

مروری بر فناوری لوله های حرارتی: چالش ها، نوآوری ها و کاربردهای صنعتی

آتیه میرزایی و مانلی خوانچه زرین

دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، واحد علوم و فناوری پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

محسن پیرمحمدی

دانشیار مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، واحد علوم و فناوری پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

mo.pirmohammadi@iau.ac.ir

لوله های حرارتی به عنوان یکی از فناوری های کارآمد انتقال حرارت، به دلیل بازده و راندمان بالا، افت فشار اندک و توانایی عملکرد در شرایط متنوع، جایگاه ویژه ای در صنایع مختلف یافته اند. در این پژوهش، ساختار، اجزا و عوامل مؤثر بر عملکرد لوله های حرارتی از جمله انتخاب سیال کاری و محدوده های دمایی و طراحی فنیله بررسی شده است. همچنین انواع پیشرفته شامل لوله های حلقوی، تخت و میکرو معرفی و مزایا و چالش های هر کدام تحلیل گردیده است. نتایج نشان می دهد که انتخاب صحیح سیال کاری، بهینه سازی ساختار داخلی و توسعه مواد با رسانایی بالا نقش مهمی در افزایش پایداری و کارایی این فناوری دارند. این یافته ها می توانند مبنای تحقیقات آینده و گسترش کاربرد لوله های حرارتی در صنایع مختلف قرار گیرند. در پایان، مسیرهای آینده این فناوری شامل طراحی های نوین، معرفی سیالات کاری سازگار با محیط زیست و بهینه سازی طراحی جهت گسترش کاربرد در شرایط عملیاتی خاص و در صنایع نوظهور پیشنهاد می شود.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش:

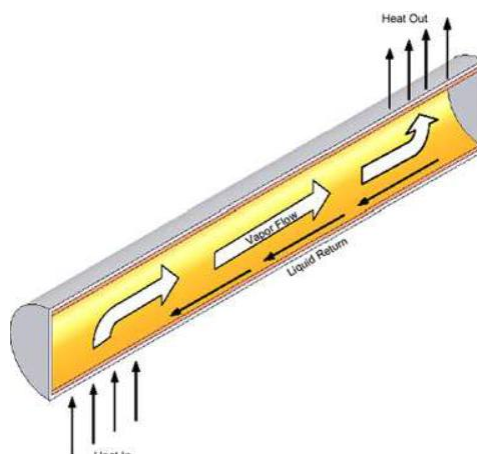
۱۴۰۴/۱۱/۰۴

کلمات کلیدی:

لوله های حرارتی،
انتقال حرارت، سیال
کاری، ساختار فنیله،
کاربردهای صنعتی

۱. مقدمه

مدیریت حرارتی همواره از چالش‌های اصلی در سیستم‌های صنعتی و الکترونیکی بوده است. لوله‌های حرارتی به‌عنوان راهکاری نوآورانه، انتقال انرژی را با استفاده از چرخه تبخیر و میعان یک سیال کاری و بازگشت آن از طریق نیروهای موپینگی انجام می‌دهند. این سازوکار موجب انتقال حرارت با بازده بالا و حداقل افت فشار در فواصل طولانی می‌شود. ساختار لوله حرارتی متشکل از تبخیر کننده^۱ برای جذب گرما، ناحیه بی دررو یا بی‌دمایی^۲ برای انتقال بخار و چگالنده^۳ برای دفع حرارت است. طراحی مناسب فیتله و انتخاب سیال کاری متناسب با دامنه دمایی، اساس عملکرد پایدار این تجهیزات محسوب می‌شود. توسعه‌های اخیر مانند لوله‌های حلقوی، تخت و میکرو نشان‌دهنده ظرفیت بالای این فناوری در پاسخگویی به نیازهای صنایع مختلف از جمله الکترونیک، هوافضا، انرژی‌های تجدیدپذیر و تهویه مطبوع است. هدف این مقاله مرور پیشرفت‌ها، چالش‌ها و چشم‌انداز آینده لوله‌های حرارتی و بررسی نقش آن‌ها در بهبود بهره‌وری انرژی و توسعه صنعتی است. یک لوله حرارتی به صورت طرحواره^۴ در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱: شمای کلی یک لوله حرارتی شامل تبخیر کننده (بخش جذب گرما)، بی دررو (قسمت انتقال بخار) و چگالنده (بخش دفع گرما) (اندرسون و همکاران^۵، ۱۳۹۸)

۲. اثر دما بر لوله‌های حرارتی و بررسی عملکرد آن‌ها

۱.۲ عملکرد لوله‌های حرارتی در دما بالا

لوله حرارتی معمولی در انتقال سیال و حرارت آن در فواصل طولانی دارای چالش‌ها و مشکلاتی از جمله افت فشار، محدودیت‌های ساختاری فیتله و کاهش عملکرد مواجه هستند که هر کدام به اندازه‌ای عملکرد دستگاه را محدود می‌کنند. همچنین دمای سیال کاری یکی از کمیت^۶‌هایی است که نقش مهمی در عملکرد و کارکرد آن‌ها دارد و توسعه انواع آن در یک محدوده دمایی خاص و مشخص به دلیل کمبود سیالاتی که قادر به عملکرد در آن باشند، یکی از چالش‌های اصلی به شمار می‌رود. بر اساس مطالعه درباره دمای عملکرد لوله‌های حرارتی در یک کنفرانس بین‌المللی ارائه شده (پرافول و همکاران^۷، ۱۳۹۹) در مورد دمای سیال کاری لوله‌های حرارتی نشان داده شده است که برای یک ورودی

^۱ Evaporator

^۲ Adiabatic Section

^۳ Condenser

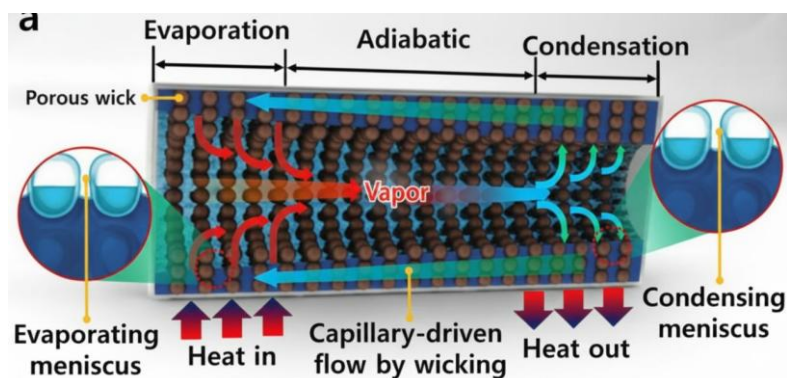
^۴ Schematic

^۵ William G. Anderson et al.

^۶ Quantity

^۷ Praful, S. et al.

حرارتی مشخص، دمای حداقلی وجود دارد که سیستم لوله حرارتی باید در آن کار کند. این پدیده به دلیل وابستگی دما به خواص ترموفیزیکی سیال کاری در لوله‌های حرارتی است. بنابراین، لوله‌های حرارتی در یک سیستم مدیریت حرارتی با توجه به دامنه‌های دمایی دقیق باید به صورت دقیقی طراحی شوند. در تحقیقات انجام شده (گروور و همکاران^۸، ۱۴۰۳) بر روی لوله‌های حرارتی با دماهای بسیار بالا (بیش از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) علاوه بر نیاز طراحی خاص، انتخاب سیال کاری مناسب مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن نشان می‌دهد لوله‌های حرارتی در بازه دمایی ۶۵۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، با سیالات کاری سدیم و لیتیم عملکرد مناسبی دارند و برای علت آن میتوان به دمای جوش بالا و رسانایی حرارتی مناسب هر دو در شرایط خلا اشاره کرد. کاربرد لوله‌های حرارتی در این محدوده دمایی، بیشتر در زمینه کاربردهای فضایی یا توربین‌های حرارتی است. در یک مطالعه تجربی و عددی (ژانگ و همکاران^۹، ۱۴۰۴)، عملکرد سه نوع ساختار فتیله‌ای^{۱۰} متخلخل^{۱۱} و شیاردار^{۱۲} و توری^{۱۳} که در شکل (۲) نیز نمایش داده شده‌اند در محدوده دمایی ۵۰ تا ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که در دماهای بالا (بالتر از ۵۰۰°C)، تنها ساختارهای فتیله‌ای از نوع متخلخل قادر بودند عملکرد حرارتی خود را حفظ کنند. این ساختارها مقاومت حرارتی^{۱۴} کمتری داشتند و پایداری حرارتی بسیار بالایی از خود نشان دادند. این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب نوع فتیله باید با توجه به دمای کاری سیستم انجام شود؛ ساختارهای متخلخل برای کاربردهای با دمای بالا (معمولاً بالاتر از ۵۰۰°C)، مانند انرژی خورشیدی، توربین‌ها یا فرآیندهای صنعتی بهترین گزینه محسوب می‌شوند به دلیل تخلخل پایدار و مقاومت ساختاری بالا مقاومت بیشتر در برابر تخریب حرارتی دارند و در مورد سیالات کاری سازگار در محدوده دمایی بالا میتوان به سدیم^{۱۵} (بازه دمایی حدود ۴۰۰-۱۰۰۰°C)، پتاسیم^{۱۶} (بازه دمایی حدود ۳۰۰-۹۰۰°C) و آلیاژ یوتکتیک سدیم-پتاسیم^{۱۷} (بازه دمایی حدود ۲۰۰-۸۰۰°C) اشاره کرد.



شکل ۲: ساختارهای متخلخل (شیمانسکی و همکاران^{۱۸}، ۱۴۰۱)

۲.۲ عملکرد و کاربرد لوله‌های حرارتی در دما متوسط

^۸ Grover, G. M. et al.

^۹ Zhang, Y. et al.

^{۱۰} Wick Structure

^{۱۱} Sintered

^{۱۲} Grooved

^{۱۳} Mesh

^{۱۴} Thermal Resistance

^{۱۵} Na

^{۱۶} K

^{۱۷} Na-K eutectic alloy

^{۱۸} P. Szymanski. et al.

محدوده دمایی دیگر که میتوان طبق تحقیقات و آزمایشات (ورنر و همکاران^{۱۹}، ۱۴۰۲) مورد بررسی قرار داد به عنوان "محدوده‌ی دمایی متوسط" شناخته می‌شود که به طور تقریبی بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد قرار دارد. در این گستره‌ی دمایی، انتخاب سیالات کاری قابل استفاده محدود است. سیالاتی نظیر جیوه با مشکلاتی از جمله ترشوندگی فزاینده، سازگاری با فلزات دیواره، سمیت، احتراق بخار، هزینه‌های توسعه‌ی بالا همراه است و چگالی بالایی دارد. در آزمایش‌های انجام شده گزارش شده است که جیوه نیازمند زمان پیش‌گرم کردن تا ۳۰ ساعت برای عملکرد موفق است. سایر فلزات مایع مانند پتاسیم و سزیم نتایج خوبی را از خود نشان داده اند به طوری که سزیم برای دمای کارکرد پایین تا ۳۲۷ درجه سانتیگراد مناسب است، اما به دلیل حساسیت بالا به رطوبت در جابجایی و مشکل سازگاری خطر انفجار را به دلیل تولید هیدروژن به همراه دارد. جابجایی آن‌ها اغلب نیازمند تجهیزات و آموزش‌های تخصصی است و تنها می‌توان آن را در جوهای خنثی انجام داد. خود این سیالات نیز گران‌قیمت هستند و نیازهای آن‌ها در جابجایی هزینه‌های تولید را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد و احتمال استفاده گسترده آن‌ها در بازار مدیریت حرارتی را کاهش می‌دهد اما با توسعه و پیشرفت بیشتر عمده‌تأ در بازار هسته‌ای استفاده می‌شود. سیالات دیگر مانند مخلوط فلز مایع سدیم/پتاسیم^{۲۰} نیز در محدوده دمایی متوسط مورد آزمایش قرار گرفت و به دلیل پدیده "جوشش جهشی" در دماهای زیر ۸۰۰ درجه سانتیگراد کارکرد نامناسبی دارد و در حال حاضر می‌توان لوله‌های حرارتی در این محدوده دمایی متوسط را در صنایع تولید برق، بازیابی حرارت اتلافی، نیروگاه خورشیدی، هسته ای و هوافضا پرکاربرد دانست.

۳.۲ عملکرد و کاربرد لوله‌های حرارتی در دما پایین

در تحقیقات لی و همکاران (۱۴۰۲^{۲۱}) لوله‌های حرارتی در بازه‌های دمایی پایین عمده‌تأ در صنایع سبک کاربرد دارند و سیالاتی مانند آب، اتانول، متانول و آمونیاک از گزینه‌های مناسب سیال کاری با فشار بخار مناسب هستند. طبق این تحقیقات بر عملکرد لوله‌های حرارتی با سیالات کاری آب و متانول در بازه‌ی دمایی ۵۰ تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد نتایج نشان می‌دهد که آب در بازه‌ی دمایی بالاتر از ۱۰۰°C عملکرد حرارتی بالاتری نسبت به متانول دارد، اما در دماهای پایین‌تر، متانول به دلیل فشار بخار بالاتر، نرخ تبخیر مؤثرتری دارد. همچنین، هر دو آن‌ها عملکرد پایداری مناسبی در سیکل‌های حرارتی تکرارشونده دارند که نشان‌دهنده‌ی قابلیت اطمینان بالا در کاربردهای طولانی مدت است. در بخش آزمایشات و نتایج (پرافول و همکاران، ۱۳۹۹^{۲۲})، دماهای اندازه‌گیری شده برای لوله‌های حرارتی مسی با سیال کاری متانول و اتانول که با مس سازگاری دارند، به حدود (۱۲۰-۱۱۰ °C) می‌رسد. این بازه‌ی دمایی برای بسیاری از کاربردها بالا محسوب می‌شود. از جمله این کاربردها می‌توان به خنک‌سازی قطعات الکترونیکی پُر قدرت مانند پردازنده‌ها^{۲۳}، سیستم‌های روشنایی LED و تجهیزات صنعتی اشاره کرد. استفاده از لوله‌های حرارتی در این زمینه‌ها نقش مؤثری در جلوگیری از خرابی سیستم و افزایش راندمان آن‌ها دارد. همانطور که تحقیقات همانطور که تحقیقات (پرافول و همکاران، ۱۳۹۹؛ گروور و همکاران^{۲۴}، ۱۴۰۳؛ لی و همکاران، ۱۴۰۲؛ ورنر و همکاران، ۱۴۰۲؛ ژانگ و همکاران^{۲۵}، ۱۴۰۴) نشان می‌دهند کارکرد و توسعه لوله‌های حرارتی در بازه‌های دمایی مختلف به کمیت‌های مهمی از جمله جنس، نوع ساختار، انواع فیتیل و سیالات کاری آن وابسته است.

۳. توسعه انواع لوله‌های حرارتی و بررسی عملکرد آن‌ها

توسعه لوله‌های حرارتی و پیشرفت در طراحی انواع مختلف آن به نحوی هر یکی از چالش‌ها پیش رو را برطرف کرد و عملکرد آن را ارتقا بخشید. براساس مطالعات جعفری و همکاران (۱۴۰۲)^{۲۶} لوله‌های حرارتی مرسوم^{۲۷} به‌عنوان ابزاری با هدایت حرارتی بسیار بالا، در مدیریت حرارتی سیستم‌های الکترونیکی و صنعتی به کار گرفته می‌شود. ساختار اصلی این لوله‌ها همانطور که پیش تر اشاره شد شامل یک پوشش مهر

^{۱۹} Werner, T. C. et al.

^{۲۰} Na/K

^{۲۱} Li, Y. et al.

^{۲۲} Praful, S. et al.

^{۲۳} CPU/GPU

^{۲۴} Grover, G. M. et al.

^{۲۵} Zhang, Y. et al.

^{۲۶} Jafari et al.

^{۲۷} Conventional heat pipe (CHP)

و موم شده، سیال کاری و ساختار فتيله است. عملکرد آن‌ها بر پایه چرخه تبخیر سیال در بخش جذب گرما و حرکت بخار به سمت قسمت دفع گرما و بازگشت مجدد مایع به اواپراتور از طریق نیروی موئینگی فتيله است. با وجود راندمان بالا، لوله‌های حرارتی مرسوم با دو محدودیت اساسی مواجه هستند، حد موئینگی^{۲۸} که حداکثر توان انتقال حرارت را محدود می‌کند و عملکرد در برابر نیروی جاذبه؛ هرچند فتيله می‌تواند مایع را خلاف جهت جاذبه بازگرداند، اما افزایش ارتفاع تبخیر کننده نسبت به چگالنده، به شدت توان انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. این محدودیت‌ها، نیاز به فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند لوله‌های حرارتی حلقوی (LHP)^{۲۹} و پمپ شده موئینگی (CPL) را که بر اساس بررسی وانگ و همکاران^{۳۰} (۱۳۹۹) و کلیوس^{۳۱} (۱۴۰۲) انجام پذیرفته است برای انتقال حجم بالای گرما در مسافت‌های طولانی و مستقل از جهت‌گیری طراحی شده‌اند، برجسته ساخت.

۱.۳ لوله‌های حرارتی حلقوی و پمپ شده موئینگی

طبق تحقیقات ریف و همکاران^{۳۲} می‌توان به لوله‌های حرارتی حلقوی^{۳۳} و حلقه‌های پمپ شده موئینگی^{۳۴} اشاره کرد. بر اساس این تحقیقات ساختار این لوله‌ها شامل اجزایی چون تبخیر کننده، چگالنده، خطوط انتقال و مخزن ذخیره سیال کاری است که در شکل (۳) نمایش داده شده است. مایع کاری را از سطح اصلی تبخیر کننده، تبخیر می‌کند و فشار بخار بالا در تبخیر کننده مایع را از طریق لوله‌های بخار به چگالنده هدایت می‌کند. سپس مایع به محفظه جبران^{۳۵} منتقل می‌شود، که به صورت هیدرولیکی تبخیر کننده متصل است و چرخه‌ی این مدار را کامل می‌کند (ACT^{۳۶}، ۱۴۰۲). با این حال، لوله‌های حرارتی حلقوی در تنظیم دمای سیستم با دشواری‌هایی مواجه بوده و حلقه‌های پمپ شده موئینگی نیز در راه‌اندازی و تحمل فشار در ناحیه پمپ محدودیت دارد. به منظور رفع محدودیت‌های ذکر شده لوله حرارتی حلقوی پیشرفته^{۳۷} توسط هوانگ^{۳۸} (۱۳۸۳) اختراع و ثبت شده‌اند. لوله حرارتی حلقوی پیشرفته عملکرد بهتری نسبت به لوله‌های حرارتی حلقوی متعارف دارند و می‌توانند حرارت هدر رفته در مسیر طولانی را در خود حمل کرده و به سینک حرارتی منتقل کنند که به صورت دو فازی است و سیال کاری را از طریق موئینگی^{۳۹} به چگالنده منتقل می‌کند که در شکل (۴) قابل مشاهده است (سیریشا و همکاران^{۴۰}، ۱۴۰۱)، لوله‌های حرارتی حلقوی پیشرفته در شرایطی که لوله‌های حرارتی حلقوی و حلقه‌های پمپ شده موئینگی دچار محدودیت و چالش بودند نیز کار می‌کند و ترکیبی از عملکردهای بهینه هر یک را ارائه می‌دهد. یک پمپ کمکی در لوله حرارتی حلقوی پیشرفته تجمع بخار در مخزن لوله‌ها را کاهش داده و مانع از توقف کار در آن می‌شود. همچنین تمرکز بر کوچک‌سازی قطر لوله‌ها و بهینه‌سازی تبخیر کننده، بهبود عملکرد حرارتی را به همراه داشته است.

^{۲۸} Capillary Limit

^{۲۹} Loop Heat Pipes (LHP)

^{۳۰} Wang, Y. et al.

^{۳۱} Callyos

^{۳۲} Riffat, S. et al.

^{۳۳} Loop Heat Pipe (LHP)

^{۳۴} Capillary Pumped Loop (CPL)

^{۳۵} Compensation Chamber

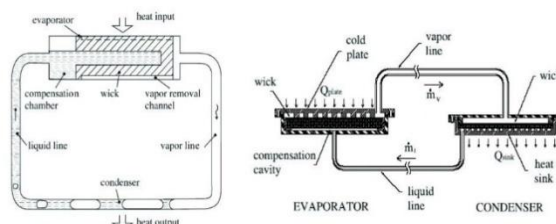
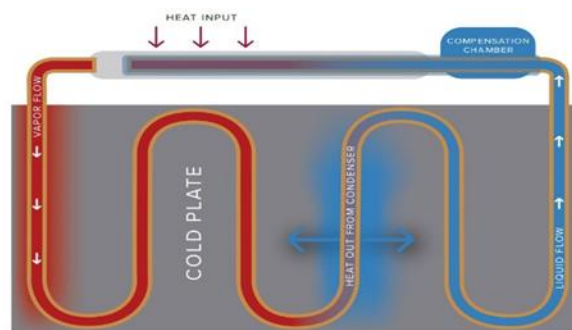
^{۳۶} Advanced Cooling Technologies

^{۳۷} Advanced Loop Heat Pipe (ALHP)

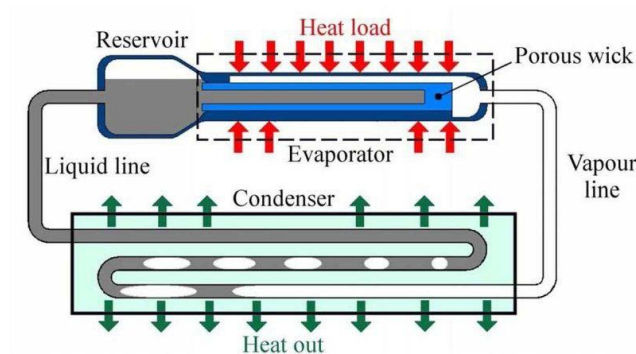
^{۳۸} Hoang, T. T.

^{۳۹} Capillary Action

^{۴۰} Sireesha, V. et al.



شکل ۳: ساختار و عملکرد اساسی یک لوله های حرارتی حلقوی (LHP) (موت^{۴۱}، ۱۳۹۳)



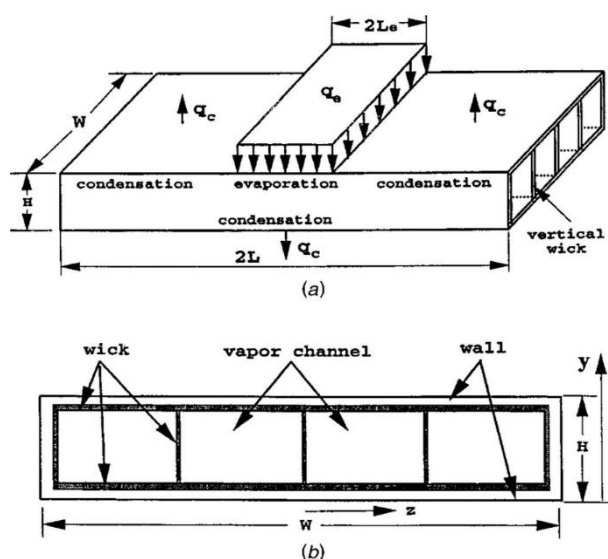
شکل ۴: نمایش لوله حرارتی حلقوی پیشرفته (ALHP) (مایدانیک^{۴۲}، ۱۳۸۳)

لوله های حرارتی حلقوی^{۴۳} نسبت به لوله های حرارتی متعارف تفاوت های کلیدی دارند که عملکرد آن ها را بهبود می بخشد. در لوله های معمولی، حرکت سیال عامل به صورت موئینگی و از طریق ساختار فتیله ای صورت می گیرد، اما در لوله های حرارتی حلقوی مسیرهای جداگانه ای برای فرآیند تبخیر^{۴۴} و تقطیر^{۴۵} تعریف شده است. این جدایی مسیرها و عملکرد کنترل پیشرفته فشار و دما، امکان انتقال حرارت بالاتر و کنترل دقیق تر سیال را فراهم می کند.

^{۴۱} Mottet, L.
^{۴۲} Y. F. Maydanik
^{۴۳} LHP
^{۴۴} Evaporation
^{۴۵} Condensation

۲.۳ بررسی لوله‌های حرارتی تخت و میکرو

طبق تحقیقات ریفت و همکاران، لوله‌های حرارتی تخت^{۴۶} به دلیل طراحی مسطح و ضخامت کم، نصب آسان و تماس بهتر با سطوح صاف، در خنک‌سازی تجهیزات الکترونیکی با فضای محدود مانند رایانه‌ها و تلفن‌های همراه کاربرد گسترده‌ای دارند. این لوله‌ها از فلزات مختلف و ورق‌های نازک ساخته می‌شوند و انتقال حرارت مؤثر و عملکرد حرارتی بالایی ارائه می‌دهند. چالش اصلی آن‌ها بهینه‌سازی ساختار فتیل‌های است، که برای افزایش کارایی و کاهش مقاومت حرارتی مورد توجه قرار می‌گیرد. لوله‌های حرارتی میکرو^{۴۷} با ساختار موئینگی پیشرفته و تیغه‌های مسی تاشو^{۴۸} توسعه یافته‌اند تا در ابعاد کوچک، ظرفیت دفع حرارت بالا و عملکرد بهینه ارائه دهند. این لوله‌ها با تنوع در طراحی، جنس و سیالات کاری، گزینه‌های پیشرفته‌ای برای سیستم‌های الکتریکی و خنک‌سازی دقیق محسوب می‌شوند و در کاربردهای با محدودیت فضا و نیاز به کارایی حرارتی بالا، عملکرد مناسبی دارند.



شکل ۵: ساختار داخلی و مقطع عرضی یک لوله حرارتی تخت شامل سه بخش اصلی تبخیر، تقطیر و ساختار فتیل‌های برای انتقال مایع می‌باشد (تامپسون و همکاران^{۴۹}، ۱۳۹۴).

لوله‌های حرارتی نوسانی صفحه تخت^{۵۰} به عنوان یک فناوری نوین در مدیریت حرارتی سیستم‌های الکترونیکی با توان بالا مطرح هستند. این نوع لوله‌ها شامل کانال‌های مارپیچی میکرو هستند که با یک صفحه فلزی دیگر مهر و موم شده‌اند که در شکل (۶) دیده می‌شود که در این عملکرد، تبخیر کننده در بخش پایینی و چگالنده در بخش بالایی قرار گرفته‌اند و انتقال حرارت از طریق حرکت نوسانی و ناپایدار سیال کاری (مایع و بخار) بین این دو بخش صورت می‌گیرد. عملکرد آن‌ها بر اساس جریان‌های نوسانی دو فازی است که انتقال حرارت را به صورت مؤثری انجام می‌دهند و کمیت‌هایی مانند شکل مقطع کانال (مربعی یا مستطیلی)، زاویه نصب و جنس ماده تأثیر قابل توجهی بر عملکرد دارند. مطالعات نشان داده‌اند که کانال‌های مربعی به دلیل پدیده پمپینگ موئینگی، عملکرد حرارتی بهتری نسبت به انواع دایره‌ای دارند (مَهتانی و همکاران^{۵۱}،

^{۴۶} Flat Heat Pipe (FHP)

^{۴۷} Micro Heat Pipe (MHP)

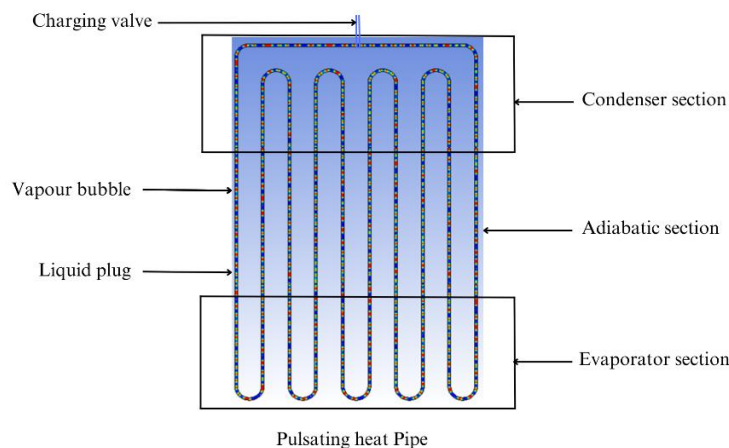
^{۴۸} Folded Copper Fins

^{۴۹} Thompson, S. M. and Ma, H

^{۵۰} Flat Plate Pulsating Heat Pipe (FPPHP)

^{۵۱} Mahtani, M. L. et al.

(۱۳۹۹). لوله‌های حرارتی نوسانی/پالسی^{۵۲} یک فناوری انتقال حرارت دوفازی نوین و امیدوارکننده هستند که برای انتقال شار حرارتی^{۵۳} بالا در محدوده‌های دمایی گسترده و با ابعاد کوچک‌تر توسعه یافته‌اند. برخلاف لوله‌های حرارتی مرسوم که به ساختار فویل متکی هستند، مکانیزم PHP اساساً بر پایه نوسان خودبه‌خودی^{۵۴} توده‌های مایع و حباب‌های بخار در یک مدار مویینگی بسته یا باز است. این نوسان که توسط اختلاف فشار در بخش‌های تبخیر کننده و چگالنده ایجاد می‌شود، انتقال حرارت بسیار مؤثری را از طریق پدیده همرفت^{۵۵} پدید آمده و تبخیر و میعان نهان فراهم می‌سازد. به دلیل سادگی ساختار و توانایی مدیریت بارهای حرارتی بالا، PHPها به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، فضایی و میکروالکترونیک تبدیل شده‌اند. با این حال، مهم‌ترین چالش‌های آنها شامل تأخیر در شروع به کار^{۵۶}، وابستگی به زاویه قرارگیری (به ویژه در لوله‌های باز) و تأثیرپذیری عملکرد از میزان دقیق شارژ سیال کاری است. (کملش پارمر^{۵۷} و همکاران، ۱۴۰۲)



شکل ۶: نمایی از عملکرد یک لوله حرارتی پالس‌زن صفحه‌ای (FPPHP) (مکوانا و همکاران^{۵۸}، ۱۴۰۲)

چن و همکاران^{۵۹} (۱۳۹۷)، در مرور خود بر لوله‌های حرارتی تخت میکرو برای خنک‌سازی الکترونیک، به لوله‌های حرارتی ریز صفحه تخت^{۶۰} (MFHPs) اشاره کرده‌اند. در این مدل از ساختارهای فویل‌های پیشرفته مانند شیارها و نانولوله‌ها استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این لوله‌ها با طراحی مناسب، توانایی بالایی در مدیریت حرارتی تجهیزات کوچک با توان بالا دارند و میتوانند برای کاربردهای مختلف در میکروالکترونیک از جمله خنک‌سازی مناسب باشند. در لوله‌های حرارتی LHP و CPL و لوله‌های حرارتی متعارف و میکرو سیال‌های کاری جدیدی ارائه شده است که با شیب مثبت کشش سطحی، دما عملکرد آنها را بهبود بخشیده و از بین لوله‌های حرارتی مخصوص توسعه یافته میتوان به لوله‌های حرارتی پالس زن قوی و تبریدی و چرخان اشاره کرد (ریفث و همکاران^{۶۱}).

۳.۳ لوله‌های حرارتی استوانه‌ای و نوآوری در ساختار

^{۵۲} Pulsating Heat Pipes (PHP)

^{۵۳} Heat Flux

^{۵۴} Self-Sustained Oscillation

^{۵۵} Convection

^{۵۶} Start-up

^{۵۷} Kamlesh Parmar

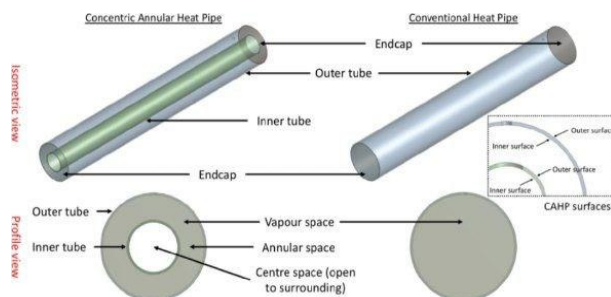
^{۵۸} Keyur Makwana et al.

^{۵۹} Chen, Y. et al.

^{۶۰} Micro Flat Heat Pipe (MFHP)

^{۶۱} Riffat, S.

لوله‌های حرارتی حلقوی هم‌مرکز^{۶۲} (CAHP) شامل دو لوله هم‌محور هستند که با ایجاد فضای حلقوی بین آن‌ها، سطح تبادل حرارت را بدون افزایش قطر خارجی افزایش می‌دهند. این طراحی امکان انتقال حرارت بیشتر در فضاهای محدود و کاهش احتمال خشک‌شدن^{۶۳} در شار حرارتی بالا را فراهم می‌کند. CAHP برای خنک‌سازی تجهیزات الکترونیکی، مبدل‌های حرارتی و محیط‌هایی با جاذبه کم کاربرد دارد.



شکل ۷: مقایسه‌ای بین عملکرد لوله حرارتی متعارف و لوله حرارتی حلقوی هم‌مرکز که طراحی دایره‌ای آن باعث بهبود توزیع شار حرارتی و بازده انتقال حرارت می‌شود (چُهوکر و همکاران^{۶۴}، ۱۴۰۳)

جدول ۱: مقایسه معیارهای فنی کلیدی انواع لوله‌های حرارتی پیشرفته. (مکوانا و همکاران، ۱۴۰۲- وانگ و همکاران، ۱۳۹۹- اندرسون و همکاران، ۱۳۹۸ - کم‌لش پارمر و همکاران، ۱۴۰۲) و تحلیل توسط نویسندگان

انواع لوله	لوله حرارتی مرسوم (CHP)	لوله حرارتی حلقوی (LHP)	لوله حرارتی نوسانی/پالسی (PHP)	لوله حرارتی تخت میکرو (MHP)
سال توسعه (حدودی)	۱۹۴۲ (اصول اساسی)	طراحی اولیه (CPL ۱۹۷۰)	۱۹۹۰	۲۰۰۰ به بعد
توان انتقال حداکثر (Q max)	کم (تا ۵۰۰ وات)	متوسط تا زیاد (تا ۱۰۰۰ وات)	متوسط تا زیاد (تا ۴۰۰ وات)	کم تا متوسط (تا ۱۵۰ وات)
شار حرارتی (Heat Flux)	متوسط (تا ۱۰ W/cm ²)	متوسط تا بالا (تا ۱۵۰ W/cm ²)	بالا (تا ۴۰۰ W/cm ²)	بالا (تا ۳۰۰ W/cm ²)
راندمان حرارتی (R _{th})	۰,۵ تا ۲ [K/W]	۰,۱ تا ۱ [K/W]	۰,۲ تا ۱,۵ [K/W]	۰,۵ تا ۰,۵ [K/W]
قابلیت ضد جاذبه (Anti-Gravity)	ضعیف یا وابسته به نوع فتیله	عالی (مستقل از جاذبه)	ضعیف تا متوسط (وابسته به شارژ)	متوسط
پیچیدگی ساختار	ساده	پیچیده (نیاز به فتیله متخلخل)	ساده (فقدان فتیله مکانیکی)	متوسط (نیاز به ریزکانال)
هزینه تولید	پایین	بالا	متوسط	متوسط تا بالا
مزیت کلیدی	سادگی، قیمت پایین	توان بالا، عملکرد جهت‌ناپذیر	ساختار ساده، تحمل شار بالا	فوق نازک بودن، مناسب میکروالکترونیک
چالش کلیدی	حد مویینگی، وابستگی به جهت	شروع به کار اولیه، هزینه	شروع به کار، وابستگی به شارژ	طراحی و ساخت ریزکانال‌ها

^{۶۲} Concentric Annular Heat Pipe (CAHP)

^{۶۳} Dry-out

^{۶۴} Chhokar, A. et al.

۴. کاربرد لوله های حرارتی

بر اساس تحقیقات ریفت و همکارانش لوله های حرارتی در بسیاری از سیستم ها و صنایع از جمله انرژی خورشیدی، تهویه مطبوع، بازیابی گرما، تجهیزات الکترونیکی، ذخیره سازی انرژی، صنایع فضایی و هسته ای کاربرد گسترده دارند. در سیستم های خورشیدی، لوله های حرارتی انتقال حرارت مستقیم از تبخیرکننده به مخزن را امکان پذیر می کنند و در جمع کننده های صفحه ای صاف و مبدل های حرارتی چگالنده به کار می روند. یوان و همکاران^{۶۵} (۱۴۰۲)، کاربرد لوله های حرارتی برای افزایش عملکرد سیستم های تهویه مطبوع در ساختمان ها را بررسی کرده اند. در سیستم های تهویه مطبوع^{۶۶} (HVAC/ACS)، لوله های حرارتی به عنوان مبدل حرارتی و بازیاب گرما از جریان هوای خروجی استفاده می شوند و سه نوع کاربرد اصلی دارند: بازیابی گرمایی در دستگاه تهویه، پیش گرم کردن هوای فرآیندی و استفاده مجدد حرارت در فرآیندها. سیستم های ترکیبی شامل لوله های حرارتی و بازیاب های تبخیری غیرمستقیم می توانند ضریب عملکرد را افزایش دهند. لوله های حرارتی با انتقال حرارت غیر فعال^{۶۷} و هدایت حرارتی بالا، مصرف انرژی سیستم های تهویه مطبوع را کاهش داده و عملکرد آن ها را بهبود می بخشد. نصب این لوله ها در واحدهای داخلی یا خارجی ساختمان ها می تواند صرفه جویی انرژی ۳ تا ۲۰ درصدی ایجاد کند و حتی بازیابی حرارت را فراهم آورد. کارایی آن ها به ساختار، سیال کاری و شرایط محیطی وابسته است و نقش مهمی در بهبود بازده انرژی ساختمان ها دارد.

۵. وضعیت بازیابی و کاربرد لوله های حرارتی

تمرکز جهانی بر کاهش رد پای کربن در محیط زیست و افزایش بهره وری انرژی، تقاضا برای لوله های حرارتی در سیستم های انرژی تجدید پذیر را افزایش می دهد. لوله های حرارتی در مبدل های حرارتی در کاربرد انرژی تجدید پذیر استفاده می شوند و باعث پایداری انرژی در سیستم می شوند و با گسترش بازار سیستم های تهویه مطبوع (HVAC)، فرصت های قابل توجهی برای لوله های حرارتی فراهم می شود در بررسی تحقیقات و بازارها^{۶۸} (۱۴۰۳)، در سراسر جهان کشورها با ایجاد قوانین و سیاست های سختگیرانه تلاش برای محقق سازی اهداف در زمینه انرژی های تجدید پذیر دارند و این سبب افزایش نیاز و تقاضا برای لوله های حرارتی می شود. افزایش تقاضا کالاهای الکترونیکی و هوشمند و راه حل مدیریت حرارتی کارآمد، تغییر به سمت انرژی های تجدید پذیر و تقاضا برای سیستم های تبادل حرارت، پیشرفت در سیستم های هوانوردی، گسترش سیستم های تهویه مطبوع (HVAC) از جمله عواملی هستند که در بازار باعث افزایش نیاز به لوله های حرارتی و پیشرفت آن می گردد. بازار جهانی لوله های حرارتی با سرعت قابل توجهی در حال گسترش است. در این میان، بخش الکترونیک بزرگترین سهم را به خود اختصاص داده است. لوله های حرارتی در قطعاتی نظیر کارت های گرافیکی و پردازنده ها در دستگاه هایی مانند تلفن های همراه، لپ تاپ ها، و سرورها نقشی حیاتی ایفا می کنند. کاربرد اصلی آنها در این حوزه، دفع حرارت بالا و پیشگیری از بروز مشکلات ناشی از افزایش دما در قطعات الکترونیکی است. در مروری که توسط پیکسل راکت^{۶۹} (۱۴۰۴/۱۴۰۳) منتشر شده، به روندهای بازار لوله های حرارتی حلقوی اشاره شده است. زمینه رشد لوله های حرارتی حلقوی (LHP) در آینده پیشرفت چشمگیری خواهد داشت علت آن را میتوان به کاربرد بسیار بالا آن در صنایع زیر اشاره نمود:

مدیریت حرارتی، استفاده روز افزون از دستگاه الکترونیکی و کوچک سازی و جلوگیری از اتلاف گرما در میکرو الکترونیک ها، صنعت هوا و فضا و دفاعی، به دلیل گسترش زیاد ماهواره ها و ساخت وسایل نقلیه فضایی، وسایل و ماشین های الکتریکی، به دلیل نیاز خودرو های برقی برای کنترل دما باتری به روش حرارتی و سبک وزن (LHP) کارآمد خواهد بود. لوله های حرارتی حلقوی (LHP) در صنایع جهانی از اهمیت و جایگاه ویژه ای برخوردارند. از جمله مزایای آن ها می توان به ساخت خنک کننده های سازگار با محیط زیست، کاهش هزینه های نگهداری و عملیات مکانیکی، و اطمینان پذیری بالا اشاره کرد. این لوله ها به دلیل کاربرد گسترده و کارایی بالا در انتقال حرارت غیر فعال در شرایط گرانس و

^{۶۵} Yuan, T. et al.

^{۶۶} Heating, Ventilation, and Air Conditioning

^{۶۷} Passive Heat Transfer

^{۶۸} Research and Markets

^{۶۹} Pixel Rocket Analysis

قابلیت طول عمر بالا، یکی از گزینه‌های اصلی در طراحی سیستم‌های حرارتی مدرن شناخته می‌شوند. پیشرفت‌های امروز، به عنوان ربات و دوقلو دیجیتال، کاربرد و استفاده از متریال پیشرفته، تولید اتوماسیون، مسیر آینده بازار و صنعت لوله‌های حرارتی حلقوی را پر رنگ و مشخص خواهند کرد. در حوزه سیستم‌های تهویه مطبوع (HVAC) و بازیافت حرارتی نیز، لوله‌های حرارتی به دلیل قابلیت‌های پیشرفته خود، نقش مهمی در افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف سوخت ایفا می‌کنند. قابلیت جایگزینی سوخت‌های سنتی با سوخت‌های سازگار با محیط زیست، سیستم‌های مبتنی بر لوله‌های حرارتی را به یکی از پرفروش‌ترین محصولات در این بازار تبدیل کرده است.

۶. تحلیل کمی بازار و چشم‌انداز اقتصادی لوله‌های حرارتی

بازار جهانی لوله‌های حرارتی در سال‌های اخیر به دلیل افزایش نیاز به مدیریت حرارتی کارآمد در صنایع الکترونیک، تهویه مطبوع (HVAC)، هوافضا و انرژی‌های تجدیدپذیر، رشد پایداری را تجربه کرده است. بر اساس گزارش استراتژیک صنعت لوله‌های حرارتی جهانی^{۷۰} (۱۴۰۲)، ارزش بازار جهانی لوله‌های حرارتی در سال ۲۰۲۳ حدود ۳٫۳ میلیارد دلار آمریکا بوده و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۴٫۴ میلیارد دلار برسد که بیانگر نرخ رشد مرکب سالانه (CAGR) حدود ۴٫۳٪ است. (تحقیقات و بازارها (۱۴۰۳) گزارش‌های تحلیلی دیگر نیز این بازه را تأیید کرده و مقدار بازار را در سال ۲۰۲۴ حدود ۳٫۳ تا ۳٫۵ میلیارد دلار و مقدار پیش‌بینی‌شده برای سال ۲۰۳۰ را حدود ۴٫۵ میلیارد دلار برآورد می‌کنند که CAGR تقریبی ۵٫۲٪ را نشان می‌دهد. این رشد عمدتاً ناشی از توسعه سیستم‌های HVAC، افزایش چگالی توان در تجهیزات الکترونیکی و گسترش مراکز داده است، GlobeNewswire (۲۰۲۴).

در میان انواع مختلف، لوله‌های حرارتی حلقوی (LHP) رشد سریع‌تری نسبت به لوله‌های حرارتی مرسوم دارند. بر اساس تحلیل بازار منتشرشده در سال ۲۰۲۵، ارزش بازار جهانی LHP در سال ۲۰۲۴ حدود ۵۲۰ میلیون دلار برآورد شده و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۳ به بیش از ۱٫۲ میلیارد دلار برسد که معادل CAGR حدود ۹٪ است. این رشد بالا به کاربردهای پیشرفته در صنایع هوافضا، ماهواره‌ها، الکترونیک توان بالا و خودروهای الکتریکی نسبت داده می‌شود. پیکسل راکت (۱۴۰۴/۱۴۰۳).

از منظر هزینه سرمایه‌گذاری، اگرچه مقالات علمی به‌طور مستقیم به هزینه‌های توسعه اشاره نمی‌کنند، اما برآوردهای صنعتی نشان می‌دهد راه‌اندازی یک خط تولید نیمه‌صنعتی لوله‌های حرارتی شامل تجهیزات آب‌بندی وکیوم، ساخت فتیله و آزمون‌های حرارتی، نیازمند سرمایه‌ای در حدود ۱ تا ۲٫۵ میلیون دلار آمریکا است. با توجه به عمر کاری بالا، ماهیت غیرفعال و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، این سرمایه‌گذاری در کاربردهای صنعتی و انرژی‌محور از توجیه اقتصادی مناسبی برخوردار است.

جدول ۲: شاخص‌های کلیدی بازار جهانی لوله‌های حرارتی

منبع	مقدار	شاخص
Research and Markets	۳٫۳ میلیارد دلار	اندازه بازار جهانی (۲۰۲۳)
GlobeNewswire	۴٫۴-۴٫۵ میلیارد دلار	پیش‌بینی بازار (۲۰۳۰)
Research and Markets	۴٫۳-۵٫۲٪	CAGR بازار جهانی
Pixel Rocket Analysis	≈ ۵۲۰ میلیون دلار	اندازه بازار LHP (۲۰۲۴)
Pixel Rocket Analysis	≈ ۹٪	CAGR بازار LHP
برآورد صنعتی	۱-۲٫۵ میلیون دلار	CapEx خط تولید

^{۷۰} Global Heat Pipes Strategic Industry Report

۷. نتیجه‌گیری

مرور تحقیقات و پیشرفت‌های اخیر نشان می‌دهد که لوله‌های حرارتی از یک فناوری ساده به سامانه‌ای پیچیده و چندمنظوره ارتقا یافته‌اند. توسعه انواع مختلف از جمله لوله‌های تخت، حلقوی پیشرفته و ساختارهای میکرو، امکان استفاده گسترده‌تر در صنایع حساس را فراهم ساخته است. این نوآوری‌ها موجب بهبود راندمان حرارتی، کاهش افت فشار و گسترش کاربرد در شرایط کاری ویژه شده‌اند. با وجود این، چالش‌هایی همچون محدودیت در انتخاب سیالات پایدار و بهینه‌سازی ساختار فتیل‌ه همچنان باقی است. افزون بر پیشرفت‌های فنی، تحلیل‌های کمی نشان می‌دهد که بازار جهانی لوله‌های حرارتی رشد پایداری با نرخ رشد مرکب سالانه ^۱۵٫۲٪ در حدود ۲۰۳۰ تا سال ۲۰۳۰ تجربه خواهد کرد. در این میان، لوله‌های حرارتی حلقوی (LHP) با نرخ رشد تخمینی ۹٪، به دلیل کارایی بالا در صنایع هوافضا و الکترونیک توان بالا، بالاترین توجیه اقتصادی و چشم‌انداز آینده را دارند. این رشد و توجیه سرمایه‌گذاری^۲، موقعیت این فناوری را به‌عنوان یک راه‌حل انرژی‌محور پایدار، تثبیت می‌کند. آینده این فناوری بر توسعه سیالات کاری سازگار با محیط زیست، افزایش دوام در شرایط سخت و طراحی‌های نوین متمرکز خواهد بود. با توجه به نیاز روزافزون به مدیریت حرارتی پیشرفته، انتظار می‌رود لوله‌های حرارتی نقش پررنگ‌تری در صنایع الکترونیک، هوافضا و انرژی‌های پاک ایفا کرده و مسیر تحقیقات آینده را شکل دهند.

منابع

- [۱] Anderson, W. G., and C. Tarau. (۲۰۱۹) "Advanced Cooling Technologies, Inc." *Thermal & Fluids Analysis Workshop (TFAWS ۲۰۱۹), NASA Langley Research Center, Hampton, VA*.
- [۲] Chen, Y. and Fan, C. C. (۲۰۱۸) "Micro Flat Heat Pipes for Microelectronics Cooling: Review" ، *Journal of Heat Transfer*، ۱۴۰(۱۲)، ۱۲۰۸۰۱.
- [۳] Chhokar, A., Ashouri, H., and Bahrami, M. (۲۰۲۴) "Modeling the thermal and hydrodynamic performance of grooved wick flat heat pipe" ، *Applied Thermal Engineering*.
- [۴] Calyos, Inc. (۲۰۲۴) "Ultimate Guide to Loop Heat Pipes: How They Work and Applications." [Online]. Available: https://www.calyos-tm.com/technologies/loop-heat-pipes. [Accessed: Dec. ۱۲، ۲۰۲۵].
- [۵] GlobeNewswire. (۲۰۲۴) "Global Heat Pipes Strategic Industry Report ۲۰۲۴-۲۰۳۰." [Online]. Available: [Insert URL/GlobeNewswire Source]. [Accessed: Dec. ۱۲، ۲۰۲۵].

^۱ CAGR

^۲ CapEx

- [۶] Grover, G. M. et al. (۲۰۲۴) , "Development and testing of high-temperature heat pipes for space nuclear power applications" , *Energy Conversion and Management*.
- [۷] Hoang, T. T. (۲۰۰۴) , "Loop heat pipe method and apparatus" , *United States Patent* No. ۶۸۱۰۹۴۶, November ۲, ۲۰۰۴.
- [۸] Jafari, M. A., and M. S. E. D. M. M. (۲۰۲۳) . "Heat pipes and pulsating heat pipes: fundamentals, recent advances, and applications in thermal management" . *International Journal of Thermal Sciences* , ۱۸۶, ۱۰۸۱۵۱. [https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.ijthermalsci.۲۰۲۳.۱۰۸۱۵۱] (<https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.ijthermalsci.۲۰۲۳.۱۰۸۱۵۱>).
- [۹] Li, Y. et al. (۲۰۲۳) . "Thermal performance and reliability of heat pipes using water and methanol for electronics cooling" . *Applied Thermal Engineering*.
- [۱۰] LinkedIn – Pixel Rocket Analysis. (۲۰۲۵) . "Loop Heat Pipes Market Overview ۲۰۲۵." [Online]. Available: [Insert URL/LinkedIn Source]. [Accessed: Dec. ۱۲, ۲۰۲۵]
- [۱۱] Mahtani, M. L. et al. (۲۰۲۰) . "Flat Plate Pulsating Heat Pipes: A Review on the Thermohydraulic Characteristics".
- [۱۲] Makwana, K., Parmar, K., Parwani, A. K., and S. Tripathi. (۲۰۲۳) . "Parametric current trends on pulsating heat pipes – A review."
- [۱۳] <https://www.researchgate.net/publication/۳۷۶۴۳۴۲۲۶> (<https://www.researchgate.net/publication/۳۷۶۴۳۴۲۲۶>).
- [۱۴] Mottet, L. (۲۰۱۴) . "Loop Heat Pipes (LHP) – Operating Principles and Applications" . *ResearchGate*. [Online]. [Accessed: Aug. ۷, ۲۰۲۵].
- [۱۵] Parmar, K., and S. Yadav. (۲۰۲۳) . "Pulsating Heat Pipes: A New Trend in Heat Transfer Technology" .in *Recent Advances in Mechanical Infrastructure* , A. K. Parwani et al. (Eds.), Springer, pp. ۱۸۷-۱۹۵. [https://doi.org/۱۰.۱۰۷/۹۷۸-۹۸۱-۱۶-۷۶۶۰-۴_۱۷] (https://doi.org/۱۰.۱۰۷/۹۷۸-۹۸۱-۱۶-۷۶۶۰-۴_۱۷).

[۱۶] Pixel Rocket Analysis. (۲۰۲۵). "Loop Heat Pipes Market Overview ۲۰۲۵: Trends and Growth Areas." [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/company/pixel-rocket-analysis> [Accessed: May ۲۳, ۲۰۲۵].

[۱۷] Praful, S. et al. (۲۰۲۰). "On the operating temperature of heat pipes" ,*J. Phys.: Conf. Ser.* ۱۴۷۳, ۰۱۲۰۲۵.

[۱۸] QATS. (۲۰۲۵). "Understanding Loop Heat Pipes." [Online]. Available: [Insert actual link]. [Accessed: Aug. ۷, ۲۰۲۵].

[۱۹] Research and Markets. (۲۰۲۴). "Global Heat Pipes Strategic Industry Report ۲۰۲۴-۲۰۳۰: Expansion of HVAC Systems Market Expands Addressable Market Opportunities." [Online].

[۲۰] Riffat, S. and Ma, X. (۲۰۰۷). "Recent developments in heat pipe technology and applications: a review" ,*International Journal of Low-Carbon Technologies*, ۲(۲), ۱۶۲-۱۷۷.

[۲۱] Sireesha, V., Kishore, P. S., and Dharma Rao, V. (۲۰۲۲). "Chapter ۸ – Advanced wick materials and structures for loop heat pipes" ,in *Advances in Heat Pipe Technology*, V. Sireesha (Ed.), Elsevier, pp. ۲۰۰-۲۴۰. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90498-8,000-5>.

[۲۲] S. Thomas et al. (۲۰۲۵). "General configuration of concentric annular heat pipe compared to conventional heat pipe." [Online]. Available: [Insert URL]. [Accessed: Aug. ۷, ۲۰۲۵].

[۲۳] Szymanski, P., Mikielwicz, D., and S. Fooladpanjeh. (۲۰۲۲). "Current Trends in Wick Structure Construction in Loop Heat Pipes Applications: A Review" ,*Materials*, vol. ۱۵, no. ۱۶, Art. no. ۵۷۶۵. <https://doi.org/10.3390/ma15160765>.

[۲۴] Thompson, S. M. and Ma, H. (۲۰۱۵). "Flat-plate oscillating heat pipe (FP-OHP): (a) schematic; (b) photos" ,*Recent Advances in Two-Phase Thermal Ground Planes*.

[۲۵] Wang, Y., and Wang, H. (۲۰۲۰) , "Recent developments and applications of loop heat pipes: a review" , *International Journal of Heat and Mass Transfer*, ۱۵۴, ۱۱۹۷۴۷.

[<https://doi.org/10.1016/j.ijhmt.2020.119747>].

[۲۶] Werner, T. C. et al. (۲۰۲۳) , "Medium Temperature Heat Pipes – Applications, Challenges and Future direction" , *Applied Thermal Engineering*, ۱۲۱۳۷۱. DOI:

10.1016/j.applthermaleng.2023.121371.

[۲۷] Y. F. Maydanik, "Loop heat pipes," Applied Thermal Engineering, vol. ۲۵, no. ۵-۶, pp. ۶۳۵-۶۵۷, Apr. ۲۰۰۵, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2004.07.010.

[۲۸] Yuan, T. et al. (۲۰۲۳) , "The Review of the Application of the Heat Pipe on Enhancing Performance of the Air-Conditioning System in Buildings" , *Processes*, ۱۱, ۳۰۸۱.

<https://doi.org/10.3390/pr11113081>.

[۲۹] Zhang, Y., Kumar, R., and Lee, C. (۲۰۲۵) , "Thermal behavior of advanced wick structures in heat pipes under varying temperature ranges" , *Thermal Science and Engineering Progress*, ۱۰۱۲۸۴.

<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.101284>.