مهندسی مکانیک شریف، (بهار ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۳ - ۳۲، شماره‌ی ۱، ص. ۷۷-۸۲

Original Article

طراحی و ساخت یک سامانه خنک‌کننده برای افزایش راندمان پنل‌های فتوولتاییک به کمک مواد تغییر فاز

سیدرضا موسوی بایگی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
سید مجتبی صدرعاملی * (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

پنل‌های فتوولتاییک از انرژی پاک و تجدیدپذیر خورشید برای تولید برق استفاده می‌کنند. سه عامل اصلی تأثیرگذار بر راندمان این سلول‌ها عبارت‌اند از: جنس سلول، شدت تابش اشعه خورشید و دمای عملیاتی پنل. افزایش دما در پنل منجر به کاهش بازدهی آن می‌شود. به‌طور میانگین با افزایش دمای عملیاتی پنل به‌ازای هر درجه سانتی‌گراد بیش از ۲۵ درجه سیلسیوس، بازدهی پنل بین ۰٫۳ تا ۰٫۵ درصد کاهش می‌یابد. در این پژوهش برای اولین‌بار از ماده‌ی تغییر فاز پلی‌اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ به‌عنوان کنترل‌کننده‌ی دمایی پنل‌های فتوولتاییک استفاده شده است. هدف این پروژه کنترل دمای یک پنل خورشیدی در حدود دمای بهینه به‌منظور افزایش راندمان تولید الکتریسیته است. آزمایشات در میزان تشعشع $800\ W/m^2$ و در دو زاویه‌ی صفر و ۱۵ درجه نسبت به سطح افق انجام شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که عملکرد ماده‌ی تغییر فاز در کاهش دمای عملیاتی پنل خورشیدی و درنتیجه در افزایش راندمان آن مثبت است، به‌طوری که دمای سلول کنترل شده با ماده‌ی تغییر فاز، به میزان $15^\circ C$ کاهش یافته است؛ این امر بازدهی پنل را تا ۸ درصد افزایش داده است. همچنین افزایش زاویه‌ی پنل نسبت به افق میزان کاهش دما را افزایش داده و در افزایش راندمان نقش مؤثری ایفا می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان اذعان داشت که استفاده از مواد تغییر فاز یکی از روش‌های مؤثر برای کنترل دمای سلول‌های فتوولتاییک است.

واژگان کلیدی: انرژی خورشیدی، خنک‌سازی رایگان، فتوولتاییک، کنترل دمایی، مواد تغییر فاز.

reza.mousavi1366@gmail.com
sadramel@modares.ac.ir

۱. مقدمه

با توجه به نیاز روزافزون به انرژی از یک سو و محدودیت منابع انرژی فسیلی و نیز افزایش آلودگی محیط زیست از سوی دیگر، ضرورت کاربرد منابع تجدیدپذیر انرژی بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از این منابع، انرژی خورشیدی است که عظیم‌ترین منبع انرژی در جهان است. پنل‌های فتوولتاییک یا سلول‌های فتوولتاییک وسایلی هستند که می‌توانند به‌طور مستقیم نور خورشید را به الکتریسیته تبدیل کنند. کارایی و بازدهی این سلول‌ها به سه عامل: جنس نیمه‌هادی به‌کار رفته، شدت تابش، و دمای عملیاتی پنل بستگی دارد. از این سه عامل، فقط دما را می‌توان حین استفاده از پنل کنترل کرد.

طبق تحقیقات انجام‌گرفته دمای پنل فتوولتاییک با راندمان آن رابطه‌ی عکس دارد، به‌طوری که با افزایش دما بیش از $25^\circ C$، به‌ازای هر درجه ۰٫۳-۰٫۵ درصد از میزان راندمان کاسته خواهد شد.[۱و۲] با توجه به این که دمای عملیاتی پنل در فصول گرم به بیش از $65^\circ C$ می‌رسد، کاهش ۱۴-۲۲ درصدی راندمان بدیهی به نظر می‌رسد. مطالعات تجربی نشان داد که با افزایش دمای پنل بیشینه‌توان خروجی به‌صورت خطی کاهش می‌یابد.[۳]

برای حذف گرمای اضافی از سطح سلول از شیوه‌های مختلفی استفاده شده که هرکدام مزایا و معایب خود را دارد. استفاده از جریان طبیعی هوا و پس از آن استفاده از جریان اجباری به‌کمک فن اولین ایده‌های مطرح شده برای حل این مشکل بود. جریان طبیعی هوا تأثیر بسیار اندکی در انتقال حرارت دارد. همچنین برخی معایب جریان اجباری عبارت‌است از: هزینه‌ی اولیه‌ی بالا برای تجهیزاتی مانند فن و کانال‌کشی در مقیاس‌های بزرگ، هزینه‌ی جاری بالا برای تأمین الکتریسیته‌ی فن و هزینه‌ی تعمیر و نگه‌داری بالا. روش دیگر برای خنک‌کردن پنل فتوولتاییک استفاده از آب به‌صورت جاری روی سطح یا به‌صورت کانال در پشت پنل است. انتقال حرارت در این روش، در مقایسه با روش جریان هوای اجباری، بیشتر است، اما هزینه‌ی اولیه‌ی آن نیز به‌دلیل نیاز به پمپ بالاتر است. هزینه‌های تعمیر و نگه‌داری بیشتر، مصرف برق بیشتر و عمر کم‌تر به‌دلیل خوردگی تجهیزات از دیگر معایب این روش است.

---

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۲/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۰/۶، پذیرش ۱۳۹۳/۱۰/۲۷.

جدول ۱. مقایسه‌ی انواع روش‌های خنک‌سازی سلول فتوولتاییک.[۴]

	گردش طبیعی هوا	گردش اجباری	خنک‌سازی با آب	مواد تغییر فاز
مزایا	ــ عدم نیاز به نگه‌داری ــ بدون هزینه‌ی اولیه ــ بدون صدا ــ عدم نیاز به برق ــ سرمایش رایگان	ــ نرخ انتقال حرارت بیشتر ــ عدم وابستگی به سرعت باد ــ نرخ جرمی بیشتر هوا ــ کاهش دمای بیشتر	ــ نرخ انتقال حرارت بیشتر از هوا ــ کاهش دمای بیشتر نسبت به ــ هدایت حرارتی بیشتر از هوا ــ نرخ جرمی بیشتر	ــ نرخ انتقال حرارت بیشتر از هوا و آب ــ جذب بیشتر گرما به‌خاطر گرمای نهان ــ بدون هزینه‌ی تعمیر و نگه‌داری ــ عدم نیاز به برق ــ سرمایش رایگان ــ فرایند همدما
معایب	ــ انتقال حرارت بسیار کم ــ وابسته به باد و هوا ــ نرخ کم جرمی جریان هوا ــ محدودیت در میزان خنک‌سازی	ــ هزینه‌ی اولیه‌ی بالا ــ مصرف برق بالا ــ هزینه‌های تعمیر و نگه‌داری بالا ــ ایجاد سر و صدا	ــ عمر کوتاه‌تر بدلیل ایجاد خوردگی ــ هزینه‌ی اولیه‌ی بالاتر به‌خاطر پمپ ــ مصرف برق بالا ــ هزینه‌ی تعمیر و نگه‌داری بالا	ــ هزینه‌ی اولیه‌ی بالا ــ احتمال پدیده‌ی ابرسرمایش

راه حل دیگری که می‌توان برای رفع این مشکل مطرح ساخت جذب گرمای اضافی از سطح سلول توسط مواد تغییر فاز[۱] است. این مواد گرما را طی فرایند ذوب در خود ذخیره، و طی فرایند سرمایش (انجماد) آزاد می‌کنند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این مواد ثابت بودن دما حین انجام فرایند جذب و سرمایش است.[۵]

خلاصه روش‌های به‌کار رفته برای خنک‌سازی پنل و مزایا و معایب آن‌ها به‌اختصار در جدول ۱ ثبت شده است.

به‌دلیل قابلیت بالای مواد تغییر فاز در جذب گرما، این مواد به‌سرعت به‌عنوان عاملی برای خنک‌سازی رایگان وسایل مختلف مطرح شده و جایگزین روش‌های قدیمی از جمله استفاده از انتقال حرارت اجباری، مثل فن، شدند.

در یک آزمایش تجربی از یک واحد ذخیره‌ی انرژی توسط ماده‌ی تغییر فاز، در رایانه‌های قابل حمل برای خنک‌سازی بوردها و مدارات الکترونیکی استفاده شد.[۶] بدین‌ترتیب گرمای نهان ماده‌ی تغییر فاز، حرارت را از ریزپردازنده‌ها جمع‌آوری و آن را برای مدت دو ساعت در دمای پایین‌تری خنک نگاه می‌داشت.

در مطالعه‌یی دیگر، ماده‌ی تغییر فاز نرمال ایکوسان[۲] را درون سه چاه گرمایی[۳] آلومینیومی با هندسه‌ی متفاوت به‌لحاظ تعداد پره ریختند و از آن برای خنک‌کردن رایانه‌های قابل حمل استفاده کردند. متغیرهای مورد بررسی شامل تأثیر وجود ماده‌ی تغییر فاز، تعداد پره، جهت‌گیری زاویه‌یی و توان مصرفی دستگاه بود. طبق گزارش نهایی این پژوهش استفاده از چاه گرمایی بدون ماده‌ی تغییر فاز تأثیر چندانی بر انتقال حرارت ناپایا نخواهد داشت؛ ماده‌ی تغییر فاز به‌عنوان نقطه‌ی کلیدی در خنک‌سازی این وسایل نقش مؤثری دارد.[۷]

محققین از چند کانال هوا که در پشت پنل فتوولتاییک تعبیه شده و جریان هوا در آن‌ها یکنواخت بود، برای خنک‌سازی آن استفاده کردند. نتایج تحقیقات این گروه نشان می‌دهد بازدهی الکتریکی با دما رابطه‌یی خطی و معکوس دارد و خنک‌سازی منجر به بهینه‌سازی تولید برق می‌شود.[۸]

در آزمون استفاده از پاشش آب روی سطح فتوولتاییک به‌منظور خنک‌سازی آن، براساس گزارش‌های ارائه شده با افزایش ۱۰ درجه‌یی دما (از ۳۵ به ۴۵ درجه)، بازدهی حدود ۱۱٪ کاهش می‌یابد. بنابراین کنترل فتوولتاییک در این محدوده حائز اهمیت است.[۹]

در استفاده از ماده‌ی تغییر فاز تجارتی RT۲۵ برای خنک‌کردن پنل‌های فتوولتاییک، به‌دلیل پایین‌بودن ضریب هدایت حرارتی این ماده، در داخل فضای محفظه‌ی ماده‌ی تغییر فاز از پره استفاده شد. نتیجه‌ی این تحقیق نشان می‌دهد که دمای پنل دارای ماده‌ی تغییر فاز در مقایسه با پنل بدون آن تا $30^{\circ}C$ کاهش یافته است.[۱۰]

در پژوهشی دیگر، از پنج ماده‌ی تغییر فاز با دمای ذوب $24 \pm 4^{\circ}C$ و گرمای نهان ذوب $140\text{-}213\ kJ/kg$، برای کنترل دمایی سلول فتوولتاییک استفاده شد. محققین در این مطالعه بر جرم و هدایت حرارتی ماده‌ی تغییر فاز تمرکز داشتند. با مقایسه‌ی نتایج، کلسیم‌کلرید به‌عنوان بهترین ماده برای پایین نگاه‌داشتن دما در مدت طولانی‌تر شناخته شد.[۱۱]

در پژوهش حاضر آزمایش خنک‌سازی سلول فتوولتاییک توسط مواد تغییر فاز و در شرایط جوی واقعی انجام شده است. تا پیش از این، مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی و در شرایط مصنوعی (تابش توسط چراغ شبیه‌ساز خورشید و داخل آزمایشگاه) انجام شده است. ابعاد سلول‌های مورد آزمایش در مطالعات پیشین معمولاً کم‌تر از $10\ cm$ گزارش شده ولی در این پژوهش $60 \times 50\ cm$ است. با توجه به این که دمای بهینه برای عملکرد سلول فتوولتاییک $25^{\circ}C$ است، برای کنترل دمایی آن باید ماده‌یی با دمای ذوب $25^{\circ}C - 30$ مورد استفاده قرار بگیرد. طی پژوهش‌های انجام گرفته برای یافتن ماده‌ی تغییر فاز مناسب و موجود در کشور، پلی‌اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ (PEG۱۰۰۰) با دمای ذوب $35^{\circ}C - 40$ انتخاب شد.

۲. شرح دستگاه و روش آزمایش

خواص فیزیکی PEG۱۰۰۰ مورد استفاده در جدول ۲ آمده است. برای انجام آزمایش دو پنل خورشیدی یکسان با ظرفیت ۴۰ W، ساخت شرکت ولتامکس خریداری و مواد تغییر فاز در پشت یکی از آنها جاسازی شد. آزمایش ظهرهنگام ــ زمانی که شدت تابش خورشید بیشینه بود ــ و در دو زاویه‌ی صفردرجه و پانزده درجه نسبت به سطح زمین انجام گرفت. با توجه به قرارگیری ایران در

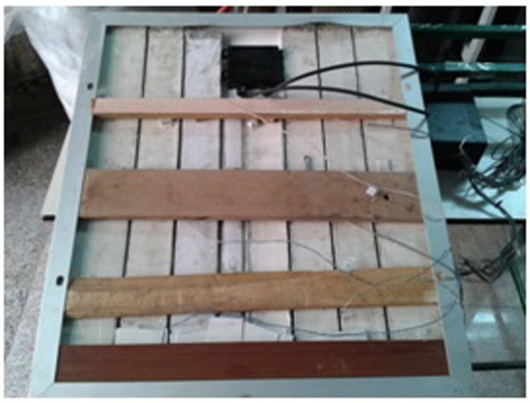
جدول ۲. خواص پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰.

ΔT_m ($^{\circ}C$)	ΔH_m (J/kg)	k (W/m.$^{\circ}C$)	ρ (kg/lit)
۳۵ – ۴۰	۱۵۸۹۹۲	۰/۲۳	۱/۰۹۲۷

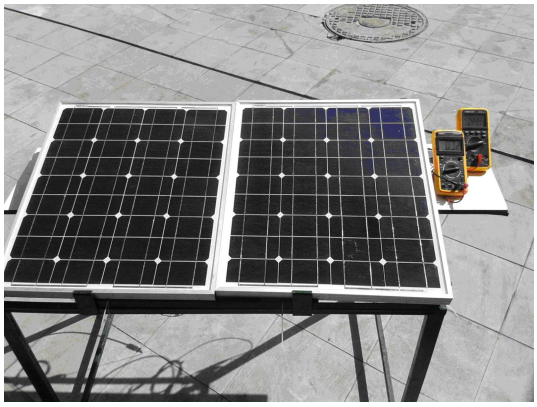
نیمکره‌ی شمالی، روی پنل به سمت جنوب قرار گرفت. طبق مطالعات انجام گرفته برای کشورهایی که در نیمکره‌ی شمالی قرار دارند، برای به دست آوردن تقریبی بهترین زاویه‌ی نور خورشید برای فصول گرم، باید عرض جغرافیایی منطقه را از عدد ۲۰ کم کرد. با توجه به این که تهران در عرض ۳۵ درجه واقع شده، زاویه ۱۵ درجه انتخاب شد.[۱۲] آزمایشات از تاریخ ۲۸ مرداد تا ۱۲ شهریور ۹۲ انجام شد. در شکل‌های ۱ تا ۳، به‌ترتیب تصویر پنل به‌همراه محفظه‌ها، تصویر پنل در حال آزمایش، و نیز شماتیک محفظه‌ی حاوی ماده‌ی تغییر فاز نشان داده شده است.

با شروع آزمایش و در بازه زمانی هر ۵ دقیقه ۳۲ نقطه دما روی سطوح، ۱۲ نقطه‌ی پشت پنل‌ها و نیز مقادیر ولتاژ جریان مدار باز و اتصال کوتاه، و حالت بیشینه‌ی این دو ثبت می‌شد. روی هر پنل ۱۵ نقطه‌ی دمایی متقارن انتخاب شده بود و پشت هر پنل نیز ۶ نقطه‌ی متقارن برای ثبت دما انتخاب شد که میانگین این نقاط به‌عنوان دمای هر پنل در آن بازه زمانی معرفی می‌شد. محل‌های اندازه‌گیری دما در شکل ۴ نشان داده شده است. توان بیشینه نیز از حاصل ضرب جریان و ولتاژ بیشینه به دست می‌آید. برای ثبت این دماها از دو نوع دماسنج استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دمای پشت از شش سنسور نوع Pt-۱۰۰ و برای ثبت دماهای سطح از دماسنج لیزری استفاده شد. ذکر این نکته ضروری است که تمامی سنسورها و دماسنج لیزری توسط یک دماسنج جیوه‌یی کالیبره شده‌اند.

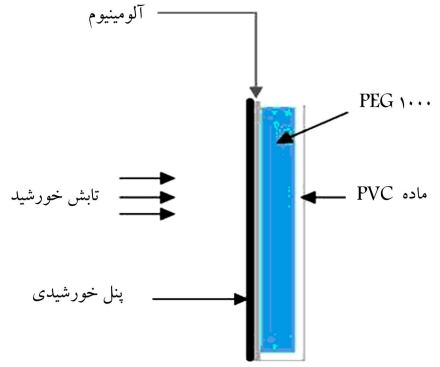
برای به دست آوردن ولتاژ و جریان بیشینه باید این مقادیر در حالت مداربسته و در حضور مقاومت متغیر اندازه‌گیری، و طوری تنظیم شود که در هر زمان اندازه‌گیری، مقاومت داخلی سلول برابر با مقاومت خارجی (متغیر) باشد. این کار به‌کمک یک



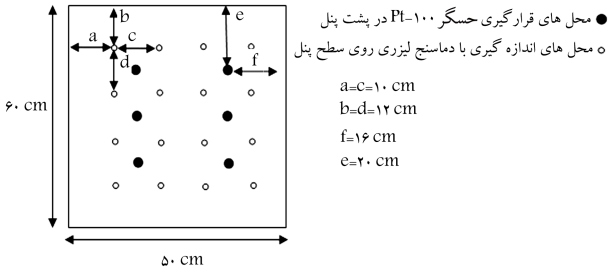
شکل ۱. تصویر پشت پنل دارای محفظه، حاوی ماده تغییر فاز.



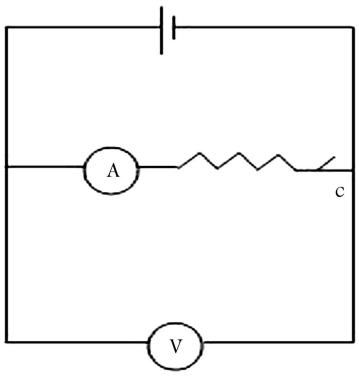
شکل ۲. پنل‌های خورشیدی در حالت آزمون.



شکل ۳. شماتیک محفظه از نمای جانبی.



شکل ۴. محل‌های اندازه‌گیری دما در پشت و جلو پنل.



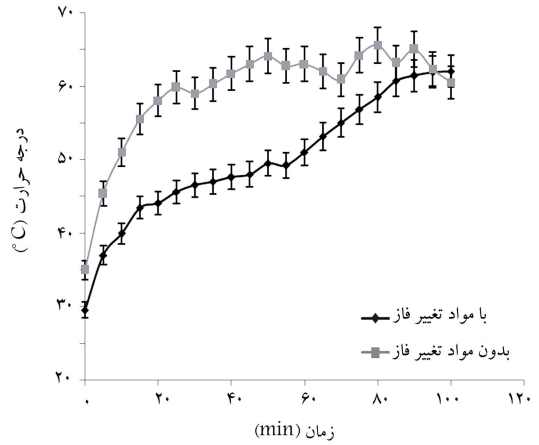
شکل ۵. مدار الکتریکی پنل و سایر تجهیزات اندازه‌گیری.

المنت و با آزمون و خطا مشخص شد. اندازه‌گیری ولتاژ و جریان نیز براساس مدار شکل ۵ انجام گرفت.

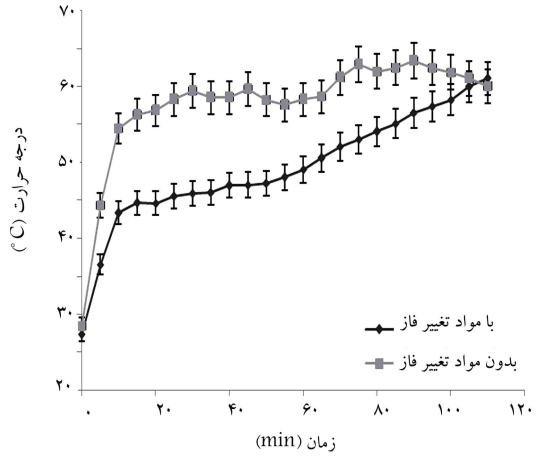
در شروع هر بازه اندازه‌گیری کلید C باز بوده و مقادیر ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه اندازه‌گیری می‌شد. پس از آن با وصل شدن این کلید، مقاومت یا المنت وارد مدار می‌شود تا بتوان ولتاژ و جریان را در حالت بیشینه اندازه گرفت.

۳. جمع‌بندی

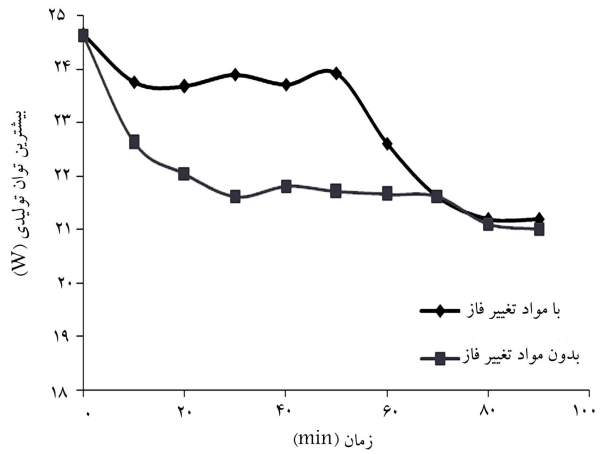
در شکل ۶ توزیع دما برای حالت افقی نشان داده شده است. براین اساس دمای پنلی که در آن ماده‌ی تغییر فاز به کار نرفته با شروع آزمایش با شیب تندی افزایش یافته تا به حالت نسبتاً پایداری برسد و پس از آن با شیب کم‌تری نوسان در آن اتفاق می‌افتد. دلیل این نوسانات سرعت باد در لحظات مختلف است که موجب خنک‌سازی مقطعی در برخی زمان‌ها و به میزان کمی شده است. اما درمورد سلولی که دارای



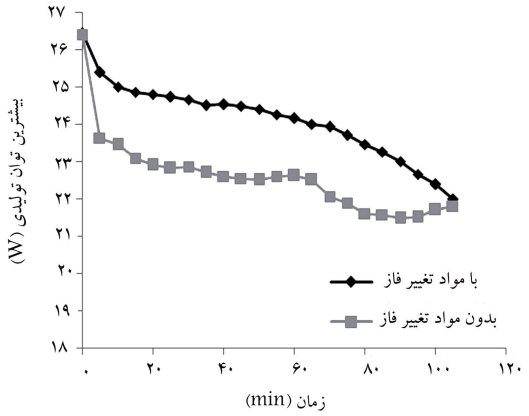
شکل ۶. مقایسه‌ی دمای دو پنل در دو حالت بدون ماده‌ی تغییر فاز و با ماده‌ی تغییر فاز در حالت افقی.



شکل ۷. مقایسه‌ی دمای دو پنل در دو حالت بدون ماده‌ی تغییر فاز و با ماده‌ی تغییر فاز، با زاویه‌ی ۱۵ درجه.



شکل ۸. مقایسه‌ی توان خروجی پنل در حالت بدون ماده‌ی تغییر فاز و با ماده‌ی تغییر فاز در حالت افقی.



شکل ۹. مقایسه‌ی توان خروجی پنل در حالت بدون ماده تغییر فاز و با ماده تغییر فاز در زاویه‌ی ۱۵ درجه.

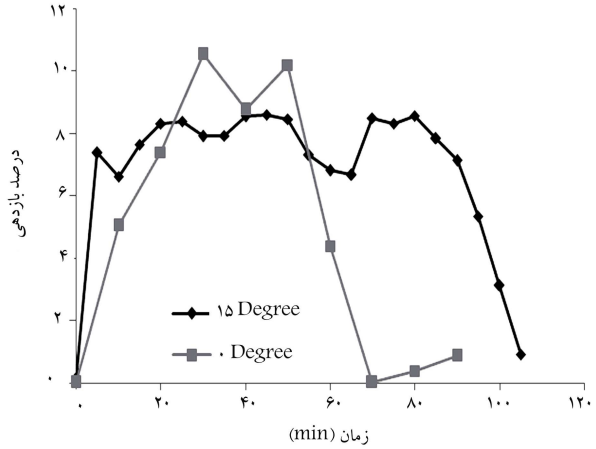
ماده‌ی تغییر فاز است این نوسان‌ها بسیار کم‌تر اتفاق افتاده است. وجود ظرفیت حرارتی بزرگ ماده‌ی تغییر فاز در پشت پنل از این نوسانات دمایی جلوگیری می‌کند.

در شکل ۷ نمودار دما برحسب زمان برای زاویه‌ی ۱۵ درجه نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود اختلاف دمای ایجاد شده نسبت به حالت قبل بیشتر است. با شروع آزمایش و پس از جهش دما و رسیدن به دمای حدود $40^{\circ}C$ آثار ماده‌ی تغییر فاز بر پنل ظاهر می‌شود. تفاوت این نمودار با نمودار قبل در منحنی ذوب پنل است که علاوه بر این که روند بهتر و منطقی‌تری طی کرده، اختلاف دمای بیشتری با پنل بدون ماده تغییر فاز دارد. در آزمایش حالت زاویه‌دار (۱۵ درجه نسبت به سطح زمین)، پنل دارای ماده‌ی تغییر فاز مدت زمان بیشتری نسبت به همان پنل در آزمایش افقی دمای سلول را ثابت نگه داشته است. یعنی فرایند ذوب مدت زمان بیشتری به طول انجامیده است. دلیل این امر را می‌توان در انتقال حرارت در محفظه عنوان کرد. با شروع فرایند ذوب و با توجه به شیب کمی که محفظه دارد، لایه‌های مایع ذوب شده به‌صورت جریانی آرام، شروع به حرکت به سمت پایین کرده و این حرکت موجب انتقال حرارت به‌صورت جابه‌جایی می‌شود و نهایتاً منجر به بهبود گرمارسانی به لایه‌های جامد زیرین شده است. با توجه به این که ما در طول سال روزانه حدود ۷ الی ۸ ساعت تابش مفید داریم برای افزایش بازدهی زمان خنک‌سازی باید سیستمی برای جذب گرمای ذخیره شده در مواد تغییر فاز، و تبدیل آن به آب گرم تعبیه شود، که این امر توسط نگارندگان انجام شده و نتایج آن منتشر خواهد شد.

در شکل‌های ۸ و ۹ تفاوت بیشینه توان خروجی دو پنل در دو حالت افقی و ۱۵ درجه نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود توان تولیدی سلول کنترل شده با ماده‌ی تغییر فاز در هر دو حالت افقی و زاویه‌دار بیشتر است. بیشترین میزان آن برای پنل افقی ۲۳٫۸ وات و برای پنل زاویه‌دار ۲۴٫۸۵ وات است. مقایسه‌ی دو نمودار نشان می‌دهد که در نمودار حالت افقی افت بازدهی از دقیقه‌ی ۵۵ به بعد با شیب قابل توجهی کاهش یافته اما در نمودار حالت زاویه‌دار این اتفاق نیفتاده است. دلیل این موضوع با دقت در نمودارهای دمای دو سلول (شکل‌های ۶ و ۷) مشخص می‌شود. براساس آنچه که گفته شد چون انتقال حرارت و به تبع آن خنک‌سازی در حالت زاویه‌دار بهتر انجام شده، بازدهی تولید برق نیز در همین حالت (زاویه‌دار) بهتر بوده است.

نکته‌ی دیگری که از این نمودارها درمی‌یابیم افزایش توان در حالت زاویه‌دار است که دلیل آن افزون بر خنک‌سازی بهتر، بهبود زاویه‌ی تابش خورشید بر سطح پنل و جذب طول موج‌های مناسب‌تر و بیشتر و درنتیجه افزایش تولید زوج الکترون و حفره‌ی بیشتر است.

با تعریف بازدهی نسبی، که در آن دو پنل در شرایط یکسان نسبت به هم



شکل ۱۰. بازدهی نسبی دو پنل در طول زمان در حالت افقی و ۱۵ درجه.

اندازه‌گیری می‌شوند، خواهیم داشت:

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{MP with PCM} - \text{MP without PMC}}{\text{MP without PCM}} \qquad (۱)$$

که در آن MP مقدار توان بیشینه است.

در شکل ۱۰ نتیجه‌ی ترسیم این فرمول و مقایسه‌ی دو پنل در طول زمان در دو حالت افقی و ۱۵ درجه نشان داده شده است. بیشترین میزان اثر ماده‌ی تغییر فاز برای حالت افقی ۱۰٫۵٪ از زمان شروع تا زمان حدود ۶۰ دقیقه است؛ یعنی در زمانی که هنوز ماده‌ی تغییر فاز به‌طور کامل ذوب نشده است. اما درمورد سلول با زاویه‌ی ۱۵ درجه محدوده‌ی بیشترین عملکرد ماده‌ی تغییر در طول زمان نسبت به حالت افقی افزایش یافته است به‌طوری که از زمان شروع تا ۸۵ دقیقه بعد عملکرد ماده ادامه داشته و بیشینه مقدار آن ۸٫۵٪ است. دلیل این امر جاری شدن ماده‌ی مایع شده و ایجاد انتقال حرارت جابه‌جایی در پنل است. همچنین افزایش دوباره‌ی بازدهی پس از رسیدن به صفر در حالت افقی ممکن است ناشی از حضور تکه‌هایی به‌صورت جامد در این حالت باشد که مجدداً بر جذب گرما تأثیر گذاشته‌اند.

۴. نتیجه‌گیری

طی این پژوهش یک سامانه‌ی خنک‌کننده توسط مواد تغییر فاز برای سلول فتوولتاییک ساخته شد. نتایج نشان‌گر آن است که خنک‌سازی سلول فتوولتاییک اثر قابل توجهی بر میزان الکتریسیته‌ی تولیدی آن خواهد داشت به‌نحوی که با کاهش دمای سلول از میانگین ۶۲°C به ۴۷°C می‌توان به افزایش بیش از ۸٪ دست یافت. همچنین تغییر در زاویه‌ی سلول نسبت به سطح زمین منجر به بهبود در توزیع انتقال حرارت خواهد شد. زیرا منجر به یک انتقال حرارت جابه‌جایی در محفظه‌ها می‌شود که این امر باعث بهبود و افزایش انتقال حرارت به لایه‌های زیرین جامد ماده‌ی تغییر فاز می‌شود. ضمن این که در این حالت به‌دلیل جذب بیشتر طیف‌های خورشید، برق تولیدی نیز بیشتر از حالت افقی خواهد بود. با توجه به نتایج حاصل و این که این مواد انرژی گرمایی را در خود ذخیره کرده و قابلیت استفاده از این انرژی را به‌راحتی فراهم می‌سازند، توسعه و استفاده از این مواد برای خنک‌سازی و ذخیره‌ی انرژی به‌طور همزمان پیشنهاد می‌شود. همچنین به‌منظور بهینه‌سازی و مقرون به‌صرفه بودن سیستم به‌لحاظ ماده‌ی تغییر فاز مصرفی می‌توان این سیستم را با یک سیستم گردش آب به‌طور موازی یکپارچه کرد تا پس از ذوب شدن ماده‌ی تغییر فاز، با جریان یافتن آب، هم آب گرم تولید شود و هم ماده‌ی تغییر فاز دوباره به حالت جامد برگردد.

تقدیر و تشکر

در پایان از واحد پژوهش و فنّاوری سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت و معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس به‌دلیل حمایت مالی از این پروژه تشکر و قدردانی می‌شود.

پانوشت‌ها

1. phase change material
2. n-eicosane
3. heat sink

منابع (References)

1. Biwole, P., Eclache, P. and Kuznik, F. “Improving the performance of solar panels by the use of phase-change materials”, *World Renewable Energy Congress*, Sweden (2011).
2. Weng, Z.J. and Yang, H.H. “Primary analysis on cooling technology of solar cells under concentrated illumination”, *Journal of Energy Technology*, **29**(1), pp. 171-174 (2008).
3. Radziemska, E. “The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells”, *Renewable Energy*, **28**(1), pp. 1-12 (2003).
4. Hasan, A., McCormack, S.J., Huang, M.J. and Norton, B. “Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaic”, *Solar Energy*, **84**(9), pp. 1601-1612 (2010).
5. Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R. and Buddhi, D. “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(2), pp. 318-345 (2009).
6. Tan, F.L. and Tso, C.P. “Cooling of mobile electronic devices using phase change materials”, *Applied Thermal Engineering*, **24**(2-3), pp. 159-169 (2003),
7. Fok, S.C., Shen, W. and Tan, F.L. “Cooling of portable hand-held electronic devices using phase change materials in finned heat sinks”, *International Journal of Thermal Sciences*, **49**(1), pp. 109-117 (2009).

8. Teo, H.G., Lee, P.S. and Hawlader, M.N.A. "An active cooling system for photovoltaic modules", *Applied Energy*, **90**(1), pp. 309-315 (2011).
9. Moharram, K.A., Abd-Elhady, M.S., Kandil, H.A. and El-Sherif, H. "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling", *Ain Shams Engineering Journal*, (2013).
10. Huanga, M.J., Eames, P.C. and Norton, B. "Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics", *Solar Energy*, **80**(9), pp. 1121-1130 (2011).
11. Hasan, A., McCormack, S.J., Huang, M.J. and Norton, B. "Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaic", *Solar Energy*, **84**(9), pp. 1601-1612 (2010).
12. http://solarelectricityhandbook.com/solar-angle-calculator.html