

مقایسه عملکرد حرارتی یک ترموسیفون دوفازی بسته در اثر استفاده از نانوسیال های اکسیدفلزی*

سعید زینالی هریس^(۳)سید حسین نوعی^(۲)مصطفی کاهانی^(۱)

چکیده نانوسیال‌ها سوسپانسیون‌های پایداری از نانو ذرات جامد در یک سیال پایه می باشند که پتانسیل زیادی در افزایش انتقال حرارت از خود نشان می دهند. آنها می‌توانند در بسیاری از تجهیزات حرارتی از جمله سیستم ترموسیفون‌ها، به عنوان محیط انتقال حرارت مورد استفاده قرار بگیرند. یک ترموسیفون دوفازی بسته، دستگاهی برای انتقال حرارت می باشد که شامل یک لوله دوسر بسته تحت خلا است که درون آن با مقدار معینی از یک سیال عامل پر شده است. در این پژوهش پس از تهیه نانوسیال های "اکسید آلومینیوم/آب" و "اکسید مس/آب" در غلظت‌های مختلف حجمی از ۱ تا ۳ درصد، نقش استفاده از آنها به عنوان محیط انتقال حرارت در داخل سیستم ترموسیفون دوفازی بسته بررسی شده است. نتایج تجربی نشان می دهد که در صورت استفاده از نانوسیال به جای آب در سیستم ترموسیفون دوفازی بسته، راندمان سیستم به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می یابد. به طوری که در نسبت پرشدن ۴۵٪، استفاده از نانوسیال های اکسید آلومینیوم/آب و یا اکسید مس/آب به جای آب خالص به ترتیب منجر به افزایش ۱۴/۷ و ۱۳/۴ درصدی در راندمان سیستم مورد استفاده می گردد. هم‌چنین در مورد هر دو نانوسیال، ماکزیمم راندمان در نسبت پرشدن ۳۵٪ و در غلظت حجمی ۳٪ حاصل می شود.

واژه‌های کلیدی نانوذرات اکسیدفلزی، نانوسیال، ترموسیفون دوفازی بسته، نسبت پرشدن، بهبود انتقال حرارت.

The Comparison of Thermal Performance on a Two-Phase Closed Thermosyphon Using Metal Oxide Nanofluids

M. Kahani

S. H. Noie

S. Zeinali Heris

Abstract Nanofluids are stable suspensions of nano solid particles in a conventional fluid. They have great potential in heat transfer enhancement and can be used in thermal equipment such as thermosyphons as the heat transfer media. A two-phase closed thermosyphon is a device for heat transfer; it consists of an evacuated-closed tube filled with a certain amount of a stable working fluid. In this paper, after preparing two kind nanofluids "Al₂O₃/Water" and "CuO/Water" in different volume percent (1%~3%) the role of using these nanofluids instead of pure water as the heat transfer media are investigated. Experimental results shows that nanofluid can significant improve efficiency of two-phase closed thermosyphon. For filling ratio of 45%, using the "Al₂O₃/Water" and "CuO/Water" nanofluid instead of water in the system, resulted in 14.7% and 13.4% gain in the efficiency. For both nanofluids maximum efficiency of two-phase closed thermosyphon tacked place at 35% filling ratio and 3 volume percent.

Key Words Metal Oxide Nanoparticles, Nanofluid, Two-Phased Closed Thermosyphon, Filling Ratio, Heat Transfer Enhancement.

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۷/۱۰/۱۶ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۹/۴/۲۷ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی دکتری، مهندسی شیمی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه فردوسی مشهد

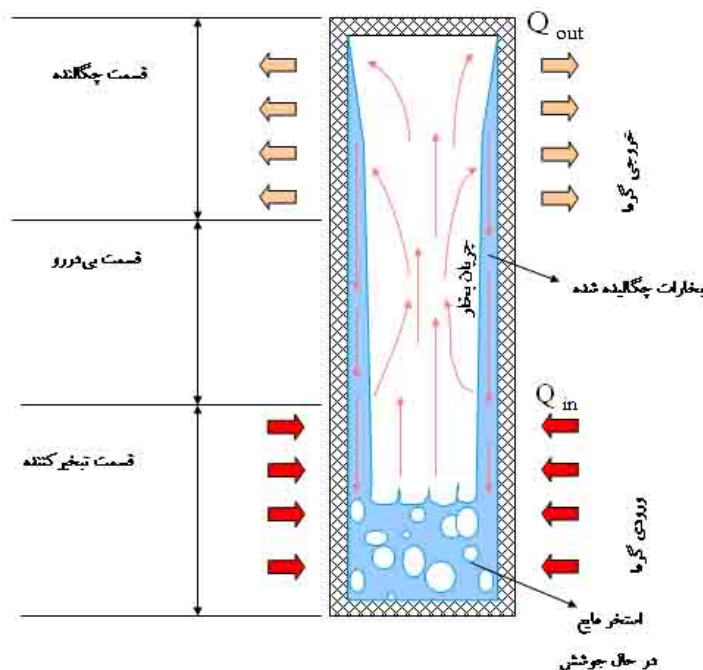
(۳) نویسنده‌ی مسئول، استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه فردوسی مشهد

است، متشکل از یک ظرف استوانه‌ای است که دو سر آن بسته شده و مقدار کمی از یک سیال عامل درون آن تحت شرایط خلاء قرار دارد [۵]. این وسیله به طور معمول شامل سه بخش تبخیرکننده، آدیاباتیک و چگالنده است. حرارت ورودی به بخش تبخیرکننده ترموسیفون موجب جوشش و تبخیر سیال عامل می‌شود، سپس بخار با از دست دادن گرمای نهان خود در بخش چگالنده به صورت یک فیلم مایع، تحت تأثیر نیروی گرانش به بخش تبخیرکننده باز می‌گردد. از آنجایی که میزان گرمای نهان تبخیر سیال قابل توجه می‌باشد، حرارت زیادی با حداقل اختلاف دما بین دو سر لوله انتقال می‌یابد. در عمل هدایت حرارتی موثر ترموسیفون‌ها ۲۰۰ الی ۵۰۰ برابر مس که یک فلز با قابلیت حرارتی بالا می‌باشد- است [6].

مقدمه

روش‌های زیادی به منظور بهبود راندمان حرارتی تجهیزات وجود دارد که از آن جمله می‌توان به استفاده از دستگاه ترموسیفون دو فازی بسته اشاره کرد. این وسیله، به علت تغییر فاز سیال عامل در آن، یک هادی حرارتی بسیار موثر می‌باشد. ساختار ساده، مقاومت حرارتی پایین و از همه مهمتر هزینه ساخت کم آن باعث شده است که از ترموسیفون‌های دو فازی بسته در بسیاری از کاربردها از قبیل بازیابی حرارت اتلافی در صنایع، خنک کردن تجهیزات الکترونیکی، آبگرمکن‌های خورشیدی، سیستم‌های تهویه مطبوع و... استفاده شود [1-4].

ترموسیفون دو فازی بسته یا لوله گرمایی بدون فتیله که شماتیک آن در شکل (۱) نشان داده شده



شکل ۱ شماتیک یک ترموسیفون دوفازی بسته

منظور افزایش هدایت حرارتی سیالات به آنها اضافه کرد. هدایت حرارتی سیالاتی که ذرات جامد در آنها پراکنده شده اند به مراتب از سیالات معمولی بیشتر است. این ایده برای اولین بار توسط ماکسول [12] در ۱۰۰ سال قبل مطرح گردید، اما به علت اندازه بزرگ و دانسیته بالای ذرات مورد استفاده، مشکلاتی از قبیل ته نشینی ذرات، افزایش مقاومت در برابر جریان و نیز سایدگی احتمالی مجراهای جریان را به همراه داشت. به همین علت این نوع سوسپانسیون‌ها چندان مورد توجه قرار نگرفتند.

با پیشرفت تکنولوژی و ظهور نانو فناوری، امکان ساخت ذراتی با ابعاد کوچک‌تر از ۵۰ نانومتر فراهم گردید. سیالاتی که در آنها ذرات با اندازه نانومتر معلق شده اند را اصطلاحاً نانو سیالات می‌گویند که اولین بار توسط چویی [13] محقق آزمایشگاه مرکزی آرگون ایالات متحده مطرح شد. تعادلی که بین وزن ذرات نانو، نیروی شناوری و تلاطم حرارتی (حرکات برونی) آنها در سیال پایه وجود دارد از یک طرف و سطح جانبی بسیار بزرگ‌تر ذرات نانو در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر از طرف دیگر، منجر به پایداری نانو سیال‌ها در قیاس با سوسپانسیون‌های معمولی گردیده است.

با معلق کردن ذرات نانو، عملکرد حرارتی سیال به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد بدون این که در سیستم افت فشار قابل ملاحظه‌ای ایجاد شود.

دلایل اصلی این افزایش عبارتند از:

- ۱- با توجه به نقش سطوح نانو ذرات در انتقال حرارت، سطح جانبی نسبی بسیار بزرگ نانو ذرات باعث افزایش شدید انتقال حرارت در داخل سیال می‌شود.
- ۲- نانو ذرات معلق شده، هدایت حرارتی موثر یا ظاهری سیال را افزایش می‌دهند.
- ۳- برهم‌کنش و برخورد بین ذرات نانو، سیال و سطح جامد بیشتر می‌شود.

عوامل زیادی بر عملکرد حرارتی یک ترموسیفون دو فازی بسته تأثیر می‌گذارند که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به نسبت پرشدن، نسبت ابعاد، زاویه شیب، دما و فشار عملیاتی و جنس لوله و جنس سیال پایه اشاره کرد.

نسبت پرشدن یکی از پارامترهای اصلی و تأثیر گذار بر روی عملکرد و طراحی ترموسیفون‌ها می‌باشد که به صورت نسبت حجم سیال عامل به حجم قسمت تبخیر کننده تعریف می‌شود. ضمن این که نسبت پرشدن برای هر ترموسیفون با هر مشخصه فیزیکی (نسبت ابعاد، جنس لوله، جنس سیال عامل و...) کاملاً منحصر به فرد بوده و در هیچ مرجعی کسی ادعا نکرده است که نسبت پرشدن بهینه‌ای که او به دست آورده است برای تمامی ترموسیفون‌ها صادق می‌باشد. ایمورا و هم‌کاران [7] و نیز هارادا و هم‌کاران [8] به ترتیب نسبت پرشدن ۲۰ الی ۳۳ درصد و ۲۵ الی ۳۰ درصد را به عنوان نسبت پرشدن بهینه پیشنهاد کردند. نوعی و هم‌کاران [9] نسبت پرشدن ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصدی را برای ترموسیفون‌های دوفازی بسته با مشخصات هندسی مختلف پیشنهاد کردند. این در حالی است که حسین و هم‌کاران [10] نسبت پرشدن ۲۰ درصد را پیشنهاد دادند. همچنین، فلدمن و هم‌کاران [11] بیان داشتند که نسبت پرشدن مناسب بین ۱۸ تا ۲۲ درصد می‌باشد.

سیالات خنک‌کننده از نقش بسیار مهمی در صنایع مربوط به تولید و انتقال انرژی برخوردار می‌باشند. با این حال، هدایت حرارتی پایین سیالات خنک‌کننده عملاً راه را برای بهبود راندمان حرارتی تجهیزات حرارتی محدود کرده است. روش‌های زیادی به منظور بهبود هدایت حرارتی این قبیل سیالات مورد بررسی قرار گرفته است.

انواع مختلف پودر های فلزی و غیر فلزی و ذرات پلیمری (که از هدایت حرارتی بسیار بالاتری در قیاس با سیالات برخوردار می‌باشند) را می‌توان به

سطح افقی مورد بررسی قرار دادند. آنها ادعا کردند ضریب انتقال حرارت نانوسیالات در این حالت در مقایسه با آب خالص در حالت جابه‌جایی آزاد کوچک‌تر است. بر خلاف نظر آنها، تیو و هم‌کاران [23] افزایش انتقال حرارت در حالت جوشش ظرفی برای نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب را گزارش کرده‌اند. یکی از روش‌های موثر در بهبود عملکرد حرارتی یک ترموسیفون دوفازی بسته استفاده از نانوسیال در سیستم به عنوان محیط انتقال حرارت می‌باشد. اگر چه تحقیقات گسترده‌ای بر روی ترموسیفون‌های دوفازی بسته و نانوسیالات به صورت جدا از هم صورت پذیرفته است ولی استفاده از نانوسیال‌ها در داخل سیستم‌های ترموسیفون دوفازی بسته کمتر مورد توجه قرار گرفته است. شانگ و هم‌کاران [24] نشان دادند که عملکرد حرارتی یک لوله گرمایی در صورت استفاده از نانوسیال نقره به جای سیال خالص به شدت افزایش پیدا می‌کند. تسا و هم‌کاران [25] اثر مشخصات ساختاری نانوذرات را بر عملکرد حرارتی یک لوله گرمایی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تأکید کردند که استفاده از نانوسیال به جای آب خالص به عنوان سیال عامل، مقاومت حرارتی لوله گرمایی را کاهش می‌دهد. نافون و هم‌کاران [26] از نانوذرات تیتانیوم با قطر ۲۱ نانومتر در سیال پایه R11 استفاده کرده و نانوسیال حاصله را به عنوان سیال عامل در لوله گرمایی مورد استفاده قرار دادند. نتایج تجربی آن‌ها از افزایش ۴۰ درصدی راندمان سیستم تنها در اثر استفاده از ۱/۰٪ از نانو ذرات در سیال پایه حکایت داشت. پارماتنانوات و هم‌کاران [27] افزایش تقریبی ۲۰٪ در عملکرد حرارتی یک ترموسیفون دوفازی بسته را در اثر استفاده از نانو سیال نقره/آب در قیاس با استفاده از آب خالص گزارش کرده‌اند. خنده کار و هم‌کاران [28] عملکرد حرارتی یک ترموسیفون دوفازی بسته را که از نانوسیال به عنوان محیط انتقال حرارت استفاده می‌کرد، مورد بررسی قرار دادند.

۴- نوسان و تلاطم سیال با حضور ذرات نانو تشدید می‌شود.

۵- پراکندگی ذرات نانو باعث پخش شدن گرادیان دما در تمام سیال می‌شود.

به توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد نانوسیال‌ها از آن‌ها به عنوان نسل آینده سیالات حرارتی یاد می‌شود که می‌توانند در زمینه‌های مهمی همانند الکترونیک، حمل‌ونقل و پزشکی مورد استفاده قرار گیرند [14].

مقالات بسیار زیادی پیرامون پیش‌بینی و اندازه‌گیری خواص نانوسیالات ارائه شده‌اند که در میان آن‌ها اکسید آلومینیوم و اکسید مس دو نانوذره‌ای هستند که بیشترین پژوهش‌های تجربی بر روی خواص آنها صورت پذیرفته است. لی و هم‌کاران [15] اولین اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیالات را انجام دادند. ایستمن و هم‌کاران [16] و نیز کلبینسکی و هم‌کاران [17] بیان کردند که هدایت حرارتی نانو سیالات با افزایش کسر حجمی ذرات در سیال پایه، افزایش می‌یابد. با کسر حجمی ۷/۵ درصد برای نانو سیال اکسید آلومینیوم/آب حدود ۴۵٪ و برای نانو سیال آلومینیوم/اتیلن گلایکول حدود ۷۰٪ افزایش در میانگین ضریب انتقال حرارت دیواری مشاهده شده است [18].

زینالی هریس و هم‌کاران [19,20] انتقال حرارت جا به جایی نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب و اکسید مس/آب را در یک لوله مدور مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأکید کردند که ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه و عدد پکلت افزایش می‌یابد. در مورد نانوسیال طلا/آب افزایش نرخ انتقال حرارت و در مورد نانو سیال دی‌اکسید سیلیسیوم/اتیلن گلایکول کاهش نرخ انتقال حرارت در حالت جوشش ظرفی (Pool Boiling) گزارش شده است. [21]. بنگ و هم‌کاران [22] انتقال حرارت در حال جوشش را برای نانو سیال اکسید آلومینیوم/آب در یک

پایه، محلول ۴ ساعت در دستگاه اولتراسونیک قرار داده می‌شود تا پراکندگی ذرات نانو به خوبی در سیال پایه صورت بگیرد. این کار هم‌چنین موجب افزایش زمان ماند نانوسیال می‌شود، به طوری که هیچ‌گونه ته‌نشینی از ذرات نانو در ۶ ساعت اولیه تهیه آن مشاهده نمی‌گردد. در جدول (۱) خواص فیزیکی نانو ذرات به کار رفته در این پژوهش آورده شده است که توسط فروشنده (Nano Structural-Nano Amorphs Materials Inc این نانو ذرات) ارائه شده است.

شکل (۳) تصاویر TEM از نانو ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس مورد استفاده در این آزمایشات (در غلظت ۱ درصد حجمی) را نشان می‌دهد. به دلیل ترافیک تقاضا برای گرفتن تصاویر TEM در آزمایشگاه مربوطه، عملاً امکان تهیه تصاویر زودتر از ۲۴ ساعت بعد از تهیه نانوسیال مقدور نبود و با توجه به عدم استفاده از ماده فعال ساز سطحی به منظور تثبیت نانوسیال (برای جلوگیری از تاثیر منفی مواد فعال ساز سطحی روی خواص حرارتی نانوسیال) مقداری خوشه شدن (Cluster) ذرات نانو در داخل سیال کاملاً قابل انتظار است. البته ذکر این نکته ضروری است که کلیه آزمایش‌ها بلافاصله بعد از تهیه هر نانوسیال انجام می‌گرفت و بنابراین بحث ته‌نشینی یا خوشه شدن نانوذرات در حین آزمایشات کاملاً منتفی است. ضمن این که دانسیته نانوسیال‌ها بلافاصله بعد از تولید و هم‌چنین بعد از اتمام آزمایش اندازه‌گیری و تفاوت قابل ملاحظه‌ای مشاهده نگردید که این امر، مؤید پایداری قابل قبول نانوسیال تولیدی می‌باشد.

توسط آمپرسنج و ولت‌متری که در مدار قرار گرفته است، می‌توان توان ورودی به بخش تبخیرکننده را محاسبه کرد:

$$Q_{in} = VI \quad (1)$$

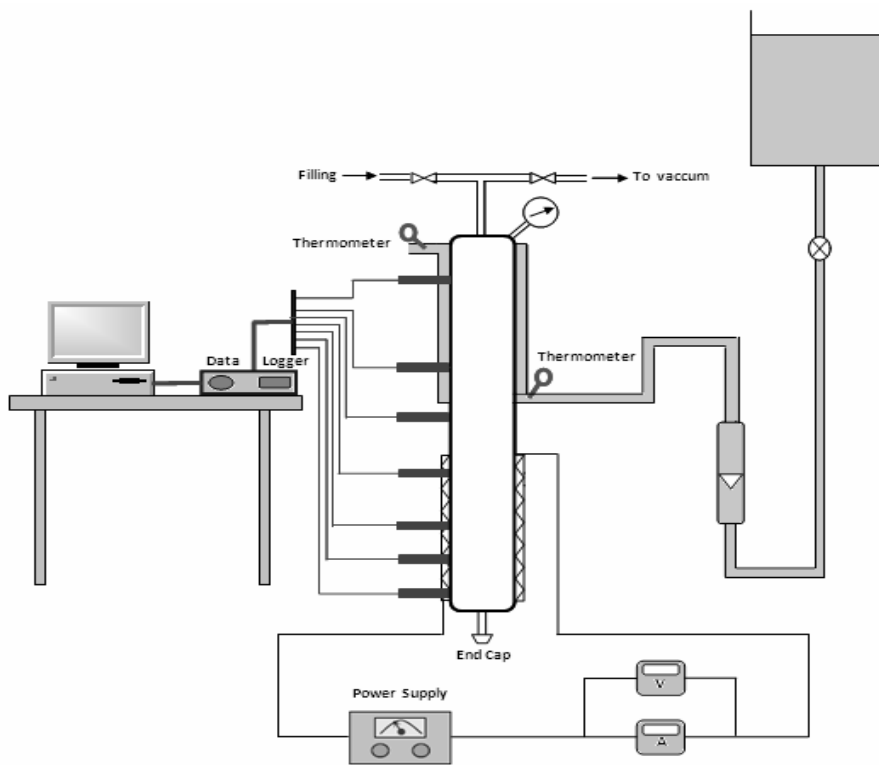
هم‌چنین Q_{loss} که کل اتلاف حرارتی ناشی از تشعشع و جا به جایی آزاد سیستم می‌باشد، از رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید:

$$Q_{loss} = Q_{rad} + Q_{conv} \quad (2)$$

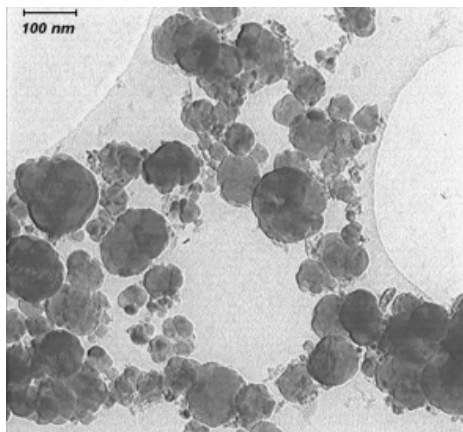
آن‌ها بیان کردند که مقاومت حرارتی ترموسیفون در اثر استفاده از نانوسیال به جای آب خالص افزایش می‌یابد. آن‌ها ادعای خود را این چنین توجیه کردند که ضریب انتقال حرارت پایین نانوسیالات در قیاس با سیالات خالص در حالت جوشش ظرفی، بر هدایت حرارتی بالای نانوسیال‌ها غلبه کرده و در نتیجه، راندمان-حرارتی در ترموسیفون دو فازی بسته را کاهش می‌دهد. در این مطالعه، از نانو سیال‌های اکسید آلومینیوم/آب و اکسید مس/آب به عنوان یک محیط انتقال حرارت جدید در داخل یک ترموسیفون دوفازی بسته استفاده شده است و هدف، مقایسه عملکرد حرارتی سیستم زمانی که از نانوسیال‌های اکسید فلزی و یا آب خالص به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود، می‌باشد.

شرح دستگاه و روش انجام آزمایش‌ها

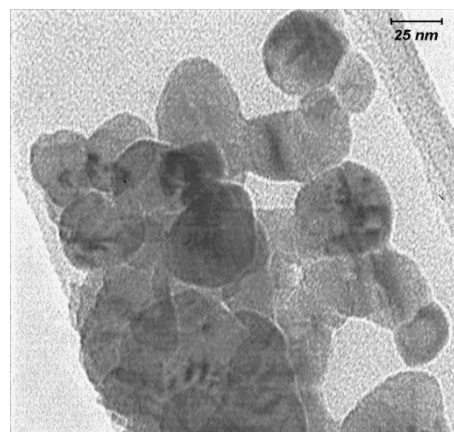
شماتیک سیستم مورد استفاده در این پژوهش به منظور مطالعه عملکرد حرارتی یک ترموسیفون دوفازی بسته در شکل (۲) نشان داده شده است. قسمت اصلی سیستم ترموسیفون دوفازی بسته یک لوله مسی است که طول، قطر داخلی و ضخامت آن به ترتیب معادل ۱۰۰۰، ۲۰ و ۱ میلی‌متر می‌باشد. در این پژوهش گرمایش لوله توسط یک گرمکن الکتریکی با توان اسمی ۱۰۰۰ وات و سرمایش آن بوسیله غلافی که به طور هم‌محور با بخش چگالنده قرار دارد، انجام می‌شود. طول بخش تبخیرکننده و چگالنده به ترتیب ۳۵۰ و ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین کل سیستم با پنبه نسوز به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر عایق شده است. در این آزمایش‌ها از سوسپانسیون نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس در آب، استفاده شده است. نانوسیال‌ها در کسرهای حجمی ۱، ۲ و ۳ درصد تهیه شده‌اند. با هدف جلوگیری از ایجاد اثرات نامطلوب بر روی خواص شیمیایی نانوسیال‌ها، از هیچ‌گونه ماده شیمیایی به عنوان پراکنده‌ساز یا تثبیت‌کننده استفاده نشده است. بعد از مخلوط کردن نانوذرات در سیال



شکل ۲ شماتیک دستگاه آزمایش



ب



الف

شکل ۳ تصاویر TEM (الف) نانو ذرات اکسیدمس (ب) نانو ذرات اکسیدآلومینیوم

جدول ۱ خواص فیزیکی نانو ذرات استفاده شده در این پژوهش

نانوذره	اندازه (nm)	دانسیته ظاهری (Kg/m ³)	دانسیته واقعی (Kg/m ³)	CP (J/kg.K)	K (W/m.K)
Al ₂ O ₃	۲۰-۳۰	۱۶۰-۴۰۰	۳۷۰۰	۸۸۰	۴۶
CuO	۵۰-۶۰	۷۹۰	۶۳۵۰	۵۳۵/۶	۶۹

حرارت اتلافی از سیستم تقریباً معادل ۲/۴۹ درصد از توان ورودی به بخش تبخیرکننده است.

دمای قسمت‌های مختلف سطح ترموسیفون توسط هفت IC با خروجی خطی دما (نوع- LM35) اندازه گیری می‌شود. از دو ترمومتر دیجیتال با دقت ۰/۱°C برای اندازه‌گیری دمای آب ورودی و خروجی از چگالنده استفاده می‌گردد (Digital Thermometer Testo 0900 0519). تمام IC ها به یک دستگاه ثبت کننده داده‌ها متصل هستند که امکان مشاهده داده‌ها را بر روی مانیتور فراهم می‌آورد. موقعیت ICها بر روی سیستم در شکل (۴) نشان داده شده است. هم‌چنین تمام تجهیزات الکتریکی (از قبیل ICها، دماسنج‌ها، آمپرسنج و ولت‌متر) و مکانیکی (از قبیل روتامتر) با دقت کالیبره شده‌اند. ترموسیفون در ابتدا تحت خلاء می‌باشد ولی در حین کار، فشار آن تا ۱/۵ بار هم افزایش می‌یابد.

نرخ انتقال حرارت از طریق تشعشع و جا به جایی آزاد به ترتیب توسط روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند:

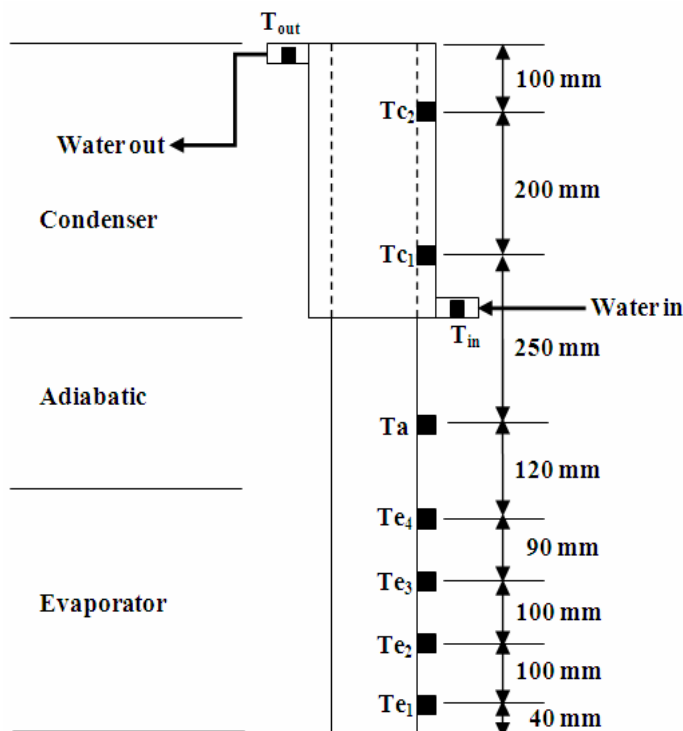
$$Q_{rad.} = \varepsilon \delta A (T_{ins.}^4 - T_{surr.}^4) \quad (3)$$

$$Q_{conv.} = h_{conv.} A (T_{ins.} - T_{surr.}) \quad (4)$$

چرچیل و هم‌کاران [29] رابطه‌ای را برای محاسبه ضریب انتقال حرارت در حالت جا به جایی آزاد پیشنهاد کردند:

$$Nu = \frac{h_{conv.} L_t}{k_{surr.}} = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left(1 + \left[\frac{0.492}{Pr} \right]^{9/16} \right)^{8/27}} \right]^2 \quad (5)$$

بعد از انجام محاسبات مشخص شد که کل



شکل ۴ محل قرار گرفتن ICها بر روی سطح خارجی ترموسیفون

راندمان برای نانوسیال اکسیدمس/آب در توان ورودی ۴۸/۴ وات، به میزان ۱۳/۴ درصد و برای نانو سیال اکسید آلومینیوم/آب در توان ورودی ۹۷/۱ وات، به میزان ۱۴/۷ درصد می‌باشد.

اثر نسبت پرشدن

در شکل (۶) اثر نسبت پرشدن بر روی راندمان سیستم، در غلظت‌های مختلف از دو نانوسیال اکسید مس/آب و اکسید آلومینیوم/آب در قیاس با آب خالص در توان ورودی ۹۷/۱ وات نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش نسبت پرشدن از ۱۵ تا ۳۵٪، راندمان سیستم افزایش می‌یابد، ولی در نسبت‌های پرشدن بیشتر از ۳۵٪ شاهد کاهش تدریجی راندمان سیستم هستیم. در نسبت‌های پرشدن بالاتر، صداها و لرزش‌های شدیدی در سیستم به وجود می‌آید که در مراجع علمی به آن اصطلاحاً "جوشش نوسانی" گفته شده است. از این رو برای ایمنی بیشتر، آزمایشی در نسبت‌های پرشدن بیشتر از ۴۵٪ انجام نگرفت. برای هر دو نانوسیال حداکثر راندمان در غلظت حجمی ۳ درصد و در نسبت پرشدن ۳۵٪ حاصل می‌شود.

در صورت استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب به جای آب خالص، حداکثر افزایش در راندمان سیستم در نسبت پرشدن ۱۵٪ و به میزان ۱۹/۳۸ درصد و در صورت استفاده از نانوسیال اکسیدمس/آب به جای آب خالص در نسبت پرشدن ۲۳٪ و به میزان ۱۶/۷ درصد صورت می‌پذیرد. حداکثر راندمان قابل حصول در سیستم با استفاده از نانوسیال اکسیدمس/آب، ۹۱/۵ درصد و با استفاده از نانو سیال اکسید آلومینیوم/آب، ۹۴/۴ درصد می‌باشد.

توزیع دما در سطح خارجی ترموسیفون دوفازی

بسته

برای بررسی توزیع دما بر روی سطح خارجی

نتایج تجربی و بحث

آهنگ گرمای منتقل شده توسط بخش چگالنده به آب داخل غلاف از رابطه‌ی (۶) به دست می‌آید.

$$Q_{out} = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (6)$$

راندمان سیستم به صورت نسبت توان خروجی از بخش چگالنده به توان ورودی به بخش تبخیرکننده تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (7)$$

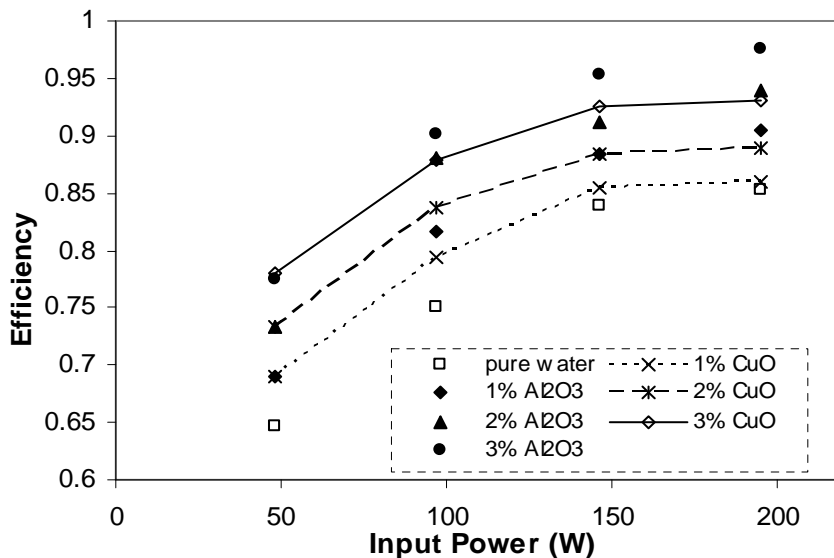
اثر غلظت نانو سیال

در شکل (۵) برای توان‌های مختلف ورودی به بخش تبخیر کننده (۱۹۵/۲ ~ ۴۸/۴ وات) و در غلظت‌های مختلف نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب و اکسیدمس/آب، راندمان سیستم در نسبت پرشدن ۴۵٪ نشان داده شده است. زمانی که سیستم ترموسیفون دوفازی بسته با نانوسیال شارژ می‌شود، راندمان سیستم نسبت به حالتی که از آب خالص به عنوان سیال عامل استفاده می‌گردد افزایش می‌یابد. به طوری که ۱٪ از نانو ذرات اکسید آلومینیوم و یا اکسیدمس در آب در توان ورودی ۹۷/۱ وات، می‌تواند راندمان سیستم را از ۷۵/۱ به ترتیب به ۸۱/۵۶ و ۷۹/۴ درصد برساند.

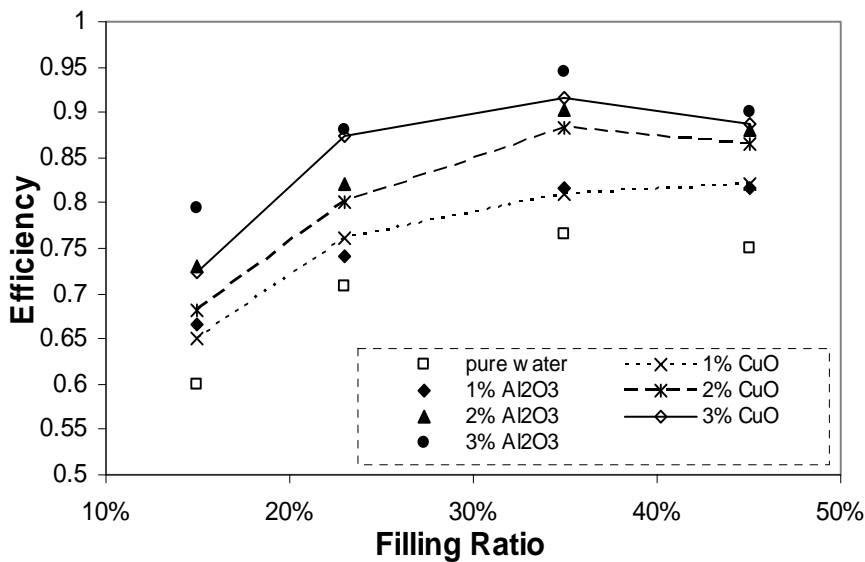
برای هر دو نانوسیال با افزایش غلظت، توانایی سیستم در انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد، اما این افزایش در راندمان سیستم شکل منظمی ندارد، یعنی در توان‌های پایین‌تر، آهنگ افزایش راندمان سریع‌تر بوده و در توان‌های بالاتر این آهنگ رشد به مراتب کندتر است. در توان‌های ورودی بیش از ۱۴۶/۲ وات تغییر قابل ملاحظه‌ای در راندمان سیستم ملاحظه نمی‌شود.

بیشترین افزایش در راندمان سیستم در صورت استفاده از نانو سیال به جای آب، در غلظت ۳٪ حجمی از نانوسیال اتفاق می‌افتد. این افزایش در

ترموسیفون، همان طور که اشاره شد از هفت IC با بخش تبخیرکننده، یک IC در بخش آدیاباتیک و دو خروجی خطی دما استفاده شده است. چهار IC در IC در بخش چگالنده قرار گرفته است.



شکل ۵ مقایسه اثر توان ورودی بر روی راندمان ترموسیفون در غلظت های مختلف از نانو سیال اکسید آلومینیوم و اکسید مس



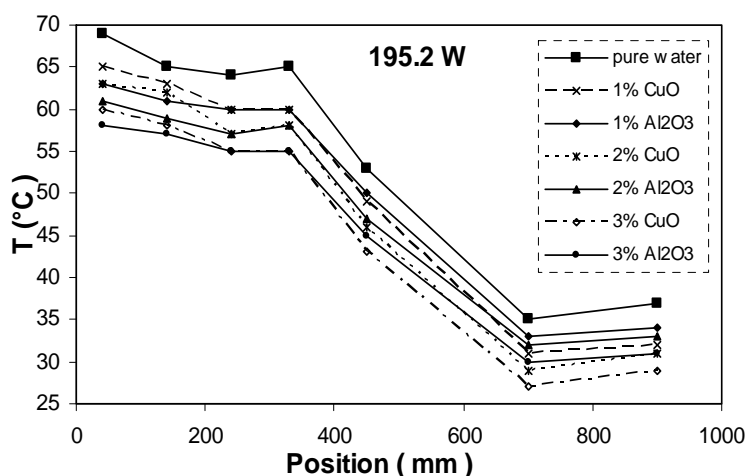
شکل ۶ مقایسه اثر نسبت پر شدن بر راندمان سیستم در غلظت های مختلف از نانو سیال اکسید آلومینیوم و اکسید مس و مقایسه با آب خالص

در شکل (۸) مقاومت حرارتی سیستم بر حسب توان ورودی و غلظت های مختلف نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب در نسبت پرشدن ۳۵٪ نشان داده شده است. با افزایش توان ورودی، میزان مقاومت حرارتی سیستم کاهش پیدا می کند که البته شیب کاهش مقاومت حرارتی در توان های پایین ترموسیفون بیشتر می باشد. به طور مثال برای نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب که حاوی ۲٪ حجمی از نانوذرات می باشد با افزایش توان ورودی از ۴۸/۴ W به ۱۹۵/۲ W، میزان مقاومت حرارتی سیستم از ۰/۴۴ °C/W به ۰/۸۸ °C/W کاهش پیدا می کند. در تمامی غلظت های نانوسیال مقاومت حرارتی سیستم نسبت به آب خالص کمتر می باشد به طور مثال در توان ورودی ۴۸/۴ W مقاومت حرارتی سیستم برابر با ۰/۵۵۳ °C/W می باشد اما با تزریق نانوذرات اکسید آلومینیوم به آب به میزان ۱، ۲ و ۳ درصد حجمی، مقاومت حرارتی سیستم به ترتیب به ۰/۵۰۷ °C/W، ۰/۴۶۱ °C/W و ۰/۴۲۱ °C/W کاهش می یابد و این بدان معنی است که افزایش غلظت نانوسیال نیز مقاومت حرارتی سیستم را کاهش می دهد. در صورت استفاده از نانوسیال در قیاس با آب خالص، حداکثر کاهش مقاومت حرارتی در غلظت ۳٪ حجمی و در توان ورودی ۴۸/۴ W رخ می دهد.

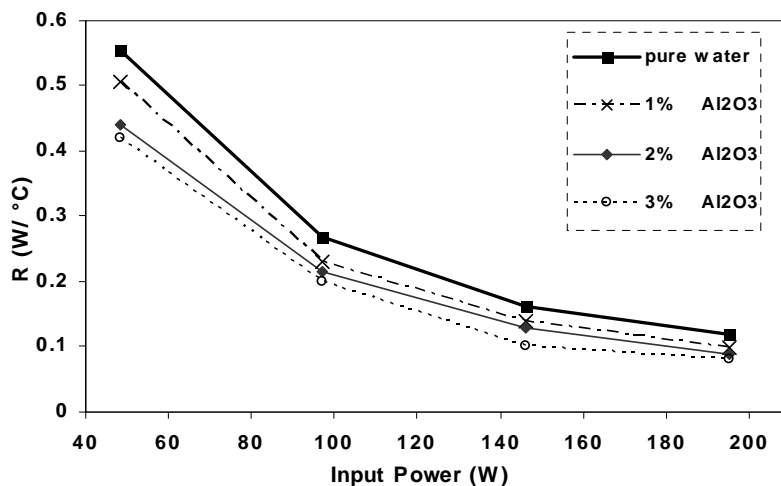
اختلاف دما بین بخش های تبخیرکننده و چگالنده یک سیستم ترموسیفون دوفازی بسته، بیان کننده عملکرد حرارتی آن می باشد. هر چه این اختلاف کمتر باشد به این معنی است که حرارت از بخش تبخیرکننده با افت کمتری به بخش چگالنده منتقل شده و در نتیجه راندمان سیستم بهتر می باشد. شکل (۷) توزیع دما در نسبت پرشدن ۴۵٪ و توان ورودی ۱۹۵/۲ وات را در غلظت های مختلف حجمی از نانوسیال ها نشان می دهد. اختلاف دما بین دو سر سیستم در صورت استفاده از نانوسیال به جای آب خالص کمتر می باشد که همین نکته مؤید بهبود راندمان سیستم در صورت استفاده از نانوسیال است. با افزایش غلظت نانوسیال این اختلاف کمتر شده و در نتیجه، عملکرد حرارتی سیستم مطلوب تر می گردد. مقاومت حرارتی برای ترموسیفون به صورت زیر تعریف می شود [28]:

$$R = \frac{T_{ave,e} - T_{ave,c}}{Q_{in}} \quad (8)$$

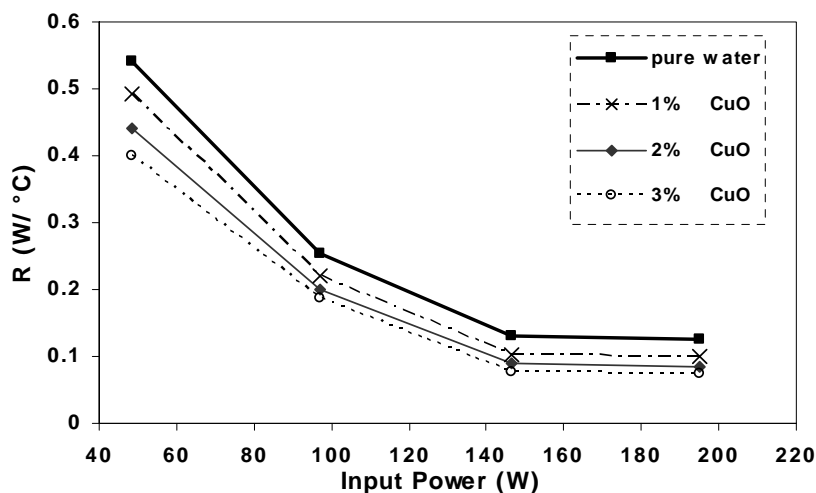
با توجه به این که نسبت پرشدن بهینه برای هر دو نوع نانوسیال ها، ۳۵٪ به دست آمده است، در این بخش مقاومت حرارتی سیستم در این نسبت پرشدن مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۷ مقایسه پروفیل دما روی سطح خارجی ترموسیفون برای نانوسیال اکسید آلومینیوم و اکسید مس



شکل ۸ تغییرات مقاومت حرارتی برای غلظت های مختلف نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب بر حسب توان ورودی در نسبت پرشدن ۳۵٪



شکل ۹ تغییرات مقاومت حرارتی برای غلظت های مختلف نانوسیال اکسید مس/آب بر حسب توان ورودی در نسبت پرشدن ۳۵٪

در شکل (۹) مقاومت حرارتی سیستم برای غلظت های مختلف نانوسیال اکسید مس/آب بر حسب توان ورودی در نسبت پرشدن ۳۵٪ نشان داده شده است. نانوسیال اکسید مس/آب در تمامی غلظت ها مقاومت حرارتی کمتری در قیاس با آب خالص ارائه می کند. به طور مثال در توان ورودی ۹۷/۱W، مقاومت حرارتی ترموسیفون در صورت استفاده از آب خالص در تمام آزمایشات صورت گرفته، استفاده از $0.267 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ می باشد در حالی که با تزریق نانوسیال در غلظت های مختلف ۱٪ تا ۳٪ حجمی، مقاومت حرارتی سیستم به ترتیب به $0.230 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ ، $0.217 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ و $0.200 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ کاهش می یابد. در سایر توان های ورودی نیز همین منوال در کاهش مقاومت حرارتی ترموسیفون ملاحظه می گردد.

در شکل (۹) مقاومت حرارتی سیستم برای غلظت های مختلف نانوسیال اکسید مس/آب بر حسب توان ورودی در نسبت پرشدن ۳۵٪ نشان داده شده است. نانوسیال اکسید مس/آب در تمامی غلظت ها مقاومت حرارتی کمتری در قیاس با آب خالص ارائه می کند. به طور مثال در توان ورودی ۹۷/۱W، مقاومت حرارتی ترموسیفون در صورت استفاده از آب خالص

انتقال حرارت هدایت شعاعی (Radial Conduction) را بهبود می‌بخشد. هم‌چنین به علت وجود ذرات نانو، زبری سطح و در نتیجه، ضریب انتقال حرارت آن افزایش می‌یابد. در این حالت منحنی جوشش ظرفی به سمت راست منتقل گردیده و جوشش هسته‌ای (Nuclear Boiling) بهبود می‌یابد [31-33].

هر چه ابعاد نانوذرات کوچک‌تر باشد با توجه به افزایش سطح جانبی آنها و در نتیجه افزایش سطح انتقال بین ذرات نانو و سیال پایه، عملکرد حرارتی نانوسیال بهبود می‌یابد [34,35]. از آنجایی که اندازه نانوذرات اکسید آلومینیوم مورد استفاده در این آزمایشات ۲۰-۳۰ نانومتر و اندازه نانوذرات اکسید مس مورد استفاده ۶۰-۵۰ نانومتر می‌باشد در نتیجه، استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب در قیاس با نانوسیال اکسید مس/آب، بهبود عملکرد حرارتی سیستم ترموسیفون دوفازی بسته را به همراه دارد.

آنالیز خطای آزمایشات

بررسی‌هایی جهت تعیین میزان خطا در محاسبه راندمان ترموسیفون به وسیله اندازه‌گیری‌های تجربی انجام گرفته است. این بررسی‌ها تاثیر خطاهای اندازه‌گیری را در نتیجه کلی نشان می‌دهد. معادله مورد استفاده جهت تخمین خطا رابطه (۹) می‌باشد [36].

$$U_{pi} = \frac{X_i}{P} \frac{\partial P}{\partial X_i} U_{Xi} \quad (9)$$

که در این رابطه X_i : پارامتر قابل اندازه‌گیری، P : کمیت محاسبه شده از روی پارامترهای قابل اندازه‌گیری، U_{Xi} : خطای اندازه‌گیری و U_{pi} : حداکثر خطای ممکن در محاسبه یک کمیت می‌باشند. تاثیر تمام خطاها در محاسبه کمیت نهایی به صورت معادله‌ی (۱۰) بیان می‌شود [37].

نانوسیال‌ها به عنوان سیال عامل به جای سیال خالص منجر به بهبود عملکرد حرارتی ترموسیفون دوفازی بسته گردید. می‌توان علت این افزایش راندمان در سیستم را به صورت زیر خلاصه کرد:

"عامل اصلی مقاومت حرارتی در برابر انتقال حرارت در سیستم ترموسیفون دوفازی بسته، تشکیل حباب‌های بخار در استخر مایع موجود در بخش تبخیرکننده می‌باشد. هرچه این حباب‌ها بزرگ‌تر باشند مقاومت حرارتی بیشتری ایجاد می‌شود که مانع انتقال حرارت بین سطح جامد و مایع می‌گردد. در نتیجه دمای سطح تبخیرکننده سیستم افزایش می‌یابد که منجر به افزایش اختلاف دما بین بخش تبخیرکننده و بخش چگالنده سیستم و در نهایت کاهش راندمان سیستم می‌گردد" [30]. نانوذرات پراکنده شده در سیال پایه موجب ترکیدن حباب‌های بخار در همان لحظات اولیه شکل‌گیری می‌شوند، بنابراین اندازه حباب‌های تشکیل شده در یک نانوسیال به مراتب کوچکتر از یک سیال معمولی می‌باشد و در نتیجه، مقاومت حرارتی سیستم در صورت استفاده از نانوسیال به جای سیال معمولی کاهش می‌یابد.

تأثیر نانوذرات روی انتقال حرارت جوشش نیز بدین شکل است که در هنگام جوشش، زیر لایه نازکی (Thin Sub-Layer) از مایع در زیر حباب‌های بخار موجود بر روی سطح جامد تشکیل می‌گردد. این لایه دارای نانوذرات می‌باشد. هنگام تبخیر مایع، ذرات نانو روی سطح جامد قرار گرفته و لایه منفذداری (Porous Layer) را ایجاد می‌کند. با شکل‌گیری لایه مذکور، از تشکیل بیشتر حباب‌ها روی سطح ممانعت به عمل آمده و خاصیت ترشوندگی (Wettability) افزایش می‌یابد که این خود، افزایش انتقال حرارت از دیواره به نانوسیال را به همراه دارد. در حقیقت این لایه، حباب‌های بزرگ‌تر را شکسته و به حباب‌های کوچک‌تری تبدیل می‌نماید. هم‌چنین این لایه در پراکنده ساختن نقاط داغ (Hot Spots) کمک کرده و

با جایگذاری مقادیر خطا در رابطه‌ی (۱۲) میزان خطا در این آزمایش خاص ۰/۵/۴۱ به دست می‌آید.

نتیجه گیری

در این پژوهش پس از تهیه نانوسیال‌های اکسید-آلومینیوم/آب و اکسیدمس/آب در غلظت‌های ۱ تا ۳ درصد حجمی، از آنها به عنوان سیال عامل در یک ترموسیفون دوفازی بسته استفاده گردید. نتایج بدست آمده از این پژوهش عبارتند از:

۱- استفاده از نانوسیال منجر به بهبود راندمان سیستم ترموسیفون دوفازی بسته در تمامی شرایط عملیاتی مورد مطالعه می‌گردد. در محدوده غلظتی مورد آزمایش، هر چه غلظت نانوسیال مورد استفاده بیشتر باشد راندمان سیستم نیز افزایش بیشتری می‌یابد.

۲- با افزایش نسبت پر شدن تا ۳۵٪، راندمان سیستم افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر نسبت پر شدن بهینه در مورد هر دو نوع نانوسیال، ۳۵٪ می‌باشد.

۳- با وجود بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی اکسیدمس در مقایسه با اکسیدآلومینیوم، استفاده از نانوسیال اکسیدآلومینیوم/آب در قیاس با نانوسیال اکسیدمس/آب منجر به عملکرد حرارتی بهتر سیستم ترموسیفون دوفازی بسته گردید که علت آن اندازه کوچک‌تر ذرات اکسیدآلومینیوم می‌باشد.

۵- برای هر دو نوع نانوسیال، حداکثر راندمان برای توان ورودی ۹۷/۱ وات در غلظت ۳ درصد حجمی به دست آمده است.

۶- اختلاف دما بین بخش تبخیرکننده و بخش چگالنده سیستم در صورت استفاده از نانوسیال به جای سیال خالص کاهش می‌یابد که این نکته مؤید بهبود راندمان سیستم می‌باشد.

و به طور کلی می‌توان گفت که استفاده از نانو سیال‌ها به جای سیال معمولی به دلیل جلوگیری از

$$\text{Max } U_p = \pm \left[\left(\frac{X_1}{P} \frac{\partial P}{\partial X_1} U_1 \right)^2 + \left(\frac{X_2}{P} \frac{\partial P}{\partial X_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{X_3}{P} \frac{\partial P}{\partial X_3} U_3 \right)^2 \right]^{0.5} \quad (10)$$

که U_p نشان دهنده خطای حاصل در تخمین کمیت می‌باشد.

محاسبه خطاها

نحوه تخمین خطای حاصله در محاسبه راندمان ترموسیفون در یکی از آزمایشات به عنوان نمونه در زیر آورده می‌شود.

خطای اندازه گیری ولتاژ:

$$U_v = \pm \frac{1}{62} = \pm 1.61 \times 10^{-2}$$

خطای اندازه گیری جریان (آمپر):

$$U_I = \pm \frac{0.01}{0.80} = \pm 1.25 \times 10^{-2}$$

خطای تقریبی اندازه گیری دبی جرمی سیال:

$$U_{\dot{m}} = \pm 5 \times 10^{-2}$$

خطای اندازه گیری دمای آب غلاف چگالنده:

$$U_{T_{in}} = \pm \frac{0.1}{21.9} = \pm 4.56 \times 10^{-3}$$

با فرض این که مقدار ظرفیت گرمایی ویژه که از جداول ترمودینامیکی به دست می‌آید بدون خطا باشد، داریم:

$$\text{Max } U_{\eta} = \pm \left[(U_{\eta,v})^2 + (U_{\eta,I})^2 + \dots + (U_{\eta,T})^2 \right]^{0.5} \quad (11)$$

با توجه به رابطه‌ی (۹) نتیجه می‌شود:

$$\text{Max } U_{\eta} = \pm \left[(-U_v)^2 + (-U_I)^2 + (-U_{\dot{m}})^2 + (U_T)^2 \right]^{0.5} \quad (12)$$

$Q_{conv.}$	نرخ انتقال حرارت جابجایی (W)	تشکیل حباب های بخار بزرگ در بخش تبخیرکننده
Q_{in}	حرارت ورودی به تبخیر کننده (W)	(که اصلی ترین دلیل افزایش مقاومت حرارتی می باشد)
Q_{out}	نرخ حرارت به دست آمده از ژاکت چگالنده (W)	منجر به کاهش مقاومت حرارتی سیستم و در نتیجه، افزایش راندمان آن می گردد.
Q_{rad}	نرخ انتقال حرارت تابش (W)	
Q_{loss}	حرارت تلف شده (W)	فهرست نمادها
Ra	عدد رایلی (بدون بعد)	A سطح انتقال حرارت جا به جایی و تابش (m^2)
T_a	دمای سطح بخش بی در رو ($^{\circ}C$)	C_p ظرفیت گرمایی ویژه آب در فشار ثابت ($J/kg.^{\circ}C$)
$T_{ave,e}$	دمای متوسط بخش تبخیرکننده ($^{\circ}C$)	E میزان خطا
$T_{ave,c}$	دمای متوسط بخش چگالنده ($^{\circ}C$)	$F.R$ نسبت پر شدن (حجم سیال عامل به حجم قسمت تبخیر کننده)
T_c	دمای سطح بخش چگالنده ($^{\circ}C$)	g شتاب ثقل (m/s^2)
T_e	دمای سطح بخش تبخیرکننده ($^{\circ}C$)	h_{conv} ضریب انتقال حرارت جابجایی ($W/m^2.^{\circ}C$)
T_{in}	دمای آب ورودی به چگالنده ($^{\circ}C$)	I شدت جریان الکتریکی (A)
$T_{ins.}$	دمای سطح خارجی عایق ($^{\circ}C$)	$k_{surr.}$ هدایت حرارتی محیط ($W/m.^{\circ}C$)
T_{out}	دمای آب خروجی از چگالنده ($^{\circ}C$)	L_e طول بخش تبخیر کننده (m)
$T_{surr.}$	دمای محیط ($^{\circ}C$)	L_t طول لوله (m)
V	ولتاژ (V)	\dot{m} دبی جرمی آب ورودی به چگالنده (kg/s)
ε	ضریب انتشار عایق	Nu عدد ناسلت (بدون بعد)
δ	ثابت بولتزمن در معادله (۳)، ($W/m^2.K^4$)	Pr عدد پراتل (بدون بعد)
η	راندمان ترموسیفون	

مراجع

- Noie, S.H., Majideian, G.R., "Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger (HPHE) for surgery rooms in hospitals", *Applied Thermal Engineering*, 20, pp. 1271-1282 (1999).
- Vasiliev, L., Lossouarn, D., Romestant, C., Alexandre, A., Bertin, Y., Piatsiushyk, Y., Romanenkov, V., "Loop heat pipe for cooling of high-power electronic components", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (1-2), pp. 301-308 (2008).
- Xiau, P., W.U, Johnson, P., Akbarzaseh, A., "A study of heat pipe heat exchanger effectiveness in an air conditioning application", in: *Proc. 5th Int. Heat Pipe Symposium*, Melbourne, Australia, (1996).
- Liu, G., et al., "The application of heat pipe heat exchanger in exhaust gas heat recovery system and its thermodynamic analysis", in: *Proc. 8th Int. Heat Pipe Conf.*, Beijing, China, pp. 582-585, (1992).

۵. سرمستی امامی؛ محمدرضا، نوعی؛ سید حسین، خشنودی؛ محمد و نعمتی؛ مجید، "بررسی جوشش نوسانی در یک ترموسیفون دوفازی بسته"، دهمین کنگره مهندسی شیمی ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، آبان (۱۳۸۴).

6. Dunn, P.D., Reay, D.A., "Heat Pipes", 3 ed., Pergamon Press, (1994).
7. Imura, H., Sasaguchi, K., Kozai, H., "Critical heat flux in a closed two phase thermosyphon", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 26(8), pp 1181– 1188, (1983).
8. Harada, K., Inoue, S., Fujita, J., et al., "Heat transfer characteristics of large heat pipe (in Japanese)", *Hitachi Zosen Tech. Rev.* 41, (1980).
9. Noie, S.H., "Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon", *Applied Thermal Engineering*, 25, pp. 495-506, (2005).
10. Hussein, H.M.S., El-Ghetany, H.H., Nada, S.A., "Performance of wickless heat pipe flat plate solar collectors having different pipes cross sections geometries and filling ratios", *Energy Conversion Management*, 47, pp 1539–1549, (2006).
11. Feldman, K.T., Srinivasan, R., "Investigation of heat transfer limits in two-phase closed thermosyphon", *5th Int.l Heat Pipe Conf.*, (1984).
12. Maxwell, J.C., "A Treatise on Electricity and Magnetism", second edition, Clarendon Press, Oxford, UK, (1881).
13. Choi, S.U.S., "Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles, Developments and Applications of Non-Newtonian Flows", FED-V. 231/ MD-V. 66, ASME, New York, pp. 99-105, (1995).
14. Zussman, S., "More about Argonne's stable, highly conductive nanofluids", Public communication, Argonne National Laboratory, IL, USA, (2002).
15. Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S., Eastman, J.A., "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles" *Journal of Heat Transfer*, 121, pp. 280-289, (1999).
16. Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., Soyez, G., Thompson, L.J., et al., "Novel thermal properties of nanostructures materials", *Materials sciences, Forum*, 312-314, pp. 629-634, (1999).
17. Keblinski, P., Phillpot, S.R., Choi, S.U.S., Eastman, J.A., "Mechanism of heat flow in suspension of nano-sized particle (nanofluids)", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 45(4), pp. 855-863, (2002).
18. Palm, S.J., Roy, G., Nguyen, C.T., "Heat transfer enhancement in a radial flow cooling system using nanofluids", *Int. Symp. Advances in Computational Heat Transfer*, Norway, (2004).
19. Zeinali Heris, S., Etemad S.Gh., Nasr Esfahany, M., "Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33, pp. 529–533, (2006).
20. Zeinali Heris, S., Nasr Esfahany, M., Etemad, S.Gh., "Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in circular tube", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, pp. 203–210, (2007).
21. Wang, X., Mujumdar, A.S., "Heat transfer characteristics of nanofluids: A review", *International Journal of Thermal Science*, 46, pp 1–19, (2007).

22. Bang, I.C., "Boiling heat transfer performance and phenomenon of Al₂O₃-water nanofluids from a plain surface in a pool", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, pp. 2407-2419, (2005).
23. Tu, J.P., Dinh, N., Theofanous, T., "An experimental study of nanofluid boiling heat transfer", In: Proc. of 6th Int. Symp. Heat Transfer, Beijing, China, (2004).
24. Shung, W.K., Wei, W.C., "Experimental Investigation of silver nanofluid on heat pipe thermal performance", Proceedings Tamkang University, Int. Nano and MEMS Workshop, Taiwan, (2005).
25. Tsai, C.Y., Chien, H.T., Ding, P.P., Chan, B., Luh, T.Y., Chen, P.H., "Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance", *Materials Letters*, 58 (9), pp. 1461-1465, (2004).
26. Naphon, P., Thongkum, D., Assadamongkol, P., "Heat pipe efficiency enhancement with refrigerant-nanoparticles mixtures", *Jour. of Energy Conversion and Management*. in: Proc, (2008).
27. Pauramatethanuwat, T., Rittidech, S., Booddachan, K., "Effect of Inclination Angles and Aspect ratios on Heat Transfer Characteristics of a Two- Phase Closed Thermosyphon Using De Ionize Water Mix Silver Nano", 9th Int. Heat Pipe Symp., Malaysia, (2008).
28. Khandekar, S., Joshi, Y., Mehta, B., "Thermal performance of closed two-phase thermosyphon using nanofluids", *International Journal of Thermal Science*, 47, pp. 659-667, (2007).
29. Churchill, S.W., and Chu, H.H.S., "Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18, pp. 1049-1053, (1975)
30. Collier, J.G., Thome, J.R., "Convective boiling and condensation", Clarendon Press, Oxford, (1996).
31. You, S.M., Kim, J., Kim, K.H., "Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer". *Applied Physics Letters*, 83, pp. 3374-3379, (2003).
32. Milanova, D., Kumar, R., Kuchibhatla, S., Seal, S., "Heat transfer behavior of oxide nanoparticles in pool boiling experiment", In: *Proc. of Fourth International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels*, Ireland, (2006).
33. Kim, S.J., Bang, I.C., Buongiorno, J., Hu, L.W., "Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux", *Heat and Mass Transfer*, 50, pp. 4105-4110, (2007).
34. Wang, X., Xu, X., Choi, U.S., "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 13, pp. 474-480, (1999).
35. Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., Yu, W., Thompson, L.J., "nomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles", *Applied Physics letters*, 78 (6), pp. 718-720, (2001).
36. Young, H.D., "Statistical treatment of experimental data", Mc. Grow-Hill, New York, (1962).
37. Holman, J.D., "Experimental methods for engineers", 5 ed., Mc. Grow-Hill, New York. (1989).