Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(6) (2020) 387-390
DOI: 10.22060/mej.2019.14777.5949

Using Polyethylene Glycol, as a Phase Change Material and Fins for the Cooling of Photovoltaic Cells of the Crystalline Type

M. Firoozzadeh[1], A. H. Shiravi [1]*, M. Shafiee[2]

[1] Department of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran
[2] Department of Chemical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

ABSTRACT: Photovoltaic (PV) technology is one of the most popular methods to produce power. In hot days of the year, when the maximum irradiation of sun is available, the efficiency of PV cells falls down and the cells must be kept cool. In this paper, Polyethylene-Glycol 600 (PEG-600) is used as a phase change material (PCM) is in order to decrease the temperature of PV cells. Moreover, to enhance the heat transfer rate, adding some fins was investigated. The panel equipped with PCM, reached the same temperature as the conventional panel at the last 80 mins of the test, nevertheless, the panel equipped with both PCM and fins, at the end of the experiment, had still about 9°C temperature difference compared with the conventional panel. Furthermore, the maximum efficiency difference between the conventional panel and the one with PCM and the panel with PCM + fins, were about 2.4 % and 4.6 %, respectively. This means that adding fins, plays an important role to increase the efficiency by controlling the cell temperature due to increase the heat exchange between the panel and PCM. Finally, an economical assessment is also presented to verify the industrial feasibility of the proposed prototypes.

Review History:

Received: 8 Aug. 2018
Revised: 4 Dec. 2018
Accepted: 27 Dec. 2018
Available Online: 15 Jan. 2019

Keywords:

Phase change material
Photovoltaic
Fin
Economical feasibility

1. Introduction

Nowadays, environmental protection and efforts to reduce the pollution caused by industrial activities on one hand and researches in order to find novel and optimal ways to generate energy from the other hand, have become one of the important concerns of governments all around the world. Photovoltaic (PV) technology is one of the most global accepted method to produce power. However, increasing the temperature of these cells, causes to decrease their power generation. Different methods are offered to cool PV cells e.g. Nanofluids [1-3], thermo-electric [4, 5], wind blowing [6], etc. Moreover, using Phase Change Material (PCM) is another common way to absorb the heat of PV cells.

Stritih [7] carried out both numerical and experimental studies on using RT28HC with melting point of 28°C as PCM behind the panel in order to increase the efficiency. The results showed that the uppermost temperature difference between the panels with and without PCM, was up to 36°C. Sharma et al. [8] used RT40 behind PV panel under constant irradiation of 1000 W/m2. They showed the electrical efficiency increasing of 13.7 %. Vaseline was used as PCM, by Indartono et al. [9]. This study was located in Indonesia by two identical 10 W panels and the increase of 21.6 % in efficiency was illustrated.

In this paper we focused on enhancing the thermal potential of PCM, by using a number of aluminum fins, in order to decrease the temperature of PV panels. Furthermore, a financial assessment of proposed prototypes is presented.

*Corresponding author's email:Ahshiravi@yahoo.com

2-PCM Selection

Because the temperature of 25°C is known as the best operating temperature for PV panels, Polyethylene-Glycol 600 (PEG 600) with the melting range of 23-26°C was selected as PCM. PEG-600 is a non-toxic and odorless material and has a wide industrial applications. The thermo-physical properties of PEG-600 are presented in Table 1.

Table 1. Thermo-physical properties of PEG 600

Melting range (°C)	Density (kg/m^3)	Viscosity (m^2/s)	Latent heat of fusion (kJ/kg)
23-26	1125	10.8	146

3-Experimental Procedure

Three similar 60-Watt polycrystalline PV modules, made by Yingli Solar Company, have been tested in the photovoltaic laboratory of Jundi-shapur University of Technology, Dezful. In order to observe the effect of using PCM and fins, three prototypes were studied as follows:

Prototype 1: Conventional PV panel,

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Fig. 1. Schematics of (a) prototype 2 and (b) prototype 3

Prototype 2: PV panel with PCM behind it,
Prototype 3: PV panel integrated with both PCM and aluminum fins.
Figure 1, shows a schematic picture of prototypes 2 and 3.

In prototype 3, 10 longitudinal aluminum fins with thermal conductivity of 204 W/mK were used. The experiment was carried out in an indoor condition which both ambient temperature and irradiation were adjustable by using three identical 1-kW projectors. In this study, temperature and irradiation were fixed on 85°C and 630 W/m2, respectively.

Fig. 2. The variation of (a) Temperature, (b) Efficiency and (c) Power during time.

4-Results and Discussion

In this paper, the effect of both PEG-600 as a phase change material and fins, in order to control the temperature of PV panels have been presented. All tests were carried out in 270 minutes and finally, results were compared together. To achieve accurate results of the experimental data, each test was performed twice.

The variation of temperature, efficiency and power are illustrated in Figure 2. In this figure, temperature is plotted against time. As expected, the cell temperature is increased and both efficiency and power are decreased. However, the temperature of the third prototype which is integrated with PCM and fins is less than the other prototypes, and consequently caused to be more efficient.

In order to provide a better presentation of temperature difference between prototype 2 and 3 with prototype 1, Figure 3 is plotted. This figure reveals that in the last 90 minutes of the experiment, prototype 2 took the same temperature with prototype 1. However, prototype 3 kept a temperature difference of 9°C with two other prototypes at the end of the test.

Fig. 3. Temperature difference between prototype 2 and 3 with prototype 1

Finally, the Financial Estimation (F.E.) of proposed cases is presented in Figure 4. In this figure, the vertical axis is in Iranian Rials (IRR).

The financial estimation, illustrates that prototype 3, has appropriate performance compared with the others.

Fig. 4. Financial estimation of proposed prototypes

5-Conclusions

In this paper, experimental and cost analyses of using PEG-600 as PCM and fins were studied. The results showed that prototype 3 has a better performance for controlling the temperature of PV panel. Moreover, the mentioned prototype has a suitable results from the financial view point.

References

[1] M. Firoozzadeh, A.H. Shiravi, M. Shafiee, Experimental Study on Photovoltaic Cooling System Integrated With Carbon Nano Fluid, Journal of Solar Energy Research, 3(4) (2018) 287-292.

[2] M. Ghadiri, M. Sardarabadi, M. Pasandideh-fard, A.J. Moghadam, Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids, Energy Conversion and Management, 103 (2015) 468-476.

[3] M. Hosseinzadeh, M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, Energy and exergy analysis of nanofluid based photovoltaic thermal system integrated with phase change material, Energy, 147 (2018) 636-647.

[4] A.N. Kane, V. Verma, Performance enhancement of building integrated photovoltaic module using thermoelectric cooling, International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 3(2) (2013) 320-324.

[5] G. Li, X. Chen, Y. Jin, Analysis of the Primary Constraint Conditions of an Efficient Photovoltaic-Thermoelectric Hybrid System, Energies, 10(1) (2017) 20.

[6] J.K. Kaldellis, M. Kapsali, K.A. Kavadias, Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece, Renewable Energy, 66 (2014) 612-624.

[7] U. Stritih, Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM, Renewable Energy, 97 (2016) 671-679.

[8] S. Sharma, N. Sellami, A. Tahir, K. Reddy, T.K. Mallick, Enhancing the performance of BICPV systems using phase change materials, in: AIP Conference Proceedings, AIP Publishing, 2015, pp. 110003.

[9] Y.S. Indartono, A. Suwono, F.Y. Pratama, Improving photovoltaics performance by using yellow petroleum jelly as phase change material, International Journal of Low-Carbon Technologies, 11(3) (2016) 333-337.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۶، سال ۱۳۹۹، صفحات ۱۵۵۱ تا ۱۵۶۰
DOI: 10.22060/mej.2019.14777.5949

استفاده از پلی اتیلن گلایکول به عنوان ماده تغییر فاز دهنده و پره جهت خنک کاری سلول‌های فتوولتائیک از نوع کریستالی

محمد فیروززاده[۱]، امیرحسین شیروی[۱*]، مجتبی شفیعی[۲]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایـران.
۲- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایـران.

خلاصه: امروزه استفاده از منابع تجدیدپذیر، جزء روش‌های جذاب در تولید الکتریسیته محسوب می‌شود. فناوری فتوولتائیک، یکی از این روش‌ها در تولید برق است. در روزهای گرم سال که بیش‌ترین میزان تابش خورشید در دسترس است، به دلیل بالا رفتن دما، بازدهی سلول‌ها کاهش می‌یابد. در این مقاله، به منـظور کاهش دمای سلول‌های فتوولتائیک، استفاده از پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰ به عنوان ماده تغییر فاز دهنده مورد مطالعه قـرار گرفته است. به علاوه، به منظور انتقال بهتر حرارت از سطح پنل و افزایش نرخ ذوب ماده، نصب پره نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج، نشان دهنده‌ی تاثیر مثبت وجود پره بر کنترل دمای پنل فتوولتائیک است. بر اساس نمودارهای ترسیم شده می‌توان دریافت که پنل حاوی ماده تغییر فاز دهنده، در حدود ۸۰ دقیقه‌ی انتهایی آزمایش، دمای یکسانی با پنل عادی داشته است و پنل حاوی ماده تغییر فاز دهنده و پره، حتی در انتهای آزمایش نیز اختلاف دمای حدود ۹ درجه سانتی گراد را نسبت به پنل عادی حفظ کرده بود. به علاوه، بیشینه‌ی اختلاف بازدهی بین پنل حاوی ماده تغییر فاز دهنده و پنل با ماده تغییر فاز دهنده به همراه پره با پنل عادی، به ترتیب حدود ۲/۴ ٪ و ۴/۶ ٪ بوده است. بدین معنا که وجود پره، به دلیل افزایش مقدار تبادل حرارت بین پنل و ماده تغییر فاز دهنده، توانسته است نقش خوبی در افزایش بازدهی و کنترل دمای پنل ایفا کند. در انتها و به منظور امکان سنجی اقتصادی و صنعتیِ طرح پیشنهادی، برآورد اقتصادی از این طرح نیز ارائه شده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۷
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۹/۱۳
پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵

کلمات کلیدی:
ماده تغییر فاز دهنده
فتوولتائیک
ذخیره حرارت
پره

۱- مقدمه

امروزه حفظ محیط زیست و تلاش برای کاهش آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های صنعتی از طرفی و پـژوهش در یافتـــن روش‌هایی جدید و بهینه برای تامین انرژی از طرف دیگر، به یکی از دغدغه‌های دولت‌ها در سراسر جهان تبدیل شده است. تحقیقات بر مباحث مرتبط با انرژی‌های نو، از مهم‌ترین و محبوب‌ترین مباحث در حوزه‌ی علم انرژی است. عمده‌ی این پژوهش‌ها به بهینه سازی و افزایش راندمان تولید برق در نیروگاه‌های تجدیدپذیر تولید برق معطوف می‌شود. به دلیل اینکه در تمام سطح کره زمین، نور خورشید در دسترس است، تولید برق توسط نیروگاه‌های فتوولتائیک، در بسیاری از مناطق کره زمین انجام می‌شود.

یکی از مشکلات پیش روی این صنعت، وجود نسبت عکس برق تولیدی و دمای سطح پنل است به طوری که هر میـزان دما افـزایـش یابد، راندمان کاهش خواهـد یافت. روش‌های مختلفی برای کاهش دمای سطح پنل‌های فتوولتائیک به کـار گرفته شده است کـه اصلی‌ترین این روش‌ها خنـک کاری توسط نانـو سیالات [۶-۱]، خنک کاری با استفاده از پاشش آب [۷ و ۸]، استفاده از ترمو الکتریک [۱۱-۹] و استفاده از مواد تغییر فاز دهنده هستند. بهره گیری از مواد تغییر فاز دهنده به دلیل عدم نیاز به نگه داری، تنوع بسیار گسترده‌ی مواد قابل استفاده، اقتصادی بودن و عدم نیاز به مصرف انرژی برای خنک کاری، بیش‌تر مورد مطالعه‌ی محققین قرار گرفته است.

تـاکنـون تحقیقات زیادی بر تاثیر افزایش دما در کاهش راندمان پنل‌های فتوولتائیک انجام شده است. این تحقیقات کاهش حدود ۰/۵ درصدی در بازدهی الکتریکی را بازای هر یک درجه سانتی‌گراد افزایش دمای پنل‌ها نشان داده‌اند [۱۲ و ۱۳]. علاوه بر کاهش راندمان، بالا بودن دمای پنل‌ها می‌تواند موجب کاهش عمر و همین‌طور خرابی آن‌ها نیز شود.

تایواری و همکاران [۱۴]، با انجام یک آزمایش در فصل تابستان، به بررسی تاثیر افزایش دما بر بازدهی پنل‌های فتوولتائیک پرداختند. آن‌ها با رسم نمودار تغییرات دما و بازدهی در طول روز، نشان دادند که در میانه‌ی روز که دمای هوا بیشینه است، کمترین بازدهی را داریم.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Ahshiravi@jsu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

آتکین و فرید [۱۵] نیز به افزودن گرافیت به RT۴۰ و استفاده در پشت پنل فتوولتائیک پرداختند که به موجب آن رسانش حرارتی RT۴۰ از ۰/۲۵ W/m.K بـه ۱۶/۶ W/m.K افزایش یافت.

اسمیت و همکاران [۱۶] با انجام آزمایشاتی در زمینه‌ی کاربرد ماده تغییر فاز دهنده[1] در پشت پنل در اقلیم آب و هوایی غرب مکزیک، افزایش ۶ ٪ را در راندمان الکتریکی گزارش دادند. ایندارتونو و همکاران [۱۷] با استفاده از وازلین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در اقلیم آب و هوایی اندونزی، افزایش ۲۱/۶ ٪ در بازدهی پنل فتوولتائیک گزارش دادند. در کار آن‌ها از دو عدد پنل ۱۰ واتی استفاده شده بود. راجارام و سیواکومار [۱۸] از سولفات مس ۵ آبه[2] در پشت پنل استفاده کردند. این ماده توانست حدود ۲ ساعت دمای پنل را در حدود ۴۰ درجه، ثابت نگه دارد.

حسن و همکاران [۱۹] به مقایسه‌ی استفاده از دو ماده تغییر فاز دهنده با دو نقطه ذوب متفاوت پرداختند. آن‌ها از کاپریک پالمیک اسید با نقطه ذوب حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد و کلسیم کلراید ۶ آبه با نقطه ذوب حدود ۲۲ درجه سانتی‌گراد استفاده نمودند. این آزمایش در شهر دوبلین، پایتخت کشور ایرلند انجام شد. نشان داده شد که در هنگام استفاده از کاپـریک پالمیک اسید، ۱۶ درجه سانتی‌گراد و هنگام استفاده از کلسیم کلراید ۶ آبه به میزان حدود ۲۱ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای محیط، اختلاف دما ایجاد شده بـود. ماهامودول و همکاران [۲۰] از RT۳۵ در اقلیم آب و هوایی مالزی استفاده نمودند و نشان دادند که با وجود اینکه دمای محیط حدود ۵۳ درجه سانتی‌گراد بود، دمای پنل، حدود ۴ ساعت در دمای ۴۲ درجه سانتی‌گراد باقی مانده بود.

شارما و همکاران [۲۱] نیز از RT۴۰ در یک محیط آزمایشگاهی استفاده نمودند که افزایش بازدهی الکتریکی ۱۳/۷ ٪ را نسبت به حالتی که از ماده تغییر فاز دهنده استفاده نمی‌شود نشان دادند. در این پژوهش، دمای محیط حدود ۵۹ درجه سانتی‌گراد بوده و آزمایش تحت تابش ثابت ۱۰۰۰ وات بر مترمربع انجام شده بود.

در هیچ کدام از پژوهش‌های پیشین، مطالعه‌ای تجربی و یا عددی بر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در بیشینه‌ی دمای کارکرد پنل‌ها یافت نشد. از این‌رو، در این پژوهش، شرایط دمایی طوری تنظیم شده است که پنل‌ها در شرایط بیشینه‌ی دمای کارکرد خود (۸۵ درجه سانتی‌گراد) قرار گیرند. در مقاله‌ی حاضر، بررسی تغییرات دما و بازدهی برای سه حالت مختلف از پنل‌های فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفته است. این حالات شامل پنل عادی، پنل به همراه ماده تغییر فاز دهنده و پنلی که علاوه بر ماده تغییر فاز دهنده از پره نیز در آن استفاده شده است، می‌باشند.

۲- انتخاب ماده تغییر فاز دهنده

ماده تغییر فاز دهنده، به ماده‌ای اطلاق می‌شود که پتانسیل ذخیره‌ی حرارت را از طریق گرمای نهـان داشتـه باشد. این مواد از حیث دستـــه‌بندی شیمیایی، گستره‌ی وسیعی را شامل می‌شوند. نمک‌های هیدراته، اسیدهای چرب، پارافین‌ها، بسیاری از هیدروکربن‌ها، الکل‌های شیرین، نیترات‌ها، فقط بخشی از موادی هستند که تـا به امـروز به عنوان ماده‌ی تغییر فاز دهنده مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۱ نشان دهنده‌ی لیستی از موادی است که دارای نقطه ذوبی در حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد هستند. هدف از گردآوری ایـــن لیست، این بـــود که غالبـا دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به عنوان بهترین دمای کارکرد پنل‌های فتوولتائیک معرفی می‌شـــود. از جدول ۱، پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰ انتخاب شد. تصویر این ماده در دو حالت مایع و جامد، در شکل ۱ نشان داده شده است و خواص ترموفیزیکی این ماده در جدول ۲ ذکر شده‌اند. به طور کلی پلی اتیلن گلایکول‌ها غیرسمی، بی بو، روان‌کننده، غیرفرار، خنثی و ضدسوزش هستند و دارای کاربردهای صنعتی متنوعی نظیر کاربرد در چسب‌ها، سرامیک‌ها، خمیر و کاغذ، آبکاری فلزات، روان‌سازها، کشاورزی و شوینده‌ها می‌باشند. پلی اتیلن گلایکول‌ها دارای انواع مختلفی هستند که با عددی که در مقابل نام آن‌ها نوشته می‌شود،

جدول ۱: مواد مناسب برای استفاده در این پژوهش به عنوان ماده تغییر فاز دهنده
Table 1. Suitable materials for this study in order to use as PCM

ماده	نقطه ذوب (°C)	گرمای نهان ذوب (kJ/kg)	مرجع
n-Octadecane	۲۷/۷	۲۱۰	[۲۲]
$Mn(No_3)_2 . 6H_2O$	۲۵/۸	۱۲۵/۹	[۲۳]
Polyethylene glycol 600	۲۳-۲۶	۱۴۶	[۲۴]
Mystric acid + capric acid $C_{14}H_{28}O_2$ + $C_{10}H_{20}O_2$ 34% , 66%	۲۴	۱۴۷/۷	[۲۵]
D-lattic acid	۲۶	۱۸۴	[۲۱]
$CaCl_2 . 6H_2O$	۲۹	۱۸۸/۳۴	[۲۶]

1 Phase Change Material (PCM)
2 Copper sulphate. 5H2O

شکل ۱ پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰ در دو حالت مایع و جامد
Fig. 1. Poly Ethylene Glycol (PEG) 600 in solid and liquid states

از یکدیگر متمایز می‌شوند. این عدد، نشان دهنده‌ی متوسط جرم مولکولی آن‌ها می‌باشد.

جدول ۲ خواص ترمو فیزیکی پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰
Table 2. Thermo-physical properties of PEG 600

خواص	مقدار
نقطه ذوب (°C)	۲۳-۲۶
چگالی (kg/m^3)	۱۱۲۵
گرمای نهان ذوب (kJ/kg)	۱۴۶
لزجت سینماتیکی (m^2/s)	۱۰/۸

۳- فناوری فتوولتائیک

۳-۱- سلول‌های فتوولتائیک

سلول‌های فتوولتائیک، از موادی موسوم به نیمه هادی‌ها ساخته می‌شوند. نیمه هادی‌ها دارای رسانشی بین مواد عایق و مواد رسانا هستند. نیمه هادی‌ها قادرند تا بخشی از نور دریافت شده از خورشید را به الکتریسیته تبدیل کنند. غالبا از سیلیکون به عنوان نیمه هادی در پنل‌های فتوولتائیک استفاده می‌شود [۲۷]. تاکنون انواع بسیار مختلفی از سلول‌های فتوولتائیک ساخته و روانه‌ی بازار شده‌اند. عمده‌ی تفاوت آن‌ها در نوع مواد افزودنی است که به نیمه هادی اضافه می‌شود.

پنل‌های فتوولتائیک دارای انواع مختلفی هستند که هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود هستند. پنل‌های مونو کریستال و پلی‌کریستال از مهمترین و پرکاربردترین انواع پنل‌های فتوولتائیک، خصوصا در کاربردهای نیروگاهی هستند. پنل‌های مونو کریستال دارای بازدهی بالا در حدود ۱۹-۱۶ درصد هستند و از سیلیکون خالص تولید می‌شوند و به همین دلیل دارای قیمت نسبتا بالایی هستند. در تولید پنل‌های پلی کریستال از موادی به عنوان ناخالصی در سیلیکون استفاده می‌شود که بازدهی آن‌ها را مقداری کاهش می‌دهد. بازدهی این نوع پنل‌ها حدود ۱۷-۱۴ درصد است و قیمت آن‌ها نیز از نوع مونوکریستال کمتر است.

۳-۲- روابط ریاضی

به منظور یافتن مقدار تغییرات بازده پنل‌ها، نیاز است تا داده‌های دریافت شده از دیتالاگر را به همراه مولفه‌های ذکر شده در جدول ۳ مورد استفاده قرار دهیم. فرمول کلی برای محاسبه‌ی بازده لحظه‌ای پنل‌های فتوولتائیک، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{oc}.I_{sc}.FF}{A.G} \quad (۱)$$

که در آن G ، مقدار تشعشع تابیده شده به سطح پنل فتوولتائیک است و بر حسب W/m^2 بیان می‌شود. A نیز مساحت سطح سلول‌های فتوولتائیکِ به کار رفته در پنل بر حسب m^2 است. به علاوه، V_{oc} ولتاژ مدار باز بر حسب ولت و I_{sc} جریان اتصال کوتاه بر حسب آمپر می‌باشند. FF مولفه‌ای است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$FF = \frac{V_{mp}.I_{mp}}{V_{oc}.I_{sc}} \quad (۲)$$

که در آن V_{mp} و I_{mp} نیز مولفه‌های الکتریکی هستند که از دیتالاگر به‌دست می‌آیند.

۴- شرح دستگاه آزمایش

مجموعه‌ای شامل سه پنل یکسان، در آزمایشگاه فتوولتائیک دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. شکل ۲ نشان دهنده‌ی شماتیک پنل‌های حاوی ماده تغییر فاز دهنده است. پنل‌ها از نوع پلی کریستال با توان ۶۰ وات بوده و ساخت شرکت

شکل ۲ شماتیکی از پنل‌های مورد استفاده؛ (الف) نمونه ۲، (ب) نمونه ۳

Fig. 2. A view of PV panel (a) prototype 2 and (b) prototype 3

Yingli Solar چین می‌باشند.

جدول ۳ نشان دهنده‌ی اطلاعات کامل الکتریکیِ پنل‌های تحت آزمایش است. همانطور که در این جدول قابل مشاهده است، بیشینه‌ی دمای کاری، ۸۵ °C ذکر شده است که این رقم تقریبا در کاتالوگ تمامی شرکت‌های سازنده پنل، عددی یکسان و ثابت است.

جدول ۳: مولفه های الکتریکی پنل فتوولتائیک مورد استفاده در این آزمایش

Table 3. Electrical parameters of PV modules

مولفه‌های پنل	واحد	مقدار
شرکت سازنده	-	Yingli Solar
توان خروجی	W	۶۰
بازدهی نامی	٪	۱۴/۴
بیشینه دمای کارکرد	°C	۸۵
ولتاژ در بیشینه توان (V_{mp})	V	۱۸/۴۷
جریان در بیشینه توان (I_{mp})	A	۳/۲۵
ولتاژ مدار باز (V_{oc})	V	۲۲/۸۶
جریان اتصال کوتاه (I_{sc})	A	۳/۴۴

به منظور مشاهده‌ی تاثیر استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و پره، آزمایش‌هایی بر سه پنل به شرح زیر انجام شد:

نمونه اول: پنل عادی که هیچگونه تغییری در آن اعمال نشده بود.

نمونه دوم: پنلی که پشت آن از پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰ به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده شد.

نمونه سوم: علاوه بر پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰، به خاطر افزایش تبادل حرارتی پنل و ماده تغییر فاز دهنده، از پره نیز در پشت پنل استفاده شد.

در هر کدام از نمونه‌های دوم و سوم، از ۸/۵ کیلوگرم پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰ استفاده شده است. دلیل انتخاب این جرم از ماده آن است که در مقالات مرتبط با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده درون محفظه‌های بسته، توصیه شده است به منظور در نظر گرفتن تغییرات حجم ماده در هنگام تغییر فاز، حداقل ۱۵ درصد از حجم محفظه خالی نگه داشته شود. در این آزمایش نیز پس از اندازه‌گیری حجم محفظه پشت پنل و دانستن چگالی ماده (جدول ۲)، مقدار جرمی ماده‌ی قابل افزودن به درون محفظه اندازه‌گیری شد و پس از کسر ۱۵ درصد، به مقدار ۸/۵ کیلوگرم برای پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰ رسیدیم.

تعداد ۱۰ عدد پره طولی به عرض ۴ سانتی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر، در پشت صفحه‌ی سومین پنل، استفاده شده است. پره‌ها از جنس آلومینیوم با ضریب رسانش حرارتی $\frac{W}{m.K}$ ۲۰۴ می‌باشند.

ایده‌ی استفاده از پره از آن‌جا پدید آمد که در برخی پژوهش‌ها مشاهده می‌شد که بخشی از ماده تغییر فاز دهنده‌ی پشت پنل، پس از اتمام فرایند شارژ، به حالت جامد باقی می‌ماند [۲۸].

جامد ماندن بخشی از ماده بدین معناست که از کل ظرفیت ماده

شکل ۳ (a)پنل با پره و (b) پنل بدون پره

Fig. 3. PV modules (a) with fins (b) without fins

جدول ۴- مشخصات حسگرهای دمایی مورد استفاده
Table 4. Thermal sensors properties

تعداد	نوع	حداقل دمای قابل اندازه‌گیری (°C)	حداکثر دمای قابل اندازه‌گیری (°C)	دقت اندازه‌گیری (°C)
۴	One-wire DS 18B20	-۵۰	۱۵۰	۰/۰۱

برای جذب گرمای پنل استفاده نشده است. دلیل ذوب نشدن بخشی از ماده تغییر فاز دهنده آن است که به دلیل پایین بودن ضریب رسانش حرارتی در بسیاری از مواد تغییر فاز دهنده، حرارت سطح پنل نمی‌توانست تا عمق بیش‌تری از ماده نفوذ کند و بدین ترتیب بخشی از ماده تغییر فاز دهنده جامد باقی می‌ماند. شکل ۳، نشان دهنده‌ی پنل‌های بدون پره و با پره است.

برای پنل سوم که شامل پره می‌باشد، به دلیل اینکه از چسبیده شدن لبه‌ی پره‌ها به سطح پشتی پنل اطمینان حاصل کنیم، از چسب سیلیکون استفاده شده است. این چسب دارای ضریب هدایت حرارتی بالایی است که موجب می‌شود فاصله‌ی اندک میان پره و پنل پر شود و رسانش حرارتی بهتری داشته باشیم.

در این آزمایش از سه عدد پروژکتور تنگستنی به‌جای نور و گرمای خورشید استفاده شده است که توان هر پروژکتور ۱۰۰۰ وات می‌باشد. مزیت انجام آزمایش به این صورت، آن است که می‌توان با تغییر فاصله‌ی پروژکتور از پنل، آزمایش را با شرایط نورانی و دمایی متفاوتی به انجام رساند. در این آزمایش، پروژکتورها در فاصله‌ی عمودی ۵۰ سانتی‌متری از سطح پنل تنظیم شدند. دلیل تعیین این فاصله، آنست که ما به دنبال فاصله‌ای بودیم که دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد را در سطح پنل تامین کند. پس از آزمایش بر روی چند فاصله مختلف و اندازه‌گیری دما، مشخص شد که با تنظیم فاصله ۵۰ سانتی‌متری بین پروژکتور تا سطح پنل، این شرایط دمایی دلخواه ایجاد می‌شود. از دستگاه سولاریمتر از نوع TES-۱۳۲ جهت اندازه‌گیری مقدار تشعشع وارد شده از پروژکتور به سطح پنل، استفاده شد و این دستگاه، مقدار تابش ۶۳۰ W/m^2 را در شرایط توصیف شده، نشان داد.

از حسگرهای نوع one-wire DS-۱۸B۲۰ که ضد آب هستند استفاده شده است. این حسگرها بر اساس مقدار دمایی که احساس می‌کنند، یک پالس دیجیتال به دستگاه مرکزی ارسال می‌کنند. دستگاه مرکزی، این پالس‌ها را به عدد – که همان دما است – تبدیل می‌کند و بر صفحه نمایشگر نشان می‌دهد. دیگر اطلاعات مربوط به حسگرها در جدول ۴ ذکر شده‌اند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، آزمایش و مقایسه بین سه حالت مختلف از پنل‌های فتوولتائیک انجام شد. توصیف شرایط آزمایش و چگونگی محاسبه و استخراج نتایج در قسمت‌های پیشین بیان شد. مدت زمان انجام تمامی آزمایش‌ها ۲۷۰ دقیقه (۴/۵ ساعت) بوده است و برای اطمینان از صحت داده‌های بدست آمده، هر آزمایش دو تا سه بار تکرار شد که نتایج این سه آزمایش با هم تطابق داشتند. در شکل ۴، نمودارهای دما، بازدهی و توان بر حسب زمان برای تشعشع ۶۳۰ وات بر مترمربع ترسیم شده‌اند. در این فاصله، دمای دریافتی سطح پنل از جانب پروژکتورها، ۸۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. همانطور که در شکل ۴ مشخص است، با گذشت زمان، دمای پنل‌ها افزایش پیدا کرده تا به حالت پایا رسیده‌ایم. با مقایسه‌ی شکل‌های ۴-الف و ۴-ب، کاملا مشخص است که افزایش دما برای هر پنل، به کاهش بازدهی آن پنل منجر شده است.

۵-۱- دمای سطح پنل

از شکل ۴-الف، مشخص است که پس از گذشت یک بازه زمانی از شروع آزمایش، تقریبا به حالت پایا رسیده‌ایم و تغییرات دمایی چندانی مشاهده نمی‌شود.

برای بهتر نشان دادن تاثیر مثبت نمونه‌های ۲ و۳ نسبت به حالت عادی، شکل ۵ رسم شده است. این شکل اختلاف دمای ایجاد شده بین نمونه‌های ۲ و ۳ را با نمونه ۱ نشان می‌دهد. نمونه ۲، پس از گذشت مدت زمانی حدود ۲۰۰ دقیقه از شروع آزمایش، تقریبا با پنل عادی هم دما شده است در حالی که نمونه ۳ حتی در ۲۰ دقیقه‌ی پایان آزمایش نیز توانسته است اختلاف دمای حدود ۹ درجه سانتی‌گراد را با پنل عادی داشته باشد.

از این شکل مشخص است که نمونه ۲ توانسته تا ۱۸/۶ درجه سانتی‌گراد، اختلاف دما با پنل عادی ایجاد کند و نمونه ۳ در مقایسه با پنل عادی، تا ۳۴/۱ درجه سانتی‌گراد اختلاف دما ایجاد

شکل ۴: نمودارهای (الف) دما، (ب) بازدهی و (ج) توان بر حسب زمان برای پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰

Fig. 4. The graph of (a) temperature (b) efficiency (c) power versus time for PEG-600

کرده است.

۵-۲- بازدهی

در شکل ۴-ب ، نمودار تغییرات بازدهی در طول زمان رسم شده است. همانطور که پیش بینی می‌شد، با گذشت زمان و افزایش دمای پنل‌ها، بازدهی آن‌ها کاهش می‌یابد. در این‌جا نمودار اختلاف بازدهی ترسیم شده است تا نشان دهیم در طول مدت زمان آزمایش، اختلاف بازدهی الکتریکی میان نمونه‌های ۲ و ۳ ، با نمونه ۱ چگونه است. این تفاضل بازدهی در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، حداکثر مقدار اختلاف بازدهی بین حالات ۱ و ۲ مقدار ۲/۴۵ ٪ و بین حالات ۱ و ۳ مقدار ۴/۶۵ ٪ است.

۵-۳- توان خروجی

شکل ۵: اختلاف دمای ایجاد شده بین نمونه‌های ۲ و ۳ با نمونه ۱

Fig. 5. Temperature difference between prototypes 2 and 3 with prototype 1

شکل ۶ :اختلاف بازدهی ایجاد شده بین نمونه‌های ۲ و ۳ با نمونه ۱

Fig. 6. Efficiency difference between prototypes 2 and 3 with prototype 1

طبق نتایجی که در شکل ۴-ج مشخص است، پس از گذشت حدود ۱۷۰ دقیقه از شروع آزمایش، توان خروجی هر سه پنل، تقریبا نصف مقدار نامی شده است. بدین معنا که در چنین شرایط دمایی، تنها نیمی از توان نامی پنل در حال استفاده است که نشان دهنده‌ی کاهش بسیار چشمگیری در تولید برق پنل‌هاست.

۵-۴- ارتباط میان دما و بازده

هدف اصلی از پژوهش حاضر، بررسی تاثیر تغییرات اعمال شده بر دما و در نهایت بازدهی است. به همین دلیل، در شکل ۷، ارتباط میان این دو پارامتر، بر روی یک نمودار نشان داده شده است.

همانگونه که انتظار می‌رفت، دقیقا با همان نرخی که دما افزایش می‌یابد، بازدهی کاهش یافته است. نکته‌ی دیگری نیز که از شیب این نمودارها قابل استنباط است، این است که شیب تغییرات در نمونه ۱، سریع‌تر از نمونه ۲ و نمونه ۲ نیز سریع‌تر از نمونه ۳ به افقی شدن (رسیدن به حالت پایا) میل می‌کند. در شکل ۷-ج که از پره در کنار ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است، نمودارهای

شکل ۷. ارتباط میان دما و بازدهی برای (الف) نمونه ۱ (ب) نمونه ۲ (ج) نمونه ۳

Fig. 7. . Temperature and efficiency dependency of (a) prototype 1 (b) prototype 2 (c) prototype 3

بازدهی و دما، حتی تا انتهای آزمایش هم در برابر پایا شدن مقاومت می‌کنند و همین امر، یکی از نشانه‌های تاثیر مثبت استفاده از پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰ به همراه پره در این آزمایش است. لازم به ذکر است که شیب منحنی‌های ترسیم شده در شکل ۷، کاملا با پژوهش انجام شده توسط تایواری و همکاران [۱۴] تطابق دارد.

۵-۵-تحلیل و برآورد اقتصادی

رویکرد اصلی در این پژوهش، امکان سنجی علمی کاهش دمای پنل‌های فتوولتائیک توسط پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰ بوده است که شرح جزئیات و نتایج حاصل از آن در قسمت‌های پیشین بیان شد. در این قسمت، به رویکردی اقتصادی از کاربرد پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰ جهت کنترل دمای پنل‌های فتوولتائیک پرداخته شده است.

جدول ۵ نشان دهنده‌ی هزینه‌ی اجزای به کار رفته در سه نمونه‌ی موجود در این پژوهش است. هزینه‌ی تک تک اجزا و همین‌طور جمع کل هزینه‌ها برای سه نمونه‌ی تحت آزمایش محاسبه شده‌اند. لازم به ذکر است که تمامی قیمت‌های ذکر شده در این جدول بر حسب تومان هستند.

به منظور تحلیل اقتصادیِ طرح ارائه شده، نمودار شکل ۸ ترسیم شده است. این نمودار، در چند زمان مختلف از آزمایش، نسبت هزینه‌ی تمام شده برای هر پنل را به توان الکتریکی تولید شده توسط آن پنل نشان می‌دهد. در این نمودار، اعدادِ روی محور عمودی بر حسب (تومان/وات) هستند. یعنی بازای هر یک وات برق تولید شده، چه مقدار هزینه شده است. پس در هر زمان، هر کدام از نقاطِ روی منحنی‌ها که پایین‌تر باشد، نشان دهنده‌ی اقتصادی‌تر بودن آن نمونه نسبت به سایر نمونه‌هاست. مشاهده می‌شود که با گذشت زمان،

جدول ۵. لیست هزینه برای نمونه‌های تحت آزمایش (تمامی قیمت‌ها به تومان هستند)

Table 5. Cost list for tested prototypes

	پنل فتوولتائیک	پره آلومینیومی	ماده تغییرفازدهنده	محفظه پشت پنل برای ماده	جمع کل (تومان)
نمونه ۱	۳۴۰/۰۰۰	–	–	–	۳۴۰/۰۰۰
نمونه ۲	۳۴۰/۰۰۰	–	۴۰/۰۰۰	۱۵/۰۰۰	۳۹۵/۰۰۰
نمونه ۳	۳۴۰/۰۰۰	۱۲/۰۰۰	۴۰/۰۰۰	۱۵/۰۰۰	۴۰۷/۰۰۰

شکل ۸. برآورد مالی از نمونه‌های تحت آزمایش در زمان‌های مختلف

Fig. 8. Financial estimation of all prototypes in different times

نقاط روی منحنی شکل ۸ به یکدیگر نزدیک می‌شوند.

لازم به یادآوریست که این آزمایش‌ها تحت بیشینه‌ی دمای کارکرد پنل‌ها انجام شده‌اند و این تحلیل اقتصادی نیز تحت همین شرایط بحرانی صورت پذیرفته است. بعلاوه اینکه آزمایش‌های ذکر شده تحت شرایط شبیه سازی شده انجام شده‌اند و در واقعیت، هیچ‌گاه مدت زمان طولانی از روز، پنل‌ها تحت دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد قرار نمی‌گیرند. بیشینه‌ی دمای روز، مربوط به ظهر است و همان دمای بیشینه نیز کمتر از یک ساعت پایدار خواهد بود.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده و بررسی نقش پره در کاهش دمای پنل‌های فتوولتائیک به منظور افزایش بازدهی آن‌ها به صورت تجربی مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

به دلیل اینکه بهترین دمای کارکرد برای پنل‌های فتوولتائیک ۲۵ درجه سانتی‌گراد است، از پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰ که دارای نقطه ذوب در محدوده ۲۳ تا ۲۶ درجه سانتی‌گراد است استفاده شد.

بر اساس داده‌های بدست آمده از انجام آزمایش و محاسبه‌ی بازدهی، تاثیر مثبت استفاده از پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰ به همراه پره در کنترل دما و افزایش بازدهی پنل‌های فتوولتائیک اثبات شد. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- در نمونه ۳ که به طور همزمان از پره و ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده بود، به دلیل اینکه دمای سطح پنل می‌تواند تا عمق بیش‌تری از ماده تغییر فاز دهنده نفوذ کند، کاهش دما و در نتیجه افزایش بازدهی بیش‌تری را نسبت به پنل عادی شاهد هستیم.

۲- بیش‌ترین اختلاف دمای بین نمونه‌های ۳ و ۲ با نمونه ۱ به ترتیب ۳۴/۱و ۱۸/۶ درجه سانتی‌گراد بوده است.

۳- بیش‌ترین اختلاف بازدهی بین نمونه ۳ و نمونه ۲ با نمونه ۱ به ترتیب ۴/۶۵ ٪ و ۲/۴۵ ٪ بوده است.

۴- در هنگامی که دمای پنل به بیش از ۷۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، توان آن به حدود نصف کاهش خواهد یافت که علاوه بر کاهش برق تولیدی، عمر پنل را نیز به شدت کاهش خواهد داد.

۵- برآورد اقتصادی مربوط به این پژوهش نیز انجام شد. این برآورد هزینه بر حسب توان خروجی پنل‌ها در طول زمان صورت پذیرفت و نشان داد تغییرات پیشنهاد شده در این پژوهش از حیث اقتصادی نیز به‌صرفه هستند.

هدف اصلی این مقاله نشان دادن تاثیر استفاده از پلی اتیلن گلایکول ۶۰۰ به همراه پره در میزان بازدهی پنل‌های فتوولتائیک برای دماهای بالا بوده است. در بخش‌های ۵-۱ تا ۵-۳، تغییرات دما، بازدهی و توان در طول زمان ترسیم و تشریح شد. در شکل ۷، به منظور بهتر نشان دادن ارتباط بین دما و بازدهی، این دو مولفه در طول زمان، بـر روی یک نمودار ترسیم شده‌اند. همانطور که کاملا مشخص است، در تمامی حالت‌های رسم شده، با همان شیبی که دما افزایش می‌یابد، بازدهی کم می‌شود. نکته‌ی دیگری که راجع به شیب این نمودارها می‌توان دریافت، این است که شیب نمودار مربوط به نمونه ۱، سریع‌تر از نمونه ۲ و نمونه ۲ هم سریع‌تر از نمونه ۳، به افقی شدن میل می‌کند. افقی شدن منحنی، نشان دهنده‌ی پایا شدن آن‌هاست. در شکل ۷-ج که منحنی تغییرات دما و بازدهی، حتی تا انتهای آزمایش نسبت به افقی شدن مقاومت می‌کند، نشان دهنده‌ی

تاثیر مثبت تغییرات اعمال شده در پنل است.

علائم انگلیسی

A	مساحت، m^2
G	تابش دریافتی از خورشید، W/m^2
V	ولتاژ، V
I	جریان، A
P	توان، W
T	دما، ^oC
PCM	ماده تغییر فاز دهنده
PV	فتوولتائیک

علائم یونانی

η	بازدهی، ٪

زیرنویس

OC	مدار باز
SC	اتصال کوتاه
Mp	بیشینه توان

فهرست علائم:

References

[1] M. Firoozzadeh, A.H. Shiravi, M. Shafiee, Experimental Study on Photovoltaic Cooling System Integrated With Carbon Nano Fluid, Journal of Solar Energy Research, 3(4) (2018) 287-292.

[2] O. Rejeb, M. Sardarabadi, C. Ménézo, M. Passandideh-Fard, M.H. Dhaou, A. Jemni, Numerical and model validation of uncovered nanofluid sheet and tube type photovoltaic thermal solar system, Energy Conversion and Management, 110 (2016) 367-377.

[3] M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, M.-J. Maghrebi, M. Ghazikhani, Experimental study of using both ZnO/ water nanofluid and phase change material (PCM) in photovoltaic thermal systems, Solar Energy Materials and Solar Cells, 161 (2017) 62-69.

[4] M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, S.Z. Heris, Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units), Energy, 66 (2014) 264-272.

[5] M. Ghadiri, M. Sardarabadi, M. Pasandideh-fard, A.J. Moghadam, Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids, Energy Conversion and Management, 103 (2015) 468-476.

[6] J.J. Michael, S. Iniyan, Performance analysis of a copper sheet laminated photovoltaic thermal collector using copper oxide–water nanofluid, Solar Energy, 119 (2015) 439-451.

[7] H. Bahaidarah, A. Subhan, P. Gandhidasan, S. Rehman, Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions, Energy, 59 (2013) 445-453.

[8] S. Krauter, Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels, Solar Energy Materials and Solar Cells, 82(1) (2004) 131-137.

[9] A.N. Kane, V. Verma, Performance enhancement of building integrated photovoltaic module using thermoelectric cooling, International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), (2)(2013) 320-324.

[10] J.-S. Choi, J.-S. Ko, D.-H. Chung, Development of a thermoelectric cooling system for a high efficiency BIPV module, Journal of Power Electronics, 10(2) (2010) 187-193.

[11] A. Makki, S. Omer, Y. Su, H. Sabir, Numerical investigation of heat pipe-based photovoltaic–thermoelectric generator (HP-PV/TEG) hybrid system, Energy conversion and management, 112 (2016) 274-287.

[12] S.A. Kalogirou, Y. Tripanagnostopoulos, Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production, Energy conversion and management, 47(18-19) (2006) 3368-3382.

[13] M. Chandrasekar, S. Rajkumar, D. Valavan, A review on the thermal regulation techniques for non integrated flat PV modules mounted on building top, Energy and Buildings, 86 (2015) 692-697.

[14] G. Tiwari, R. Mishra, S. Solanki, Photovoltaic modules and their applications: a review on thermal modelling, Applied energy, 88(7) (2011) 2287-2304.

[15] P. Atkin, M.M. Farid, Improving the efficiency of photovoltaic cells using PCM infused graphite and aluminium fins, Solar Energy, 114 (2015) 217-228.

[16] C.J. Smith, P.M. Forster, R. Crook, Global analysis of photovoltaic energy output

enhanced by phase change material cooling, Applied Energy, 126 (2014) 21-28.

[17] Y.S. Indartono, A. Suwono, F.Y. Pratama, Improving photovoltaics performance by using yellow petroleum jelly as phase change material, International Journal of Low-Carbon Technologies, 11(3) (2016) 333-337.

[18] R. Rajaram, D. Sivakumar, Experimental investigation of solar panel cooling by the use of phase change material, Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences ISSN, 974 (2015) 2115.

[19] A. Hasan, S. McCormack, M. Huang, B. Norton, Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics, Solar Energy, 84(9) (2010) 1601-1612.

[20] H. Mahamudul, M. Silakhori, I.H. Metselaar, S. Ahmad, S. Mekhilef, Development of a temperature regulated photovoltaic module using phase change material for Malaysian weather condition, the journal Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications, 8 (2014) 1243-1245.

[21] S. Sharma, N. Sellami, A. Tahir, K. Reddy, T.K. Mallick, Enhancing the performance of BICPV systems using phase change materials, in: AIP Conference Proceedings, AIP Publishing, 2015, pp. 110003.

[22] E.M. Alawadhi, Thermal analysis of a building brick containing phase change material, Energy and Buildings, 40(3) (2008) 351-357.

[23] K. Nagano, T. Mochida, S. Takeda, R. Domański, M. Rebow, Thermal characteristics of manganese (II) nitrate hexahydrate as a phase change material for cooling systems, Applied thermal engineering, 23(2) (2003) 229-241.

[24] I. Dincer, M. Rosen, Thermal energy storage: systems and applications, John Wiley & Sons, 2002.

[25] G.A. Lane, Low temperature heat storage with phase change materials, International Journal of Ambient Energy, 1(3) (1980) 155-168.

[26] D. Zhou, C.-Y. Zhao, Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, Applied energy, 92 (2012) 593-605.

[27] R. Foster, M. Ghassemi, A. Cota, Solar energy: renewable energy and the environment, CRC Press, 2009.

[28] S. Chandel, T. Agarwal, Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 73 (2017) 1342-1351.