

بررسی تجربی عملکرد نانوسیال مس اکسید - استون بر بازده گرمایی یک ترموسیفون دوفازی بسته

سید حسین نوعی، فرزانه حریری دیبا، سید مصطفی نوعی*⁺

مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

نجمه حسینی زاده

قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان، گروه مهندسی شیمی

سعید زینالی هریس

مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

چکیده: لوله گرمایی و ترموسیفون دوفازی بسته فناوری‌های جدید در انتقال گرما هستند، شامل لوله‌ای بسته تحت خلأ هستند که با مقدار معینی از سیال یا نانوسیال پر شده‌اند. نانوسیال‌های سوسپانسیون، ذره‌های جامد در یک سیال پایه هستند که محیط جدیدی برای انتقال گرما در تجهیزات گرمایی به شمار می‌آیند. این پژوهش تأثیر نانوسیال مس اکسید - استون را بر عملکرد گرمایی یک ترموسیفون دوفازی بسته بررسی می‌کند. نتیجه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد در بیشتر غلظت‌ها کاهش بازده نسبت به سیال پایه خالص وجود دارد به جز در غلظت ۱٪ که افزایش کمی در بازده ترموسیفون دیده می‌شود. همچنین مقاومت گرمایی در دو غلظت ۰/۵ و ۱٪ نسبت به سیال پایه کاهش می‌یابد. در غلظت ۱٪ تأثیر درصد پرشدن برای دو نسبت ۶۰٪ و ۳۵٪ نیز بررسی شد.

واژه‌های کلیدی: ترموسیفون دوفازی بسته، نانوسیال، نانو ذرات مس اکسید، استون، نسبت پرشدن.

KEY WORDS: Two-phase closed thermosyphon, Nanofluid, CuO nanoparticles, Acetone, Filling ratio.

مقدمه

گرمایی (امروزی) [۲] تا به امروز که دانشمندان نوع‌های گوناگونی از آن را در صنایع گوناگون به کار می‌برند بیش از نیم قرن می‌گذرد. در این مدت دانشمندان تلاش کرده‌اند با آزمایش بر روی پارامترهای مؤثر از جمله اندازه‌های لوله گرمایی، جنس سیال پایه و نانوذره‌ها، توان ورودی، درصد پرشدن، زاویه قرارگیری و... عملکرد گرمایی آنها را بهبود بخشند [۲۳-۲۲-۳]. به طور کلی

مبدل‌های گرمایی کاربرد بسیار زیادی در صنایع گوناگون دارند، از مبدل‌های قاب و صفحه‌ای در صنایع غذایی تا مبدل‌های پوسته و لوله در صنعت نفت [۱] نوع‌های ویژه‌ای از این مبدل‌ها لوله‌های گرمایی هستند که با استفاده از گرمای نهان تبخیر انتقال انرژی انجام می‌دهند. از سال ۱۹۴۴ میلادی که Gauglev یک وسیله‌ی بسیار سبک برای انتقال گرما بین دو ماده ساخت (بسیار شبیه به لوله‌های

+E-mail: nowee@um.ac.ir

*عهده دار مکاتبات

۰/۱٪ حجمی بیان کرد که بیشترین افزایش بازده در آن ۱۰/۶٪ است [۹]. *Noie* در سال ۲۰۰۹ میلادی با استفاده از نانو سیال آب - آلومینیوم اکسید، افزایشی به میزان ۱۴/۷٪ در یک ترموسیفون دوفازی بسته دید، وی تأثیر دو پارامتر توان ورودی و غلظت را بر بازده ترموسیفون بررسی کرد [۱۰]. در همین سال *Devatta* نیز نتیجه‌هایی را برای مس اکسید، آلومینیوم اکسید، سیلیکون اکسید و سیال‌های آب و اتیلن گلیکول ارائه داد. به عقیده وی سیال‌ها با نانوذره‌های مس اکسید، افت فشار، ضریب انتقال گرما و گرانبوی بیشتری در مقایسه با سایر نانوسیال‌ها دارند [۱۱]. *Jia Qu* تأثیر درصد پرشدن، غلظت و توان ورودی را با استفاده از نانو سیال آب - آلومینیوم اکسید بر مقاومت گرمایی یک لوله گرمایی نوسانی (Oscillating Heat Pipe) بررسی کرد که نتیجه‌های وی نشان داد غلظت ۰/۹٪ جرمی و توان ورودی ۵۸/۷ W و همچنین درصد پر شدن ۷۰٪ شرایط بهینه بوده که بیشترین میزان کاهش مقاومت گرمایی ۳۲/۵٪ است [۱۲]. *Weerpun* در دو مقاله، تأثیر استفاده از نانوسیال آب - تیتانیوم اکسید را در یک مبدل گرمایی دولوله‌ای افقی با جریان متقاطع بررسی کرد. نتیجه‌های وی نشان داد که ضریب انتقال گرما در جا به جایی اجباری ۶-۱۱٪ نسبت به سیال پایه بهتر بوده در حالی که این ضریب در جریان درهم در غلظت ۱٪ حدود ۲۶٪ افزایش دارد اما در غلظت ۲٪ حدود ۱۴٪ کاهش دارد [۱۳-۱۴]. *Wenhuae* نیز میزان افزایش ضریب انتقال گرما در جریان درهم را با استفاده از نانو سیال آب - سیلیکون کاربید، ۵۰-۶۰٪ در رینولدز ثابت گزارش نمود [۱۵]. شیب لوله گرمایی، درصد وزنی نانوذرات و درصد پرشدن پارامترهایی بودند که *Tune* در آزمایش‌های خود با نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم بررسی کرد. وی شرایط بهینه را غلظت ۱٪، شیب ۶۰° و درصد پرشدن ۶۰٪ گزارش کرد و افزایشی معادل ۱۶/۸٪ در عملکرد گرمایی دید [۱۶]. نتیجه‌های *Lui* افزایش ۶۰-۱۰۰٪ در ضریب انتقال گرما تبخیرکننده و چگالنده و همچنین شیب ۷۵° را برای همان نانوسیال در یک لوله گرمایی شیاردار^(۱) نشان داد [۱۷]. این یافته‌ها با مقاله مرجع [۹] که شیب ۶۰° را برای آب گزارش کرده قابل مقایسه است. همگن کردن و پخش کردن نانوذره‌ها در سیال پایه نیز از جمله پارامترهای مهم در عملکرد گرمایی لوله‌های گرمایی می‌باشند [۱۹، ۱۸]. می‌توان گفت که در بیشتر مواقع نانو ذره‌ها باعث افزایش بازده لوله‌های گرمایی گوناگون می‌شوند

یک لوله گرمایی از بخش‌های تبخیر کننده، آدیاباتیک و چگالنده تشکیل شده که به دلیل خلأ نسبی فضای داخلی آن، سیال مورد استفاده با انرژی بسیار کمی تبخیر شده و به قسمت چگالنده هدایت می‌شود، در این بخش بخار، گرمای نهان خود را از دست داده و با نیروی گرانش به بخش تبخیرکننده باز می‌گردد و این چرخه دوباره تکرار می‌شود. در میان نوع‌های گوناگون لوله‌های گرمایی، ترموسیفون (لوله گرمایی بدون فتیله) به دلیل ساختار ساده و مقاومت گرمایی کم از کاربرد بیشتری در صنایع گوناگون از جمله مبدل‌های گرمایی (پیش‌گرمکن‌های هوا، سامانه‌های بازیابی انرژی اتلافی)، خنک کردن تجهیزات الکترونیکی، سامانه‌های تبدیل انرژی خورشیدی، خنک کردن توربین‌های گازی و... برخوردار است [۲۴-۴]. بیشتر استفاده از لوله‌های گرمایی در حالت عمودی و مورب است و نتیجه‌های آزمایش‌ها نشان داده که می‌توانند تا ۱۰۰۰ برابر در انتقال انرژی مؤثر باشند [۵]. ورود فناوری نانو و استفاده از نانو سیال‌های گوناگون در بهبود بازده گرمایی لوله‌های گرمایی تأثیر به‌سزایی داشته‌اند. نانوسیال به نوعی ویژه‌ای از سیال گفته می‌شود که شامل ذره‌های پایدار فلزی یا غیر فلزی با قطر کمتر از ۱۰۰nm بوده و به صورت همگن و پایدار در سیال پایه پخش شده‌اند. مس اکسید، آلومینیوم اکسید، آهن اکسید و تیتانیوم اکسید از جمله پرکاربردترین نانوذره‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها هستند که با توجه به بالاتر بودن ضریب هدایت گرمایی آنها نسبت به سیال‌های پایه‌ای چون آب، اتانول، اتیلن گلیکول و...، افزایش سطح انتقال گرما و درهمی سیال در افزایش بازده گرمایی لوله گرمایی مؤثر واقع می‌شوند [۶]. *Mawel* در حدود ۱۰۰ سال پیش نظریه هدایت گرمایی سوسپانسیون‌های دارای ذره‌های جامد را مطرح کرد [۷]، اما *Choi* در سال ۱۹۹۵ میلادی برای نخستین بار سوسپانسیون پودرهای نانو در سیال‌ها را نانو سیال نامید [۸]. پس از آن دانشمندان به شیوه‌های گوناگون سعی در بهینه‌سازی و افزایش بازده لوله‌های گرمایی داشتند و پژوهش‌های آنها شکل گسترده‌ای به خود گرفت. *Naphon* در سال ۲۰۰۸ میلادی تأثیر پارامترهای درصد پرشدن و زاویه شیب را بر عملکرد گرمایی ترموسیفون با استفاده از نانو ذره‌های تیتانیوم و سیال پایه آب و الکل بررسی کرد. نتیجه‌های وی نشان داد، زاویه شیب بیش از ۶۰° برای آب و بیش از ۴۵° برای الکل نتیجه وارون روی عملکرد ترموسیفون دارد. وی همچنین شرایط بهینه را در درصد پرشدن ۶۶٪ و غلظت جرمی

(۱) Miniature grooved heat pipe

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی نانوذره‌های اکسید مس.

نانوذره	اندازه ذره‌ها (nm)	دانسیته ظاهری (kg/m^3)	دانسیته واقعی (kg/m^3)	C_p (J/kg.K)	k_s (W/m.K)
CuO	۶۹	۵۳۵٫۶	۶۳۵۰	۷۹۰	۵۰-۶۰

است در تهیه نانو سیال از هیچ گونه ماده تثبیت کننده یا پایدار کننده‌ای به منظور حفظ ویژگی‌های شیمیایی و گرمایی نانوسیال استفاده نشده است.

برای جلوگیری از اتلاف استون در هنگام کار با دستگاه اولتراسونیک از یک پوشش پلاستیکی به عنوان درپوش و حمام آب و یخ استفاده شد. سرانجام نانوسیال در غلظت‌های ۰٫۵، ۱، ۲ و ۳٪ جرمی تهیه شد. شمای دستگاه مورد آزمایش در شکل ۱ آمده است. از آب به عنوان سیال خنک کننده در جدار خارجی چگالنده، گرم کن برقی از جنس نیکل - کروم با توان نامی ۱۰۰۰W در اطراف تبخیرکننده و یک آمپرتر و ولت متر برای اندازه‌گیری توان ورودی استفاده شد.

شرح دستگاه

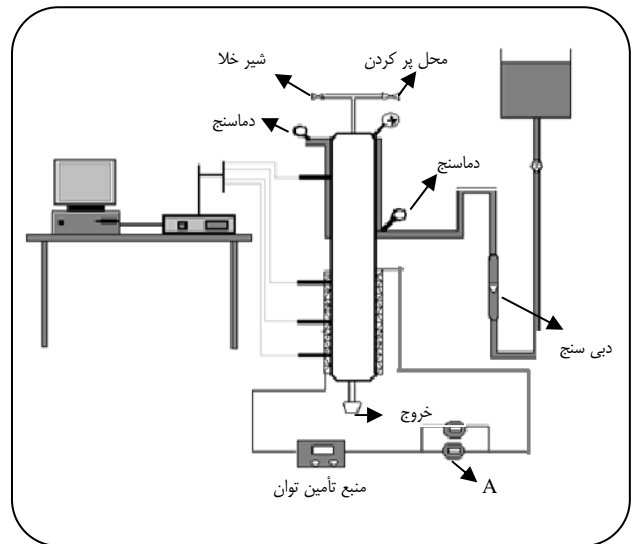
ترموسیفون دوفازی بسته مورد استفاده در این آزمایش از یک لوله اصلی از جنس مس با قطر داخلی ۱٫۶mm، ضخامت ۲mm و طول ۴۱۰mm تشکیل شده است که ارتفاع بخش‌های تبخیرکننده و چگالنده به ترتیب ۱۶۰mm و ۱۵۰mm می‌باشد. دمای قسمت‌های مختلف آن با ۴ ترموکوپل نوع (LM35) اندازه‌گیری می‌شود، این دماسنج‌ها بر روی تبخیرکننده و چگالنده تعبیه شده‌اند. همچنین دمای ورودی و خروجی آب نیز به منظور کاهش خطا با یک ترمومتر دیجیتالی با دقت 0.1°C قرائت شد. به منظور جلوگیری از اتلاف گرمای سطح خارجی ترموسیفون با مواد عایق به ضخامت ۲۰mm به خوبی پوشانده شد. کلیه دستگاه‌های الکتریکی و الکترونیکی نیز قبل از انجام آزمایش‌ها کالیبره شده بودند. شکل ۲ چگونگی قرارگیری و مکان دماسنج‌ها را نشان می‌دهد. توان ورودی به بخش تبخیرکننده را می‌توان با استفاده از آمپرتر و ولت متر موجود در مدار محاسبه کرد:

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

کل اتلاف گرمایی نیز مطابق معادله زیر می‌باشد:

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

با اندازه‌گیری دمای سطح خارجی عایق و محاسبه انتقال گرما جابه‌جایی آزاد و همچنین انتقال گرما تابشی که



شکل ۱- شمای دستگاه آزمایش.

اما در برخی پژوهش‌ها با سیال‌های پایه ویژه این نتیجه روندی وارونه معکوس دارد برای مثال *Khandekar* نشان داد مقاومت گرمایی ترموسیفون در صورت استفاده از نانوسیال گوناگون (آب - مس اکسید، آلومینیوم اکسید) افزایش می‌یابد [۲۰].

در این پژوهش، نانوسیال با سیال آبی در یک ترموسیفون دوفازی بسته مورد استفاده قرار گرفت. از سیال‌های پایه متداول مانند آب و اتیلن گلیکول استفاده نشد و از آنجا که در آزمایش‌های پیشین نتیجه‌های قابل قبولی در افزایش بازده ترموسیفون در مبدل‌های گرمایی در سامانه‌های تهویه مطبوع برای سیال استون به دست آمد [۲۱]، استون به عنوان سیال پایه جدید استفاده و عملکرد آن در دماهای پایین بررسی شد.

بخش تجربی

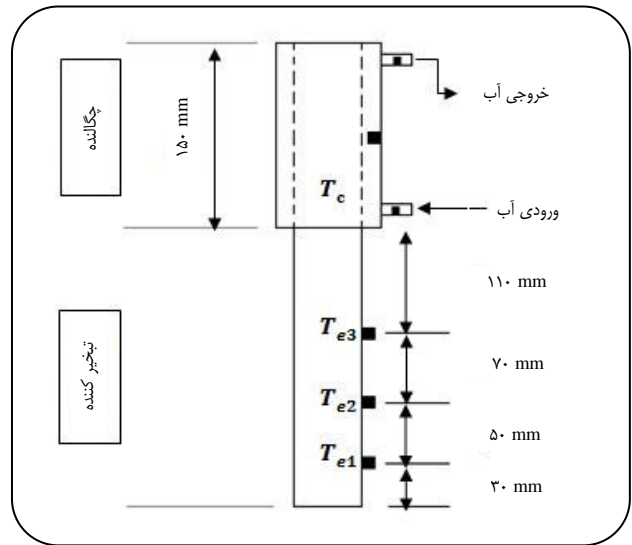
مواد

نانوذره‌های مس اکسید با ویژگی‌های فیزیکی مشخص در جدول ۱ در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای آماده‌سازی سوسپانسیون نانوسیال ابتدا محلول به وسیله یک همزن مکانیکی مخلوط شد، سپس از دستگاه فراصوت ساخت شرکت *Helscher* مدل UP-200S برای همگن کردن محلول استفاده شد. شایان گفتن

نتیجه‌ها و بحث

در این مطالعه به بررسی تأثیر غلظت جرمی نانوذرها، توان ورودی و مقاومت گرمایی بر عملکرد گرمایی ترموسیفون پرداخته می‌شود. همچنین در یک غلظت خاص تأثیر درصد پرشدن بر بازده گرمایی ترموسیفون نیز بررسی می‌شود. قبل از شروع هر آزمایش داخل لوله اصلی ترموسیفون به خوبی با آب مقطر و سیال پایه شست و شو داده می‌شود تا هر گونه آثار به جا مانده از نانوذرها مرحله قبل از بین برود. آزمایش‌ها برای توان‌های گوناگون $98-429 \text{ W}$ و غلظت‌های جرمی $0.5-3\%$ با درصد‌های پرشدن 60% و 35% و شدت جریان آب 500 mL/min انجام شد. هنگامی که ترموسیفون با استفاده از نانوسیال (استون - مس اکسید) پر می‌شود، برخلاف روند معمول، بازده ترموسیفون کاهش می‌یابد و تنها در غلظت 1% روند افزایشی دیده می‌شود که می‌تواند به علت افزایش زیاد ویسکوزیته، کلوخه شدن و همگن نشدن محلول نانو سیال و بالا بودن فشار بخار استون باشد. با این حال با افزایش توان ورودی به دلیل افزایش نیروی محرکه (اختلاف دما) بازده ترموسیفون افزایش می‌یابد، برای مثال در غلظت 2% وقتی توان ورودی از 98 W تا 429 W افزایش می‌یابد بازده از 0.5 تا 0.77 رشد می‌کند. همچنین در توان‌های بالا میزان رشد بازده بیشتر است. برای مثال در نسبت پرشدن 60% وقتی توان ورودی از 98 W تا 254 W افزایش می‌یابد بازده 6% بهبود می‌یابد اما با افزایش توان از 254 W تا 429 W بهبود بازده 10.1% است. با توجه به نتیجه‌ها، دیده شد که تنها در غلظت 1% بهبود بازده وجود دارد و مقدار بهینه آن در توان 254 W حدود 9.2% می‌باشد. این بهبود بازده در سایر توان‌ها به طور متوسط 5% است. شکل ۳ روند تغییر بازده را با توان ورودی و غلظت نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که دلیل این کاهش بازده و افزایش مقاومت ترموسیفون، افزایش نانوذرها نسبت به استون خالص، افزایش ویسکوزیته نانوسیال و برهم کش و احاطه مولکول‌های سیال توسط نانوذرها بوده که توسط افزایش سطح و ضریب هدایت ذره‌های جامد جبران نشده است.

نانوسیال استون - مس اکسید و توان‌های ورودی گوناگون در نسبت پر شدن 60% را نشان می‌دهد. با افزایش توان ورودی، در توان‌های ورودی پایین، میزان مقاومت گرمایی سامانه کاهش پیدا می‌کند و در توان‌های بالا مقاومت گرمایی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در غلظت 1% وقتی توان ورودی از 98 W تا 254 W افزایش می‌یابد مقاومت گرمایی از 0.116 تا 0.111 کاهش می‌یابد



شکل ۲- مکان دماسنج‌ها بر ترموسیفون.

در دماهای پایین بسیار ناچیز است دیده شد که کل گرمای اتلافی به تقریب معادل 0.1% از توان ورودی به بخش تبخیر کننده است. بنابراین در اینجا از گرمای اتلافی صرف نظر می‌شود. آهنگ انتقال گرما به سیال خنک کننده (آب) با اندازه گیری دمای ورودی و خروجی آن محاسبه می‌شود:

$$Q_{out} = \dot{m} C_p (T_{wout} - T_{win}) \quad (3)$$

سرانجام بازده ترموسیفون دوفازی بسته به صورت نسبت گرمای خروجی از چگالنده به گرمای ورودی ناشی از المنت الکتریکی اطراف تبخیر کننده تعریف می‌شود:

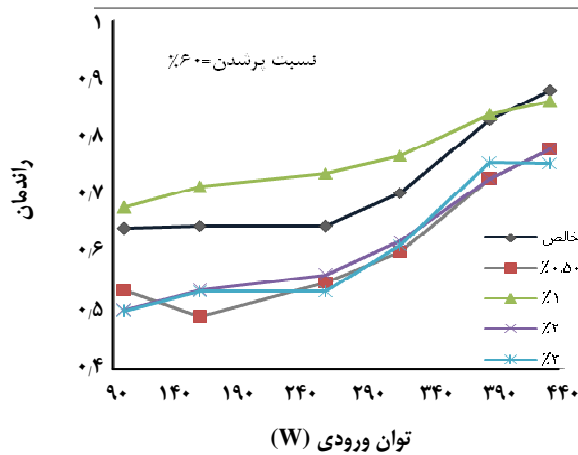
$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (4)$$

همچنین مقاومت گرمایی ترموسیفون به صورت معادله زیر می‌باشد:

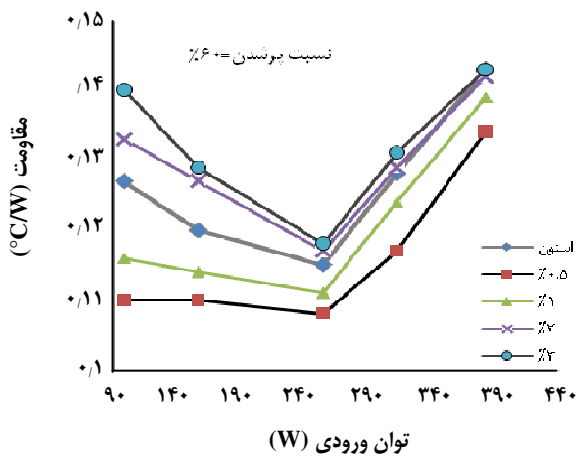
$$R = \frac{(T_{ave,s} - T_{ave,c})}{Q_{in}} \quad (5)$$

$$E_{\eta} = \frac{(\eta_{max} - \eta_{min})}{\eta_{max}} * 100 \quad (6)$$

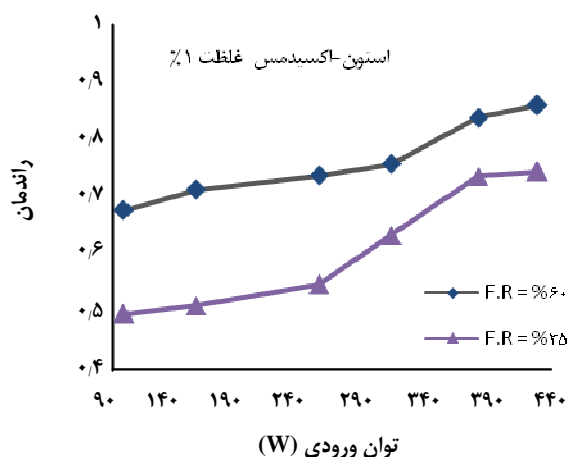
به منظور کاهش خطاهای آزمایش شامل خطاهای فردی (قرائت دماسنج‌ها، ریختن محلول به داخل ترموسیفون، تهیه محلول و...) و خطای دستگاه‌های مورد استفاده (دماسنج، آمپر متر و ولت‌متر) هر آزمایش دوبار تکرار شد و در صورتی که درصد خطا مطابق معادله (۶) بیش از مقدار قابل قبول بود، آزمایش‌ها برای بار سوم انجام می‌شد.



شکل ۳- اثر غلظت نانوسیال بر بازده ترموسیفون در توان‌های گوناگون.



شکل ۴- اثر غلظت نانوسیال بر مقاومت گرمایی ترموسیفون در توان‌های ورودی گوناگون.



شکل ۵- تأثیر درصد پرشدن بر بازده ترموسیفون در توان‌های گوناگون.

اما وقتی توان ورودی از ۲۵۴W تا ۴۲۹W افزایش می‌یابد مقاومت گرمایی از ۰/۱۱۱ تا ۰/۱۳۹ افزایش می‌یابد. از طرفی شیب کاهش مقاومت در توان‌های ورودی پایین، با افزایش غلظت نانوسیال بیشتر می‌شود. بیشترین کاهش مقاومت نیز نسبت به استون خالص در غلظت ۰/۵٪ و توان ۹۸W به میزان ۱/۷٪ است. در غلظت‌های ۰/۵ و ۱٪ مقاومت گرمایی نسبت به سیال پایه (استون) کاهش می‌یابد اما در غلظت‌های ۲ و ۳٪ افزایش مقاومت دیده می‌شود و این بدان معنی است که با افزایش غلظت نانوسیال مقاومت گرمایی ترموسیفون افزایش می‌یابد.

نتیجه‌های دیده شده در شکل ۴ نیز در اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از دمای نقاط گوناگون ترموسیفون تأیید می‌شود. در جدول ۲ دیده می‌شود در غلظت ۰/۵ و ۱٪ با توجه به افزایش بازده اختلاف دمای کمتری بین تبخیرکننده و چگالنده ترموسیفون نسبت به استون خالص و سایر غلظت‌ها به دست آمده است.

در شکل ۵ تأثیر درصد پرشدن را بر بازده ترموسیفون در غلظت ۱٪ دیده می‌شود. با توجه به نتیجه‌ها، درصد پر شدن ۶۰٪ عملکرد بهتری را نشان می‌دهد و در هر دو نسبت بازده با افزایش توان ورودی روند افزایشی دارد. همچنین در توان‌های ورودی پایین اختلاف بازده گرمایی بین دو نسبت پر شدن بیشتر است به عنوان مثال در توان ورودی ۹۸W اختلاف بازده ۰/۱۸ است اما در توان ۴۲۹W این اختلاف به ۰/۱۲ می‌رسد.

نتیجه‌گیری

نانو سیال‌ها محیط‌های جدیدی برای انتقال گرما هستند که می‌توانند باعث افزایش انتقال گرما شوند. در این پژوهش با استفاده از نانو سیال مس اکسید - استون به بررسی ویژگی‌های گرمایی یک ترموسیفون دو فاز بسته پرداخته شد که چکیده نتیجه‌های آزمایشگاهی به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- نانو ذره‌ها تأثیر چندانی بر سیال استون ندارند و به جز در یک غلظت خاص موجب کاهش بازده ترموسیفون می‌شوند.
- ۲- در غلظت ۱٪ و در توان ۲۵۴W بیشترین بهبود بازده به میزان ۹/۲٪ دیده شد که این میزان برای سایر توان‌ها به طور متوسط ۵٪ می‌باشد. با افزایش توان ورودی بازده ترموسیفون افزایش می‌یابد که این افزایش در توان‌های بالا بیشتر از توان‌های پایین است.

جدول ۲- اختلاف دمای سطح تبخیر کننده و چگالنده در توان ۲۵۴ W.

غلظت نانوذرات	استون خالص	۰٫۵٪	۱٪	۲٪	۳٪
$\bar{T}_{\text{evap}} (^{\circ}\text{C})$	۵۳٫۹	۵۳٫۳	۵۰٫۷	۵۶٫۰	۵۶٫۶
$T_{\text{con}} (^{\circ}\text{C})$	۲۴٫۷	۲۵٫۹	۲۳٫۶	۲۶٫۵	۲۶٫۷
ΔT	۲۹٫۲	۲۷٫۴	۲۷٫۱	۲۹٫۵	۲۹٫۹

Q_{loss}	گرمای اتلافی از ترموسیفون	۳- نسبت پرشدن ۶۰٪ در تمامی توان‌ها نتیجه‌های بهتری نسبت به ۳۵٪ در غلظت ۱٪ نشان می‌دهد.
Q_{rad}	گرمای تابشی	۴- مقاومت گرمایی ترموسیفون در توانهای پایین کاهش و در توانهای بالا افزایش می‌یابد همچنین در غلظت‌های ۰٫۵ و ۱٪ کاهش مقاومت گرمایی و در غلظت‌های ۲ و ۳٪ افزایش مقاومت گرمایی دیده شد. بنابراین با افزایش غلظت مقاومت گرمایی ترموسیفون افزایش و بازده کاهش می‌یابد.
R	مقاومت گرمایی ترموسیفون	به طور کلی باید گفت با توجه به احاطه و ایجاد پیوند بین نانوذره‌های مس اکسید و مولکول‌های استون، مقاومت گرمایی افزایش و سرانجام نانو ذره‌ها منجر به کاهش عملکرد گرمایی ترموسیفون می‌شوند.
$T_{\text{ave.e}}$	دمای متوسط قسمت تبخیر کننده	
$T_{\text{ave.c}}$	دمای متوسط قسمت چگالنده	
T_{win}	دمای آب ورودی	
T_{wout}	دمای آب خروجی	
V	ولتاژ ورودی به المنت اطراف ترموسیفون	
η	راندمان ترموسیفون	
η_{max}	بیشترین بازده به دست آمده	
η_{min}	کمترین بازده به دست آمده	

فهرست نمادها

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه آب
$C_{p,n}$	ظرفیت گرمایی ویژه نانو ذرات
E_{η}	خطای مربوط به بازده
I	آمپر ورودی به المنت اطراف ترموسیفون
\dot{m}	شدت جریان آب چگالنده
Q_{conv}	گرمای جابه‌جایی
Q_{in}	گرمای داده شده به ترموسیفون

قدردانی

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد در قالب طرح پژوهشی به شماره‌ی ۲/۱۱۳۱۰ مصوب ۸۸/۱۰/۲۷ تقدیر و تشکر می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۶/۲۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۳/۱۳

مراجع

- [۱] جعفری نصر، محمدرضا؛ سعیدان، مهسا؛ طراحی بهینه و مدل سازی مبدل های حرارتی قاب و صفحه‌ای، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۲۷، ص. ۷۹ (۱۳۸۷)
- [2] Gauglar R.S., Heat Transfer Device, *US Patent 2350348*, (1994).
- [3] Xiang-Qi Wang, Arun S. Mujumdar, Heat Transfer Characteristics of Nanofluids, A Review, *International Journal of Thermal Sciences*, **46**, p. 1, (2007).
- [4] Noie S.H., Heat Transfer Characteristics of A Two-Phase Closed Thermosyphon, *Applied Thermal Engineering*, **25**, p. 495 (2005).

- [5] Frank Mucciardi, Zhongsen Yuan, Chunhui Zhang, "The Heat Pipe as a Sensor for Temperature Level and Flow", Process Sensors Symposium of AISE, Canada (2001).
- [6] Yimin Xuan, Qiang Li, Heat Transfer Enhancement of Nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **21**, p. 58 (2000).
- [7] Maxwell J.C., "A Treatise on Electricity and Magnetism", Second Edition, Clarendon Press, Oxford, UK (1881).
- [8] Choi S.U.S., Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, FED **231/MD 66**, p. 99 (1995).
- [9] Paisarn Naphon, Pichai Assadamongkol, Teerapong Borirak Experimental Investigation of Titanium Nanofluids on the Heat Pipe Thermal Efficiency, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **35**, p. 1316 (2008).
- [10] Noie S.H., Zeinali Heris S., Kahani M., Nowee S.M., Heat Transfer Enhancement Using Al₂O₃/Water Nanofluid in a Two-Phase Closed Thermosyphon, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **30**, p. 700 (2009).
- [11] Devdatta P. Kulkarni, Debendra K. Das, Ravikanth S. Vajjha, Application of Nanofluids in Heating Buildings and Reducing Pollution, *Applied Energy*, **86**, p. 2566 (2009).
- [12] Jian Qu, Hui-ying Wu, Ping Cheng, Thermal Performance of an Oscillating Heat Pipe with Al₂O₃-Water Nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **37**, p. 111 (2010).
- [13] Weerapun Duangthongsuk, Somchai Wongwises, Heat Transfer Enhancement and Pressure Drop Characteristics of TiO₂-Water Nanofluid in a Double-Tube Counter Flow Heat Exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**, p. 2059 (2009).
- [14] Weerapun Duangthongsuk, Somchai Wongwises, An Experimental Study on the Heat Transfer Performance and Pressure Drop of TiO₂-Water Nanofluids Flowing Under A Turbulent Flow Regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **53**, p. 334 (2010).
- [15] Wenhua Yu a, David M. France, David S. Smith, Dileep Singh, Elena V. Timofeeva, Jules L. Routbort, Heat Transfer to a Silicon Carbide/Water Nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**, p. 3606 (2009).
- [16] Tun-Ping Tenga, How-Gao Hsua, Huai-En Mob, Chien-Chih Chenc, Thermal Efficiency of Heat Pipe with Alumina Nanofluid, *Journal of Alloys and Compounds*, **504S**, p. 5380 (2010).
- [17] Zhen-Hua Liu, Yuan-Yang Li, Ran Bao, Thermal Performance of Inclined Grooved Heat Pipes Using Nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, **49**, p. 1680 (2010).
- [18] Samal S., Satpati B., Chaira D., Production and Dispersion Stability of Ultrafine Al-Cu Alloy Powder in Base Fluid, *Journal of Alloys and Compounds*, **504S**, p. 5389 (2010).
- [19] Chung S.J., Leonard J.P., Nettleship I., Lee J.K., Soong Y., Martello D.V., Chyu M.K., Characterization of ZnO Nanoparticle Suspension in Water, Effectiveness of Ultrasonic Dispersion, *Powder Technology*, **194**, p. 75 (2009).

- [20] Khandekar S., Joshi Y., Mehta B., Thermal Performance of Closed Two-Phase Thermosyphon Using Nanofluids, *International Journal of Thermal Science*, **47**, p. 659 (2007).
- [21] Abrishamchi I., Nowee S. M., Rezazadeh R., Noie S.H., Effect of Working Fluid on the Performance of Thermosyphon Heat Exchangers in Series Used in An Air Conditioning System, "Proceedings of International Conference on Chemical Engineering and Applications", Singapore (2010).
- [۲۲] سرمستی امامی، محمدرضا؛ نوعی باغبان، سید حسین؛ خشنودی، محمد؛ اثر نسبت ابعاد و نسبت پر شدن بر عملکرد گرمایی یک ترموسیفون دوفازی بسته شیبدار، *مجله ایرانی علوم و تکنولوژی*، **۳۲** (ب - ۱)، ص. ۳۹ (۱۳۸۷).
- [۲۳] غلامی بناد کوکی، محمد مهدی؛ بررسی اثر زاویه شیب بر عملکرد لوله گرمایی، *نشریه امیرکبیر*، **۱۴** (ب - ۵۴)، ص. ۴۱۴ (۱۳۸۲).
- [۲۴] کاهانی، مصطفی؛ نوعی باغبان، سیدحسین؛ زینالی هریس، سعید؛ مقایسه عملکرد حرارتی یک ترموسیفون دوفازی بسته در اثر استفاده از نانوسیال های اکسیدفلزی، *جداسازی و پدیده‌های انتقال (دانشکده مهندسی)*، **۲۱**، ص. ۴۳ (۱۳۸۹).