ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2024;24(01):21-30.

Experimental Study of the Effect of Using Phase Change Material to Improve Electrical Insulation of Power Distribution Transformers

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Mazidi Sharfabadi M. [1*],
Majeed Karam N. [2],
Kurd R. [3]

How to cite this article
Mazidi Sharfabadi M, Majeed Karam N, Kurd R. Experimental Study of the Effect of Using Phase Change Material to Improve Electrical Insulation of Power Distribution Transformers. Modares Mechanical Engineering; *2024;24(01):21-30.*

[1] Optimization of Energy Research Group, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran.
[2] Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran
[3] School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Correspondence
Address: Optimization of Energy Research Group, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran

mazidim@ripi.ir

Article History
Received: January 22, 2024
Accepted: March 10, 2024
ePublished: April 20, 2024

ABSTRACT

In this article, the effect of using phase change materials to improve heat transfer in power distribution transformers has been investigated experimentally. To enhance the cooling of the transformer, a new method has been proposed, which involves adding paraffin inside aluminium containers that are sealed to the transformer oil. The test setup includes an electric transformer filled with transformer oil, two electrical heaters, a power regulator, a thermal camera, oil insulation measuring device, and temperature sensors placed at various locations. The experimental results demonstrated that the addition of phase change materials to the electronic transformer oil led to a decrease in the temperature of the transformer, particularly in summer weather conditions. Additionally, the mean temperature of the transformer oil was reduced from 46.7 to 42.5 degrees Celsius by adding 8 kg of paraffin. However, it was observed that when the temperature increases suddenly and rapidly within an hour, these materials are ineffective in dissipating the heat and reducing the temperature of the transformers. Additionally, the research examines the impact of continuous and high-temperature increases on the oil electrical insulation. The results revealed that using phase change materials increased the voltage that the oil could withstand as an electrical insulator from 56.8 kV to 61 kV.

Keywords Experimental Study, Test Bench, Disturbution Transformer, Phase Change Material, Paraffin, Cooling, Oil Insulation

CITATION LINKS

1- Temperature control of permanent-magnet ... 2- Phase-change materials to improve solar ... 3- Establishment and experimental verification ... 4- Study on overload performance enhancement ... 5- Yearly energy performance of a photovoltaic-phase ... 6- Enhancement of thermal conductivity of ... 7- Plate type heat exchanger for thermal ... 8- Development of paraffin wax as phase ... 9- Using of PCM as an energy storage material ... 10- The use of phase change material for the ... 11- Analysis of underfloor electrical heating ... 12- Numerical simulation of a solar cooling ... 13- Numerical and experimental investigation of the ... 14- Experimental analysis of a novel PV/T panel ... 15- Application of an active PCM storage system ... 16- Thermal storage performance of building ... 17- Experimental study and performance analysis ... 18- Review on phase change materials (PCMs) for ... 19- Modifying the thermal performance of electrical ... 20- Transient cooling of electronics using phase ... 21- Maximization of performance of a PCM ... 22- Experimental investigation of phase change ...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-20]

[DOI: 10.22034/MME.24.1.21]

مطالعه تجربی تأثیر استفاده از ماده تغییر فاز دهنده جهت بهبود عایق‌بندی الکتریکی ترانسفورماتورهای توزیع برق

محمد مزیدی شرف‌آبادی [۱*] ، نهی مجید کرم [۲]، رضا کرد [۳]

[۱] گروه پژوهش بهینه‌سازی انرژی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

[۲] گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

[۳] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان عامل بهبود انتقال حرارت در ترانسفورماتورهای توزیع برق به‌طور تجربی بررسی شده است. برای بهبود خنک‌کاری ترانسفورماتور، روش جدیدی پیشنهاد شده که شامل افزودن پارافین در داخل ظروف آلومینیومی دربسته به روغن ترانسفورماتور است. بستر آزمون استفاده‌شده شامل یک ترانسفورماتور برق به همراه روغن ترانسفورماتور، دو گرم‌کن برقی، تنظیم‌کننده توان، دوربین حرارتی، دستگاه اندازه‌گیری استقامت دی‌الکتریک روغن و حسگرهای دما که در مکان‌های مختلف قرارگرفته‌اند، می‌باشد. نتایج تجربی نشان داد که افزودن ۸ کیلوگرم پارافین به روغن ترانسفورماتور، باعث کاهش دمای ترانسفورماتور به‌ویژه در شرایط آب و هوایی گرم تابستان می‌شود و دمای میانگین روغن ترانسفورماتور را از ٤٦/٧ به ٤٢/٥ سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. در این آزمایش مشخص شد که وقتی دمای روغن به‌طور ناگهانی و سریع طی یک ساعت افزایش یابد، افزودن پارافین به‌خوبی نمی‌تواند باعث دفع حرارت و کاهش دما شود. در انتها تأثیر افزایش مداوم و بالای دما بر عایق روغن بررسی شد. نتایج نشان داد که با به‌کارگیری پارافین، مقدار ولتاژی که روغن می‌تواند به‌عنوان عایق الکتریکی تحمل کند از ٥٦/٨ به ٦١ کیلوولت افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: بررسی تجربی، بستر آزمون، ترانسفورماتور توزیع، مواد تغییر فاز دهنده، پارافین، خنک‌کاری، عایق روغن

تاریخ دریافت: ۱٤۰۲/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

*نویسنده مسئول: mazidim@ripi.ir

۱- مقدمه

نیاز فزاینده به سامانه‌های خنک‌کننده در کاربردهای مختلف، بسیاری از پژوهشگران را بر آن داشته است تا بر بهبود کارایی این سامانه‌ها و همچنین کاهش مصرف انرژی تمرکز کنند. در سال‌های اخیر، یکی از راه‌های افزایش کارایی ترانسفورماتورها با بهبود انتقال حرارت از آن‌ها اتفاق افتاده است. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در این زمینه به‌عنوان یک جایگزین ساده و کم‌وزن برای خنک کردن ترانسفورماتور بررسی شده است [1]. با توجه به دمای بالای فایل آداپتور توزیع برق و درنتیجه تأثیر منفی آن، توسعه راه‌های حفظ ترانسفورماتورهای الکتریکی دمای بالا و همچنین از بین بردن نویز آن در حین کار در تابستان یکی از مسائل اساسی است. از مواد تغییر فاز دهنده برای بهبود عملکرد حرارتی ترانسفورماتور و برای جذب گرمای اضافی در پیک حرارتی استفاده می‌شود. مواد تغییر فاز دهنده موادی هستند که معمولاً در دمای معینی ذوب و جامد می‌شوند. این‌گونه مواد دارای خاصیت ذخیره‌سازی انرژی هستند و می‌توانند مقدار زیادی انرژی را جذب و دفع کنند. هنگامی‌که ماده تغییر فاز می‌دهد گرما را آزاد یا جذب می‌کند. این مواد تا زمانی که تمام وزنشان به فاز مایع تبدیل شود، بدون افزایش قابل‌توجه دما به جذب گرما ادامه می‌دهند. هنگامی‌که دمای محیط در اطراف ماده در حالت مایع کاهش می‌یابد، دوباره جامد می‌شود و گرمای ذخیره‌شده در خود را آزاد می‌کند.

بیوله و همکاران [2] در سال ۲۰۰۰ با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در پنل‌های فتوولتائیک حرارتی (PVT) توانستند علی‌رغم تابش مداوم تشعشع به میزان ۱۰۰۰ وات بر مترمربع به مدت ۸۰ دقیقه، دمای پنل را در ۴۰ سانتی‌گراد نگه دارند. انرژی خورشیدی تمیز و پایدار است و مواد تغییر فاز دهنده که در ساختمان‌ها استفاده می‌شوند، می‌توانند گرمای اضافی را ذخیره کرده و در صورت نیاز برای کاهش تقاضای انرژی در زمستان آزاد کنند. این تحقیق که توسط شیلی لو و همکاران [3] انجام شد مدل جدیدی از به‌کارگیری مواد تغییر فاز دهنده در کف ساختمان همراه با سیستم گرمایش آب خورشیدی را توسعه می‌دهد. در صورت حفظ دمای داخلی ساختمان در ۲۰ سانتی‌گراد، ۵/۸۷٪ در شدت مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌شود. ژیانگ بین و همکاران [4] در سال ۲۰۱۷ پژوهشی را برای بهبود عملکرد اضافه‌بار موتورهای مغناطیس دائم با استفاده از ذخیره‌سازی حرارتی تغییر فاز پارافین انجام داد که نشان می‌دهد چگونه تغییر فاز گرمایی پارافین به‌وضوح بر میزان افزایش دمای جسم در حال خنک شدن و فرکانس وقوع این فرآیند تأثیر می‌گذارد. در سال ۲۰۱۸ سیستم ترکیبی فوتوولتائیک-ماده تغییر فاز (PV-PCM) در امارات متحده عربی که محیط گرمی دارد، توسط حسن و همکاران [5] آزمایش شد. در طول یک سال، مواد تغییر فاز دهنده دمای پیک فتوولتائیک را به‌طور متوسط ۱۰/۵ سانتی‌گراد کاهش دادند که منجر به افزایش ۵/۹٪ در تولید برق پنل شد. ردی و همکاران [6] افزایش ضریب هدایت حرارتی پارافین را با اضافه کردن پودر گرافیت بررسی کردند. نتایج نشان داد با ترکیب ۶۰٪ پارافین و ۴۰٪ گرافیت ضریب هدایت حرارتی برابر با ۷/۱ وات بر متر کلوین می‌شود. رامی سعید و همکاران [7] در مطالعه‌ای از مخزن جدید ذخیره گرما که دارای یک واحد مبدل حرارتی صفحه‌ای است و از ماده تغییردهنده فاز به‌عنوان واسط ذخیره انرژی و آب به‌عنوان سیال کاری استفاده کرده است. در این مطالعه زمانی که از ماده تغییر فاز دهنده با رسانایی حرارتی پایین استفاده شود، عملکرد صفحه‌های موازی فشرده از عملکرد سامانه‌های ذخیره‌سازی معمولی پیشه می‌گیرد و به بازدهی حدود ۸۳/۱٪ می‌رسد. همچنین، هزینه ساخت، خرید، نگهداری و بهره‌برداری آن نسبت به سامانه‌های معمولی کمتر است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-20]

[DOI: 10.22034/MME.24.1.21]

عبدالرحمن و همکاران [8] به شبیه‌سازی سه‌بعدی یک مبدل حرارتی با شکل غیرمتعارف با دیواره‌های داخلی مثلثی در نرم‌افزار انسیس- فلوئنت (ANSYS -fluent) پرداخته است. در این مبدل، هواي گرم شده با جریان آرام وارد مبدل حرارتی با مواد تغییر فاز دهنده می‌شود. در این تحقیق، تأثیر روش ذوب مواد تغییر فاز دهنده بر عملکرد مبدل حرارتی بررسی شده است که بر طبق این شبیه‌سازی، با گذشت زمان، ذوب شدن با سرعت بیشتری انجام می‌شود. میزان بهبود انتقال حرارت برای Re=۲۰۰۰ پس از ۶۰ ثانیه، ۲۶ وات بود. فرآیند ذوب (ذخیره محسوس) در Re=۲۰۰۰ و با نرخ انتقال حرارت حدود ۱۸ وات، ۲۹۵ ثانیه طول می‌کشد، اما در Re=۵۰۰ و نرخ انتقال حرارت حدود ۱۰ وات، ۴۸۵ ثانیه زمان می‌برد. در مقایسه با استفاده از روغن ترانسفورماتور به‌تنهایی، استفاده از پارافین دمای ترانسفورماتور الکتریکی را حدود ۷ سانتی‌گراد کاهش می‌دهد. افزایش مقدار مواد تغییر فاز دهنده مورداستفاده خنک‌سازی ترانسفورماتور را بهبود می‌بخشد. در آب‌وهوای گرم، پارافین به‌خصوص در ساعات اوج گرما و در شبکه‌های توزیع با بار الکتریکی زیاد مفید است. ترانسفورماتورها برای جلوگیری از خرابی در این دماهای بالا به پارافین نیاز دارند. نقطه ذوب این ماده بین ۵۰ تا ۵۷ سانتی‌گراد است [9]. آیت و همکاران [10] از مواد تغییر فاز دهنده درون هادی‌های توخالی (HCs) به‌عنوان روشی منحصربه‌فرد برای خنک‌کردن سیم‌پیچ‌های مستقیم استفاده کرده است. ژنراتورهای استاتور (S/G) در هواپیماها نمونه‌هایی از ماشین‌های الکتریکی تحت بار بالا و عملکرد گذرا کوتاه هستند. راه‌اندازی این دستگاه‌ها نیاز به حذف مقدار زیادی گرما از سیم‌پیچ‌ها دارد که می‌تواند چند ثانیه طول بکشد. انواع هادی‌های توخالی پر از مواد تغییر فاز دهنده به‌صورت عددی و تجربی تجزیه‌وتحلیل شده‌اند که استفاده از این مواد باعث کاهش ۱۸ درصدی وزن سیم‌پیچ و افزایش ۸ درصدی دمای سیم‌پیچ‌ها شده است. فرج و همکاران [11] عملکرد سیستم گرمایش از کف را با استفاده از روغن نارگیل به‌جای مواد تغییر فاز دهنده سنتی بررسی کرده‌اند. بر اساس مهم‌ترین یافته‌ها، استفاده از روغن نارگیل می‌تواند باعث تغییر مصرف برق ساختمان از ساعات اوج به ساعات غیر اوج شود. پلیتاریا و همکاران [12] در سال ۲۰۱۹ به بررسی بازده و هزینه یک سیستم خنک‌کننده خورشیدی با و بدون دیوارهای تابشی با یکپارچه‌سازی مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در دیوارهای تابشی باعث می‌شود تا ساختمان با حداقل مصرف انرژی گرم و خنک شود. استفاده از پمپ حرارتی و انرژی خورشیدی به همراه یک سیستم ذخیره‌سازی حرارتی تغییر فاز دهنده توسط فیاض و همکاران [13] بررسی شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میانگین ضریب عملکرد سیستم (COP) به ۳/۷۹ و راندمان متوسط استحصال گرمای کلکتور خورشیدی به ۵۹/۸٪ می‌رسد و نسبت انرژی خورشیدی سیستم تأمین گرما ۲۷/۲٪ است. داوید پنا گنزالز و همکاران [14] طراحی جدیدی برای پنل فتوولتائیک حرارتی برای به حداکثر رساندن تولید هم‌زمان انرژی و گرما پیشنهاد کردند. در این مطالعه، لوله‌های حرارتی برای بهبود بیشتر انتقال حرارت در داخل مواد تغییر فاز دهنده گنجانده شده‌اند. پنل در این آزمایش اولیه بیش از ۶۰ وات برق و ۷۰۰ وات توان حرارتی در دمای پنل ۴۵ سانتی‌گراد تولید کرد. با این پنل، اکثر نیازهای انرژی برای سامانه‌های آب گرم مصرفی و سامانه‌های گرمایشی دمای پایین مانند گرمایش از کف قابل تأمین است. مواد تغییر فاز دهنده اخیراً به دلیل پتانسیلی که در کاهش شکاف بین عرضه و تقاضای انرژی در ساختمان‌ها دارند، موردتوجه زیادی قرارگرفته‌اند. غلامی و فرید [15] در پژوهشی، استفاده از سامانه‌های ذخیره‌سازی فعال مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان‌ها و تأثیر فصلی آن‌ها بر بهره‌وری انرژی را بررسی کردند. به‌منظور کاهش نیاز به گرمایش و سرمایش، واحدهای ذخیره‌سازی مواد تغییر فاز دهنده در خانه‌های روستایی نصب شدند و نتایج با داده‌های به‌دست‌آمده از خانه مرجع مقایسه شدند. با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده مبتنی بر افزایش حجم در ماه اردیبهشت، مصرف انرژی گرمایی ۴۰٪ و در ماه‌های خرداد و تیر، ۱۰/۳٪ کاهش یافت. وانگ و همکاران [16] در سال ۲۰۲۱ به بررسی میزان ذخیره گرما توسط پوشش‌های ساختمانی در شرایط غیرفعال (بدون تهویه) پرداختند. در آن مطالعه، یک پنل دیواری آزمایشی حاوی ماده تغییر فاز دهنده برای بهبود ظرفیت ذخیره حرارتی تعبیه شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که بهبود ترتیب لایه‌های مصالح می‌تواند ضمن کاهش تغییرات دمایی دیوار تا ۳۱٪، ضریب انباشت گرمای دیوار را نیز افزایش دهد. لی و همکاران [17] طی آزمایشی که در داخل خانه با شرایط عملیاتی انجام دادند، حداکثر بازده الکتریکی پنل فتوولتائیک حرارتی را با روش‌های محاسباتی و تجربی به ترتیب ۱۲/۴٪ و ۱۲/۲۸٪ به دست آوردند. به همین ترتیب، برای پنل فتوولتائیک حرارتی یکپارچه‌سازی شده با مواد تغییر فاز دهنده، بازده الکتریکی برای مطالعات محاسباتی و تجربی به ترتیب ۱۲/۷۵٪ و ۱۲/۵۹٪ حاصل شد.

در این مقاله به افزایش جذب گرمای ناشی از سیم‌پیچ‌ها در مدت بهره‌برداری از ترانسفورماتورهای توزیع ۱۰۰ کیلو ولت آمپر در تابستان که معمولاً در شبکه برق عراق استفاده می‌شوند، پرداخته خواهد شد. چهار قوطی پارافین ۲ کیلوگرمی به‌عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده می‌شود که در داخل روغن قرار می‌گیرند. روغن ترانسفورماتور و پارافین گرمای تولیدشده را جذب می‌کنند. این امر منجر به حفظ ترانسفورماتورها از آسیب‌های احتمالی می‌شود. نتایج این مطالعه علاوه بر ثبت از طریق حسگرهای حرارتی، به‌کمک تصویربرداری دوربین حرارتی نیز بررسی می‌شوند. در این پژوهش برخلاف مطالعات پیشین، اثر افزایش

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-20]

[DOI: 10.22034/MME.24.1.21]

ناگهانی دمای روغن بر روی عملکرد ماده تغییر فاز دهنده در خنک‌سازی ترانسفورماتور بررسی خواهد شد. همچنین، میزان عایق بودن روغن قبل و بعد از اضافه کردن ماده تغییر فاز دهنده به آن توسط دستگاه آزمون استقامت دی‌الکتریک اندازه‌گیری و گزارش می‌گردد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- بستر آزمون

در این آزمایش، از یک ترانسفورماتور الکتریکی ۱۰۰ کیلو ولت آمپر ساخت شرکت میتسوبیشی استفاده شده است. این ترانسفورماتور شامل سه سیم‌پیچ است و از قطعات اصلی تانکر (مخزن)، هسته، فایل‌ها، عایق‌ها و روغن تشکیل شده است. شکل ۱ ترانسفورماتور توزیع برق به‌کاربرده شده در این آزمایش را نشان می‌دهد. این ترانسفورماتور شامل یک ورودی و یک خروجی ولتاژ است. ولتاژ در ورودی آن ۱۱ کیلوولت است و در خروجی آن ولتاژی برابر با ۲۴۰ ولت به مصرف‌کننده وارد می‌شود. روغن به‌عنوان یک عنصر مهم در سیستم خنک‌کننده استفاده می‌شود؛ زیرا روغن به‌سرعت بین سیم‌پیچ‌ها پخش می‌شود و بهترین انتقال حرارت را فراهم می‌کند. هنگامی‌که روغن به کویل‌ها و هسته‌ها برخورد می‌کند، گرما را از آن‌ها دریافت و به کمک بقیه اجزای سیستم خنک‌کاری (پمپ، رادیاتور، لوله، فن) این گرما را به بیرون منتقل می‌کند. مخزن روغن شامل پره‌هایی است که در آن تبادل حرارتی از روغن به محیط اطراف انجام می‌شود. سیم‌پیچ‌های مسی در این ترانسفورماتور به دور هسته‌ای آهنی پیچیده شده‌اند. فاصله بین سیم‌پیچ و مخزن با روغن پرشده است. در این مخزن‌ها، پره‌های خنک‌کننده در چهار طرف مبدل قرار می‌گیرند و به آن پیچ می‌شوند. روغن به رادیاتور پمپ و پس از خنک‌کاری به کمک پره‌های رادیاتور، به مخزن برگردانده می‌شود.

شکل ۱) نمایی از ترانسفورماتور توزیع برق مورد آزمایش

هسته ترانسفورماتور از ورقه‌هایی به ضخامت ۰/۳ میلی‌متری و از جنس فولاد سیلیکونی با نورد سرد (CRGO) ساخته‌شده است. سیم‌پیچ معمولاً از سیم مسی خالص ساخته می‌شود و تمام سیم‌پیچ‌های آن از یکدیگر و از هسته عایق شده‌اند. انواع مختلفی از عایق‌های الکتریکی در ترانسفورماتورها استفاده می‌شود. برخی از آن‌ها با هادی‌ها، برخی برای جداسازی لایه‌های نوارهای فلزی از یکدیگر و برخی نیز برای جداسازی سیم‌پیچ‌ها از هسته آهنی به کار می‌روند.

۲-۲- تجهیزات اندازه‌گیری

داده‌های تجربی با استفاده از تجهیزات و ابزارهای اندازه‌گیری نشان داده‌شده در شکل ۲ به دست آمده‌اند. در این مطالعه از تنظیم‌کننده توان، گرمکن برقی، آمپرمتر، دوربین حرارتی برند فلاک، دستگاه آزمون استقامت دی‌الکتریک برند مگر و ۸ حسگر دما استفاده شده است.

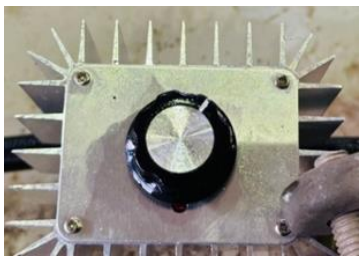
در این مطالعه تجربی از دو گرم‌کن میله‌ای و همچنین از یک تنظیم‌کننده که گرم‌کن‌ها را به منبع برق متصل می‌کند، استفاده می‌شود. از این گرم‌کن‌های برقی برای ایجاد گرما در روغن استفاده شده تا گرمای تولیدی در نمونه واقعی ترانسفورماتور در حین کار را شبیه‌سازی کند. این گرم‌کن‌ها به‌گونه‌ای تنظیم می‌شوند که متناسب با گرمای تولیدشده توسط سیم‌پیچ‌ها و هسته‌ها در هنگام بهره‌برداری، حرارت تولید کنند. حرارت موردنیاز در آزمون‌های مختلف توسط گرم‌کن‌های برقی غوطه‌ور در روغن ترانسفورماتور و با کمک تنظیم‌کننده توان تأمین شده‌اند. حس‌گرهای دما با دقت اندازه‌گیری ۱± سانتی‌گراد در فواصل مساوی و در عمق ۲۵ سانتی‌متری در داخل روغن قرار داده شده‌اند. برای گرفتن تصویر حرارتی از دوربین برند فلاک مدل TiX560 با رزولوشن ۴۸۰×۶۴۰ پیکسل و با دقت اندازه‌گیری ۲± سانتی‌گراد یا ۲٪ (هرکدام که بزرگ‌تر باشد) در بازه دمایی ۲۰- تا ۱۲۰۰ سانتی‌گراد، استفاده شده که دارای کیفیت تصویر بالایی است و جزئیات زیادی را نشان می‌دهد. در این آزمایش برای اندازه‌گیری میزان قدرت عایق الکتریکی روغن از دستگاه آزمون استقامت دی‌الکتریک برند مگر مدل OTS80PB استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری این دستگاه با توجه به نرخ افزایش ولتاژ در دستگاه ۱٪± است.

۲-۳- ماده تغییر فاز دهنده

در این مطالعه از پارافین به‌عنوان یک ماده تغییر فاز دهنده ساده و کم‌وزن استفاده شده است که خواص آن در جدول ۱ آمده است. با برش صفحه آلومینیومی و جوشکاری آن‌ها، قوطی‌هایی با ابعاد ۴۵×۲۰×۳ سانتی‌متر به‌عنوان مخزن پارافین ساخته شده‌اند. در این قوطی‌ها برای افزایش نرخ انتقال حرارت از پره‌های داخلی استفاده می‌کنند. قوطی آلومینیومی و توزیع پارافین را در داخل آن پس از ذوب و انجماد مجدد در شکل ۳ نشان داده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-20]

[DOI: 10.22034/MME.24.1.21]



(الف)

(ب)

(ج)

(د)

(ه)

شکل ۲) ابزار اندازه‌گیری: الف) تنظیم‌کننده توان، ب) گرمکن برقی، ج) دوربین حرارتی فلاک، د) دستگاه آزمون استقامت دی‌الکتریک مِگِر، ه) حسگرهای دما

جدول ۱) خواص حرارتی پارافین و روغن ترانسفورماتور [18]

مواد	هدایت حرارتی (W/m.K)	گرمای ویژه (kJ/kg.K)	چگالی (kg/m³)	دما (°C)		گرمای ذوب (kJ/kg)	ویسکوزیته برای فاز مایع (kg/m.s)
				T_s	T_l		
پارافین	۰/۲۱۲	۱/۸-۲/۳	۸۸۰	۵۰	۵۷	۱۷۳/۶	۰/۰۰۶۳
روغن ترانسفورماتور	۰/۱۰۹	۲	۸۸۰	-	-	-	-

(الف)

(ب)

(ج)

شکل ۳) نحوه آماده‌سازی پارافین: الف) ساخت قوطی آلومینیومی، ب) تزریق پارافین مایع، ج) پارافین پس از انجماد مجدد در قوطی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-20]

[DOI: 10.22034/MME.24.1.21]

۲-۴- روش آزمون

در این مطالعه پارافین را ابتدا وزن کرده و پس از قرار دادن در ظرفی مخصوص، حرارت داده تا ذوب شود و مطابق با شکل۳ داخل ظروف آلومینیومی تزریق می‌شود. سپس ورودی این ظرف آلومینیومی برای جلوگیری از اختلاط پارافین و روغن جوش داده می‌شود و این ظروف در داخل روغن قرار می‌گیرند. با هر آزمایش جدید یک ظرف اضافی با ۲ کیلوگرم پارافین اضافه می‌شود تا جرم نهایی به ۸ کیلوگرم برسد. در این آزمایش از مقادیر مختلف پارافین (۲، ٤، ٦ و ۸ کیلوگرم) استفاده شده است. این مقادیر بر اساس گنجایش مخزن روغن ترانسفورماتور تعیین می‌شود. مقدار پارافین به‌کاررفته بسته به اندازه مخزن روغن ترانسفورماتور قابل‌افزایش است [19]. در آزمایش اول، حرارت با نرخ ٦۰۰۰ وات و به‌صورت ناگهانی توسط گرم‌کن‌های برقی به روغن داده می‌شوند و برای مدت یک ساعت داده‌برداری توسط ۸ حسگر دمایی انجام و نتایج ثبت می‌گردد. آزمایش دوم، با اعمال حرارت با نرخ ۲۰۰۰ وات انجام می‌شود، اما این بار گرما به‌صورت تدریجی و برای مدت‌زمان بلندتری (٤ ساعت) به روغن اعمال می‌گردد.

۲-۵- معادلات حاکم

گرمای محسوس را می‌توان از ظرفیت گرمای ویژه و اختلاف دما به‌صورت زیر محاسبه کرد [20]:

$$Q_{sensible} = \int_{T_1}^{T_2} mC_p dT \qquad (۱)$$

و گرمای نهان ماده تغییر فاز دهنده را می‌توان از طریق زیر محاسبه کرد:

$$Q_{latent=}\ a\ m\ H_l \qquad (۲)$$

جایی که a کسر جرمی مذاب ماده تغییر فاز دهنده است.

کسر جرمی مذاب را می‌توان با رابطه (۳) پس از اندازه‌گیری دمای متوسط روغن، T_m و مقایسه این دما با دمای جامد و مایع ماده تغییر فاز دهنده، محاسبه کرد [21]:

$$\begin{cases} a = 0 & if\ T < T_s \\ a = \dfrac{(T\ -\ T_s)}{(T_l - T_s)} & if\ \ T_s < T < T_l \\ a = 1 & if\ T > T_l \end{cases} \qquad (۳)$$

انرژی کل (محسوس و نهان) منتقل‌شده را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد [22]:

$$Q = \int_{Ts}^{Tpc} m\ C_{p,s}\ dT + m\ H_l + \int_{Tpc}^{T_l} m\ C_{p,l}\ dT \qquad (۴)$$

شار گرمایی تولیدشده در سیم‌پیچ تقریباً برابر با کل گرمای منتقل‌شده توسط روغن و گرمای ذخیره‌شده در ماده تغییر فاز دهنده است.

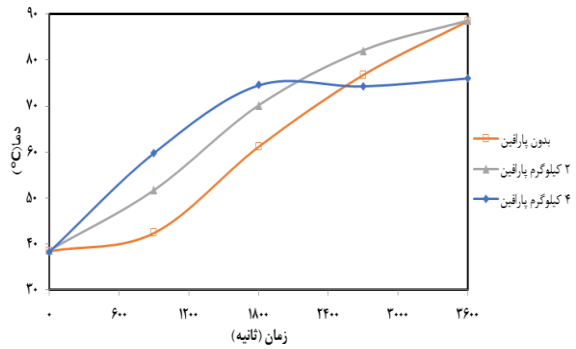
۳- نتایج وتفسیر آن‌ها

۳-۱- بررسی تأثیر ماده تغییر فاز دهنده بر خنک‌سازی ترانسفورماتور

در این مطالعه، نتایج تجربی برای دو حالت به دست آمده‌اند. در حالت اول آزمایش با شوک حرارتی به روغن و در حالت دوم با افزایش تدریجی دمای روغن انجام شده است. اثر اضافه کردن ماده تغییر فاز دهنده و ذخیره حرارتی در آن‌ها در افزایش ناگهانی و سریع دمای روغن در شکل ۴ نشان داده شده است. در این مرحله مدت‌زمان انجام آزمون ۶۰ دقیقه و مجموع توان مصرفی گرم‌کن‌های برقی بر روی ۶۰۰۰ وات تنظیم شده است. بعد از طی این زمان دما به‌شدت بالا رفته و به نزدیکی ۹۰ سانتی‌گراد می‌رسد که این امر می‌تواند باعث آسیب به ترانسفور شود.

همان‌طور که از نمودارهای شکل ۴ مشخص است با اعمال ناگهانی و سریع بار حرارتی در ۳۰ دقیقه ابتدایی درجه حرارت روغن با استفاده از ۴ کیلوگرم پارافین از دو حالت دیگر بیشتر است چراکه بخشی از گرما توسط پارافین جامد جذب و صرف افزایش دمای پارافین می‌گردد تا به نقطه ذوب برسد. با توجه به کمتر بودن ظرفیت گرمای ویژه پارافین جامد از روغن، گرمای جذب‌شده نسبت به حالت استفاده از روغن بدون پارافین کمتر است. با توجه به افزایش دمای روغن با به‌کارگیری ۲ و ۴ کیلوگرم پارافین معلوم می‌شود که افزودن پارافین در صورت بروز شک حرارتی در ترانسفورماتور فایده‌ای ندارد. پس از گذشت ۳۰ دقیقه و رسیدن پارافین به نقطه ذوب به‌تدریج دمای روغن با به‌کارگیری ۲ و ۴ کیلوگرم پارافین کاهش می‌یابد و دمای روغن بدون استفاده از پارافین با آهنگ شدیدی زیاد می‌شود.

در آزمایش دوم، قوطی‌های حاوی پارافین به مدت ۴ ساعت در داخل روغن غوطه‌ور شده‌اند و گرما از طریق دو گرم‌کن برقی و با اعمال ۲۰۰۰ وات به‌تدریج به روغن اعمال می‌شود که گرمای تولیدشده توسط گرم‌کن معادل تلفات حرارتی از سیم‌پیچ‌ها و هسته داخل ترانسفورماتور در حین کار واقعی است.



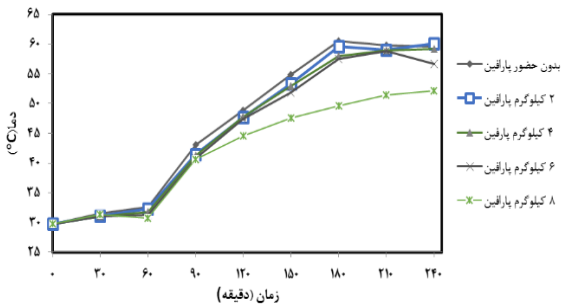
شکل ۴) اثر شوک حرارتی بر دمای روغن

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-20]

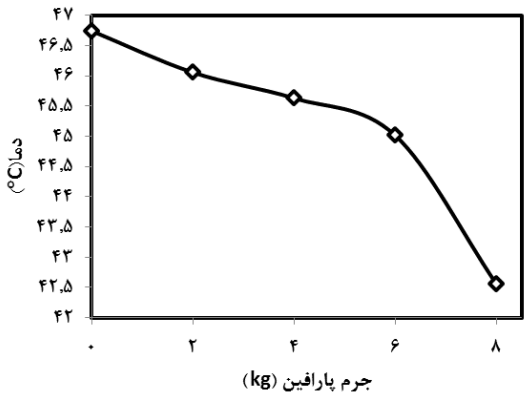
[DOI: 10.22034/MME.24.1.21]

۸ حس‌گر دمایی در نقاط مختلف روغن و در عمق ۲۵ سانتی‌متری آن قرار گرفته که کار خوانش دما را انجام می‌دهند. تغییرات دمای روغن بدون اضافه کردن پارافین و با حضور مقادیر مختلف آن با گذشت زمان در شکل ۵ نشان داده شده است.

در مراحل ابتدایی یعنی در شروع کار گرم‌کن برقی، دمای روغن در همه حالت‌ها یکسان است و زمانی که حرارت به روغن اعمال می‌شود، تغییرات دمایی ایجاد می‌گردد. هر چه مقدار پارافین بیشتری اضافه شود، جذب حرارت بیشتر شده و این گرمای جذب‌شده توسط پارافین، میزان گرمای تولیدشده در داخل روغن ترانسفورماتور توزیع را کاهش می‌دهد. این پدیده به علت جذب گرمای اضافی توسط ماده تغییر فاز دهنده درنتیجه فرآیند ذوب است که هرچه مقدار ماده تغییر فاز دهنده غوطه‌ور شده افزایش یابد، در اثر ذوب و جذب حرارت، میزان کاهش دما زیاد می‌شود. میانگین دمای این ۸ حس‌گر برای مدت زمان ۴ ساعت با به‌کارگیری مقادیر مختلف پارافین در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار پارافین غوطه‌ور در روغن به ۸ کیلوگرم میانگین دمای روغن ۴۲/۵ سانتی‌گراد شد، به‌عبارت‌دیگر میانگین دمای روغن ۴/۲ سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. کسر جرمی پارافین در طول زمان برای جرم‌های مختلف آن با گذشت زمان در شکل ۷ نشان داده شده است.



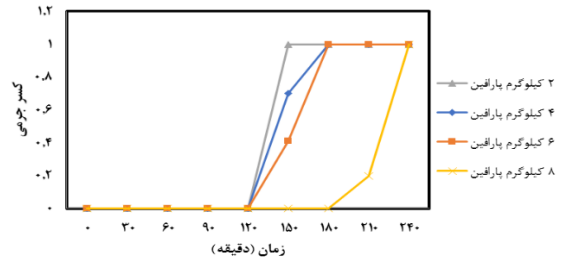
شکل ۵) تغییرات دمای روغن با گذشت زمان در حضور و بدون حضور پارافین



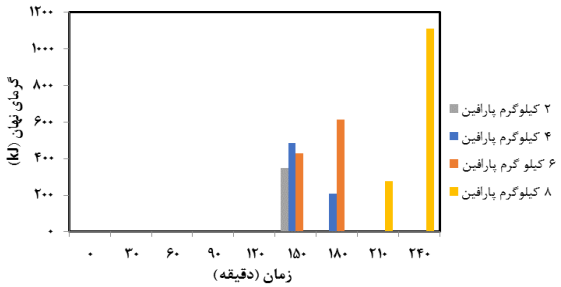
شکل ۶) اثر افزایش جرم پارافین بر دمای میانگین روغن با اعمال تدریجی بار حرارتی

این شکل نشان می‌دهد که کسر جرمی در شروع آزمایش برابر با صفر است، به این معنی که پارافین در ابتدا به حالت جامد است؛ اما با افزایش دما، پارافین شروع به ذوب شدن می‌کند و درنتیجه کسر جرمی شروع به افزایش می‌کند و درنهایت، به حداکثر مقدار خود یعنی ۱ می‌رسد که نشان می‌دهد تمام پارافین به حالت مایع درآمده است. علت متفاوت بودن دوره زمانی ذوب شدن ناشی از مختلف بودن جرم پارافین استفاده شده در این آزمایش است که شروع فرآیند ذوب را با توجه به مقدار ماده تغییر فاز دهنده غوطه‌ور در روغن به تأخیر می‌اندازد. در شکل ۸، میزان جذب حرارت پارافین برحسب زمان و برای مقادیر مختلف پارافین نشان داده است. این نمودار بیانگر این است که حرارت به‌دست‌آمده در داخل پارافین به گرمای نهان تبدیل می‌شود. این نمودار نشان می‌دهد که مقدار جذب حرارت با زیاد شدن مقدار پارافین افزایش می‌یابد، به‌عبارت‌دیگر افزایش مقدار پارافین، منجر به کاهش دمای سیم‌پیچ‌های داخلی ترانسفورماتور توزیع و درنتیجه باعث بهبود عایق الکتریکی و حفاظت از فایل‌های داخلی در برابر آسیب می‌شود و طول عمر آن‌ها را افزایش می‌دهد.

قبل و بعد از انجام هر مرحله از آزمایش با استفاده از دوربین حرارتی دمای ترانسفورماتور الکتریکی ثبت می‌شود. تصاویر حرارتی گرفته‌شده توسط دوربین حرارتی برای حالتی که فقط از روغن و یا از روغن و پارافین به‌صورت هم‌زمان استفاده‌شده در شکل ۹ باهم مقایسه می‌شوند. این شکل تصاویر حرارتی ترانسفورماتور را برای سه حالت مختلف در ابتدای کار ترانسفورماتور، در صورت وجود روغن ترانسفورماتور به‌تنهایی و در حضور ۸ کیلوگرم پارافین نشان می‌دهد.



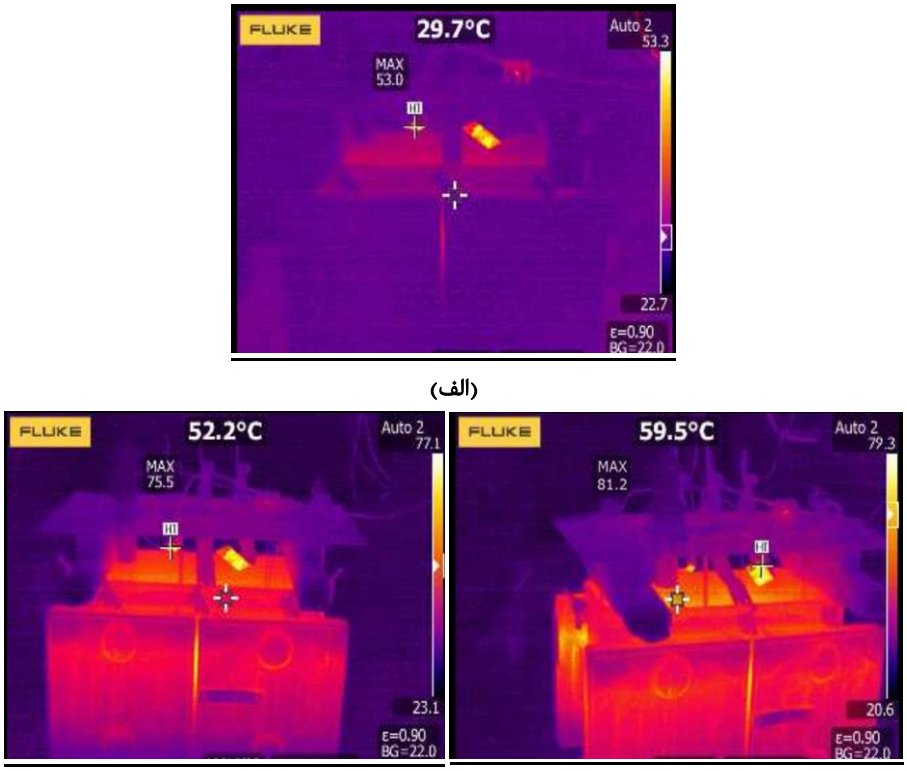
شکل ۷) تغییر کسر جرمی پارافین با زمان



شکل ۸) تغییر در مقدار گرمای نهان برای مقادیر مختلف پارافین با گذشت زمان

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-20]

[DOI: 10.22034/MME.24.1.21]



شکل ۹) تصاویر حرارتی ترانسفورماتور توزیع: الف) در ابتدای کار، ب) بدون پارافین، ج) با اضافه کردن ۸ کیلوگرم پارافین

۳-۲- بررسی تأثیر ماده تغییر فاز دهنده بر استقامت دی‌الکتریک روغن

مقدار استقامت دی‌الکتریک روغن ترانسفورماتور پس از اتمام آزمون‌ها با و بدون به‌کارگیری پارافین به کمک دستگاه مگر اندازه‌گیری شده است. این آزمون‌ها به ترتیب در دماهای روغن ۴۲ و ۳۷ سانتی‌گراد برای دو حالت با و بدون به‌کارگیری پارافین انجام شده است. قرائت‌ها پس از قرار دادن روغن در کاپ دستگاه انجام و نتایج در جدول ۲ آورده شده است. عددی که این دستگاه نشان می‌دهد به دمای روغن ترانسفورماتور که در داخل کاپ مخصوص دستگاه قرار داده می‌شود، بستگی دارد. در داخل این کاپ دو الکترود وجود دارد. هنگامی‌که آزمایش شروع می‌شود، یک میدان مغناطیسی به الکترودهای قرار داده‌شده در داخل کاپ روغن اعمال می‌شود و میزان عایق الکتریکی روغن قبل از خرابی آن محاسبه می‌شود. این آزمایش برای هر دو حالت ۶ مرتبه تکرار و نتایج در جدول ۲ مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد که با به‌کارگیری ۸ کیلوگرم پارافین، مقدار ولتاژی که روغن می‌تواند به‌عنوان عایق الکتریکی تحمل کند از ۵۶/۸ به ۶۱ کیلوولت افزایش می‌یابد؛ به‌عبارت‌دیگر، به‌کارگیری پارافین استقامت دی‌الکتریک روغن را ۴/۲ کیلوولت افزایش می‌یابد.

جدول ۲) تأثیر پارافین بر روی خاصیت عایق الکتریکی روغن

شماره آزمایش	مقدار ولتاژ (بدون پارافین) (کیلوولت)	مقدار ولتاژ (با پارافین) (کیلوولت)
۱	۵۴/۵	۶۱/۱
۲	۵۷/۱	۵۴/۲
۳	۵۴/۳	۵۶/۶
۴	۶۱/۳	۶۹/۶
۵	۵۵/۴	۶۰/۲
۶	۵۸/۲	۶۴/۴
میانگین	۵۶/۸	۶۱

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر استفاده از پارافین به‌عنوان ماده تغییر فاز دهنده جهت بهبود انتقال حرارت در ترانسفورماتورهای توزیع برق به‌طور تجربی بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که:

۱) خنک‌کاری ترانسفورماتورها را می‌توان با زیاد کردن مقدار پارافین استفاده‌شده در داخل روغن ترانسفورماتور افزایش داد، زیرا افزایش مقدار پارافین منجر به افزایش جذب گرما می‌شود. استفاده از ۸ کیلوگرم پارافین در مقایسه با استفاده از روغن به‌تنهایی، ۴/۲ سانتی‌گراد دمای روغن ترانسفورماتورهای الکتریکی را کاهش می‌دهد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-20]
[DOI: 10.22034/MME.24.1.21]

۲) وقتی دمای روغن به‌طور ناگهانی و سریع در عرض چند دقیقه افزایش یابد، افزودن پارافین به‌خوبی نمی‌تواند باعث دفع حرارت و کاهش دما شود.

۳) اضافه کردن پارافین به روغن برای محافظت از ترانسفورماتور در برابر خرابی در دوره پیک فصل تابستان و بارهای زیاد بسیار مفید است. با استفاده از پارافین و کاهش دمای روغن، استقامت دی‌الکتریک آن و حداکثر ولتاژ قابل‌تحمل، ۴/۲ کیلوولت افزایش می‌یابد. این امر باعث کاهش خرابی ترانسفورماتور در مواجهه با پیک حرارتی می‌شود.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچگونه تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

تقدیر و تشکر: نویسندگان مراتب قدردانی خود را از حمایت‌های مالی شرکت برق منطقه‌ای استان کربلای عراق و همچنین از زحمات مهندسان و تکنیسین‌های شبکه توزیع برق شهر کربلا ابراز می‌دارند.

فهرست علائم

a	کسر حجمی
Cp	گرمای ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
H	گرمای نهان (Jkg^{-1})
m	جرم (kg)
Q	گرمای ذخیره‌شده (J)
T	دما (K)

زیرنویس‌ها

l	مایع
m	میانگین
s	جامد

منابع

1- Wang S, Li YZ, Liu Y, Zhou H, Li Y, Guo W, Xiao X. Temperature control of permanent-magnet synchronous motor using phase change material. In2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) 2015 Jul 7 (pp. 1635-1640). IEEE.

2- Biwole PH, Eclache P, Kuznik F. Phase-change materials to improve solar panel's performance. Energy and Buildings. 2013 Jul 1;62:59-67.

3- Lu S, Zhao Y, Fang K, Li Y, Sun P. Establishment and experimental verification of TRNSYS model for PCM floor coupled with solar water heating system. Energy and Buildings. 2017 Apr 1;140:245-60.

4- Bin X, Guobiao G, Lin R, Zhenguo L. Study on overload performance enhancement of motor based on heat storage of phase change paraffin. In2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) 2017 Aug 11 (pp. 1-4). IEEE.

5- Hasan A, Sarwar J, Alnoman H, Abdelbaqi ES. Yearly energy performance of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system in hot climate. Solar Energy. 2017 Apr 1;146:417-29.

6- Reddy PB, Gunasekar C, Mhaske AS, Krishna MN. Enhancement of thermal conductivity of PCM using filler graphite powder materials. InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018 Aug 1 (Vol. 402, No. 1, p. 012173). IOP Publishing.

7- Saeed RM, Schlegel JP, Sawafta R, Kalra V. Plate type heat exchanger for thermal energy storage and load shifting using phase change material. Energy Conversion and Management. 2019 Feb 1;181:120-32.

8- Abdulrahman RS, Ibrahim FA, Dakhil SF. Development of paraffin wax as phase change material based latent heat storage in heat exchanger. Applied Thermal Engineering. 2019 Mar 5;150:193-9.

9- Abduladheem AA, Hasan MI. Using of PCM as an energy storage material to improve the cooling process in electrical transformers. University of Thi-Qar Journal for Engineering Sciences. 2019;10(2):98-104.

10- Ayat S, Serghine C, Klonowski T, Yon S, Mutabazi A, McDaniel S. The use of phase change material for the cooling of electric machine windings formed with hollow conductors. In2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) 2019 May 12 (pp. 1195-1201). IEEE.

11- Faraj K, Faraj J, Hachem F, Bazzi H, Khaled M, Castelain C. Analysis of underfloor electrical heating system integrated with coconut oil-PCM plates. Applied Thermal Engineering. 2019 Jul 25;158:113778.

12- Plytaria MT, Bellos E, Tzivanidis C, Antonopoulos KA. Numerical simulation of a solar cooling system with and without phase change materials in radiant walls of a building. Energy conversion and management. 2019 May 15;188:40-53.

13- Fayaz H, Rahim NA, Hasanuzzaman M, Nasrin R, Rivai A. Numerical and experimental investigation of the effect of operating conditions on performance of PVT and PVT-PCM. Renewable Energy. 2019 Dec 1;143:827-41.

14- González-Peña D, Alonso-deMiguel I, Díez-Mediavilla M, Alonso-Tristán C. Experimental analysis of a novel PV/T panel with PCM and heat pipes. Sustainability. 2020 Feb 25;12(5):1710.

15- Gholamibozanjani G, Farid M. Application of an active PCM storage system into a building for heating/cooling load reduction. InThermal Energy Storage with Phase Change Materials 2021 Jul 25 (pp. 331-358). CRC Press.

16- Wang Z, Qiao Y, Liu Y, Bao J, Gao Q, Chen J, Yao H, Yang L. Thermal storage performance of building envelopes for nearly-zero energy buildings during cooling season in Western China: An experimental study. Building and Environment. 2021 May 1;194:107709.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-20]

[DOI: 10.22034/MME.24.1.21]

17- Li Z, Ma T, Zhao J, Song A, Cheng Y. Experimental study and performance analysis on solar photovoltaic panel integrated with phase change material. Energy. 2019 Jul 1;178:471-86.
18- Oró E, De Gracia A, Castell A, Farid MM, Cabeza LF. Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. Applied Energy. 2012 Nov 1;99:513-33.
19- Hasan MI, Abduladheem AA. Modifying the thermal performance of electrical distribution transformers using phase change materials (paraffin wax). Heat Transfer—Asian Research. 2019 Sep;48(6):2440-55.
20- Kandasamy R, Wang XQ, Mujumdar AS. Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-based heat sinks. Applied thermal engineering. 2008 Jun 1;28(8-9):1047-57.
21- Sciacovelli A, Gagliardi F, Verda V. Maximization of performance of a PCM latent heat storage system with innovative fins. Applied Energy. 2015 Jan 1;137:707-15.
22- Hasan MI, Basher HO, Shdhan AO. Experimental investigation of phase change materials for insulation of residential buildings. Sustainable cities and society. 2018 Jan 1;36:42-58.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-20]

[DOI: 10.22034/MME.24.1.21]