

بررسی تجربی عملکرد نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره در آبگرم کن خورشیدی صفحه تخت تحت جریان طبیعی و اجباری

کوروش حسن زاده^{۱*}، امید خسروداد^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پردیس، شهر جدید پردیس، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پردیس، شهر جدید پردیس، ایران

* تهران، صندوق پستی ۴۵۹۷۸-۹۴۴۱۸، kourosh_hasanzadeh68@yahoo.com

چکیده

امروزه آبگرم کن‌های خورشیدی صفحه تخت به‌طور گسترده‌ای جهت گرمایش آب در دماهای پایین برای کاربردهای مسکونی مورد استفاده قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره جهت استفاده در آبگرم کن خورشیدی در کسر حجمی ۰/۰۵٪ تهیه شده و خواص حرارتی این نانوسیال به طور آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده است. جهت پایدارسازی نانوسیال مورد استفاده از سورفکتانت سدیم دودسیل سولفات استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیال تاثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد آبگرم کن خورشیدی صفحه تخت داشته و همچنین افزایش کارایی سیستم در جریان طبیعی بیشتر از جریان اجباری می‌باشد.

کلیدواژگان

آبگرم کن خورشیدی، کلکتور صفحه تخت، نانوسیال، نانوذرات نانولوله کربنی چند جداره، کسر حجمی

An Experimental Investigation on performance of MWCNT-water nanofluid in a flat plate solar water heater under natural and forced circulations

Kourosh Hasanzade^{1*}, Amid khosrowdad²

1- Master student, Department of mechanical engineering, Islamic Azad University, Pardis branch, Pardis, Iran

2- Associate professor, Department of mechanical engineering, Islamic Azad University, Pardis branch, Pardis, Iran

*Tehran, P.O.B 94418-45978; kourosh_hasanzadeh68@yahoo.com

Abstract

Nowadays, in order to heating water in low-temperature residential applications, flat plate solar water heater is widely used. In this paper, we aim to discuss the thermal performance of MWCNT-water nanofluid in a flat plate solar water heater. The nanofluid has been prepared in solid volume fraction of 0.05% and its thermal performance has been experimentally investigated. In order to make a dispersed and stable nanofluid, Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate surfactant has been used. The results showed that using the nanofluid has a considerable effect on improvement of the performance of the flat plate solar water heater. Furthermore, the increase of the system's performance under natural circulation is much higher than that of forced circulation.

Keywords

Solar water heater, Flat plate collector, Nanofluid, MWCNT Nano particles, Solid volume fraction

تاثیر استفاده از نانوسیالات در صنایع مختلف و کاربردهای خانگی به صورت آزمایشگاهی و تئوری مورد بررسی محققین در سراسر دنیا قرار گرفته است. کارایی حرارتی نانوسیالات به عوامل مختلفی از قبیل خواص ترموفیزیکی نانوذرات مانند قطر ذرات، شکل ذرات، ویسکوزیته، هدایت حرارتی و کسر حجمی نانوذرات بستگی دارد. تئوری‌های مختلفی جهت درک رفتار نانوسیالات در شرایط مختلفی از قبیل دما، میزان اسیدیته و کسر حجمی نانوذرات ارائه گردیده است. آنالیزهای حرارتی بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی بر پایه‌ی تاثیر اندازه ذرات [۱] و حرکت براونی گسترش یافته‌اند [۲]. همچنین روشی برای اندازه‌گیری ضریب انتشار حرارتی و هدایت حرارتی نانوسیالات بر پایه نوسانات دما ارائه گردیده است [۳]. در مطالعه‌ی تئوری کارایی نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در آبگرم کن خورشیدی و تاثیر اندازه ذرات و کسر حجمی مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. در یک مطالعه آزمایشگاهی که با استفاده از نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در کسر وزنی ۰/۰۲٪ انجام شده است ۳۰٪ افزایش کارایی حرارتی در آبگرم کن خورشیدی گزارش شده است [۵]. بر طبق مطالعات انجام شده بر روی خواص

۱- مقدمه

آبگرم کن‌های خورشیدی به‌طور گسترده‌ای برای تولید آب گرم در دمای پایین جهت کاربرد در بخش خانگی برای شستشوی لباس، ظروف و استحمام مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آبگرم کن خورشیدی صفحه تخت، سیستمی خورشیدی است که می‌تواند آب را در محدوده‌ی دمایی بین ۶۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد تولید کند. آبگرم کن‌های خورشیدی از مدل‌های مختلفی مانند حلقه بسته، دارای مبدل حرارتی و غیرمستقیم تشکیل شده‌اند. مدل‌های مذکور در جایی استفاده می‌شوند که مخلوط آب- اتیلن گلیکول به سیستم اضافه شده و از یخ زدن لوله‌های مسی در اقلیم‌های سرد جلوگیری می‌کند. با توجه به هدایت حرارتی پایین آب در کارایی مبدل‌های حرارتی درجه حرارت بدست آمده از سیال ثانویه کاهش می‌یابد. به منظور افزایش دمای خروجی مورد استفاده و کارایی حرارتی، نانوذرات که دارای خواص حرارتی بسیار مطلوبی می‌باشند، به سیال پایه اضافه شده و نانوسیال را به وجود می‌آورد، بنابراین هدایت حرارتی موثر را افزایش می‌دهد.



شکل ۱ تصویر TEM نانوذرات نانولوله کربنی چند جداره

در شکل ۲ نیز تصاویر نانوسیالات تولید شده با استفاده از سورفکتانت و بدون استفاده از سورفکتانت نشان داده شده است. این تصاویر پس از گذشت مدت زمان ۷ روز گرفته شده و پایداری خوب نانوسیال با استفاده از سورفکتانت را نشان می‌دهد.



شکل ۲ تصویر پایداری نانوسیال با استفاده از سورفکتانت و بدون استفاده از سورفکتانت

در شکل ۳ نیز نانوسیال در طی فرآیند تولید نشان داده شده است.



شکل ۳ نانوسیال در طی فرآیند تولید

تصویری از نانوذرات نانولوله کربنی چند جداره نیز در شکل ۴ نشان داده شده است.

ترموفیزیکی نانوسیالات آب- اکسید آلومینیوم و آب- اکسید تیتانیوم نشان می‌دهد که استفاده از این نانوسیالات در کسرهای حجمی پایین کارایی بهتری دارد [۶، ۱۷]. در پژوهشی دیگر کارایی حرارتی نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم با جریان طبیعی در کسرهای حجمی ۰/۵٪ و ۳٪ مورد بررسی قرار گرفته شده است و متعاقباً کارایی حرارتی تا ۶۰٪ افزایش یافته است [۸، ۱۹].

همانطور که در پیشینه‌ی پژوهش بیان گردید، مطالعات بسیاری در زمینه‌ی آبگرم‌کن‌های خورشیدی انجام شده است. بیشتر پژوهش‌های انجام شده به گردش اجباری یا طبیعی سیال در سیکل اختصاص داده شده است. با این حال، پژوهشی مبنی بر مقایسه‌ی بین گردش اجباری و طبیعی در آبگرم-کن خورشیدی صفحه تخت صورت پذیرفته است از این رو در این پژوهش به بررسی جریان اجباری و طبیعی در آبگرم‌کن خورشیدی صفحه تخت پرداخته شده است. استفاده از نانوسیالات نیز در آبگرم‌کن خورشیدی صفحه تخت جنبه‌ای جدید در پژوهش‌های در حال انجام بر روی این سیستم‌ها می‌باشد. در بیشتر پژوهش‌های انجام شده بر پایه‌ی استفاده از نانوسیالات در آبگرم‌کن‌های خورشیدی، از نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم استفاده شده است. در این پژوهش به دلیل خواص حرارتی بسیار مطلوب نانولوله‌های کربنی چند جداره نسبت به نانوذرات مذکور، از نانوذرات نانولوله‌های کربنی در کسر حجمی ۰/۵٪ در سیال پایه آب استفاده شده است.

۲- آماده سازی نانوسیال

در تحقیق حاضر، نانوسیال آب-نانولوله کربنی چند جداره^۱، با استفاده از روش دو مرحله‌ای^۲ با استفاده از پایدارکننده سدیم دودسیل سولفات، به‌عنوان نمونه آزمایشگاهی تولید شد. در خلال مراحل تولید و به‌منظور توزیع کردن^۳ نانوذرات در کسرهای حجمی^۴ مختلف، از یک همزن مکانیکی^۵ استفاده شد. در مرحله بعدی، برای کسر حجمی مورد نظر مقداری معین از نانوذره نانولوله کربنی چند جداره به سیال پایه آب افزوده شد. همچنین به‌منظور مخلوط کردن نانوذرات در سیال پایه، از یک همزن مغناطیسی^۶ به مدت سه ساعت استفاده شد. در مرحله نهایی، از یک پردازشگر اوتراسونیک^۷، با قدرتی برابر با ۱۲۰۰ وات و فرکانس ۲۴ کیلوهرتز، به‌منظور از بین بردن پدیده کلوخه شدن^۸ بین نانوذرات و همچنین جلوگیری از مشکل ته‌نشین شدن به مدت سه ساعت استفاده شد. این روش باعث پایدار شدن نمونه برای مدت زمانی مطلوب (حدود ۷ روز) می‌شود و هیچگونه اثر ته‌نشین شدن با چشم غیر مسلح مشاهده نمی‌شود. به‌منظور اطمینان از شکل و میانگین اندازه قطر نانوذرات مورد مطالعه، تصویر TEM مربوط به نانوذرات نانولوله کربنی چند جداره، در شکل ۱، نشان داده شده است. همان‌گونه که در این تصویر مشخص است ذرات اندازه‌ای در حدود ۵۰ نانومتر دارند.

¹ MWCNT

² Tow-step Method

³ Disperse

⁴ Solid volume fraction

⁵ Mechanical mixture

⁶ Magnetic stirrer

⁷ Ultrasonic processor

⁸ Agglomeration

روش سیم داغ گذرا استفاده شده است. به منظور اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی از دستگاه (KD2 Pro) که در شکل ۵ نشان داده شده است، استفاده گردیده است.



شکل ۵ دستگاه اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی

۳-۴- ویسکوزیته دینامیکی

به منظور اندازه گیری ویسکوزیته دینامیکی از ویسکومتر بروکفیلد مدل DV1 Prime به همراه UL Adaptor جهت تنظیم دما استفاده شده است. دستگاه آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است. تغییرات ویسکوزیته نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره نیز در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶ دستگاه اندازه گیری ویسکوزیته دینامیکی



شکل ۴ نانوذرات نانولوله کربنی چند جداره

۳- آنالیز عدم قطعیت

کارایی آبگرم کن خورشیدی به طور مستقیم به عواملی مانند نرخ جریان عبوری و ظرفیت گرمایی ویژه سیال پایه، اختلاف دمای بین ورودی و خروجی، مساحت کلکتور و شدت تابش خورشید به کلکتور بستگی دارد. با فرض عدم قطعیت ناچیز در ظرفیت گرمایی ویژه و مساحت کلکتور خورشیدی، به طور کلی عدم قطعیت استفاده از آبگرم کن خورشیدی از رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$\eta_i = f(\dot{m}, G, \Delta T) \quad (1)$$

بنابراین رابطه عدم قطعیت کلی به صورت زیر بیان می گردد:

$$\left(\frac{U_{\eta_i}}{\eta_i}\right)^2 = \left(\frac{U_{\dot{m}}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{U_G}{G}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta T}}{\Delta T}\right)^2 \quad (2)$$

که U بیانگر عدم قطعیت و متغیرهایی مانند \dot{m} ، G و ΔT به ترتیب نرخ جرم عبوری آب (kg/s)، میزان ثابت خورشیدی جهانی بر روی کلکتور صفحه تخت (W/m²) و اختلاف دمای بین سیال ورودی و خروجی به کلکتور خورشیدی می باشد. میزان دقت دبی سنج، سنسور دما و تشعشع سنج خورشیدی به ترتیب $\pm 5\%$ ، $\pm 0.1^\circ\text{C}$ و $\pm 5\%$ می باشد. ماکزیمم عدم قطعیت برای دبی سنج، سنسور دما و تشعشع سنج خورشیدی به ترتیب 0.22%، 3.97% و 0.18% محاسبه گردیده است. بنابراین ماکزیمم عدم قطعیت برای سنسور دما محاسبه شده و 3.97% می باشد.

۴- نتایج و بحث

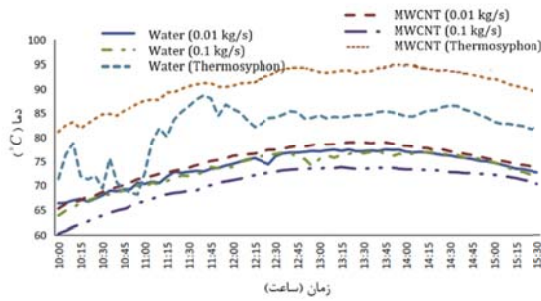
۴-۱- آزمایش خواص نانوسیال

روش های زیادی جهت اندازه گیری خواص نانوسیالات در دسترس می باشد، اما نتایج بدست آمده از این روش های مختلف یکسان نمی باشد. به این دلیل خواص ترموفیزیکی نانوسیال مورد استفاده در سیکل اندازه گیری و گزارش گردیده است.

۴-۲- روش سیم داغ گذرا

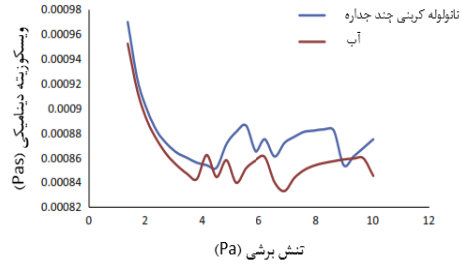
هدایت حرارتی به عنوان یکی از مهمترین خواص نانوسیالات می باشد. جهت اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیال مورد استفاده در سیکل، از

دمای لوله‌های مسی در قسمت ورودی سرد کلکتور کمترین مقدار خود می‌باشد. این امر به دلیل افزایش نرخ انتقال حرارت در بخش ورودی لوله‌ی بالا آورنده می‌باشد که به آرامی دما کاهش یافته و باعث کاهش اختلاف درجه حرارت بین سیال و لوله می‌شود. با عبور سیال از لوله‌های بالا آورنده دمای پره در اثر نیروی شناوری و کسب حرارت توسط کلکتور افزایش پیدا می‌کند. نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره با توجه به هدایت حرارتی بالاتر نسبت به آب، دستیابی با دماهای بالاتری را در مقایسه با آب خالص امکان پذیر می‌کند. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، بالاترین دما برای گردش طبیعی معادل ۹۴/۵ درجه سانتی‌گراد، و در گردش اجباری در نرخ جریان عبوری (kg/s) ۰/۱ معادل ۷۳/۸ درجه سانتی‌گراد برای نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره بدست آمده است. در گردش طبیعی میزان اختلاف دمای بین نانوسیال و آب زیاد می‌باشد در نتیجه دمای بیشتر نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره در مبدل حرارتی به آب انتقال می‌یابد.



شکل ۹ درجه حرارت جذب شده در کلکتور خورشیدی صفحه تخت

دمای آب در مخزن ذخیره سازی آب گرم به عواملی از قبیل کارایی مبدل حرارتی و دمای ورودی و خروجی سیال بستگی دارد. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، دمای آب ذخیره شده در مخزن ذخیره و در جریان طبیعی بواسطه‌ی نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره معادل ۹۱/۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد در حالیکه نانوسیال مورد استفاده در جریان اجباری و با نرخ جریان عبوری (kg/s) ۰/۱ توان حصول دمایی معادل ۶۶/۵ درجه سانتی‌گراد را خواهد داشت. در مقابل بالاترین میزان درجه حرارت با استفاده از آب در سیکل به جای نانوسیال، معادل ۸۴/۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که این میزان کمتر از دمای بدست آمده توسط نانوسیال می‌باشد. در گردش طبیعی نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره به آرامی حرارت را به مخزن ذخیره انتقال داده و دمای آب ذخیره شده در مخزن را افزایش می‌دهد. اما در جریان اجباری و نرخ جریان عبوری معادل (kg/s) ۰/۱ هر دو سیال مورد استفاده در سیکل حصول به دمای پایین‌تری را در مقایسه به جریان طبیعی امکان‌پذیر می‌کند، زیرا مدت زمان انتقال حرارت در مبدل حرارتی کاهش می‌یابد. استفاده از نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۰/۰۵٪ دمای آب ذخیره شده در مخزن ذخیره را به میزان ۸/۹٪ در جریان طبیعی افزایش می‌دهد.



شکل ۷ ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره و آب در تنش‌های برشی مختلف

۴-۴- تجزیه و تحلیل تجربی

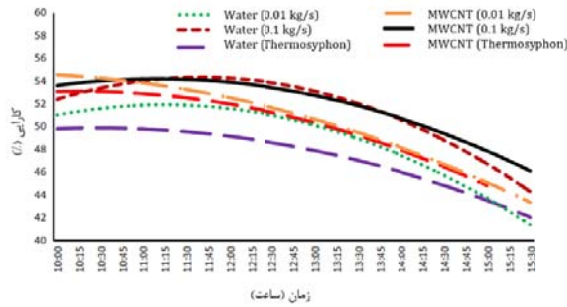
میزان کارایی آبگرم‌کن خورشیدی با استفاده از نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره در جریان طبیعی با عدد رایلی 10^5 ، میزان نرخ جریان عبوری (kg/s) ۰/۰۱، عدد رینولدز ۱۲۷۶ (جریان آرام) و برای جریان اجباری میزان نرخ جریان عبوری (kg/s) ۰/۱، عدد رینولدز ۱۲۷۶۴ مورد آزمون قرار گرفته و نتایج بدست آمده با آب مقایسه گردیده است.

۴-۴-۱- دستگاه آزمایش

آبگرم‌کن‌های خورشیدی از سه بخش اصلی تشکیل می‌شوند که شامل: کلکتور، مدار لوله کشی، مخزن ذخیره حرارتی می‌باشند. در آبگرم‌کن خورشیدی صفحه تخت مورد استفاده در این پژوهش سیال عامل نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره می‌باشد که در یک سیکل بسته بین مخزن و کلکتور توسط مدار لوله‌کشی در جریان است. کلکتور انرژی حرارتی خورشید را جذب کرده و به سیال عامل منتقل می‌کند. سیال گرم شده به سمت مخزن ذخیره حرکت کرده و در آنجا پس از عبور از یک مبدل حرارتی، گرمای خود را به آب داخل مخزن منتقل می‌کند و پس از سرد شدن به کلکتور باز می‌گردد و به این ترتیب بدون اینکه با آب مصرفی مخلوط شود، دائماً در یک سیکل بسته در حال حرکت است. در شکل ۸ آبگرم‌کن خورشیدی صفحه تخت نشان داده شده است.

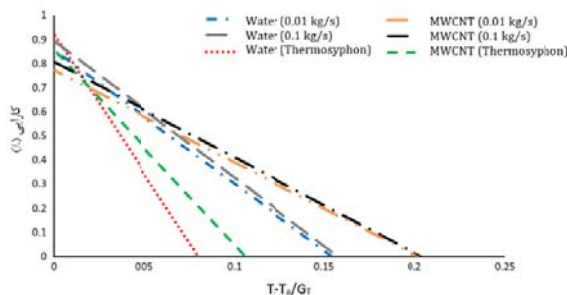


شکل ۸ آبگرم‌کن خورشیدی صفحه تخت



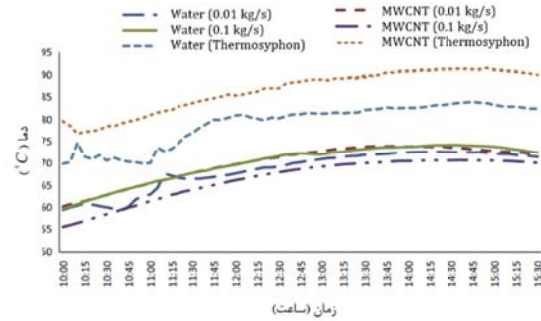
شکل ۱۲ کارایی کلکتور صفحه تخت

پایین‌ترین میزان کارایی نیز معادل ۵۲/۳۳٪ برای سیال آب و در جریان طبیعی بدست آمده است. افزایش کارایی حرارتی در جریان طبیعی، اجباری با نرخ‌های جریان عبوری ۰/۰۱ (kg/s) و ۰/۱ (kg/s) به ترتیب ۶/۳٪، ۲/۷٪ و ۰/۴٪ می‌باشد. واضح می‌باشد که افزایش در کارایی حرارتی با استفاده از نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره در جریان طبیعی و در مقایسه با جریان اجباری قابل توجه است. با افزایش سرعت عبوری جریان، بهبود کارایی در مقایسه با آب و در شرایط یکسان کاهش می‌یابد. با این حال، بالاترین کارایی حرارتی در بالاترین نرخ جریان بدست می‌آید زیرا عدد رینولدز بالا بوده و جریان مغشوش می‌باشد. اگرچه کارایی کلکتور خورشیدی در جریان مغشوش به دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت بالا می‌باشد، اما سهم نانوسیال در افزایش کارایی در جریان مغشوش و در مقایسه با جریان آرام کم می‌باشد. پس از گذشت مدت زمان دو روز در جریان طبیعی نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره کاهش کارایی را به همراه داشته است. دلیل این امر ته‌نشینی نانوسیال می‌باشد که در حالت سکون سیستم و در طول شب رخ می‌دهد. خط مستقیم در شکل ۱۳ با ترسیم $(T_i - T_a) / G_T$ در مقابل کارایی لحظه‌ای، کارایی کلکتور خورشیدی را نشان می‌دهد. شیب خط داده شده میزان انرژی تلف شده را نشان می‌دهد و تقاطع خط مستقیم با محور Y میزان انرژی جذب شده را نشان می‌دهد. کارایی نانوسیال در کسر حجمی پایین در مقایسه با نانوسیال با کسر حجمی بالا به دلیل پایداری نامناسب نانوسیال، بهتر می‌باشد. با توجه به شکل ۱۳ مشهود است در جریان طبیعی میزان کارایی حرارتی افزایش بیشتری نسبت به جریان اجباری دارا می‌باشد.



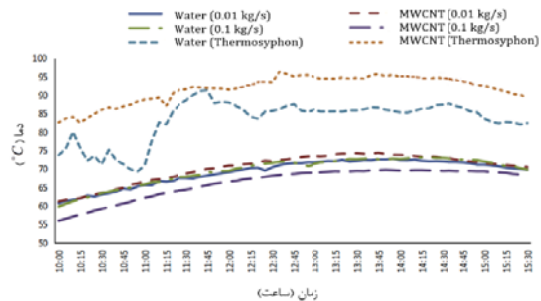
شکل ۱۳ نمودار خص مستقیم بین کارایی حرارتی و کاهش درجه حرارت

این مسئله بیانگر این مطلب است که افزایش در کارایی حرارتی نانوسیال با توجه به هدایت حرارتی بالاتر نانوذرات و حرکت براونی کمک به جذب بیشتر انرژی خورشیدی می‌کند.



شکل ۱۰ دمای مخزن ذخیره

دمای سیال خروجی از کلکتور خورشیدی به عواملی از قبیل نرخ جریان عبوری، میزان تابش خورشیدی و دمای محیط بستگی دارد. همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، بالاترین دمای خروجی معادل ۹۶/۳ درجه سانتی‌گراد در جریان طبیعی و کمترین دما معادل ۶۹/۸ درجه سانتی‌گراد در جریان اجباری و نرخ عبور جریان ۰/۱ (kg/s) با استفاده از نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره بدست آمده است. در جریان طبیعی به دلیل ضریب هدایت حرارتی بالا نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره حرارت بیشتری را جذب نموده و حصول به درجه حرارت بالاتری را در خروجی امکان‌پذیر می‌کند. اما در جریان اجباری به دلیل اینکه مدت زمان تماس نانوسیال در لوله بالا آورنده کوتاه می‌باشد، دستیابی به دمای بالاتر در مقایسه با جریان طبیعی امکان‌پذیر نمی‌باشد.



شکل ۱۱ دمای خروجی سیال از کلکتور صفحه تخت

۴-۴-۲- کارایی حرارتی

کارایی حرارتی کلکتور خورشیدی صفحه تخت با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\eta_i = Q_u / [A_c * I(t)] = I(t)(\tau\alpha) - U_t(T_p - T_a) \quad (3)$$

$$Q_u = \dot{m} * C_p * (T_o - T_i) \quad (4)$$

که در رابطه بالا A_c سطح کلکتور (m²)، $I(t)$ میزان تابش خورشیدی جهانی به کلکتور (w/m²)، $\tau\alpha$ ضریب انتقال، جذب، U_t میزان اتلاف حرارت از سطح بالا (w/m²k)، T_i دمای سیال ورودی (°C)، T_a درجه حرارت محیط می‌باشند. همان‌گونه که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، بالاترین میزان کارایی برای نانوسیال مورد استفاده در سیکل، ۵۴/۹۸٪ در نرخ جریان ۰/۱ (kg/s) بدست آمده است.

۵- نتیجه گیری

بسیاری از محققین در دهه‌های اخیر پژوهش‌های زیادی بر روی افزایش کارایی کلکتورهای خورشیدی انجام داده‌اند. اما هنوز کارایی کلکتورهای خورشیدی در مقایسه با سایر تکنولوژی‌ها به حد مطلوب خود نرسیده است. افزودن نانوذرات به سیالات انتقال دهنده‌ی حرارت منجر به افزایش قابل توجهی در کارایی حرارتی این دسته از سیالات گردیده است. در این پژوهش، نانوسیال آب- نانولوله کربنی چند جداره در کسر حجمی ۰/۰۵٪ کارایی حرارتی آبگرم‌کن خورشیدی را به میزان ۶/۳٪ افزایش داده است. همچنین در مقایسه از نظر نرخ جریان عبوری بیشترین افزایش در کارایی حرارتی را در جریان طبیعی شاهد می‌باشیم.

۶- مراجع

- [۱] R. Saidur, T. Meng, Z. Said, M. Hasanuzzaman, and A. Kamyar, "Evaluation of the effect of nanofluid-based absorbers on direct solar collector," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, pp. 5899-5907, 2012.
- [۲] J. Buongiorno, "Convective transport in nanofluids," *Journal of Heat Transfer*, vol. 128, pp. 240-250, 2006.
- [۳] S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids," *Journal of Heat Transfer*, vol. 125, pp. 5۶۰۳-۵۷۴-۶۷
- [۴] O. Mahian, A. Kianifar, A. Z. Sahin, and S. Wongwises, "Entropy generation during Al₂O₃/water nanofluid flow in a solar collector: Effects of tube roughness, nanoparticle size, and different thermophysical models," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 78, pp. 64-75, 2014.
- [۵] R. Gangadevi, S. Senthilraja, and S. A. IMAM, "EFFICIENCY ANALYSIS OF FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR USING Al₂O₃/WATER NANOFLUID," *image*, vol. 2, p. 3, 2013.
- [۶] Z. Said, R. Saidur, A. Hepbasli, and N. Rahim, "New thermophysical properties of water based TiO₂ nanofluid—The hysteresis phenomenon revisited," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 58, pp. 85-95, 2014.
- [۷] Z. Said, M. Sajid, M. Alim, R. Saidur, and N. Rahim, "Experimental investigation of the thermophysical properties of Al₂O₃-nanofluid and its effect on a flat plate solar collector," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 99-107, 2013.
- [۸] C. Ho, Y. Chung, and C.-M. Lai, "Thermal performance of Al₂O₃/water nanofluid in a natural circulation loop with a mini-channel heat sink and heat source," *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 848-858, 2014.
- [۹] M. Misale, F. Devia, and P. Garibaldi, "Experiments with Al₂O₃ nanofluid in a single-phase natural circulation mini-loop: Preliminary results," *Applied Thermal Engineering*, vol. 40, pp. 64-70, 2012.