Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(2) (2020) 73-76
DOI: 10.22060/mej.2018.14288.5830

Experimental Investigation of Cooling Performance Enhancement of a Photovoltaic Module Using a Phase Change Material-CuO Nanoparticles

E. Ebrahimi*

Mechanical Engineering Department, Kermanshah Branch of Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

ABSTRACT: In this work, the effect of using the mixture of a phase change material and CuO nanoparticles as a cooling agent on the performance of a photovoltaic module has been investigated experimentally. The phase change material located in a chamber at the backside of the module is cooled with spiral copper tubes. Phase change material due to absorbing a lot of heat from the surface of the module and control the heat capacitance of the system causes to raising its overall efficiency. The effect of CuO nanoparticles concentration (0.5-4% wt.) and the weight of phase change material (1-2.25 kg) on the different parameters such as the surface temperature of the photovoltaic module, increase in maximum power and cooling efficiency have been investigated. Results show that using pure phase change material significantly causes to decrease in the surface temperature of the module from 58.34 ºC to 51.7 ºC. In addition, data depicted that adding CuO nanoparticles to the pure phase change material results in increasing the cooling efficiency and the produced power. Increasing the weight of pure phase change material and the mixture of phase change material -4% CuO from 1 kg to 2.25 kg results in a decrease in the surface temperature of the photovoltaic module from 51.7 ºC to 48.1 ºC and 45 ºC to 42.9 ºC, respectively. In addition, by increasing the nanoparticles in phase change material, cooling efficiency and the produced power are increased and the highest values are 22.87% and 3.46 W attributed to the layout of using 2.25 kg phase change material and 4% CuO.

Review History:

Received: 07/04/2018
Revised: 05/06/2018
Accepted: 17/07/2018
Available Online: 24/07/2018

Keywords:

Phase change material
Photovoltaic
CuO
Cooling

1. INTRODUCTION

Solar energy is considered as one of the renewable energy sources that is always available and does not produce any specific waste [1-3]. The demand for cheap and abundant energy has increased the use of Photovoltaic (PV) systems to generate electricity through solar radiation. There is a direct relationship between the conversion of solar energy to electricity and the surface temperature of photovoltaic modules and maximum efficiency is between 14-17% [4]. The efficiency of PV modules 0.5% decreases per 1°C increase in their surface temperature. Therefore, finding efficient methods for cooling the PV modules in order to remove the high amount of heat from their surface is seriously needed. Some active and passive new methods have been used to enhance the cooling performance of PV modules. Active cooling techniques have high efficiency and lead to high amounts of energy. Passive cooling techniques are divided into three main groups, including passive cooling of the air, passive cooling of the water and conductive cooling. A particular type of passive conductive cooling in PV modules is the use of Phase Change Material (PCM), which has been considered by many authors. PCMs due to their high ability to get plenty of surface temperature of PV modules, help to control the thermal capacity of the system to increase their efficiency [1]. In this study, the effect of using PCM and CuO nanoparticles as a cooling agent on the cooling performance of a PV system has been studied experimentally. Indeed, the innovation of this study is the simultaneous use of CuO nanoparticles and PCM material to cool a photovoltaic module, in which the PCM is cooled by cold water flowing in the spiral copper pipes. In this paper, copper oxide nanoparticles have been added to PCM because of its high thermal conductivity coefficient. In general, the effect of concentration of CuO nanoparticles (0.5-4%wt) and weight of PCM (1.2-25 kg) on different parameters such as module surface temperature, maximum power increase and cooling efficiency of the PV modulus are investigated.

2. EXPERIMENTAL SETUP AND EXPERIMENT PROCEDURES

An experimental setup is built to investigate the effect of PCMs on the efficiency of a PV system. The basic components of the setup used in the present work are consisting of a PV module, a solar simulator, and a reservoir and a data acquisition system. In order to measure the temperature, 9 thermocouples are attached on the surface of the PV module, with an extremely thin layer of a thermal epoxy. A thermometer (Lutron, BTM-4208SD) and an electrical load system connected to the PV electrical output are used to measure and record the data. During the experiments, the electrical load is used to measure PV voltage at different demanded electrical current. The PCM located in a chamber at the backside of the PV module is cooled with copper microchannel tubes. In

*Corresponding author's email: ebrahimi@iauksh.ac.ir

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.

order to cool the PCM, copper channel tubes in which cold water is flowing have been used. The schematic of the cross-section of the PV module and the copper tubes surrounded by PCM-CuO nanoparticles can be seen in Fig. 1.

A solar simulator is fabricated and used to imitate the necessary solar irradiation in the experiment of photovoltaic modules section. In the present study, CuO nanopowder with a diameter of <50 nm (purity, 99.5 %) is supplied by Sigma-Aldrich Company. The density and surface area of CuO nanoparticles are 6300 kg/m^3 and 29m^2/g, respectively. Nanoparticles of CuO are used because of their specific characteristics and high electrical conductivity. The paraffin wax has been used as PCM is supplied by Haya Chemical Company (HCC) in Iran. All the experiments are performed at room temperature (16-17°C).

3. RESULTS AND DISCUSSION

Initially, experiments were performed for the non-cooling system and all data were recorded, including module temperature, voltage, and current. The temperature at most points of the PV module is maintained at approximately 60 minutes reach steady condition and the maximum average temperature for after minute was about 58.4 ºC. In the next step, 1 kg of pure PCM was poured inside the chamber behind the PV module and experiments were repeated to verify the effect of the pure PCM on reducing the surface temperature of the PV module. The experiments were repeated at different concentrations of PCM and CuO nanoparticles. Fig. 2 shows the average temperature variation of the PV modules in the three mentioned states. This figure shows that in the absence of a cooling system, the surface temperature of the PV module was steadily increasing and reached to about 58°C approximately after 65 minutes. However, with regard to the use of pure PCM and the combination of PCM and CuO nanoparticles, the surface temperature of the module decreased significantly and the slope of the temperature increase decreased. After 60 minutes, the surface temperature of the PV module for all three cases was constant and the system was stable.

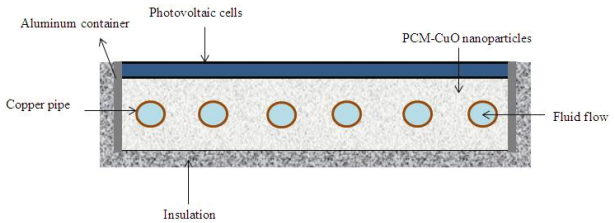


Fig. 1: The schematic of the cross-section of the PV module and the copper tubes surrounded by PCM-CuO nanoparticles.

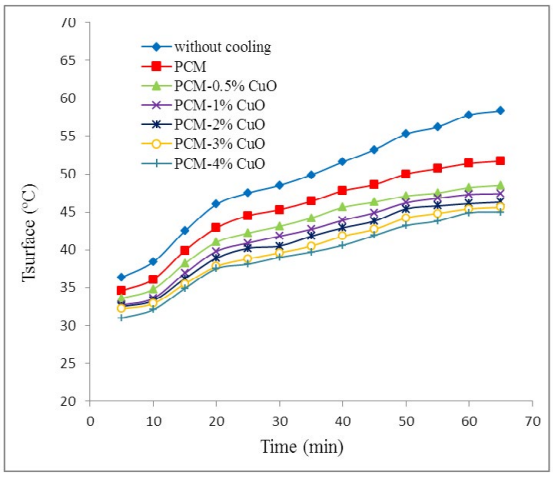


Fig. 2: Variation of the average temperature of the PV module with time for the non-cooling system, using PCM and simultaneous use of PCM and nanoparticles (Q = 1 L/min, W = 1 kg).

The reason for the temperature reduction of the PV module surface by using PCM is the absorption of additional heat from its surface by phase change material. In addition, as shown in Fig. 2, with increasing concentration of CuO nanoparticles, the surface temperature of the PV module is reduced and the best condition is related to the combination of PCM and CuO% 4, which temperature reached to 45 °C. The presence of copper oxide nanoparticles in the phase change material leads to an increase in its thermal conductivity and increases the absorption capacity of the heat. The effect of PCM weight (W=1-2.5 kg) and PCM-% 4CuO nanoparticles was investigated. Initially, by changing W from 1 kg to 1.5 kg, the surface temperature of the PV module decreased with steep gradients and the slope of the temperature changes for W=2 kg is decreased. However, no significant temperature changes for W=2 kg and W=2.5 kg are found, which means that the W=2 kg for both states has a high ability to absorb the heating surface of the PV module. The results showed that increasing the water flow rate caused a decrease in the surface temperature of the PV module. The power output of the PV modules for the PCM+ CuO nanoparticles with different concentrations and for different weights of paraffin wax was investigated. These results show that increasing the concentration of CuO nanoparticles in PCM and increasing the PCM weight leads to an increase in its cooling performance and, as a result, the surface temperature of the PV modules decreases.

4. CONCLUSIONS

In this paper, PCM material is used to cool and reduce the surface temperature of a photovoltaic module. In order to postpone the melting of the PCM material, the copper spiral tubes are placed with a slight distance under the surface of the PV module within the PCM material in the backside of the module and cool water flows from them. The addition of nanoparticles to the PCM leads to an increase in the thermal conductivity and its ability to absorb heat from the PV surface and a decrease in the surface temperature of the PV module. The effect of nanoparticle concentration and PCM weight on different parameters such as module surface temperature, maximum power increase and cooling efficiency of the PV module were investigated. According to the results, the use of pure PCM and the combination of PCM and CuO nanoparticles leads to a decrease in the surface temperature of the module and increase the cooling efficiency and also power output of the photovoltaic module.

REFERENCES

[1] Al-Waeli A., Sopian K., Chaichan MT., Kazem H.A., Hasan HA., Najah Al-Shamani Ali., 2017. " An experimental investigation of SiC nanofluid as a base-fluid for a photovoltaic thermal PV/T system". *Energy Convers Manage,* (142), March, pp. 547–558.

[2] Chandel SS., Agarwal T., 2017. "Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems". *Renew Sustain Energy Review*, (73), February, pp. 1342–1351.

[3] Sardarabadi M., Passandideh-Fard M.,Maghrebi MJ., Ghazikhani M., 2017. "Experimental study of using both ZnO/water nanofluid and phase change material (PCM) in photovoltaic thermal systems". *Sol Energy Mater Sol Cells.* (161), March, pp. 62–9.

[4] Emam M., Ookawara S., Ahmed M., 2017. " Performance study and analysis of an inclined concentrated photovoltaic-phase change material system". *Sol Energy.* (150), July, pp. 229–245. October ,pp. 103: 468–476.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۲، سال ۱۳۹۹، صفحات ۲۸۱ تا ۲۹۶
DOI: 10.22060/mej.2018.14288.5830

بررسی آزمایشگاهی بهبود عملکرد خنک‌سازی یک ماژول فتوولتائیک با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده-نانوذرات اکسید مس

ابراهیم ابراهیمی *

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

خلاصه: در این مطالعه، تاثیر استفاده از ترکیب یک ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس به عنوان عامل خنک‌ساز بر روی عملکرد یک ماژول فتوولتائیک به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. ماده تغییر فاز که در محفظه پشت ماژول قرار گرفته و از طریق میلی‌لوله‌های مارپیچی با آب سرد خنک‌سازی شده است. ماده تغییر فاز دهنده به دلیل دریافت مقدار زیادی ازگرمای سطح ماژول و درنتیجه کنترل ظرفیت حرارتی سیستم به افزایش راندمان آن کمک می‌کند. اثر غلظت نانوذرات اکسید مس (۰/۵ تا ۴ درصد وزنی) و مقدار ماده تغییر فاز (۱/۲۵ تا ۲ کیلوگرم) بر پارامترهای مختلف مانند دمای سطح ماژول، افزایش توان بیشینه و بازده خنک‌سازی ماژول فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده خالص به طور چشمگیری باعث کاهش دمای سطح ماژول از ۵۸/۳۴ °C به ۵۱/۷ °C شده است. همچنین، داده‌ها نشان داد که افزودن نانوذرات اکسید مس به ماده تغییر فاز دهنده خالص منجر به افزایش بازده خنک‌سازی و توان تولیدی از ماژول شده است. افزایش وزن ماده تغییر فاز دهنده خالص وترکیب آن با اکسید مس ۴٪ از ۱ kg به ۲/۲۵ kg منجر به کاهش دمای سطح ماژول به ترتیب از ۵۱/۷ °C به ۴۸/۱ و از ۴۵ °C به ۴۲/۹ °C شده است. همچنین، با افزایش غلظت نانوذرات در ماده تغییر فاز دهنده، بازده خنک‌سازی و مقدار توان تولیدی افزایش یافته و بالاترین مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر ٪۲۲/۸۷ و ۳/۴۶ W مربوط به حالت استفاده از ۲/۲۵ kg ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ می‌باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۱۸
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۳/۱۵
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۵/۰۲

کلمات کلیدی:
مواد تغییر فاز دهنده
فتوولتائیک
اکسید مس
خنک‌سازی

۱- مقدمه

انرژی خورشیدی به عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر محسوب می‌شود که همیشه در دسترس است و ضایعات خاصی تولید نمی‌کند [۳-۱]. تقاضا برای انرژی ارزان و فراوان، استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک[1] برای تولید برق از طریق تابش خورشید را افزایش داده است. کارایی، بهره‌وری و طول عمر ماژول های فتوولتائیک به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر شرایط آب و هوایی مانند سرعت باد، جهت جریان باد و دمای محیط قرار می‌گیرد [۴]. در منابع گزارش شده است که فقط حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد از تابش خورشیدی جذب شده توسط ماژول فتوولتائیک را می‌توان به برق تبدیل کرد و بقیه به عنوان گرما از بین می‌رود [۵]. بین بازده تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته و دمای سطح ماژول‌های فتوولتائیک رابطه مستقیم وجود دارد و حداکثر مقادیر بازدهی بین ۱۴ تا ۱۷ درصد است [۴]. کارایی ماژول‌های فتوولتائیک به ازای هر ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش دمای سطح آن‌ها، ۰/۵ درصد کاهش می‌یابد [۸-۶]. بنابراین، پیدا کردن روش‌های کارآمد برای خنک‌سازی ماژول‌های فتوولتائیک به منظور حذف مقدار بالایی از حرارت از سطح آن‌ها به طور جدی مورد نیاز است.

تعداد زیادی روش‌های جدید فعال[2] و منفعل[3] به منظور افزایش عملکرد و خنک‌سازی ماژول‌های فتوولتائیک استفاده شده است. در روش‌های خنک‌کننده فعال مانند استفاده از اسپری آب [۹] و جت برخوردکننده هیبریدی[4] [۱۰]، به استفاده از یک نیروی محرکه

1 Photovoltaic (PV)

2 Active

3 Passive

4 Hybrid Jet Impingement

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ebrahimi@iauksh.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.

خارجی[1] برای جریان دادن به سیال عامل نیاز دارند. تکنیک‌های خنک‌سازی فعال دارای راندمان بالایی هستند و منجر به تولید مقدار زیاد انرژی می‌شوند. روش‌های خنک‌سازی منفعل به سه گروه اصلی شامل خنک‌سازی منفعل هوا[2]، خنک‌سازی منفعل آب[3] و خنک‌سازی هدایتی[4] تقسیم می‌شوند. یک نوع خاص از خنک‌کننده هدایتی منفعل در ماژول‌هایفتوولتائیک، استفاده از ماده تغییر فاز دهنده[5]است که توسط بسیاری از نویسندگان مورد توجه قرار گرفته است [۱۶-۱۱]. مواد تغییر فاز دهنده به دلیل داشتن توانایی بالا برای دریافت مقدار زیادی ازحرارت سطح ماژول‌های فتوولتائیک و درنتیجه کنترل ظرفیت حرارتی سیستم به افزایش راندمان آن‌ها کمک می‌کند [۱]. معمول‌ترین ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده برای خنک‌سازی ماژول‌های فتوولتائیک واکس پارافین است. واکس پارافین به منظور ذخیره‌سازی حرارت استفاده می‌شود، زیرا دارای ظرفیت بالا برای ذخیره‌سازی گرما در طیف گسترده‌ای از دما بوده و ارزان، غیرسمی و سازگار با محیط زیست است. همچنین، مطالعات زیادی روی خنک‌سازی ماژول‌های فتوولتائیک با استفاده از ترکیب ماده تغییر فاز دهنده با نانومواد انجام شده است.

کارونامورسی[6] و همکاران [۱۷] اثر وجود نانوذرات اکسید مس[7] در پارافین تغییر فاز دهنده روی افزایش هدایت حرارتی آن را بررسی کرده و مشاهده کردند که هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده بهبود یافته است. آنان اظهار داشتند که این مسئله امکان غلبه بر میزان نسبتا کم انتقال حرارت در کاربردهای ذخیره انرژی حرارتی را فراهم کرد.

سردارآبادی[8] و همکاران [۱۸] مطالعه آزمایشگاهی یک مجموعه سیستم حرارتی-فتوولتائیک مبتنی بر نانوسیالاکسید روی[9] با پارافین تغییر فاز دهنده را انجام دادند. نانوسیال در لوله‌هایی که در مخزن ذخیره‌سازی ماده تغییر فاز دهنده قرار داشتند جاری بود. استفاده از این تکنیک خروجی الکتریکی سیستم را نسبت به مدل فتوولتائیک معمولی حدود ٪۱۳ افزایش داده است.

موسوی بایگی و صدر عاملی [۱۹] اثر استفاده از ماده تغییر فاز پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ بر خنک‌سازی و بهبود عملکرد یک پنل فتوولتائیک را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. طبق اظهار این محققین، در این پژوهش برای اولین بار در مقیاس نیمه‌صنعتی از مواد تغییر فاز به عنوان کنترل‌کننده دمای سلول فتوولتاییک استفاده شده است. نتایج آنان نشان داد که این سامانه می‌تواند دمای سطح پنل فتوولتائیک را حدود°C ۱۵کاهش دهد که باعث بهبود راندمان در حدود ٪۸ شد.

ال وائلی[10] و همکاران [۱] اثر استفاده از ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات سیلیسیم کاربید[11] به عنوان ماده تغییر فاز برای خنک‌سازی سیستم حرارتی-فتوولتائیک و بهبود عملکرد آن را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، علاوه بر وجود نانوذرات در ماده تغییر فازدهنده، نانوسیال سیلیسیم کاربید در لوله‌هایی که در مخزن ذخیره‌سازی ماده تغییر فاز دهنده قرار داشتند جاری بود. نتایج نشان داد که استفاده از این تکنیک، منجر به کاهش دمای سطح ماژول شده و بازده حرارتی سیستم را نسبت به مدل فتوولتائیک معمولی حدود ٪۷۲ افزایش داده است.

گستره استفاده از ترکیب مواد تغییر فاز با نانوذرات به تحقیق بیشتر به منظور ارائه بهترین حالت‌ها و روش ممکن برای بهبود خنک‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک و کاهش هزینه‌های انرژی، همراه با افزایش فروش تجاری سیستم‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی نیاز دارد.

در این پژوهش، تاثیر استفاده از ترکیب ماده تغییر فاز و نانوذرات اکسید مس به عنوان عامل خنک‌ساز بر روی عملکرد و خنک‌سازی یک سیستم فتوولتائیک به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. درواقع، نوآوری این تحقیق استفاده همزمان از نانوذرات اکسید مسو ماده تغییر فاز به منظور خنک‌سازی یک ماژول فتوولتائیک است در حالتی که این ترکیب توسط آب خنک‌کننده جاری در میلی لوله‌های مسی مارپیچی، تغییر فاز می‌دهند و خنک می‌شوند. در مراجع زیادی از ترکیب نانولوله‌های کربنی و نانوذراتاکسید آلومینیوم[12]، بوهمیت و ... با آب برای تولید نانوسیال و جهت خنک‌سازی مواد تغییر فاز

1 External Driving Force
2 Air Passive Cooling
3 Water Passive Cooling
4 Conductive Cooling
5 Phase Change Material (PCM)
6 Karunamurthy
7 CuO
8 Sardarabadi
9 ZnO
10 Al-Waeli
11 SiC
12 Al_2O_3

دهنده استفاده شده است. در این مقاله، نانوذرات اکسید مس به دلیل داشتن ضریب هدایت حرارتی بالا، جهت افزایش ضریب هدایت حرارتی پارافین و همچنین برای افزایش ظرفیت جذب حرارت، به آن اضافه شده است. استفاده از میلی لوله‌های مارپیچی برای عبور سیال خنک‌کن به دلیل افزایش سطح انتقال حرارت، نسبت به لوله‌های مستقیم موجود در مراجع دیگر، به عنوان یکی دیگر از نوآوری‌های این مقاله در نظر گرفته می‌شود. همچنین، در هیچ کدام از مراجع بررسی شده در این زمینه، اثر مقدار ماده تغییر فاز دهنده بر عملکرد و خنک‌سازی ماژول بررسی نشده که در این مطالعه این موضوع به طور کامل ارزیابی شده است. به طور کلی، اثر غلظت نانوذرات اکسید مس (درصد وزنی ۰/۵ تا ۴ درصد) و وزن ماده تغییر فاز دهنده (۱/۲۵ تا ۲ کیلوگرم) بر پارامترهای مختلف مانند دمای سطح ماژول، افزایش توان ماکزیمم و بازده خنک‌سازی ماژول فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲- کار آزمایشگاهی

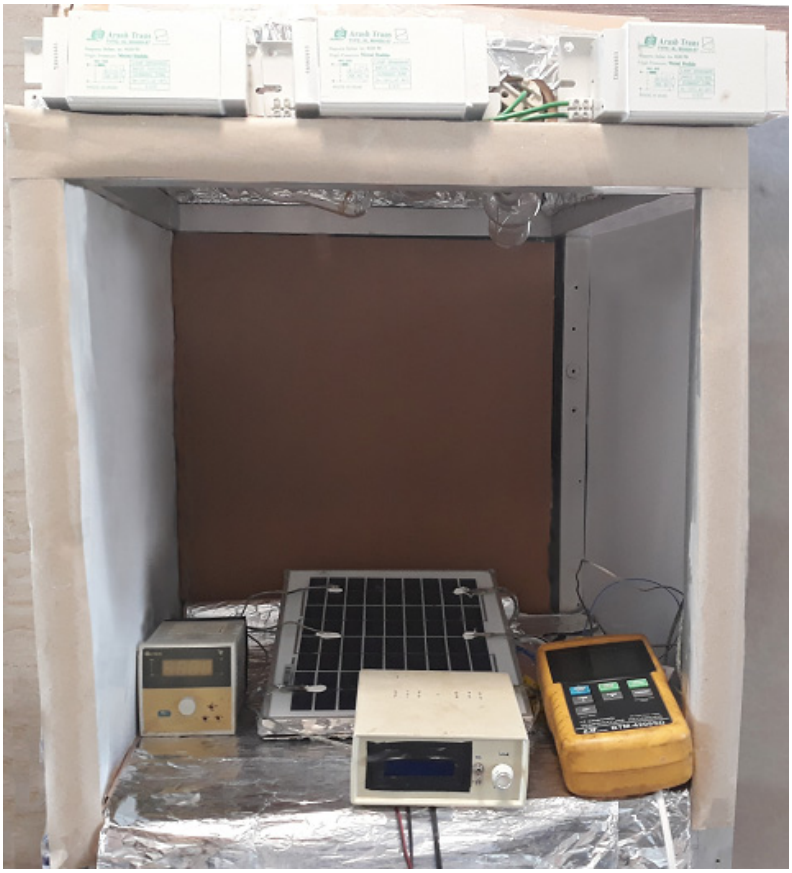
۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

یک سیستم آزمایشگاهی به منظور بررسی اثر ترکیب ماده تغییر فاز دهنده با نانوذرات اکسید مس بر عملکرد ماژول فتوولتائیک ساخته شد که شماتیک آن در شکل ۱ قابل مشاهده است. اجزا اصلی این سیستم عبارتند از: شبیه‌ساز خورشیدی، مخزن آب، سیستم ثبت‌کننده داده‌ها و ماژول فتوولتائیک. یک شبیه‌ساز خورشیدی به منظور تولید تابش خورشیدی لازم طراحی شده است. ایده اولیه ساخت شبیه‌سازی خورشیدی مورد استفاده در این پژوهش، از یک منبع معتبر استخراج شده است [۲۰]. از آنجایی‌که نور خورشید همیشه در دسترس نیست، از ۵ لامپ متال هالید[1] مدل اِچ.آی.دی-تی۴۰۰ دبلیو/دی[2] با توان ۴۰۰ وات به منظور تولید مستمر نور استفاده شده است. همه لامپ‌ها روی سطح یک صفحه آلومینیومی بر روی سقف یک اتاقک متصل شده و در فاصله cm ۶۰ از سطح ماژول قرار گرفته‌اند. در تمامی آزمایشات، قدرت تابش نور از لامپ‌ها ثابت و برابر W/m^2 ۱۰۰۰ تنظیم شده است. به منظور اندازه‌گیری دمای سطح ماژول از یک ترمومتر مدل لوترون، بی.تی.اِم-۴۲۰۸اِس.دی[3] استفاده شد. یک دستگاه الکتریکی[4] به منظور اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها به ماژول فتوولتائیک متصل شده است.

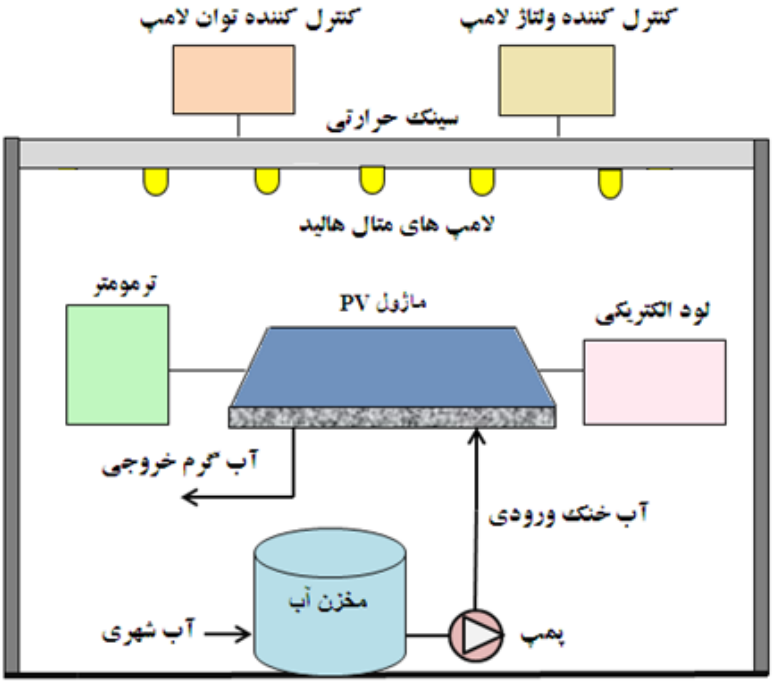
ماژول فتوولتائیک مورد استفاده از مدل زِد.تی۱۰-۱۸-پی، تایوان[5] بوده و درواقع یک ماژول سیلیکونی مونوکریستالی[6] است که شامل ۷۲ سلول بوده که به صورت موازی و سری بهم متصل شده‌اند. ناحیه فعال هر ماتریس در ماژول فتوولتائیک به صورت mm ۳۶×mm ۲۴ است. به منظور اندازه‌گیری دمای سطح ماژول فتوولتائیک، تعداد ۹ ترموکوپل به سطح آن متصل شد. ۵ ترموکوپل به سطح بالایی ماژول و ۴ ترموکوپل به سطح پایینی آن متصل شدند. همچنین دو ترموکوپل به ورودی و خروجی آب خنک‌کن متصل شده و دماهای آب را در ورود به لوله پی.وی.سی[7] پایین و خروج از لوله پی.وی.سی بالایی اندازه می‌گیرند. خطای ترمومتر لوترون، بی.تی. اِم-۴۲۰۸اِس.دی برابر ٪۰/۴± و خطای هر ترموکوپل برابر ºC ۰/۱۵± تا ºC ۰/۲۵± است. شکل ۲ شماتیکی از ماژول فتوولتائیک، ابعاد آن و نحوه قرارگیری ترموکوپل ها را نشان می‌دهد.

به منظور به تعویق انداختن ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده، از میلی لوله‌های مسی که در آن‌ها آب سرد جریان دارد، استفاده شده است. لوله‌های مسی در فاصله ۰/۵ سانتی‌متری از سطح ماژول قرار گرفته و در تماس با آن نیستند و تنها نقش خنک‌کننده ماده تغییر فاز دهنده در حالت مذاب را به عهده دارند. لوله‌های مسی به صورت مارپیچی از دو سر به دو لوله پی.وی.سی متصل شده و در محفظه پشت ماژول قرار گرفته‌اند. درب شیشه‌ای این محفظه طوری ساخته شده که حجم آن را متغیر می‌سازد و می‌توان مقادیر مختلف از وزن ماده تغییر فاز دهنده را تا حداکثر kg ۲/۵ استفاده کرد. شماتیکی از برش عرضی از مجموعه ماژول فتوولتائیک و لوله‌های مسی احاطه شده با ترکیب ماده تغییر فاز دهنده-اکسید مس را می‌توان در شکل ۳ (الف) مشاهده کرد. همچنین، شکل ۳ (ب) نمای بالا از نحوه قرارگیری لوله‌های مسی در محفظه پشت ماژول فتوولتائیک را نشان می‌دهد. آب سرد از مخزن خارج شده و به یکی لوله‌های پی.وی.سی وارد و از لوله دیگر خارج می‌شود. به منظور

1 Metal Halide Lamps
2 HID-T400 W/D
3 Lutron, BTM-4208SD
4 Electrical Load
5 ZT10-18-P ACDC, Taiwan
6 Mono-Crystalline Silicon
7 Polyvinyl Chloride (PVC)



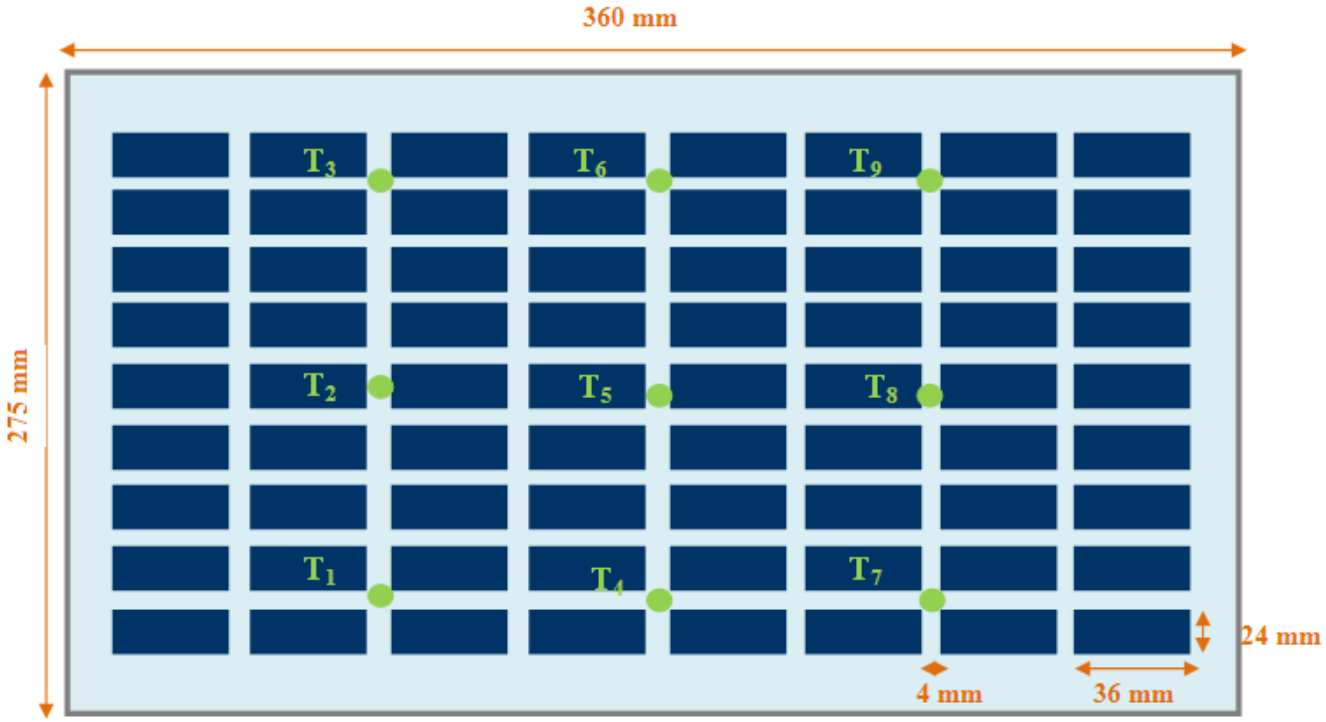
الف)



ب)

شکل ۱: نمایی از سیستم آزمایشگاهی راه‌اندازی شده در این مطالعه. الف) شکل واقعی تجهیزات آزمایشگاهی، ب) شماتیکی از تجهیزات آزمایشگاهی.

Fig. 1: Overview of the experimental set up launched in this study. (A) The actual shape of the set up equipment; (b) a schematic of the set up equipment.



شکل ۲: شماتیک ماژول فتوولتائیک مورد مطالعه و نحوه قرارگیری ترموکوپل‌ها روی سطح آن.

Fig. 2: Schematic of the photovoltaic module studied and positioning of the thermocouples on the surface.

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز مورد استفاده در این مطالعه.

Table 1: Thermophysical Properties of changing Phase Material (PCM) using in this study.

پارامتر	مشخصات نانوذرات اکسید مس
کشور سازنده	شرکت سیگما آلدریچ
درصد خلوص	99/5٪
دانسیته (kg/m^3)	6300
سطح ویژه (m^2/g)	29
قطر متوسط نانوذرات (mm)	<50
هدایت حرارتی (W/m.ºC)	20
دمای نقطه ذوب (ºC)	1326
ظرفیت گرمای ویژه حالت جامد (kJ/kg.ºC)	531

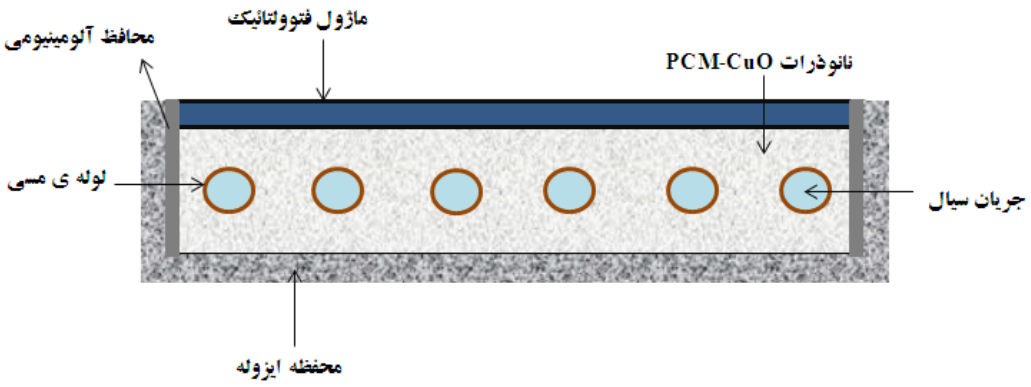
اینکه در طول انجام آزمایشات لوله‌های مسی پر از آب باشند، ماژول فتوولتائیک با افق شیب ۱۵ درجه داشته و آب سرد به لوله پی.وی.سی پایین وارد می‌شود.

۲-۲- آماده سازی ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس

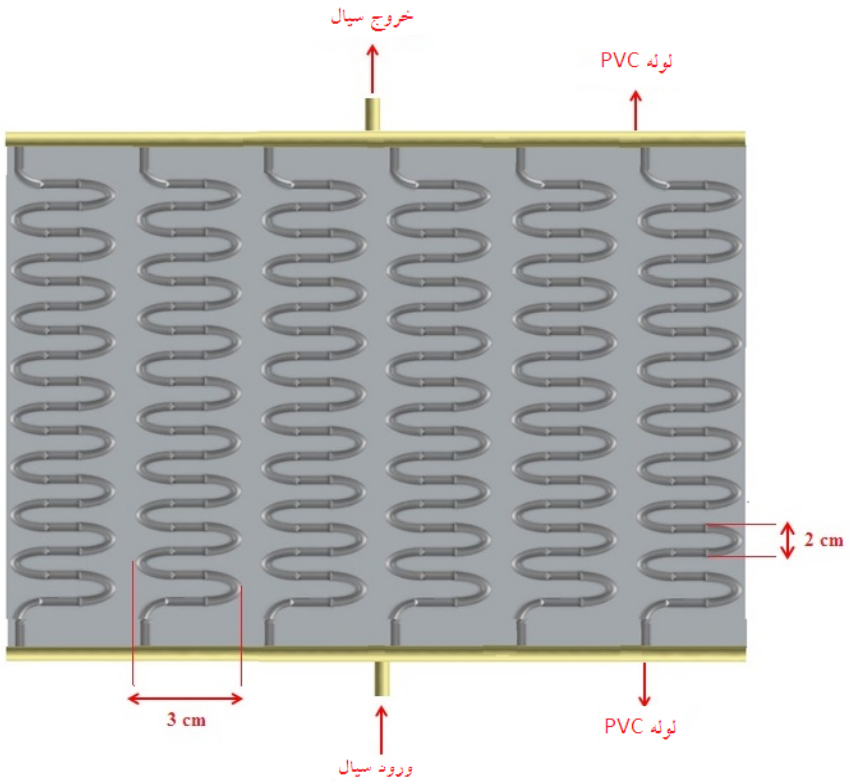
ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده در این پژوهش، واکس پارافین بوده که از شرکت هایا شیمی رازی (کرمانشاه) خریداری شده و خواص فیزیکی آن طبق اطلاعاتی که این شرکت ارائه کرده، در جدول ۱ آمده است.

همچنین، مشخصات نانوذرات اکسید مس مورد استفاده که از شرکت سیگما آلدریچ خریداری شده در جدول ۲ آمده است.

نانوذرات با درصد جرمی‌های مختلف ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد در ماده تغییر فاز دهنده مذاب پراکنده شده و ۵ سوسپانسیون با درصد جرمی‌های مختلف نانوذرات بدست آمده است. عمل اختلاط



الف) برش عرضی از مجموعه ماژول فتوولتائیک و لوله‌های مسی احاطه شده با ترکیب ماده تغییر فاز دهنده-اکسید مس.



ب) نمای بالا از نحوه قرارگیری لوله‌های مسی در پشت ماژول فتوولتائیک.

شکل ۳: شماتیک ماژول فتوولتائیک مورد مطالعه.

Fig. 3: Schematic of the photovoltaic module studied

نانوذرات در ماده تغییر فاز دهنده مذاب، توسط همزن التراسونیک (مدل هیلسچر-یو.پی.۴۰۰.اِس[1] ، ساخت کشور آلمان) با فرکانس ۲۴ کیلوهرتز و توان ۴۰۰ وات، تحت دمای کنترل شده ۲۹۳ تا ۲۹۸ کلوین، به صورت همگن درآورده شد. برای حصول مخلوط همگن و پایدار، این فرآیند یک ساعت به طول انجامید. به منظور کنترل دما ضمن همگن شدن سوسپانسیون توسط همزن التراسونیک، ظرف حاوی سوسپانسیون در حمام آب و یخ قرار داده شد. بعد از همگن شدن، رنگ محلول سوسپانسیون از عسلی روشن به قهوه‌ای تیره-سیاه تغییر می‌کند. مقادیر گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و دانسیته سوسپانسیون پارافین مذاب و نانوذرات اکسید مس با استفاده از معادلات مربوط به خواص فیزیکی نانوسیال موجود در مرجع [۲۱] محاسبه گردید که در جدول ۳ آمده است.

مقادیر دمای ذوب ترکیب حالت جامد پارافین و نانوذرات در درصد

1 Hielscher-UP400S

جدول ۲: مشخصات نانوذرات اکسید مس مورد استفاده در این مطالعه.

Table 2: Specifications of CuO nanoparticles using in this study.

پارامتر	مشخصات نانوذرات اکسید مس
کشور سازنده	شرکت سیگما آلدریچ
درصد خلوص	99/5٪
دانسیته (kg/m^3)	6300
سطح ویژه (m^2/g)	29
قطر متوسط نانوذرات (mm)	<50
هدایت حرارتی (W/m.ºC)	20
دمای نقطه ذوب (ºC)	1326
ظرفیت گرمای ویژه حالت جامد (kJ/kg.ºC)	531

جدول ۳: مشخصات ترکیب پارافین و نانوذرات اکسید مس مورد استفاده در این مطالعه.

Table 3: Properties of Composition of paraffin and CuO nanoparticles using in this study.

پارامتر	□=0/5٪	□=1٪	□=2٪	□=3٪	□=4٪
دانسیته حالت مایع (kg/m^3)	865/31	892/62	947/24	1001/86	1056/48
هدایت حرارتی حالت مایع (W/m.ºC)	0/213	0/216	0/222	0/228	0/235
دمای نقطه ذوب (ºC)	52-53	52-53	50-51	49-50	49
ظرفیت گرمای ویژه حالت مایع (kJ/kg.ºC)	21/353	394/29	724/53	1018/76	1282/57

جرمی‌های مختلف ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد که در جدول ۳ آمده است.

۲-۳- روند انجام آزمایشات

قبل از انجام آزمایشات، تست وجود نشتی برای مجموعه لوله‌های مسی در بالاترین دبی آب انجام شد و مشکلات نشتی به طور کامل رفع گردید. برای هر آزمایش مقدار مشخص از سوسپانسیون ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات به درون محفظه پشت ماژول ریخته شده و ۲۴ ساعت به سیستم استراحت داده شده تا این به طور کامل جا گرفته و ترکیب به جامد تبدیل شود. در هنگام انجام آزمایشات، دبی آب سرد ورودی روی مقدار دلخواه تنظیم شد. مقادیر ولتاژ خروجی مختلف در جریان‌های الکتریکی مختلف با استفاده از دستگاه الکتریکی تنظیم شد. در حین آزمایشات، خروجی الکتریکی فتوولتائیک به دستگاه الکتریکی متصل بوده و بعد از اینکه سیستم به حالت پایا رسید (حدود ۶۵ دقیقه)، مقادیر I-V به منظور بدست آوردن ماکزیمم توان تولیدی (P_{max}) و مقادیر ولتاژ ماکزیمم (V_{max}) و جریان ماکزیمم (I_{max}) ضبط شدند. دماهای ۹ نقطه از سطح ماژول با استفاده از ترمومتر همزمان ضبط شدند. همه آزمایشات در دمای اتاق و حدود ۱۶- ۱۷ درجه سانتی‌گراد در فصل زمستان انجام شدند.

۲-۴- خطاهای آزمایشگاهی و آنالیز عدم قطعیت

مقادیر واقعی از داده‌های اندازه‌گیری شده در این کار ناشناخته است. بنابراین، دقت داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهدکه داده‌های اندازه‌گیری تکرار شده چقدر به یکدیگر نزدیک هستند. از آنجاکه عدم قطعیت در مقادیر اندازه‌گیری شده یک دلیل عدم قطعیت در مقادیر محاسبه شده است، به عدم قطعیت دمای سطح ماژول، ولتاژ و توان اندازه‌گیری شده نیاز است. داده‌های اندازه‌گیری به عنوان "مقدار اندازه‌گیری± عدم قطعیت" گزارش شده است. محاسبات به این شرح است: برای یک مجموع N تایی از مقادیر اندازه‌گیری شده برای برخی از کمیت‌ها، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده ($\bar{x}$) و انحراف استاندارد (σ_x) به صورت زیر محاسبه شد [۲۲]:

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \quad (۱)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2} \quad (۲)$$

مقادیر اندازه‌گیری شده را می‌توان به صورت $x = \bar{x} \pm \sigma_x$ و $x = \bar{x} \pm RSD(\%)$ گزارش نمود. در حالی که، RSD که انحراف استاندارد نسبی است، می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$RSD(\%) = 100\frac{\sigma_X}{\bar{x}} \quad (۳)$$

ماکزیمم مقدار عدم قطعیت برای داده‌های دمای سطح ماژولفتوولتائیک ٪۴/۴، برای ولتاژ ٪۳/۶ و برای توان اندازه‌گیری شده٪ ۴/۱ است.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱- بررسی اثر ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس بر دمای سطح ماژول فتوولتائیک

در ابتدا آزمایشات برای حالت بدون سیستم خنک‌کننده انجام شده و همه داده‌ها شامل دمای سطح ماژول، ولتاژ و جریان ثبت شدند. جدول ۴ دماهای ۹ نقطه از سطح ماژول فتوولتائیک و همچنین میانگین آن‌ها را با گذشت زمان تا رسیدن به حالت پایا در حالت بدون سیستم خنک‌کننده نشان می‌دهد. مطابق این جدول، دما در اکثر نقاط سطح ماژول بعد از گذشت حدودا ۶۰ دقیقه به حالت پایا رسیده و حداکثر دمای متوسط سطح ماژول بعد از ۶۵ دقیقه حدود ۵۸/۳۴ °C است.

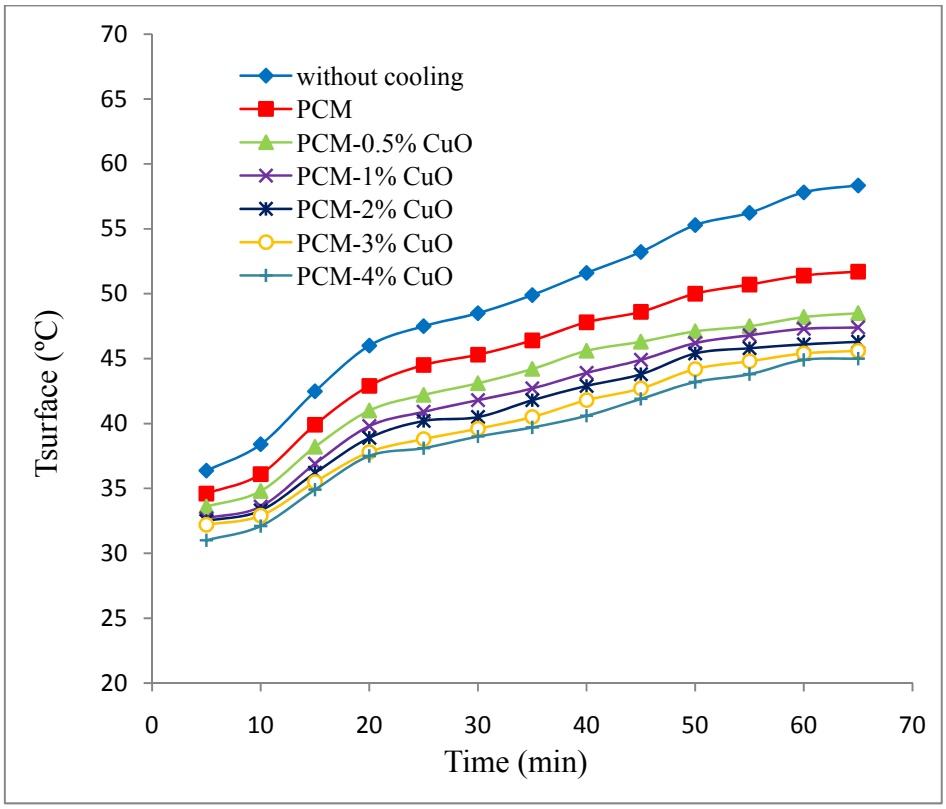
در مرحله بعد ۱ kg از ماده تغییر فاز دهنده خالص درون محفظه پشت ماژول ریخته شده و آزمایشات تکرار شدند تا اثر ماده تغییر فاز خالص بر کاهش دمای سطح ماژول بررسی شود. سپس آزمایشات در غلظت‌های مختلف ترکیب مادهتغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس تکرار شدند. در همه این مراحل، دماهای سطح ماژول تا وقتی که سیستم به حالت پایا برسد ضبط می‌شدند. در ابتدا برای انجام آزمایشات ذکر شده، دبی آب سرد (Q) روی ۱ Lit/min تنظیم شده و مقدار ۱ kg ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است. شکل ۴ تغییرات دمای متوسط سطح ماژول فتوولتائیک را در سه حالت ذکر شده نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در حالت بدون سیستم خنک‌کننده، دمای سطح ماژول با شیب تندی در حال افزایش یافتن بوده و تقریبا بعد از ۶۵ دقیقه به سمت ثابت شدن پیش رفته و به حدود ۵۸/۳۴ °C رسیده است. اما در مورد حالت‌های استفاده از ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس مقادیر دمای سطح ماژول کاهش چشمگیری داشته و شیب افزایش دما کاهش یافته است. بعد از گذشت ۶۰ دقیقه، مقادیر دمای سطح ماژول برای حالت‌های استفاده از ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس ثابت شده و سیستم به حالت پایدار رسیده است.

دلیل کاهش دمای سطح ماژول در حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده، جذب گرمای اضافی از سطح آن توسط ماده تغییر فاز و است.

جدول ۴: تغییرات دمای سطح ماژول فتوولتائیک با زمان در حالت بدون سیستم خنک‌کننده.

Table 4: Surface temperature changing of the photovoltaic module over time without cooling system.

T_{ave}	T_9(°C)	T_8(°C)	T_7(°C)	T_6(°C)	T_5(°C)	T_4(°C)	T_3(°C)	T_2(°C)	T_1(°C)	زمان (دقیقه)
36/37	37/2	35/9	37/3	37/1	35/8	36	36/2	35/2	36/6	5
38/40	38/3	38	38/2	38/3	38/8	38/7	39	38	38/3	10
42/48	42	43/2	42/6	43/2	42/3	42/2	42/6	41/3	42/9	15
46/00	46/3	46/5	46	46/2	45/8	46/1	45/8	45/6	45/7	20
47/50	47/8	47	47/6	47/7	47/2	47/8	47/3	47/7	47/4	25
48/50	48/4	48/8	48/6	48/7	48/7	48/9	48/8	47/9	47/7	30
49/90	49/6	50/2	50	49/6	50/2	49/7	50/5	49/7	49/6	35
51/60	51/5	52/7	51/2	51/4	51/6	51/7	51/8	50/7	51/8	40
53/22	53/8	54/3	53/3	53/4	53/6	52/8	53	52/5	52/3	45
55/29	55/9	56/5	55/5	55/9	54/8	55/7	54	54/8	54/5	50
56/23	56/7	57/4	56/6	56/8	56/4	56/2	55/5	55	55/5	55
57/81	58/8	59/1	58/1	58	57/9	57/7	57	56/8	56/9	60
58/34	59	59/2	58/6	58/7	58/3	58/8	57/5	57/6	57/4	65



شکل ۴: تغییرات دمای متوسط سطح ماژول با زمان برای حالت بدون سیستم خنک‌کننده، استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و استفاده همزمان ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات (Q=۱ Lit/min, W=۱ kg).

Fig. 4: Mean temperature variations of the module surface over time for cooling-free mode, using PCM and PCM with nanoparticle simultaneously (Q = 1 Lit / min, W = 1 kg).

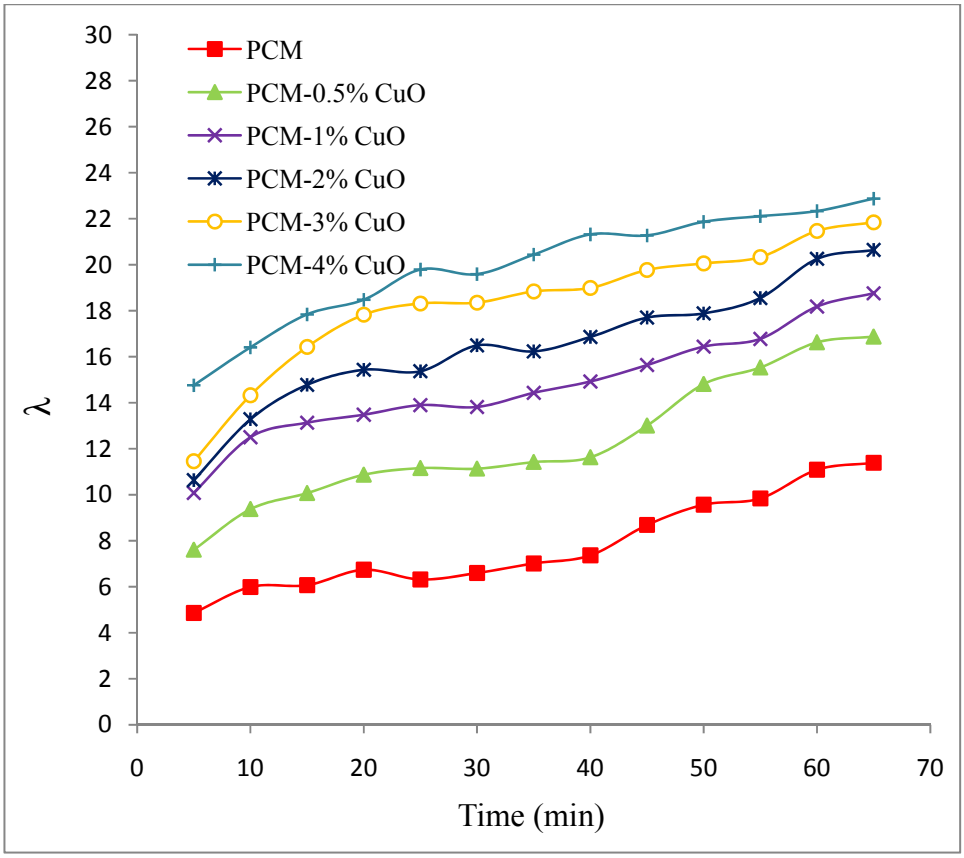
همچنین، مطابق شکل ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت نانوذرات اکسید مس، کاهش دمای سطح ماژول افزایش یافته و بهترین حالت مربوط به ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ است که دما به ۴۵ ºC رسیده است. وجود نانوذرات اکسید مس در ماده تغییر فاز منجر به افزایش هدایت حرارتی آن شده و ظرفیت جذب گرما را بالا می‌برد. همچنین افزودن نانوذرات به پارافین مطابق جدول ۳ منجر به کاهش نقطه ذوب آن شده که به نفع خنک‌سازی سیستم است. درصد نسبت کاهش دمای نسبی سطح ماژول در حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده به دمای سطح ماژول در حالت بدون سیستم خنک‌کننده را به عنوان یک معیار بدون بعد به نام بازده خنک‌سازی می‌نامند. به منظور مقایسه علکرد خنک‌سازی ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس، بازده کاهش دمای متوسط سطح ماژول فتوولتائیک نسبت به حالت بدون سیستم خنک‌کننده (λ) به صورت زیر تعریف شده است [۲۲]:

$$\lambda = \left| \left(\frac{T_{PCM} - T_{no\ cooling}}{T_{no\ cooling}} \right) \right| \times 100 \qquad (۴)$$

شکل ۵ نشان می‌دهد که با که در همه حالت‌ها، بازده خنک‌سازی با زمان با شیب نسبتا تندی در حال افزایش بوده و تقریبا بعد از ۶۰ دقیقه به سمت ثابت شدن پیش رفته است.

حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده خالص کمترین بازده را داشته و حداکثر مقدار آن به ۱۱/۳۸ درصد می‌رسد. نانوذرات اکسید مس به علت داشتن ضریب هدایت حرارتی و همچنین ظرفیت گرمایی ویژه بالا منجر به افزایش ظرفیت جذب گرمای ماده ماده تغییر فاز دهنده شده و بنابراین بازده خنک‌سازی را افزایش می‌دهد.

همان طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، با افزایش غلظت نانوذرات در ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس مقادیر λ افزایش چشمگیری داشته و بالاترین بازده خنک‌سازی مربوط به استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ بوده که حدود ۲۲/۸۷٪ است. بنابراین، در آزمایشات بعدی ماده ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ به عنوان یک حالت بهینه انتخاب شده است.



شکل ۵: تغییرات درصد کاهش دمای متوسط سطح ماژول نسبت به حالت بدون سیستم خنک‌کننده (λ) با زمان برای حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و استفاده همزمان ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات (Q=۱ Lit/min, W=۱ kg).

Fig. 5: Changing percentage reduction of mean temperature of the module surface relative to the no-cooling system (λ) with time using PCM and PCM with nanoparticle simultaneously (Q = 1 Lit / min, W = 1 kg).

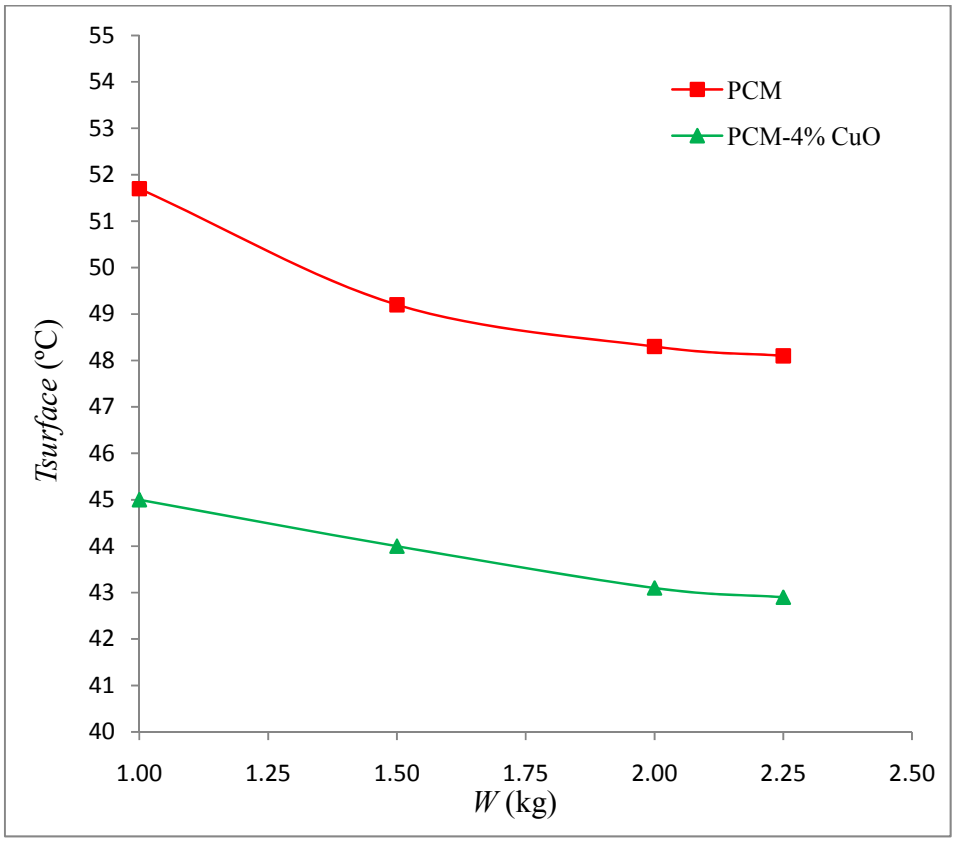
۳-۲- اثر مقدار ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده بر کاهش دمای سطح ماژول فتوولتائیک

شکل ۶ اثر وزن ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب آن با ۴٪ نانوذرات اکسید مس بر تغییرات دمای سطح ماژول را نشان می‌دهد. در ابتدا با تغییر وزن ماده تغییر فاز دهنده از ۱ kg به ۱/۵ kg، دمای سطح ماژول با شیب تندی در حال کاهش یافتن بوده وبا تغییر وزن ماده تغییر فاز دهنده به۲ kg شیب تغییرات دما کمتر شده است. افزایش وزن ماده تغییر فاز دهنده به معنای افزایش توانایی جذب گرمای سطح ماژول است. اما همان طورکه در شکل مشاهده می‌شود تغییرات محسوس دمایی برای مقدار ماده تغییر فاز دهنده برابر۲ kg و ۲/۲۵ kg مشاهده نمی‌شود و این بدین معناست که مقدار۲ kg از ماده تغییر فاز دهنده برای دو حالت خالص و ترکیب آن با ۴٪ نانوذرات توانایی جذب گرمای سطح ماژول را داشته و به منظور صرفه‌جویی اقتصادی و همچنین راحتی کار، مقدار بیشتر آن توصیه نمی‌شود.

همان طورکه انتظار می‌رود، مقایسه بین دمای سطح ماژول با ماده تغییر فاز دهنده خالص وترکیب ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ نشان می‌دهد که شیب تغییرات دمایی با مقدار ماده ماده تغییر فاز دهنده با حالت استفاده از اکسید مس ۴٪ کمتر بوده است. درواقع، اثر مقدار مقدار ماده(W) در ماده تغییر فاز دهنده خالص مشهودتر بوده و با اضافه کردن نانوذرات به ماده تغییر فاز دهنده می‌توان ظرفیت جذب گرمای آن را بالا برده و از مقدار کمتر آن استفاده کرد. درپایان، در آزمایشات مرحله بعد مقدار۲ kg به عنوان یک حالت مناسب برای ماده تغییر فاز دهنده انتخاب شده است.

۳-۳- اثر دبی آب خنک‌کن بر کاهش دمای سطح ماژول فتوولتائیک و راندمان کل

همان طورکه گفته شد، به منظور به تعویق انداختن ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده، از میلی لوله‌های مسی که در آن‌ها



شکل ۶: اثر مقدار ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده (W) بر دمای متوسط سطح ماژول برای حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و استفاده همزمان ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات (Q=۱ Lit/min, ϕ=۴٪ CuO).

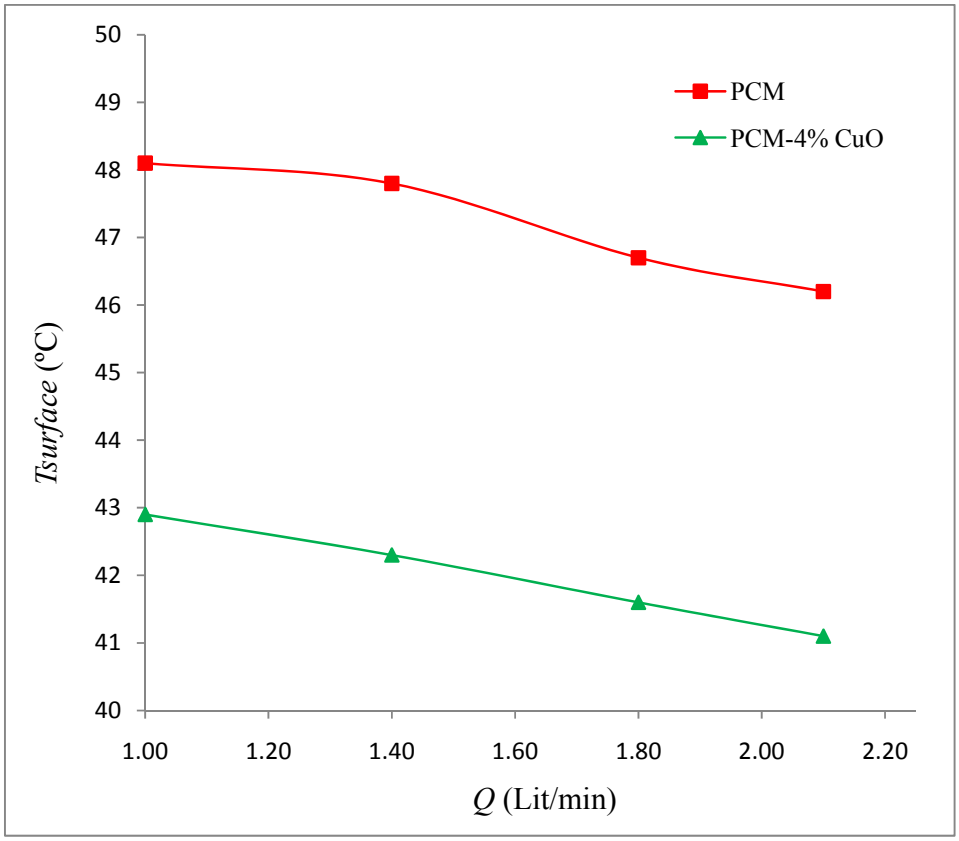
Fig. 6: The effect of the amount of PCM (W) on the average surface temperature of the module using PCM and PCM with nanoparticle simultaneously (Q = 1 Lit / min, ϕ = 4% CuO).

آب سرد جریان دارد، استفاده شده است. لوله‌های مسی با فاصله از سطح ماژول قرار گرفته و در تماس با آن نبوده و تنها نقش خنک‌کننده ماده تغییر فاز دهنده در حالت مذاب را به عهده دارد. شکل ۷ دبی آب خنک‌کن (Q) جاری در میلی لوله‌های مسی که توسط ماده تغییر فاز دهنده احاطه شده‌اند را بر تغییرات دمای سطح ماژول را نشان می‌دهد. درواقع، آب سرد داخل لوله ها به منظور تبادل انتقال حرارت با ماده تغییر فاز دهنده‌به کار برده شده‌اند. با افزایش دمای سطح ماژول به مقدار بیشتر از دمای نقطه ذوب ماده تغییر فاز دهنده، شاهد ذوب شدن آن خواهیم بود. بنابراین با جریان دادن آب خنک داخل لوله‌های مسی می‌توان مجددا ماده تغییر فاز دهنده را به حالت جامد برگرداند و فرایند تبادل گرمای سطح ماژول به ماده تغییر فاز دهنده و تغییر حالت آن ادامه پیدا می‌کند. مطابق شکل، افزایش دبی آب خنک‌کن منجر به کاهش دمای سطح ماژول شده که به دلیل جلوگیری از ذوب شدن پارافین بوده است. درواقع، افزایش (Q) منجر به افزایش سرعت انتقال حرارت بین آب و ماده تغییر فاز دهنده اطراف لوله‌ها خواهد شد و بنابراین عملکرد ماده تغییر فاز دهنده برای کاهش دمای سطح ماژول را بهبود می‌بخشد.

در شکل ۷ مقایسه بین دمای سطح ماژول با ماده تغییر فاز دهنده خالص و ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴ درصد نشان می‌دهد که در حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ دمای سطح ماژول کمتر از ماده تغییر فاز دهنده خالص است که با نتایج قبلی تطابق دارد. درپایان، در آزمایشات مرحله بعد دبی برابر Lit/min ۲/۱ به عنوان یک حالت مناسب برای دبی آب خنک‌کن انتخاب شده است.

۳-۴- عملکرد الکتریکی

به منظور بررسی تأثیرات خنک‌سازی ماده تغییر فاز بر تولید برق توسط ماژول فتوولتائیک، ابتدا عملکرد ماژول بدون سیستم



شکل ۷: اثر دبی آب خنک‌کن (Q) بر دمای متوسط سطح ماژول برای حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و استفاده همزمان ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات (W=۲ kg, ϕ=۴٪ CuO).

Fig. 7: The effect of cooling water flow (Q) on the average surface temperature of the module using PCM and PCM with nanoparticle simultaneously (W = 2 kg, ϕ = 4% CuO).

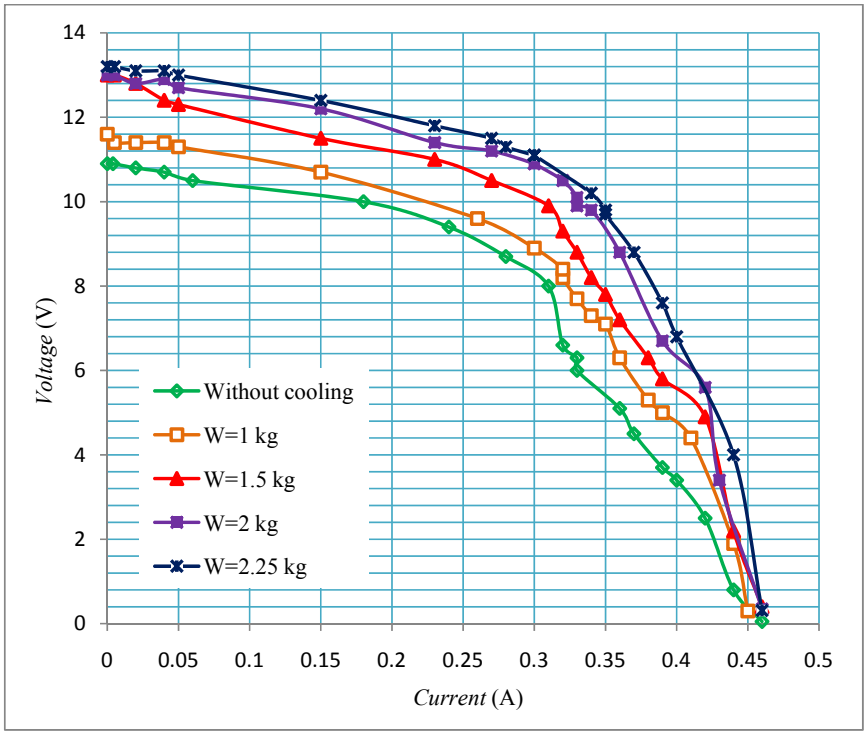
خنک‌کننده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس، داده‌های I-V از آزمایشات در چهار وزن مختلف از پارافین در ترکیب با ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ جمع‌آوری می‌شود. داده‌های آزمایشگاهی I-V ماژول فتوولتائیک در محدوده زمانی استاندارد، برای حالت بدون خنک‌سازی و برای(W=۱-۲/۲۵ kg) در شکل ۸ ترسیم شده است. همان طورکه در شکل زیر دیده می‌شود، مساحت تحت منحنی I-V با افزایش وزن ماده تغییر فاز دهنده افزایش می‌یابد. از آنجا که مساحت ناحیه زیر منحنی I-V میزان توان تولید برق را نشان می‌دهد، این نتایج به معنای افزایش توان خروجی از ماژول فتوولتائیک با افزایش وزن ماده تغییر فاز دهنده در ترکیب آن با نانوذرات اکسید مس است. مشابه داده‌های دمای سطح ماژول، تغییرات داده‌های I-V برای W=۲ kg و W=۲/۲۵ kg بسیار کم است.

توان تولید شده از ماژول فتوولتائیک که با ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ کار می‌کند، به عنوان تابعی از ولتاژ خروجی در شکل ۹ ترسیم شده است. همان طورکه انتظار می‌رود، با افزایش میزان ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده، روند مشخصی در افزایش توان تولیدی وجود دارد. با توجه به این شکل، حداکثر توان خروجی از سیستم فتوولتائیک ماده تغییر فاز دهنده برابر با ۳/۴۷ وات است که مربوط به W=۲/۲۵ kg در ولتاژ V ۱۰/۲ است.

حداکثر توان خروجی تولید شده از ماژول(P_{max}) فتوولتائیک را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد [۲۳]:

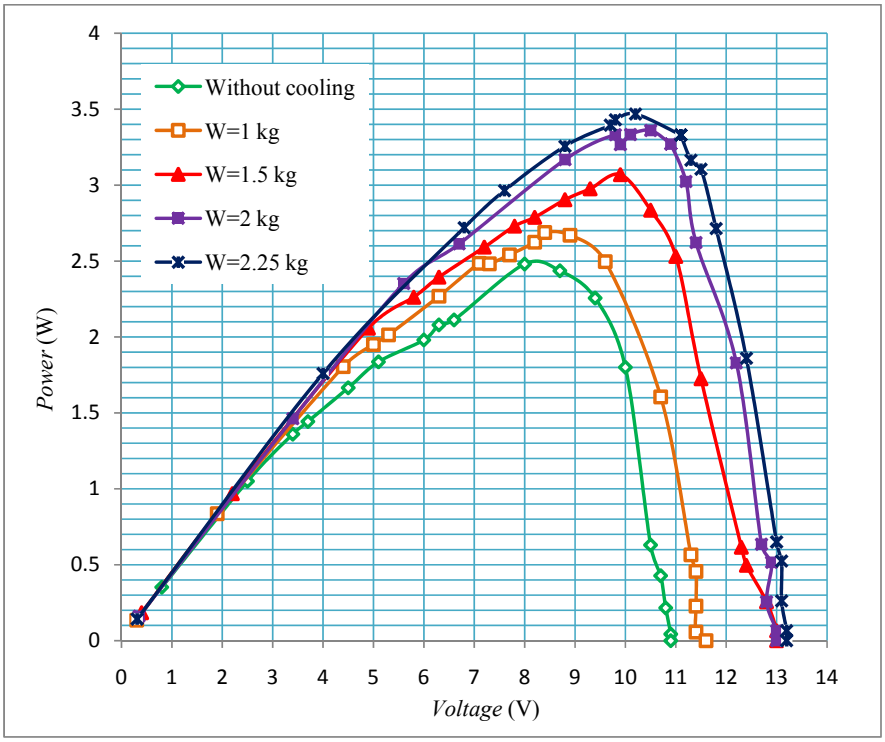
$$P_{max} = I_{PV} \times V_{PV} \quad (۵)$$

همان‌طورکه در شکل ۱۰ دیده می‌شود، انرژی تولید شده از ماژول فتوولتائیک، با افزایش غلظت نانوذرات در ماده تغییر فاز دهنده و همچنین وزن ماده تغییر فاز دهنده، افزایش می‌یابد. همان‌طورکه در بالا ذکر شد، افزایش غلظت نانوذرات اکسید مس در پارافین موجب افزایش ضریب هدایت حرارتی آن شده و درنتیجه عملکرد خنک‌کنندگی ماده تغییر فاز دهنده برای کاهش دمای سطح ماژول فتوولتائیک افزایش می‌یابد. بنابراین، توان تولیدی خروجی به علت کاهش دمای ماژول فتوولتائیک افزایش می‌یابد.



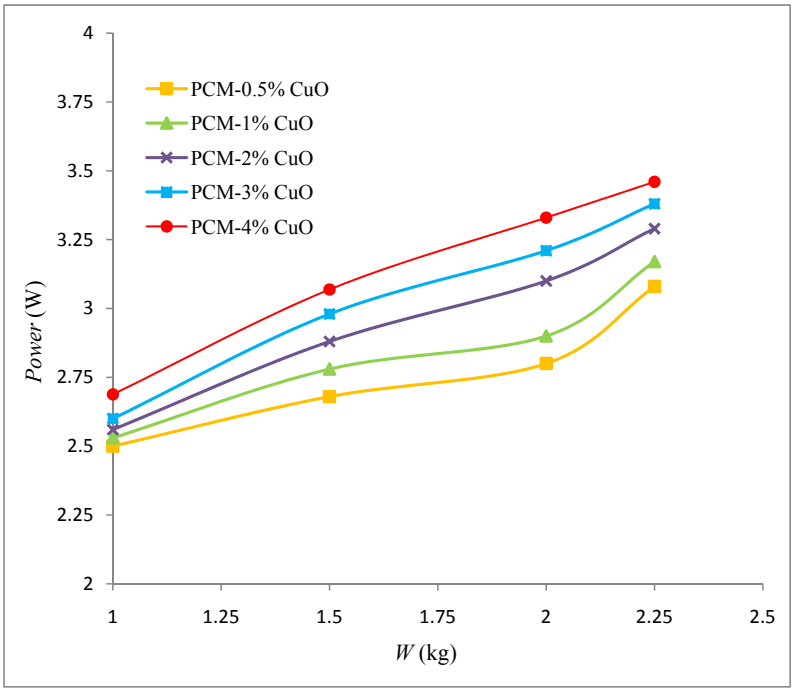
شکل ۸: نمودار ولتاژ-جریان برای حالت‌های بدون سیستم خنک‌کننده و مقادیر مختلف ماده تغییر فاز دهنده (Q=۲/۱ Lit/min, ϕ=۴٪ CuO).

Fig. 8: Voltage-current diagram for coolant-free modes and different PCM values (Q = 2.1 Lit / min, ϕ = 4% CuO)



شکل ۹: نمودار ماکزیمم توان-ولتاژ برای حالت‌های بدون سیستم خنک‌کننده و مقادیر مختلف ماده تغییر فاز دهنده (Q=۲/۱ Lit/min, ϕ=۴٪ CuO)

Fig. 9: Maximum voltage-voltage diagram for non-cooling modes and different values of PCM(Q = 2.1 Lit / min, ϕ = 4% CuO)



شکل ۱۰: ماکزیمم توان‌های تولید شده ماژول فتوولتائیک با تغییر غلظت نانوذرات و وزن ماده تغییر فاز دهنده (Q=۲/۱ Lit/min)

Fig. 10: Maximum power produced by photovoltaic module by varying concentration of nanoparticles and weight of PCM (Q = 2.1 Lit / min).

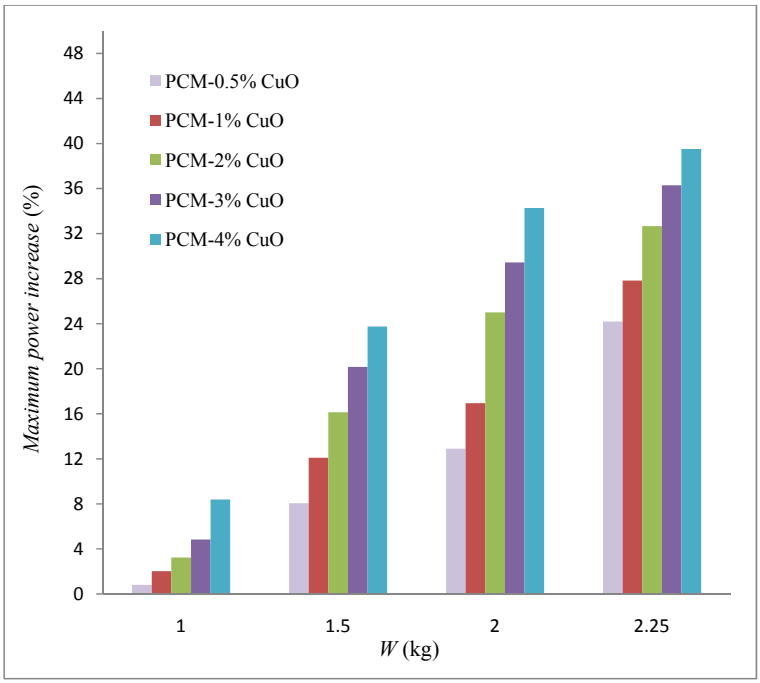
در این مطالعه، معادله (۶) برای محاسبه درصد افزایش ماکزیمم توان خروجی، P_{max} ، استفاده می‌شود که به شرح زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$P_{(\max)increase} = \left(\frac{P_{PCM} - P_{no\ cooling}}{P_{no\ cooling}}\right) \times 100 \qquad (۶)$$

درصد افزایش توان خروجی ماژول فتوولتائیک برای ترکیب تغییر فاز دهنده و نانوذرات با غلظت‌های مختلف در وزن‌های مختلف پارافین در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این شکل نیز نشان می‌دهد که افزایش غلظت نانوذرات اکسید مس در ماده تغییر فاز دهنده و افزایش وزن ماده تغییر فاز دهنده منجر به افزایش عملکرد خنک‌کنندگی آن شده و درنتیجه دمای سطح ماژول فتوولتائیک کاهش می‌یابد. بنابراین، انتظار می‌رود که درصد افزایش ماکزیمم توان خروجی نیز به علت کاهش دمای ماژول فتوولتائیک افزایش یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از ماده تغییر فاز دهنده جهت خنک‌سازی و کاهش دمای سطح یک ماژول فتوولتائیک استفاده شده است. ماده تغییر فاز دهنده در محفظه پشت ماژول قرار گرفته و با دریافت مقدار زیادی ازگرمای سطح ماژول و کنترل ظرفیت حرارتی سیستم منجر به افزایش بازده خنک‌سازی و توان تولیدی آن می‌شود. به منظور به تعویق انداختن ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده، لوله‌های مارپیچی مسی با فاصله کمی از سطح مازول و در درون ماده تغییر فاز دهنده در محفظه پشت ماژول قرار گرفته‌اند و آب خنک از داخل آن‌ها در جریان است. افزودن نانوذرات اکسید مس به ماده تغییر فاز دهنده موجب افزایش ضریب هدایت حرارتی و توانایی جذب آن برای دریافت گرما شده و منجر به کاهش دمای سطح ماژول شده است. اثر غلظت نانوذرات و مقدار ماده تغییر فاز دهنده بر پارامترهای مختلف مانند دمای سطح ماژول، افزایش توان ماکزیمم و بازده خنک‌سازی ماژول فتوولتائیک بررسی شد. طبق نتایج به دست آمده، استفاده از ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس منجر به کاهش دمای سطح ماژول، افزایش بازده خنک‌سازی و همچنین افزایش توان تولیدی ماژول فتوولتائیک می‌شود. افزایش وزن ماده تغییر فاز دهنده خالص وترکیب ماده تغییر فاز دهنده با CuOاکسید مس ۴٪ ، از kg ۱ به kg ۲/۲۵ منجر به کاهش دمای سطح ماژول به ترتیب از ۵۱/۷ به ۴۸/۱ سانتی‌گراد و از ۴۵ به ۴۲/۹ درجه سانتی‌گراد شده است. افزایش غلظت نانوذرات اکسید مس، منجر به افزایش بازده خنک‌سازی



شکل ۱۱: درصد افزایش توان تولید شده ماژول فتوولتائیک نسبت به حالت بدون سیستم خنک‌کننده در غلظت‌های مختلف نانوذرات و با تغییر وزن ماده تغییر فاز دهنده (Q=۲/۱ Lit/min).

Fig. 11: Percentage of power generated by the photovoltaic module compared to the no-cooling state at different concentrations of nanoparticles using changing of weight of PCM material (Q = 2.1 Lit / min).

و مقدار توان تولیدی ماژول فتوولتائیک شده و بالاترین مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر ۲۲/۸۷٪ و ۳/۴۶ W مربوط به حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده ۲/۲۵ kg و اکسید مس ۴٪ است.

تقدیر و تشکر

تحقیق حاصل بخشی از طرح پژوهشی با عنوان طراحی و ساخت خشک‌کن خورشیدی می‌باشد. بدین‌وسیله از حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه تقدیر و تشکر می‌گردد.

فهرست علائم

I	شدت میانگین بر سطح جاذب (W/m²)
T	دمای سطح ماژول (°C)
I_{PV}	جریان ماژول فتوولتائیک (A)
V_{PV}	ولتاژ ماژول فتوولتائیک (V)
P_{max}	ماکزیمم توان ماژول فتوولتائیک (W)
Q	دبی آب خنک‌کن (Lit/min)
W	مقدار ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده (kg)

حروف یونانی

λ	بازده خنک‌سازی (-)
φ	غلظت نانوذرات (-)

زیرنویس

max	ماکزیمم
no cooling	بدون سیستم خنک‌کننده

اختصارات

PV	فتوولتائیک
PCM	ماده تغییر فاز دهنده
RSD	انحراف استاندارد نسبی

منابع

[1] Al-Waeli AH, Sopian K, Chaichan MT, Kazem HA, Hasan HA, Al-Shamani AN. An experimental investigation of SiC nanofluid as a base-fluid for a photovoltaic thermal PV/T system. Energy Convers Manage 2017; 142: 547-558.

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

[3] Kazem HA, Al-Badi HA, Al Busaidi AS, Chaichan MT. Optimum design and evaluation of hybrid solar/wind/ diesel power system for Masirah Island. Environ Dev Sustain 2017; 19(5): 1761-1778.

[4] Popovici CG, Hudişteanu SV, Mateescu TD, Cherecheş N-C. Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks. Energy Procedia 2016; 85: 425-432.

[5] Emam M, Ookawara S, Ahmed M. Performance study and analysis of an inclined concentrated photovoltaic-phase change material system. Sol Energy 2017; 150: 229-245.

[6] Kalogirou SA, Tripanagnostopoulos Y. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. Energy Convers Manage 2006; 47(18-19): 3368-3382.

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

[8] Ghadiri M, Sardarabadi M, Pasandideh-fard M, Moghadam AJ. Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids. Energy Convers Manage 2015; 103: 468-476.

[9] Barrau J, Rosell J, Chemisana D, Tadrist L, Ibáñez M. Effect of a hybrid jet impingement/micro-channel cooling device on the performance of densely packed PV cells under high concentration. Sol Energy 2011; 85(11): 2655-2665.

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

[11] Preet S, Bhushan B, Mahajan T. Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (PV/T) system with and without phase change material (PCM). Sol Energy 2017; 155: 1104-1120.

[12] Klemm T, Hassabou A, Abdallah A, Andersen O. Thermal energy storage with phase change materials to increase the efficiency of solar photovoltaic modules. Energy Procedia 2017; 135: 193-202.

[13] Karthick A, Murugavel KK, Ramanan P. Performance enhancement of a building-integrated photovoltaic module using phase change material. Energy 2018; 142: 803-812.

[14] Preet S. Water and phase change material based photovoltaic thermal management systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018; 82: 791-807.

[15] Nižetić S, Arıcı M, Bilgin F, Grubišić-Čabo F. Investigation of pork fat as potential novel phase change material for passive cooling applications in photovoltaics. J of Clean Prod 2018; 170: 1006-1016.

[16] Su Y, Zhang Y, Shu L. Experimental study of using phase change material cooling in a solar tracking concentrated photovoltaic-thermal system. Sol Energy 2018; 159: 777-785.

[17] Karunamurthy K, Murugumohankumar K, Suresh S. Use of CuO nano-material for the improvement of thermal conductivity and performance of low temperature energy storage system of solar pond. Digest J Nano Mater Bio Struct 2012; 7(4): 1833-1841.

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

[19] Mousavi Baegi Seyed Reza, Sadrameli Seyed Mojtaba, Designs and Builds a Cooling System to Increase the Efficiency of Photovoltaic Panels Using Changing Phase Materials. Sharif Mechanical Engineering Journal, Volume 3-23, Number 1, pp. 77-82 (2016).(in Persian)

[20] Chandrasekar M, Suresh S, Senthilkumar T. Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures. Energy Convers Manage 2013; 71: 43-50.

[21] Karami E, Rahimi M, Azimi N. Convective heat transfer enhancement in a pitted microchannel by stimulation of magnetic nanoparticles. Chem Eng Process 2018; 126: 156-167.

[22] Rostami Z, Rahimi M, Azimi N. Using high-frequency ultrasound waves and nanofluid for increasing the efficiency and cooling performance of a PV module. Energy Convers Manage 2018; 160: 141-149.

[23] Karami N, Rahimi M. Heat transfer enhancement in a PV cell using Boehmite nanofluid. Energy Convers Manage 2014; 86: 275-285.