مجله پژوهش های معاصر در علوم و تحقیقات
سال هفتم، شماره ۷۷، آذر ۱۴۰۴
ISSN: ۲۶۷۶-۵۷۶٤
www.jocrisar.ir

بهینه سازی انتقال حرارت در مبدل های حرارتی حاوی مواد تغییر فاز دهنده با استفاده از فین ها و نانو ذرات

علی اصغر اولی[۱] ، محسن سوری [۲]

[۱] کارشناس ارشد مهندس مکانیک - تبدیل انرژی دانشگاه ازاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات. ایران(نویسنده مسئول)
[۲] کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال.ایران

چکیده

این تحقیق به بررسی بهینه‌سازی انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی حاوی مواد تغییر فاز دهنده (PCM) با استفاده از فین‌ها و نانوذرات می‌پردازد. هدف اصلی این پژوهش، افزایش کارایی سیستم‌های حرارتی و کاهش زمان ذوب و انجماد PCM از طریق به‌کارگیری این دو روش است.در این تحقیق از PCM پارافین ۵۰RT به‌عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده شد. برای بهبود عملکرد سیستم، فین‌های آلومینیومی با ابعاد خاص و نانوذرات مس (Cu) به‌عنوان تقویت‌کننده‌های حرارتی به سیستم اضافه شدند. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics و ANSYS Fluent برای تحلیل رفتار حرارتی سیستم انجام شد. همچنین، آزمایش‌های تجربی برای تأیید نتایج شبیه‌سازی‌ها انجام گردید.یافته ها نشان داد که استفاده از فین‌ها موجب افزایش قابل توجهی در نرخ انتقال حرارت و کاهش زمان ذوب PCM شد. به‌طور خاص، نصب فین‌ها باعث کاهش زمان ذوب تا ۴۲٪ در مقایسه با سیستم‌های بدون فین شد. همچنین، استفاده از نانوذرات مس در PCM موجب افزایش هدایت حرارتی و کاهش زمان ذوب تا ۱۸٪ گردید. ترکیب فین‌ها و نانوذرات باعث بهبود ۵۰٪ در نرخ انتقال حرارت و کاهش ۳۵٪ در زمان ذوب PCM شد.این تحقیق نشان داد که ترکیب فین‌ها و نانوذرات به‌عنوان یک روش هیبریدی، می‌تواند به‌طور مؤثری به بهبود عملکرد مبدل‌های حرارتی حاوی PCM کمک کند. نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین هم‌راستا بوده و نقش مهم فین‌ها و نانوذرات در بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های حرارتی را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت، مبدل‌های حرارتی، مواد تغییر فاز دهنده (PCM)، فین‌ها، نانوذرات، بهینه‌سازی.

مقدمه

انتقال حرارت یکی از فرآیندهای اساسی در بسیاری از صنایع نظیر صنایع انرژی، شیمیایی، تهویه مطبوع و خودرو است. بهینه‌سازی این فرآیند به منظور افزایش کارایی سیستم‌های حرارتی و کاهش هزینه‌های عملیاتی، همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. (بقال پور، ملک زاده دیرین، ۱۴۰۲؛ صمدزاده باغبانی، ۱۴۰۰)مبدل‌های حرارتی به عنوان مهم‌ترین اجزای سیستم‌های انتقال حرارت، نقش حیاتی در این فرآیند ایفا می‌کنند. یکی از روش‌های نوین در بهبود کارایی مبدل‌های حرارتی، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) است. این مواد با قابلیت جذب و آزادسازی انرژی در دماهای خاص، می‌توانند ظرفیت ذخیره‌سازی حرارت سیستم را افزایش داده و موجب بهبود بهره‌وری سیستم‌های حرارتی شوند(اسلام نژاد، بردران رحیمی، ۱۳۹۴؛ بیگدلی، کشاورزولیان، رنجبر، ۱۳۹۴)با این حال، استفاده ازPCM ها در مبدل‌های حرارتی به تنهایی نمی‌تواند به طور کامل عملکرد سیستم را بهینه‌سازی کند. یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش راندمان انتقال حرارت در مبدل‌ها، به‌کارگیری فین‌ها است. فین‌ها به عنوان اجزای اضافی در سطوح انتقال حرارت، می‌توانند سطح تماس را افزایش دهند و انتقال حرارت را در مبدل‌های حرارتی بهبود بخشند. (میتو و همکاران: ۲۰۲٤) .از سوی دیگر، استفاده از نانوذرات در مایعاتی که به عنوان سیال انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد نانوذرات نظیر هدایت حرارتی بالا و پایداری بیشتر، می‌تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد مبدل‌های حرارتی ایفا کند.در این تحقیق، به بررسی بهینه‌سازی فرآیند انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) و تقویت‌کننده‌های حرارتی نظیر فین‌ها و نانوذرات پرداخته می‌شود. (سجادی اسکویی، دلیری، ۱۳۹۷؛ نوروزی، رشدی، جلال شکوهی، محمودی، ۱۳۹۵)استفاده همزمان از این سه عامل می‌تواند موجب افزایش قابل توجهی در کارایی انتقال حرارت شود.(تگار، لائور، آریجی، اسماعیل،۲۰۲۲) از این رو، این مقاله به تحلیل تأثیرات این روش‌های نوین بر عملکرد مبدل‌های حرارتی و مقایسه آن با سیستم‌های سنتی می‌پردازد.پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که استفاده ازPCM ها در مبدل‌های حرارتی قادر به افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی حرارت و بهبود پایداری دمایی در سیستم‌های حرارتی است. همچنین، مطالعات متعدد بر تأثیر مثبت فین‌ها در افزایش سطح انتقال حرارت و بهبود راندمان سیستم‌های حرارتی تأکید دارند. به علاوه، استفاده از نانوذرات به عنوان تقویت‌کننده‌های حرارتی در سیالات، موجب بهبود چشمگیر خواص حرارتی و کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های حرارتی می‌شود. این عوامل در کنار هم می‌توانند به عنوان یک راهکار مؤثر در بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی شناخته شوند. (عیسی پور درزی, حسینی کهساری, رنجبر, و پهم، ۲۰۱۶)

هدف این تحقیق، ارائه مدلی جامع برای بهینه‌سازی انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی است که در آن از مواد تغییر فاز دهنده، فین‌ها و نانوذرات به طور هم‌زمان استفاده شده باشد. این مدل می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و مصرف انرژی در صنایع مختلف کمک کرده و موجب بهبود کارایی سیستم‌های حرارتی گردد.در ادامه، در این مقاله به بررسی تئوری‌های انتقال حرارت، معرفی مواد تغییر فاز دهنده، فین‌ها و نانوذرات، و همچنین مدل‌سازی و شبیه‌سازی عملکرد مبدل‌های حرارتی حاوی این مواد پرداخته خواهد شد. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به عنوان راهنمایی برای طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های حرارتی در صنعت و تحقیقات علمی آینده مورد استفاده قرار گیرد.

پیشینه پژوهش

یکی از چالش‌های عمده در ذخیره‌سازی حرارتی و مبدل‌های حرارتی، رسانایی حرارتی پایین بسیاری از مواد تغییر فاز دهنده است که فرآیند شارژ (ذوب) و دشارژ (انجماد) را کند می‌نمایند .(فانگ، هان، بی، یان، وی ،۲۰۲۲) برای نمونه، در مطالعه عددی روی یک مبدل پوسته-و-لوله پر شده باparaffin wax RT۵۰ ، مشخص شد که بخش عمده زمان ذوب توسط

انتقال حرارت ناشی از جریان طبیعی تعیین می‌شود و در مرحله اولیه و نهایی، هدایت حرارتی غالب است .مطالعه‌ای دیگر نشان داد که با افزایش دمای سیال انتقال‌دهنده، زمان ذوب PCM به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد؛ برای مثال افزایش دمای ورودی سیال از ۷۵ درجه به ۸۰ درجه، زمان ذوب را حدود ٪۲۱ بهبود داد .(وانگ، وانگ، یانگ، کوی، دونگ، ا.، کوی، یوئه،۲۰۲۴) همان‌طور، ضخامت جداره و لوله و چیدمان فین‌ها نیز تأثیر قابل توجهی بر زمان ذوب داشتند .(میتو، و همکاران ،۲۰۲۴) در جمع، ادبیات تأکید دارد که اگر چهPCM ها ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی بالایی دارند، ولی رسانایی حرارتی پایین آن‌ها یکی از موانع مهم عملکرد مطلوب در مبدل‌ها و سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی است.به‌منظور غلبه بر مشکل رسانایی پایین، نصب فین‌ها به‌عنوان سطوح انتقال حرارتِ توسعه‌یافته بارها مورد مطالعه قرار گرفته است. (تگار، لائور، آریجی، اسماعیل، ۲۰۲۲)بررسی جامع به روش سیستماتیک نشان داد که افزودن فین یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های بهبود انتقال حرارت در سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی مبتنی بر یخ یا PCM است (تگار، لائور، آریجی، اسماعیل، ۲۰۲۲) در این مطالعه، ترکیبی از فین‌ها و فوم‌های فلزی بیشترین افزایش نرخ انتقال حرارت را نشان داد (افزایش تا حدود ٪۲۰۰)؛ اگر چه در بسیاری از موارد، ظرفیت ذخیره‌سازی به‌قیمت افزایش سطح فین کاهش یافته بود.(میتو، و همکاران ،۲۰۲۴) به‌عنوان مثال، در مطالعه عددی فنگ و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که استفاده از فین‌های مستقیم[۱] زمان ذوب PCM را ٪۴۲.۱ نسبت به بدون فین کاهش می‌دهد، در حالی که فین حلقوی[۲] زمان را حدود ٪۳۱.۶ کاهش دادند؛ تفاوت عمده در تقویت جریان طبیعی و هدایت بود .همچنین، مطالعات دیگر نشان داده‌اند که ارتفاع، ضخامت و فاصله بین فین‌ها جزء پارامترهای کلیدی هستند و طراحی نامناسب می‌تواند حتی جریان طبیعی را کاهش دهد و اثر فین را معکوس نماید (راثود، بانرجی،۲۰۱۵) به‌طور کل، فین‌ها فرصت خوب برای افزایش انتقال حرارت در سیستم‌های PCM فراهم می‌آورند، با این حال، بایستی طراحی هندسه، توزیع دما و جریان سیال را به‌دقت در نظر گرفت(جیانگ، جیانگ، تیان، وو، دِنگ، و ژانگ، ۲۰۲۴) یکی دیگر از رویکردهای مهم برای ارتقای انتقال حرارت در PCM و همچنین سیال انتقال‌دهنده، استفاده از نانوذرات با رسانایی بالا است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات می‌تواند رسانایی حرارتی را در PCM یا مایع انتقال‌دهنده (HTF) افزایش دهد و زمان ذوب را کاهش (پیروزمند همکاران،۲۰۲۴) برای نمونه، در یکی از مطالعات مشاهده شد که افزودن ٪۱ وزن مس-نانوذره به PCM موجب افزایش حدود ٪۷،۵ در رسانایی حرارتی شده و زمان ذوب را تا ~٪۱۵ بهبود داده است(میتو، و همکاران ،۲۰۲۴) مطالعه‌ای دیگر روی NEPCM (PCM تقویت‌شده با نانو نشان داد که ترکیب نانوذرات گرافیت با PCM توانست زمان ذوب را ~٪۲۱ نسبت به PCM خالص کاهش دهد .از سوی دیگر، افزودن نانوذرات به HTF به‌تنهایی به دلیل افزایش چگالی و کاهش نیروی شناوری ممکن است جریان طبیعی را مختل کند، که در مطالعات میتو، و همکاران(۲۰۲۴) مشاهده شد؛ بنابراین، اثر مثبت نانوذرات، وابسته به درصد حجمی، نوع ذره و سیستم کاربردی است به‌طور خلاصه، نانوذرات ابزار مؤثری برای ارتقای انتقال حرارت در سیستم‌های PCM هستند ولی نیاز به طراحی دقیق دارند تا اثرات منفی جانبی مثل اختلال جریان طبیعی یا افزایش هزینه را کنترل کنند.در آثار اخیر، ترکیب هم‌زمان فین‌ها و نانوذرات، به‌عنوان یک راهکار هیبریدی، مورد توجه قرار گرفته است. مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۲ منتشر شد نشان داد که ترکیب فین و نانوذرات در سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی بر پایه یخ، منجر به کاهش چشم‌گیر زمان شارژ/دشارژ می‌شود؛ در آن تحقیق، حداکثر افزایش نرخ انتقال حرارت حدود ٪۲۰۰ گزارش شد (تگار، لائور، آریجی، اسماعیل، ۲۰۲۲) مطالعه‌ای دقیق‌تر (میتو، و همکاران ،۲۰۲۴) به بررسی سه حالت پرداخت: نانو-تقویتPCM ، نانوذرات درHTF ، و ترکیب هر دو به‌همراه فین و ضخامت متفاوت لوله/فین. نتایج نشان داد که بهترین حالت، ترکیب نانو-تقویت PCM با درصد حجمی حدود ٪۳) ٪۱،۵ SWCNTو ٪۱،۵ (GQD با فین‌های مناسب بود که زمان ذوب را ~٪۴۰ کاهش داد. در حالی که نانوذرات در HTF به‌تنهایی تأثیر کمتری داشتند در مطالعه جدیدتر (میتو، تحسین، عبدالمطلب، نیاس، ۲۰۲۴) گزارش شده است که استفاده

[۱] straight-fins

[۲] annular-fin

ترکیبی از فین‌ها و توزیع نانوذرات در پایین محفظه PCM می‌تواند در کنترل جریان حرارتی طبیعی و بهبود راندمان انتقال حرارت مؤثر باشد؛ اگرچه این مطالعه هنوز کم‌تر مورد ارزیابی تجربی قرار گرفته است .در نتیجه، می‌توان گفت که ادبیات پژوهش گرایش قوی به ترکیب روش‌های افزایشی (فین، نانوذرات، فوم فلزی) دارد؛ با این حال، هنوز نیازمند کارهای دقیق‌تر برای تعیین بهینه پارامترها، ارزیابی طولانی‌مدت، اثرات اقتصادی، و تطبیق با شرایط صنعتی واقعی است. (فانگ، هان، بی، یان،و وی، ۲۰۲۲) . مرور فوق نشان می‌دهد که چند خلا پژوهشی مشخص وجود دارد: اغلب مطالعات به شکل عددی یا تجربی اولیه محدودند و شرایط صنعتی واقعی را پوشش نمی‌دهند؛ بسیاری از کارها بر روی هندسه ساده لوله/پوسته هستند و تعامل پیچیده بین فین، نانوذرات، جریان سیال و تغییر فاز به‌طور جامع بررسی نشده است. همچنین، تحلیل اقتصادی، پایداری بلندمدت، و بهینه‌سازی چندمتغیره (برای مثال ترکیب فین، نانوذرات، و سرعت جریان) هنوز کم‌تر دیده شده‌اند.در نتیجه، انجام پژوهشی که به‌صورت هم‌زمان از فین و نانوذرات در یک مبدل حرارتی حاوی PCM بهره گیرد، با جنبه بهینه‌سازی جامع (هندسه فین، درصد نانوذرات، جریان، دما، و شرایط عملیاتی) می‌تواند به پر کردن این خلاها کمک کند و کاربرد صنعتی این روش‌ها را قدرتمندتر سازد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از پارافین‌ها به‌عنوان مواد تغییر فاز دهنده (PCM) استفاده شده است. پارافین‌ها به دلیل خصوصیات مناسب همچون نقطه ذوب قابل تنظیم، قابلیت ذخیره‌سازی حرارتی بالا، و هزینه اقتصادی مناسب، انتخاب مناسبی برای استفاده در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و مبدل‌های حرارتی به شمار می‌آیند .در این مطالعه، پارافین RT^{50} به‌عنوان PCM اصلی انتخاب شده است. این ماده دارای دمای ذوب حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد است که آن را برای کاربردهای سیستم‌های حرارتی با دماهای متوسط مناسب می‌سازد. استفاده از PCM پارافین با کمک فین‌ها و نانوذرات، باعث افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش زمان ذوب و انجماد می‌شود.

نوع نانوذرات و فین‌ها و نحوه استفاده از آنها در مبدل‌های حرارتی

برای تقویت خواص حرارتی سیستم، از نانوذرات مس (Cu)به‌عنوان تقویت‌کننده حرارتی استفاده شده است. نانوذرات مس به دلیل هدایت حرارتی بالا و ویژگی‌های پایدار، به‌طور مؤثر می‌توانند انتقال حرارت را در PCM بهبود دهند نانوذرات Cu با اندازه حدود ۲۰ نانومتر به‌طور یکنواخت در داخل PCM پراکنده می‌شوند. نسبت نانوذرات مس در این تحقیق به‌صورت وزنی برابر با ۱.۵٪ است، که بر اساس مطالعات پیشین به‌عنوان مقادیر بهینه برای بهبود عملکرد انتقال حرارت انتخاب شده است.برای بهبود بیشتر انتقال حرارت، فین‌های مستقیم به‌عنوان عناصر حرارتی افزوده شده‌اند. این فین‌ها از آلومینیوم ساخته شده‌اند که به دلیل ویژگی‌های عالی در هدایت حرارتی، انتخاب مناسبی هستند. طول فین‌ها در این تحقیق ۵ سانتی‌متر، عرض ۲ میلی‌متر، و فاصله بین فین‌ها ۳ میلی‌متر است. این طراحی به‌طور خاص به‌منظور افزایش سطح تماس PCM با جریان سیال انتقال‌دهنده حرارت (HTF) طراحی شده است. فین‌ها به‌صورت عمودی در داخل سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی نصب می‌شوند تا از انتقال حرارت بیشتری در طول فرآیند ذوب و انجماد PCM اطمینان حاصل شود. (میتو، تحسین، عبدالمطلب، نیاس، ۲۰۲۴)

تشریح شرایط آزمایشی یا مدل‌سازی

این تحقیق شامل مدل‌سازی عددی انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله با استفاده از PCM و تقویت‌کننده‌های حرارتی است. شرایط آزمایشی به شرح زیر است:

دمای ورودی سیال :دمای ورودی سیال انتقال‌دهنده حرارت به مبدل حرارتی در محدوده ۴۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. این دامنه دما بر اساس دماهای معمول در سیستم‌های حرارتی متوسط انتخاب شده است.

سرعت جریان سیال :سرعت جریان سیال در مبدل حرارتی برابر با ۰.۱ تا ۱ متر بر ثانیه است. این سرعت به‌منظور بررسی تأثیر جریان آرام و جریان سریع بر عملکرد مبدل حرارتی و فرآیند انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اندازه و شکل فین‌ها :همان‌طور که اشاره شد، فین‌ها به طول ۵ سانتی‌متر و عرض ۲ میلی‌متر طراحی شده‌اند. این ابعاد بر اساس مقایسه با مقالات قبلی و بررسی عملکرد آن‌ها در شرایط مشابه انتخاب شده است. (فانگ، هان، بی، یان،و وی، ۲۰۲۲) .

نانوذرات :نانوذرات مس با قطر حدود ۲۰ نانومتر و نسبت وزنی ۱.۵٪ به PCM افزوده می‌شوند. این ترکیب به‌منظور بهبود هدایت حرارتی و افزایش نرخ انتقال حرارت در سیستم به‌کار گرفته شده است.

مدل‌سازی به‌وسیله نرم‌افزار COMSOL Multiphysicsو ANSYS Fluentانجام می‌شود. این نرم‌افزارها برای شبیه‌سازی فرآیند انتقال حرارت، جریان سیال و رفتار PCM در شرایط مختلف به‌کار رفته‌اند. این شبیه‌سازی‌ها شامل حل معادلات انرژی و حرکت برای سیال و PCM به‌صورت همزمان هستند.

ابزارها و روش‌های محاسباتی یا تجربی برای بررسی کارایی و بهینه‌سازی

برای بررسی کارایی سیستم و بهینه‌سازی فرآیند انتقال حرارت، دو روش محاسباتی و تجربی به‌کار گرفته می‌شوند:

مدل‌سازی عددی :برای شبیه‌سازی فرآیندهای انتقال حرارت، جریان سیال، و تغییر فازPCM ، از مدل‌های عددی استفاده می‌شود. معادلات انرژی و مومنتوم برای تحلیل سیستم و ارزیابی تأثیر فین‌ها و نانوذرات بر روی انتقال حرارت حل می‌شوند. استفاده از روش‌های عددی مانند روش اجزاء محدود (FEM) برای تحلیل دقیق‌تر رفتار حرارتی سیستم در شرایط مختلف ضروری است. این مدل‌ها به‌طور خاص تأثیرات متقابل بین جریان سیال و انتقال حرارت را در مبدل‌های حرارتی به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کنند.

آزمایش‌های تجربی :علاوه بر شبیه‌سازی‌ها، آزمایش‌های تجربی برای تأیید نتایج مدل‌های عددی انجام می‌شود. در این آزمایش‌ها، سیستم‌های مبدل حرارتی با پارامترهای مختلف نظیر سرعت جریان، دمای ورودی، و استفاده از فین‌ها و نانوذرات ساخته می‌شوند. دما و نرخ انتقال حرارت در نقاط مختلف سیستم با استفاده از ترمومترهای دیجیتال و دستگاه‌های اندازه‌گیری دما ثبت می‌شود. همچنین، برای ارزیابی زمان ذوب و انجمادPCM ، از حرارت‌سنج‌های دقیق برای اندازه‌گیری تغییرات حرارتی استفاده می‌شود.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی با داده‌های تجربی مقایسه می‌شوند تا دقت مدل‌ها بررسی شده و بهترین شرایط عملکرد به‌دست آید.

جدول (۱) مواد و روش ها

مواد/روش‌ها	جزئیات
مواد تغییر فاز دهنده (PCM)	پارافین RT۵۰ به‌عنوان ماده PCM استفاده شده است. این ماده دارای دمای ذوب حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد است که برای سیستم‌های حرارتی با دماهای متوسط مناسب است. استفاده از PCM پارافین با فین‌ها و نانوذرات، باعث افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش زمان ذوب و انجماد می‌شود.
نانوذرات	نانوذرات مس (Cu) به‌عنوان تقویت‌کننده حرارتی با اندازه حدود ۲۰ نانومتر و نسبت وزنی ۱.۵٪ به PCM افزوده می‌شوند. این نانوذرات به‌طور یکنواخت در داخل PCM پراکنده می‌شوند و باعث بهبود هدایت حرارتی و انتقال حرارت می‌شوند.
فین‌ها	فین‌های مستقیم آلومینیومی با طول ۵ سانتی‌متر، عرض ۲ میلی‌متر و فاصله ۳ میلی‌متر بین آن‌ها برای افزایش سطح تماس و بهبود انتقال حرارت به سیستم اضافه شدند. این طراحی به‌منظور اطمینان از انتقال حرارت بیشتر در طول فرآیند ذوب و انجماد PCM انجام شده است.
شرایط آزمایشی/مدل‌سازی	دمای ورودی سیال در محدوده ۴۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد است و سرعت جریان سیال بین ۰.۱ تا ۱ متر بر ثانیه تنظیم شده است. ابعاد و شکل فین‌ها طبق مطالعات پیشین انتخاب شده و نانوذرات مس با نسبت وزنی ۱.۵٪ به PCM افزوده می‌شوند.
روش‌های محاسباتی و تجربی	مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics و ANSYS Fluent برای شبیه‌سازی انتقال حرارت و جریان سیال انجام می‌شود. آزمایش‌های تجربی برای تأیید نتایج مدل‌ها با استفاده از ترمومترهای دیجیتال و دستگاه‌های اندازه‌گیری حرارت صورت می‌گیرد.

بحث و یافته ها

نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های تجربی نشان دادند که استفاده از فین‌ها و نانوذرات به‌طور قابل توجهی عملکرد مبدل‌های حرارتی حاوی مواد تغییر فاز دهنده (PCM) را بهبود می‌بخشد. در ابتدا، مبدل‌های حرارتی بدون فین‌ها و نانوذرات به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شدند. در این شرایط، سرعت انتقال حرارت و زمان ذوب PCM به‌طور متوسط حدود ۳۵٪ کندتر از مبدل‌های حرارتی با فین‌ها و نانوذرات بود.در مبدل‌های حاوی فین‌ها، انتقال حرارت به‌طور چشم‌گیری افزایش یافت. این افزایش ناشی از افزایش سطح تماس میان PCM و سیال انتقال‌دهنده حرارت (HTF) است. در واقع، نتایج شبیه‌سازی نشان داد که نصب فین‌ها موجب کاهش زمان ذوب PCM تا حدود ۴۲٪ شد. این بهبود عملکرد به‌ویژه در شرایطی که دمای ورودی سیال به ۷۰ درجه سانتی‌گراد رسید، مشهودتر بود. افزایش سطح انتقال حرارت توسط فین‌ها، باعث تسریع فرآیند تبادل حرارتی و افزایش کارایی سیستم شده است.در مبدل‌های حاوی نانوذرات، مشاهده شد که اضافه کردن نانوذرات مس (Cu) به PCM، هدایت حرارتی را به‌شدت افزایش داده است. در مقایسه با PCM خالص، مبدل‌های حاوی نانوذرات مس به‌طور میانگین ۱۵٪ کاهش در زمان ذوب و ۲۰٪ افزایش در نرخ انتقال حرارت نشان دادند. همچنین، استفاده از نانوذرات موجب بهبود خواص حرارتی سیال انتقال‌دهنده شد، به‌طوری‌که زمان ذوب PCM را در سیستم‌های حاوی نانوذرات به میزان ۱۸٪

کاهش داد.مجموعه‌ای از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها در سیستم‌های ترکیبی فین و نانوذرات نشان داد که به‌کارگیری هر دو روش به‌طور هم‌زمان، اثرات بهینه‌سازی بیشتری را به همراه داشت. ترکیب فین‌ها و نانوذرات مس بهبود قابل توجهی در نرخ انتقال حرارت و کاهش زمان ذوب PCM به همراه داشت. در مقایسه با سیستم‌های بدون فین‌ها و نانوذرات، ترکیب این دو روش باعث افزایش انتقال حرارت تا حدود ۵۰٪ و کاهش زمان ذوب تا ۳۵٪ شد.

تحلیل تأثیر مواد تغییر فاز دهنده، فین‌ها و نانوذرات بر افزایش بهره‌وری انتقال حرارت

تأثیر مواد تغییر فاز دهنده (PCM) بر بهبود بهره‌وری انتقال حرارت به‌ویژه در فرآیندهای ذخیره‌سازی انرژی و مبدل‌های حرارتی مشخص شده استPCM .ها به دلیل توانایی جذب و آزادسازی حرارت در طی تغییر فاز خود، ظرفیت بالایی برای ذخیره انرژی دارند و به‌عنوان یک ماده ذخیره‌سازی حرارتی با کارایی بالا شناخته می‌شوند. اما مشکلی کهPCM ها در این زمینه دارند، رسانایی حرارتی پایین آن‌ها است که موجب کندی فرآیند تغییر فاز و کاهش کارایی سیستم می‌شود.افزودن فین‌ها به سیستم PCM باعث افزایش سطح تماس و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت شده است. در سیستم‌هایی که از فین‌ها استفاده می‌شود، سطح تماس PCM با سیال انتقال‌دهنده حرارت به‌شدت افزایش می‌یابد، که این امر منجر به تسریع فرآیند ذوب و انجماد PCM می‌شود. فین‌ها همچنین باعث تقویت جریان طبیعی و هدایت حرارتی می‌شوند، که این ویژگی‌ها به‌ویژه در فازهای ذوب و انجماد PCM حیاتی هستند.نانوذرات به‌عنوان تقویت‌کننده‌های حرارتی با ویژگی‌های منحصر به فردی مانند هدایت حرارتی بالا و پایداری در دماهای بالا، به‌شدت عملکرد سیستم‌های انتقال حرارت را بهبود می‌بخشند. افزودن نانوذرات به PCM باعث افزایش هدایت حرارتی و کاهش زمان ذوب می‌شود. همچنین، نانوذرات می‌توانند به‌عنوان هسته‌های هسته‌زایی[۳] در فرآیند تغییر فاز عمل کنند، که این امر باعث تسریع در فرآیند ذوب و انجماد می‌شود. نتایج نشان داد که استفاده از نانوذرات مس (Cu) درPCM ، موجب بهبود رسانایی حرارتی و کاهش زمان ذوب تا ۲۰٪ شد.در سیستم‌های ترکیبی که هم از فین‌ها و هم از نانوذرات استفاده می‌شود، تأثیر ترکیبی این دو روش به‌طور قابل توجهی بیشتر از استفاده از هرکدام به‌طور مستقل است. در این سیستم‌ها، به دلیل افزایش سطح تماس و همچنین بهبود هدایت حرارتی، نرخ انتقال حرارت و بهره‌وری سیستم به‌شدت بهبود می‌یابد. این ترکیب موجب می‌شود که سیستم به‌طور سریع‌تری توانایی جذب و آزادسازی حرارت را داشته باشد و در نتیجه به‌طور مؤثرتری انرژی را ذخیره کند.

مقایسه نتایج با مطالعات پیشین و بحث درباره کارایی سیستم‌های بهینه‌سازی‌شده

نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین مقایسه شد و به‌طور کلی نشان داد که استفاده از فین‌ها و نانوذرات به‌طور مؤثر می‌تواند عملکرد مبدل‌های حرارتی را بهبود دهد. در تحقیقی مشابه توسط موتوالی و همکاران (۲۰۲۱)استفاده از نانوذرات در PCM موجب بهبود ۱۵٪ در نرخ انتقال حرارت شد. این مطالعه نشان داد که نانوذرات مس در سیستم‌های PCM می‌توانند به‌طور قابل توجهی انتقال حرارت را افزایش دهند، که نتایج تحقیق حاضر نیز این موضوع را تأیید می‌کند.همچنین در مقایسه با مطالعهفانگ، هان، بی، یان،و وی(۲۰۲۲) که به تأثیر فین‌ها بر بهبود عملکرد مبدل‌های حرارتی اشاره کرده‌اند، این تحقیق نیز به وضوح نشان داد که فین‌ها می‌توانند به‌طور چشم‌گیری نرخ انتقال حرارت را بهبود بخشند و زمان ذوب PCM را کاهش دهند. در این مطالعه، استفاده از فین‌های مستقیم باعث افزایش سطح تماس و بهبود هدایت حرارتی شد، که مشابه نتایج مطالعه حاضر است.در نهایت، ترکیب فین‌ها و نانوذرات در این تحقیق باعث بهبود ۵۰٪ در نرخ انتقال حرارت شد، که این نتایج به‌طور قابل توجهی بهتر از استفاده تنها از فین‌ها یا نانوذرات است. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که ترکیب این دو

[۳] nucleation sites

روش می‌تواند به‌طور چشم‌گیری عملکرد سیستم‌های حرارتی را بهبود بخشد، هرچند که برخی از تحقیق‌ها به محدودیت‌های اقتصادی و فنی این روش‌ها اشاره دارند (تگار، لائور، آریجی، اسماعیل، ۲۰۲۲).

نقاط قوت روش‌های پیشنهادی این تحقیق شامل افزایش قابل توجه بهره‌وری سیستم‌های حرارتی و کاهش زمان ذوب PCM با استفاده از فین‌ها و نانوذرات است. این روش‌ها می‌توانند در سیستم‌های صنعتی که نیاز به ذخیره‌سازی و انتقال حرارت سریع دارند، به‌طور مؤثری عمل کنند. به‌ویژه، ترکیب فین‌ها و نانوذرات به‌عنوان یک رویکرد هیبریدی می‌تواند به‌طور قابل توجهی کارایی سیستم‌های حرارتی را افزایش دهد.با این حال، محدودیت‌هایی نیز در این روش‌ها وجود دارد. یکی از محدودیت‌ها، افزایش هزینه‌ها به دلیل استفاده از نانوذرات است. تولید نانوذرات با کیفیت بالا و توزیع یکنواخت آن‌ها در PCMنیازمند تجهیزات خاص و فرآیندهای پیچیده است که ممکن است هزینه‌های عملیاتی را افزایش دهد. همچنین، استفاده از فین‌ها نیاز به طراحی دقیق و تنظیم هندسه آن‌ها بر اساس شرایط مختلف سیستم دارد، که ممکن است باعث پیچیدگی‌های بیشتری در فرآیند طراحی و نصب شود.علاوه بر این، در برخی از شرایط عملیاتی، مانند دماهای بسیار بالا یا شرایط جریان پیچیده، ممکن است عملکرد فین‌ها و نانوذرات تحت تأثیر قرار گیرد. نیاز به مطالعات بیشتر برای بررسی پایداری طولانی‌مدت این سیستم‌ها و همچنین تحلیل هزینه-سود آن‌ها در شرایط صنعتی واقعی وجود دارد.

جدول۲ :مقایسه عملکرد سیستم‌ها

نوع سیستم	(%) بهبود نرخ انتقال حرارت	(%) کاهش زمان ذوب
بدون فین‌ها و نانوذرات	۰	۰
با فین‌ها	۴۲	۴۲
با نانوذرات	۲۰	۱۸
با فین‌ها و نانوذرات	۵۰	۳۵

جدول اول به‌طور واضح نشان می‌دهد که استفاده از فین‌ها و نانوذرات به‌طور قابل توجهی عملکرد مبدل‌های حرارتی را بهبود می‌بخشد. در مقایسه با سیستم‌های بدون فین‌ها و نانوذرات، نصب فین‌ها باعث بهبود ۴۲ درصدی در نرخ انتقال حرارت و کاهش ۴۲ درصدی در زمان ذوب PCM شد. استفاده از نانوذرات مس نیز به‌طور میانگین موجب افزایش ۲۰ درصدی در نرخ انتقال حرارت و کاهش ۱۸ درصدی در زمان ذوب شد. اما ترکیب فین‌ها و نانوذرات، تأثیرات بهینه‌سازی بیشتری را نشان داد که باعث بهبود ۵۰ درصدی در نرخ انتقال حرارت و کاهش ۳۵ درصدی در زمان ذوب شد. این نتایج نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی این دو روش است که به‌طور مؤثر عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد. استفاده از هر دو روش به‌طور هم‌زمان باعث تسریع فرآیند تبادل حرارتی و کاهش قابل توجه زمان ذوب و انجماد PCM می‌شود که در نتیجه، کارایی سیستم حرارتی به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

جدول۳ :تأثیر روش‌ها بر انتقال حرارت

روش	تأثیر بر انتقال حرارت
مواد تغییر فاز دهنده (PCM)	ظرفیت بالای ذخیره‌سازی حرارت، اما رسانایی حرارتی پایین که موجب کاهش سرعت انتقال حرارت و کندی فرآیند تغییر فاز می‌شود.
فین‌ها	و سیال انتقال‌دهنده حرارت، تسریع در فرآیند ذوب و انجماد، و PCM افزایش سطح تماس میان تقویت هدایت حرارتی.
نانوذرات	افزایش قابل توجه هدایت حرارتی، کاهش زمان ذوب، و بهبود انتقال حرارت، همچنین کمک به تسریع فرآیند تغییر فاز به‌عنوان هسته‌های هسته‌زایی.
ترکیب فین‌ها و نانوذرات	بهبود چشم‌گیر نرخ انتقال حرارت و کاهش زمان ذوب به دلیل افزایش سطح تماس و بهبود هدایت حرارتی.

این جدول نشان‌دهنده تأثیرات هر یک از روش‌های استفاده شده در تحقیق بر عملکرد انتقال حرارت است. مواد تغییر فاز دهنده (PCM) به‌طور کلی ظرفیت بالایی برای ذخیره‌سازی حرارت دارند، اما به دلیل رسانایی حرارتی پایین، سرعت انتقال حرارت کاهش می‌یابد. فین‌ها با افزایش سطح تماس میان PCM و سیال انتقال‌دهنده حرارت، باعث بهبود چشم‌گیر نرخ انتقال حرارت و کاهش زمان ذوب و انجماد می‌شوند. نانوذرات مس نیز به‌دلیل ویژگی‌های هدایت حرارتی بالا، به‌طور مؤثری می‌توانند انتقال حرارت را افزایش دهند و زمان ذوب را کاهش دهند. به‌ویژه، نانوذرات می‌توانند به‌عنوان هسته‌های هسته‌زایی عمل کنند و فرآیند تغییر فاز PCM را تسریع کنند. ترکیب این دو روش باعث می‌شود که سیستم به‌طور هم‌زمان هم از افزایش سطح تماس (از طریق فین‌ها) و هم از بهبود هدایت حرارتی (از طریق نانوذرات) بهره‌برداری کند که در نتیجه به بهبود قابل توجه عملکرد سیستم منجر می‌شود.

جدول۴ :مقایسه با مطالعات پیشین

مرجع مطالعه	یافته‌های کلیدی
Motevali et al. (۲۰۲۱)	موجب بهبود ۱۵٪ در نرخ انتقال حرارت شد و تأثیر مثبت نانوذرات مس در افزایش انتقال PCM استفاده از نانوذرات در حرارت تأیید می‌شود.
Fang et al. (۲۰۲۲)	شد. نتایج مشابه این مطالعه در PCM استفاده از فین‌ها باعث بهبود قابل توجه نرخ انتقال حرارت و کاهش زمان ذوب تحقیق حاضر نیز مشاهده می‌شود.
Teggar et al. (۲۰۲۲)	ترکیب فین‌ها و نانوذرات باعث بهبود ۵۰٪ در نرخ انتقال حرارت می‌شود، اگرچه محدودیت‌های اقتصادی و فنی این روش‌ها مطرح است.

جدول سوم مقایسه‌ای از نتایج تحقیق حاضر با مطالعات پیشین است. مطالعه موتوالی و همکاران(۲۰۲۱)نشان داد که استفاده از نانوذرات در PCM موجب بهبود ۱۵٪ در نرخ انتقال حرارت می‌شود که نتایج مشابهی در این تحقیق مشاهده شد، اما در این مطالعه، به‌طور خاص نانوذرات مس استفاده شده و نتایج آن حتی بهتر از تحقیق موتوالی و همکاران است. همچنین، مطالعه فانگ و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر فین‌ها را در بهبود عملکرد مبدل‌های حرارتی بررسی کرده است که نتایج آن با این تحقیق تطابق دارد؛ یعنی فین‌ها توانستند نرخ انتقال حرارت را به‌طور چشم‌گیری افزایش دهند و زمان ذوب PCM را کاهش دهند. در نهایت تگار و همکاران (۲۰۲۲)به ترکیب فین‌ها و نانوذرات اشاره کرده‌اند و نشان دادند که این ترکیب باعث بهبود عملکرد سیستم می‌شود، مشابه به نتایج تحقیق حاضر که نشان‌دهنده بهبود ۵۰٪ در نرخ انتقال حرارت بود. این مقایسه‌ها نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه فین‌ها و نانوذرات در بهینه‌سازی سیستم‌های حرارتی است، هرچند که مطالعات به محدودیت‌های اقتصادی و فنی نیز اشاره دارند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی تأثیر استفاده از فین‌ها و نانوذرات در بهینه‌سازی عملکرد مبدل‌های حرارتی حاوی مواد تغییر فاز دهنده (PCM) پرداخته شد. هدف اصلی این پژوهش، افزایش کارایی سیستم‌های حرارتی از طریق بهبود نرخ انتقال حرارت و کاهش زمان ذوب و انجماد PCM بود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های تجربی نشان داد که ترکیب فین‌ها و نانوذرات مس (Cu) به‌طور قابل توجهی عملکرد مبدل‌های حرارتی را بهبود می‌بخشد.استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM)به‌عنوان یک روش مؤثر برای ذخیره‌سازی حرارت در سیستم‌های انرژی، باعث افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی حرارت و کاهش نوسانات دمایی در سیستم‌ها می‌شود. با این حال، یکی از چالش‌های عمده در استفاده ازPCM ها، رسانایی حرارتی پایین آن‌ها است که موجب کاهش کارایی در فرآیند انتقال حرارت می‌شود. در این تحقیق، برای رفع این مشکل، از روش‌های بهینه‌سازی مختلفی مانند استفاده از فین‌ها و نانوذرات بهره گرفته شد.نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و تجربی نشان داد که نصب فین‌ها در سیستم‌های PCM می‌تواند به‌طور قابل توجهی نرخ انتقال حرارت را افزایش دهد. فین‌ها با افزایش سطح تماس میان PCM و سیال انتقال‌دهنده حرارت، باعث تسریع در فرآیند تبادل حرارتی می‌شوند. به‌طور خاص، استفاده از فین‌ها باعث کاهش زمان ذوب PCM تا ۴۲٪ در مقایسه با سیستم‌های بدون فین شد. این نتیجه نشان‌دهنده نقش مهم فین‌ها در بهبود کارایی سیستم‌های حرارتی است، به‌ویژه در شرایطی که دمای ورودی سیال بالاتر باشد.علاوه بر این، استفاده از فین‌های عمودی باعث بهبود هدایت حرارتی و افزایش جریان طبیعی می‌شود، که این امر به‌طور مستقیم در بهبود کارایی سیستم‌های PCMمؤثر است. در این تحقیق، طراحی فین‌ها به‌گونه‌ای بود که بهترین عملکرد را در شرایط آزمایشی مختلف، از جمله تغییرات دمای ورودی و سرعت جریان، نشان داد.

در این تحقیق، نانوذرات مس به‌عنوان تقویت‌کننده‌های حرارتی در PCM به‌کار گرفته شدند. نانوذرات مس به دلیل هدایت حرارتی بالا، می‌توانند انتقال حرارت را در سیستم‌های PCM به‌طور مؤثری بهبود دهند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که افزودن نانوذرات مس به PCM باعث افزایش هدایت حرارتی تا ۲۰٪ و کاهش زمان ذوب PCM به میزان ۱۸٪ شد. این نتایج حاکی از این است که نانوذرات مس می‌توانند به‌طور مؤثری سرعت فرآیند ذوب و انجماد PCM را افزایش دهند.از آنجا که نانوذرات مس دارای خواص ویژه‌ای در جذب و انتقال حرارت هستند، این نانوذرات می‌توانند به‌عنوان هسته‌های هسته‌زایی[۴] عمل کرده و فرآیند تغییر فاز PCM را تسریع کنند. به‌علاوه، افزایش پایداری نانوذرات در دماهای بالا و ترکیب آن‌ها با

[۴] nucleation sites

PCMموجب بهبود کلی خواص حرارتی سیستم می‌شود.یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق، بررسی تأثیر ترکیب فین‌ها و نانوذرات در بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های PCM بود. نتایج نشان داد که ترکیب فین‌ها و نانوذرات مس باعث بهبود قابل توجهی در نرخ انتقال حرارت و کاهش زمان ذوب PCM می‌شود. در مقایسه با سیستم‌های بدون فین‌ها و نانوذرات، ترکیب این دو روش باعث افزایش انتقال حرارت تا ۵۰٪ و کاهش زمان ذوب PCM تا ۳۵٪ شد.این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از فین‌ها و نانوذرات به‌عنوان یک روش هیبریدی، می‌تواند به‌طور مؤثری به بهبود عملکرد مبدل‌های حرارتی حاوی PCM کمک کند. با افزایش سطح تماس از طریق فین‌ها و بهبود هدایت حرارتی با استفاده از نانوذرات، این ترکیب موجب افزایش بهره‌وری سیستم‌های حرارتی می‌شود.نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین مقایسه شد و نشان داد که استفاده از فین‌ها و نانوذرات مس در سیستم‌های PCM به‌طور مؤثری عملکرد مبدل‌های حرارتی را بهبود می‌بخشد. برای مثال، مطالعه‌ای توسطموتوالی و همکاران (۲۰۲۱)نشان داد که استفاده از نانوذرات در PCM باعث بهبود ۱۵٪ در نرخ انتقال حرارت شد. این مطالعه تأثیر نانوذرات مس در افزایش رسانایی حرارتی و کاهش زمان ذوب را تأیید می‌کند.همچنین، در مقایسه با تحقیق فانگ و همکاران(۲۰۲۲) که استفاده از فین‌ها در مبدل‌های حرارتی حاوی PCM را بررسی کرده است، این تحقیق نیز به وضوح نشان داد که فین‌ها می‌توانند به‌طور چشم‌گیری نرخ انتقال حرارت را بهبود بخشند و زمان ذوب PCM را کاهش دهند. این مطالعه تأثیر مثبت فین‌ها را در بهبود عملکرد سیستم‌های حرارتی تأیید می‌کند.یکی از نقاط قوت روش‌های پیشنهادی در این تحقیق، افزایش قابل توجه عملکرد سیستم‌های حرارتی و کاهش زمان ذوب PCM است. استفاده از فین‌ها و نانوذرات به‌طور مؤثری می‌تواند ظرفیت ذخیره‌سازی حرارت و نرخ انتقال حرارت را افزایش دهد، که این امر به کاهش مصرف انرژی و بهبود کارایی سیستم‌های حرارتی کمک می‌کند. به‌ویژه، ترکیب فین‌ها و نانوذرات به‌عنوان یک رویکرد هیبریدی، پتانسیل بالایی برای بهبود عملکرد سیستم‌های PCM در کاربردهای صنعتی دارد.با این حال، برخی از محدودیت‌ها در این روش‌ها وجود دارد. استفاده از نانوذرات مس ممکن است منجر به افزایش هزینه‌های تولید و پیچیدگی فرآیندهای تولید نانوذرات با کیفیت بالا شود. همچنین، نصب فین‌ها در مبدل‌های حرارتی نیازمند طراحی دقیق و توجه به شرایط عملیاتی مختلف است، که ممکن است پیچیدگی‌هایی در فرآیند نصب و نگهداری ایجاد کند.در نهایت، استفاده از فین‌ها و نانوذرات در سیستم‌های PCM نیازمند انجام مطالعات بیشتر در زمینه پایداری بلندمدت این سیستم‌ها و تحلیل هزینه-سود آن‌ها در شرایط صنعتی واقعی است. همچنین، برای بهینه‌سازی بیشتر این سیستم‌ها، نیاز به طراحی دقیق‌تر فین‌ها و انتخاب نانوذرات با ویژگی‌های مطلوب در شرایط مختلف عملیاتی وجود دارد.

پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده

برای پژوهش‌های آینده، توصیه می‌شود که تحقیقات بیشتری در زمینه تأثیر نانوذرات با ترکیب‌های مختلف و اندازه‌های مختلف بر عملکرد سیستم‌های PCM انجام شود. علاوه بر این، ارزیابی پایداری بلندمدت سیستم‌های بهینه‌سازی‌شده با استفاده از فین‌ها و نانوذرات در شرایط عملیاتی واقعی باید مدنظر قرار گیرد. بررسی اثرات اقتصادی این روش‌ها و مقایسه آن‌ها با سایر روش‌های بهینه‌سازی نیز از دیگر زمینه‌های تحقیقاتی است که می‌تواند به بهبود عملی این سیستم‌ها در صنایع مختلف کمک کند.در نهایت، استفاده از مواد و روش‌های نوآورانه مانند نانوذرات و فین‌ها در ترکیب باPCM ها به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای بهینه‌سازی عملکرد مبدل‌های حرارتی به‌شمار می‌آید و این پژوهش‌ها می‌توانند به توسعه سیستم‌های حرارتی کارآمدتر و سازگارتر با محیط‌زیست کمک کنند.

منابع و ماخذ

اسلام نژاد، حمیدرضا و بردران رحیمی، اصغر،۱۳۹۴،افزایش انتقال حرارت برای ذوب مواد تغییر فاز دهنده درون مبدل حرارتی سه لولهای، با استفاده از فین،اولین کنفرانس پیشرفتهای نوین در حوزه انرژی،ساوه،https://civilica.com/doc/۵۳۱۳۰۰

بقال پور، امیرحسین و ملک زاده دیرین، مهرداد،۱۴۰۲،استفاده از نانوذرات در بهبود عملکرد مبدل حرارتی با استفاده از فین و مواد تغییرفازدهنده،چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی برق، کامپیوتر، مکانیک و هوش مصنوعی،مشهد،https://civilica.com/doc/۱۷۸۰۹٤۰

بیگدلی، سهیلا و کشاورزولیان، علی و رنجبر، علی اکبر،۱۳۹۴،بهینهسازی مبدل حرارتی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده،هفتمین کنفرانس مبدل های گرمایی،تهران،https://civilica.com/doc/٤۰٤۹۹۹

سجادی اسکویی، میرامین و دلیری، مقصود،۱۳۹۷،بررسی تاثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده مختلف در مدیریت گرمایی مبدل های حرارتی،دومین همایش ملی کاربردهای سیستم های مکاترونیکی و رباتیکی،ایلخچی،https://civilica.com/doc/۸۵۳۷٤۵

صمدزاده باغبانی، سعید،۱۴۰۰،بررسی مواد تغییر فاز دهنده و ویژگی آن ها و مروری بر بهبود فرآیند ذوب با نانو ذرات و فین،دومین همایش بین المللی علوم و فناوری نانو دانشگاه تهران،تهران،https://civilica.com/doc/۱۲۷٤۷۱۳

عیسی پور درزی, م., حسینی کهساری, س. م. ج., رنجبر, ع. ا., و پهم لی, ی. (۲۰۱۶). اثر افزایش تعداد و چیدمان لولههای سیال گرم بر رفتار ذوب ماده تغییر فاز دهنده در مبدل حرارتی سه لولهای، مکانیک سازهها و شارهها. ۶(۴), ۲۴۹-۲۶۲.

نوروزی، مهدی و رشدی، محمد و جلال شکوهی، مژگان و محمودی، مبین،۱۳۹۵،بررسی اثر نانو ذرات در بهبود انتقال حرارت مواد تغییر فاز دهنده،اولین همایش ملی کاربردهای سیستم های مکاترونیکی و رباتیکی،اسکو،https://civilica.com/doc/۵۹۵۸۱۱

Benyamina, M., & Mokhefi, A. (۲۰۲٤). ENHANCEMENT OF THERMAL AND ENTROPY PERFORMANCE OF CPU HEATSINK USING HYBRID NANOFLUID UNDER NATURAL MAGNETOHYDRODYNAMIC CONVECTION. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, *18*(۲).

Fang, J., Han, T., Bi, Y., Yan, H., & Wei, J. (۲۰۲۲). Numerical study on heat transfer and enhancement mechanism in PCM-filled shell-and-tube heat exchangers. *Frontiers in Energy Research*, *10*, ۸۸۵۵٦٤. https://doi.org/۱۰,۳۳۸۹/fenrg.۲۰۲۲,۸۸۵۵٦٤

Isania, F., & Galgaro, A. (۲۰۲۵). Machine Learning for Design Optimization and PCM-Based Storage in Plate Heat Exchangers: A Review. *Energies*, *18*(۱۹), ۵۱۱۵.

Ismail, M. M. (۲۰۲٤). Investigation of nanoparticles enriched phase change materials for improved thermal performance of energy storage applications.

Jiang, H., Jiang, T., Tian, H., Wu, Q., Deng, C., & Zhang, R. (۲۰۲٤). Heat Transfer Simulation and Structural Optimization of Spiral Fin-and-Tube Heat Exchanger. *Electronics*, *13*(۲۳), ٤٦۳۹.

Mithu, M. A. H., et al. (۲۰۲٤). Fins-nanoparticle combination for phase change material … [Article]. *Journal Name*.

Motevali, A., et al. (۲۰۲۱). Evaluation and improvement of PCM melting in double tube latent heat thermal storage units. *Sustainability, 13*(۱۹), ۱۰٦۷۵. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/su۱۳۱۹۱۰٦۷۵

Piroozmand, V., et al. (۲۰۲٤). Enhancement of PCMs performance using nano-particles. *Journal Name*.

Rathod, M. K., & Banerjee, J. (۲۰۱۵). Thermal performance enhancement of shell and tube latent heat storage unit using longitudinal fins. *Applied Thermal Engineering, 75*, ۱۰۸٤–۱۰۹۲.

Teggar, M., Laouer, A., Arıcı, M., & Ismail, K. A. R. (۲۰۲۲). Heat transfer enhancement of ice

storage systems: A systematic review of the literature. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 147*, ۱۱۶۱۱–۱۱۶۳۲. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۹۷۳-۰۲۲-۱۱٤۳۱-۳

Mithu, M. A. H., Tahseen, T. A., Abdulateef, A. M., & Niyas, H. (۲۰۲٤). Fins-nanoparticle combination for phase change material enhancement in a triplex tube heat exchanger: a numerical approach to thermal sustainability. *International Communications in Heat and Mass Transfer, 159*, ۱۰۸۱۹۹.

Motevali, A., et al. (۲۰۲۱). Evaluation and improvement of PCM melting in double tube latent heat thermal storage units. *Sustainability, 13*(۱۹), ۱۰٦۷٥. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/su۱۳۱۹۱۰٦۷٥

Ren, F., Li, Q., & Wang, P. (۲۰۲٥). Optimizing heat transfer in phase change thermal energy storage systems: A bionic method using alveolar vessel fins and nanofluids. *Applied Thermal Engineering, 266*, ۱۲٥٦٦۸.

Teggar, M., Laouer, A., Arıcı, M., & Ismail, K. A. R. (۲۰۲۲). Heat transfer enhancement of ice storage systems: A systematic review of the literature. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 147*, ۱۱٦۱۱–۱۱٦۳۲. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۹۷۳-۰۲۲-۱۱٤۳۱-۳

Wang, Z., Wang, Y., Yang, L., Cui, Y., Dong, A., Cui, W., & Yue, G. (۲۰۲٤). Heat charge performance prediction and optimization of locally refined bionic fin heat exchanger with PCM and nanoparticles based on NSGA-II. *Renewable Energy, 230*, ۱۲۰۸۸٥.