دریافت: ۱۵ آذر ۹۴ پذیرش: ۲۹ بهمن ۹۴

مروری مختصر بر تکنولوژی ترموالکتریک، مواد ترموالکتریک و کاربرد آن در زمینه سرمایش

مرضیه سیاه مرگویی[۱]، نادر رهبر[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران
۲- استادیار، مرکز تحقیقات راهبردی انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران
*سمنان،صندوق پستی:۳۵۱۹۶۹۷۹۵۱، پستالکترونیکی:rahbar@semnaniau.ac.ir

چکیده

ترموالکتریک‌ها دستگاه‌های حرارتی حالت‌جامد هستند. آن‌ها نیمه‌هادی‌هایی هستند که با استفاده از اثر سیبک تولید جریان الکتریکی و براساس اثر پلتیر به عنوان نیمه‌هادی خنک-کننده استفاده می‌شوند. ترموالکتریک دارای قابلیت‌های جالبی در مقایسه با دستگاه‌های برقی و خنک‌کننده‌های معمولی است. عدم وجود قطعات در حال حرکت منجر به افزایش قابلیت اطمینان، کاهش درتعمیر و نگهداری و افزایش عمرسیستم می‌شود. عدم وجود سیال باعث کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی شده و همچنین بی‌صدا بودن آن مزیت بسیار مهمی است. با توسعه سریع فنّاوری درزمینه ساخت مواد نیمه‌هادی، امروزه ترموالکتریک‌ها توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. در این مقاله مروری مختصر بر فنّاوری ترموالکتریک، مواد ترموالکتریک و کاربرد آن درزمینه سرمایش صورت گرفته است.

کلیدواژگان

ترموالکتریک، مواد ترموالکتریک، تک طبقه، دوطبقه.

A brief review of thermoelectric technology, materials and its application in cooling systems

M.siahmargoi[1], N.rahbar[2*]

1- Department of mechanical engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.
2- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
*P.O.B. 3519697951 Semnan, Iran, rahbar@semnaniau.ac.ir

Abstract

Thermoelectrics are solid-state devices. They are semiconductors that produce electricity using based on the Seebeck and Peltier effect as semiconductor cooler. Thermoelectric has interesting features compared to conventional cooler and electrical appliances. The absence of moving parts result in increasing reliability, reducing maintenance, and increasing the system life. Lack of fluid reduces environmental pollution as well as being quiet which is a great advantage. With rapid development of technology in the field of semiconductor materials, thermoelectric has attracted a lot of attention these days. In this paper the thermoelectric technology, materials, application in the field of cooling has briefly reviewed.

Keywords

Thermoelectric, Thermoelectric materials, One-stage, Two-stage

۱- مقدمه

یکی ازآخرین پیشرفت‌های رشته تخصصی تبرید، استفاده از قطعه ترموالکتریک برای ایجاد سرما است. به این معنی که به‌جای ماده مبرد از انرژی الکتریکی به عنوان یک حامل استفاده می‌شود و حرارت از یک جهت به جهت دیگر منتقل می‌گردد.

با بکار بردن این روش، بدون اینکه از وسایل معمولی و ضروری تولید سرما از قبیل کمپرسور، کندانسور، اواپراتور استفاده شده باشد، سرما تولید می‌شود.

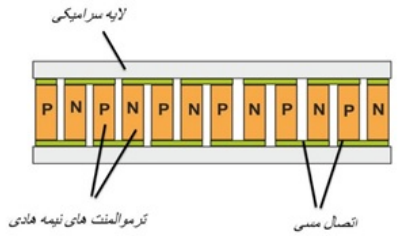
خصوصیات برجسته دستگاه‌های سردکننده ترموالکتریکی عبارت‌اند از: نداشتن قطعات متحرک، نداشتن صدا، یکپارچه بودن، عدم احتیاج به سرویس و تعمیرات آن‌هاست. ازمزایای دیگر این سیستم این است که چون فقط جریان الکتریک ی است که ایجاد برودت می‌کند و در این سیستم لوله‌کشی و هدایت گاز و غیره وجود ندارد، لذا به سادگی می‌توان از یک منبع انرژی استفاده کرده و چندین دستگاه را یکجا بکار انداخت. ترموالکتریک‌ها در هرحالتی قادر بکار هستند حتی زمانیکه درحال نقل و انتقال می‌باشند. اگر از لحاظ حجمی، دستگاه‌های ترموالکتریکی را با دستگاه‌های سردکننده تراکمی مقایسه کنیم، با ظرفیت سرمایی مساوی، دستگاه‌های ترموالکتریکی دارای حجم خیلی کوچکی خواهند بود.

در سال ۱۸۲۱ یک فیزیکدان آلمانی بنام سیبک[۱] مشاهده نمود که اگر یک سیکل بسته از اتصال دو فلز ناهم‌جنس ساخته‌شده و بین دو سر اتصال، اختلاف دما وجود داشته باشد، در سیکل اختلاف‌پتانسیل ایجاد خواهد شد. در سال ۱۸۳۴ ژان پلتیر[۲]عکس پدیده سیبک را گزارش نمود. وی مشاهده کرد که درون سیکلی از اتصال دو فلز ناهم‌جنس اگر جریان القا شود، بین دو سر اتصال اختلاف دما به وجود خواهد آمد. کشفیات فوق تا سال ۱۸۳۸ کاربرد خاصی نداشتند تا در آن سال مهندسی آلمانی به نام لنز[۳] با استفاده از پدیده پلتیر یک قطره آب را منجمد نمود.

پدیده ترموالکتریک تا اواسط دهه ۱۹۵۰ که نیمه‌هادی‌ها به بازار عرضه شدند، جای خود را در صنعت باز نکرد. باعرضه نیمه‌هادی‌ها و به‌تبع آن ساخت مدول ترموالکتریک، به‌مرور کاربردها و مزایای تکنولوژی ترموالکتریک

[1]-Thomas Seebeck
[2] -Jean Peltier
[3]lenz

برای بشر آشکار گردید. سرمایش ترموالکتریک وقتی ایجاد می‌شود که یک جریان مستقیم از یک یا چند جفت نیمه‌هادی نوع N و P بگذرد. شکل ۱ نمایی ساده از ساختار مدول ترموالکتریک را نشان می‌دهد.



شکل۱ نمایی ساده از ساختار مدول ترموالکتریک.

سرمایش در ترموالکتریک وقتی رخ می‌دهد که الکترون از یک تراز انرژی پایین‌تر در نوع P به سمت تراز انرژی بالاتر در نوع N حرکت می‌کند. حرارت جذب‌شده توسط انتقال الکترون به سمت گرم‌تر یعنی T_H حرکت کرده و در آنجا، در هنگام حرکت الکترون از یک ترازبالا به تراز پایین‌تر، آزاد می‌شود. این پدیده اثر پلتیر[1] نامیده می‌شود و مدول را یخچال ترموالکتریک می‌نامند.

پدیده دیگری که در ترموالکتریک بسیار اهمیت دارد زمانی است که در دو طرف یک مدول ترموالکتریک اختلاف دما وجود داشته باشد. در این حالت یک ولتاژ ایجاد می‌شود. این ولتاژ که ولتاژ سیبک نامیده می‌شود، مستقیماً متناسب با اختلاف دمای ایجادشده است. ضریب تناسب نیز ضریب سیبک[2] نامیده می‌شود. اثر پلتیر توسط ضریب پلتیر[3] که حاصل‌ضرب ضریب سیبک در دمای مطلق است، کنترل می‌شود. لازم به ذکر است که عوض کردن جهت جریان، جای دو سطح سرد و گرم را نیز عوض می‌کند.

کارهایی که در زمینه ترموالکتریک تاکنون انجام‌شده یک سری تحقیقات آزمایشگاهی است. ازآنجایی‌که کارهای آزمایشگاهی نیاز به دستگاه تست دارد، پرهزینه و وقت‌گیر و مشکل است. ازاین‌رو دانشمندان به روش‌های مدل‌سازی عددی روی می‌آورند. از مزایای این روش می‌توان سریع بودن، هزینه پایین، در اکثر مواقع پایه‌گذاری آسان و امکان بررسی شرایط مختلف بدون دربرداشتن هزینه را نام برد.

خنک‌کننده ترموالکتریک علاوه بر کاربردهای نظامی، هوافضا، کارهای صنعتی و علمی، به‌تدریج حضور بیشتری را در زندگی روزمره مردم پیدا می‌کند. دستگاه‌های خنک‌کننده ترموالکتریک به طور گسترده برای خنک‌کننده‌های الکترونیکی مانند پردازنده‌های کامپیوتری، پکیج‌های نگهداری محصولات غذایی و آشامیدنی قابل‌حمل، کنترل دمایی صندلی ماشین و حتی دستگاه‌های تهویه مطبوع ترموالکتریکی مورداستفاده قرار می‌گیرند. جامعه علمی مقدار زیادی از تلاش خود را درزمینه تحقیقات خنک‌کننده‌های ترموالکتریک قرار داده است. بررسی‌های بسیاری درزمینه فن‌آوری و کاربردهای ترموالکتریک که شامل مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل مدول ترموالکتریک[۱]، فن‌آوری‌های ترموالکتریکی مبتنی بر انرژی خورشیدی[۲]، خنک‌کننده، گرمایش، قدرت تولید و بازیابی حرارت اتلافی [۳, ۴] انجام‌شده است. تحقیقات اخیر دو راه را برای به دست آوردن پیشرفت‌های چشمگیری در خنک‌کننده ترموالکتریک نشان می‌دهد: ۱) بهبود بازده درونی مواد ترموالکتریک ۲) بهبود طراحی حرارتی سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک و بهینه‌سازی بر اساس ترموالکتریک‌های موجود.

۲- تحقیقات درزمینه بهبود بازده درونی مواد ترموالکتریک

بررسی‌های انجام‌شده درزمینه بهبود مواد ترموالکتریک به‌صورت زیر می‌باشد. لیو و همکارانش[4][۵] در سال ۲۰۱۲ به بررسی رفتار شبه مایع مس در اطراف زیر شبکه بلوری seدر بلورcu_{2-x}se که منجر به هدایت حرارتی بسیار کم در شبکه و بالا رفتن میزان ضریب مزیت[5]در این نیمه‌هادی می‌شود، پرداختند .هارمن[6] و همکارانش[۶] در سال ۲۰۰۵ بالاترین میزان ضریب مزیت را در تحقیقات برابر مقدار ۳ به دست آورد، این در حالی است که در حال حاضر بهترین ترموالکتریک‌های تجاری دارای ارزش ضریب مزیت ZT برابر یک می‌باشند. همچنین بل[7][۴] بیان کرد اگرمیزان متوسط ZT به مقدار۲ برسد، گرمایش حالت‌جامد خانگی و تجاری، تهویه و دستگاه‌های خنک‌کننده هوا با استفاده از مواد ترموالکتریک عملی می‌شود. مینیچ[8] و همکارانش[۷] پیشنهاد کردندکه خواص برخی از مواد ترموالکتریک به شدت وابسته به دما است. از این‌رو به منظور ساخت یک مدل کلیTEC، خواص متغیر باید در نظر گرفته شود. فرانسیس دیسوالو[9][۸] به معرفی ترموالکتریک و نحوه کارکرد آن و اساس کار آن پرداخته است. ایشان با بهبود مواد ترموالکتریک اثر آن را در افزایش بهره‌وری ترموالکتریک بررسی کرده است. بهبود مواد نه‌تنها به خنک‌کنندگی الکتریکی پیشرفته کمک می‌کند، بلکه بر روی ارائه مزایای انرژی در یخچال و حتی تولید انرژی برق با هدر رفت گرما تأثیر می‌گذارد.

بهترین مواد ترموالکتریکی که ساخته‌شده دارای ضریب مزیتی بین ۱/۲ تا ۲/۲ در بازه دمایی ۶۰۰ تا۸۰۰ کلوین طبق جدول ۱می‌باشد. پیش‌بینی می‌شود ترموالکتریک خنک‌کننده‌ای با ضریب مزیت برابر ۱ عملکردی برابر با ۱۰ درصد از بازده کارنو را داشته باشد. زمانی عملکرد مجموعه برابر با ۳۰درصد بازده کارنو می‌شود که ضریب مزیت برابر با ۴ باشد. هرچند افزایش ضریب مزیت تا مقدار ۴ همچنان به‌عنوان چالشی بزرگ به قوت خود باقیاست.

۳- بهبودطراحی سیستم ترموالکتریک

بعد از بررسی تحقیقات صورت گرفته در زمینه بهبود مواد ترموالکتریک به بررسی طراحی سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک و بهینه‌سازی مجموعه می‌پردازیم. تحقیقات بسیاری با توجه به استفاده خنک‌کننده ترموالکتریک در فن‌آوری‌های متفاوت مانند یخچال‌های ترموالکتریک، خنک‌کننده‌های الکترونیکی، خنک‌کننده اتومبیل و خنک‌کننده تهویه مطبوع و ... به صورت کارهای تئوری و تجربی انجام شده است که در اینجا به بخشی از آنان می‌پردازیم.

۳-۱ بررسی‌های تئوری بهبود طراحی حرارتی سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک

ازآنجایی‌که خنک‌کننده ترموالکتریک شامل مبدل‌های حرارتی می‌باشد، بنابراین برای مدل‌سازی خنک‌کننده ترموالکتریک، مدل‌سازی ریاضی تک‌تک

[1] Peltier effect
[2] Seebeck coefficient
[3] Peltier coefficient

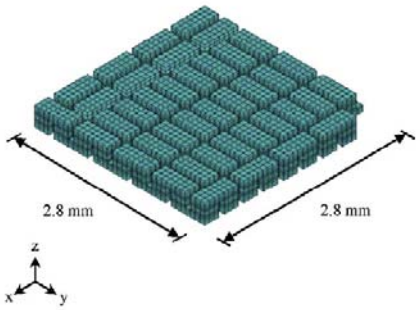
[4] Huili Liu
[5] ZT
[6] Harman
[7] Lon E. Bell
[8] Minnich
[9] Francis J. DiSalvo

ترموکوپل‌ها در یک خنک‌کننده ترموالکتریک کاری منطقی است.بدین منظور چن[1] و همکارانش[۹] به بررسی ارائه یک مطالعه سه‌بعدی عددی برای خنک‌کننده ترموالکتریک مینیاتوری (کوچک) متشکل از هشت، بیست و چهل جفت از ترموکوپل پرداختند. آن‌ها ضریب سیبک را وابسته به دما در نظر گرفتند، درحالی‌که رسانایی گرمایی و الکتریکی مقداری ثابت داشتند. پیش‌بینی نشان می‌دهد که قدرت خنک‌کننده و ضریب عملکردمدول، هنگامی‌که در داخل یک مدول ترموکوپل‌ها کوچک‌شده، در حال افزایش است.

جدول ۱ خلاصه‌ای از ضریب مزیت‌های بالا مواد ترموالکتریک گزارش‌شده در دهه اخیر

Material	Type	ZT value	Temperature
Bi-doped PbSeTe/PbTe (QDSL)	n	۳	۵۵۰K
$In_{0.2}Ce_{0.15}Co_4Sb_{12}$ S	n	۱/۴۳	۸۰۰k
$Pb_{0.25}Sn_{0.25}Ge_{0.5}Te$	p	۰/۹۵	۶۷۰ k
$(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3$	p	۱/۲۷	۲۹۸k
$Bi_2(Te_{0.94}Se_{0.06})_3$	n	۱/۲۵	۲۹۸ k
$K_{0.95}Pb_{20}Sb_{1.2}Te_{22}$	n	۱/۶	۷۵۰k
PbTe_SrTe	p	۱/۷	۸۰۰K
Binary crystalline $In_4Se_{3-\delta}$	n	۱/۴۸	۷۵۰K
$AgPb_mSbTe_{2+m}$	n	۲/۲	۸۰۰K

بااین‌حال، این روش بسیارگران‌قیمت و دارای پیچیدگی‌های محاسباتی است، چراکه شبکه‌های مش هر نوع p و نوعn مدل‌سازی شده باید در اندازه-های بسیار کوچک باشند. علاوه بر این، مقاومت گرمایی و الکتریکی در فرایند مدل‌سازی پیچیدگی‌های بیشتری را خواهند داشت.



شکل۲ شماتیک از سیستم شبکه و آرایشیک مدول ترموالکتریک با ۴۰ ترموالمنت[۹].

به‌جای مدل‌سازی هر ترموکوپل به‌صورت جداگانه، مدل‌سازی خنک-کننده ترموالکتریک به‌عنوان یک حجم رویکردی بسیار ساده‌تر است. این نوع از مدل‌های به‌اصطلاح جمع‌وجور[2]را می‌توانید با استفاده از مش‌های ریز و درشت در مناطق مختلف برای بررسی‌های چند بعدی به کار برد. چن[3] و سیندر[4][۱۰] یک روش مدل‌سازی جمع‌وجوری را بررسی کردند که نتایج به‌دست‌آمده با نتایج به‌دست‌آمده از مدل فیزیکی مطابقت کامل داشت. در این روش مقدار قابل‌توجهی از مش‌ها کاهش یافته است و سرعت محاسبات تقریباً ۱۰۰ برابر سریع‌تر است. روش مدل‌سازی جمع‌وجور روشی مناسب برای تعیین ضریب مؤثر سیبک و رسانایی الکتریکی و حرارتی می‌باشد.

پالازیوس[5] و همکارانش[۱۱] یک روش تحلیلی برای به‌دست آوردن پارامترهای داخلی با استفاده از منحنی‌های عملکرد ترموالکتریک را پیشنهاد دادند. چرکز[6][۱۲] به شرح امکان بهبود ضریب عملکرد خنک‌کنندگی برای خنک‌کننده برای ترموالکتریک با ترکیب دو اثر پلتیر و اثر ژول-تامسون پرداخت و نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که مقدار ضریب عملکرد خنک‌کنندگی ۶۰ تا ۷۰ درصد افزایش را در مقایسه با دستگاه‌های ترموالکتریک همرفتی و ۵تا ۸ درصد افزایش در مقایسه با ترموالمنت‌های با اثر جزیی ژول داشته است.

فوجیساکا[7] و همکارانش[۱۳] به بررسی روشی برای بهینه‌سازی حداکثر توان خروجی پرداختند. مدل تک‌بعدی برای بار اول، برای بهینه‌سازی ابعاد ترموالکتریک با در نظر گرفتن تعادل حرارتی ازجمله انتقال حرارت رسانایی و اثر پلتیر و اثر ژول با فرض ثابت بودن درجه حرارت، در تمام اتصالات بررسی شد. تعداد جفت‌های P_N برای به دست آوردن حداکثر توان خروجی بهینه‌سازی شد. توان خروجی به ۱/۲۴ درصد (از ۱۲/۷ وات به ۱۵/۷ وات) افزایش پیدا کرد. در مدل دوبعدی که اساس محاسبات حجم محدود است، درجه حرارت و توزیع پتانسیل الکتریکی موردبررسی قرار گرفتند. حداکثر توان خروجی نیز ارزیابی شد. بازده هر دو روش مورد مقایسه قرار گرفت. تحلیل یک‌بعدی برای طراحی‌های سخت و محاسبات عددی چندبعدی برای بررسی جزئیات ابعاد و عملکرد ترموالکتریک آبشاری مناسب است.

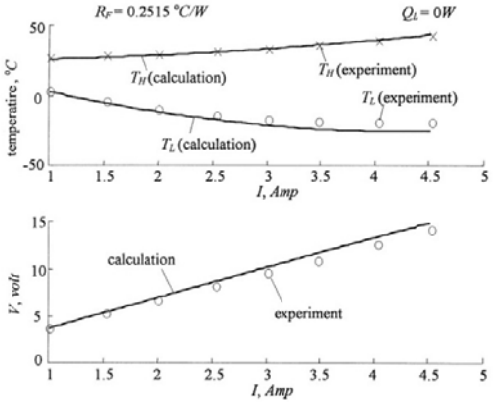
۳-۲- تحقیقات تجربی صورت گرفته در مورد بهبود طراحی حرارتی سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک

برای اولین بار یک طراحی حرارتی برای خنک‌کننده هوای ترموالکتریکی توسط هانگ[8] و همکارانش[۱۴] ارائه شدکه شامل یک عدد ترموالکتریک و یک هیت‌سینک[9] می‌باشد. محاسبات طراحی با بهره‌گیری از منحنی عملکرد مدول‌های حرارتی که از طریق تجربی مشخص‌شده، انجام‌شده است.برای نشان دادن تست، دستگاه تست خودکار طراحی و ساخته شد. از نتایج تست عملکرد مدول‌ها برای تعیین خواص فیزیکی و استخراج یک رابطه تجربی برای عملکرد مدول‌های حرارتی استفاده می‌شود. پس‌ازآن از این نتایج در تجزیه و تحلیل یک سیستم ترموالکتریک خنک‌کننده با استفاده از یک مدل شبکه حرارتی استفاده می‌شود. مقاومت حرارتی هیت‌سینک به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی یک کولر ترموالکتریک انتخاب‌شده است. همچنین نشان دادند که داده‌های سیستم شبیه‌سازی با داده‌های تجربی یک خنک‌کننده ترموالکتریک که با استفاده از یک هیت‌سینک که دارای مقاومت حرارتی($\frac{℃}{w}$) ۰/۲۵۱۵ است، سرد می‌شود مطابقت دارد. در شکل ۳ این

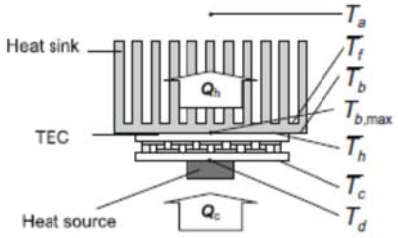
[1] Chen
[2] compact
[3] Chen
[4] Snyder
[5] Palacios
[6] Cherkez
[7] Fujiska
[8] Huang
[9] Heatsink

مطابقت در دو حالت متفاوت نشان داده‌شده است. همچنین آن‌ها طراحی بهینه خنک‌کننده ترموالکتریک در شرایط مطلوبCOP را بررسی کردند[۱۴].

چنگ[1] و همکارانش[۱۵] عملکرد یک خنک‌کننده هوای ترموالکتریکی برای دستگاه‌های الکترونیکی را مورد بررسی قرارداد. در این تحقیق نشان داده شدکه در یک‌بار حرارتی خاص، مدول خنک‌کننده ترموالکتریک در جریان ورودی مطلوب، بهترین عملکرد خنک‌کنندگی را دارا می‌باشد. شکل ۴ طرحواره مورد بررسی آنان بوده است.



شکل۳ مقایسه نتایج شبیه‌سازی وتجربی در $Q_l = 0$[۱۴].

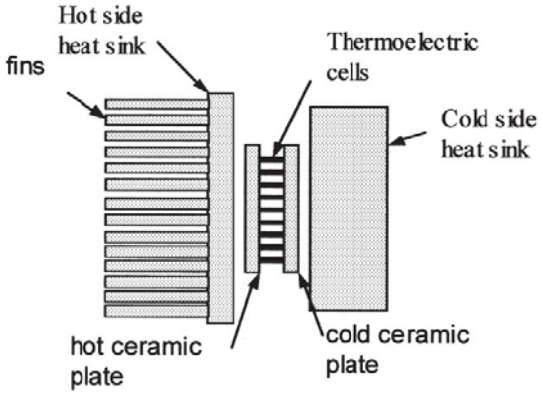


شکل۴ طرح مدول ترموالکتریک خنک‌کننده هوا[۱۵].

گاوس[2] و ایلر[3][۱۶] به بررسی، نصب و راه‌اندازی فاز طراحی مدول‌های ترموالکتریک خنک‌کننده[4] همراه با عوامل مؤثر بر فاز پرداختند. بررسی‌ها بر روی محاسبات سطح گرم و سرد، محاسبات توان الکتریکی و محاسبات هیت‌سینک بوده است. عملکرد مدول‌های ترموالکتریک خنک‌کننده توسط اثر گرمایش ژول، اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک و ضریب هدایت حرارتی بین اتصالات PN تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین نشان داده شد که تأثیر عوامل تأثیرگذار را نمی‌توان نادیده گرفت و باید در طول محاسبات منظور شود.

ریفات[5] و ژائولی ما[6][۱۷] یک یخچال ترموالکتریک طراحی و تست کردند. سیستم در ابتدا به‌صورت یک هیت‌سینک بر روی سطح سرد و یک هیت‌سینک به همراه فن بر روی سطح گرم که در شکل ۵ نشان داده شده است، موردبررسی قرار داده شد. همچنین برای حالت دوم سطح سرد ترموالکتریک خنک‌کننده با ماده تغییر فاز[7] محصور شد و موردبررسی قرار گرفت. تعویض سیستم هیت‌سینک معمولی با ماده تغییر فاز، بهبود در عملکرد سیستم تبرید ترموالکتریک را به همراه داشت. همچنین جریان گرما معکوس در ترموالکتریک را می‌توان با استفاده از لوله‌های حرارتی بین ترموالکتریک خنک‌کننده و ماده تغییر فاز از بین برد.

چین[8] و هانگ[9][۱۸] به بررسی عملکرد خنک‌کننده ترموالکتریک در خنک‌کننده‌های الکترونیکی پرداختند. آن‌ها با معلوم بودن دمای سطح سرد و اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک مقادیر ظرفیت خنک‌کنندگی و دمای اتصال به چیپ و ضریب عملکرد ترموالکتریک و مقاومت هیت‌سینک سطح گرم ترموالکتریک را محاسبه کردند.



شکل۵ اجزای اصلییک سیستم خنک‌کننده پلتیر[۱۷].

نتایج نشان داد زمانی که دمای سطح سرد افزایش و اختلاف دمای دو سر ترموالکتریک کاهش پیدا می‌کند، ضریب عملکرد خنک‌کنندگی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین عملکرد ترموالکتریک بستگی به دمای سطح سرد و مقاومت هیت‌سینک سطح گرم دارد. آن‌هاهیت‌سینک با کانال میکرو رابا استفاده از آب یا هوا خنک کردند تا کاهش مقاومت حرارتی برای هیت‌سینک گرم را در پی داشته باشد. کاهش مقاومت حرارتی هیت‌سینک گرم عاملی است برای افزایش ضریب عملکرد ترموالکتریک.

رهاب نور[10] و محمد الکبی[11][۱۹] به بررسی تئوری انتقال حرارت به روش تفاضل محدود برای پارامترهای متفاوت داخلی ترموالکتریک پرداختند. همچنین به بررسی تأثیرات توان ورودی و سطح سرد بر روی میزان توان خنک‌کنندگی، میزان حرارت خروجی و ضریب عملکردپرداخته‌شده و بهینه-ترین مقدار ضریب عملکرد زمانی اتفاق می‌افتد که توان ورودی کمترین مقدار را داردو با افزایش توان ورودی ضریب عملکرد کاهش پیدا می‌کند.

جون لو[12] و همکارانش[۲۰]تئوری زمان محدود ترمودینامیک برای تجزیه و تحلیل و بهینه سازی عملکرد یخچال ترموالکتریک که از چند عنصر تشکیل شده را بررسی کردند. برای سطح ثابت، کل انتقال حرارت از دو مبدل‌حرارتی، نسبت مساحت سطح انتقال حرارت از درجه حرارت بالای مبدل حرارتی به سمت سطح انتقال حرارت مبدل‌های حرارتی مجموع برای به حداکثر رساندن بار خنک‌کننده و ضریب بهینه‌سازی عملکرد یخچال حرارتی. تأثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد مطلوب می‌شد. نتایج ممکن

[1] Chang
[2] Gouws
[3] Eilers
[4] Thermoelectric cooler modules (TECMs)
[5] Riffat
[6] Xiaoli Ma
[7] phase change material
[8] Chein
[9] Huang
[10] Rehab Noor
[11] Mohammed Al-Kaby
[12] Jun Luo

است راهنماهای برای تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی حرارتی یخچال و فریزر عملی ارائه می‌کنند.

ژنگ[1] و همکارانش[۲۱] گزارش کردند که قدرت خنک‌کننده یک ترموالکتریک با طول پایه ترموالکتریک رابطه معکوس دارد. از این‌رو تغییر ابعاد ترموالکتریک را می‌توان به‌عنوان یک استراتژی جایگزین برای رسیدن به تراکم قدرت سرمایش بالا در نظر گرفت. آن‌ها ابعاد میکروکولر سیلیکونی سه‌بعدی را که دارای مزایای قدرت سرمایش بالا و وابستگی کمتر به ضخامت عنصر ترموالکتریک است را با دستگاه مشابه با هندسه تک‌بعدی مورد مقایسه قراردادند. آن‌هاحداکثرسردکنندگی^{o}C۱/۲ را برای دستگاه میکرو کولر با ناحیه ۴۰×۴۰ اندازه گرفتند که معادل چگالی قدرت سردکنندگی تخمین زده شده ۵۸۰ وات بر سانتی‌متر مربع می‌باشد.

۴- مروری به تحقیقات انجام‌شده برای ترموالکتریک دوطبقه

با توجه به محدودیت عملکرد ترموالکتریک تک طبقه، یک ترموالکتریک تک طبقه موجود در بازار زمانی که دمای سطح گرم با دمای محیط برابر باشد حداکثر اختلاف دمایی را به‌دست می‌دهد[۲۲]. بنابراین، هنگامی‌که تفاوت درجه حرارت زیاد برای برخی از برنامه‌های کاربردی خاص موردنیاز است، ترموالکتریک تک طبقه گزینه مناسبی برای استفاده نخواهد بود. علاوه بر این، تفاوت درجه حرارت زیاد نیزضریب عملکردترموالکتریک تک طبقه را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد که ازاین‌رو باعث عملکرد حرارتی ضعیف مجموعه می‌شود. به‌منظور به دست آوردن اختلاف درجه حرارت بیشتر و به‌منظور بهبود ضریب عملکرد، ترموالکتریک دو یا چند طبقه طراحی و پیشنهاد شد[۲۳]. به‌طوری‌که دو یا چند ترموالکتریک بر روی‌هم قرار می‌گیرند. همچنین طی بررسی‌های بی‌شماری ثابت شد که ترموالکتریک دو یا چندطبقه اختلاف دمایی بیشتر از ۱۰۰درجه را در پی خواهد داشت. برای ترموالکتریک‌های دوطبقه، سه روش معمول برای تأمین جریان الکتریکی در هر مرحله وجود دارد: سری، موازی و جداشده است. بنابراین، به‌جز خواص مواد که بر روی ظرفیت خنک‌کننده، ضریب عملکرد و حداکثر اختلاف دمای ترموالکتریک دوطبقه تأثیر دارد، انتظار می‌رود که نسبت تعداد عناصر حرارتی بین دوطبقه و نسبت جریان اعمال در هر طبقه تأثیر بسزایی بر روی ظرفیت خنک‌کننده، ضریب عملکرد و حداکثر اختلاف دمای ترموالکتریک‌های خنک-کننده دوطبقه داشته باشد. در اینجا به بررسی برخی از تحقیقات انجام‌شده بر روی ترموالکتریک‌های دوطبقه می‌پردازیم.

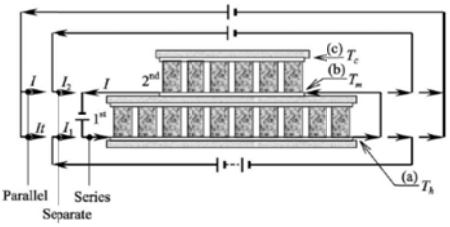
برای برخی از کاربردهای الکترونیکی و اپتوالکترونیکی، درجه حرارت موردنظر را نمی‌توان با یک کولر حرارتی تک مرحله به دست آورد. علاوه بر این، برخی از دستگاه‌های الکترونیکی و اپتوالکترونیکی، مانند لیزر کوانتومی آبشاری، پراکندگی شارحرارتی با قابلیت خنک‌کنندگی، یک ترموالکتریک تک طبقه همخوانی ندارد.

۴-۱ تحقیقات تئوری انجام‌شده بر روی ترموالکتریک دوطبقه

ژوان[2] و همکارانش[۲۴] به بررسی خنک‌کننده ترموالکتریک مکعبی دوطبقه که به‌سادگی بااتصال دو ترموالکتریک تجاری مشابه که به‌صورت سری ازلحاظ حرارتی چیدمانی آبشاری دارد، پرداختند. خنک‌کننده ترموالکتریک مکعبی دوطبقه نسبت به خنک‌کننده ترموالکتریک هرمی دوطبقه دارای مزیت تغییر جهت جریان می‌باشد؛ به این معنی که نرخ سرمایش و ضریب عملکرد با تغییر جهت جریان تغییر نمی‌کند. به‌عنوان‌مثال، یک ماژول ترموالکتریک تک طبقه از ملکور[3]را برای مقایسه عملکرد بینترموالکتریک خنک‌کننده تک طبقه و دوطبقه انتخاب کردند. شرایط عملی با در نظر گرفتن اثر مقاومت حرارتی بینطبقات محاسبه‌شده است. محاسبات نشان داد که ترموالکتریک مکعبی دوطبقه در مقایسه با ترموالکتریک تک طبقه تفاوت دمایی بالاتری را فراهم می‌کند. بااین‌حال لازم به ذکر است که ترموالکتریک تک طبقه ضریب عملکرد بهتری نسبت به ترموالکتریک مکعبی دوطبقه دارد [۲۴].

ژوان و همکاران[۲۵] به بهینه‌سازی یک سیستم ترموالکتریک دوطبقه با دو طراحی متفاوت به‌طوری‌که در مدل اول ترموالکتریک‌ها چیدمانی هرمی دارند و جریان الکتریکی به‌گونه‌ای اعمال‌شده که ترموالکتریک بالایی سطح سرد دارد و در حالت دوم به صورت مکعبی چیده شده‌اند و جریان اعمالی به‌گونه‌ای است که سطح سرد و گرم ترموالکتریک را می‌توان تغییر داد. بهینه‌سازی به خوبی نشان داد که برای ترموالکتریک خنک‌کننده دوطبقه با دو طراحی متفاوت مکعبی و هرمی، حد بهینه r نسبت تعداد مدول‌های ترموالکتریک بین طبقات در ترموالکتریک خنک‌کننده هرمی و حد بهینه t نسبت جریان الکتریکی بین طبقات در ترموالکتریک خنک‌کننده مکعبی در هر دو ۲/۵ تا ۳ می‌باشد. علاوه بر این، عملکرد خنک‌کنندگی بهینه برای ترموالکتریک خنک‌کننده دو طبقه با این دو پیکربندی تقریباً همانند است. علاوه بر این، قابل ملاحظه است که بدانیم حداکثر اختلاف دما در ترموالکتریک خنک‌کننده هرمی دوطبقه به‌مراتب بیشتر از یک ترموالکتریک خنک‌کننده تک می‌باشد.

ژوان و همکارانش [۲۶] به بررسی حداکثر اختلاف درجه حرارت و خاصیت قطبی ترموالکتریک خنک‌کننده دوطبقه پرداختند. حداکثر اختلاف دما[4] سه نوع ترموالکتریک دوطبقه که ازلحاظ الکتریکی به ترتیب، موازی و متوالی و جدا از هم بسته شده است، موردبررسی قرار گرفت. در شکل ۶ دیاگرام این پیکربندی‌ها را می‌توان مشاهده کرد. تجزیه و تحلیل همه با توجه به نسبت مهم R (یعنی نسبت تعداد زوج بین طبقات) در ترموالکتریک دوطبقه انجام شده است. حداکثر اختلاف دما اولین و آخرین پیکربندی هر دو به مراتب بالاتر از یک ترموالکتریک خنک‌کننده تک طبقه است. هنگامی‌که R نزدیک به بی‌نهایت باشد و دمای سطح گرم ۳۰۰ کلوین باشد، دمای ترموالکتریک خنک‌کننده به ۱۹۰ کلوین می‌رسد. همچنین اگر به تعداد طبقات اضافه شود اختلاف دمای بیشتری نیز حاصل خواهد شد. اگر اختلاف دمای بیشتر و تغییر قطبیت مدنظر باشد، ترموالکتریک دوطبقه مکعبی با جریان الکتریکی جداگانه بهترین انتخاب است، اگرچه ترموالکتریک خنک‌کننده دوطبقه با جریان الکتریکی سری بهترین پیکربندی است.



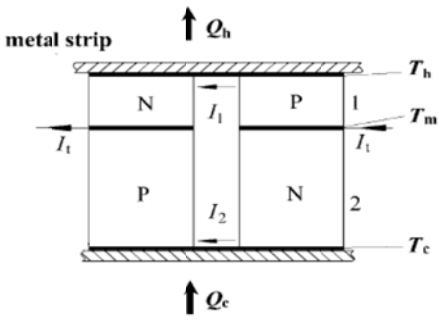
شکل۶ شماتیک سه نوع پیکربندی ترموالکتریک دوطبقه[۲۶].

[1] Yan Zhang
[2] X.C. Xuan
[3] Melcor
[4] Maximum temperature difference

چنگ[1][۲۷] به بررسی به حداکثر رساندن ظرفیت خنک‌کننده و ضریب عملکرد در ترموالکتریک خنک‌کننده دوطبقه از طریق الگوریتم ژنتیک پرداخت. این مطالعه ارائه یک روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حداکثر رساندن ظرفیت خنک‌کننده و ضریب عملکرد در ترموالکتریک خنک‌کننده دوطبقه می‌باشد. تمرکز بر روی ترموالکتریک‌های خنک‌کننده دوطبقه آبشاری، پارامترها، ازجمله جریان الکتریکی اعمال شده و تعداد جفت ترموکوپل از هر طبقه، بهینه سازی شده است. مدل جدید ریاضی برای مقابله با خواص مواد وابسته به دما و شامل اثرات تماس و گسترش مقاومت حرارتی مطرح شد. پارامترهای بهینه به دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک ابتدا که درمقایسه با داده‌های به‌دست‌آمده از روش تحلیلی تأیید شد. پس از تأیید، بهینه‌سازی برای تولید پارامترهای بهینه برای اختلاف درجه حرارت مطلوب 90C به اجرا درآمد. اثرات مقاومت حرارتی، ظرفیت خنک‌کنندگی از ترموالکتریک‌های خنک‌کننده دوطبقه را با تنظیم پارامترها می‌توان به حداکثر رساند و بهبود داد. در طول محاسبات درالگوریتم ژنتیک، جستجو فرآیندها به‌سرعت همگرا شده و پارامترهای بهینه بدون مشکل یافت می‌شوند.

ونگ[2] و همکارانش[۲۸] برای اولین بار با استفاده از یک مدل سه‌بعدی، بهینه‌سازی عملکرد خنک‌کننده ترموالکتریک دوطبقه در سه حالت متفاوت، از لحاظ الکتریکی به‌صورت سری، به‌صورت موازی و جدا از هم مورد بررسی قراردادند. بهینه‌سازی برای ترموالکتریک دوطبقه با ۳۰ عنصر حرارتی انجام‌شده است. نسبت تعداد عناصر و نسبت جریان برای رسیدن به حالت بهینه ظرفیت خنک‌کننده، ضریب عملکرد و حداکثر اختلاف دما مورد بررسی قرار گرفتند. توزیع دما سه‌بعدی برای ترموالکتریک دو مرحله با نسبت تعداد عناصر بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از یک مشاهده شد. علاوه بر این ثابت کردند خواص مواد وابسته به دما برای پیش‌بینی عملکرد ترموالکتریک خنک‌کننده دو مرحله بسیار مهم است. همچنین نتایج نشان داد که برای بهبود ضریب عملکرد و ظرفیت خنک‌کنندگی تعداد عناصر حرارتی سطح گرم باید بیشتر از تعداد عناصر سطح سرد باشد به‌طوری‌که نسبت بهینه عناصر چیزی بین ۱/۷۳ تا ۲/۳۳ در پیکربندی سری باشد. همچنین عملکرد مجموعه با اعمال جریان بیشتر بر ترموالکتریک گرم می‌تواند بهبود یابد. نسبت مطلوب جریان در حدود ۱/۵ تا ۲ می‌باشد.

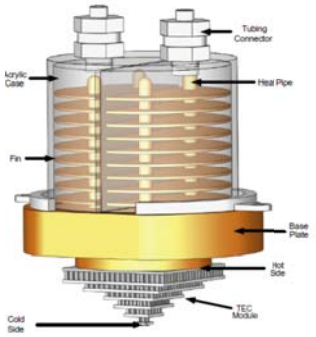
مینگ ما[3] و یو[4][۲۹] یک مدل تحلیلی جدید از ترموالکتریک خنک‌کننده دوطبقه ارائه دادند. شماتیک مجموعه مورد بررسی در شکل ۸ نشان داده می‌شود.براساس مطالعه آن‌ها زمانی حداکثر ضریب عملکرد خنک‌کنندگی رازمانی خواهیم داشت که دمای سطح سرد زیاد و نسبت طول پایه ترموالکتریک طبقه اول به طول پایه کل مقداری کوچک باشد.بنابراین ترموالکتریک دوطبقه اختلاف دما را بهبود بخشیده و مؤثرتر از ترموالکتریک تک طبقه است.



شکل۷ شماتیک ترموالکتریک درون آبشاری[۲۹].

۲-۴ تحقیقات تجربی انجام‌شده بر روی ترموالکتریک دوطبقه

پوترا[5] و همکاران[۳۰] یک تحقیق تجربی با استفاده از ترموالکتریک خنک‌کننده به خنک کردن برای کرایوتراپی یا سرما درمانی پرداختند. آن‌ها دو نمونه از دستگاه‌های کرایوتراپی که متشکل از ۵ تا ۶ مرحله از مدول‌های ترموالکتریک بودند را با استفاده از انواع ولتاژ الکتریکی موردبررسیقراردادند.

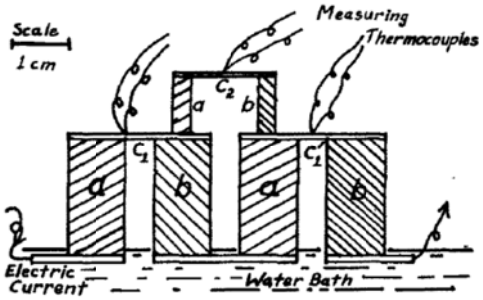


شکل۸ شماتیک دستگاه کرایوتراپی[۳۰].

برین[6] و همکارانش [۳۱] به بررسی عملکرد ترموالکتریک خنک‌کننده با استفاده از آبشاری کردن زوج‌های پلتیر پرداختند. شماتیک آن در شکل ۹ دیده می‌شود. سرمایش ترموالکتریک تک طبقه به علت خواص ذاتی عناصر مورداستفاده، به اختلاف درجه حرارت خاصی محدودشده است. آلتنکیرچ[7] یک تئوری برای تک زوج و راه را برای غلبه بر محدودیت در خنک‌کنندگی با استفاده از تعدادی از ترموالکتریک که ازلحاظ حرارتی آبشاری هستند ارائه داد. چنین آرایشی توسط تورتینی[8] ساخته شد و نحوه کارکرد آن نشان داده شده است. آن‌ها فرم ساده شده نظریه آلتنکیرچ را ارائه دادند و شکلی که ساده‌تر و کارآمدتر از تورتینی شرح داده و نتایج تجربی داده شد. خنک‌کنندگی ترموالکتریک آبشاری دوطبقه بدون حضور عایق بندی به ۱۱ ℃ می‌رسد درحالی‌که خنک‌کنندگی ترموالکتریک تک طبقه تحت شرایط متفاوت ۱۵℃ می‌باشد.این عملکرد سازگاری خوبی را برای عملکرد ترموالکتریک آبشاری طبق نظریه نشان می‌دهد. همچنین در این مقاله نشان داده‌شده است ترموالکتریک آبشاری از لحاظ تئوری کارآمدتر از یک ترموالکتریک تک طبقه تحت هر شرایطی می‌باشد.

[1] Cheng
[2] Wang
[3] Ming Ma
[4] Yu

[5] Putra
[6] Brien
[7] Altenkirch
[8] Turrettini



شکل۹ شماتیک ترموالکتریک دوطبقه[۳۱].

یانگ[1] و همکارانش[۳۲] به بررسی ترموالکتریک میکروکولر آبشاری پرداختند. خنک‌کننده‌های ترموالکتریک چندطبقه به علت اختلاف دمای بیشتری که نسبت به ترموالکتریک تک طبقه دارند مدت زمان زیادی است که از آن‌ها استفاده می‌شود. فن‌آوری دستگاه‌های میکرو الکترومکانیکی منجر به امکان ساخت میکرو کولر ترموالکتریک چندطبقه بدون افزایش پیچیدگی در مقایسه با ترموالکتریک کولر تک طبقه شد. آن‌ها به طراحی و تجزیه و تحلیل این کولر چندطبقه، با تمرکز بر بهینه‌سازی حداکثر اختلاف دما پرداختند.

کورژو[2] و آویلو[3][۳۳] به بررسی استفاده از تکنیک هارمن برای اندازه‌گیری ضریب مزیت ترموالکتریک آبشاری پرداختند. توانایی‌های تشخیصی تکنیک سرعت بالا هارمن برای اندازه‌گیری ضریب مزیت ترموالکتریک آبشاری تبدیل‌کننده با پایه‌های غیریکنواخت که ناهمگن یا دارای اشکال نامنظم بودند، مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که برای مدل‌های دوطبقه‌ای یا بیشتر و همچنین برای هر مدلی با پایه‌های غیریکنواخت، به کاربردن تکنیک استاندارد هارمن به جواب اشتباه می‌رسد.اندکی اصلاحات برای تکنیک هارمن پیشنهادشده است که آنرا برای مدل‌های یک یا چند طبقه با پایه‌های همگن و غیریکنواخت مناسب می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مروری بر کارهای تئوری و تجربی انجام‌شده بر روی ترموالکتریک تک طبقه و دوطبقه پرداخته‌شده است و نشان داده شد که بهبود مواد ترموالکتریک می‌تواند تأثیر بسزایی بر روی عملکرد ترموالکتریک داشته باشد به‌طوری‌که بهبود مواد افزایش ضریب مزیت تا مقدار ۳ را فراهم کرده است. در بررسی‌های انجام‌شده بر روی ترموالکتریک تکطبقه نشان داده شد که تعداد پایه‌ها و طول پایه‌ها، مساحت سطح ترموالکتریک در میزان خنک کاری ترموالکتریک مؤثر است و برای ترموالکتریک دوطبقه نشان داده شد که اختلاف دمایی که می‌توان از ترموالکتریک دوطبقه به‌مراتب بیشتر از ترموالکتریک تک طبقه است.

۶- مراجع

[1] S. L. a. S. Ben-Yaakov, "Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules," IEEE Transactions on industry applications, vol. 43, 2007.

[2] L. L. Hongxia Xi, Gilles Fraisseb, "Development and applications of solar-based thermoelectric technologies," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 11, pp. 923–936, 2007.

[3] X. M. S.B. Riffat "Thermoelectrics: a review of present and potential applications," pergamon, vol. 23, pp. 913–935, 2003.

[4] L. E. Bell, "Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems," Science, vol. 231, 2008.

[5] X. S. Huili Liu, Fangfang Xu,Linlin Zhang,Wenqing Zhang,Lidong Chen,Qiang Li, Ctirad Uher,Tristan Day&G. Jeffrey Snyder, "Copper ion liquid-like thermoelectrics," 2012.

[6] T.C. Harman, M.P. Walash,1 B.E. Laforg and G.W. Turner, "Nanostructured Thermoelectric Materials," Journal of Electronic materials, vol. 34, 2005.

[7] a. M. S. D. A. J. Minnich, Z. F. Renc and G. Chen, "Bulk nanostructured thermoelectric materials: current research and future prospects" Energy & Environmental Science, 2009.

[8] F. J. DiSalvo, "Thermoelectric Cooling and Power Generation," aaas, vol. 285, 1999.

[9] C.-Y. L. b. Wei-Hsin Chen a, Chen-I Hung, "A numerical study on the performance ofminiature thermoelectric cooler affected by Thomson effect," Applied Energy, 2012.

[10] G. J. S. b. Min Chena, "Analytical and numerical parameter extraction for compact modeling of thermoelectric coolers," International Journal of Heat and Mass Transfer2013.

[11] A. A. R. Palacios , R.R. Pecharromán, F.L. Pagola, "Analytical procedure to obtain internal parameters from performance curves of commercial thermoelectric modules," Applied Thermal Engineering, 2009.

[12] R. Cherkez, "Theoretical studies onthe efficiency of air conditioner based on permeable thermoelectric converter," Applied Thermal Engineering, vol. 38, pp. 7-13, 2012.

[13] Takeyuki fujisaka, Hongtao sui, and Ryosuke o suzuki, "Design and Numerical Evaluation of Cascade-Type Thermoelectric Modules," Journal of Electronic materials, 2013.

[14] C. J. C. B.J. Huang, C.L. Duang, "A design method of thermoelectric coolers," International Journal of Refrigeration, vol. 23, pp. 208-218, 2000.

[15] C.-C. C. a. Yu-Wei Chang, Ming-Tsun Ke ,Sih-Li Chen, "Thermoelectric air-cooling module for electronic devices," Applied Thermal Engineering, 2009.

[16] R. G. a. H. Eilers, "A review on thermoelectric cooling modules: Installation design, performance and efficiency," Scientific Research and Essays, pp. 485-492, 2013.

[17] S. A. O. S.B. Riffat , Xiaoli Ma, "A novel thermoelectric refrigeration system employing heat pipes and a phase change material: an experimental investigation," pergamon, vol. 23, pp. 313–323, 2001.

[18] G. H. Reiyu Chein "Thermoelectric cooler application in electronic cooling," elsevier, pp. 2207–2217, 2004.

[19] R. N. M. Al-Kaby, "Study of thermal performance of cooling system".

[20] L. C. a. Jun Luo, Fengrui Sun, Chih Wu, "Optimum allocation of heat transfer surface area for cooling load and COP optimization of a thermoelectric refrigerator," pergamon, vol. 44, pp. 3197–3206, 2003.

[21] Y. Z. a. A. S. a. G. Zeng, "High-power-density spot cooling using bulk thermoelectrics," 2004.

[22] X. C. Xuan, "Analyses of the performance and polar characteristics of two-stage thermoelectric coolers," Semiconductor Science and Technology vol. 17, pp. 414-420, 2002.

[23] K. W. Lindler, "Use of multi -stage cascade to improve performance of thermoelectric heat pumps ",pergamon, vol. 39, pp. 1009-1014, 1998.

[24] K. C. N. X.C. Xuan, C. Yap, H.T. Chua, "A two-stage cuboid-styled thermoelectric cooler with switched polarity," 20th International Conference on Thermoelectrics, 2001.

[25] K. C. N. a. X.C. Xuan a, C. Yap a ,H.T. Chua b, "Optimization of two-stage thermoelectric coolers with two design configurations," pergamon, vol. 43, pp. 2041–2052, 2002.

[26] K. C. N. a. X.C. Xuan a, C. Yap a, H.T. Chua, "The maximum temperature difference and polar characteristic of two-stage thermoelectric coolers," elsevier, pp. 273–278, 2002.

[27] C. S. Yi-Hsiang Cheng "Maximizing the cooling capacity and COP of two-stage thermoelectric coolers through genetic algorithm," elsevier, vol. 26, pp. 937–947, 2006.

[28] Q.-H. W. Xiao-Dong Wang , Jin-Liang Xu "Performance analysis of two-stage TECs (thermoelectric coolers) using a three-dimensional heat-electricity coupled model," Energy, vol. 66, pp. 419-429, 2013.

[29] J. Y. Ming Ma, "An analysis on a two-stage cascade thermoelectric cooler for electronics cooling applications," International Journal of Refrigeration, 2013.

[30] A. Nandy Putra , William Sukyono, David Johansen, Ferdiansyah N. Iskandar, "The characterization of a cascade thermoelectric cooler in a cryosurgery device," elsevier, vol. 50, pp. 759–764, 2010.

[31] C. S. W. B. J. O'Brien, and K. Landecker, "Cascading of Peltier Couples for Thermoelectric Cooling," Journal of applied physics, 1956.

[32] R. Y. a. G. Chen, "Multistage thermoelectric microcoolers," Journal of applied physics, 2004.

[1] Ronggui Yang
[2] Korzhuev
[3] Avilov

[33] a. E. S. A. M.A. Korzhuev, "Use of the Harman Technique for Figure of Merit Measurements of Cascade Thermoelectric Converters," Electronic materials, pp. 1499-1503, 2010.