ISSN: 2476-6909; Modares. Mech. Eng. *2025;25(07):403-415.*

Modares Mechanical Engineering

DOI: 10.48311/MME.25.7.403
journal homepage: www.mme.modares.ac.ir

New Methods of Controlling the Temperature of Exothermic Equipment using Phase Change Nanocomposites

Mohamad Shafagati[1], Aziz Babapoor[1*], Zohreh Rahimi-Ahar[2]

[1] Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
[2] Department of Chemical Engineering, Engineering Faculty, Velayat University, Iranshahr, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: December 30, 2024
Revised: June 02, 2025
Accepted: June 03, 2025
ePublished: September 12, 2025

ABSTRACT

The use of phase change materials (PCMs) in heat sinks (HSs) is an effective method that has garnered significant attention from researchers. However, due to their low thermal conductivity, the application of these materials for cooling digital components is limited. To address this limitation, thermal conductivity enhancers (TCEs) are employed. The purpose of this study is to investigate various TCEs applied to PCM-based heat sinks. It includes recent experimental and numerical research, with an emphasis on analyzing the effects of TCEs such as fins, foams, and nanoparticles on improving the thermal performance of PCM-based heat sinks. According to previous studies, limited research has been conducted on PCM-based heat sinks under alternating conditions. Additionally, no numerical studies currently exist on hybrid heat sinks that demonstrate superior thermal cooling compared to conventional heat sinks. Furthermore, the remarkable heat transfer capabilities of nanoparticles suggest they are promising as passive solutions for electronic thermal management.

Keywords: Phase Change Materials, Heat Sink, Thermal Conductivity Enhancers, Fin

How to cite this article
Shafagati M, Babapoor A, Rahimi-Ahar Z, New Methods of Controlling the Temperature of Exothermic Equipment using Phase Change Nanocomposites. Modares Mechanical Engineering; *2025;25(07):403-415.*

**Corresponding author's email: babapoor@uma.ac.ir*
**Corresponding ORCID ID: 0000-0003-4907-2462*

Copyright© 2025, 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.

شاپا: ۷۹۰۹-۲۴۷۶؛ مهندسی مکانیک مدرس. ۴۱۵-۴۰۳:(۰۷)۲۵؛۱۴۰۴

مهندسی مکانیک مدرس

DOI: 10.48311/MME.25.7.403

صفحه اصلی مجله: www.mme.modares.ac.ir

مروری بر روش‌های نوین درکنترل دمای تجهیزات گرمازا با استفاده از نانو کامپوزیت‌های تغییرفازدهنده

محمد شفقتی[۱]، عزیز باباپور[۱*]، زهره رحیمی اهر[۲]

[۱] گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

[۲] گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۲۱

چکیده

کنترل حرارتی قطعات الکترونیکی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در سینک‌های حرارتی (HSs) روشی کارآمد است که توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. با این حال، به دلیل هدایت حرارتی ضعیف، استفاده از این مواد برای خنک کردن قطعات الکترونیکی محدود است. برای غلبه بر این ضعف، از تقویت‌کننده‌های هدایت حرارتی (TCEs) استفاده می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی TCE های مختلف است که بر روی سینک‌های حرارتی مبتنی بر PCM اعمال می‌شود و شامل تحقیقات اخیر در مورد کارهای تجربی و عددی با تأکید بر تجزیه و تحلیل تأثیر استفاده از TCEهایی مانند پره‌ها، فوم‌ها و نانوذرات برای بهبود عملکرد حرارتی سینک‌های حرارتی مبتنی بر PCM است. با توجه به پژوهش‌های قبلی، مطالعات کمی بر روی سینک حرارتی مبتنی بر PCM تحت شرایط متناوب انجام شده است. علاوه بر این، در مورد سینک¬های حرارتی هیبریدی که خنک‌کنندگی حرارتی بالایی نسبت به سینک‌های حرارتی معمولی نشان می‌دهند، مطالعات عددی وجود ندارد. به نظر می‌رسد که قابلیت‌های جالب انتقال حرارت نانوذرات، به‌عنوان راه‌حل‌های غیرفعال برای مدیریت حرارتی الکترونیکی ترجیح داده می‌شوند.

کلیدواژه‌ها: مواد تغییر دهنده فاز، سینک حرارتی، تقویت‌کننده‌های هدایت حرارتی، پره

نحوه ارجاع به این مقاله

شفقتی محمد، باباپور عزیز، رحیمی اهر زهره، مروری بر روش‌های نوین درکنترل دمای تجهیزات گرمازا با استفاده از نانو کامپوزیت‌های تغییرفازدهنده، مهندسی مکانیک مدرس. ۴۱۵-۴۰۳:(۰۷)۲۵؛۱۴۰۴

*پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: babapoor@uma.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده دار مکاتبات: ۰۰۰۰-۰۰۰۳-۴۹۰۷-۲۴۶۲

Copyright© 2025, 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.

۱- مقدمه

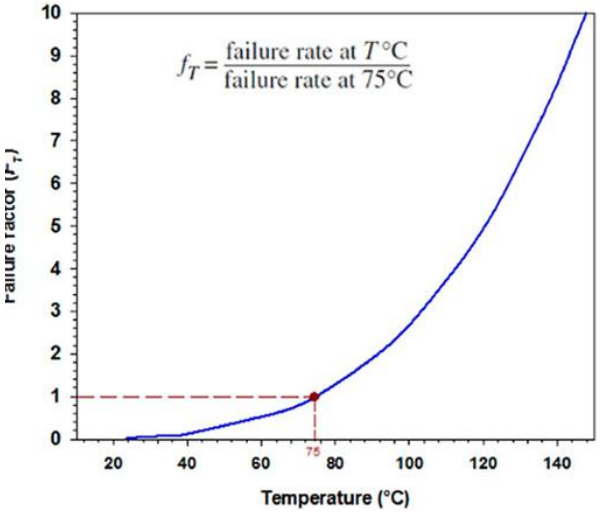
در سال‌های اخیر، با توجه به رشد سریع تقاضای جامعه، سرعت پیشرفت در نیازمندی‌های دستگاه‌های الکترونیکی در کاربردهای مختلف مانند هوافضا، حمل و نقل و ارتباطات به‌طور فزاینده‌ای بالا بوده است. با توسعه فناوری‌های مدارهای یکپارچه که هنوز از قانون مور کلاسیک پیروی می‌کنند، افزایش مداوم چگالی توان و کوچک‌سازی قطعات الکترونیکی از میکرومتر به نانومتر باعث افزایش سرعت مدار و عملکرد بالا می‌شود. به گفته شرکت سازنده نیمه‌هادی تایوان، تراشه‌های الکترونیکی ۳ نانومتری در سال ۲۰۲۱ تولید شدند و تراشه‌های کارخانه ۲ نانومتری در حال ساخت هستند. افزایش چگالی توان در قطعات الکترونیکی پیشرفته به چالشی اساسی برای مهندسان تبدیل شده است [1]. مدیریت ناکارآمد حرارت می‌تواند منجر به تخریب زودهنگام اجزا، کاهش عملکرد و افزایش هزینه‌های نگهداری شود. دمای بالا نه‌تنها بازده ترانزیستورها را کاهش می‌دهد، بلکه اثرات جانبی مانند الکترومایگریشن و تخریب مواد را نیز تشدید می‌کند [3] . به‌همین دلیل، پژوهش‌ها در زمینه مدیریت حرارتی به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از راهکارهای پیشنهادی برای بهبود مدیریت حرارتی، استفاده از مواد تغییر فاز (PCM) است. این مواد با جذب و آزادسازی حرارت در طی فرایند تغییر فاز، امکان کاهش نوسانات دمایی و حفظ دمای عملیاتی بهینه را فراهم می‌کنند. علاوه بر PCM، روش‌هایی مانند استفاده از نانوسیالات، میکروکانال‌های خنک‌کننده و سامانه‌های حرارتی هیبریدی نیز در حال توسعه هستند [5]. مواد تغییر فاز دهنده به دلیل ظرفیت حرارتی بالا و توانایی ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در هنگام تغییر فاز جامد به مایع، به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد معمولاً در دمای خاصی عمل می‌کنند و می‌توانند به‌عنوان یک سپر حرارتی عمل کنند [7]. در سال‌های اخیر، ترکیب نانوذرات با PCM برای بهبود هدایت حرارتی و پایداری آنها پیشنهاد شده است. برای مثال، اضافه کردن نانوذرات فلزی یا کربنی به PCM می‌تواند سرعت انتقال حرارت را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. این فناوری‌ها در حال حاضر در سامانه‌های الکترونیکی پیشرفته، باتری‌های لیتیوم-یون و حتی سامانه‌های خورشیدی به‌کار گرفته می‌شوند. میکروکانال‌های خنک‌کننده یک راه‌حل مؤثر برای مدیریت حرارت در دستگاه‌های الکترونیکی کوچک‌سازی شده هستند [9]. این سامانه‌ها از کانال‌های بسیار ریز با مایعات خنک‌کننده استفاده می‌کنند تا حرارت تولیدشده توسط تراشه‌ها را جذب و دفع کنند. طراحی بهینه این کانال‌ها می‌تواند منجر به افزایش بازده حرارتی و کاهش مصرف انرژی شود. همچنین، استفاده از نانوسیالات به جای مایعات خنک‌کننده معمولی می‌تواند عملکرد این سامانه‌ها را بهبود بخشد [11]. این فناوری‌ها با بهره‌گیری از ویژگی‌های حرارتی خاص مواد در مقیاس نانو، پتانسیل بالایی برای کاربرد در تراشه‌های پیشرفته دارند. اگرچه فناوری‌های جدید در مدیریت حرارتی امیدبخش هستند، اما هنوز چالش‌هایی مانند هزینه بالا، پیچیدگی در تولید و محدودیت‌های مواد وجود دارد. به‌عنوان مثال، یکپارچه‌سازی مواد تغییر فاز دهنده با ساختارهای موجود بدون تأثیر منفی بر عملکرد الکترونیکی، نیازمند تحقیق و توسعه بیشتری است [13]. همچنین، بهبود مدل‌سازی‌های حرارتی برای پیش‌بینی دقیق رفتار تجهیزات الکترونیکی در شرایط عملیاتی مختلف ضروری است. با توجه به اهمیت مدیریت حرارتی در تجهیزات الکترونیکی پیشرفته، تلاش‌های گسترده‌ای در راستای توسعه فناوری‌های نوین صورت گرفته است [15]. استفاده از مواد نانوساختار و روش‌های خنک‌کنندگی نوآورانه می‌تواند به کاهش چالش‌های موجود کمک کند. آینده این حوزه با پیشرفت‌های بیشتر در زمینه مواد و فناوری‌های ساخت، نویدبخش افزایش کارایی و پایداری در دستگاه‌های الکترونیکی خواهد بود. علاوه بر این، تعداد قطعات الکترونیکی (ترانزیستور) که می‌توانند بر روی مدار یکپارچه تعبیه شوند، طبق قانون مور [3] همچنان در حال افزایش است. به‌عنوان مثال، تعداد ترانزیستورهای نصب‌شده در Core i7 بیش از ۷۳۱ میلیون ترانزیستور روی سطح ۲۷۰ میلی‌متر مربع است که توان حرارتی آن را به ۱۴۰ وات افزایش می‌دهد [18]. این تعداد ترانزیستور باعث افزایش دمای پیک، کوتاهی عمر و کاهش عملکرد آن‌ها می‌گردد. با این‌حال، قابلیت اطمینان کار اجزای الکترونیکی (ترانزیستور) و دمای عملیاتی آن ارتباط نزدیکی دارند. همانطور که توسط همبستگی بلک [19] تخمین زده می‌شود، زمان متوسط تا شکست (MTF)، برحسب ساعت طبق معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$MTF = \frac{1}{AJ^2} exp\left(\frac{E_A}{K_B T}\right) \quad (۱)$$

که در این رابطه A ضریب پیش‌نمایی (پیش‌عاملی)، J چگالی جریان، برحسب A2/cm، E_A انرژی فعال‌سازی، برحسب eV، K_B ثابت بولتزمن و T دمای مطلق، برحسب کلوین (K) است.

معادله (۱) نشان می‌دهد که افزایش جزئی در دمای کار می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی میزان خرابی دستگاه را افزایش دهد. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که قطعات الکترونیکی که در شرایط دمای بالا کار می‌کنند می‌توانند منجر به خرابی قطعه شوند [21]. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در هر دمایی در مقایسه با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد، ضریب شکست به‌طور تصاعدی با افزایش دمای کارکرد دستگاه افزایش می‌یابد [19].

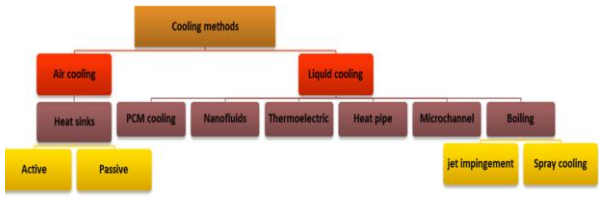
علاوه بر خرابی، افزایش دمای بالای قطعات الکترونیکی چالش‌های اجتناب‌ناپذیری را در حوزه مدیریت حرارتی ایجاد می‌کند و هزینه‌های خنک‌کننده را افزایش می‌دهد [19]. بنابراین، نیاز و تقاضای یک روش خنک‌کننده مؤثر و قابل اعتماد برای کاهش دمای عملیاتی و افزایش طول عمر قطعات الکترونیکی بسیار مهم می‌شود [22].



شکل ۱ ضریب خرابی قطعات الکترونیکی [3]

Fig. 1 Electronic component failure rate [3]

در حال حاضر راه‌حل‌های مدیریت حرارتی عمدتاً شامل دو روش است که می‌توان آن‌ها را به روش‌های خنک‌کننده فعال که نیاز به ورودی برق از طریق منبع خارجی دارد و روش‌های خنک‌کننده غیرفعال که نیازی به تجهیزات مکانیکی و ورودی انرژی ندارند تقسیم کرد [23]. روش‌های خنک‌کننده برای قطعات الکترونیکی بیشتر به دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند. اول اینکه خنک‌سازی مایع به‌عنوان روش‌های جوش به دو دسته تقسیم می‌شود: برخورد جت و خنک‌کننده اسپری [25]. دوم، خنک‌کننده هوا به‌عنوان سینک حرارتی که به دو دسته فعال و غیرفعال نیز طبقه‌بندی می‌شود و عموماً از مس یا آلومینیوم ساخته می‌شود (شکل ۲). سینک‌های حرارتی فعال دارای دمنده هستند [26] که به دلیل سر و صدای آن‌ها استفاده از این سینک‌ها محدود می‌شود. سینک‌های حرارتی غیرفعال [27] هیچ جزء مکانیکی ندارند. انواع سینک‌های حرارتی فعال و غیر فعال به ترتیب در شکل‌های ۳ و ٤ نشان داده شده است.



شکل ۲ روش‌های مختلف خنک‌کننده مورد استفاده در مدیریت حرارتی [26]

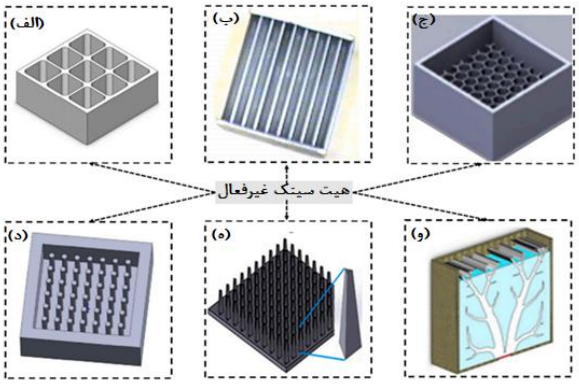
Fig. 2 Different cooling methods used in thermal management [26]

روند فعلی در فناوری‌ها به سمت کوچک شدن اندازه دستگاه‌های الکترونیکی است[34] . بنابراین، با محدودیت مکانی، استفاده از روش‌های خنک‌کننده فعال محدود می‌شود. علاوه بر این، این روش‌ها به دلیل پیچیدگی سامانه، وزن اضافی و تعمیر و نگهداری منظم که منجر به هزینه بالا می‌شود، همیشه محدودیت دارند. در نتیجه، روش خنک‌کننده غیرفعال اغلب کاربردی‌تر از خنک‌کننده فعال است [35]. در چند سال اخیر، سینک‌های حرارتی مبتنی بر PCM برای خنک‌کننده غیرفعال، به‌عنوان یک روش جایگزین ترجیح داده می‌شود [36] آن‌ها معمولاً برای دستیابی به قابلیت اتلاف حرارت بالا استفاده می‌شوند، در نتیجه گرمای آزاد شده توسط قطعات الکترونیکی را جذب می‌کنند، زمان عملیات را طولانی می‌کنند و زمان را برای رسیدن به حداکثر دمای به تعویق می‌اندازند. PCMهای مورد استفاده برای اهداف مدیریت حرارتی باید به معیارهای متعددی پاسخ دهند [37]. ابتدا دمای ذوب آن‌ها باید بین محدوده دمای کاری مجاز قطعات الکترونیکی باشد. آن‌ها باید غیرخورنده، غیرقابل اشتعال و غیرقابل انفجار باشند[19] . با این حال، این مواد هدایت حرارتی ضعیف دارند. به منظور رسیدگی به این موضوع، روش‌های متعددی برای بهبود رسانایی PCM وجود دارد که TCE نامیده می‌شوند (مانند پره‌های رسانا، فوم‌های فلزی، فوم کربن و نانوذرات) [39].

شکل ۳ سینک حرارتی فعال [19]

Fig. 3 Active heat sink [19]

هدف از این پژوهش، بررسی و تحلیل روش‌های نوین مدیریت حرارتی قطعات الکترونیکی با تمرکز بر استفاده از سینک‌های حرارتی مبتنی بر PCM و TCE است. این مطالعه به دنبال ارزیابی عملکرد TCEهای مختلف مانند پره‌ها، فوم‌های فلزی و نانوذرات در بهبود هدایت حرارتی PCMها و افزایش کارایی خنک‌کنندگی در شرایط عملیاتی متنوع است. همچنین، با مرور تحقیقات تجربی و عددی اخیر، تلاش می‌شود تا راهکارهای بهینه برای غلبه بر محدودیت‌های حرارتی در تجهیزات الکترونیکی پیشرفته ارائه گردد و چشم‌اندازی برای توسعه فناوری‌های خنک‌کننده غیرفعال در آینده ترسیم شود.



شکل ۴ سینک‌های حرارتی غیرفعال معمولی: پره های (الف) متقاطع [6] (ب) موازی [29]؛ (ج) لانه‌زنبوری [30]؛ (د) دایره‌ای [31]؛ (ه) مثلثی با مقطع متغیر [32]؛ (و) درختی شکل [28]

Fig. 4 Typical passive heat sinks: fins (a) crossed [6]; (b) parallel [29]; (c) honeycomb [30]; (d) circular [31]; (e) triangular with variable cross-section [32]; (f) tree-shaped [28]

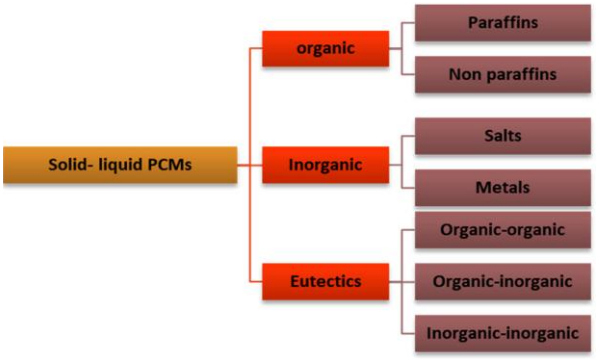
۲- PCMها و دستگاه‌های الکترونیکی خنک‌کننده

۲-۱- سینک حرارتی مبتنی بر PCM

سینک‌های حرارتی مبتنی بر PCM یکی از روش‌های غیرفعال اضطراری برای خنک‌کردن قطعات الکترونیکی با جذب گرمای تولیدشده در طول فرآیند انتقال فاز هستند. سینک‌های حرارتی دمای جزء را تقریباً یکنواخت نگه می‌دارند، زیرا قابلیت ذخیره حرارت بالایی دارند [41]. عموماً در خنک‌سازی حرارتی الکترونیک، از PCMهای جامد-مایع به‌عنوان ذخیره‌سازی انرژی حرارتی گرمای نهان (LHTES) استفاده می‌شود که تغییر حجم کمی در محدوده قابل قبولی دارند و نسبتاً مقرون به‌صرفه هستند. PCMها با توجه به نوع PCM در محدوده دمایی وسیعی کار می‌کنند. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، می‌توان آن‌ها را به PCMهای آلی، معدنی و یوتکتیک [43] طبقه‌بندی کرد.

PCMها مانند پارافین‌ها دارای نقطه ضعف رسانایی حرارتی پایین ۰/۱-۰/۳ W/m K هستند [45]. این ویژگی به‌عنوان نقطه‌ضعف اصلی آن‌ها در هنگام استفاده در خنک‌سازی قطعات الکترونیکی پرقدرت در نظر گرفته می‌شود، زیرا گرمای جذب‌شده از قطعات را نمی‌توان در مدت زمان کوتاهی حذف کرد، و گرما باعث کند شدن فرآیند انتقال حرارت می‌شود. بنابراین، بهبود رسانایی حرارتی سینک‌های حرارتی مبتنی بر PCM برای خنک کردن قطعات الکترونیکی با قدرت بالا حیاتی‌تر می‌شود [46].

از ساختاری که شامل یک سینک حرارتی بر پایه PCM است، برای خنک کردن یک قطعه الکترونیکی متصل به یک پره فلزی استفاده شد. برای تحلیل نتایج از روش آنتالپی-تخلخل و مدل تعادل حرارتی استفاده گردید. نتایج نشان داد که کارایی این سینک حرارتی با افزایش نسبت پر شدن فوم آلومینیوم بهبود می‌یابد، در نتیجه دمای قطعه الکترونیکی را به میزان ۱۵/۸۵ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد، زمان ذوب را بیش از ۱۰۰۰ ثانیه کوتاه می‌کند و رسانایی مؤثر کلی را ۲۵ برابر در مقایسه با مورد بدون فوم آلومینیوم افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نسبت بهینه پر کردن جزئی به دلیل صرفه‌جویی قابل توجه ۳۳/۳۳ درصد در هزینه مواد و وزن کلی سینک حرارتی، ۳/۲ تعیین شد [48]. در مطالعه‌ای دیگر از یک مجموعه آزمایشی از سینک حرارتی، PCM، نانوذرات کاربید سیلیکون، ترموکوپل و سامانه جمع‌آوری داده‌ها برای کنترل تولید گرما و افزایش گرمای از دست رفته به محیط اطراف در تجهیزات الکترونیکی استفاده شد. نانوذرات کاربید سیلیکون در ترکیبات مختلف، به عنوان مثال، ۱٪ وزنی، ۲٪ وزنی و ۳٪ درصد وزنی، در موم پارافین (به عنوان PCM) انتخاب شد. تأثیر گرمای ورودی (۱۵ وات، ۲۰ وات، ۳۵ وات و ۴۵ وات) از طریق گرم‌کننده صفحه نیز مورد مطالعه قرار گرفت. دمای عملیاتی سینک حرارتی در حین آزمایش اجازه داده شد بین ۴۵ تا ۶۰ درجه سانتیگراد در نوسان باشد. نوسان دمای سینک حرارتی برای نظارت و مقایسه دوره‌های شارژ، ماندن و تخلیه در سینک حرارتی ثبت شد. مشاهده شد که افزایش درصد ترکیب نانوذرات کاربید سیلیکون در موم پارافین منجر به افزایش دمای پیک و دوره ماندگاری سینک حرارتی می‌شود. افزایش حرارت ورودی بالای ۱۵ وات در کنترل مدت چرخه حرارتی سودمند است. در نتیجه استنباط شد که گرمای ورودی بالا در افزایش دوره گرمایش مفید است، در حالی که درصد ترکیب کاربید سیلیکون در PCM با افزایش دمای اوج و دوره ماندگاری سینک گرما سودمند است. بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که گرمای ورودی بالا، یعنی ۴۵ وات، در افزایش دوره گرمایش مفید است، در حالی که درصد ترکیب کاربید سیلیکون در PCM با افزایش دمای اوج سینک حرارتی و دوره ماندگاری سودمند است [49].



شکل ۵ پرکاربردترین PCMها [43]

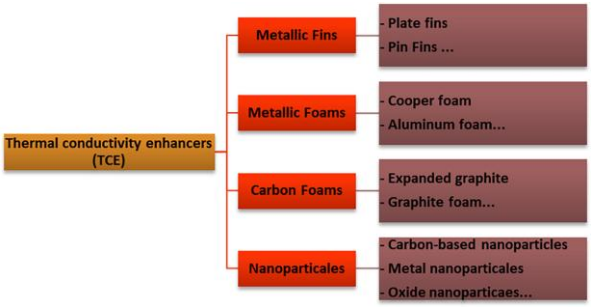
Fig. 5 The most widely used PCMs [43]

۲-۲- تقویت‌کننده‌های هدایت حرارتی (TCEs)

اگرچه PCMها از قابلیت بالای خود در جذب و ذخیره گرما در طول انتقال فاز جامد به مایع بهره می‌برند، بنابراین زمان شارژ را کاهش می‌دهند، دمای سینک حرارتی را یکنواخت نگه می‌دارند و می‌توانند استفاده طولانی‌تری داشته باشند. این مواد هنوز از

مسئله هدایت حرارتی ضعیف رنج می‌برند که استفاده از آن‌ها را محدود می‌کند. بنابراین، بهبود هدایت حرارتی آن‌ها با استفاده از TCE ضروری است [50]. TCEهای مختلف مجهز به پره‌های رسانا، فوم‌های کربنی، فوم‌های فلزی و نانوذرات در شکل ٦ نشان داده شده است.

در مطالعه‌ای دو نوع تقویت‌کننده هدایت حرارتی چاپ‌شده با چاپ سه‌بعدی بررسی گردید. پره‌ها و مواد متخلخل ساختاری برای افزایش عملکرد حرارتی سینک‌های حرارتی استفاده شد. ۱۵ سینک حرارتی با در نظر گرفتن پیکربندی‌های TCE و کسر حجمی مختلف طراحی شدند. هر دو بررسی تجربی و عددی برای ارزیابی رفتار حرارتی این سینک‌های حرارتی تحت مقادیر مختلف توان (۱۰ وات، ۱۵ وات و ۲۰ وات) و با در نظر گرفتن گرانش انجام شدند.



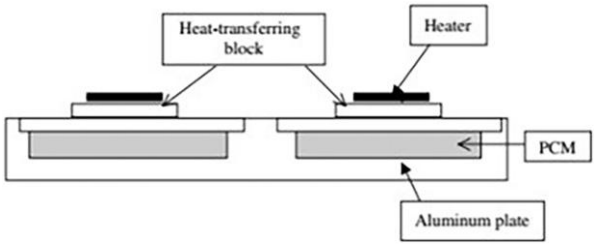
شکل ۶ تقویت‌کننده‌های هدایت حرارتی (TCEs) مورداستفاده در PCMها [50]

Fig. 6 Thermal Conductivity Enhancers (TCEs) used in PCRs [50]

نتایج نشان داد که سینک‌های حرارتی از نوع مواد متخلخل در مقایسه با سینک‌های حرارتی پره در کسر حجمی یکسان به یکنواختی حرارتی و عملکرد بهتر دست می‌یابند. قدرت گرمایش تأثیر مشخصی بر افزایش عملکرد سینک‌های حرارتی با استفاده از TCE داشت، به عنوان مثال، در قدرت گرمایش ۲۰ وات، سینک حرارتی دارای مواد متخلخل حداکثر نسبت افزایش ۵/۳ را برای عملکرد حرارتی نسبت به حالت مرجع بدون TCE نشان داد [53]. چگونگی افزایش ضریب جابجایی طبیعی PCM ذوب شده در ساختار سلولی، توسط پره‌ی تشکیل‌شده از ساختاری که دارای اجرام فلزی است، بررسی گردید. جدای از بهبود همزمان رسانایی حرارتی، که می‌تواند عملکرد انتقال حرارت را افزایش دهد. یک ساختار دارای پره-شبکه هیبریدی (HFS) به‌عنوان TCE طراحی و ساخته شد. طراحی بر مبنای تولید افزودنی Additive (AM:Manufacturing) بود. نتایج عددی نشان داد که افزایش ضریب جابجایی طبیعی و هدایت حرارتی را می‌توان به طور همزمان زمانی که یک پره به خوبی طراحی شده در یک ساختار شبکه‌ای به دست آورد. افزایش جابجایی طبیعی منجر به بهبود نرخ ذوب و کاهش دمای دیواره گردید. به عنوان مثال، زمان ذوب کامل و دمای دیواره زمان استفاده از پره آلومینیومی به ترتیب ۱۱/٦٪ و ۱۹/۷ % کاهش یافت. علاوه بر این، پارامترهای HFS از جمله تخلخل، چگالی منافذ و بعد پره تاثیر زیادی بر انتقال حرارت داشت. طراحی ساختار HFS تاثیر افزایشی بر سرعت ذوب PCM داشت و باعث کاهش هدایت حرارتی ماده گردید. هنگامی که پره وارد ساختار شبکه شد، زمان ذوب کامل ۲٤/۱ درصد برای فلز تیتانیوم کاهش یافت [54]. آزمایش‌های خنک‌کننده سینک حرارتی تحت چندین توان ورودی (۱۱ وات، ۱۳ وات و ۱۵ وات) و سرعت جریان هوا (۳/٤ متر بر ثانیه، ۲/۵ متر بر ثانیه، و ۱/۵ متر بر ثانیه) با دو مطالعه موردی مختلف با و بدون PCM انجام شد. موم پارافین به عنوان PCM استفاده شد و در زیر یک سینک حرارتی به ضخامت ۳۰ میلی متر و ٦۰ میلی متر قرار گرفت. مشخص شد که سینک حرارتی دارای PCM می‌تواند دما را تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد. همچنین اثر افزودن نانوذره اکسید آلومینیوم (Al2O3) به PCM نشان داد که مقدار کم این نانوذره (۲ درصد وزنی) باعث بهبود عملکرد سینک حرارتی گردید [55].

۳- سینک حرارتی با مجهز به PCM

PCMها در سینک‌های حرارتی به‌عنوان روش غیرفعال برای کنترل حرارتی قطعات الکترونیکی استفاده می‌شوند. مطالعه‌ای بر روی خنک کردن دستگاه‌های تلفن همراه PDA (دستیارهای دیجیتال شخصی)، با استفاده از یک واحد سینک حرارتی که به‌عنوان یک سینک حرارتی حاوی n -ایکوزان PCM عمل می‌کند، انجام گرفت (شکل ۷) [56]. یافته‌ها نشان داد که استفاده از PCM دمای سامانه را پایین‌تر نگه می‌دارد. دمای کار مجاز ۵۰ درجه سانتی‌گراد در طول مدت ۲ ساعت کار بود. این دما و زمان به دلیل گرمای نهان زیاد PCMو توانایی آن در جذب گرمای اتلاف شده از تراشه‌های الکترونیکی است.



شکل ۷ واحد سینک حرارتی حاوی PCM [۵۶]

Fig. 7 Heat sink unit containing PCM [56]

اگرچه، استفاده از HSهای مبتنی بر PCM باعث کاهش دمای سطح و جلوگیری از رسیدن قطعات الکترونیکی به دمای اوج می‌شود، اما همچنان از تضعیف نرخ حذف گرما در هر دو فاز شارژ و تخلیه رنج می‌برد. ازاین‌رو، بهبود انتقال حرارت در داخل HS مبتنی بر PCM با افزودن پره‌ها ضروری است.

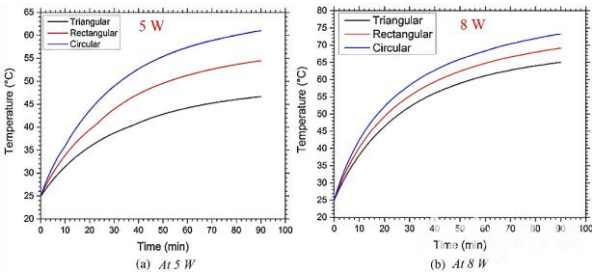
با معرفی سینک‌های حرارتی مبتنی بر PCM، خنک‌سازی قطعات الکترونیکی در کاربردهای گذرا توسعه یافته است. اثربخشی سینک

حرارتی مبتنی بر PCM تنها در زمان ذوب قابل قبول است، به طوری که در مرحله پس از ذوب، دمای قطعات الکترونیکی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. یک سینک حرارتی هیبریدی پر از PCM و هوا استفاده می‌شود تا از قابلیت سینک حرارتی دارای PCM و پتانسیل هوا به طور همزمان برای خنثی کردن اثرات شار گرمای ورودی استفاده شود تا دمای دستگاه الکترونیکی را پایین نگه دارد. ادغام هوا در سینک حرارتی مبتنی بر PCM منجر به تسریع در دفع حرارت به محیط می‌شود (اثر مثبت) و کسر حجمی PCM (اثر منفی) را کاهش می‌دهد. بر اساس نتایج، اثر مثبت بر اثر منفی برتری دارد و در نتیجه، توانایی خنک کنندگی سینک حرارتی جدید بهتر از سینک‌های حرارتی مبتنی بر PCM و همچنین سینک‌های حرارتی هوا خنک است. با افزایش ضریب هدایت جابجایی، اثر مثبت تقویت شده و اثربخشی سینک حرارتی هیبریدی آشکارتر می‌شود. سینک حرارتی جدید با ضریب هدایت جابجایی $۵۰\ W.m^{-2}.K^{-1}$ می‌تواند با سینک‌های حرارتی خنک شده با هوا با ضریب انتقال حرارت همرفتی بسیار بالاتر ($۱۰۰\ W.m^{-2}.K^{-1}$) رقابت کند [57].

۴- عوامل مؤثر بر راندمان حرارتی سینک حرارتی مبتنی بر PCMو مجهز به پره

۴-۱- هندسه پره

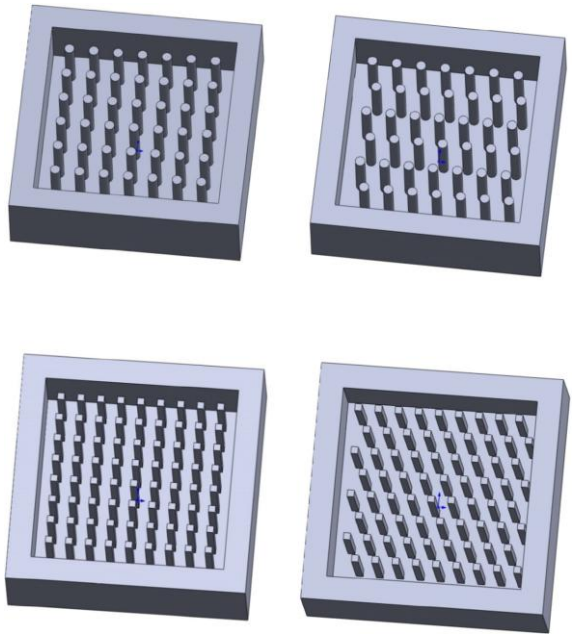
عملکرد HS مبتنی بر PCM با یک HS بدون PCM مقایسه شد. هندسه‌های مختلف پره‌ها (مانند مقطع مستطیلی، گرد و مثلثی) مورد بررسی قرار گرفت. قراردادن پره‌های مثلثی شکل، انتقال حرارت را در طول ۹۰ دقیقه کارکرد بهبود بخشید. علاوه بر این، دمای اوج ۴۷ درجه سانتی‌گراد و ۶۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای ورودی‌های گرمای ۵ وات و ۸ وات تضمین شد (شکل ۸). پره مثلثی کارآمدترین ساختار پره معرفی شد، درحالی‌که پره‌های مستطیلی و دایره‌ای در رده‌های بعدی قرار داشتند [58].



شکل ۸ تغییرات دمایی هندسه¬های مختلف پره: (الف) در ۵ وات و (ب) در ۸ وات [58]

Fig. 8 Temperature changes of different blade geometries: (a) at 5 W and (b) at 8 W [58]

به‌طور مشابه، تأثیر هندسه پره بر کارایی HSهای مبتنی بر PCM تحلیل شد [59] . این تحقیق فقط بر پیکربندی پره‌های دایره‌ای و مربعی متمرکز بود. تأثیر دو نوع چیدمان پره (شکل ۹)، به‌صورت پلکانی و در خط، بر عملکرد حرارتی یک HS مبتنی بر PCM، مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفت. پیکربندی درون‌خطی عملکرد بالاتری را در مقایسه با آرایش مبهم برای مقاطع دایره‌ای و مربعی نشان داد. علاوه بر این، مقایسه بین آرایش دایره‌ای و مربعی خطی به درک این نکته کمک کرد که دایره‌ای خطی انتخاب بهتری برای HS مبتنی بر PCM است.



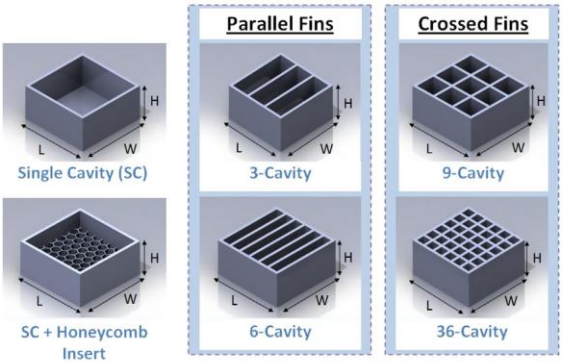
شکل ۹ پیکربندی‌های سینک حرارتی پره پین¬دار با آرایش خطی و پلکانی [59]

Fig. 9 Pinned fin heat sink configurations with linear and staggered arrangement [59]

یک تحقیق تجربی برای بررسی تأثیر پیکربندی‌های مختلف پره-های صفحه‌ای (شکل ۱۰) انجام گرفت [30] تا بازده HS مبتنی بر PCMبرای کنترل حرارتی دستگاه‌های الکترونیکی مشخص گردد. پیکربندی موازی، متقاطع و لانه‌زنبوری مقایسه شد. مشخص شد که HSهای لانه‌زنبوری و پره صفحه‌ای عملکرد حرارتی مشابهی در طول گرمایش و سرمایش دارند و از مزایای سبک وزن و هزینه کم برخوردار هستند.

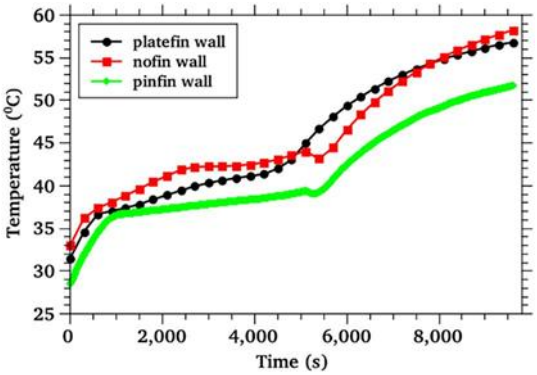
هندسه‌های مختلف پره مورد مطالعه می‌گیرد تا زمان عملیات HS کوتاه شود [60]. یافته‌ها ثابت کردند که HS پره‌دار مبتنی بر PCM، در افزایش دوره کار دستگاه الکترونیکی و زمان شارژ مفید است. کسر حجمی ۹ درصد به‌عنوان TCE، در تمام هندسه‌های پره صفحه‌ای استفاده شد. بر اساس شکل ۱۱، مشاهده شد که HS بدون پره، به دلیل هدایت حرارتی کم PCM، قادر به حذف گرمای بیشتر نیست. پره نوع پین‌دار دمای پایه پایین‌تری را به دلیل مساحت بزرگ نشان داد که انتقال حرارت از پره‌ها را افزایش داد. در بین تمام HSهای مورد مطالعه، HS مجهز به پره دارای ۷۲ پین حذف

گرما را نسبت به HS مجهز به پره صفحه‌ای افزایش داد که منجر به خنک‌سازی بیشتر قطعات الکترونیکی گردید.



شکل ۱۰ پیکربندی‌های مختلف سینک حرارتی مجهز به PCM [30]

Fig. 10 Different configurations of PCM-equipped heat sink [30]



شکل ۱۱ تکامل دمای دیواره سینک حرارتی مبتنی بر PCM در ۴ وات برای پیکربندی‌های مختلف [60]

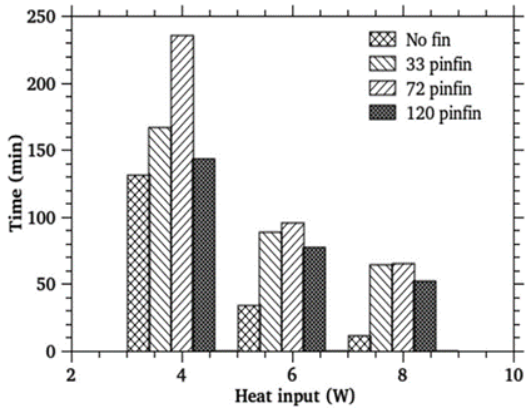
Fig. 11 Evolution of the wall temperature of a PCM-based heat sink at 4 W for different configurations [60]

۴-۲- تعداد پره‌ها

افزایش تعداد پره‌ها می‌تواند انتقال حرارت را در HS مبتنی بر PCMبه دلیل مساحت سطح بزرگ بهبود بخشد. با این حال، افزایش تعداد پره‌ها از مقدار معینی، منجر به محدودیت در بازده حرارتی HS می‌شود. این امر به دلیل افزایش مقاومت جریان در PCMمایع است که بر حالت همرفت و در نتیجه انتقال حرارت در PCM تأثیر می‌گذارد. بنابراین، در میان چندین پیکربندی آزمایش‌شده، HS با سه پره بهترین پاسخ را از نظر زمان کار قطعه الکترونیکی نشان داد [61].

۴-۳- کسر حجمی پره‌ها

به‌طور تجربی یک HS مجهز به پره پین‌دار مبتنی بر PCM با کسرهای حجمی پره ٤ درصد (پره‌های ۳۳ پین)، ۹ درصد (پره‌های ۷۲ پین) و ۱۵ درصد (پره‌های ۱۲۰ پین) مورد مطالعه قرار گرفت [62]. نتایج به دست آمده نشان داد که کسر حجمی ۹ درصد بهینه‌ترین مورد است که می‌توان با PCM استفاده کرد. در واقع، این کسر حجمی افزایش خوبی در انتقال حرارت و کشش دوره عملکرد دستگاه‌های الکترونیکی نشان داد (شکل ۱۲). این نتیجه مطابق با یافته‌های سایر محققین نیز بود [60]. در پژوهشی دیگر [63]، کسر حجمی TCE بهینه ۸ درصد اعلام شد. اکثر محققان در تحقیقات خود بر روی HSهای پره‌دار مبتنی بر PCM، کسر حجمی پره ۹ درصد را انتخاب کردند.



شکل ۱۲ زمان برای حفظ دمای تنظیم شده ۵۳ درجه سانتیگراد در ورودی‌های حرارتی ۴، ۶ و ۸ وات با "φ=1" [62]

Fig. 12 Time to maintain the set temperature of 53°C at thermal inputs of 4, 6 and 8 W with "φ=1" [62]

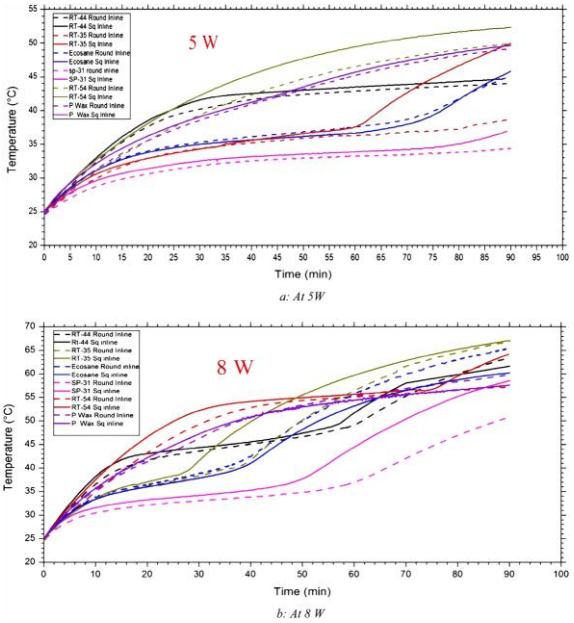
۵- نتایج حاصل از انواع PCM

با قراردادن PCMها در HSها، تحت دو ورودی گرمای مختلف ۵ وات و ۸ وات ثابت شده است که در ۵ وات، n-ایکوزان PCM یک انتخاب مؤثر برای پره پین‌دار مربعی خطی نسبت به HS دایره‌ای خطی است. علاوه بر این، در ۸ وات، یک رفتار انحرافی توسط موم پارافین و n -ایکوزان در مقایسه با سایر PCMها مشاهده گردید (شکل ۱۳). چیدمان پین‌های دایره‌ای خطی، برای همه PCMها بهتر از پین‌های مربعی خطی بود [58].

همانطور که در شکل ١٤ نشان داده شده است، نوع PCM بر نسبت ذخیره‌سازی تأثیر می‌گذارد. بدیهی است که استفاده از RT-35HC (نوعی PCM) با حضور پره پین‌دار مثلثی، از نظر نسبت ذخیره‌سازی کارآمدترین است و بیشترین نسبت ذخیره‌سازی را دارد (٦٨ درصد و ۳۸/۵ درصد به ترتیب در ۵ وات و ۸ وات). این رفتار ناشی از گرمای نهان زیاد و چگالی بالاتر PCM است. با این حال، به دلیل گرمای نهان کم موم پارافین، نسبت ذخیره‌سازی کمتری در هر دو سطح توان ثابت شد. درحالی‌که ازنظر زمان عملیاتی، برای دمای بحرانی ٦٠ درجه سانتی‌گراد، به دلیل نقطه ذوب بالای آن‌که بین ۵۳ درجه سانتی‌گراد تا ۵۷ درجه سانتی‌گراد متغیر است، انتخاب بهتری بود [62].

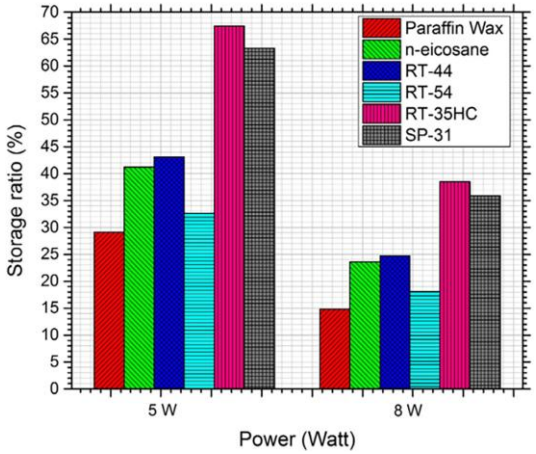
از تمام مقایسه‌های فوق می‌توان دریافت که گرمای نهان عامل اصلی کارایی بیشتر و انتقال حرارت PCMها است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که در شرایط خاصی، مانند زمانی که دمای کاری قطعات الکترونیکی نزدیک به نقطه ذوب PCM است، استفاده از PCMهای با نقطه ذوب پایین‌تر می‌تواند به عملکرد حرارتی بهتری منجر شود. برای مثال، در توان‌های پایین‌تر (مانند

۵ وات)، این نوع PCMها به دلیل تطابق بهتر با دمای عملیاتی، زمان عملیات را طولانی‌تر می‌کنند، اما در توان‌های بالاتر (مثل ۸ وات)، ممکن است ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی محدودتر آن‌ها عملکرد را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، انتخاب PCM با نقطه ذوب پایین‌تر باید با توجه به شرایط عملیاتی خاص هر کاربرد انجام شود [30].



شکل ۱۳ تکامل دما با استفاده از PCMهای مختلف در سطح توان (الف) ۵ وات، (ب) ۸ وات [59]

Fig. 13 Temperature evolution using different PCMs at power levels of (a) 5 W, (b) 8 W [58]

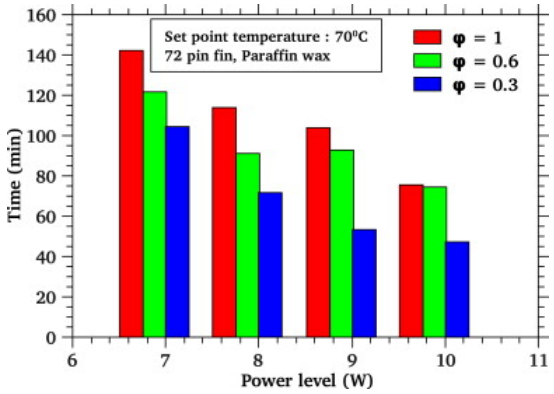


شکل ۱۴ نسبت ذخیره حرارت برای انواع مختلف PCM در ۵ وات و ۸ وات [59]

Fig. 14 Heat storage ratio for different types of PCM at 5 W and 8 W [59]

۵-۱- کسر حجمی PCM

مقدار PCM با ضخامت چارچوب PCM فلزی و نسبت PCM تعیین می‌شود. در میان سه کسر حجمی ۰/۳، ۰/۶ و ۱ پیکربندی بهینه با کسر حجمی برابر با ۱ حداکثر انتقال حرارت را می‌تواند داشته باشد [18]. هر چه نسبت PCM بیشتر باشد، دوره انتقال فاز طولانی‌تر و مقاومت حرارتی و دمای پیک نیز بالاتر است، که پاسخ حرارتی را کند می‌کند [59].



شکل ۱۵ زمان نگهداری در دمای تنظیم شده ۷۰ درجه سانتیگراد در ورودی‌های گرمای مختلف برای پره‌های ۷۲ پین HS پرشده با PCM [62]

Fig. 15 Holding time at a set temperature of 70°C at different heat inputs for 72-pin HS fins filled with PCM [62]

استفاده از TCE مانند پره‌ها، فوم‌های فلزی و نانوذرات به‌طور قابل‌توجهی هدایت حرارتی PCM را بهبود می‌بخشد و در نتیجه کارایی سینک‌های حرارتی رو افزایش می‌دهد. نتایج تجربی و عددی به‌دست‌آمده تا حد زیادی این فرضیه رو تأیید می‌کنند؛ برای مثال، افزودن نانوذرات کاربید سیلیکون به موم پارافین دمای اوج و دوره ماندگاری سینک حرارتی را افزایش می‌دهد و استفاده از پره‌های مثلثی انتقال حرارت را بهینه می‌کند. با این حال، در برخی موارد، تناقض‌هایی مشاهده گردیده است که نیازمند تحلیل دقیق‌تر است. به‌عنوان مثال، در توان‌های ورودی بالاتر (مثل ۴۵ وات)، افزایش کسر حجمی نانوذرات بیش از حد انتظار باعث کندی در پاسخ حرارتی می‌شود و می‌تواند به محدودیت‌های تجربی، مثل پراکندگی ناهمگن نانوذرات در PCM، یا شرایط مرزی متفاوت در آزمایش‌ها (مانند دمای محیط یا نرخ انتقال حرارت به اطراف) نسبت داده شود. در سینک‌های حرارتی هیبریدی، اثر مثبت همرفت هوا گاهی کمتر از پیش‌بینی‌ها است که احتمالاً به دلیل کاهش کسر حجمی PCM و تأثیر آن بر ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی است. این مشاهدات نشان می‌دهد که طراحی بهینه TCEها و PCMها باید با در نظر گرفتن تعادل بین هدایت حرارتی و ظرفیت ذخیره‌سازی حرارت انجام شود و آزمایش‌ها در شرایط کنترل‌شده‌تر تکرار شوند تا این تناقض‌ها به حداقل برسند.

۶- نتیجه‌گیری

مطالعات انجام شده در این مقاله به بررسی و تحلیل روش‌های مختلف مدیریت حرارتی قطعات الکترونیکی با استفاده از سینک‌های حرارتی مبتنی بر PCM و TCE پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از PCMها به دلیل قابلیت بالای ذخیره‌سازی حرارتی و امکان کاهش دمای قطعات الکترونیکی، می‌تواند راهکاری مؤثر برای خنک‌سازی غیر فعال باشد. با این حال، هدایت حرارتی پایین PCMها یکی از محدودیت‌های اصلی

آن‌ها به شمار می‌رود. در این راستا، تقویت‌کننده‌های هدایت حرارتی نظیر پره‌های رسانا، فوم‌های فلزی، فوم‌های کربنی و نانوذرات توانسته‌اند بهبود قابل توجهی در انتقال حرارت این سامانه‌ها ایجاد کنند. بررسی‌های تجربی و عددی نشان داده است که پارامترهایی همچون هندسه پره‌ها، تعداد پره‌ها، نوع PCM و کسر حجمی آن‌ها تأثیر بسزایی بر کارایی حرارتی سینک‌های حرارتی مبتنی بر PCM دارند. به طور خاص، هندسه پره‌های مثلثی و استفاده از PCM با نقطه ذوب پایین‌تر و گرمای نهان بالا، بهترین عملکرد را از نظر کاهش دمای قطعات الکترونیکی و افزایش زمان عملیاتی آن‌ها ارائه کرده‌اند.

در نهایت، توسعه فناوری‌های جدید و بهینه‌سازی پارامترهای طراحی می‌تواند به گسترش کاربرد سینک‌های حرارتی در مدیریت حرارتی دستگاه‌های الکترونیکی پیشرفته کمک کند. این امر به‌ویژه در کاربردهایی که محدودیت فضا و وزن وجود دارد، از اهمیت بیشتری برخوردار است.

۷- محدودیت‌های مطالعه و جهت‌گیری‌های آتی

اگرچه استفاده از سینک‌های حرارتی مبتنی بر PCM و TCE راهکاری نویدبخش برای مدیریت حرارتی قطعات الکترونیکی ارائه می‌دهد، اما این مطالعه و فناوری‌های مرتبط با آن با محدودیت‌هایی مواجه هستند که باید مورد توجه قرار گیرند. یکی از محدودیت‌های اصلی، محدودیت‌های فنی مربوط به هدایت حرارتی پایین ذاتی PCMها است. هرچند TCEهایی مانند نانوذرات و پره‌ها این مشکل را تا حدی برطرف می‌کنند، اما یکنواختی توزیع نانوذرات یا طراحی بهینه پره‌ها در مقیاس‌های بزرگ همچنان چالش‌برانگیز است. علاوه بر این، هزینه‌بر بودن تولید نانوکامپوزیت‌های پیشرفته و فوم‌های فلزی می‌تواند مانعی برای کاربرد گسترده این فناوری در صنایع باشد، به‌ویژه در محصولاتی که نیاز به تولید انبوه با هزینه کم دارند. پیچیدگی تولید نیز از دیگر موانع مهم است. فرآیندهای ساخت افزودنی یا ترکیب نانوذرات با PCMها نیازمند تجهیزات پیشرفته و کنترل دقیق شرایط هستند که ممکن است در مقیاس صنعتی به پیچیدگی و زمان‌بر بودن فرآیند منجر شود. همچنین، مقیاس‌پذیری این فناوری با چالش‌هایی همراه است؛ برای مثال، در حالی که آزمایش‌های تجربی در مقیاس آزمایشگاهی نتایج مثبتی نشان داده‌اند، انتقال این نتایج به سامانه‌های واقعی با ابعاد بزرگ‌تر و شرایط عملیاتی متنوع‌تر نیازمند بررسی‌های بیشتری در زمینه‌های پایداری طولانی‌مدت مواد و سازگاری آن‌ها با محیط‌های صنعتی است. برای رفع این محدودیت‌ها، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آتی بر توسعه روش‌های تولید کم‌هزینه و ساده‌تر، مانند استفاده از مواد اولیه ارزان‌تر یا بهینه‌سازی فرآیندهای موجود، متمرکز شود. همچنین، انجام مطالعات در مقیاس بزرگ‌تر و شبیه‌سازی‌های پیشرفته‌تر برای ارزیابی عملکرد این سامانه‌ها در شرایط واقعی می‌تواند به رفع موانع مقیاس‌پذیری کمک کند. در نهایت، بررسی اثرات زیست‌محیطی و بازیافت‌پذیری این مواد نیز جهت‌گیری مهمی برای پایداری این فناوری در آینده خواهد بود.

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

تعارض منافع: تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

[1] M. Mahesh, K. V. Kumar, M. Abebe, L. Udayakumar, and M. Mathankumar, "A review on enabling technologies for high power density power electronic applications," *Materials Today: Proceedings,* vol. 46, pp. 3888-3892, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.340.

[2] N. Singh *et al.*, "Challenges and Opportunities in Engineering of Next Generation 3D Microelectronic Devices: Improved Performance, Higher Integration Density," *Nanoscale Advances,* 2024, doi: 10.1039/D4NA00578C.

[3] Z. Zhang, X. Wang, and Y. Yan, "A review of the state-of-the-art in electronic cooling," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy,* vol. 1, p. 100009, 2021/01/01/ 2021, doi: 10.1016/j.prime.2021.100009.

[4] C.-C. Lin *et al.*, "The micro-LED roadmap: status quo and prospects," *Journal of Physics: Photonics,* vol. 5, no. 4, p. 042502, 2023, doi: 10.1088/2515-7647/acf972/pdf.

[5] G. Huminic and A. Huminic, "Entropy generation of nanofluid and hybrid nanofluid flow in thermal systems: a review," *Journal of Molecular Liquids,* vol. 302, p. 112533, 2020, doi: 10.1016/j.molliq.2020.112533.

[6] J. Sarkar, P. Ghosh, and A. Adil, "A review on hybrid nanofluids: recent research, development and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 43, pp. 164-177, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.11.023.

[7] A. N. Keshteli and M. Sheikholeslami, "Nanoparticle enhanced PCM applications for intensification of thermal performance in building: a review," *Journal of Molecular Liquids,* vol. 274, pp. 516-533, 2019, doi: 10.1016/j.molliq.2018.10.151.

[8] M. A. Fikri *et al.*, "Thermal conductivity, reliability, and stability assessment of phase change material (PCM) doped with functionalized multi-wall carbon nanotubes (FMWCNTs)," *Journal of Energy Storage,* vol. 50, p. 104676, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104676.

[9] A. Jahanbakhshi, A. A. Nadooshan, and M. Bayareh, "Cooling of a lithium-ion battery using microchannel heatsink with wavy microtubes in the presence of nanofluid," *Journal of Energy Storage,* vol. 49, p. 104128, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104128.

[10] A. K. Thakur *et al.*, "A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for

for electronic components, Li-ion batteries and photovoltaic modules," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 31, pp. 427-438, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.12.017.
[23] N. K. Mdachi and C. Choong-koo, "Comparative Review of Thermal Management Systems for BESS," *Batteries,* vol. 10, no. 7, p. 224, 2024, doi: 2313-0105/10/7/224.
[24] R. Zhao, S. Zhang, J. Liu, and J. Gu, "A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system," *Journal of Power Sources,* vol. 299, pp. 557-577, 09/21 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.09.001.
[25] X. Chen, H. Ye, X. Fan, T. Ren, and G. Zhang, "A review of small heat pipes for electronics," *Applied Thermal Engineering,* vol. 96, pp. 1-17, 2016/03/05/ 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.048.
[26] A. Farzanehnia, M. Khatibi, M. Sardarabadi, and M. Passandideh-Fard, "Experimental investigation of multiwall carbon nanotube/paraffin based heat sink for electronic device thermal management," *Energy Conversion and Management,* vol. 179, pp. 314-325, 2019/01/01/ 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.10.037.
[27] X.-H. Yang, S.-C. Tan, Y.-J. Ding, L. Wang, J. Liu, and Y.-X. Zhou, "Experimental and numerical investigation of low melting point metal based PCM heat sink with internal fins," *International Communications in Heat and Mass Transfer,* vol. 87, pp. 118-124, 2017/10/01/ 2017, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.07.001.
[28] J. Xie, K. F. Choo, J. Xiang, and H. M. Lee, "Characterization of natural convection in a PCM-based heat sink with novel conductive structures," *International Communications in Heat and Mass Transfer,* vol. 108, p. 104306, 2019, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104306.
[29] R. Kandasamy, X.-Q. Wang, and A. S. Mujumdar, "Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-based heat sinks," *Applied Thermal Engineering,* vol. 28, no. 8, pp. 1047-1057, 2008/06/01/ 2008, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.06.010.
[30] S. Mahmoud, A. Tang, C. Toh, R. Al-Dadah, and S. L. Soo, "Experimental investigation of inserts configurations and PCM type on the thermal performance of PCM based heat sinks," *Applied Energy,* vol. 112, pp. 1349-1356, 2013/12/01/ 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.04.059.
[31] H.-Q. Jin, L.-W. Fan, M.-J. Liu, Z.-Q. Zhu, and Z.-T. Yu, "A pore-scale visualized study of melting heat transfer of a paraffin wax saturated in a copper foam: Effects of the pore size," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 112, pp. 39-44, 2017/09/01/ 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.114.
[32] Q. Ren, P. Guo, and J. Zhu, "Thermal management of electronic devices using pin-fin based cascade microencapsulated PCM/expanded graphite composite," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 149, p. 119199, 2020/03/01/ 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119199.
Lithium–ion battery system of electric vehicles," *Journal of Energy Storage,* vol. 32, p. 101771, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101771.
[11] A. Bhattad, J. Sarkar, and P. Ghosh, "Improving the performance of refrigeration systems by using nanofluids: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 82, pp. 3656-3669, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.097.
[12] S. S. Murshed and C. N. De Castro, "A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 78, pp. 821-833, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.112.
[13] E. Wiener *et al.*, *PCM-BASED HEAT SINK FOR PASSIVE COOLING OF ELECTRONIC COMPONENTS: NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY*. 2023, p. 11, doi: http://dx.doi.org/10.1615/IHTC17.90-30.
[14] X. Wang, W. Li, Z. Luo, K. Wang, and S. P. Shah, "A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application," *Energy and buildings,* vol. 260, p. 111923, 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.111923.
[15] H. Nazir *et al.*, "Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 129, pp. 491-523, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126.
[16] D. Zhou, C.-Y. Zhao, and Y. Tian, "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications," *Applied energy,* vol. 92, pp. 593-605, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.08.025.
[17] J. Shalf, "The future of computing beyond Moore's Law," *Philosophical Transactions of the Royal Society A,* vol. 378, no. 2166, p. 20190061, 2020, doi: 10.1098/rsta.2019.0061.
[18] C. H. Amon, J. Murthy, S. Yao, S. Narumanchi, C.-F. Wu, and C.-C. Hsieh, "MEMS-enabled thermal management of high-heat-flux devices EDIFICE: embedded droplet impingement for integrated cooling of electronics," *Experimental Thermal and Fluid Science,* vol. 25, no. 5, pp. 231-242, 2001, doi: 10.1016/S0894-1777(01)00071-1.
[19] S. M. Sohel Murshed and C. A. Nieto de Castro, "A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 78, pp. 821-833, 2017/10/01/ 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.112.
[20] P. C. Davies, "Thermodynamics of black holes," *Reports on Progress in Physics,* vol. 41, no. 8, p. 1313, 1978, doi: 10.1088/0034-4885/41/8/004.
[21] V. Lakshminarayanan and N. Sriraam, "The effect of temperature on the reliability of electronic components," in *2014 IEEE international conference on electronics, computing and communication technologies (CONECCT)*, 2014: IEEE, pp. 1-6, doi: 10.1109/CONECCT.2014.6740182.
[22] Z. Ling *et al.*, "Review on thermal management systems using phase change materials

[33] J. Xie, H. M. Lee, and J. Xiang, "Numerical study of thermally optimized metal structures in a Phase Change Material (PCM) enclosure," *Applied Thermal Engineering,* vol. 148, pp. 825-837, 2019/02/05/ 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.11.111.
[34] S. Zhang, X. Xu, T. Lin, and P. He, "Recent advances in nano-materials for packaging of electronic devices," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics,* vol. 30, pp. 13855-13868, 2019, doi: 10.1007/s10854-019-01790-3.
[35] I. Oropeza-Perez and P. A. Østergaard, "Active and passive cooling methods for dwellings: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 82, pp. 531-544, 2018, doi: 10.1007/s10854-019-01790-3.
[36] B. Debich, A. El Hami, A. Yaich, W. Gafsi, L. Walha, and M. Haddar, "Design optimization of PCM-based finned heat sinks for mechatronic components: A numerical investigation and parametric study," *Journal of Energy Storage,* vol. 32, p. 101960, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101960.
[37] R. Nandan, V. Arumuru, and M. Das, "PCM-based heat sink for thermal management of electronic chips," 2023, pp. 703-725, doi: 10.1016/B978-0-443-19017-9.00037-4.
[38] V. Bianco, M. De Rosa, and K. Vafai, "Phase-change materials for thermal management of electronic devices," *Applied Thermal Engineering,* vol. 214, p. 118839, 06/01 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118839.
[39] D. Shmyhol, M. Rimár, M. Fedak, T. Krenický, M. Lopušniak, and N. Polivka, "Techniques for Enhancing Thermal Conductivity and Heat Transfer in Phase Change Materials in Hybrid Phase Change Material–Water Storage Tanks," *Applied Sciences,* vol. 14, no. 9, p. 3732, 2024, doi: https://www.mdpi.com/2076-3417/14/9/3732.
[40] S. Ahmed *et al.*, "Integration of phase change materials in improving the performance of heating, cooling, and clean energy storage systems: An overview," *Journal of Cleaner Production,* vol. 364, p. 132639, 06/01 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132639.
[41] A. S. Husainy, A. M. Funde, A. B. Sonalkar, S. I. Mulla, and R. S. Gote, "Review on PCM Heat Sink for Electronic Thermal Management Application," *Asian Review of Mechanical Engineering,* vol. 12, no. 1, pp. 9-14, 2023, doi: 10.51983/arme-2023.12.1.3640.
[42] R. Nandan, V. Arumuru, and M. Das, "An experimental investigation into PCM-integrated heat sinks under varying duty cycles," *Journal of Energy Storage,* vol. 97, p. 112905, 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112905.
[43] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, and H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications," *Applied thermal engineering,* vol. 23, no. 3, pp. 251-283, 2003, doi: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8.
[44] S. A. Mohamed *et al.*, "A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 70, pp. 1072-1089, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.012.
[45] T. Barz and J. Emhofer, "Paraffins as phase change material in a compact plate-fin heat exchanger - Part I: Experimental analysis and modeling of complete phase transitions," *Journal of Energy Storage,* vol. 33, p. 102128, 2021/01/01/ 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.102128.
[46] K. Swaminathan Gopalan and V. Eswaran, "Numerical investigation of thermal performance of PCM based heat sink using structured porous media as thermal conductivity enhancers," *International Journal of Thermal Sciences,* vol. 104, pp. 266-280, 06/01 2016, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.01.008.
[47] B. Çiçek, "Improvement of the Thermal Performance of PCM-Based Heat Sink Used in Electronic Cooling by Adding Nano-Particles," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C Tasarım ve Teknoloji,* vol. 12, 08/20 2024, doi: 10.29109/gujsc.1476191.
[48] I. Afaynou, H. Faraji, K. Choukairy, K. Khallaki, and D. Akrour, "Effectiveness of a PCM-based heat sink with partially filled metal foam for thermal management of electronics," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 235, p. 126196, 2024/12/15/ 2024, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126196.
[49] R. Balakrishnan, K. Govindaraj, A. Mahalingam, and Y. Devarajan, "Analysis of the thermal management of electronic equipment by employing silicon carbide nano-pcm-based heat sink," *Environmental Science and Pollution Research,* vol. 31, no. 34, pp. 46376-46384, 2024/07/01 2024, doi: 10.1007/s11356-023-27468-2.
[50] R. Tauseef ur, H. M. Ali, M. M. Janjua, U. Sajjad, and W.-M. Yan, "A critical review on heat transfer augmentation of phase change materials embedded with porous materials/foams," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 135, pp. 649-673, 2019/06/01/ 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.001.
[51] A. Albojamal, H. Hamzah, and K. Vafai, "Energy storage analysis of phase change materials (PCMs) integrated with thermal conductivity enhancers (TCEs)," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications,* vol. 83, no. 1, pp. 1-18, 2022. , doi: 10.1016/j.rser.2016.12.012.
[52] Y. Li, S. Liu, and A. Shukla, "Experimental analysis on use of thermal conductivity enhancers (TCEs) for solar chimney applications with energy storage layer," *Energy and buildings,* vol. 116, pp. 35-44, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.12.049.
[53] X. Hu, P. Chen, X. Guo, and X. Zhang, "Comparative studies on the thermal performance of novel PCM-based heat sinks using 3D-printed thermal conductivity enhancers," *International Communications in Heat and Mass Transfer,* vol. 162, p. 108613, 2025, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108613.
[54] D. Kong, Y. Zhang, and S. Liu, "Enhanced Natural Convection for Accelerating Melting of Phase Change Material in Cellular Structure through

Inserting Fin," *Journal of Thermal Science,* vol. 33, no. 2, pp. 548-563, 2024/03/01 2024, doi: 10.1007/s11630-023-1841-8.
[55] J. M. Jalil, H. S. Mahdi, and A. S. Allawy, "Cooling performance investigation of PCM integrated into heat sink with nano particles addition," *Journal of Energy Storage,* vol. 55, p. 105466, 2022/11/01/ 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105466.
[56] F. Tan and C. Tso, "Cooling of mobile electronic devices using phase change materials," *Applied thermal engineering,* vol. 24, no. 2-3, pp. 159-169, 2004, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2003.09.005.
[57] R. Kalbasi, "Introducing a novel heat sink comprising PCM and air-Adapted to electronic device thermal management," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 169, p. 120914, 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120914.
[58] T.-u. Rehman, H. M. Ali, A. Saieed, W. Pao, and M. Ali, "Copper foam/PCMs based heat sinks: An experimental study for electronic cooling systems," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 127, pp. 381-393, 2018/12/01/ 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.120.
[59] M. J. Ashraf, H. M. Ali, H. Usman, and A. Arshad, "Experimental passive electronics cooling: parametric investigation of pin-fin geometries and efficient phase change materials," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 115, pp. 251-263, 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.114.
[60] R. Baby and C. Balaji, "Experimental investigations on phase change material based finned heat sinks for electronic equipment cooling," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 55, no. 5, pp. 1642-1649, 2012/02/01/ 2012, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.11.020.
[61] M. Y. Yazici, M. Avci, and O. Aydin, "Combined effects of inclination angle and fin number on thermal performance of a PCM-based heat sink," *Applied Thermal Engineering,* vol. 159, p. 113956, 2019/08/01/ 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113956.
[62] R. Baby and C. Balaji, "Thermal optimization of PCM based pin fin heat sinks: An experimental study," *Applied Thermal Engineering,* vol. 54, no. 1, pp. 65-77, 2013/05/14/ 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.10.056.
[63] S. Saha, K. Srinivasan, and P. Dutta, "Studies on optimum distribution of fins in heat sinks filled with phase change materials," 2008, doi: 10.1115/1.2804948.