



نهمین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران پنجمین همایش ملی فناوری‌های نوین انرژی

«گواهی ارائه مقاله»

گواهی می‌شود مقاله با عنوان:

مروری بر روش‌های بهبود عملکرد سیستم‌های PV/T با استفاده از نانو سیالات

نویسندگان: مجتبی ماموریان، علیرضا زمانی آقایی و محمد رضائیان شهری

در نهمین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران و پنجمین همایش ملی فناوری‌های نوین انرژی که از ۲ الی ۵ اسفند ۱۴۰۰ در دانشگاه سجاد مشهد برگزار شد، به صورت سخنرانی ارائه گردید. از خداوند منان موفقیت روزافزون ایشان را در پیشبرد امور علمی کشورمان خواهانیم.



دکتر ایمان احدی اخلاقی
دبیر علمی کنفرانس



دکتر محسن قاینی
دبیر کنفرانس



مروری بر روش‌های بهبود عملکرد سیستم‌های PV/T با استفاده از نانوسیالات

مجتبی ماموریان^۱، علیرضا زمانی آقایی^۲، محمد رضائیان شهری^۳

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه سجاد، مشهد، mamourian@um.ac.ir

^۲ عضو هیات علمی پاره وقت، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه سجاد، مشهد، ar.z.ghaie@gmail.com

^۳ دانشجوی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه سجاد، مشهد، mohammad.rezaeian.1375@gmail.com

چکیده

در این مقاله مروری به کارهای انجام شده توسط محققین در بهبود عملکرد سیستم فتوولتائیک حرارتی^۱ با خنک‌کاری نانوسیالات در مقایسه با خنک‌کاری توسط آب می‌پردازد. سیال پایه اکثر مقاله‌های مورد بررسی آب می‌باشد. روش کار سیستم PV/T به این صورت است که در داخل سیستم سیال خنک‌کاری زمانی که جریان می‌یابد و از لوله‌های خنک‌کننده در پشت صفحه جاذب عبور می‌کند و خنک‌کاری سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی انجام می‌شود و سیال خنک‌کاری خروجی از کلکتور با دمای بالا با عبور از مبدل حرارتی خنک‌شده و همین صورت سیال در سیستم در گردش است. سیستم با نانوسیالات عملکردی بهتری در مقایسه با آب داشت و عواملی از قبیل شرایط محیطی، نوع نانوسیال و خواص آن، دبی جریانی و غیره... در بهبود عملکرد نقش داشت. نانوسیالات^۲ مورد بررسی از قبیل Cu، CuO، Al₂O₃، Fe، SiC، TiO₂ و SiO₂ می‌باشد.

روش انجام تحقیقات در مقاله، مطالعه تعدادی مقالات منتشر شده در نشریه‌های بین‌المللی که در زمینه به کارگیری استفاده از نانوسیالات در بهبود عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی می‌باشد. استخراج اطلاعات از هر مقاله شامل روش انجام کار، اطلاعات پارامترهایی از مقاله، بررسی نتایج و داده‌های مقالات می‌باشد. اعتبارسنجی مقالات مورد بررسی با روش‌های تجربی و عددی انجام شده است.

واژه‌های کلیدی

فتوولتائیک حرارتی، نانوسیالات، مروری

مقدمه

بیش تر تابش‌های خورشیدی که بر روی یک پنل فتوولتائیک وارد می‌شوند به طور کامل توسط سلول‌های فتوولتائیک به برق تبدیل نمی‌شود، این بخش انرژی تبدیل نشده باعث می‌شود سلول‌های فتوولتائیک گرم شوند و دمای عملیاتی آن‌ها افزایش یابد. از آنجایی که سلول‌های فتوولتائیک نسبت به دما بسیار حساس هستند کارایی آن‌ها با افزایش دما کاهش می‌یابد. با

ترکیب پنل فتوولتائیک با یک کلکتور حرارتی صفحه تخت می‌توان یک کلکتور فتوولتائیک حرارتی (PV/T) ایجاد کرد. همچنین کارایی این کلکتورها با خنک‌کاری افزایش می‌یابد. تحقیقات در مورد سیستم‌های PV/T از سال ۱۹۷۰ میلادی شروع شده است و خنک‌کاری با هوا، آب و نانوسیالات برای بهبود عملکرد در این سیستم‌ها تا کنون انجام شده است و پیشرفت‌های بسیاری تاکنون توسط محققین پدید آمده است. [۶].

این سیستم‌ها توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است و همچنین عملکرد بهتر نانوسیالات مختلف نسبت آب به دلیل خواص ترمودینامیکی عالی آن‌ها در خنک‌کاری سیستم‌های PV/T مورد بررسی قرار گرفته است [۴].

بلوس^۳ و همکاران به مقایسه عملکرد سیستم‌های PV/T را با استفاده از خنک‌کاری نانوسیال Cu و آب پرداختند و آزمایش برای تمامی ماه‌های سال در آتن یونان انجام شده است [۱]. حل معادلات انتقال حرارت با استفاده از نرم افزار EES انجام شد. با انجام آزمایش متوجه شدند که بهترین اندازه مخزن ذخیره برای کلکتوری با مساحت ۲ مترمربع، ۱۵۰ لیتر است و دمای سیال خروجی سیستم ۳۱۵ K است همچنین حجم مخزن ذخیره بالاتر منجر کاهش دمای خروجی سیستم می‌شود که عملاً برای استفاده از آب گرم سیستم رضایت بخش نیست. همان طور از جدول ۱ مشاهده می‌شود در طول یکسال به ترتیب بازدهی (الکتریکی، گرمایی و کل) نانوسیال مس ۱۲/۶٪، ۴۳/۸٪ و ۵۶/۴٪ می‌باشد که در مقایسه با آب در (بازده الکتریکی، گرمایی و کل) به ترتیب ۰/۲٪، ۱/۸٪ و ۲٪ بهبود راندمان داشته است. همچنین استفاده از نانوسیالات در فتوولتائیک هیبریدی در مواردی ضروری است که هزینه انرژی حرارتی و الکتریکی بالا باشد و افزایش راندمان می‌تواند منجر به سود اقتصادی قابل توجهی شود.

¹ Photovoltaic Thermal

² Nanofluids

³ Bellos

جدول ۳: اثر تغییر غلظت نانوذرات بر گرمای ویژه ($J/kg \cdot ^\circ C$) نانوسیال به دست آمده از آزمایش.

Type	0.01wt.%	0.1wt.%	1wt.%
CNTs nanofluid	3752	3648	3635
Cu nanofluid	3820	3752	3660
Al ₂ O ₃ nanofluid	3934	3919	3862
Base fluid, DW	4200	4200	4200

کراسلن^۲ و همکاران شبیه سازی با نرم افزار تجاری فلوئنت را در سیستم های PV/T با خنک کاری مونو و نانوسیالات هیبریدی انجام دادند [۳]. سیالات به صورت هیبریدی CuO+Fe و CuO به صورت مجزا با سیال پایه آب مورد تحلیل قرار گرفت. سرعت ورود سیالات ($0.02-0.08 \text{ m/s}$) است و غلظت ۲٪ انتخاب شد. از نتایج دریافتند نانوسیالات هیبریدی در بازدهی گرمایی حدود ۲٪ و ۵/۴٪ نسبت نانوسیالات مونو و آب بهبود عملکرد داشتند. از شکل ۳ مشاهده می شود ماکزیمم راندمان الکتریکی^۳ برای سیالات آب، مس اکسید + آب و مس اکسید + آهن + آب در سرعت 0.08 m/s برابر با ۱۱/۳۶٪، ۱۱/۵۱٪ و ۱۱/۶۰٪ می باشد. از شکل ۴ مشاهده می شود ماکزیمم راندمان کل برای سیالات آب، مس اکسید + آب و مس اکسید + آهن + آب در سرعت 0.08 m/s برابر با ۵۷/۲٪، ۵۸/۸٪ و ۵۹/۹٪ می باشد. از شکل ۲ مشاهده می شود ماکزیمم راندمان گرمایی برای سیالات آب، مس اکسید + آب و مس اکسید + آهن + آب در سرعت 0.08 m/s برابر با ۴۵/۸٪، ۴۷/۳٪ و ۴۸/۳٪ می باشند. دمونتاز^۴ سه بعدی سیستم PV/T در شکل ۱ مشاهده می شود یک سیستم فتوولتائیک حرارتی از لایه های مختلفی تشکیل شده است که پیچیدگی خاصی در تولید آنها وجود دارد. قسمت های یک کلکتور PV/T پنل فتوولتائیک، فرم دور پنل PV، لایه اتیلن وینیل استات^۴، صفحه جاذب^۵، لوله ها و مواد عایق می باشند. روش صحنه گذاری بر نتایج مقایسه نتایج شبیه سازی با نرم افزار فلوئنت با نتایج تجربی آزمایش با شرایط یکسان می باشد.

روش صحنه گذاری بر نتایج مقایسه با کار تجربی دیگر محققان در این زمینه می باشد که میزان انحراف بازدهی بسیار کم است و درستی نتایج را تایید شده است.

جدول ۱: مقایسه بازده های ماهانه آب و نانوسیال برای مخزن ذخیره سازی ۱۵۰ لیتر

month	Water				Nanofluid			
	$\eta_{th,sys}$	$\eta_{el,sys}$	$\eta_{tot,sys}$	$\eta_{ex,sys}$	$\eta_{th,sys}$	$\eta_{el,sys}$	$\eta_{tot,sys}$	$\eta_{ex,sys}$
January	0.488	0.126	0.574	0.148	0.469	0.128	0.600	0.153
February	0.433	0.125	0.558	0.154	0.453	0.127	0.580	0.159
March	0.420	0.124	0.544	0.162	0.438	0.126	0.564	0.167
April	0.409	0.124	0.533	0.170	0.426	0.125	0.552	0.175
May	0.402	0.123	0.525	0.176	0.419	0.125	0.543	0.181
June	0.400	0.123	0.522	0.181	0.416	0.124	0.540	0.186
July	0.402	0.122	0.525	0.184	0.419	0.125	0.543	0.190
August	0.410	0.123	0.533	0.185	0.427	0.125	0.553	0.191
September	0.421	0.124	0.546	0.180	0.440	0.126	0.566	0.186
October	0.435	0.125	0.561	0.171	0.456	0.127	0.583	0.176
November	0.449	0.126	0.576	0.158	0.471	0.128	0.599	0.163
December	0.455	0.127	0.582	0.149	0.477	0.129	0.605	0.154
Yearly	0.420	0.124	0.544	0.171	0.438	0.126	0.564	0.177

لی^۱ و همکاران مقایسه عملکرد بین نانوسیالات (CNTs, Cu, Al₂O₃) با آب دیونیزه در سیستم های PV/T انجام دادند و تابش خورشید به طور مصنوعی توسط لامپ های هالوژن تامین شده است [۲].

غلظت های مورد بررسی ۰/۰۱٪، ۰/۱٪ و ۱٪ می باشد و اندازه ذرات مس حدود ۵۰ nm، آلومینا ۲۰ nm و نانولوله های کربنی ۵ μm می باشد. و در جدول ۲ مشاهده می شود نتایج زمان قرار گرفتن کلکتور در دما ۵۰°C نشان می دهد متوجه شدند در خنک کاری به ترتیب نانوسیال CNTs، مس، آلومینا و آب بهترین خنک کاری را داشتند. جدول ۳ مقدار ضریب گرمای ویژه در ۳ مقدار غلظت برای سیالات مختلف بررسی شده است که در مجموع به ترتیب نانوسیال CNTs، مس، آلومینا و آب ضریب گرمایی ویژه پایین تری داشتند، هرچه ضریب گرمای ویژه نانوسیال پایین تر باشد انتقال حرارت بهتر انجام می شود. روش صحنه گذاری بر نتایج مقایسه کار تجربی حاصل از آزمایش با کارهای تجربی دیگر محققان می باشد که از نتایج به دست آمده به درستی آزمایش رسیدند.

جدول ۲: اثر تغییرات غلظت نانوذرات بر زمان قرار گرفتن در معرض دمای ۵۰ سانتی گراد

Type	0.01wt.%	0.1wt.%	1wt.%
CNTs nanofluid	3272	3142	3138
Cu nanofluid	3342	3268	3162
Al ₂ O ₃ nanofluid	3476	3458	3384
Base fluid, DW	3756	3756	3756

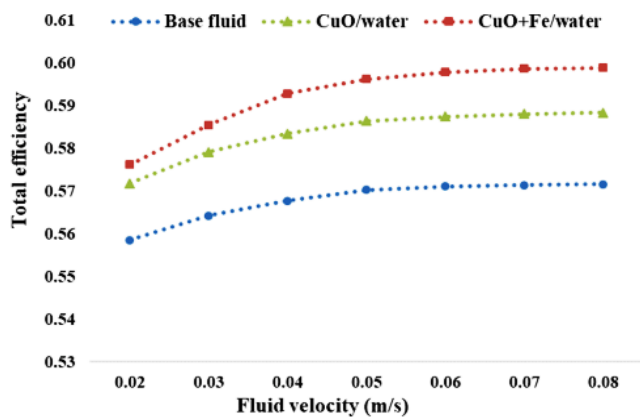
¹ Lee

² Karaaslan

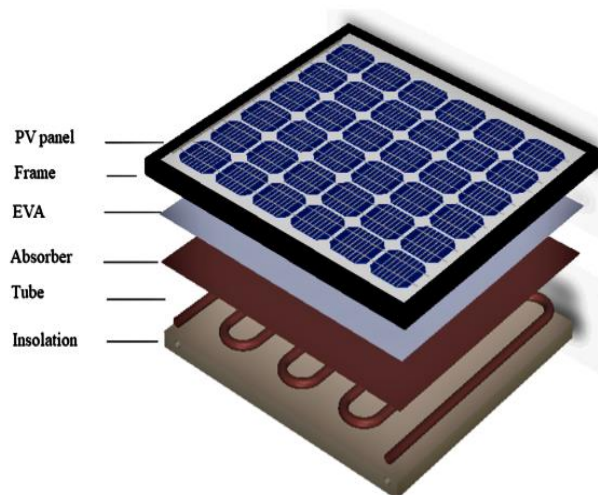
³ Electrical efficiency

⁴ Ethylene vinyl acetate

⁵ Absorbent plate



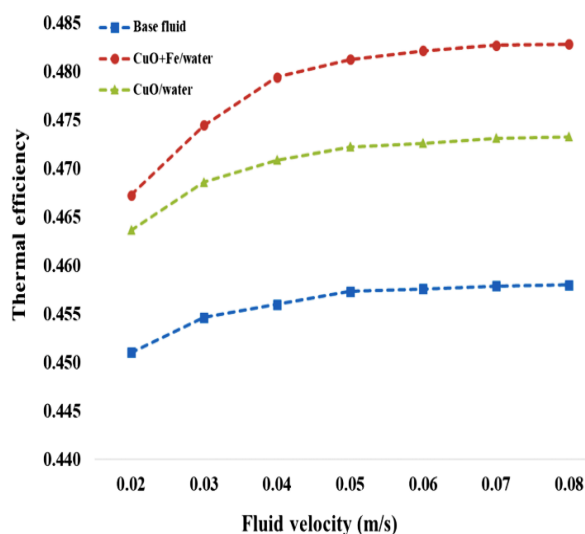
شکل ۴: تغییرات راندمان کل با سرعت‌های ورودی مختلف



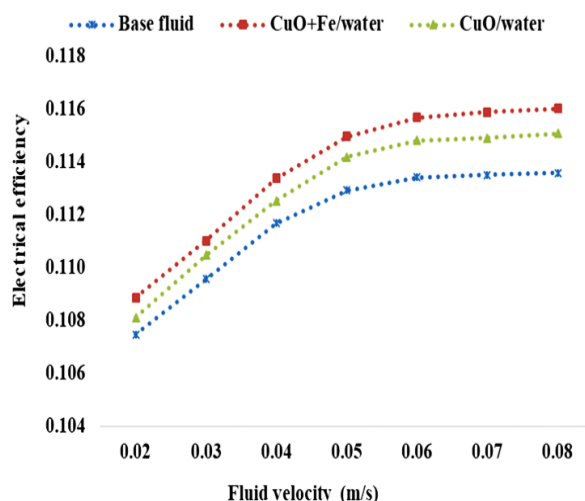
شکل ۱: اجزای مختلف سیستم‌های PV/T

عبدالله^۱ و همکاران بهبود عملکرد با نانوسیالات MWCNT در غلظت کم در سیستم‌های PV و PV/T بررسی کردند [۴]. بررسی در شهر کایرو مصر انجام شد. محدود غلظت استفاده شده (۰/۳ - ۰/۰۵) می‌باشد و بهترین عملکرد کلکتور PV/T در غلظت ۰/۰۷۵٪ انجام شد. در شکل ۵ مشاهده می‌شود در ساعت ۱۲:۳۰ ظهر و غلظت ۰/۰۷۵٪ مقدار بازده الکتریکی ۱۴٪ می‌باشد و بهبود عملکرد بازده الکتریکی در ساعت ۱۲:۳۰ ظهر در کلکتور با نانوسیال در غلظت ۰/۰۷۵٪ در مقایسه با حالت بدون خنک کاری فتوولتائیک و کلکتور PV/T با آب به ترتیب حدود ۴٪ و ۲/۲ درصد است در شکل ۶ مشاهده می‌شود بازده (کل) در غلظت ۰/۰۷۵٪ میانگین یک روز و حداکثر یک روز به ترتیب برابر ۶۱/۲۳٪ و ۸۳/۲۶٪ می‌باشند و همچنین بهبود عملکرد بازده کل نانوسیال Mwcnt در غلظت ۰/۰۷۵٪ در ساعت ۱۲:۳۰ ظهر، در مقایسه با آب حدود ۴۲/۳۶٪ می‌باشد و بهبود بازده میانگین کل نانوسیال Mwcnt در غلظت ۰/۰۷۵٪ در مقایسه با آب ۲۹/۲۳٪ می‌باشد. میزان غلظت نانوسیال مورد استفاده باید بهینه باشد اگر از این مقدار بهینه بیشتر باشد مقدار ویسکوزیته^۲ زیاد می‌شود و پدیده حرکت براونی^۳ و تجمع ذرات اتفاق می‌افتد و باید تحقیقات آزمایشگاهی در این زمینه انجام شود تا غلظت بهینه انتخاب شود.

کالیبراسیون در تمام دستگاه‌های مورد استفاده صورت گرفته است. روش صحه گذاری بر نتایج مقایسه کار تجربی آزمایش با کار تجربی دیگر محققان می‌باشد. معیار عدم قطعیت مناسبی بر اساس مقادیر پارامترها به دست آمده که مقداری کمتر از ۵ درصد دارد.



شکل ۲: تغییرات راندمان حرارتی با سرعت‌های ورودی متفاوت.



شکل ۳: تغییرات راندمان الکتریکی با سرعت‌های ورودی مختلف.

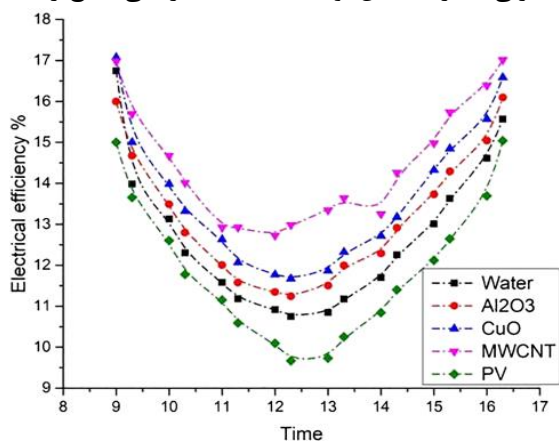
¹ Abdallah

² Viscosity

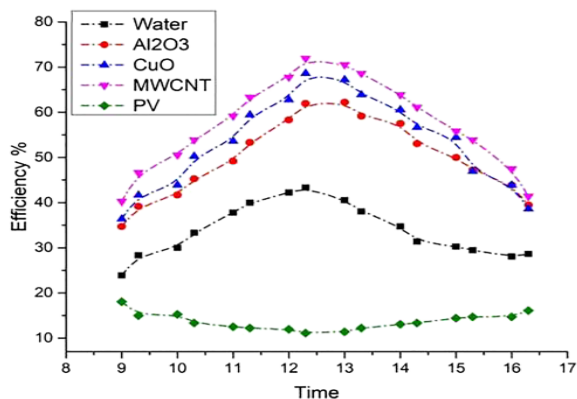
³ Brownian motion

می‌باشد. در شکل ۷ مشاهده می‌شود نانو سیالات آلومینا، مس اکسید و نانولوله کربنی، آب و سیستم فتوولتائیک بدون خنک کننده (PV) به ترتیب بهترین عملکرد در بازدهی الکتریکی داشتند که مقدار بازده الکتریکی به ترتیب برای آب و نانو سیالات در ساعت ۱۲:۳۰ ظهر برابر با ۱۰/۸٪، ۱۱/۴٪، ۱۱/۸٪ و ۱۳٪ می‌باشد. در شکل ۸ مشاهده می‌شود ماکزیمم راندمان کل آب، آلومینا، مس اکسید و نانولوله کربنی به ترتیب در ساعت ۱۲:۳۰ ظهر برابر با ۴۱٪، ۶۵٪، ۶۹٪ و ۷۵٪ می‌باشد. در شکل ۹ شماتیک روش کار سیستم PV/T نشان داده شده است به طور خلاصه که سیال داغ خنک کاری خروجی از کلکتور با عبور از مبدل حرارتی خنک شده و وارد کلکتور شده و سیستم به همین صورت ادامه می‌یابد و خنک کاری کلکتور مداوم انجام می‌شود.

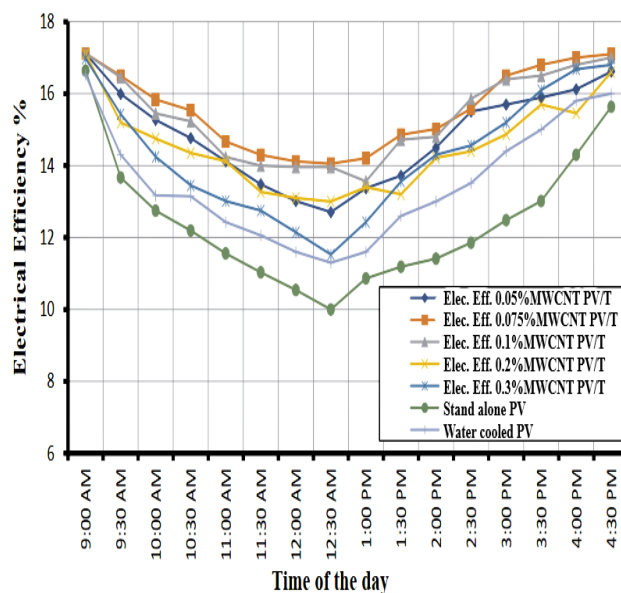
کالیبراسیون تمام دستگاه‌های مصرفی صورت گرفته است و عدم قطعیت بر اساس پارامترهای آزمایش کمتر از ۳ درصد است. روش صحه گذاری بر نتایج مقایسه کار تجربی آزمایش با کار تجربی دیگر محققان بوده است که به درستی نتایج رسیدند.



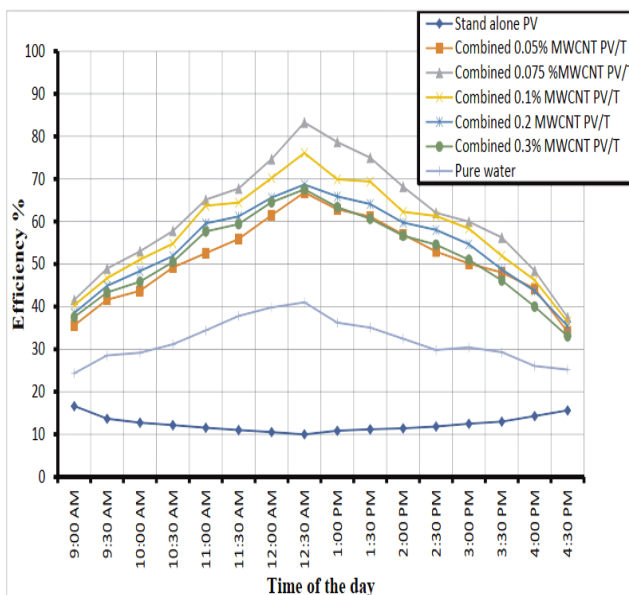
شکل ۷: راندمان الکتریکی برای نانو سیالات مختلف



شکل ۸: راندمان کل برای نانو سیالات مختلف



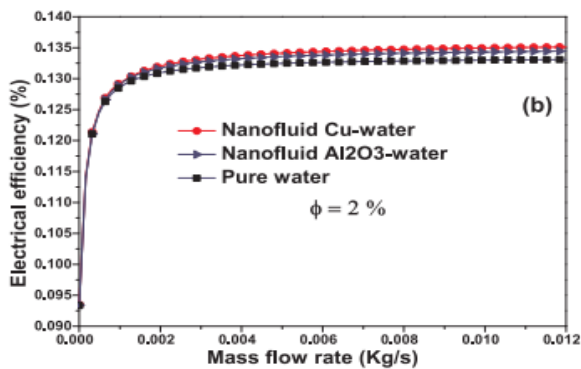
شکل ۵: راندمان الکتریکی سیستم‌های PV/T در کسر حجمی‌های مختلف



شکل ۶: راندمان کل سیستم‌های PVT در کسر حجمی‌های مختلف

سنگیسا^۱ و همکاران مقایسه عملکرد کلکتورهای PV و PV/T مورد بررسی قرار دادند و در کلکتورهای PV/T از نانو سیالات CuO ، Al_2O_3 ، MWCNT استفاده کردند [۵]. کلکتورها در شهر چنای هند نصب شده است. در کسر حجمی‌های (۰٪، ۰/۵٪، ۱٪، ۲/۵٪ و ۵٪) مورد بررسی قرار گرفته است. و دما کلکتور در طول روز بین ۲۵ تا ۶۵ درجه سانتی گراد متغییر است و در طول روز بالاترین دما به ترتیب برای سیستم PV با دما ۴۵ درجه سانتی گراد، سیستم‌های PV/T با خنک کاری (آب - آلومینا- مس اکسید و نانولوله کربنی)

¹ Sangeetha



شکل ۱۱: تغییرات راندمان الکتریکی با نرخ دبی جریان برای سیالات (Cu+water, Al₂O₃+water, Pure water)

لی و همکاران مقایسه بهبود عملکرد نانوسیالات CuO و Al₂O₃ با سیال پایه آب در سیستم‌های PV/T تحلیل کردند [۷]. سیستم PV/T در کشور کره جنوبی نصب شد. اندازه نانوذرات CuO حدود (۱۰۰-۵۰) nm و Al₂O₃ حدود ۱۰۰ nm می‌باشد. در ۴ مقدار دبی بررسی کردند که دبی ۳ L/min بهترین عملکرد را داشت. در جدول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود بهبود عملکرد نانوسیالات CuO و Al₂O₃ در راندمان حرارتی و الکتریکی و کل به ترتیب برابر ۲۱/۳٪، ۰/۰۷٪، ۲۱/۳۷٪ و ۱۵/۱۴٪، ۰/۰۱٪ و ۱۵/۱۵٪ در مقایسه با آب داشتند و در مجموع عملکرد مس اکسید بهتر از آلومینا بود.

روش صحه گذاری بر نتایج مقایسه کار تجربی حاصل از آزمایش با کار تجربی دیگر محققان می‌باشد.

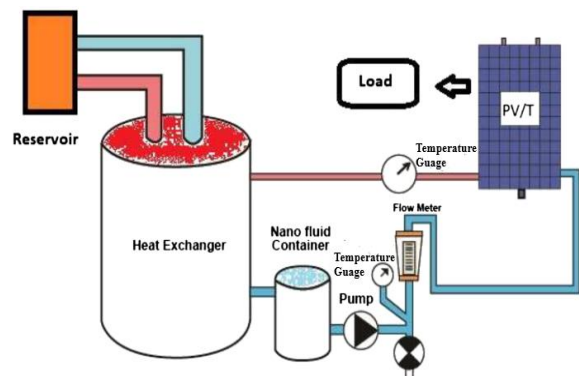
جدول ۴: میانگین راندمان سیستم‌های PV/T با استفاده از نانوسیالات CuO/water

Working Fluid	η_{th} %	η_e %	η_o %	η_f %
CuO/water Nanofluid	48.88	13.20	62.08	83.62
Water	27.58	13.13	40.71	62.13

جدول ۵: میانگین راندمان سیستم‌های PV/T با استفاده از نانوسیالات Al₂O₃/water

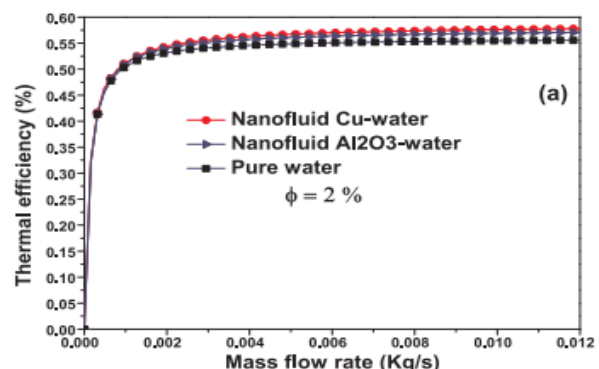
Working Fluid	η_{th} %	η_e %	η_o %	η_f %
Al ₂ O ₃ /water Nanofluid	46.95	12.22	59.17	79.11
Water	31.81	12.21	44.02	63.94

حسین و همکاران شبیه‌سازی دو سیال ترکیبی در سیستم‌های PV/T با نانوسیالات (CuO, Al₂O₃, SiO₂) با سیال پایه آب در نرم افزار تجاری انسیس فلونت انجام دادند [۸]. نانوسیالات CuO بهترین رسانایی گرمایی و پایداری گرمایی نسبت دو نانوسیالات دیگر نشان داد و مقایسه از ترکیب نانوسیالات CuO + هوا و آب + هوا در این بررسی مورد تحلیل قرار گرفته است. در سه جریان آرام، گذرا و آشفته بررسی شده است. مشاهده شد



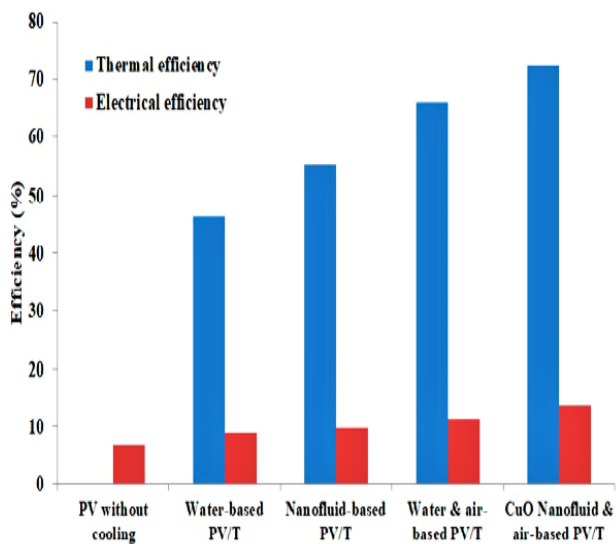
شکل ۹: دیاگرام شماتیک سیستم PVT

هیسوف^۱ و همکاران بررسی در مورد بهبود عملکرد سیستم‌های PV/T با استفاده از نانوسیالات Cu و Al₂O₃ و سیال پایه آب انجام دادند [۶]. سیستم PV/T در شهر آگادیر مراکش نصب شده است و بررسی در یک روز معمولی تابستانی انجام گرفت. همان طور در شکل ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود نمودار راندمان حرارتی و الکتریکی با دبی نشان می‌دهد با افزایش دبی راندمان‌ها بالا می‌رود و خنک کاری بهتر انجام می‌شود بعد از مقدار دبی ۰/۰۱ kg/s افزایش راندمان‌ها ناچیز است. بهبود راندمان الکتریکی و گرمایی در دبی ۰/۰۱۲ kg/s برای نانوسیالات Cu در مقایسه با آب ۱/۹٪ و ۴/۱٪ بود و همچنین برای نانوسیالات Al₂O₃ ۲/۷٪ و ۱/۲٪ بهبود راندمان گرمایی و الکتریکی در مقایسه با آب داشت. متوجه شدند با افزایش درصد غلظت مقدار هدایت حرارتی، ویسکوزیته و چگالی افزایش می‌یابد و همچنین مقدار ویسکوزیته بالا باعث اصطکاک در سیال کاری و در نتیجه به قدرت پمپاژ بیشتری برای سیالات یافته نتایج تجربی از آزمایش با نتایج عددی Range-Kutta مرتبه ۴، می‌باشد.



شکل ۱۰: تغییرات راندمان حرارتی با نرخ دبی جریان برای سیالات (Cu+water, Al₂O₃+water, Pure water)

¹ Hissouf



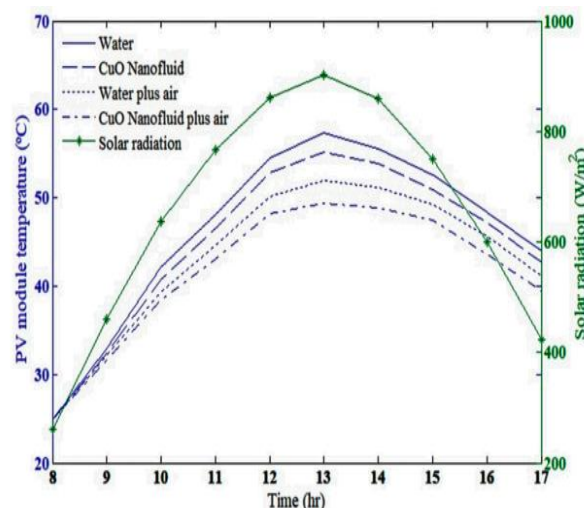
شکل ۱۳: مقایسه عملکرد بازدهی الکتریکی و حرارتی در سیستم‌های PV/T در حالت‌های مختلف

آل شامانی^۲ و همکاران مطالعه لوله‌های مستطیلی شکل جاذب در سیستم‌های PV/T را با نانوسیالات (SiC و SiO₂, TiO₂) در شرایط آب و هوای گرمسیری کشورمالزی انجام دادند [۹]. نانوسیال SiC بهترین عملکرد در بازدهی الکتریکی و توان خروجی داشت و شدت تابش ۴۰۰ W/m² بیشترین بازدهی را داشت و هرچه شدت تابش افزایش یابد بازدهی الکتریکی کمتر می‌شود. از شکل ۱۴، ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود مناسب‌ترین مقدار دبی ۰/۱۷۰ kg/s می‌باشد و با افزایش دبی مقدار راندمان الکتریکی، حرارتی و کل افزایش می‌یابد. در جدول ۷ مشاهده می‌شود در بازدهی الکتریکی، حرارتی و کل سیستم‌های PV/T در مقایسه با آب برای هر یک از نانوسیالات SiC, TiO₂, SiO₂ به ترتیب برابر با ۳/۹۱٪، ۱/۳۶٪ و ۰/۶۹٪ (بازده الکتریکی)، ۳/۴۹٪، ۲/۲۱٪ و ۱/۲۱٪ (بازده حرارتی) و ۹/۶۵٪، ۵/۸۲٪ و ۴/۱۵٪ (بازده کل) داشتند و بیشترین توان خروجی به ترتیب سیالات SiC, TiO₂, SiO₂ و آب داشتند.

در کلکتور فتوولتائیک حرارتی تولید برق و آب گرم هم‌زمان در دسترس است و یک سیستم فشرده و کارآمد و نسبت به این که پنل فتوولتائیک و کلکتور صفحه تخت از هم جدا باشد در فضا صرفه جویی می‌شود و راندمان بالاتری را می‌دهد. روش اعتبار سنجی نتایج مقایسه کار تجربی آزمایش با کارهای تجربی دیگر محققان بود و مقدار عدم قطعیت بسیار کم بود.

هر چه تعداد المان مش^۱ هندسه بیشتر و به تعداد قابل قبول رسید دقت حل مسئله بالا رفت. در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود بالاترین دما ماژول PV که در طول روز به ترتیب برای سیستم-های خنک کاری آب، نانوسیال CuO، آب + هوا و نانوسیال مس + هوا با دماهای ماکزیمم ۵۷/۵، ۵۵/۱، ۵۱/۹ و ۴۸/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در جدول ۶ از نتایج مشخص می‌شود بهترین دبی برای هوا و آب در بررسی ۰/۰۵۵ kg/s و ۰/۰۳ kg/s می‌باشد که بیشترین راندمان سیستم برای آب + هوا و نانوسیال CuO + هوا به ترتیب برابر با ۷۹/۸٪ و ۹۰/۳٪ می‌باشد. همان‌طور در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود مقدار بازدهی الکتریکی و حرارتی برای نانوسیال CuO + هوا به ترتیب برابر با ۱۳/۶٪ و ۷۳/۵٪ می‌باشد که بهبود عملکرد نسبت به آب + هوا ۲/۳٪ و ۸/۴٪ می‌باشد.

روش اعتبارسنجی نتایج با مدل سازی ریاضی به وسیله نرم افزار Matlab و شبیه سازی Cfd به وسیله نرم افزار فلوئنت انجام شده است.



شکل ۱۲: دمای ماژول PV در طول یک روز با سیال‌های کاری متفاوت

جدول ۶: بازده معادل کل سیستم PV/T با دو سیال

Nano-fluid or Water Flow Rate (kg/s)	Fixed Air Flow Rate (kg/s)	Daily Solar Radiation (MJ/m ² day)	Ambient Temperature °C	Total Equivalent Efficiency %		
				PV without Cooling	Water Plus Air	Nano-fluid Plus Air
0.005	0.055	23.25	21.47	31.5	73.7	82.6
0.01	0.055	23.25	21.47	-	75.1	85.2
0.015	0.055	23.25	21.47	-	76.6	87.4
0.02	0.055	23.25	21.47	-	78.4	88.7
0.025	0.055	23.25	21.47	-	79.1	89.5
0.03	0.055	23.25	21.47	-	79.8	90.3

² Al-Shamani
ICREDG2022، ۱۴۰۰، اسفند ۴ و ۵

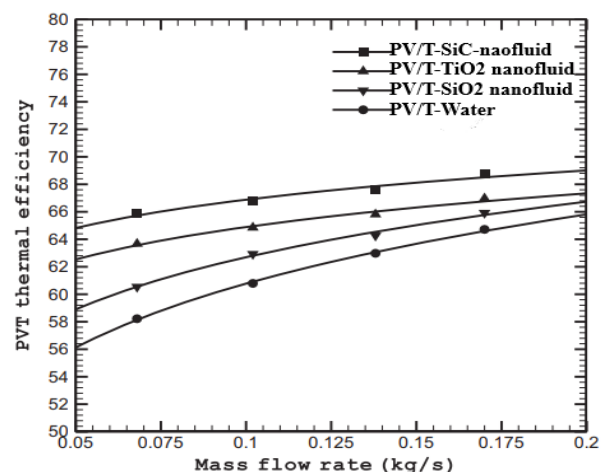
¹ Mesh

	PV/T-water 0/170kg/s	PV/T-SiO ₂ nanofluid 0/170 kg/s	PV/T-TiO ₂ nanofluid 0/170 kg/s	PV/T-SiC nanofluid 0/170 kg/s
Mean PV module temperature, °C	50/01	48/95	46/52	42/61
Outlet Temperature, °C	50/63	51/48	52/28	53/16
PVT Electrical Power, W	82/35	88/30	94/10	115/7
PVT Thermal Power, W	582/1	625/33	658/8	697/9
Overall PVT Power, W	664/4	713/63	752/9	813/6
PVT Electrical Efficiency, %	9/608	10/30	10/97	13/52
PVT Thermal Efficiency, %	64/72	65/93	66/93	68/21
Combined (PVT) Efficiency, %	72/08	76/23	77/9	81/73

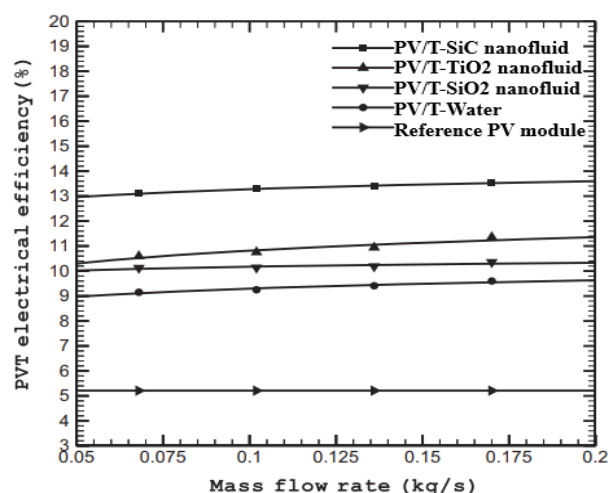
جدول ۷: بهبود پارامترهای مختلف در سیستم PV/T توسط نانوسیالات در مقایسه با آب

آل وایلی^۱ و همکاران بررسی مقایسه ای بهبود عملکرد استفاده از نانوسیالات (SiC, CuO, Al₂O₃) در سیستم‌های PV/T با سیال پایه را انجام دادند [۱۰]. از لحاظ پایداری نانوسیال بهترین عملکرد نانوسیال SiC در همه غلظت‌ها به جزء مقدار ۰/۵٪ که Al₂O₃ پایداری بهتر داشت را دارد و همچنین متوجه شدند که هرچه مقدار غلظت افزایش می‌یابد برای هر سه نانوسیال پایداری کمتر می‌شود. از شکل ۱۷ و ۱۸ متوجه شدند با افزایش شدت تابش راندمان حرارتی افزایش و راندمان الکتریکی کاهش می‌یابد. بهبود راندمان حرارتی و الکتریکی در شدت تابش ۱۰۰۰ w/m² برای نانوسیال SiC برابر با ۱۵٪ و ۱۲٪ در مقایسه با آب داشت. از بررسی مطالعات انجام شده با این سه نانوسیال متوجه شدند بهترین عملکرد به ترتیب برای SiC, CuO و Al₂O₃ می‌باشد.

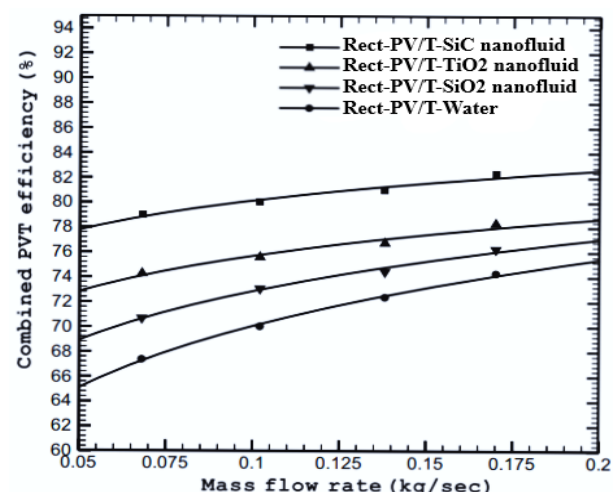
روش اعتبارسنجی نتایج مقایسه کار تجربی آزمایش با کار تجربی دیگر محققان می‌باشد و مقدار عدم قطعیت آزمایش کمتر از ۵ درصد بود.



شکل ۱۴: تغییرات راندمان حرارتی با دبی جریان برای سیستم‌های PV/T با آب و نانوسیالات مختلف در شدت تابش ۱۰۰۰ w/m²



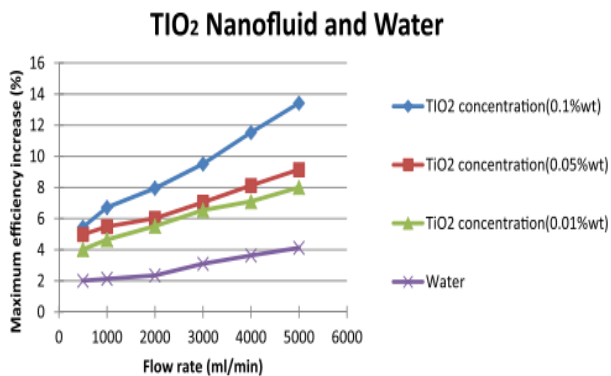
شکل ۱۵: تغییرات راندمان الکتریکی با دبی جریان برای سیستم‌های PV/T با آب و نانوسیالات مختلف در شدت تابش ۱۰۰۰ w/m²



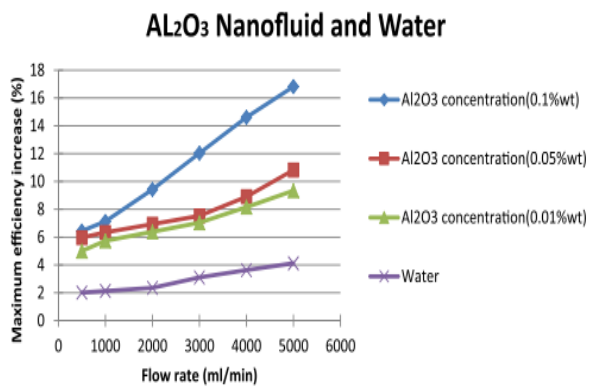
شکل ۱۶: تغییرات راندمان کل با دبی جریان برای سیستم‌های PV/T با آب و نانوسیالات مختلف در شدت تابش ۱۰۰۰ w/m²

¹ Al-Waeli

روش اعتبار سنجی نتایج مقایسه کار تجربی آزمایش با کارهای تجربی محققین است و مقدار عدم قطعیت برای پارامترهای مختلف آزمایش بسیار کم بود.



شکل ۱۹: تغییرات ماکزیمم درصد افزایش راندمان با دبی جریان در سیستم PV/T با نانوسیال TiO₂ در (۰/۰۱-۰/۰۵ و ۰/۰۱)٪



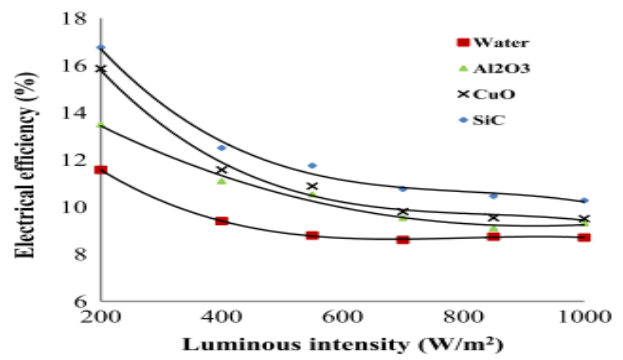
شکل ۲۰: تغییرات ماکزیمم درصد افزایش راندمان با دبی جریان در سیستم PV/T با نانوسیال Al₂O₃ در غلظت (۰/۰۱-۰/۰۵ و ۰/۰۱)٪

نتیجه گیری

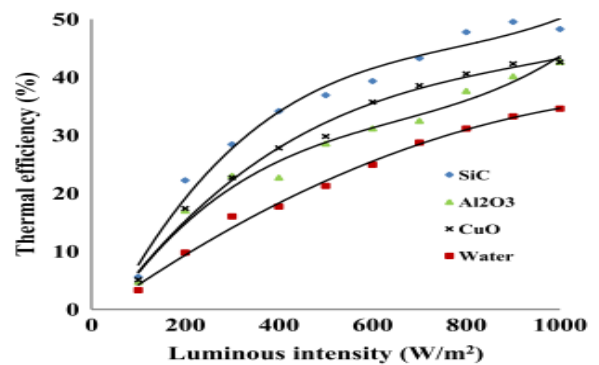
همان طور که در مقاله‌ها بررسی شد با به کارگیری نانوسیالات در سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی شاهد افزایش بهبود عملکرد آن‌ها در مقایسه با آب بود. عوامل تاثیر گذار در بهبود عملکرد سیستم PV/T عبارتند از: نوع نانوسیالات و ویژگی‌های آن، دبی جریانی و دمای ورودی سیال، عوامل محیطی (سرعت باد، شدت تابش خورشیدی و دمای محیط) و غیره... می‌باشد.

با افزایش درصد غلظت نانوسیالات مقدار ویسکوزیته افزایش می‌یابد و باید توجه نمود حرکت براونی شکل نگیرد و پایداری ذرات به طور محسوسی کاهش نیابد.

اگر نوع خنک کاری در این سیستم‌ها اولویت بندی شود اولویت اول با خنک کاری نانوسیال اولویت دوم با خنک کاری آب و اولویت سوم با خنک کاری هوا می‌باشد.



شکل ۱۷: تغییرات راندمان حرارتی با شدت تابش برای نانوسیالات مختلف و آب



شکل ۱۸: تغییرات راندمان الکتریکی با شدت تابش برای نانوسیالات مختلف و آب

اباید^۱ و همکاران مقایسه بهبود عملکرد دو نانوسیال Al₂O₃ و TiO₂ در سیستم‌های PV/T با سیال پایه آب در کشور اردن انجام شده است [۱۱]. برای غلظت‌های ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۰۱٪ بررسی کردند. اندازه نانوذرات Al₂O₃ حدود ۴۳۱ nm و TiO₂ حدود ۵۰ nm می‌باشد. قدرت خروجی برای نانوسیال آلومینا بهتر از نانوسیال تیتانیوم اکسید و حالت با آب عمل کرد. در شکل ۱۹ و ۲۰ مشاهده می‌شود بهبود میانگین راندمان الکتریکی برای نانوسیال TiO₂، Al₂O₃ در مقایسه با حالت با آب به ترتیب در غلظت ۰/۰۱٪ برابر ۶/۲٪ و ۸/۱۹٪ در غلظت ۰/۰۵٪ برابر ۳/۹۱٪ و ۴/۸۶٪ و در غلظت ۰/۰۱٪ برابر با ۳/۰۱٪ و ۴/۰۵٪ می‌باشد. متوجه شدند هرچه دبی بیشتر باشد در نتیجه عدد رینولدز بالاتر خواهد بود و مقدار راندمان الکتریکی و قدرت خروجی بالاتر خواهد بود. در مقابل مسائل و مشکلات این مورد وجود دارد از جمله بالا بودن هزینه نانوسیالات، بالا بودن هزینه سیستم فتوولتائیک حرارتی، طراحی لوله‌های جاذب حرارتی، حفظ و نگهداری و پایداری آن و غیره... را توجه نمود و در حل کردن مسائل تلاش کرد.

¹ Ebaid

- [5] Sangeetha, Manimaran, Manigandan, Sekar, Chaichan, Miqdam T, 2019. "Progress of MWCNT, Al₂O₃, and CuO with water in enhancing the photovoltaic thermal system" *Energy Research*, 10.1002/er.4905
- [6] Hissouf, Mohamed, Feddaoui, M'barek, Najim, Monssif, 2020. "Numerical study of a covered Photovoltaic-Thermal Collector (PVT) enhancement using nanofluids", *Solar Energy*, 10.1016/j.solener.2020.01.083
- [7] Lee, Joo Hee, Hwang, Seong Geon, Lee, Gwi Hyun, 2019. "Efficiency Improvement of a Photovoltaic Thermal (PVT) System Using Nanofluids", *Energies*, 10.3390/en12163063
- [8] Hussain, M. Imtiaz, Kim, Jin-Hee, Tae Kim, Jun, 2019. "Nanofluid-Powered Dual-Fluid Photovoltaic /Thermal (PV/T) System: Comparative Numerical Study", *Energies*, 10.3390/en12050775
- [9] Al-Shamani, Ali Najah, Sopian, K, Mat, Sohif, 2016. "Experimental studies of rectangular tube absorber photovoltaic thermal collector with various types of nanofluids under the tropical climate conditions", *Energy Conversion and Management*, 10.1016/j.enconman.2016.07.052
- [10] Al-Waeli, Ali H.A, Chaichan, Miqdam T, Kazem, Hussein A, 2017. "Comparative study to use nano-(Al₂O₃, CuO, and SiC) with water to enhance photovoltaic thermal PV/T collectors", *Energy Conversion and Management*, 10.1016/j.enconman.2017.06.072
- [11] Ebaid, Munzer S. Y, Al-busoul, Mamdoh, Ghrair, Ayoub M, 2020. "Performance enhancement of photovoltaic panels using two types of nanofluids", *Heat Transfer*, 10.1002/htj.21745

مزایای این سیستم‌ها این است که به صورت ترکیبی است و برق و آب گرم همزمان فراهم می‌کنند که در دنیای امروز با ارزش است. با افزایش شدت تابش در طول روز راندمان الکتریکی کاهش می‌یابد چون سطح پنل فتوولتائیک بسیار داغ می‌شود ولی راندمان حرارتی، راندمان کل و قدرت خروجی از سیستم افزایش می‌یابد.

باید به چالش‌های استفاده نانو سیالات در سیستم‌های PV/T توجه کرد و با ارائه راه حل‌های مفید و سازنده در حل مشکلات قدمی برداشت.

منابع

- [1] Bellos, Evangelos, Tzivanidis, Christos, 2017. "Yearly performance of a hybrid PV operating with nanofluid", *Renewable Energy*, 113 (2017) 867e884
- [2] Lee, Youngho, Jeong Hyomin, Sung, Yonmo, 2021. "Thermal Absorption Performance Evaluation of Water-Based Nanofluids (CNTs, Cu, and Al₂O₃) for Solar Thermal Harvesting", *Energies*, 10.3390/en14164875
- [3] Karaaslan, Irem, Menlik, Tayfun, 2021. "Numerical study of a photovoltaic thermal (PV/T) system using mono and hybrid nanofluid", *Solar Energy*, 10.1016/j.solener.2021.06.072
- [4] Abdallah, Saber Ragab, Saidani-Scott, Hind, Abdellatif, Osama Ezzat, 2019. "Performance analysis for hybrid PV/T system using low concentration MWCNT (water-based) nanofluid" *Solar Energy*, 10.1016/j.solener.2019.01.088