیل، v
X	جزء کسری مایع
Y	جزء کسری بخار

نمادهای یونانی

ρ	چگالی، $kg \cdot m^{-3}$
σ	کشش سطحی، $N \cdot m^{-1}$
π	عدد پی
ϕ	اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان الکتریکی
زیرنویس	
b	حباب
i	شمارنده
l	مایع
v	بخار
w	دیواره

Abstract

In this experimental research the heat transfer coefficient changes in pool boiling using bubble dynamic in three aqueous, electrolyte and nanofluid solutions have been investigated. An insulated glass tank with a cooper cylindrical element (constant roughness) was considered. The effects of the bubble dynamic parameters such as bubble departure diameter, bubble departure frequency and the density of the bubble generation points are significant and effective on the heat transfer coefficient through increasing agitation and turbulency in the solution. Therefore increasing these parameters had a direct relation to enhance the heat transfer coefficient due to agitation conditions. Although the deposition of the nanoparticles and salt led to decrease the heat transfer coefficient, it aided to make capillary force on heat transfer surface and increase the critical heat flux point. Therefore, it could act as a positive parameter in optimum conditions. Finally, the deposition resulted in a delay in converting the nucleate boiling to film boiling. The results showed that CuO nanofluid increased the heat transfer coefficient from 6.2 (deionized water) to 8.8 kW.m⁻².°C⁻¹. This amount is about % 38.44 and % 39.76 higher than deionized water and electrolyte solution, respectively.