



Investigation of the Effects of pH Scale and Ultrasonic Waves on the Stability of Copper Oxide Nanoparticles in the Pool Boiling Process

Mohsen Khooshehchin¹, Sohrab Fathi², Farhad Salimi^{1*} and Akbar Mohammadidou^{1*}

1. Department of Chemical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Kermanshah, Iran

2. Department of Chemical Engineering, Faculty of Energy, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

mohammadidou¹@iauksh.ac.ir

f.salimi@iauksh.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4710.3114

Received: January/11/2022

Accepted: July/03/2022

Introduction

Pool boiling belongs to the phase conversion process, in which heat transfer can occur ranging from very low to high heat flux (HF). Pool boiling is used in several heat transfer processes including cooling nuclear reactors, electronic chips, and boilers, where obtaining the highest heat transfer is extremely important [1]. Generally, two methods exist to improve the heat transfer: active and passive methods. Due to the high thermal conductivity of nanoparticles, most results show that nanoparticles (except passive) can significantly increase the heat transfer performance of liquids [2]. Several conventional methods exist to stabilize the suspension, including the addition of surfactants, pH change, and ultrasonic radiation [3]. In this laboratory study, the aim is to investigate the stability of nanoparticles by applying ultrasound and changes in pH value.

Materials and Methods

The main part of the laboratory machine including an empty copper cylindrical element with a medium surface roughness of 0.840 μm (stable roughness during tests), an external diameter of 24 mm, an internal

diameter of 13 mm and with a length of 180 mm that was used as a heat transfer surface within a rectangular cube tank with a dimension of 180 $\times$ 130 $\times$ 350 mm. It was made of safe glass with a 10 mm thickness having a high thermal resistance. This vessel was surrounded by some glass wool to avoid thermal dissipation. There was a heater located in the middle of copper element by 11 mm in diameter, length of 160 mm and with a maximum power of 1 kW as a heat source. This heater worked with 220 V Urban Electricity which to modify the input voltage and temperature record, there was an autotransformer 10 KVA (Model MST) placed in the flow path with input of 220 V, AC and output of 0–300 V and at 1000 kW. The voltage range was 100–220 V and increases 20 V stepwise. To create the ultrasound waves, USH 1200 Generator Ultrasonic Homogenizer with 1.2 kW power and the frequency of 24 kHz was used. More details for the experimental apparatus are shown in Figure 1. The experiments were carried out at first with deionized water as base solution in the volume of 1 liter and then by the addition of copper oxide (CuO) nanoparticles with 0.025 wt.% to 0.125 wt.% by the step of 0.025 wt.% were investigated.

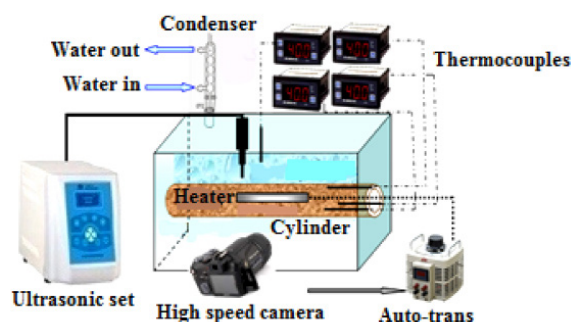


Fig. 1 The schematic of experimental rig.

Results and Discussions

At the first, the effects of applying CuO nanoparticles on the BHTC and the CHF at three sizes of 20, 40 and 60 nm at the constant concentration of 0.025 wt.% in deionized water was investigated. (Figure 2).

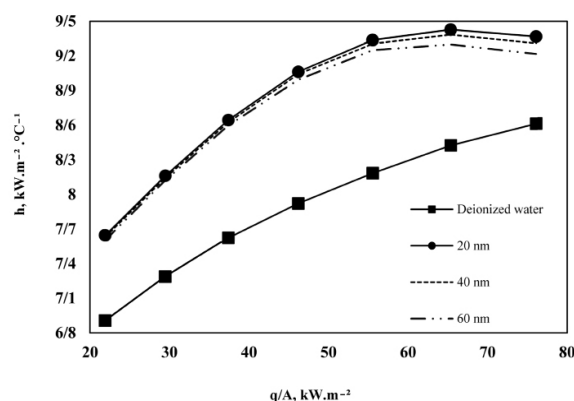


Fig. 2 Effects of size of CuO nanoparticles at constant concentration of 0.025 wt.% on the BHTC relative to deionized water.

It can be seen in Figure 2 that by applying CuO nanoparticles, a significant increase in the performance of BHTC nanofluid compared to deionized water was achieved. A diameter of 20 nm was determined as the optimal size for increasing the BHTC.

Then CuO nanoparticles with 20 nm diameter had the best performance for the increasing BHTC. Subsequently, the effects of nanoparticle concentration (0.025, 0.05, 0.75, 0.1 and 0.125 wt.%) on the BHTC was investigated.

Figure 3 shows that as the concentration of nanoparticles increases from 0.025 wt.% to 0.125 wt.%, the BHTC will increase continuously. But, the main problem was the deposition of nanoparticles on the surface of heat transfer, which it reduced the heat transfer coefficient. In the following, we will deal with the stability of nanoparticles by changing the pH and irradiation of ultrasound waves. For the stability of nanofluid, CuO with water changes from 9.5, 10 and 10.5 and for ultrasound in three radiations have been selected. Also, nanofluid concentrations of 0.075 wt.%, 0.1 wt.%, 0.125 wt.% have been selected.

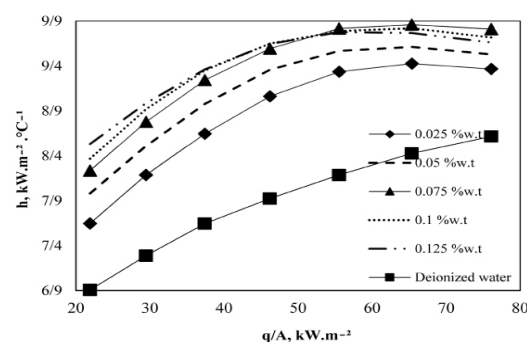


Fig. 3 Effect of CuO concentration on the BHTC relative to deionized water.

The Effect of pH Change and Ultrasonic Waves on BHTC

As shown in Figure 4, the increase of pH caused to increase the heat transfer coefficient reached the maximum value. In addition the ultrasonic waves play important role in increasing the BHTC and stabilizing the nanoparticles.

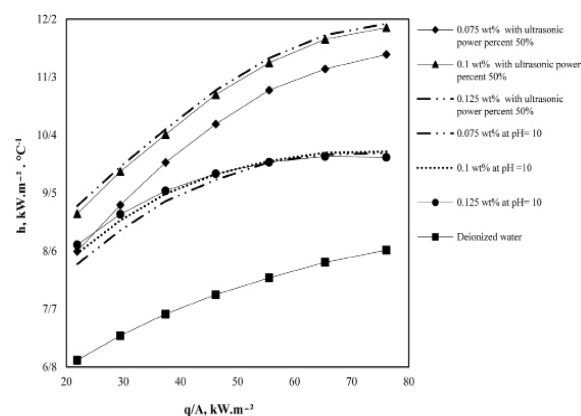


Fig. 4 The effect of pH change and ultrasonic waves on BHTC.

Conclusions

1. The use of both stabilizers increased the heat transfer coefficient by increasing the stability of nanoparticles in the suspension.
2. Increasing the boiling heat transfer coefficient was achieved at a concentration of 0.125wt.% for ultrasonic waves with an average of 37.48% and for pH value of 10 as 22.68% .

References

1. Chung J, Chen T, Maroo S (2011) A review of recent progress on nano/micro scale nucleate boiling fundamentals. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 2:023004.
2. Yang L, Du K (2017) A comprehensive review on heat transfer characteristics of TiO₂ nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108:11-31.
3. Xuan Y, Li Q (2000) Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of heat and fluid flow*, 21:58-64.

بررسی اثرات مقیاس pH و امواج فراصوت بر پایداری نانوذرات مس اکسید در فرآیند جوشش استخری

محسن خوشه‌چین^۱، سهراب فتحی^۲، فرهاد سلیمی^{۱*} و اکبر محمدی دوست^{۱*}

۱- گروه مهندسی شیمی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۲- گروه مهندسی شیمی، دانشکده انرژی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

چکیده

در این پژوهش آزمایشگاهی به بررسی افزایش ضریب انتقال حرارت در جوشش استخری نانوسیال با ذرات مس اکسید (CuO) با استفاده از روش‌های تغییر pH و امواج فراصوت پرداخته شده است. نانوذرات موجب افزایش ضریب انتقال حرارت سیال پایه در فرآیند جوشش شده اما این مواد به علت عدم پایداری با افزایش دما و زمان، موجب رسوب بر سطح گرم‌کن و در نهایت موجب کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شوند. در نتیجه لازم است که غلظت بهینه نانوذرات در سیال به دست آید تا کمترین مقدار رسوبات تشکیل شود. بنابراین استفاده از روش‌هایی که منجر به کاهش رسوب نانوذرات بر روی سطح شوند، مانند افزایش پایداری نانوذرات و استفاده از غلظت بهینه، می‌تواند ضریب انتقال حرارت را افزایش دهد. در این کار از دو روش پایداری نانوذرات در محلول یعنی تغییر pH (۹/۵، ۱۰ و ۱۰/۵) و تابش امواج فراصوت (با توان‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ از توان دستگاه فراصوت (۱/۲ kW)) استفاده شده است. نتایج کار به خوبی نشان داد که در غلظت ۰/۱۲۵ wt.٪ از محلول نانوسیال، بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت با تابش امواج فراصوت (۵۰٪ توان) برابر ۳۷/۴۸٪ و در تغییر اسیدیته محلول (pH=۱۰) برابر با ۲۲/۶۸٪ حاصل شد.

کلمات کلیدی: نانوذرات، ضریب انتقال حرارت جوشش، امواج فراصوت، pH، رسوب

مقدمه

و با صرفه اقتصادی جلب شده است. فرآیندهای تغییر فاز در انتقال حرارت یکی از روش‌های مؤثر در انتقال انرژی هستند که در آن انرژی با شار حرارت بالا و در قالب فرآیند تغییر فاز مایع به بخار و بالعکس رخ می‌دهد [۱]. فرآیند جوشش استخری با تغییر فاز قادر به انتقال شارهای حرارتی خیلی کم تا شارهای بسیار زیاد است.

به علت وجود بحران انرژی (در تولید از منابع) در سراسر جهان، توجه بیشتری به سمت صرفه‌جویی در تولید و تبدیل انرژی به سایر انرژی‌های کارآمد

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی
Ak.Mohammadidoust@iau.ac.ir
f.salimi@iauksh.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4710.3114)

و ته‌نشینی را کاهش می‌دهند، اما جز لاینفک در کاهش هدایت حرارتی نانوسیال است. برخی از محققین تأکید دارند که تجمع ذرات و تشکیل خوشه‌های^۴ نانوذرات باعث کاهش در پایداری نانوسیال می‌شوند [۱۲ و ۱۳]. مادامی که در فرآیند جوشش، تبخیر در میکرو لایه‌ها باعث حفظ و ادامه فرآیند می‌شود، غلظت نانوذرات در این نواحی و پس از جدا شدن هر حباب از سطح، افزایش یافته و موجب رسوب سریع نانوذرات بر روی سطح انتقال حرارت می‌شود. این سازوکار باعث می‌شود تشکیل رسوب در فرآیند جوشش اجتناب‌ناپذیر باشد [۱۴]. هدایت حرارتی نانوسیال‌ها تابع فاکتورهایی مانند شکل، اندازه و پایداری نانوذرات، نوع سیال پایه استفاده شده، غلظت نانوذرات و دمای محلول است [۱۵]. روش‌های متداول برای پایداری نانوسیالات شامل افزودن سورفکتانت، تغییر pH محلول و تابش امواج فراصوت هستند [۱۶]. پراکندگی مناسب نانوذرات در سوسپانسیون را می‌توان با افزایش چگالی بار سطحی (جهت تولید نیروهای دافعه قوی) به‌دست آورد. به‌طور کلی، نانوسیال نباید در نقطه ایزوالکتریک (IEP) قرار داشته باشد. نقطه ایزوالکتریک نقطه‌ای است که در آن مولکول یا ذره دارای بار الکتریکی سطحی خالصی نباشد. در این حالت، پدیده‌های الکتروسینتیکی از بین می‌روند. در صنعت هر دو روش تغییر pH محلول و افزودن سورفکتانت برای دور شدن از نقطه ایزوالکتریک به‌کار می‌برند. براساس نظریه Derjaguin- Landau- Verwey- Overbeek [۱۷]، کنترل کردن pH در محلول یک روش مناسب برای پراکندگی نانوذرات در محلول است. زمانی که pH مساوی یا نزدیک به نقطه IEP است، نانوذرات تمایل به ناپایداری دارند و در نتیجه خوشه‌هایی از ذرات تشکیل و رسوب می‌کنند.

فرآیند جوشش استخری، در تجهیزات صنعتی مانند راکتورهای هسته‌ای، تراشه‌های الکترونیکی، دیگ‌های بخار و غیره، که در آن‌ها دستیابی به بالاترین میزان انتقال حرارت از اهمیت زیادی برخوردار است، نقش اساسی دارد [۲]. به‌طور کلی، دو روش برای افزایش کارایی در انتقال حرارت وجود داد که شامل روش‌های فعال و غیرفعال می‌باشند. در روش‌های فعال نیازمند یک نیروی خارجی مانند ارتعاشات مکانیکی [۳]، الکتروهیدرودینامیک (EHD) [۴] و امواج فراصوت [۵] است. روش‌های غیرفعال نیز شامل تکنیک‌هایی می‌شود که درون محلول و سیستم (بعد از شروع فرآیند) نمی‌توان بر فرآیند تغییر اعمال کرد) انجام می‌گیرد که شامل نوع محلول، جنس و هندسه سطح هستند. این تکنیک‌ها مانند نانوسیال [۶]، دستگاه‌های جریان چرخشی^۲ [۷] و سطوح افزایش یافته [۸] می‌باشند. با توجه به هدایت حرارتی بالای نانوذره، اکثر نتایج نشان می‌دهند که نانوذرات می‌توانند عملکرد انتقال حرارت را در مایعات به‌طور چشم‌گیری افزایش دهند [۹]. اما نکته مهم در مورد افزودن نانوذرات فلزی، افزایش ویسکوزیته مایعات است که موجب افزایش هزینه‌های پمپاژ شده، و از طرفی نانوذرات به‌شدت تمایل به ته‌نشینی داشته که موجب کاهش میزان ضریب انتقال حرارت می‌شود. نانوذرات متداول در صنعت و آزمایشگاه‌ها شامل آلومینیوم اکسید (Al_2O_3)، مس (Cu)، مس اکسید (CuO)، کاربیدسیلیکون (SiC)، کاربیدتیتانیوم (TiC) می‌باشند. نانوذرات فلزی یا اکسید آن‌ها می‌توانند با خواص خود که شامل بالا بودن ضریب هدایت [۱۰ و ۱۱]، افزایش نیروی براونین^۳ در کنار کم بودن ویسکوزیته نسبت به اندازه ذرات در مقیاس میکرومتر، باعث افزایش چشم‌گیری در ضریب انتقال حرارت مخصوصاً در مبدل‌های حرارتی شوند، که این افزایش موجب کاهش در اندازه ساخت تجهیزات گران قیمت می‌شود. اگرچه ذرات در اندازه نانو به‌طور چشم‌گیری مشکل کلوخه شدن

1. Electro Hydrodynamic
2. Swirl Flow Device
3. Brownian Motion
4. Cluster

فعال مولد حباب می‌شود [۲۶]. امواج فراصوت را می‌توان به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم اعمال کرد. در روش مستقیم برای انتشار امواج، پراب را به‌صورت غوطه‌وردر محلول قرار داده، ولی در روش غیرمستقیم ظرف حاوی نمونه را داخل حمامی از مایع قرار داده و سپس امواج از داخل مایع به ظرف نمونه تابانده می‌شود [۲۷]. مشکل اصلی نانوذرات عدم پایداری آن‌ها در محلول و تمایل به ته‌نشینی است که موجب رسوب بر سطح انتقال حرارت، و در نتیجه کاهش میزان انتقال حرارت می‌شوند. در این مطالعه آزمایشگاهی هدف بررسی افزایش ضریب انتقال حرارت به‌وسیله افزودن نانوذرات به محلول در جوشش استخری (رژیم هسته‌ای و ناحیه اشباع) و همچنین پایداری نانوذرات با اعمال امواج فراصوت و تغییرات pH محلول است. واضح است که دو روش ذکر شده جزء روش‌های پایداری نانوسیالات می‌باشند، اما در جوشش استخری به‌علت تولید حباب بر روی سطح انتقال حرارت، پایداری پیچیده و متفاوت‌تر می‌شود زیرا هنگام تولید و جدایش حباب‌ها از روی سطح انتقال حرارت، نانوذرات معلق در محلول به محض جدا شدن هر حباب از سطح انتقال حرارت بر روی سطح نشسته و رسوب می‌کنند. بنابراین لازم است بررسی شود که کدامیک از دو روش موجود، موجب کاهش رسوبات و افزایش میزان انتقال حرارت می‌شود. به‌طور کلی، باید مشخص شود کدام روش پایداری برای نانوذرات در جوشش استخری، عملکرد بهتری داشته بدون اینکه باعث به‌وجود آمدن مشکلات و موانعی برای افزایش میزان انتقال حرارت شود. اصلی‌ترین تفاوت این کار با دیگر تحقیقات را می‌توان در بهینه کردن جزء به جزء پارامترهای تأثیرگذار نانوذرات، امواج فراصوت و همچنین مقیاس pH محلول ذکر نمود. تأثیرگذاری امواج مافوق صوت و مقیاس pH بر پایداری نانوذرات و در نهایت مقایسه این دو از دیگر نوآوری‌های این کار می‌باشد.

به‌طور خلاصه در نقطه ایزوالکتریک، نیروی دافعه بین ذرات به کمترین مقدار خود می‌رسد. گودرزی [۱۸] نشان داد که با تغییر pH نانوسیال $\text{CuO-H}_2\text{O}$ و دور شدن از نقطه ایزوالکتریک نانوذرات (به‌دلیل اینکه نانوسیال‌ها اسیدی یا بازی‌تر می‌شوند)، بازده انتقال حرارت افزایش می‌یابد. سرافراز [۱۹] نشان داد که برای نانوذرات CuO محلول در آب، نقطه ایزوالکتریک در $\text{pH} = 8/33$ بوده، بنابراین برای تثبیت نانوسیال CuO ، pH سوسپانسیون باید تاجایی که امکان دارد کمتر یا بیشتر از $8/33$ باشد که در نهایت pH برابر با $10/2$ را به‌عنوان بهترین مقدار برای پایداری نانوذرات CuO اعلام کرد. از طرفی، پیغمبرزاده [۲۰] در آزمایش‌های خود بیان کرد که pH برابر $10/1$ ، نانوذرات CuO را در محلول به پایدارترین حالت می‌رساند. روش سوم در پایداری نانوذرات استفاده از امواج فراصوت است که از آن برای شکست یا ضعیف کردن نیروی جاذبه واندروالسی در سطح تماس بین ذرات می‌توان استفاده کرد. در صورتی که امواج فراصوت نتوانند کلوخه شدن نانوذرات را به‌طور کامل در هم بشکنند، اما با تبدیل آن‌ها به تراکم‌های کوچک‌تر، موجب افزایش پایداری در نانوسیال می‌شوند [۲۱]. البته کاهش رسوبات یا شکستن کلوخه‌ها به قدرت و مدت زمان تابش امواج فراصوت بستگی دارد. محبوبول [۲۲] مشاهده کرد که پراکندگی نانوذرات با افزایش زمان تابش امواج فراصوت، هدایت حرارتی بالاتر و ویسکوزیته پایین‌تری حاصل می‌گردد. امواج فراصوت با شدت بالا در محلول انتشار پیدا کرده و باعث کاویتاسیون می‌شود [۲۳]. حباب‌هایی که در اثر کاویتاسیون تولید شده، طی چندین دوره رشد می‌کنند و بعد از رسیدن به قطر بحرانی خود متلاشی می‌شوند [۲۴]. اثر مثبت کاویتاسیون ناشی از امواج فراصوت بر روی انتقال حرارت جامد-مایع قبلاً توسط کیم بررسی شده است [۲۵]. از طرفی، تابش امواج فراصوت با جلوگیری از نشست ذرات بر روی سطح گرم‌کن، مانع از مسدود شدن نقاط

دامنه ولتاژ ۷-۱۰۰ تا ۲۲۰ و به صورت پلکانی ۷-۲۰ افزایش یافت. پس از هر بار تغییر ولتاژ به سیستم اجازه داده شد که از نظر تغییرات دمایی ایجاد شده پایدار شده (معمولاً بین ۲ تا ۳ min)، سپس نتایج را ثبت کرده و مجدد ولتاژ افزایش داده می‌شد. برای ثابت نگه داشتن حجم (۲ L) و غلظت محلول در حال جوشش از یک کندانسور دربالای آکواریوم جهت میعان کردن بخارات و برگشت به مخزن استفاده شده است. جهت ایجاد امواج فراصوت، از دستگاه USH 1200 Generator Ultrasonic Homogenizer با توان ۱/۲ kW و فرکانس ۲۴ kHz استفاده شد که جزئیات بیشتر در شکل ۱ قابل مشاهده است.

سیستم اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری مقدار ولتاژ و آمپر مصرفی از یک مولتی‌متر در محدوده ۷-۱۰۰۰ mV و ۲۰ A $\sim 1 \mu A$ استفاده شد. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد جهت ثبت تغییرات دمای ایجاد شده در سطح گرم‌کن، از سه عدد ترموکوپل در سه سوراخ ایجاد شده با زاویه 120° نسبت به هم استفاده شده است. این سوراخ‌ها در نزدیک‌ترین فاصله ممکن به قطر خارجی استوانه یعنی ۱ mm قرار داده شده‌اند. قطر هر سوراخ ۲ mm و عمق آن نیز ۵۰ mm است. در درون هر سوراخ یک ترموکوپل نوع K با طول سنسور ۵۰ mm و قطر ۲ mm، با محدوده عملکرد $180^\circ C$ تا $750^\circ C$ و دارای حساسیت $41 \mu V/^\circ C$ قرار داده شد. صفحه نمایش دمایی که ترموکوپل‌ها به آن وصل شده تک کاناله، از نوع LCD و مدل آن HANYOUNG ED6-FKMAP4 با دقت خواندن دما به صورت اعشاری و با خروجی ۵ A می‌باشد. برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی محلول نانوسیال، از دستگاه KD2pro مدل DECAGON ساخت آمریکا که امکان اندازه‌گیری در محدوده $50^\circ C$ تا $150^\circ C$ دارد است، استفاده گردید. جهت اندازه‌گیری میزان pH محلول نیز از دستگاه pH متر مدل MI150 ساخت کمپانی Milwaukee ایتالیا استفاده شد.

در ادامه، به بررسی مهم‌ترین مدل‌های پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت پرداخته شده است. روزنو [۲۸] مدل خود را بر این فرض که حرکت حباب‌ها از ابتدای ترک سطح انتقال حرارت، بیشترین اهمیت را دارا هستند، ارائه نمود. کوتاتلادزه [۲۹] مدل خود را با استفاده از دو پارامتر بدون بعد و بدون لحاظ کردن زبری سطح انتقال حرارت محاسبه و ارائه داد. استفان [۳۰] معادل خود را با استفاده از برازش چندگانه و با تحلیل و به‌کارگیری ۵۰۰۰ نتایج آزمایشگاهی از ۷۲ مقاله، برای سطوح افقی و تحت فشار اتمسفریک به‌دست آورد. گارنفلو [۳۱] با بررسی و تحلیل آزمایش‌های بی‌شمار و حجم زیادی از داده‌ها، مدل خود را ارائه کرد. مدل گارنفلو تابعی از زبری سطح R_p ، فشارکاهیده و شار حرارتی است. علوی فاضل [۳۲] با مطالعات آزمایشگاهی برروی محلول‌های خالص (مانند آب دی‌یونیزه و مایعات الکلی) با استفاده از اصل حالات متناظر و آنالیز ابعادی مدل خود را ارائه نمود. این مدل‌های ریاضی در جدول ۱ آورده شده است.

مواد و روش‌ها

دستگاه آزمایشگاهی

سیستم مورد مطالعه از یک ظرف مکعب شکل از جنس شیشه‌ای (آکواریوم) به ضخامت ۱۰ mm که دارای مقاومت حرارتی بالا و ابعاد ۱۸۰، ۹۰ و ۳۵۰ mm که به ترتیب طول، عرض و ارتفاع می‌باشند، ساخته شده است. در مرکز این ظرف از یک استوانه‌ای توخالی از جنس مس به قطر خارجی، قطر داخلی و طول به ترتیب ۱۳، ۲۴ و ۱۶۰ mm با زبری متوسط سطح $0.84 \mu m$ به‌عنوان گرم‌کن تعبیه شده است. جهت تولید حرارت، داخل استوانه یک لامپ مدادی به قطر و طول به ترتیب ۱۱ و ۱۶۰ mm با توان حداکثر ۱ kW قرار داده شده است. همچنین برای تغییر در ولتاژ ورودی به لامپ، از یک اتوترانس با توان ۱ kW که قادر به تغییر ولتاژ در بازه ۷-۳۰۰ است، استفاده گردیده است.

جدول ۱ روابط برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت جوشش استخری

محقق	رابطه ریاضی مدل
روزنو [۲۸]	$\frac{h\beta'}{k} \left[\frac{gc\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{\frac{1}{2}} = C_r \left[\frac{\beta'}{\mu} \left(\frac{g_c\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{q}{A} \right]^{\frac{2}{3}} \left(\frac{c\mu}{k} \right)^{-0.7}$
کوتاتلادزه [۲۹]	$h = \left[3.37E - 9 \frac{k_l}{I^*} \left(\frac{H_{fg}}{C_{pl}(\frac{q}{A})} \right)^{-2} M^{*-4} \right]^{\frac{1}{3}}, M^{*-4} = \frac{\left(\frac{p}{\rho_v} \right)^2}{\frac{\sigma g}{\rho_l - \rho_v}}, I^* = \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{0.5}$
استفان [۳۰]	$\frac{hD_b}{k_l} = (0.24E + 7) \left(\frac{qD_b}{Ak_l} \right)^{0.673} \left(\frac{h_{fg}D_b^2}{k_l^2} \right)^{-1.58} \left(\frac{T_{sat}D_bC_{pl}}{k_l^2} \right)^{1.26} \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_l} \right)^{5.22}$ شکل تبرید $\frac{hD_b}{k_l} = 267 \left(\frac{qD_b}{Ak_lT_{sat}} \right)^{0.745} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.581} \left(\frac{\alpha_l}{k_l} \right)^{0.533}$ شکل عمومی رابطه $\frac{hD_b}{k_l} = 0.23 \left(\frac{qD_b}{Ak_lT_{sat}} \right)^{0.647} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.297} \left(\frac{h_{fg}D_b^2}{\alpha^2} \right)^{0.371} \left(\frac{\rho_l\alpha^2}{\sigma D_b} \right)^{0.35} \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_l} \right)^{-1.73}$
گارنفلو [۳۱]	$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{q}{q_0} \right)^{n(p_r)} F(p_r) \left(\frac{R_p}{R_{p0}} \right)^{0.133}$ $n(p_r) = 0.9 - 0.3p_r^{0.3}, F(p_r) = 1.73p_r^{0.27} + \left(6.1 + \frac{0.68}{1 - p_r} \right) p_r^2$
علوی فاضل [۳۲]	$h = \frac{3.253\sigma^{0.125} h_{fg}^{0.125} \left(\frac{q}{A} \right)^{0.876}}{T_{sat} \alpha_l^{0.145}}$



(ب)

(الف)

شکل ۱ الف) شماتیک دستگاه آزمایشگاهی و ب) المنت گرمایشی

را جهت پراکندگی یکنواخت تر ذرات، حدود نیم ساعت در حمام فراصوت دیجیتال Elmasonic EP20H ساخت آلمان با فرکانس ۳۷ kHz قرار داده شد. برای اطمینان از قرار داشتن فرآیند در شرایط جوشش اشباع، در طول آزمایش‌ها به کمک ترموکوپل چهارم که در محلول قرار داده شد، شرایط اشباع بودن همواره کنترل گردید. همچنین در هر مرحله از آزمایش‌ها با استفاده از دوربین فیلم‌برداری پر سرعت Sony PMW-300K1 از تغییرات رخ داده در سطح گرم‌کن و محلول در حال جوشش فیلم گرفته شد. در نهایت اثرات و تغییرات دینامیک حباب ضبط و سپس با استفاده از نرم‌افزار EDIUS (نرم‌افزاری جهت ویرایش فیلم) تصاویر را آهسته تا تغییرات دینامیک حباب (فرکانس جدایش حباب، قطر جدایش حباب و نقاط مولد حباب) مشاهده و بررسی گردد. لازم به ذکر است که هر آزمایش حداقل ۵ بار تکرار شده و میانگین داده‌های آزمایشی لحاظ شد.

عدم قطعیت

در این دستگاه، برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت از قانون سرمایش نیوتن به‌صورت زیر استفاده شد:

$$h = \frac{q / A}{(T_s - T_{sat})} \quad (1)$$

که در آن T_s دمای سطح انتقال حرارت، A سطح انتقال حرارت، h ضریب انتقال حرارت، q شار حرارتی و T_{sat} دمای توده سیال است که روش اندازه‌گیری هر کدام بررسی می‌شود.

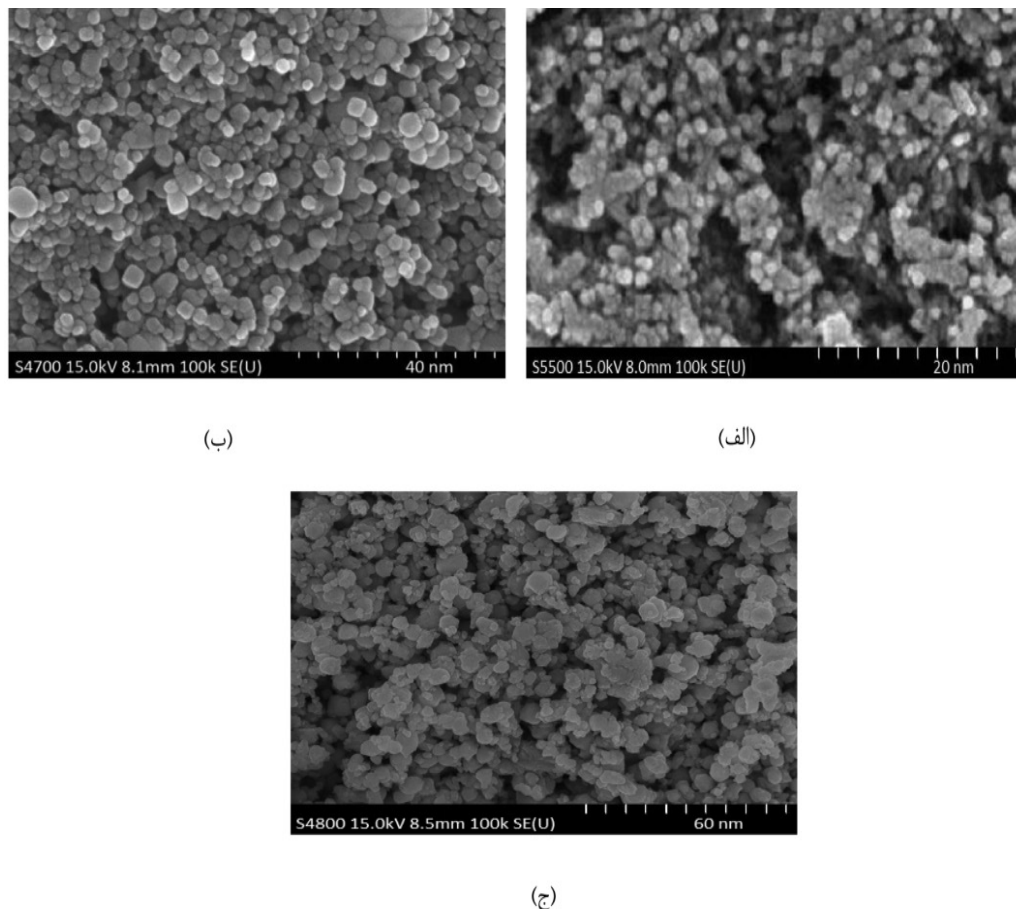
دستگاه حمام ویسکوزیته دو قلوکلاس A، مدل kp0312 شرکت کیان پژوهش‌گستر ساخت ایران با ۲ مخزن ۲۰ لیتری، دو عدد گرم‌کن برقی با توان‌های ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ W، در محدوده 20°C تا 150°C و با حداکثر نوسان دما $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ به‌کار گرفته شد. این دستگاه همچنین دارای ۴ زمان‌سنج مستقل با دقت ۰/۰۱ s است.

شرح آزمایش‌ها

آزمایش‌ها ابتدا با آب دی‌یونیزه شده به‌عنوان محلول پایه به حجم ۲ L و سپس با اضافه کردن نانوذرات مس اکسید (CuO) با وزن مولی $79.55 \text{ g. mol}^{-1}$ و چگالی 6.4 g. cm^{-3} ساخت کمپانی platonicananotech کشور هند، انجام گرفت. مشخصات نانوذرات در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ذرات نزدیک به کروی با غلظت ۰/۰۲۵ wt.% به آب دی‌یونیزه با سه اندازه ۲۰، ۴۰ و ۶۰ nm اضافه شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشند. پس از تعیین بهترین اندازه نانوذره جهت افزایش ضریب انتقال حرارت، در مرحله بعد جهت تعیین غلظت بهینه با افزایش درصد وزنی‌های نانوذرات، از ۰/۰۲۵ wt.% تا ۰/۱۲۵ wt.% با گام ۰/۰۲۵ wt.% استفاده شد. در مراحل بعدی برای بررسی پایداری نانوسیال به‌ترتیب تغییر pH (استفاده از HCl و NaOH جهت تنظیم) و سپس امواج فراصوت به‌کار گرفته شد. قبل از استفاده از درصد وزنی‌های مختلف نانوسیال، محلول نانوسیال

جدول ۲ مشخصات نانوذرات مس اکسید.

اندازه (nm)	جرم مولی (g. mol^{-1})	چگالی (g. cm^{-3})	رنگ	خلوص %	فرمول شیمیایی	ماده
۲۰، ۴۰ و ۶۰	۷۹/۵۵	۶/۴	پودر سیاه	۹۹/۹	CuO	نانوذرات مس اکسید



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نانوذرات اکسیدمس: الف) مقیاس ۲۰ nm، ب) مقیاس ۴۰ nm و ج) مقیاس ۶۰ nm

و تحلیل نتایج حائز اهمیت است و از طرف دیگر، مکان نصب ترموکوپل‌ها در فاصله کمی با سطح بیرونی گرم‌کن قرار دارند و این فاصله هر چند کوچک، باعث اختلاف دمای بسیار کمی شده که برای ثبت دقیق‌تر دما، از رابطه ۴ برای تصحیح این خطا استفاده شد:

$$T_S = T_{th} - \frac{q'' b_s}{k_s} \quad (۴)$$

در این رابطه، b_s فاصله بین محل‌های نصب ترموکوپل تا سطح انتقال حرارت و k_s هدایت حرارتی سطح گرم‌کن است. میانگین درجه حرارت سه ترموکوپل ($\bar{T}_s$) از رابطه ۵ محاسبه گردید:

$$\bar{T}_S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{S,i} \quad (۵)$$

از آنجا که گرم‌کن موجود در سیستم توان الکتریکی را به انرژی حرارتی تبدیل می‌کند، مقدار شار حرارتی را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد [۳۳]:

$$q/A = IV / A(\cos \varphi) \quad (۲)$$

سطح گرم‌کن نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A = \pi d.L \quad (۳)$$

که در آن I ، V و φ به ترتیب معرف اختلاف پتانسیل الکتریکی برحسب ولت، شدت جریان برحسب آمپر و φ اختلاف فاز بین اختلاف پتانسیل الکتریکی (که اختلاف فاز بین اختلاف پتانسیل الکتریکی و شدت جریان ناچیز بوده عملاً می‌توان $\cos \varphi$ را برابر واحد در نظر گرفت). از آنجا که ثبت دقیق دمای سطح گرم‌کن توسط ترموکوپل برای تجزیه

نتایج و بحث

مقایسه ضریب انتقال حرارت (BHTC) آزمایشگاهی

با مدل‌های پیشین

برای صحت از عملکرد و درستی دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده قبل از شروع به آزمایش‌ها، چند تست بر روی آب دی‌یونیزه به‌عنوان سیال پایه انجام گرفت. سپس نتایج را با مدل‌های موجود مقایسه و نتایج در شکل ۳ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد، که دستگاه مورد آزمایشگاهی در محدوده مناسبی از نتایج کار می‌کند. به نحوی که نتایج به‌دست آمده در مقایسه با مدل استفان و عبدالسلام با میانگین خطای ۱۰/۳٪ بیشترین همپوشانی یا کمترین خطا و با مدل علوی فاضل خطای ۱۶/۲٪ کمترین همپوشانی را با نتایج آزمایشگاهی برای آب دی‌یونیزه داشته‌اند.

پارامترهای نانوذرات

تأثیر اندازه نانوذره بر BHTC

در شکل ۴ مشاهده می‌شود در ابتدا به بررسی اثرات اضافه کردن نانوذرات CuO بر BHTC و شار حرارت بحرانی در سه اندازه ۲۰، ۴۰ و ۶۰ nm در غلظت ثابت ۰/۰۲۵ wt.٪ در آب دی‌یونیزه به‌عنوان سیال پایه پرداخته شده است.

حداکثر عدم قطعیت تخمین زده شده برای شار حرارتی برابر است با:

$$\frac{\delta(q/A)}{q/A} = \sqrt{\left(\frac{\delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2} \quad (6)$$

همچنین برای به‌دست آوردن مقادیر خطای اختلاف دمای سطح و محلول در حال جوشش (دمای سوپرهیت) و همچنین ضریب انتقال حرارت از رابطه‌های ۷ و ۸ استفاده شده است.

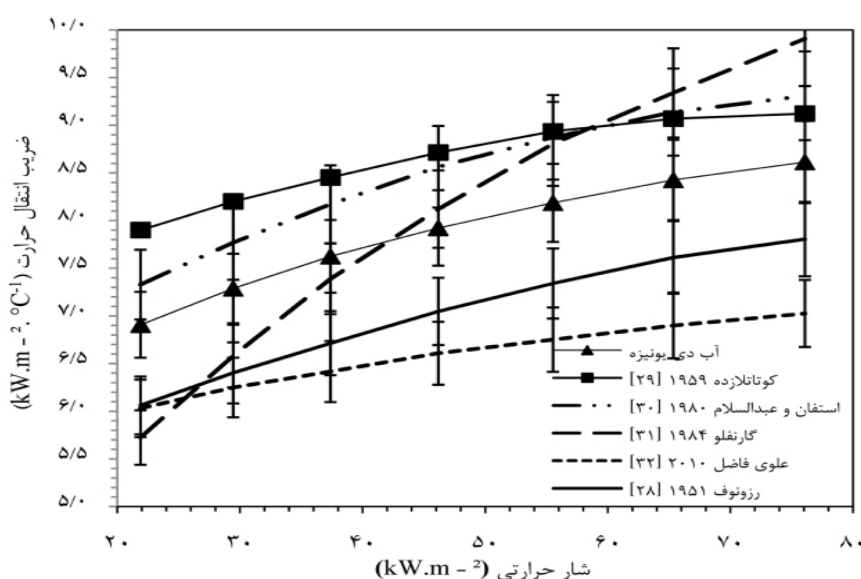
$$\delta \Delta T = \sqrt{(\delta T_s)^2 - (\delta T_{th})^2} \quad (7)$$

$$\frac{\delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2} \quad (8)$$

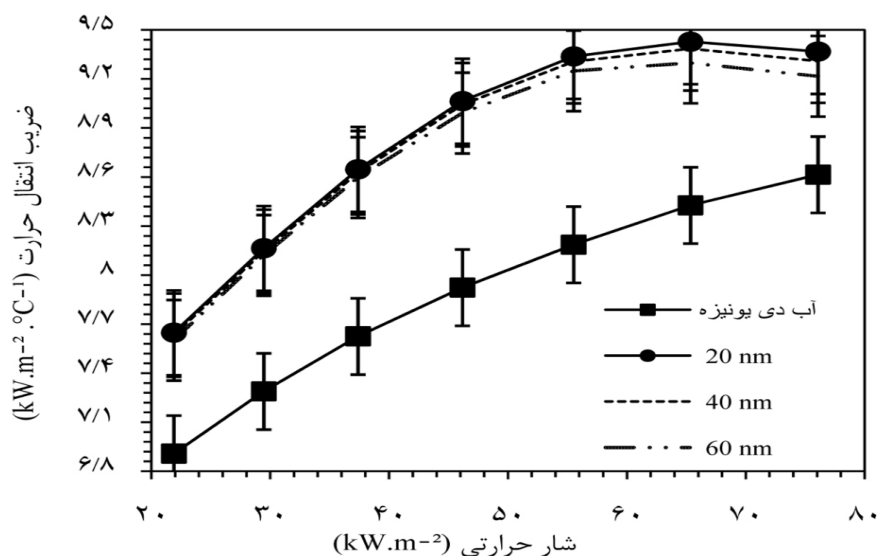
در جدول ۳ میزان عدم قطعیت دستگاه‌های اندازه‌گیری در این پژوهش آورده شده است.

جدول ۳ منابع عدم قطعیت

پارامتر	میزان عدم قطعیت
قطر و طول لوله	$\pm 0.1 \text{ mm}$
ترموکوپل، K-type	$\pm 0.1^\circ \text{C}$
ولتاژ	$\pm 0.1 \text{ V}$
جریان	$\pm 1 \text{ A}$
توان	$\pm 1.5 \text{ W}$
شار حرارت ماکزیمم 76 kW.m^{-2}	$\pm 1/8545 \text{ kW.m}^{-2}$
ضریب هدایت حرارتی، KD2 pro	$5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
زبری سنج	$\pm 5\%$



شکل ۳ مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی با مدل‌های مرسوم نسبت به آب دی‌یونیزه.



شکل ۴ تغییرات ضریب انتقال جوشش نانو مس اکسید با غلظت ۰/۰۲۵ wt. % نسبت به آب دی‌یونیزه

دلایل مهمی در کنار افزایش دما بر افزایش نیروی براونین نقش اساسی دارد. بیشتر شدن سطح ویژه باعث می‌شود سطح بیشتری برای تبادل حرارت در اختیار سوسپانسیون قرار گیرد (جدول ۴).

جدول ۴ مقادیر سطح ویژه CuO

قطر (nm)	۶۰	۴۰	۲۰
سطح مقطع ویژه (m ² .g ⁻¹)	~۱۸	~۲۰	~۳۵

براساس نظریه انتشار اینشتین سرعت براونین نانوذرات با کاهش قطر نانوذرات تا حد زیاد افزایش می‌یابد [۴۰]. افزایش دما باعث افزایش حرکت ذرات می‌شود و از آنجایی که ذرات کوچک‌تر سریع‌تر نسبت به ذرات درشت‌تر حرکت می‌کنند، در نتیجه ذرات کوچک‌تر در سطح بالاتری از حرکت براونین نسبت به ذرات بزرگ‌تر قرار می‌گیرند [۳۵]. کاهش در اندازه ذرات موجب کاهش ویسکوزیته و در نهایت افزایش در میانگین سرعت حرکات براونین می‌شود، که چندین عامل مهم مانند کسر حجمی، اندازه ذرات، درجه حرارت مایع و اثر زیادی بر ویسکوزیته می‌گذارند [۴۰].

با اضافه کردن نانوذرات CuO، افزایش چشم‌گیری در عملکرد BHTC نانوسیال، نسبت به آب دی‌یونیزه به‌دست آمده است. لو و همکاران [۳۴] در تحقیقات خود نشان دادند که با اضافه کردن نانوذرات CuO به آب دی‌یونیزه، HTC^۱ تا ۳۰٪ افزایش یافت. با مشاهده شکل ۴ افزایش BHTC در شارهای پایین تا حدود شار ۵۵ kW.m⁻² روندی صعودی داشته و پس از آن رفته‌رفته افت شدید می‌یابد. در ادامه به بررسی این افزایش و کاهش پرداخته می‌شود. همان‌طور که در بالا نیز اشاره شد افزودن ذرات فلزی در ابعاد نانومتر به‌علت داشتن هدایت حرارت بالا، باعث افزایش HTC می‌شود [۳۶ و ۳۵]. از طرفی، این افزایش فقط محدود به مقیاس در اندازه‌ی نانو نمی‌باشد، بلکه هر چه سایز ذرات در حد نانوذر باز هم کوچک‌تر شود، ضریب انتقال حرارت بیشتر و بیشتر می‌شود. نتایج نشان داده که در سایز ۲۰ nm با متوسط افزایش ۱۲/۱۷٪ و ۶۰ nm با متوسط افزایش ۱۱/۱۵٪ به‌ترتیب بیشترین و کمترین افزایش مشاهده شد. افزایش نیروی براونین^۲ به‌دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی را می‌توان دلیل مهم در افزایش BHTC نام برد [۳۹-۳۷]. حرکات براونین تنها زمانی وجود دارد که ذرات با ابعاد بسیار کوچک در سیال حضور داشته باشند.

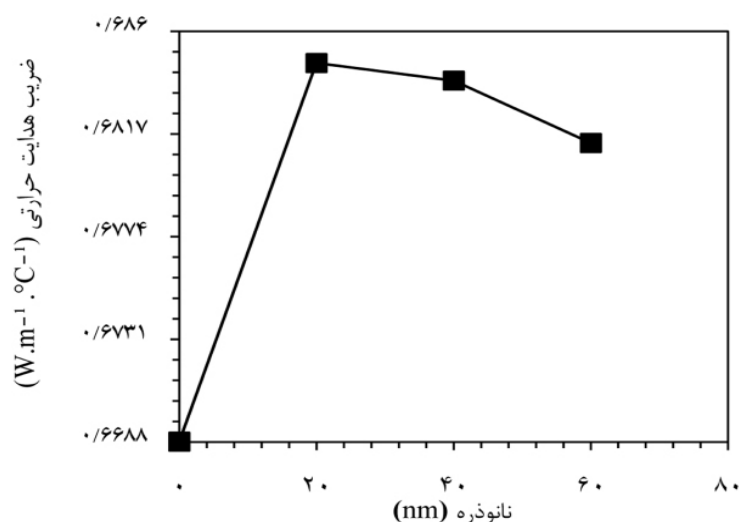
1. Heat Transfer Coefficient
2. Brownian Motion

شکل ۵ به بررسی تغییرات ضریب هدایت حرارت آب دی‌یونیزه و نانوذرات ۲۰، ۴۰ و ۶۰ nm در دمای ۱۰۰ °C می‌پردازد. از طرفی، افزایش هر چه بیشتر نیروی براونین نتیجه آن پایداری بیشتر نانوسیال است. پایداری نانوسیال موجب تشکیل رسوب کمتر بر سطح گرم‌کن می‌شود. از رسوب بر روی سطح گرم‌کن باید اجتناب شود زیرا، هم باعث مسدود شدن چشمه‌های فعال مولد حباب^۱ شده هم‌اینکه در بلند مدت با افزایش ضخامت خود بر سطح گرم‌کن مانند یک لایه عایق عمل کرده و موجب کاهش انتقال حرارت می‌شود. کوارک و همکاران نشان دادند که هم‌زمان با تبخیر میکرو لایه‌ها در زیر حباب در حال رشد بر روی سطح گرم‌کن و نهایتاً پس از جدا شدن حباب، نانوذرات به جای آن رسوب می‌کند [۴۱]. هر چند نتایج نشان دادند که کاهش هر چه بیشتر سایز نانوذرات به پایداری آن کمک می‌کند، اما در هر صورت رسوب به وجود آمده و باعث کاهش BHTC می‌شود. در بالا هم ذکر شد که هر سه نانوذره تا نزدیکی شار حرارتی 55 kW.m^{-2} عملکرد مشابه و تقریباً خطی در افزایش BHTC داشته‌اند اما بعد از آن در هر سه سایز

نانوذرات ضریب انتقال حرارت افت پیدا کرده است. عامل اصلی این افت همان‌طور که گفته شد، به علت رسوب و کلوخه شدن نانوذرات در حین فرآیند است. تمایل ذرات در سیال به کلوخه شدن را می‌توان به دو دلیل مهم مرتبط دانست. اول به دلیل وجود نیروهای واندروالس، که به ویژه در ذرات فلزی بیشتر دیده می‌شود، چون دو قطبی^۲ شدن یون‌ها می‌توانند به راحتی در مولکول‌های این ذرات رخ دهند. ایجاد دو قطبی باعث جذب دیگر دو قطبی‌های مجاو می‌شود. نیروهای واندروالس از جاذبه این دو قطبی‌ها ناشی می‌شود. این نیروی جاذبه به عنوان عامل اصلی در تجمعات ذرات، به ویژه در نانوپودرها محسوب می‌شود [۴۲]. دوم این‌که با توجه به سطح انرژی بالای نانوذرات، به راحتی انعقاد پیدا می‌کنند و در نتیجه پراکنده کردن ذرات در مایع پایه دشوار شده که این امر می‌تواند سیستم را به سمت کلوئیدی برده و در نتیجه پایداری نانوذرات کم می‌شود [۴۳].

تاثیر افزایش غلظت نانوسیال بر BHTC

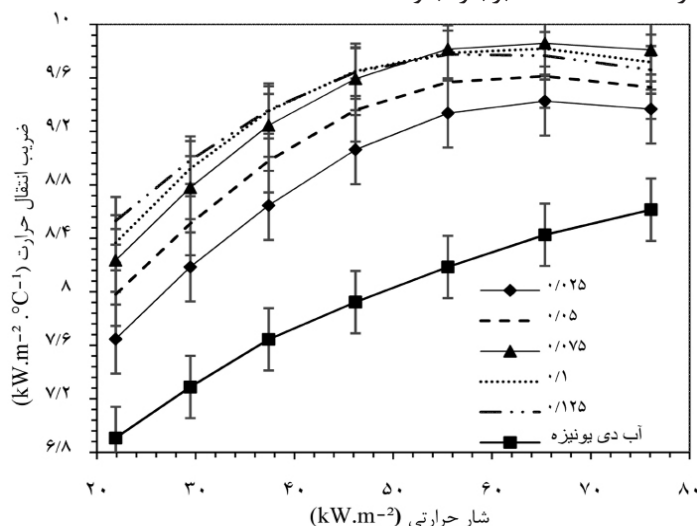
در بخش قبل نانوذره CuO در قطر ۲۰ nm به عنوان اندازه مطلوب در افزایش BHTC تعیین گردید.



شکل ۵ تغییرات ضریب هدایت جوشش نانو CuO با غلظت ۰/۰۲۵ wt.٪ نسبت به آب دی‌یونیزه

به‌طوری‌که متوسط این افزایش باتوجه به جدول ۵ از غلظت ۰/۰۲۵ wt.% تا ۰/۰۷۵ wt.% به‌صورت متوسط تقریباً ۳/۴٪ افزایش پیدا کرده و پس از آن از ۰/۰۷۵ wt.% به ۰/۱ wt.% حدوداً ۰/۵۴٪ افزایش پیدا کرده و از ۰/۱ wt.% به ۰/۱۲۵ wt.% حدوداً ۰/۲۸٪ افزایش پیدا کرده است. مطلب دوم، افزایش BHTC در تمام غلظت‌ها تا حدوداً شار حرارتی 55 kW.m^{-2} صعودی بوده و پس از آن روند نزولی پیدا کرده‌اند. روند کاهش BHTC بعد از غلظت ۰/۰۷۵ wt.% با شدت بیشتری افت کرده است. در بررسی علت کاهش BHTC در هر دو قسمت بالا باید باز هم به رسوب و ته‌نشینی نانوذرات که مهمترین عامل است اشاره کرد. Patra و همکاران [۴۴] نیز دریافتند که BHTC در نانوسیال با افزایش غلظت در شارهای حرارتی بالا، کاهش می‌یابد به‌طوری‌که نانوذرات با رسوب بر سطح گرم‌کن باعث می‌شوند که چشمه‌های فعال مولد حباب پر شده و از طرفی، افزایش رسوب مانع رسیدن مستقیم سیال به سطح گرم‌کن و در نهایت مانند یک عایق عمل می‌کند.

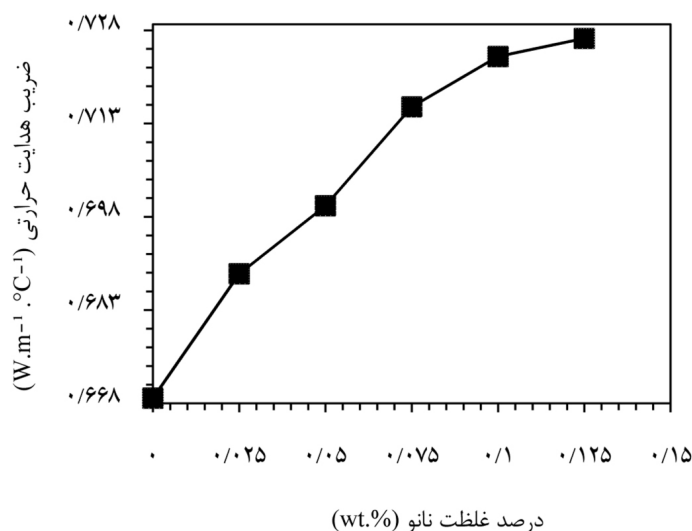
در این بخش با همین قطر به بررسی تأثیرات افزایش غلظت‌های مختلف (۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱ و ۰/۱۲۵ wt.%) پرداخته شد. شکل ۶ و جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانوذرات از ۰/۰۲۵ wt.% تا ۰/۱۲۵ wt.% مقدار BHTC پیوسته افزایش می‌یابد. اما این روند افزایش در شارهای حرارتی پایین بیشتر بوده و هر چه شار حرارتی افزایش می‌یابد، BHTC کاهش پیدا می‌کند. کاهش BHTC با افزایش درصد غلظت وزنی، بیشتر و بیشتر هم می‌شود به‌طوری‌که بعد از غلظت ۰/۰۷۵ wt.% در شارهای پایین نیز به‌شدت افت پیدا می‌کند. علت این افزایش و کاهش‌ها را باید در عملکرد ضریب هدایت حرارتی جستجو کرد. در بخش قبل ذکر شد که با افزودن نانوذرات، ضریب هدایت حرارتی که مهم‌ترین عامل افزایش BHTC است، افزایش می‌یابد. در شکل ۷ تغییرات ضریب هدایت حرارتی با افزودن غلظت نانوذرات مشاهده می‌شود. در بررسی افزایش غلظت نانوسیال و اثر آن بر افزایش BHTC دو نکته وجود دارد: اول اینکه روند متوسط افزایش BHTC در همه غلظت‌ها برابر نبوده،



شکل ۶ تغییرات BHTC نانو مس اکسید با درصدهای جرمی مختلف نسبت به آب دی‌یونیزه

جدول ۵ متوسط تغییرات BHTC نانو CuO با غلظت مختلف نسبت به آب دی‌یونیزه

درصد وزنی نانوذره	۰/۰۲۵	۰/۰۵	۰/۰۷۵	۰/۱	۰/۱۲۵
درصد تغییرات	۱۲/۱۷	۱۵/۶۴	۱۸/۹۴	۱۹/۴۸	۱۹/۷۶



شکل ۷ تغییرات ضریب هدایت حرارت نانو CuO با غلظت مختلف نسبت به آب دی‌یونیزه در دمای ۱۰۰ °C

نانوذرات بر تغییرات دمایی نسبت به آب دی‌یونیزه را نشان می‌دهد. باز هم نتایج نشان می‌دهند که افزایش نانوذرات باعث می‌شود تا فرآیند جوشش در دمای فوق اشباع کمتر سطح انجام گیرد. اما اضافه کردن نانوذرات بیش از مقدار بهینه آن باعث می‌شود تا روند اختلاف دما کمتر شود. طبق **جدول ۶** روند متوسط اختلاف دما از غلظت ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۷۵ wt.٪، حدود ۲/۵٪ افزایش یافته و پس از آن به کمتر از ۰/۵٪ رسید. هر چند افزایش غلظت، کاهش تغییرات BHTC را به دنبال داشته اما در افزایش شارحرارتی بحرانی نقشی مؤثر ایفا کرده به طوری که این نتیجه با نتایج محققین [۵۱ و ۵۰] هم‌خوانی دارد. تا اینجا مشخص شد که استفاده از نانوذرات CuO به سیال پایه باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی و به دنبال آن باعث افزایش BHTC شده است. اما مشکل اصلی نانوذرات در شارهای حرارتی بالا بود که به شدت به علت ناپایداری و رسوب کردن نانوذرات باعث کاهش BHTC می‌شود. در ادامه به بررسی روش‌های متداول برای پایداری نانوذرات یعنی تغییر pH و تاباندن امواج فراصوت به نانوسیال برای پایدار نگه داشتن نانوذرات در سه غلظت ۰/۰۷۵، ۰/۱ و ۰/۱۲۵ wt.٪ با بالاترین BHTC در طول آزمایش‌ها، پرداخته می‌شود.

کیم و همکاران [۴۵] دریافتند در فرآیند جوشش برخی از نانوذرات روی سطح گرم‌کن رسوب کرده و لایه رسوب، ترشوندگی را از طریق تغییر کاهش زاویه تماس استاتیکی روی سطح گرم‌کن افزایش می‌دهد. بنابراین با افزایش ترشوندگی سطح احتمال پاشیدن حفره‌ها با نانوسیال افزایش، چشمه‌های فعال کاهش و BHTC نیز کاهش می‌یابد. نتیجه به دست آمده با نتیجه بسیاری از محققین، که BHTC با افزایش غلظت نانوذرات در شارهای حرارتی بالا کاهش پیدا کرده است، هم‌خوانی دارد [۴۶-۴۹]. علت افزایش ترشوندگی و پاشیدن حفرات به دو دلیل اصلی است: اول اینکه در فرآیند جوشش هنگام جدا شدن حباب از روی سطح گرم‌کن موجب می‌شود که مقداری از نانوذرات جای حباب را بگیرند. دوم اینکه از طرفی نیروهای واندروالس (نیروی جاذبه و عامل اصلی در تجمعات ذرات) با افزایش جرم و حجم مولکول، افزایش یافته، که باعث افزایش کلوخه شدن بیشتر نانوذرات می‌شود. طبق نتایج، نکته‌ای که در مورد افزودن نانوذرات به سیال وجود دارد اینست که نمی‌توان به هر اندازه مقدار نانوذرات را به علت ناپایداری در سیال افزایش داد، یعنی مقداری بهینه باید تعیین گردد. **جدول ۶** اثرات افزایش درصد وزنی غلظت

جدول ۶ متوسط درصد تغییرات فوق اشباع سطح گرم‌کن نانو CuO با غلظت مختلف نسبت به آب دی‌یونیزه.

درصد وزنی نانوذره	۰/۰۲۵	۰/۰۵	۰/۰۷۵	۰/۱	۰/۱۲۵
درصد تغییرات	-۱۰/۸۳	-۱۳/۴۸	-۱۵/۹۰	-۱۶/۲۴	-۱۶/۴۰

و روند افزایشی ضریب انتقال حرارت را ادامه دهد چرا که با رسوب نانوذرات، ضریب هدایت حرارتی و در نتیجه ضریب انتقال حرارت کاهش پیدا می‌کند. در ادامه، pH از ۹/۵ به ۱۰ افزایش داده شد. نتایج در شکل ۸ (ب و ج) نشان می‌دهد که افزایش pH از ۹/۵ به ۱۰، ضریب انتقال حرارت در غلظت wt.٪ ۰/۱ به بیشترین مقدار رسیده است. اما ضریب انتقال حرارت با افزایش pH از ۱۰ به ۱۰/۵ کاهش پیدا می‌کند. هر چند که pH= ۱۰/۵ طبق جدول ۷ بیشترین افزایش ضریب انتقال حرارت را داشته اما، بیشتر این افزایش‌ها در شارهای حرارتی پایین بوده و هر چه شار حرارتی افزایش پیدا کند، روند آن کاهشی می‌شود. بالاترین ضریب انتقال حرارت به‌دست آمده مقدار $10/15 \text{ kW.m}^2$ در $\text{pH}=10$ و در غلظت wt.٪ ۰/۱ است که نشان می‌دهد بهترین میزان pH برای نانوسیال CuO مقدار ۱۰ می‌باشد که این نتیجه با نتایج دیگر محققین برای نانوسیال CuO هم‌خوانی دارد [۲۰ و ۱۹].

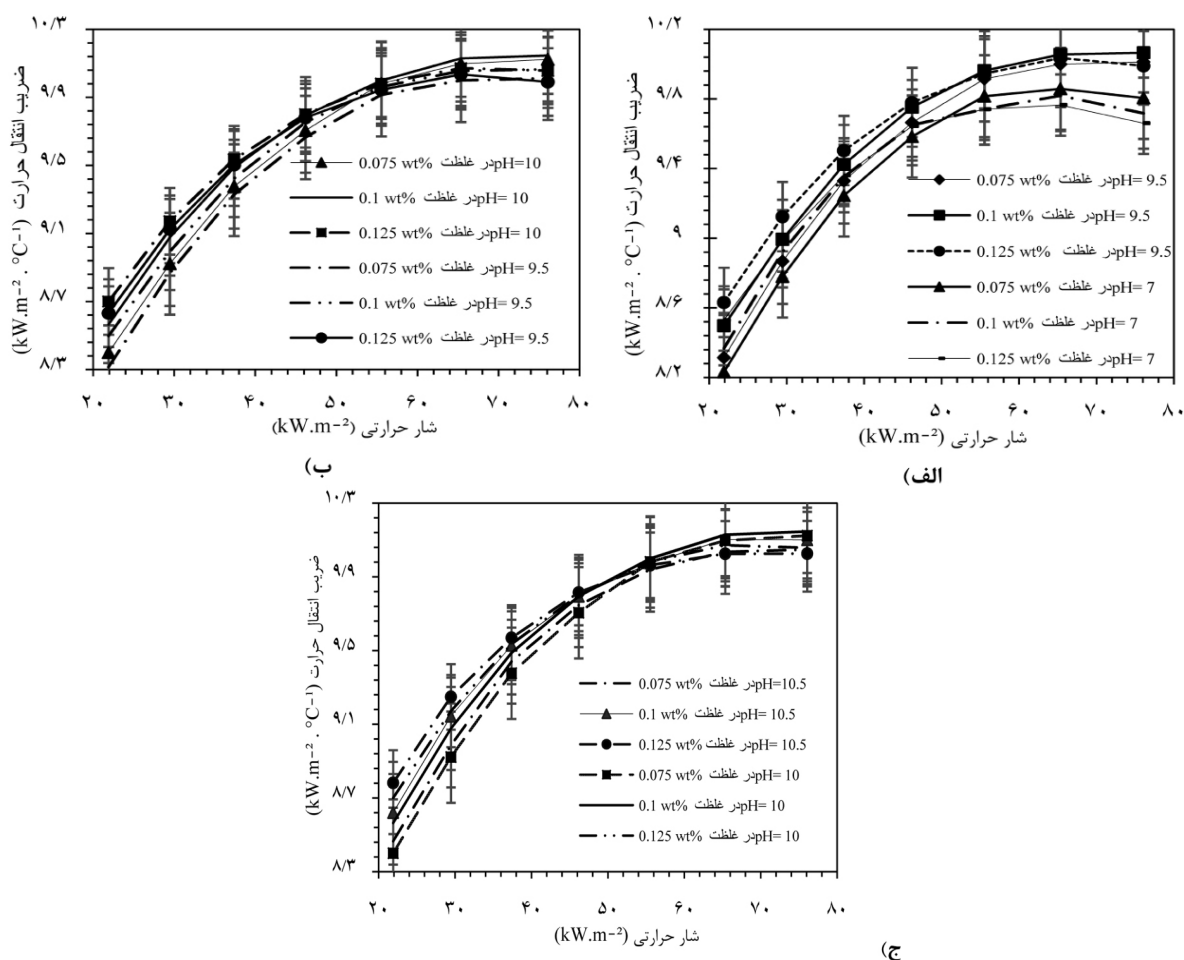
در مورد تغییرات ایجاد شده توسط pH بر ضریب انتقال حرارت دو نکته وجود دارد: اول میزان پایداری نانوذرات و دور شدن از نقطه ایزوالکتریک و دوم تغییر در قطر جدایش حباب است. در مورد نقطه ایزوالکتریک بیان شد که با تغییر pH، نانوسیال از نقطه ایزوالکتریک دور می‌شود و با افزایش نیروهای دافعه بین ذرات خود پایدارتر می‌شود. قطر جدایش حباب نیز پارامتری مهم و شناخته شده در تعیین شدت انتقال حرارت در طی فرآیند جوشش است [۵۴-۵۱]. هر چه قطر جدایش حباب افزایش پیدا کند، اختلاط و آشفته‌گی در محلول در حین فرآیند بیشتر می‌شود. اما با افزایش pH محلول، قطر جدایش حباب‌ها کوچک‌تر شده، که علت آن نیز کاهش کشش سطحی به‌واسطه افزایش pH است.

تغییرات اعمال شده در هر دو روش در سه سطح (مقدار)، برای پیدا کردن سطح بهینه آزمایش گردید. انتخاب حدود برای شروع این سطوح براساس مقادیری بوده که در مقالات پیشین ذکر شده بود. نکته مهم که باید ذکر شود این است که این دو روش پایداری نانوسیالات، روش‌های معمولی هستند که همواره برای همه شرایط فرآیندی (جوشش و غیر جوشش) انجام گرفته‌اند و حال باید بررسی شود که، نتایج و اثرات این روش‌ها در فرآیند جوشش استخری تا چه حد مؤثر می‌باشند.

پایدارکننده‌های نانوذرات

تأثیر تغییر pH بر BHTC

اولین مرحله برای پایدار کردن نانوذرات، تغییر pH نانوسیال و تأثیر آن بر ضریب انتقال حرارت است. شکل ۸ (الف-ج)، تغییرات pH در سه سطح ۹/۵، ۱۰ و ۱۰/۵ برای پایداری نانوسیال CuO و در سه غلظت wt.٪ ۰/۱۲۵، ۰/۱ و ۰/۰۷۵ را نشان می‌دهد. اولین مرحله برای پایدار کردن نانوذرات، تغییر pH نانوسیال و تأثیر آن بر ضریب انتقال حرارت است. لازم به ذکر است که pH اولیه آب دی‌یونیزه مورد مطالعه برابر ۷ اندازه‌گیری شد. همچنین محدوده انتخابی pH برای رسیدن به نتیجه بهتر و سریع‌تر از نتایج تحقیقات قبلی انتخاب شده است [۳۰ و ۲۹]. با افزایش pH نانوسیال از ۷ به ۹/۵ در شکل ۸ (الف) نتایج نشان می‌دهند که تغییر pH تأثیر مثبت برروی افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گذارد. اما تأثیر pH در تمام طول فرآیند مطلوب نبوده، به‌طوری که تا شار حرارتی 55 kW.m^2 روند تغییرات ضریب انتقال حرارت صعودی بوده و بعد از آن این روند کاهش پیدا کرده است یعنی افزایش pH به ۹/۵ نتوانسته در تمام طول آزمایش‌ها، پایداری نانوذرات را حفظ کند



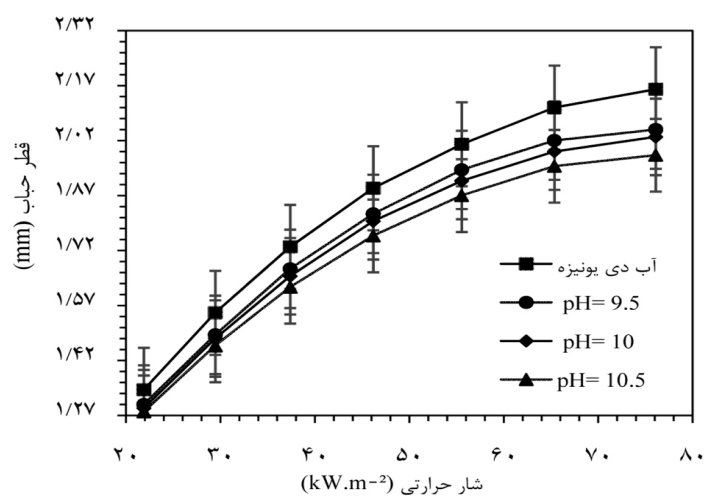
شکل ۸ تاثیر pH بر ضریب انتقال حرارت در جوشش نانوسیال: (الف) ۹/۵، (ب) ۹/۵ و ۱۰ و (ج) ۱۰ و ۱۰/۵

جدول ۷ متوسط درصد تغییرات BHTC در سه سطح pH نسبت به آب دی یونیزه.

درصد وزنی نانوذره	۰/۰۷۵	۰/۱	۰/۱۲۵
pH= ۹/۵	۲۰/۳۴	۲۱/۵۷	۲۲/۱۱
pH= ۱۰	۲۱/۲۵	۲۲/۳۹	۲۲/۶۸
pH= ۱۰/۵	۲۱/۴۰	۲۲/۵۴	۲۲/۶۱

تشکیل رسوب باعث کاهش قطر حباب می‌شود [۵۵]. نانوذرات با رسوب بر روی سطح گرم‌کن باعث به‌وجود آمدن چشمه‌های جدید مولد حباب اما کوچک‌تر شده اما با گذر زمان ذرات دیگری با وارد شدن به این چشمه‌های فعال آن‌ها را به چشمه‌های کوچک‌تر تبدیل می‌کنند. شکل‌های ۹ و ۱۰ (الف-د) تغییرات قطر جدایش حباب را با تغییر pH نشان می‌دهند.

کاهش کشش سطحی باعث می‌شود تا حباب‌ها در هنگام رشد بر روی سطح گرم‌کن فرصت کمتری برای رشد داشته باشند و در نتیجه قطر جدایش آن‌ها کاهش یابد. ولی افزایش pH از ۹/۵ به بالا، موجب کاهش بیش از حد کشش سطحی شده که منجر به کاهش مقدار زیاد قطر جدایش حباب و در نتیجه کاهش ضریب انتقال حرارت را در پی دارد. در مورد کاهش قطر حباب، تأثیر رسوب نانوذرات CuO بر سطح گرم‌کن نیز باید در نظر گرفته شود. زیرا



شکل ۹ تأثیر pH بر قطر جدایش حباب نانوسیال



(ب) pH= ۹/۵



(الف) pH=۷



(د) pH= ۱۰/۵



(ج) pH=۱۰

شکل ۱۰ تصاویر واقعی تأثیر pH بر قطر جدایش حباب

تأثیر اعمال امواج فراصوت بر BHTC

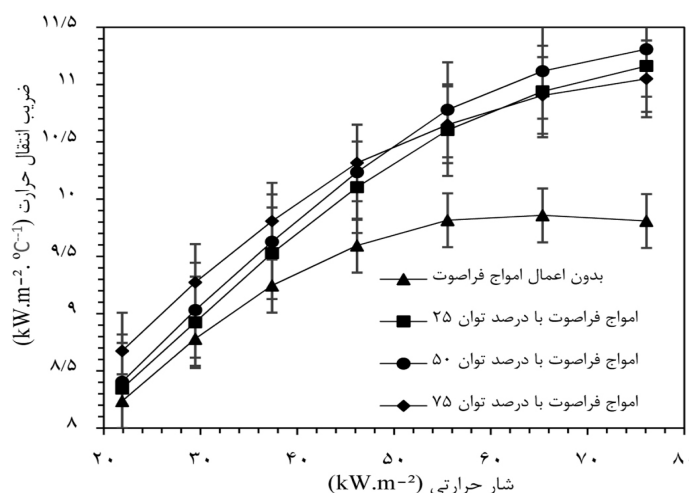
استفاده از پراب شامل در نظر گرفتن چندین پارامتر هم‌زمان، از قبیل میزان توان دستگاه، سیکل، زمان تایش و میزان فاصله سنسور پراب از سطح گرم‌کن است. دستگاه دارای شدت فرکانس ۲۴ kHz بوده که در سه درصد توان ۲۵، ۵۰ و ۷۵ استفاده شده است.

در این قسمت به بررسی اثر تابش امواج فراصوت بر ضریب انتقال حرارت پرداخته شده است. دستگاه انتخابی از نوع روش مستقیم، یعنی قرار دادن پراب دستگاه به‌طور مستقیم در محلول است. اما

در بخش قبلی مشخص شد که دوره تابش در توان ۵۰٪، بهترین عملکرد را در افزایش ضریب انتقال حرارت دارد. حال به بررسی پارامتر دوم در تنظیم امواج فراصوت یعنی دوره یا سیکل تابش که شامل دو زمان بوده پرداخته می شود. این دو زمان شامل زمان تابش و زمان استراحت است. در این تحقیق با توجه به تجربیات آزمایشگاهی و شرایط آزمایشگاهی از سه دوره ۱-۱ و ۱-۰/۵ و ۰/۵-۰/۵ استفاده شده که عدد سمت راست زمان استراحت و عدد سمت چپ زمان تابش امواج و به صورت ثانیه هستند. **شکل ۱۲** و **جدول ۹** نشان می دهد که با تنظیم دوره تابش به صورت ۰/۵ - ۰/۵ بهترین شرایط پایداری محقق می شود زیرا این زمان با تابش بیشتر و اما کوتاه موجب حذف احتمالی نانوذرات از سطح و همچنین تولید حباب بیشتر در محلول شده و در نتیجه منجر به بیشترین میزان ضریب انتقال حرارت شده است. در جوشش هسته ای به سبب تولید حباب ها در حجم بالا لازم است که حباب ها سریعاً از سطح انتقال حرارت حذف و جای خود را به حباب های تازه دهند.

فاصله سنسور پراب از سطح گرم کن، با آزمایش های مختلف ۴ cm که بیشترین تأثیر را بر افزایش ضریب انتقال حرارت داشته است، انتخاب شد. همان طور که در **شکل ۱۱** نیز مشاهده می شود، اعمال امواج فراصوت باعث افزایش ضریب انتقال حرارت شده است زیرا این امواج با تغییر دما و فشار در محلول باعث ایجاد پدیده کاویتاسیون (حباب زایی) و افزایش قطر حباب در محلول می شوند. همان طور که در بالا هم اشاره شد، قطر جدایش حباب در نانوسیال ها نسبت به سیال پایه کوچک تر است و هر چه حباب بزرگ تر تولید شود در نتیجه اغتشاشات بیشتر شده و ضریب انتقال حرارت نیز افزایش می یابد [۵۶]. امواج فراصوت فرکانس پایین ۲۴ kHz استفاده شده در این تحقیق توانایی تشکیل حباب های بزرگ تر را دارا می باشند. یعنی امواج فراصوت اثری را که نانوذرات بر کاهش قطر جدایش حباب در محلول دارند را جبران می کند. در **جدول ۸** میزان تغییرات اعمال فراصوت در توان های مختلف نسبت به حالت بدون اعمال فراصوت نشان داده شده است.

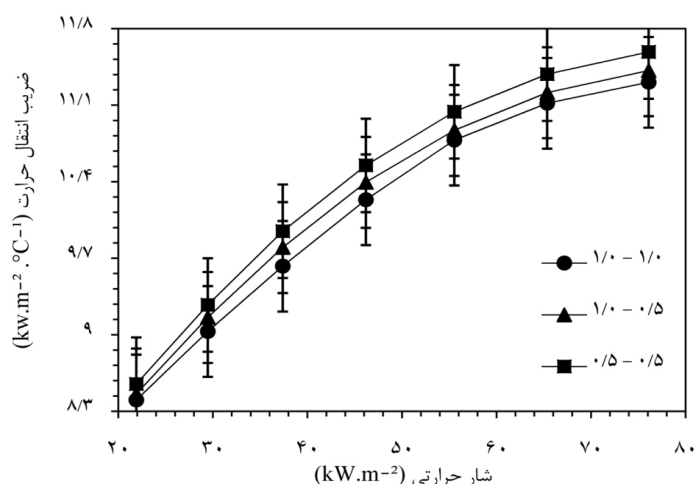
بهینه کردن دوره تابش امواج فراصوت بر BHTC



شکل ۱۱ تغییرات BHTC نانو سیال با درصد توان های مختلف فراصوت در غلظت ۰/۱۲۵٪

جدول ۸ تغییرات عددی متوسط BHTC نانوسیال در غلظت ۰/۱۲۵٪ با درصد توان های مختلف تابش فراصوت نسبت به بدون تابش.

درصد توان امواج فراصوت	۲۵	۵۰	۷۵
$h \text{ (kW.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}\text{)}$	۶/۳۲	۳۷/۴۸	۳۴/۸



شکل ۱۲ تغییرات متوسط BHTC نانوسیال با غلظت ۰/۱۲۵٪ بادامنه تابش مختلف

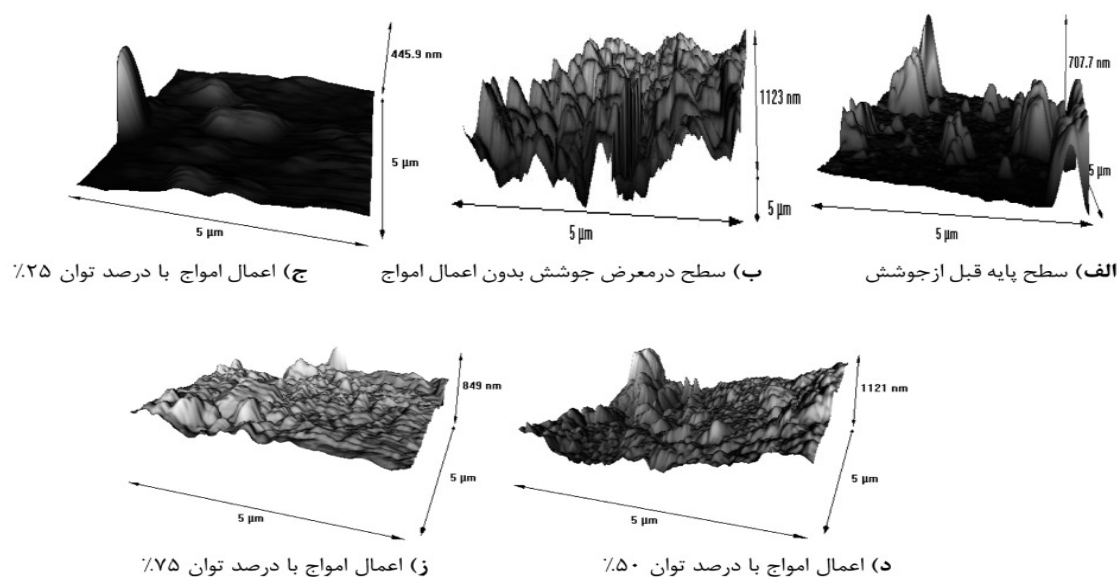
جدول ۹ تغییرات عددی متوسط BHTC نانو سیال با غلظت ۰/۱۲۵٪ باسیکل تابش مختلف نسبت به ۱-۱

زمان (s)	۱-۰/۵	۰/۵-۰/۵
h (kW.m ⁻² .°C ⁻¹)	۱/۱۴	۲/۵۸

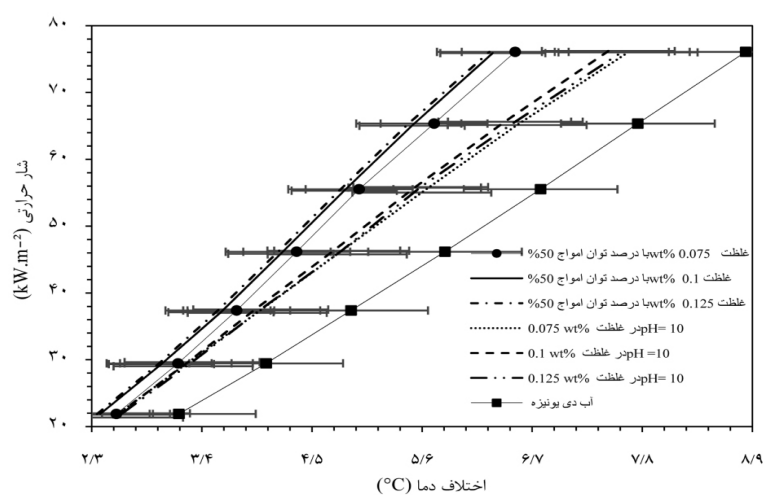
فوق اشباع سطح انتقال حرارت شده و با حرکت منحنی‌ها به سمت چپ، نشان می‌دهد شار حرارت بحرانی افزایش یافته است. تعدادی از محققین دیگر همچون داگلاس [۵۸]، ایدا و تسوتسی [۵۹] تأیید کردند که شار حرارت بحرانی با استفاده از ارتعاشات فراصوت افزایش می‌یابد. همچنین، تغییرات pH در افزایش شار بحرانی مؤثر بوده که در شکل به وضوح دیده می‌شود. در بخش پایانی کار و در شکل ۱۵ به مقایسه عملکرد دو روش اعمال شده در این پژوهش یعنی افزایش پایداری نانوذرات و تأثیر آن بر افزایش ضریب انتقال حرارت در جوشش استخری پرداخته شده است. البته در این مقایسه به علت تعداد زیاد آزمایش‌ها، مقایسه بین بهترین حالت ممکن به دست آمده در هر روش صورت گرفته است. برای تغییر pH= ۱۰ و pH= ۵۰ استفاده شده است. همان‌طور که مشخص است و در قسمت‌های قبلی هم توضیح داده شد، امواج فراصوت به‌طور متوسط با افزایش ضریب انتقال حرارتی برابر با ۳۷/۴۸٪ در غلظت ۰/۱۲۵ Wt.٪ به بهترین عملکرد دست پیدا کرده است.

بنابراین در این مطالعه دوره تابش به صورت ۰/۵-۰/۵ با تابش مداوم و در زمان کم‌تر نسبت به دوره ۱-۱، حباب‌ها سریع‌تر حذف و جای خود را به حباب‌های تازه می‌دهند.

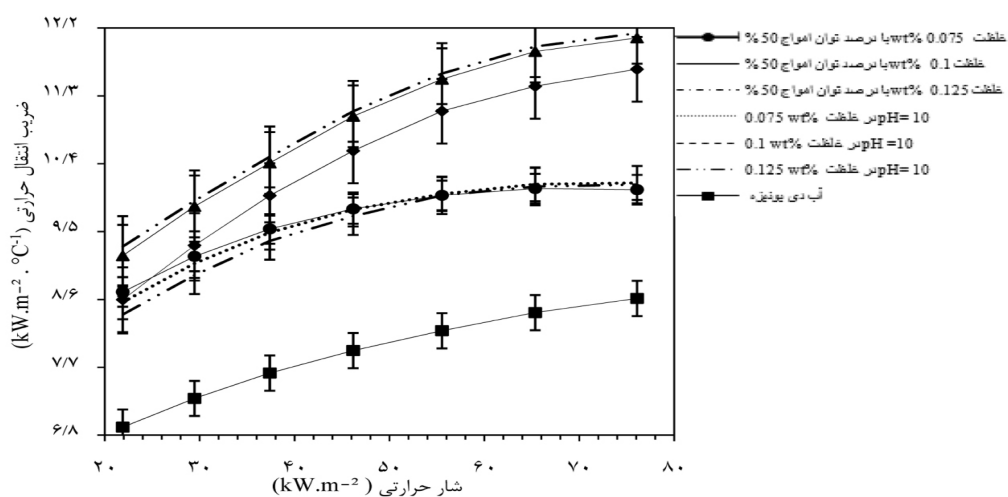
جهت بررسی افزایش رسوب که به صورت افزایش زبری بر سطح انتقال حرارت ظاهر می‌شوند و همچنین تأثیر امواج فراصوت بر کاهش آن‌ها، از تصاویر سه بعدی میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) استفاده شد. زبری‌ها به صورت پستی و بلندی در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با اعمال امواج فراصوت، زبری سطح انتقال حرارت کاهش یافته است. این روند کاهش از توان ۲۵٪ تا ۵۰٪ می‌باشد. اما با اعمال توان بیشتر به ۷۵٪ بار دیگر افزایش زبری را به همراه داشته است این مسئله می‌تواند به علت برخورد بیشتر ذرات در اثر شتاب بیش از حد با انرژی بالا باشد. از طرفی شار حرارت بحرانی با استفاده از ارتعاشات امواج فراصوت و همچنین مقیاس pH، افزایش می‌یابد. امواج، حذف حباب‌های از سطح گرم را تسهیل می‌کنند [۵۷]. طبق شکل ۱۴ استفاده از امواج فراصوت باعث کاهش زیادی در



شکل ۱۳ تصاویر AFM از تاثیر امواج فراصوت بر کاهش رسوبات نانوذرات



شکل ۱۴ مقایسه دو روش امواج فراصوت و pH در کاهش درصد فوق اشباع سطح گرم کن نسبت به آب دی یونیزه



شکل ۱۵ مقایسه دو روش اعمال شده امواج فراصوت و pH در افزایش BHTC نسبت به آب دی یونیزه

از این جهت در این پژوهش از دو روش متداول در پایداری نانوسیال یعنی تغییر pH (۹/۵، ۱۰ و ۱۰/۵) و تابش امواج فراصوت (با درصد توان‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵) استفاده شده است. نتایج کار در زیر خلاصه شده است:

۱- استفاده از هر دو روش موجب افزایش ضریب انتقال حرارت به‌واسطه افزایش پایداری نانوذرات در سوسپانسیون شد.

۲- افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش در غلظت ۰/۱۲۵ Wt.% برای امواج فراصوت با متوسط ۳۷/۴۸٪ در دامنه ۵۰٪ از توان و برای $\text{pH} = 10$ برابر ۲۲/۶۸٪ تعیین گردید.

۳- تغییر pH به‌دلیل کاهش کشش سطحی، باعث کاهش قطر جدایش حباب شده و کاهش قطر موجب کم شدن اختلاط در محلول در حال جوشش شد. از طرفی تغییر pH فقط در شارهای حرارتی پایین مناسب بوده و منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت گردید.

۴- امواج فراصوت به‌دلیل اینکه ماده جدیدی به محلول در حال جوشش اضافه نشد و از طرفی به‌دلیل افزایش قطر جدایش حباب و همچنین کاهش ویسکوزیته منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت در تمامی شارهای حرارتی گردید. همچنین این امواج تاثیر بسیار زیادی بر افزایش شار حرارتی بحرانی داشت.

از مهم‌ترین دلایل این افزایش می‌توان به ایجاد تلاطم، افزایش قطر جدایش حباب و مهم‌تر اینکه این افزایش بدون اضافه کردن هیچ ماده‌ی دیگری به محلول حاصل شده است. چرا که در تغییر pH محلول به‌واسطه اضافه کردن یک ماده دیگر به محلول اصلی موجب می‌شود که در معادلات مربوطه جهت محاسبه دینامیک حباب، پارامترهای جدیدی وارد حل معادلات شوند.

نتیجه‌گیری

انتقال حرارت جوشش به‌عنوان یک روش تبادل حرارت کارآمد، به‌طور گسترده‌ای در زمینه‌های متعددی مانند خنک کننده دستگاه‌های الکترونیکی، چرخه قدرت، ذخیره سازی و انتقال مایعات برودتی در محفظه به‌کار گرفته می‌شود. در این مطالعه آزمایشگاهی به بررسی اثرات افزودن نانوذرات CuO به سیال با پایه آب دی یونیزه، جهت افزایش ضریب انتقال حرارت پرداخته شد. سیستم مورد آزمایش از یک ظرف شیشه‌ای با مقاومت حرارتی بالا که دارای یک گرم‌کن از جنس مس به شکل استوانه و با زبری ثابت $0.84 \mu\text{m}$ انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش شد. اما این نانوذرات به‌علت عدم پایداری طولانی در سوسپانسیون، موجب رسوب بر روی سطح گرم‌کن شده و به مرور زمان باعث کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شود.

علائم و نشانه‌ها

I^* : پارامتر رابطه کوتاتلاذره
 K : ضریب هدایت حرارتی ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$)
 L : طول (m)
 M^* : پارامتر رابطه کوتاتلاذره
 $n(p)$: پارامتر رابطه گارنفلو
 P : فشار (Pa)
 Pr : عدد پرانتل
 q : شار حرارتی (W)
 R_p : متوسط زبری سطح انتقال حرارت

A : سطح مقطع (m^2)
 C_p : ظرفیت حرارتی ($\text{J kg}^{-1} \text{C}^{-1}$)
 D : قطر حباب (mm)
 $F_{(pr)}$: پارامتر رابطه گارنفلو
 g : گرانش
 H_{fg} : گرمای نهان تبخیر (J kg^{-1})
 H : ضریب انتقال حرارت جوشش
 I : جریان (A)

زیر نویس ها

0: پایه

b: حباب

d: قطر

c: بحرانی

I: مایع

s: سطح

sat: اشباع

th: گرما

v: بخار

W: وات

T: دما ($^{\circ}\text{C}$)

V: ولتاژ (V)

نمادهای یونانی

 ρ : ضریب نفوذ ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) ρ : چگالی (kg m^{-3}) δ : عمق نفوذ (mm) μ : ویسکوزیته ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) σ : کشش سطحی (N m^{-1}) π : عدد پی ϕ : اختلاف بین فاز، ولتاژ و جریان Δ : اختلاف

مراجع

- [1]. Sunil L, Kumarappa S, Hegde R (2016) Experimental studies on pool boiling heat transfer using alumina and graphene oxied nanofluid, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e-ISSN, 03, 01: 2395-0056
- [2]. Chung J, Chen T, Maroo S (2011) A review of recent progress on nano/micro scale nucleate boiling fundamentals, Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 2: 2.
- [3]. Liu W, Yang Z, Zhang B, Lv P (2017) Experimental study on the effects of mechanical vibration on the heat transfer characteristics of tubular laminar flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 115: 169-79.
- [4]. Léal L, Miscevic M, Lavieille P, Amokrane M, Pigache F, Topin F, Nogarède B, Tadrist L (2013) An overview of heat transfer enhancement methods and new perspectives: Focus on active methods using electroactive materials, International Journal of Heat and Mass Transfer, 61: 505-24.
- [5]. Improvement of heat transfer by means of ultrasound: Application to a double-tube heat exchanger (2012) Ultrasonics Sonochemistry, 19: 1194-1200.
- [6]. Azmi W, Sharif M, Yusof T, Mamat R, Redhwan (2017) Potential of nanorefrigerant and nanolubricant on energy saving in refrigeration system—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 69: 415-28.
- [7]. Sheikholeslami M, Gorji-Bandpy M, Ganji D D (2015) Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49: 444-69.
- [8]. Leong K, Ho J, Wong K (2017) A critical review of pool and flow boiling heat transfer of dielectric fluids on enhanced surfaces, Applied Thermal Engineering, 112: 999-1019.
- [9]. Yang L, Du K (2017) A comprehensive review on heat transfer characteristics of TiO_2 nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, 108: 11-31.
- [10]. Amani M, Amani P, Kasaeian A, Mahian O, Wongwises S (2017) Thermal conductivity measurement of spinel-type ferrite MnFe_2O_4 nanofluids in the presence of a uniform magnetic field, Journal of Molecular Liquids, 230: 121-8.
- [11]. Choi S U, Eastman J A (1995) Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Argonne National Lab., (ANL), Argonne, IL (United States).
- [12]. Timofeeva E V, Gavrilov A N, McCloskey J M, Tolmachev Y V, Sprunt S, Lopatina L M, Selinger J V (2007) Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory, Physical Review E, 76: 061203.
- [13]. Hong K, Hong T K, Yang H S (2006) Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles, Applied Physics Letters, 88: 031901.
- [14]. Vafaei S, Borca Tasciuc T (2014) Role of nanoparticles on nanofluid boiling phenomenon: Nanoparticle deposition, Chemical Engineering Research and Design, 92: 842-56.
- [15]. Das P K, Mallik A K, Ganguly R, Santra A K (2016) Synthesis and characterization of TiO_2 -water nanofluids with different surfactants, International Communications in Heat and Mass Transfer, 75: 341-8.
- [16]. Xuan Y, Li Q (2000) Heat transfer enhancement of nanofluids, International Journal of heat and fluid flow, 21: 58-64.
- [17]. Wamkam C T, Opoku M K, Hong H, Smith P (2011) , Effects of pH on heat transfer nanofluids containing ZrO_2 and TiO_2 nanoparticles, Journal of Applied Physics, 109: 024305.

- [18]. Goudarzi K, Nejati F, Shojaeizadeh E, Yousef Abad S A (2015) Experimental study on the effect of pH variation of nanofluids on the thermal efficiency of a solar collector with helical tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 60: 20-7.
- [19]. Sarafriz M, Hormozi F (2015) Pool boiling heat transfer to dilute copper oxide aqueous nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, 90: 224-37.
- [20]. Peyghambarzadeh S, Hashemabadi S, Naraki M, Vermahmoudi Y (2013) Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator, *Applied Thermal Engineering*, 52: 8-16.
- [21]. Habibzadeh S, Kazemi-Beydokhti A, Khodadadi A A, Mortazavi Y, Omanovic S, Shariat Niassar M (2010) Stability and thermal conductivity of nanofluids of tin dioxide synthesized via microwave-induced combustion route, *Chemical Engineering Journal*, 156: 471-8.
- [22]. Mahbubul I, Shahrul I, Khaleduzzaman S, Saidur R, Amalina M, Turgut A (2015) Experimental investigation on effect of ultrasonication duration on colloidal dispersion and thermophysical properties of alumina–water nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88: 73-81.
- [23]. Ghotbinasab S, Khooshehchin M, Mohammadidoust A, Rafiee M, Salimi F, Fathi S (2021) Comparing the heat transfer coefficient of copper sulfate and isopropanol solutions in the pool boiling process: Bubble dynamic and ultrasonic intensification, *Chemical Engineering Science*, 116589.
- [24]. Yang L, Du K, Zhang X S, Cheng B (2011) Preparation and stability of Al_2O_3 nano-particle suspension of ammonia–water solution. *Applied Thermal Engineering*, 31: 3643-7.
- [25]. Kim H, Kim Y, BH kang (2004) Enhancement of natural convection and pool boiling heat transfer via ultrasonic vibration, *Journal of Heat and Mass Transfer*, 47:2831-40.
- [26]. Khooshehchin M, Mohammadidoust A, Ghotbinasab S (2020) An optimization study on heat transfer of pool boiling exposed ultrasonic waves and particles addition, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 114: 104558.
- [27]. Taurozzi J S, Hackley V A, Wiesner M (2012) Preparation of nanoparticle dispersions from powdered material using ultrasonic disruption, *NIST Special Publication*, 1200: 1200-2.
- [28]. Rohsenow W M (1951) A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids, Cambridge, Mass.: MIT Division of Industrial Cooperation, 5, 3-4.
- [29]. Kutateladze S S (1995) Heat transfer in condensation and boiling, *AEC-tr-3770*.
- [30]. Stephan K, Abdelsalam M (1980) Heat-transfer correlations for natural convection boiling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 23: 73-87.
- [31]. Gorenflo D (1993) Pool Boiling, *VDI Heat Atlas*, VDI-Verlag, Dusseldorf, Germany.
- [32]. Fazel S A, Roumana S (2010) Pool boiling heat transfer to pure liquids, In: *WSEAS Conference*, USA.
- [33]. Fazel S A A (2017) A genetic algorithm-based optimization model for pool boiling heat transfer on horizontal rod heaters at isolated bubble regime, *Heat and Mass Transfer*, 53: 2731-2744.
- [34]. Lu L, Liu Z H, Xiao H S (2011) Thermal performance of an open thermosyphon using nanofluids for high-temperature evacuated tubular solar collectors: Part 1: Indoor experiment, *Solar Energy*, 85, 2: 379-387.
- [35]. Wong K V, Cañillo M J (2010) Heat transfer mechanisms and clustering in nanofluids, *Advances in Mechanical Engineering*, 2: 795478.
- [36]. Xu G, Fu J, Dong B, Quan Y, Gu G (2019) A novel method to measure thermal conductivity of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130: 978-988.
- [37]. Asadi A, Asadi M, Rezaniakolaei A, Aistrup L, Rosendahl L A, frand M, Wongwises S (2018) Heat transfer efficiency of Al_2O_3 -MWCNT/thermal oil hybrid nanofluid as a cooling fluid in thermal and energy management applications: An experimental and theoretical investigation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117: 474-486.
- [38]. Esfahani N N, Toghraie D, Afrand M (2018) A new correlation for predicting the thermal conductivity of ZnO–Ag (50%–50%)/water hybrid nanofluid: an experimental study, *Powder Technology*, 323: 367-373.
- [39]. Hamid K A, Azmi W H, Nabil M F, Mamat R (2018) Experimental investigation of nanoparticle mixture ratios on TiO_2 – SiO_2 nanofluids heat transfer performance under turbulent flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 118: 617-627.
- [40]. Yu W, Xie H, Chen L, Li Y (2010) Investigation on the thermal transport properties of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Powder Technology*, 197, 3: 218-221.
- [41]. Kwark S M, Kumar R, Moreno G, Yoo J, You S M (2010) Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 5-6: 972-981.
- [42]. Wong K V, Cañillo M J (2010) Heat transfer mechanisms and clustering in nanofluids, *Advances in Mechanical Engineering*, 2: 1-9.
- [43]. Wang X j, Zhu D S (2009) Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in

- nanofluids, Chemical Physics Letters, 470, 1-3: 107-111.
- [44]. Patra N, Ghosh P, Singh R S, Nayak A (2019) Flow visualization in dilute oxide based nanofluid boiling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 135: 331-344.
- [45]. Kim S J, Bang I C, Buongiorno J, Hu W (2007) Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, 19-20: 4105-4116.
- [46]. Suriyawong A, Wongwises S (2010) Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO_2 -water nanofluids at very low concentrations, Experimental Thermal and Fluid Science, 34, 8: 992-999.
- [47]. Cieslinski J T, Kaczmarczyk T Z (2011) Pool boiling of water- Al_2O_3 and water-Cu nanofluids on horizontal smooth tubes, Nanoscale Research Letters, 6, 1: 220.
- [48]. Umesh V, Raja B (2015) A study on nucleate boiling heat transfer characteristics of pentane and CuO-pentane nanofluid on smooth and milled surfaces, Experimental Thermal and Fluid Science, 64: 23-29.
- [49]. Shahmoradi Z, Etesami N, Esfahany M N, (2013) Pool boiling characteristics of nanofluid on flat plate based on heater surface analysis, International Communications in Heat and Mass Transfer, 47: 113-120.
- [50]. Shi M, Shuai M, Xuan Y (2006) Experimental study of pool boiling heat transfer for nano-particle suspensions on a plate surface, in International Heat Transfer Conference 13. Begel House Library, 7.
- [51]. Chopkar M, Das S K, Manna I, Das P K (2008) Pool boiling heat transfer characteristics of ZrO_2 -water nanofluids from a flat surface in a pool, Heat and Mass Transfer, 44, 8: 999-1004.
- [52]. Narayan G P, Kanjirakat A, Sateesh G, Das S.K (2008) Effect of surface orientation on pool boiling heat transfer of nanoparticle suspensions, International Journal of Multiphase Flow, 34, 2: 145-160.
- [53]. Piro I, Rohsenow W, Doerffer S (2004) Nucleate pool-boiling heat transfer. I: review of parametric effects of boiling surface, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47: 5033-44.
- [54]. Gerardi C, Buongiorno J, Hu L w, McKrell T (2010) Study of bubble growth in water pool boiling through synchronized, infrared thermometry and high-speed video, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53: 4185-92.
- [55]. Cao Z, Wu Z, Pham A D, Yang Y, Abbood S, Falkman P, Ruzgas T, Albèr C, Sundén B (2019) Pool boiling of HFE-7200 on nanoparticle-coating surfaces: Experiments and heat transfer analysis, International Journal of Heat and Mass Transfer, 133: 548-60.
- [56]. Roostamzadeh A, Jafarpur K, Rad E G (2016) Numerical investigation of pool nucleate boiling in nanofluid with lattice Boltzmann method, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 54.
- [57]. Li B, Han X, Wan Z, Wang X, Tang Y (2016) Influence of ultrasound on heat transfer of copper tubes with different surface characteristics in sub-cooled boiling, Applied Thermal Engineering, 92: 93-103.
- [58]. Douglas Z, Boziuk T R, Smith M K, Glezer A (2012) Acoustically enhanced boiling heat transfer, Physics of Fluids, 24: 052105.
- [59]. Iida Y, Tsutsui K (1992) Effects of ultrasonic waves on natural convection, nucleate boiling, and film boiling heat transfer from a wire to a saturated liquid, Experimental Thermal and Fluid Science, 5: 108-15.