

مروری بر نانوکامپوزیت های پلیمری با هدایت حرارتی بالا و کاربردهای آن

مجید میرزایی^{*}، مجید رضایی آبادچی، علیمراد رشیدی

گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

چکیده: در حال حاضر، انباشت و تخلیه سریع حرارت در تجهیزات الکترونیکی و بخش های مرتبط از عوامل اصلی محدودکننده کوچک سازی و افزایش توان این تجهیزات محسوب می شود. این موضوع به طور قابل توجهی عملکرد و طول عمر دستگاه های الکترونیکی را تحت تأثیر قرار می دهد. بنابراین، بهبود هدایت حرارتی کامپوزیت های پلیمری رسانای حرارتی (TCPCs) راه حل اصلی این مشکل است. بر خلاف تولید کامپوزیت های پلیمری با هدایت حرارتی ذاتی، پر کردن زمینه پلیمری با مواد پرکننده دارای هدایت حرارتی می تواند به طور موثرتری هدایت حرارتی کامپوزیت ها را افزایش دهد. این مقاله با بررسی مکانیزم هدایت حرارتی آغاز می شود و به تشریح عواملی می پردازد که بر هدایت حرارتی کامپوزیت های پلیمری اثرگذار هستند، از جمله نوع و ریخت شناسی پرکننده، نحوه توزیع و عامل دار کردن پرکننده ها. سپس به معرفی روش های مختلف تهیه کامپوزیت های پلیمری با پرکننده های متنوع پرداخته می شود. در نهایت، کاربردهای آن شرح داده شده و چالش ها و آینده TCPCs بررسی می شود.

واژگان کلیدی: نانوکامپوزیت، پلیمر، هدایت حرارتی، پرکننده.

mjmirzaei@nri.ac.ir

۱- مقدمه

می یابد [۲]. بنابراین، تولید مواد مدیریت حرارتی با ویژگی های برجسته ضروری است. مواد فصل مشترک حرارتی که غالباً از کامپوزیت های پلیمری ساخته شده اند، فضای میان دو سطح را پر کرده و سطح تماس مؤثر را افزایش می دهند. این مواد باعث بهبود قابل توجه انتقال حرارت در فصل مشترک ها می شوند، چرا که هدایت حرارتی هوا بین دو سطح بسیار پایین است. در نتیجه، این مواد نقش اساسی در دفع حرارت از دستگاه های الکترونیکی ایفا می کنند [۳].

کامپوزیت های پلیمری به دلیل ویژگی های برجسته ای مانند وزن پایین، مقاومت در برابر خوردگی، انعطاف پذیری عالی، فرآیندپذیری ساده و هزینه مقرون به صرفه، در حوزه های مختلف کاربرد گسترده ای یافته اند [۴]. اما هدایت حرارتی ذاتی اغلب زیرلایه های پلیمری بسیار پایین است ($0.1 - 0.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)، که این امر کاربرد

در سال های اخیر، سرعت بالای توسعه دستگاه های میکروالکترونیکی با ادغام زیاد و توان بالا، از جمله تراشه های نیمه هادی 5G و مدارهای یکپارچه، باعث کاهش اندازه و افزایش توان محصولات شده است [۱]. تجهیزات الکترونیکی در هنگام کار، حرارت قابل توجهی تولید می کنند که در نقاط خاصی تجمع می یابد و مشکل گرم شدن موضعی را ایجاد می کند. به همین دلیل، چالش مدیریت سریع حرارت و دفع آن به وضوح افزایش یافته و به طور جدی بر پایداری و عمر مفید محصولات الکترونیکی اثر می گذارد؛ این موضوع همچنین به یکی از چالش های اساسی کنونی تبدیل شده است. بررسی ها نشان داده است که عملکرد محصولات الکترونیکی تا ۱۰ درصد با افزایش ۲ درجه ای دما کاهش

وسیع آن‌ها را محدود می‌کند. در سال‌های اخیر، به دلیل مقاومت حرارتی بالای بین‌سطحی میان پرکننده‌ها و فصل مشترک بین پرکننده و ماتریس (زمینه) کامپوزیت‌های پلیمری و توزیع ناهمگن پرکننده‌ها در زمینه‌ها، پیشرفتی در هدایت حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری حاصل نشده است، حتی زمانی که میزان پرکننده بسیار بالا باشد [۵، ۶]. افزایش میزان پرکننده می‌تواند خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها را کاهش دهد و باعث می‌شود که پژوهش‌ها در زمینه کامپوزیت‌های حرارتی با چالش‌های زیادی روبرو شود. هرچند که هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها به صورت نظری بهبود یافته است، اما نتایج عملی کماکان رضایت‌بخش نیست. روش‌های مختلفی برای تولید کامپوزیت‌های حرارتی وجود دارد، مانند رسوب بخار شیمیایی، عملیات پلاسما، اکستروژن فاز جامد، و غیره [۷-۱۱]. محققان بسیاری توجه بیشتری به مطالعه کامپوزیت‌های پلیمری با هدایت حرارتی مطلوب معطوف کرده‌اند و با استفاده از مواد و نسبت‌های مختلف یا معرفی روش‌های نوین، تلاش کرده‌اند هدایت حرارتی را افزایش دهند و مقاومت حرارتی تماس را کاهش دهند. این مقاله به بررسی سه شکل انتقال حرارت (هدایت حرارتی، تابش حرارتی و همرفت حرارتی) می‌پردازد و سه نظریه پذیرفته شده مکانیسم‌های هدایت حرارتی را تشریح می‌کند. همچنین عوامل مؤثر بر هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها نظیر نوع پرکننده، ریخت شناسی و توزیع آن‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد. مقاله مروری حاضر مدل‌های نظری رایج هدایت حرارتی را معرفی کرده و تلاش می‌کند ویژگی‌های هر مدل را توضیح دهد تا با استفاده از این مدل‌ها شناخت بهتری از خواص حرارتی و فیزیکی کامپوزیت‌ها حاصل شود. به علاوه، به بررسی کاربرد مواد فصل مشترک حرارتی (TIMs) در تجهیزات الکترونیکی پرداخته خواهد شد و نهایتاً چالش‌ها و چشم‌اندازهای پیش روی کامپوزیت‌های پلیمری با هدایت حرارتی بالا تحلیل می‌شود.

۲- مکانیزم‌های هدایت حرارتی

به طور کلی، انتقال حرارت به سه روش انجام می‌شود: هدایت، همرفت و تابش. هدایت حرارتی به انتقال انرژی در مواجهه با تفاوت دما در اجسام اشاره دارد. در همرفت حرارتی، حرارت از طریق

یک محیط مایع منتقل می‌شود تا تعادل دمایی برقرار شود. در تابش حرارتی، جسم با حفظ دما، انرژی را به صورت امواج الکترومغناطیسی ساطع می‌کند. این مکانیزم‌ها در گازها، مایعات و جامدات متفاوت هستند. در جامدات، هدایت حرارتی روش اصلی انتقال حرارت است، در حالی که در مایعات و گازها، اغلب همراه با همرفت حرارتی اتفاق می‌افتد. همرفت حرارتی برای انتقال حرارت در مایعات و گازها منحصر به فرد است. تابش حرارتی از هدایت و همرفت متمایز است، چون نیازی به محیط برای انتقال ندارد و انرژی را به شکل تابش الکترومغناطیسی منتقل می‌کند [۱۲-۱۴]. طبیعت هدایت حرارتی بر پایه برخورد مولکول‌ها برای انتقال انرژی استوار است. در جامدات، اختلاف دما باعث انتقال انرژی جنبشی ذرات از نواحی گرم‌تر به سردتر می‌شود. در مواد هادی، الکترون‌های آزاد با حرکات نامنظم خود و ارتعاشات پایین شبکه‌ی بلوری، نقش کلیدی در هدایت حرارتی دارند. اما در عایق‌ها، ارتعاشات شبکه اتم‌ها و مولکول‌ها نقش اساسی را ایفا می‌کند. فونون‌ها، که کوانتوم انرژی ارتعاشات شبکه هستند، براساس نظریه بوز-اینشتین عمل می‌کنند و بدون جرم هستند [۱۳].

پلیمرها معمولاً فاقد الکترون‌های آزاد هستند و هدایت حرارتی آن‌ها بیشتر به حرکت فونون‌ها وابسته است. ویژگی‌های زنجیره‌ای مولکولی پیچیده و جرم مولکولی بالای پلیمرها، مشکلاتی را در بلوری شدن کامل ایجاد می‌کند که این امر باعث پراکندگی فونون‌ها و اختلال در انتقال حرارتی می‌شود. بنابراین، اکثر کامپوزیت‌های پلیمری دارای هدایت حرارتی پایینی هستند [۱۵، ۱۶]. در حال حاضر، دو روش اصلی برای تولید کامپوزیت‌های پلیمری رسانای حرارتی (TCPCs) با کیفیت بالا شامل سنتز پلیمرهای با هدایت حرارتی ذاتی و استفاده از پلیمرهای حرارتی پر شده می‌باشد. پلیمرهای با هدایت حرارتی ذاتی از طریق اصلاح ساختار زنجیره‌های مولکولی به دستیابی به ساختار مرتب‌تری هدایت می‌شوند که موجب افزایش هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها می‌شود. پلیمرهای حرارتی پر شده با افزودن پرکننده‌های غیرآلی یا فلزی با هدایت حرارتی بالا به زمینه‌های پلیمری تولید می‌شوند. این روش، برخلاف فرآیند پیچیده و هزینه‌بر سنتز پلیمرهای با هدایت حرارتی ذاتی، دارای بهره‌وری بالا، هزینه کمتر و مناسب

¹ Thermal Interface Materials

² Thermal Conductive Polymer Composites

بودن برای تولید صنعتی است و به عنوان جهت‌گیری اصلی در توسعه TCPCها شناخته می‌شود. افزودن پرکننده‌ها به زمینه‌های پلیمری به‌طور مؤثری هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها را افزایش می‌دهد، اما مکانیزم هدایت بسیار پیچیده‌ای دارد که به نوع و ساختار پرکننده‌ها، توزیع و محتوای آن‌ها، مقاومت حرارتی فصل مشترک و هدایت حرارتی ذاتی پرکننده‌ها وابسته است. در حال حاضر، نظریه‌های مختلفی برای توضیح این مکانیزم وجود دارد: نظریه مسیر حرارتی، نظریه نفوذ و نظریه‌های ضریب ترمو الاستیک. نظریه مسیر حرارتی معتقد است که پرکننده‌ها با اضافه شدن به زمینه‌های پلیمری شبکه‌هایی بوجود می‌آورند که در آن‌ها حرارت منتقل می‌شود. نظریه نفوذ بیان می‌کند که با مقدار کم پرکننده‌ها، ساختار "دریا-جزیره" شکل می‌گیرد و هدایت حرارتی به آرامی افزایش می‌یابد، اما با رسیدن به آستانه نفوذ، ساختار "دریا-دریا" تشکیل شده و هدایت حرارتی به طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد. نظریه ضریب ترموالاستیک به مکانیک الاستیک کلاسیک مربوط است و هدایت حرارتی را به عنوان ضریب الاستیک حرارت فونون‌ها در نظر می‌گیرد که بیانگر عملکرد کلی کامپوزیت‌ها بدون وابستگی به مسیر انتقال خاصی است. بنابراین، کارایی انتقال حرارت با بهبود ضریب الاستیک حرارتی کامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. این نظریه‌ها پایه‌ای برای درک و مدیریت پیشرفته‌تر انتقال حرارت در کامپوزیت‌های پلیمری ارائه می‌دهند [۱۷-۱۹].

در نانوکامپوزیت‌های پلیمری با هدایت حرارتی بالا، مکانیزم‌های مختلف هدایت حرارتی (مانند هدایت از طریق زمینه پلیمری، نانوذرات پرکننده و فصل مشترک بین آن‌ها) نه تنها به صورت مجزا عمل می‌کنند، بلکه به‌شدت بر یکدیگر تأثیر متقابل دارند. این تأثیرات متقابل می‌توانند به بهبود یا تضعیف هدایت حرارتی منجر شوند. در ادامه به مهم‌ترین این اثرات متقابل اشاره می‌شود [۲۰، ۲۱]:

➤ اثر متقابل بین زمینه پلیمری و نانوذرات رسانا

- افزایش مسیرهای هدایت حرارتی: افزودن نانوذرات با هدایت حرارتی بالا (مانند گرافن، نانولوله‌های کربنی،

بورون نیتريد) می‌تواند مسیرهای رسانای حرارتی درون زمینه ایجاد کند.

- پراکندگی فونون‌ها: در عین حال، اگر پیوند بین زمینه و نانوذرات ضعیف باشد، پراکندگی فونون‌ها در فصل مشترک افزایش یافته و انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

➤ اثر مقاومت حرارتی فصل مشترک (ITR)

- فصل‌های مشترک بین فاز پلیمری و نانوذرات دارای مقاومت حرارتی هستند.
- ITR زیاد منجر به گسست در مسیر هدایت حرارتی و کاهش کارایی نانوذرات می‌شود.
- در صورت اصلاح سطح نانوذرات یا ایجاد پیوندهای شیمیایی قوی‌تر با پلیمر، می‌توان ITR را کاهش داد و اثر هم‌افزایی مثبت داشت.

➤ اثر هم‌ترازی و آرایش نانوذرات

- هم‌ترازی نانوذرات (به‌ویژه در نانولوله‌های کربنی یا ورق‌های گرافنی) می‌تواند هدایت حرارتی در جهت خاصی را تقویت کند.
- تشکیل شبکه‌های پرکولاسیون حرارتی^۳ باعث تقویت قابل توجه هدایت حرارتی کل نانوکامپوزیت می‌شود.
- انباشتگی بیش‌ازحد نانوذرات ممکن است باعث ایجاد نقص ساختاری و کاهش هدایت حرارتی شود.

➤ اثر توزیع و اندازه نانوذرات

- توزیع یکنواخت نانوذرات منجر به افزایش احتمال اتصال حرارتی مؤثر بین آن‌ها و ایجاد شبکه‌های رسانا می‌شود.
- نانوذرات بسیار کوچک می‌توانند به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، ITR بیشتری داشته باشند که این می‌تواند اثر مثبت حضور آن‌ها را خنثی کند.

➤ اثر نوع زمینه پلیمری

¹ Interfacial Thermal Resistance

² Alignment and Percolation

³ Thermal percolation networks

- زمینه‌های پلیمری بی شکل (آمورف) معمولاً هدایت حرارتی پایینی دارند، در حالی که پلیمرهای نیمه‌بلورین هدایت حرارتی بیشتری نشان می‌دهند.
- ساختار زنجیره‌ای، تراکم بسته‌بندی و میزان بلورینگی پلیمر نیز بر تعامل با نانوذرات و انتقال حرارت مؤثرند.

۳- عوامل مؤثر بر هدایت حرارتی TCPCها

هدایت حرارتی زمینه‌های پلیمری به طور کلی ضعیف بوده و معمولاً بین 0.1 تا 0.5 وات بر متر کلین است، در حالی که پرکننده‌های حرارتی دارای هدایت حرارتی بسیار بالاتری می‌باشند. به همین دلیل، عمده هدایت حرارتی کامپوزیت‌های TCPC توسط پرکننده‌های حرارتی تأمین می‌شود. براساس نظریه مسیر حرارتی، پرکننده‌ها درون زمینه‌های پلیمری مسیرهای پیوسته‌ای را ایجاد می‌کنند تا باعث افزایش هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها شوند. با این حال، عوامل متعددی بر هدایت حرارتی TCPCها تأثیر می‌گذارند که از جمله می‌توان به نوع پرکننده، شکل و ترکیب پرکننده، نحوه توزیع آنها در زمینه و قدرت ارتباط بین پرکننده‌ها و زمینه اشاره کرد.

۳-۱- نوع پرکننده

پرکننده‌های حرارتی معمولاً به چهار دسته تقسیم می‌شوند: پرکننده‌های کربنی، پرکننده‌های غیرآلی، پرکننده‌های فلزی و پرکننده‌های ترکیبی. پرکننده‌های مبتنی بر کربن شامل گرافیت، الماس، نانولوله‌های کربنی (CNTs)، گرافن و الیاف کربنی (CFs) هستند. پرکننده‌های غیرآلی شامل نیتريد بور (BN)، نانوصفحه‌های نیتريد بور (BNNSs)، نیتريد آلومینیوم (AlN)، نیتريد سیلیکون (SiN)، کاربید سیلیکون (SiC)، آلومینا (Al_2O_3) و موارد مشابه می‌باشند. پرکننده‌های فلزی شامل نقره (Ag)، مس (Cu) و آلومینیوم (Al) هستند. پرکننده‌های ترکیبی به پرکننده‌هایی اطلاق می‌شوند که دارای عملکرد خاصی هستند مانند گرافن فلورینه یا نانولوله‌های کربنی فلورینه. پرکننده‌های کربنی، فلزی و برخی غیرآلی‌ها که قابلیت هدایت حرارتی دارند، برای تهیه کامپوزیت‌هایی با هدایت حرارتی بالا و عملکرد مناسب در محافظت

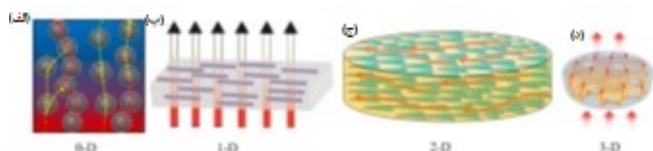
الکترومغناطیسی، بسیار مفیداند. این مواد در کاربردهای TMM^۱ قابلیت استفاده زیادی دارند. از سوی دیگر، پرکننده‌های غیرآلی عایق و ترکیبی که خاصیت عایق دارند، به طور گسترده‌ای در تولید کامپوزیت‌های حرارتی عایق کاربرد دارند که در زمینه میکروالکترونیک بسیار سودمندند. جدول ۱ هدایت حرارتی معمولی پرکننده‌های غیرآلی و زمینه‌های پلیمری را در دمای اتاق نشان می‌دهد.

جدول ۱. هدایت حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری و پرکننده‌های معمولی در دمای اتاق

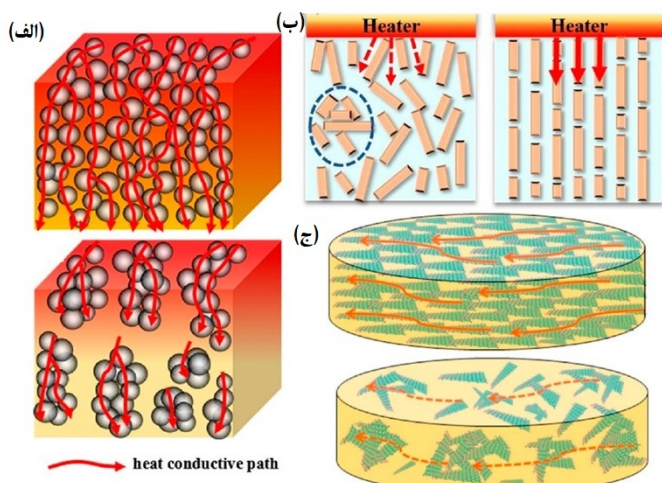
زمینه پلیمری	λ (W/m. $^{\circ}$ K)	مرجع	پرکننده رسانای حرارتی	λ (W/m. $^{\circ}$ K)	مرجع
اپوکسی پلی دی متیل سیلوکسان اتیلن وینیل استات کوپلیمر	۰/۲۲	[۲۲]	گرافیت	۱۵۰۰	[۲۳]
پلی پروپیلن	۰/۲۱	[۲۶]	گرافن	۵۳۰۰	[۲۴]
پلی متیل متا اکریلات	۰/۲۲	[۲۸]	اکسید گرافن	۱۰۰۰	[۲۵]
سیلیکون رابر	۰/۲۱	[۲۹]	نانولوله کربنی	۳۵۰۰	[۲۷]
پلی استایرن	۰/۱۹	[۳۱]	فیبرهای کربنی	۵۵۰	[۴]
پلی اتر اتر کتون	۰/۲۵	[۳۳]	کربن نیتريد هگزاگونال	۶۰۰	[۳۰]
پلی وینیل الکل	۰/۲۲	[۳۵]	کربن نیتريد نانوصفحه	-۱۶۰۰ ۲۰۰۰	[۳۲]
پلی آمید-ایمید	۰/۲۱	[۳۷]	اکسید آلومینیوم	۳۶	[۳۴]
پلی ایمید	۰/۲۷	[۳۹]	نقره	۴۳۰	[۳۶]
پلی وینیلیدین فلوراید	۰/۲۰	[۴۱]	مس	۴۰۰-۳۵۰	[۳۸]
پلی آمید	۰/۲۰	[۴۲]	آلومینیوم	۲۳۴	[۴۰]
پلی لاکتیک اسید	۰/۲۷۸	[۴۳]	-	-	-

¹ Tunnel Magnetoresistance

۳-۲- ریخت شناسی و توزیع پرکننده



شکل ۱. شبکه‌های حرارتی پرکننده‌ها (الف) صفر بعدی، (ب) یک بعدی، (ج) دوبعدی و (د) سه بعدی [۴۵].



شکل ۲. پراکندگی (الف) صفر بعدی، (ب) یک بعدی و (ج) دو بعدی پرکننده‌ها در زمینه‌ها [۴۶].

و زمینه‌های پلیمری یکی از جنبه‌های اساسی است که بر هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها تأثیرگذار است. چرا که هدایت ضعیف حرارتی در محیط فصل مشترک ممکن است باعث اتلاف حرارت شود و این ضعف اصلی در فرایند انتقال حرارت محسوب می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که پیوندهای بین پرکننده‌ها و زمینه‌ها غالباً از طریق نیروهای وان‌دروالس شکل می‌گیرند، که معمولاً ضعیف هستند. این ضعف منجر به افزایش مقاومت حرارتی میان سطوح می‌شود. در مواردی که این پیوندها به صورت هیدروژنی یا کووالانسی باشند، تمایل بیشتری به ایجاد تعامل قوی‌تر وجود دارد. این نوع پیوندها باعث بهتر شدن انتقال حرارت و بهبود کارایی کامپوزیت‌ها می‌شوند. بنابراین، با اجرای عملیات سطحی عامل‌دار کردن روی پرکننده‌ها یا زمینه‌ها، می‌توان پیوندهای قوی‌تری ایجاد کرد که موجب کاهش موثر مقاومت حرارتی و افزایش هدایت حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری خواهند شد.

به دلیل تفاوت‌های موجود در ریخت شناسی پرکننده‌ها، بسیاری از پرکننده‌های حرارتی مانند گرافن، نیتريد بور، نانولوله‌های کربنی و الیاف کربن از آنیزوتروپی برخوردارند. هدایت حرارتی این پرکننده‌ها در جهتی که هم‌تراز شده‌اند، بیشتر است و در جهت دیگر کمتر

شکل پرکننده‌های حرارتی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر هدایت حرارتی TCPCها دارد (شکل ۱). بر اساس ابعاد، پرکننده‌ها به چهار نوع تقسیم می‌شوند: صفر بعدی، یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی. پرکننده‌های صفر بعدی به شکل ذرات نقطه‌ای هستند که شامل ساختارهای کروی یا خوشه‌ای مانند نانوصفحات نیتريد بور و میکروصفحات پلی‌استایرن می‌شوند. پرکننده‌های یک بعدی ساختارهای نواری دارند که شامل لوله‌ها یا میله‌ها از جمله CNTها، CFها و سیم‌های نانو نقره می‌باشند. در ادامه، پرکننده‌های دوبعدی ساختارهای ورقه‌ای یا لایه‌ای دارند که شامل BN، گرافن و SiC هستند. در نهایت، پرکننده‌های سه بعدی ساختارهای شبکه سه بعدی ایجاد می‌کنند که می‌توانند مقاومت حرارتی بین زمینه-پرکننده یا پرکننده-پرکننده را کاهش دهند. به طور کل، اثر پراکندگی پرکننده‌های ورقه‌ای از پرکننده‌های کروی یا لوله‌ای مؤثرتر است، زیرا سطح تماس ساختار ورقه‌ای بزرگ‌تر بوده و تشکیل شبکه‌های حرارتی و کاهش مقاومت حرارتی تماس آسان‌تر صورت می‌گیرد. اندازه پرکننده‌ها برای بهبود هدایت حرارتی بسیار مهم است. اندازه کوچک‌تر پرکننده‌ها باعث افزایش سطح‌های فصل مشترک و پراکندگی بیشتر فونون‌ها در هنگام انتقال حرارت می‌شود. پرکننده‌های بزرگ‌تر به آسانی شبکه‌های نفوذی تشکیل می‌دهند که موجب کاهش مقاومت حرارتی می‌شود. همچنین، سطوح بزرگ‌تر پرکننده‌ها ممکن است گرانش را به شدت افزایش داده و باعث مشکلات پراکندگی شوند. علاوه بر این، ظرفیت هدایت حرارتی به تشکیل شبکه حرارتی وابسته است [۴۴].

به دلیل تفاوت‌های ساختاری در مواد پرکننده، بسیاری از آن‌ها دارای ویژگی‌های جهت‌گیری متفاوت هستند، مانند گرافن، نیتريد بور، نانولوله‌های کربنی و الیاف کربن. هدایت حرارتی این مواد در جهت‌های خاصی بیشتر و در سایر جهت‌ها کمتر است. بنابراین، نحوه قرارگیری و جهت‌گیری این پرکننده‌ها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر هدایت حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری داشته باشد، همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، چگونگی توزیع این پرکننده‌ها در زمینه‌های پلیمری تعیین‌کننده جهت‌گیری آن‌ها خواهد بود. در بخش عملکردی‌سازی، قدرت ارتباط بین پرکننده‌ها

می باشد. بنابراین، تنظیم جهت گیری این پرکننده ها تأثیر زیادی بر هدایت حرارتی کامپوزیت های پلیمری دارد.

۴- تقویت کننده های کامپوزیت پلیمری

۴-۱- تقویت کننده های کربنی

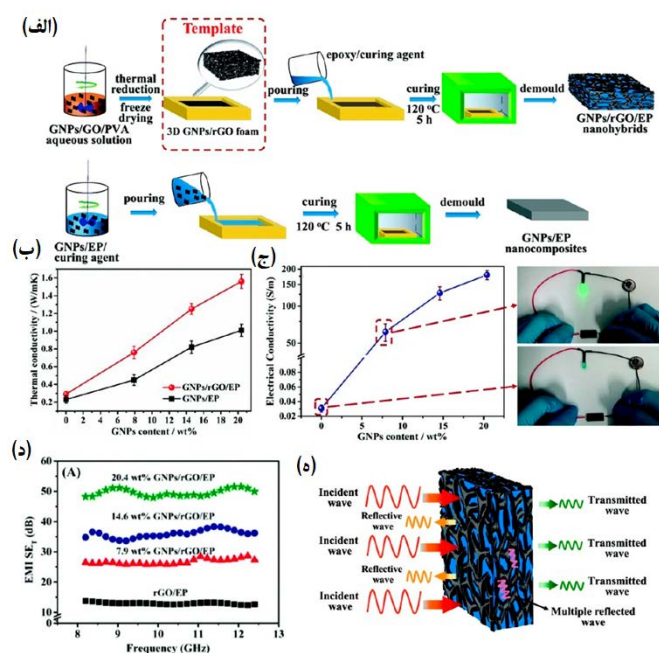
پرکننده های مبتنی بر کربن/کامپوزیت های پلیمری پرکننده های کربنی به دلیل داشتن هدایت حرارتی بالا بسیار مورد توجه هستند. در حال حاضر، پرکننده ها شامل گرافیت، نانولوله های کربنی، الیاف کربن و مشتقات مختلف گرافیت نظیر گرافن، اکسید گرافن (GO) و اکسید گرافن کاهش یافته (rGO) می باشند [۴۷].

۴-۱-۱- گرافیت و مشتقات آن

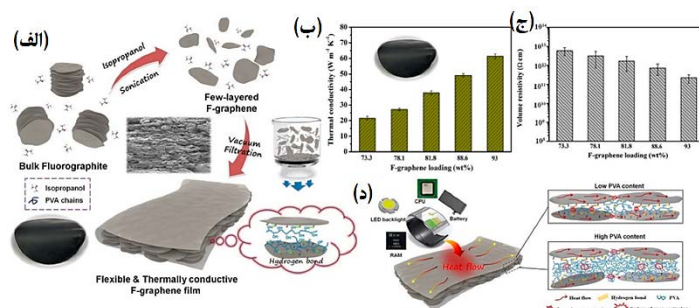
کامپوزیت های پلیمری گرافیت به عنوان یک ساختار بلوری لایه ای که از حلقه های شش ضلعی کربن تشکیل شده است، می تواند هدایت حرارتی درون صفحه ای به میزان $1500 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ داشته باشد. گرافن، که از لایه برداری گرافیت به دست می آید، دارای ویژگی های بی نظیری مانند هدایت حرارتی حدود $5000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ است و به عنوان یک ماده انقلابی شناخته می شود [۴۸]. اکسید گرافن دارای گروه های عاملی اکسیژنی بوده و با واکنش های مختلف شیمیایی می تواند تقویت شود. از طریق حذف این گروه ها، rGO به دست می آید. همچنین، با عامل دار کردن گرافیت یا گرافن مشتقاتی مانند گرافیت فلورینه و گرافن فلورینه تولید می شوند که هدایت الکتریکی و حرارتی بالایی همراه با ویژگی های عایق بودن دارند. ژانگ و همکاران کامپوزیت های تقویت شده با گرافن و نانو الماس (NDS) را با موفقیت سنتز کرده اند که پس از زینترسازی به ورق های نانوگرافیتی تبدیل می شوند و دارای هدایت حرارتی و الکتریکی عالی هستند. گروه گو نیز با استفاده از روش الگو موفق به تهیه نانو کامپوزیت هایی شامل فوم گرافنی شدند که دارای هدایت حرارتی و الکتریکی برجسته ای بودند. یکی دیگر از مطالعات نشان داده که لایه برداری گرافیت فلورینه به دست آوردن گرافن فلورینه ای منجر شده که در قالب فیلم های کامپوزیتی با پلی وینیل الکل (PVA) تهیه شده است و از خصوصیات حرارتی و عایق الکتریکی برخوردار است. جدول ۲ نیز جزئیات هدایت حرارتی کامپوزیت های پلیمری مبتنی بر گرافیت و مشتقات آن را ارائه

می کند. ژانگ و همکاران موفق به سنتز کامپوزیت هایی شدند که با گرافن و نانو الماس گرافیت شده تقویت شده اند؛ در این فرآیند، نانو الماس به عنوان پیش ماده زمینه و گرافن به عنوان تقویت کننده مورد استفاده قرار گرفت [۴۹]. پس از فرایند سینتر، نانو الماس ها به ورقه های نانوگرافیتی تبدیل شدند که نتایج حاصل در شکل ۳ نمایش داده شده اند. کامپوزیت های حاصل دارای هدایت حرارتی و الکتریکی بسیار خوبی بودند. گروه گو با روش الگو موفق به تهیه نانو کامپوزیت های فوم گرافن سه بعدی/اکسید گرافن کاهش یافته/اپوکسی شدند. چارچوب گرافن سه بعدی با اکسیژن کاهش یافته به روش خشک کردن انجمادی ایجاد شد تا شبکه های جدول ۲. هدایت حرارتی گرافیت و مشتقات آن/کامپوزیت های پلیمری.

مرجع	λ (W/m.k)	ترکیب پرکننده و مقدار آن	زمینه
[۵۲]	۳/۸	۱۰٪ وزنی گرافیت لایه لایه شده	اپوکسی
[۵۳]	۲/۱۲	۳٪ وزنی نقره+۱۲٪ وزنی اکسید گرافن احیا شده	پلی ایمید
[۵۴]	۴/۶	۲۰٪ وزنی نانولوله کربنی/سولفید مولیبدن/گرافن	اپوکسی
[۳۷]	۰/۵۳	۴/۲۵٪ وزنی فلورید کربن/اکسید گرافن احیا شده	پلی آمید-ایمید
[۲۲]	۱/۲۱	۹٪ وزنی اکسید گرافن احیا شده/اکسید آهن	اپوکسی
[۳۹]	۱/۶	۱۰٪ وزنی نانولوله کربنی چند جداره+اکسید گرافن احیا شده	پلی ایمید
[۵۵]	۲/۸۶	۴۵٪ وزنی گرافیت فلیک+۵٪ وزنی گرافیت کروی	پلی پروپیلن
[۲۶]	۱۰/۹۳	۲۷٪ حجمی گرافن	پلی پروپیلن
[۵۶]	۲۱/۳	۳۰٪ وزنی گرافیت عامل دار	پلی وینیل الکل
[۵۷]	۲/۳۰۶	۱۰٪ وزنی اکسید آهن@گرافیت	پلی وینیلیدین دی فلوراید
[۵۸]	۰/۹۲	۵٪ حجمی نانو ذرات گرافن	پلی متیل متاکریلات
[۵۹]	۱/۶۷۴	۹ درصد وزنی کاربرد سیلیسیم/گرافیت	اکتا دکانول
[۶۰]	۲۴/۱۹	۴۷٪ وزنی پلی لین-صفحات گرافیت	اپوکسی
[۶۱]	۱/۰۲	۳۰٪ وزنی اکسید گرافن احیا شده-کاربید سیلیسیم	اپوکسی
[۶۲]	۷/۴۵	۲۰٪ وزنی اکسید منیزیم-اکسید گرافن احیا شده	نانو فیبری سلولز
[۶۳]	۱۱/۲۳	۱ درصد وزنی اکسید گرافن/۲۰٪ وزنی نیتريد بور	پلی ایمید

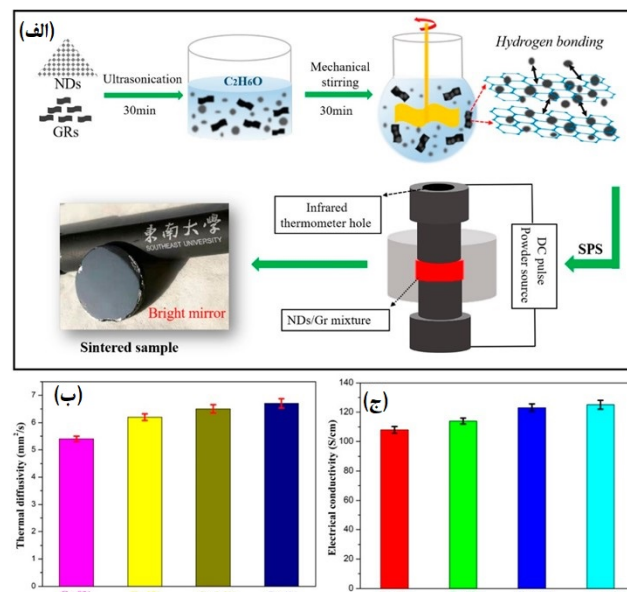


شکل ۴. (الف) شمایی از ساخت نانوصفحه‌های گرافن سه‌بعدی (GNPs)/اکسید گرافن کاهش‌یافته (rGO)/اپوکسی (EP) و نانو کامپوزیت‌های GNP/EP. (ب، ج) تأثیر محتوای GNP بر هدایت حرارتی و الکتریکی، (د) حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی (EMI SE) نانو کامپوزیت‌های rGO/EP و 3D GNP/EP در نوار X (ه) شمایی از انتقال موج الکترومغناطیسی از طریق نانو کامپوزیت‌های 3D GNP/rGO/EP [۵۰].



شکل ۵. (الف) شمایی از لایه‌برداری گرافیت فلورینه (F) و فرآیند تهیه فیلم‌های کامپوزیت-F گرافن، (ب) هدایت حرارتی، (ج) مقاومت حجمی فیلم‌های کامپوزیت-F گرافن، (د) مکانیزم هدایت حرارتی فیلم‌های کامپوزیت-F گرافن [۵۱].

شعاعی در سطح نانومتر و ابعاد محوری در سطح میکرومتر هستند و به دو نوع تک‌جداره و چندجداره تقسیم می‌شوند. این نانولوله‌ها به ترتیب دارای هدایت حرارتی ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ وات بر متر-کلون هستند و به عنوان پرکننده‌های حرارتی محبوب شناخته می‌شوند (شکل ۶). وانگ و همکاران، ذرات هسته-پوسته باریوم تیتانات در کنار نانولوله‌های کربنی چندجداره را در یک محیط واکنشی بسته تهیه کردند. سپس، با ترکیب محلولی فیلم‌های انعطاف‌پذیر کامپوزیت با خواص عالی حرارتی و دی‌الکتریک تولید



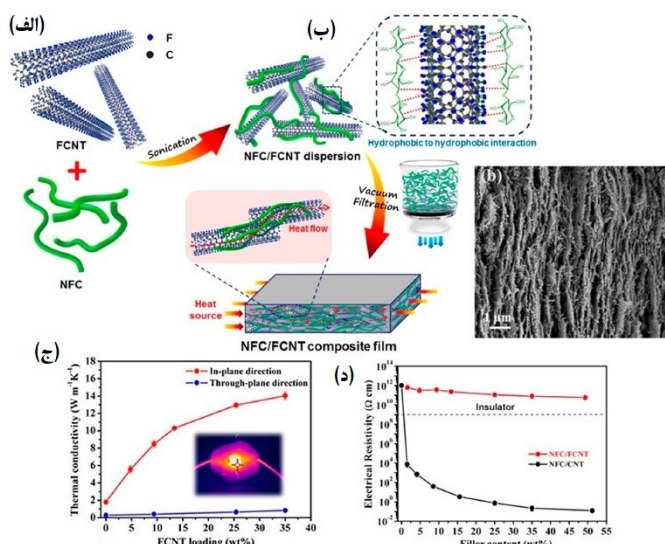
شکل ۳. (الف) تصویر شماتیک از فرآیند تهیه توده‌های کامپوزیت گرافیتی، (ب) نفوذ حرارتی و (ج) هدایت الکتریکی نمونه‌های سینتر شده با محتوای مختلف گرافن (Gr) [۴۹].

هادی الکتریکی و حرارتی درون زمینه‌های اپوکسی شکل گیرند (شکل ۴الف). کامپوزیت‌های با ترکیب ۲۰/۴٪ وزنی گرافن نانوصفحه‌ای و ۱/۰٪ وزنی اکسید گرافن کاهش‌یافته هدایت حرارتی قابل توجه ۱/۵۶ وات بر متر کلون و هدایت الکتریکی تا ۱۷۹/۲ زیمنس بر متر داشتند. همچنین مقدار حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی آنها برابر با ۵۱ دسی‌بل در محدوده نوار ایکس است (شکل ۴ب تا ۴ه) [۵۰]. وو و همکاران با لایه‌برداری از گرافیت فلورینه شده، گرافن فلورینه را تولید کردند و با فرایند فیلتراسیون تحت خلأ از پراکندگی همگن گرافن فلورینه/پلی‌وینیل‌الکل، فیلم‌های کامپوزیت انعطاف‌پذیر و مستقل را تهیه نمودند، که نتایج آن را در شکل ۵الف قابل مشاهده است. این فیلم دارای ساختار منظم و هماهنگ بود و هدایت حرارتی بسیار عالی ۶۱/۳ وات بر متر کلون و خواص عایق الکتریکی برتر با محتوای ۹۳٪ وزنی از گرافن فلورینه داشت (شکل‌های ۵ب و ۵ج) [۵۱]. مکانیزم هدایت حرارتی این فیلم‌ها نیز در شکل ۵د نمایش داده شده است. همچنین جدول ۲، هدایت حرارتی گرافیت و مشتقات آن را در کامپوزیت‌های پلیمری نشان می‌دهد.

۴-۱-۲- نانولوله‌های کربنی/کامپوزیت‌های پلیمری

نانولوله‌های کربنی به عنوان نانوپرکننده‌های یک‌بعدی با ساختار شش‌ضلعی کامل شناخته می‌شوند. این نانولوله‌ها دارای ابعاد

و هدایت الکتریکی و حرارتی هستند. هدف اصلی استفاده از الیاف کربن، ترکیب آن با رزین‌ها، فلزات و سرامیک‌ها برای تولید کامپوزیت‌های پیشرفته به عنوان ماده تقویتی است. هدایت حرارتی این الیاف می‌تواند به ۱۰۰ وات بر متر.کلون برسد و در تهیه کامپوزیت‌های حرارتی نقش گسترده‌ای دارد. ه و همکاران



شکل ۸. (الف) تصویر شماتیک از فرآیند تهیه فیلم‌های کامپوزیت نانو فیبری سلولز/نانولوله‌های کربنی فلورینه (NFC/FCNT)، (ب) ریخت شناسی مقطع عرضی FCNT (35 wt.% NFC)، (ج) هدایت حرارتی NFC/FCNT، (د) مقاومت الکتریکی حجمی فیلم‌های کامپوزیت NFC/FCNT و NFC/CNT [۶۶].

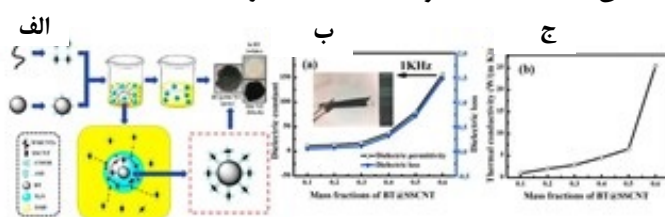
جدول ۳. هدایت حرارتی کامپوزیت‌های نانولوله کربنی/پلیمری

مرجع	λ (W/m.°K)	ترکیب پر کننده و مقدار آن	زمینه
[۶۷]	۴/۷	۲۴٪ وزنی نانولوله های کربنی چند جداره	پلی (۳- هکسیتوف-۵۲ دیول)
[۶۸]	۱۶/۹	۱٪ وزنی نانولوله کربنی	پلی آمید
[۶۹]	۱/۵۵	۱۰٪ وزنی نانولوله کربنی چندجداره	پلی وینیلیدین فلوراید
[۵۴]	۴/۶	۲۰٪ وزنی نانولوله کربنی/سولفید مولیبدن/گرافن	اپوکسی
[۳۹]	۱/۶	۱۰٪ وزنی نانولوله کربنی چند جداره- اکسید گرافن احیا شده	پلی ایمید
[۷۰]	۶۵	۴٪ وزنی نانولوله کربنی چند جداره	پلی وینیل فرمالدهید
[۷۱]	۱۷/۹	۷۰٪ وزنی نانولوله کربنی / پلی دوپامین	اتیل وینیل استات

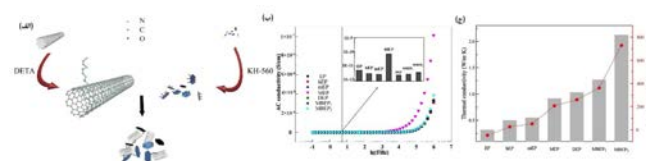
شد. این فیلم‌ها هدایت حرارتی مطلوب ۲۵/۴۳ وات بر متر-کلون و خواص دی‌الکتریک برتر را به نمایش می‌گذارند [۶۴]. شی و همکاران با استفاده از عملیات سطحی عامل‌دار شدن نانوکامپوزیت‌های MWCNT@BNNS/اپوکسی را ایجاد کرده، شبکه‌ای سه‌بعدی جهت هدایت حرارتی شکل دادند. در این کامپوزیت‌ها، بالاترین هدایت حرارتی به ۱/۹۲ وات بر متر-کلون می‌رسد و خواص دی‌الکتریک عالی را ارائه می‌دهد [۶۵] (شکل ۷). با توجه به هدایت الکتریکی عالی CNTها، کاربرد آن‌ها در زمینه عایق محدود است. برای ترکیب هدایت الکتریکی و حرارتی، وانگ و همکاران از نانولوله‌های کربنی فلورینه (FCNTs) با خواص عایق به عنوان پرکننده‌های حرارتی استفاده کرد و فیلم‌های کامپوزیتی نانو فیبر سلولزی را از طریق فیلتراسیون تحت خلأ تهیه کردند [۶۶]. این فیلم کامپوزیتی ساختاری لایه‌ای دارد و با هدایت حرارتی برجسته ۱۴/۱ وات بر متر-کلون و خواص عایق الکتریکی مطلوب با ۲۱٪ وزنی FCNTs ارائه شده است (شکل ۸). جدول ۳ هدایت حرارتی نانولوله‌های کربنی در کامپوزیت‌های پلیمری را نشان می‌دهد.

۳-۱-۴- الیاف کربن/کامپوزیت‌های پلیمری

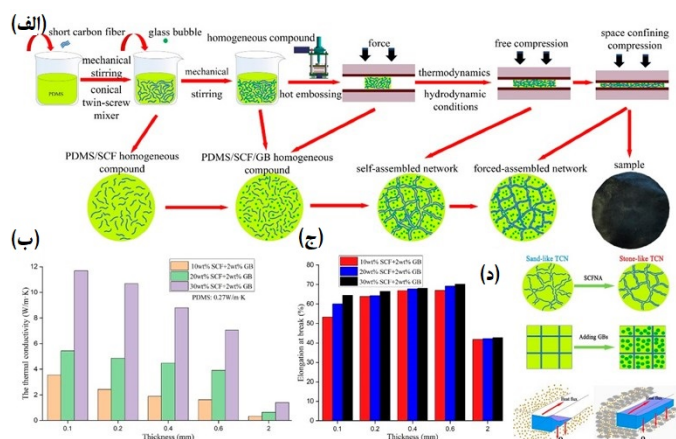
الیاف کربن به عنوان یک نانوپرکننده یک‌بعدی با استحکام و مدول بالا شناخته می‌شود که بیش از ۹۰ درصد آن را کربن تشکیل داده است. این الیاف دارای مقاومت عالی در برابر دماهای بالا، سایش،



شکل ۶. (الف) نمودار شماتیک تهیه نانوذرات هسته-پوسته باریوم تیتانات@نانولوله‌های کربنی چندجداره فوق کوتاه (BT@SSCNT)، (ب) خواص دی‌الکتریک و (ج) هدایت حرارتی فیلم‌های کامپوزیت BT@SSCNT/PVDF [۶۴].

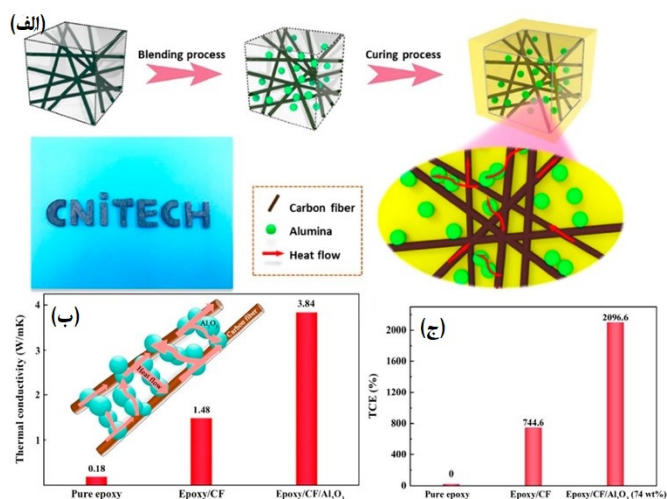


شکل ۷. (الف) فرآیند و اصل تهیه رزین اپوکسی با هدایت حرارتی بالا، (ب) هدایت الکتریکی متناوب (AC) نانوکامپوزیت‌های اپوکسی، (ج) هدایت حرارتی اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت‌های آن با پرکننده‌های نانو مختلف [۶۵].



شکل ۱۰. (الف) نمودار شماتیک روش SCFNA برای تهیه

کامپوزیت‌های PDMS/SCF/GB/شیشه‌ای (GB). (ب) هدایت حرارتی و (ج) کشش در نقطه شکست کامپوزیت‌های PDMS/SCF/GB در ضخامت‌های مختلف نمونه. (د) تبدیل شبکه حرارتی از "شیشه‌شن" به "شیشه سنگ" [۷۳].



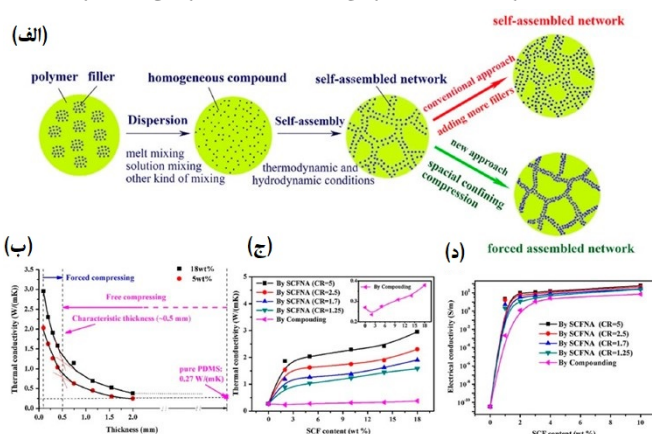
شکل ۱۱. (الف) شمایی از تهیه کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف کربن/Al₂O₃. (ب) هدایت حرارتی و (ج) افزایش هدایت حرارتی (TCE) اپوکسی خالص، اپوکسی/CF و کامپوزیت‌های اپوکسی/CF/Al₂O₃ [۷۴].

درصد وزنی Al₂O₃ می‌رسد (شکل ۱۱ ب و ج). جدول ۴ هدایت حرارتی کامپوزیت‌های الیاف کربن/پلیمری را به تصویر می‌کشد.

۴-۲- پرکننده‌های غیرآلی/کامپوزیت‌های پلیمری

پرکننده‌های حرارتی غیرآلی معمولاً دارای هدایت حرارتی بالا و خواص عایق الکتریکی هستند و عمدتاً برای تهیه کامپوزیت‌های حرارتی عایق استفاده می‌شوند. پرکننده‌های غیرآلی معمولاً استفاده شده شامل BN، AlN، SiC، Al₂O₃، Si₃N₄ و غیره هستند. هدایت حرارتی نیتريد بور به مراتب بالاتر از سایر پرکننده‌های غیرآلی است.

کامپوزیت‌های پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) با الیاف کوتاه کربن را از طریق روش مونتاژ شبکه اجباری محدود فضایی تولید کردند و این کامپوزیت‌ها با ۱۸ درصد وزنی الیاف کربن و ضخامت ۱/۰ میلی‌متر، هدایت حرارتی بهینه ۲/۹۵۲ وات بر مترکلین و خواص الکتریکی برجسته‌ای نشان دادند (شکل ۹) [۷۲]. ژانگ و همکاران روشی را برای تبدیل شبکه‌های هادی "شیشه‌شن" به "شیشه سنگ" پیشنهاد دادند تا کامپوزیت‌های SCF/PDMS/حباب‌های شیشه‌ای (GB) را با استفاده از SCFNA و افزودن حباب‌های شیشه‌ای به‌دست آورند، که در شکل ۱۰ الف نمایش داده شده است [۷۳]. استفاده از ذرات سخت منجر به کاهش اتلاف حرارت و عملکرد بهتر حذف حجم شد. نتایج نشان می‌دهد حداکثر هدایت حرارتی PDMS/SCF/GB به ۱۱/۶۹ وات بر متر کلین می‌رسد که ترکیبی از ۳۰ درصد وزنی SCF و ۲ درصد وزنی GB می‌باشد، در حالی که از نظر مکانیکی نیز عملکرد بهتری دارد (شکل ۱۰ ب و ج). اتلاف حرارت شبکه‌های حرارتی "شیشه سنگ (Qstone)" به مراتب کمتر از شبکه‌های حرارتی "شیشه شن (Qsand)" بود (شکل ۱۰ د). وانگ و همکاران با استفاده از روشی ساده، کامپوزیت‌های اپوکسی/CF/Al₂O₃ را تهیه کردند؛ در این روش رزین اپوکسی به چارچوب CF/Al₂O₃ که با هم‌زدن آماده شده بود نفوذ می‌کند. این چارچوب باعث کاهش مؤثر مقاومت حرارتی بین زمینه‌ها و CF شده است (شکل ۱۱ الف) [۷۴]. هدایت حرارتی اپوکسی/CF/Al₂O₃ به ۳/۸۴ وات بر متر کلین با ۶/۴ درصد وزنی CF و ۷۴



شکل ۹. (الف) طرح مسیر فناوری روش مونتاژ شبکه اجباری محدود فضایی (SCFNA) و ترکیب متداول. (ب) هدایت حرارتی کامپوزیت‌های PDMS/الیاف کربن کوتاه (SCF) با ضخامت‌های مختلف. (ج) هدایت حرارتی و (د) هدایت الکتریکی کامپوزیت‌های SCF/PDMS [۷۲].

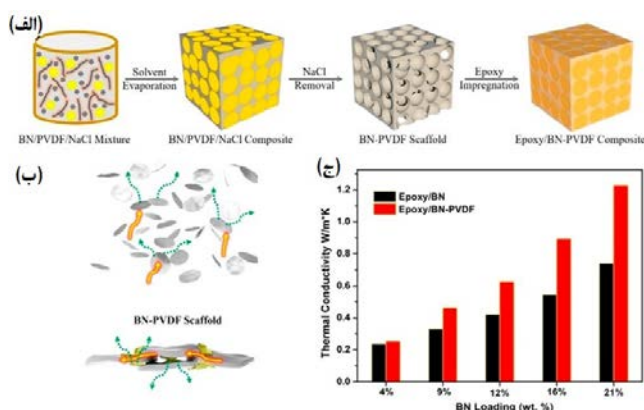
جدول ۴. هدایت حرارتی کامپوزیت‌های الیاف کربن/پلیمری

مرجع	λ (W/m ² .°K)	ترکیب پر کننده و مقدار آن	زمینه
[۷۵]	۱/۸۲	CF ۷۰٪ حجمی	اپوکسی
[۷۶]	۰/۸	۳٪ وزنی CF/۵ درصد وزنی BN-GNP	اپوکسی
[۳۷]	۰/۵۳	rGO /CF ۴/۲۵٪	پلی آمید ایمید
[۷۷]	۲/۷۳	CF ۲۰٪ وزنی	PDMS
[۷۸]	۴/۲۲	۱۲٪ حجمی CF + ۳۰٪ حجمی Al ₂ O ₃	لاستیک
[۷۹]	۱۴/۲	۴۵٪ وزنی CNT و ۵٪ وزنی CNF	سیلیکونی
[۸۰]	۳۰/۶۹	۳۰٪ وزنی Cu-CFelt	اپوکسی
[۸۱]	۲/۸۴	۱۳٪ حجمی 3D-CF	اپوکسی
[۸۲]	۹/۶۸	۳۰/۲٪ وزنی CF-Mxene	اپوکسی

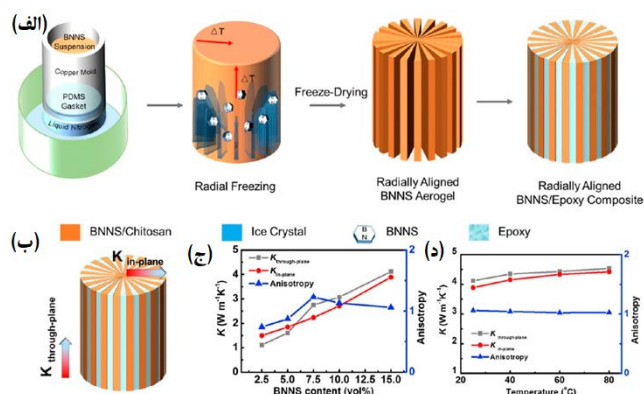
۴-۲-۱- نیتريد بور/کامپوزیت‌های پلیمری

BN ترکیبی از عناصر بور و نیتروژن است که به صورت بلوری از اتم‌های هر دو عنصر تشکیل شده است. این ترکیب شیمیایی شامل ۴۳/۶٪ بور و ۵۶/۴٪ نیتروژن می‌باشد و از خواص برجسته‌ای همچون روانکاری، مقاومت در برابر سایش، هدایت حرارتی بالا و عایق الکتریکی بودن برخوردار است. آرایش‌های مختلف اتم‌های بور و نیتروژن می‌تواند ساختارهای متنوعی ایجاد کند. در بین اشکال مختلف BN، نوع h-BN به دلیل قابلیت بالای خود در اتلاف حرارت اخیراً مورد توجه قرار گرفته است و می‌تواند با گرافن مقایسه شود که در تولید مواد TMM کاربرد دارد. h-BN را می‌توان از طریق روش‌های شیمیایی، حرارتی، مکانیکی و اولتراسونیک پردازش کرد تا لایه‌هایی از h-BN را ایجاد کند و با نیروهای وان‌دروالس لایه‌های BNNS چندگانه را به هم متصل کند. هدایت حرارتی h-BN می‌تواند به ۴۰۰ وات بر متر کلون برسد، در حالی که برای BNNS لایه‌برداری شده این مقدار می‌تواند بین ۱۶۰۰ تا ۲۰۰۰ وات بر متر کلون باشد. به دلیل این خواص برجسته، بسیاری از محققان تمرکز خود را بر تهیه کامپوزیت‌های BN/پلیمری گذاشته‌اند [۸۳]. چن و همکاران داربستی از جنس BN-پلی (وینیلیدین دی‌فلورید) (PVDF) با استفاده از روش الگوی نمکی و PVDF به عنوان چسب تهیه کردند و کامپوزیت‌های اپوکسی را از طریق نفوذ تحت خلأ تولید کردند [۱۰]. نتایج نشان داد که کامپوزیت‌های اپوکسی/BN-

PVDF با ۳۵ درصد وزنی BN دارای هدایت حرارتی بالای ۱/۲۲۷ W/m².K هستند که به دنبال مسیر BN ایجاد شده و توسط چسب PVDF به هم پیوسته است (شکل ۱۲). ما و همکاران [۸۴] کاغذهای کامپوزیتی با ساختار لایه‌ای مشابه صدف از نانوصفحه‌های نیتريد بور عملکردی‌شده با پلی‌دوپامین (BNNS@PDA)/الیاف نانوآرمید (ANF) را با فیلتراسیون و پرس گرم تهیه کردند. این کاغذها خواص حرارتی عالی با هدایت حرارتی درون‌صفحه‌ای ۳/۹۴ W/m².K نشان دادند و ویژگی‌های مکانیکی و پایداری حرارتی برجسته‌ای داشتند، همچون استحکام کششی ۳۶/۸ MPa و شاخص مقاومت حرارتی ۲۲۳/۱ درجه سانتی‌گراد (شکل ۱۳). ژائو و همکاران [۸۵] روش جدیدی برای بهبود هدایت حرارتی کامپوزیت‌های اپوکسی بر اساس اثر هماهنگی میکرو-نانو ارائه دادند، که شامل تهیه BNNS و کامپوزیت‌های BNNS/میکروصفحات نیتريد بور (BNMSs)/اپوکسی با ایجاد شبکه حرارتی سه‌بعدی شد که به هدایت حرارتی ۱/۱۴۸ W/m².K و خواص عایق الکتریکی عالی دست یافتند (شکل ۱۴). هوانگ و همکاران [۸۶] کامپوزیت اپوکسی/نانوصفحه‌های نیتريد بور (BNNS) سه‌بعدی با تراز شعاعی را از طریق ریختن انجمادی شعاعی تهیه کردند که هدایت حرارتی دوطرفه بالا نشان داد، با ۴/۰۲ W/m².K در جهت عمود بر صفحه و ۳/۸۷ در جهت درون‌صفحه‌ای. تغییرات هدایت حرارتی این کامپوزیت‌ها با دما نیز مشخص شده است (شکل ۱۵). جدول ۵ هدایت حرارتی کامپوزیت‌های نیتريد بور/پلیمری را نمایش می‌دهد.



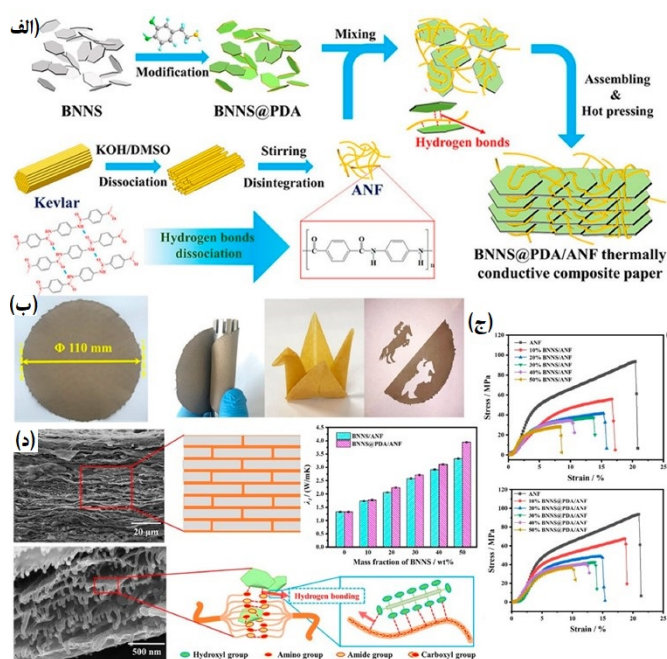
شکل ۱۲. (الف) شمایی از ساخت داربست‌های نیتريد بور (BN)-PVDF و کامپوزیت‌های اپوکسی/BN-PVDF. (ب) مسیر BN ساخته شده که توسط چسب PVDF به هم متصل شده است. (ج) هدایت حرارتی کامپوزیت‌های BN/PVDF [۸۷].



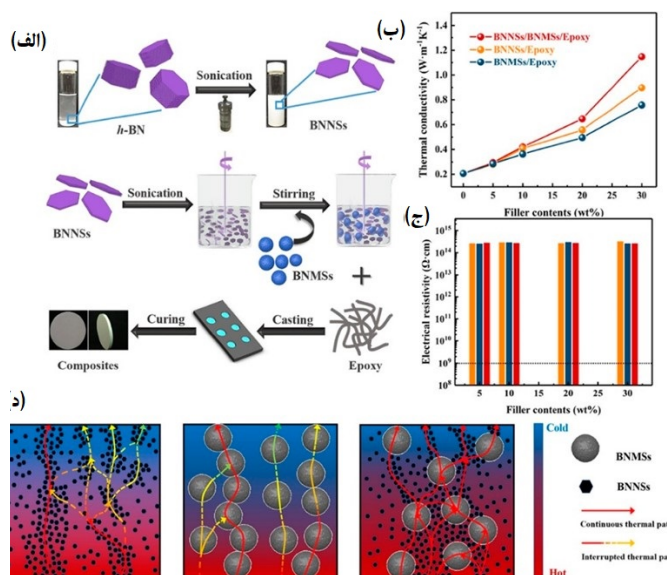
شکل ۱۵. (الف) طرح واره ای از BNNS/اپوکسی با تراز شعاعی، (ب) طرح واره هدایت حرارتی در جهت‌های عمود بر صفحه و درون صفحه‌ای، (ج) هدایت حرارتی کامپوزیت‌های BNNS/اپوکسی، (د) تغییر هدایت حرارتی کامپوزیت‌های BNNS/اپوکسی با دما [۸۶].

۳-۲-۳- سایر کامپوزیت‌های پلیمری با پرکننده‌های غیرآلی

با اینکه عملکرد سایر پرکننده‌های غیرآلی مانند SiC، SiN، Al_2O_3 و Si_3N_4 به خوبی BN نیست، آنها همچنان از جمله پرکننده‌های مهم برای ساخت کامپوزیت‌های حرارتی هادی و عایق محسوب می‌شوند. اوپانگ و همکارانش [۱۰۲] از پلازما حرارتی با فرکانس بالا برای اصلاح نانوصفحه‌های Al_2O_3 به عنوان پرکننده‌های حرارتی استفاده کردند تا کامپوزیت‌های Al_2O_3 /لاستیک سیلیکونی (SR) را تولید نمایند (شکل ۱۶). این کامپوزیت‌ها دارای هدایت حرارتی بالای ۱/۵۳ وات بر متر کلین و مقاومت حجمی مناسبی بودند. علاوه بر این، کامپوزیت‌های SR/Al_2O_3 همچنین خواص دی‌الکتریک مناسب، خواص مکانیکی برجسته و پایداری حرارتی مطلوبی را از خود نشان دادند. هان و همکاران [۱۰۳] نانوصفحه‌های کاربید سیلیکون-نیتريد بور (SiC-BNNS) با ساختاری ناهمگن را به عنوان پرکننده‌های حرارتی و عایق از طریق روش‌های سل-ژل و رشد درجا تهیه کردند. برای آماده‌سازی نانوکامپوزیت‌های حرارتی SiC-BNNS/اپوکسی، از روش مخلوط کردن-ریختن بهره بردند (شکل ۱۷الف). در شکل ۱۷ب تصاویر SEM از SiC-BNNS با نسبت‌های مختلف نمایش داده شده است. به وضوح می‌توان دید که SiC بر روی سطح BNNS ها رشد کرده است. کامپوزیت‌های SiC-BNNS/اپوکسی با بار پرکننده ۲۰ درصد وزنی، هدایت حرارتی ۰/۸۹ W/m·K و همچنین خواص شکست و عایق

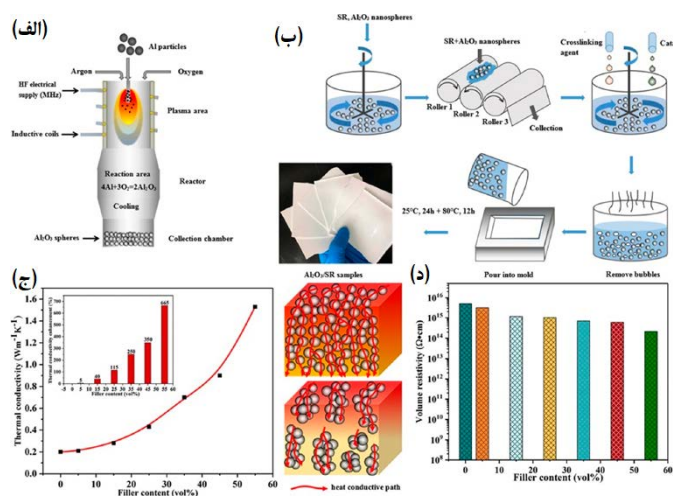


شکل ۱۳. (الف) شمایی از فرآیند تهیه کاغذهای کامپوزیت نانوصفحه نیتريد بور BNNS@PDA/الیاف نانوأرمید (ANF)، (ب) عکس‌های کاغذهای کامپوزیت BNNS@PDA/ANF، (ج) منحنی‌های تنش-کرنش کششی کاغذهای کامپوزیت BNNS@PDA/ANF و BNNS@PDA/ANF، (د) ریخت شناسی مقطع عرضی کاغذهای کامپوزیت BNNS@PDA/ANF/50wt.%BNNS و ضریب هدایت حرارتی درون صفحه‌ای کاغذهای کامپوزیت [۸۴].

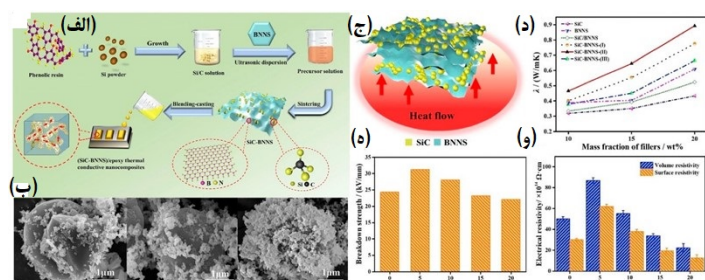


شکل ۱۴. (الف) طرح واره، (ب) هدایت حرارتی و (ج) خواص الکتریکی کامپوزیت‌های میکروصفحات نیتريد بور (BNMS)/نانوصفحه‌های نیتريد بور (BNNS)/اپوکسی. (د) مسیرهای هدایت حرارتی در کامپوزیت‌های BNNS/اپوکسی، BNMS/اپوکسی و BNMS/BNNS/اپوکسی [۴۷].

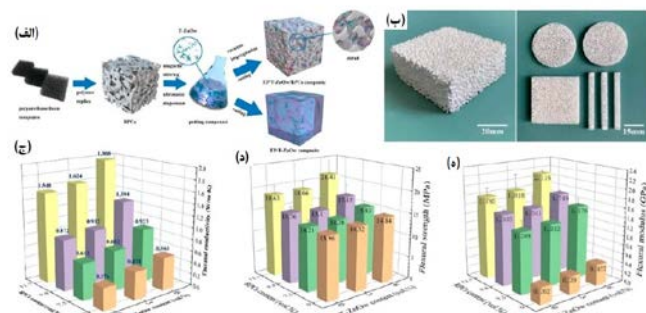
پایه به معرفی کردند تا کامپوزیت‌های $T-ZnO_w / Al_2O_3 / EP$ با ساختار شبکه‌ای پیوسته و متداخل ایجاد کنند (شکل ۱۸ الف).



شکل ۱۶. (الف) طرح واره فرآیند تهیه نانوصفحات Al_2O_3 با پلاسما حرارتی و (ب) کامپوزیت‌های SR/Al_2O_3 . (ج) هدایت حرارتی کامپوزیت‌های SR/Al_2O_3 و (د) مدل‌های جریان حرارت و (د) مقاومت حجمی کامپوزیت‌های SR/Al_2O_3 [۱۰۲].



شکل ۱۷. (الف) طرح واره برای ساخت نانوکامپوزیت‌های حرارتی رسانا-SiC (BNNS)، (ب) تصاویر SEM از (I)-(1/2)-(SiC-BNNS)، (ج) مکانیزم حرارتی رسانا برای پرکننده‌های SiC-BNNS با ساختار ناهمگن. (د) استحکام شکست و (و) مقاومت الکتریکی نانوکامپوزیت‌های حرارتی رسانا-SiC-BNNS (II)-(1/2)-(SiC-BNNS) [۱۰۳].



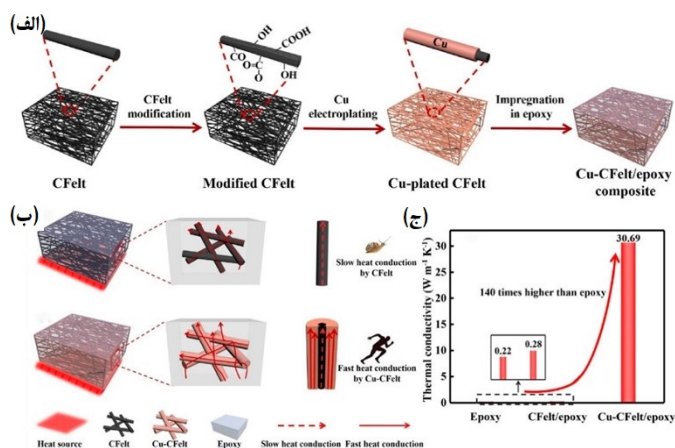
شکل ۱۸. (الف) طرح واره برای ساخت کامپوزیت‌های $EP/$ سرامیک‌های آلومینای متخلخل شبکه‌ای (RPCs)/ $T-ZnO_w$ ، (ب) تصاویر معمولی از سرامیک‌های متخلخل شبکه‌ای (چپ) و نمونه‌های پردازش شده کامپوزیت‌های $EP/$ RPCs (راست)، (ج) هدایت حرارتی، (د) استحکام خمشی و (ه) مدول خمشی کامپوزیت‌های $T-ZnO_w / RPCs / EP$ [۱۰۴].

الکتریکی مطلوبی را در اشکال ۱۷ و ۱۸ نشان دادند. وو و همکاران [۱۰۴] نوعی سرامیک آلومینای متخلخل شبکه‌ای (RPCs) را با افزودن روی اکسید ($T-ZnO_w$) به عنوان

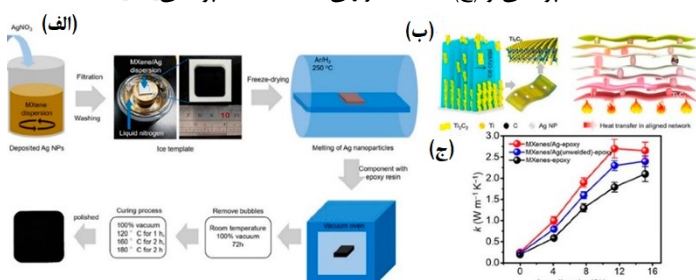
جدول ۵. هدایت حرارتی کامپوزیت‌های نیتريد بور/پلیمری

مرجع	λ (W/m·K)	ترکیب پرکننده و مقدار آن	زمینه
[۸۸]	۲۶/۱۳	۲۰٪ وزنی نیتريد بور	پلی آمید ۶۶ (PA66)
[۸۹]	۱/۵۶	۴/۴٪ حجمی نانوصفحات نیتريد بور	NFC
[۹۰]	۵/۵۷	۵۰٪ وزنی نیتريد بور	پلی استایرن/پلی پروپیلن (PS/PP)
[۹۱]	۱/۱۶	۳۵٪ وزنی نانوصفحات نیتريد بور	PDMS
[۸۶]	۴/۰۲	۱۵٪ حجمی نانوصفحات نیتريد بور	EP
[۹۲]	۱/۰۱	۳۰٪ وزنی نیتريد بور	پلی اتر اتر کتون (PEEK)
[۹۳]	۱۲۲/۵	۷۰٪ وزنی نیتريد بور	ANF
[۹۴]	۲۳/۰۳	۵۰٪ حجمی نیتريد بور هگزائگونال	پلی اتیلن با وزن مولکولی فوق العاده بالا (UMEPE)
[۹۵]	۱۳/۲	۵۰٪ وزنی نانوصفحات نیتريد بور	اتیلن وینیل استات (EVA)
[۹۶]	۲/۷۷	۲۷٪ وزنی نیتريد بور-چیتوسان	پلی اتیلن گلیکول (PEG)
[۴۱]	۱۱/۸۸	۶۰٪ وزنی نانوصفحات نیتريد بور	PVDF
[۹۷]	۲۰/۶۴	۴۰٪ وزنی نانوصفحات نیتريد بور	NFC
[۹۸]	۱/۶۵	۱۰٪ وزنی نیتريد بور	EP
[۹۹]	۵/۴	۱۰٪ وزنی نیتريد بور-نقره-گرافن	EP
[۱۰۰]	۱/۵۱	۲۵٪ وزنی نیتريد بور هگزائگونال-نانولوله کربنی چندجداره-اکسید سیلیسیم	PVDF
[۳۵]	۱۵/۴۹	۰/۹٪ وزنی ND + ۲۹/۱٪ نانوصفحات نیتريد بور	PVA
[۱۰۱]	۵/۸۶	۴۰٪ وزنی APTES-نانوصفحات نیتريد بور	EP
[۶۳]	۱۱/۲۰۳	۱٪ وزنی اکسید گرافن-۲۰٪ وزنی نیتريد بور	PI

و همکارانش شبکه سه‌بعدی و متصل به هم از جنس مس برای بهبود ویژگی‌های هدایت حرارتی کامپوزیت‌های اپوکسی طراحی کردند. آن‌ها از الیاف کربن به عنوان ساختار سه‌بعدی استفاده کرده و مس را بر روی سطح این الیاف آبکاری الکتریکی کردند که شبکه مسی را ایجاد می‌کند و به عنوان مسیر پیوسته‌ای برای انتقال حرارت عمل می‌کند (شکل ۱۹). کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف کربن و اپوکسی با محتوای مس ۳۰ درصد وزنی، هدایت حرارتی بسیار بالایی $30.69 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ را نشان دادند که نزدیک به 140 برابر بیشتر از اپوکسی خالص است. علاوه بر این، این کامپوزیت‌ها خاصیت مکانیکی بی‌نظیری دارند و هدایت الکتریکی بالا برابر با $10^4 \times 7/49 \text{ S/cm}$ ارائه می‌دهند. جی و گروهش [۱۱۵] آئروژل‌های Ag/MXene را با استفاده از روش‌های الگوی یخ و خشک‌کن انجمادی تهیه کردند و فیلم‌های نانوکامپوزیت Ag/MXene-اپوکسی را از طریق نفوذ تحت خلأ ساختند (شکل ۲۰). این نانوذرات Ag بر روی سطح MXene قرار گرفته و مقاومت تماس بین نانوصفحه‌ها را کاهش می‌دهند و موجب ایجاد فیلم‌های



شکل ۱۹. (الف) طرح واره فرآیند ساخت کامپوزیت‌های Cu-الیاف کربن (CFelt)/اپوکسی، (ب) طرح واره هدایت حرارتی در کامپوزیت‌های CFelt/اپوکسی و Cu-CFelt/اپوکسی و (ج) هدایت حرارتی CFelt/اپوکسی [۸۰].



شکل ۲۰. (الف) نمودار جریان دقیق تهیه فیلم‌های نانوکامپوزیت Ag/MXene-اپوکسی، (ب) شبکه‌های 3D و انتقال حرارت و (ج) هدایت حرارتی فیلم‌های نانوکامپوزیت Ag/MXene-اپوکسی [۱۱۵].

شکل ۱۸ ب تصاویری از سرامیک‌های متخلخل شبکه‌ای (سمت چپ) و نمونه‌های پردازش شده (سمت راست) را نشان می‌دهد. این کامپوزیت‌ها هدایت حرارتی چشمگیر $1/968 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ و خواص مکانیکی برجسته‌ای داشتند (شکل ۱۸ ج-ه). جدول ۶ هدایت حرارتی سایر کامپوزیت‌های پلیمری با پرکننده‌های غیرآلی را نشان می‌دهد.

جدول ۶ هدایت حرارتی سایر کامپوزیت‌های پلیمری با پرکننده‌های غیرآلی.

مرجع	$\lambda (\text{W/m}\cdot\text{K})$	ترکیب پرکننده و مقدار آن	زمینه
[۲۲]	۱/۲۱	۹٪ وزنی $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{rGO}$	EP
[۱۰۵]	۱/۳۱	۲۰٪ حجمی ZnOs/ZnOw	SR
[۱۰۶]	۱/۷۳	۶۰٪ وزنی Al_2O_3 و ۸٪ وزنی SiO_2	EP
[۱۰۷]	۲/۵۸	۲۳٪ حجمی $\text{f-Al}_2\text{O}_3$	EP
[۴۳]	۰/۷۲	۳۸٪ وزنی Al_2O_3 و ۲٪ وزنی AlN	پلی‌لاکتیک اسید (PLA)
[۱۰۸]	۱/۳	۶۲٪ حجمی Si_3N_4	پلی تترافلوئورواتیلن (PTFE)
[۱۰۹]	۲/۳۹	۷۰٪ وزنی $\text{ND}+\text{SiC}$	PVDF
[۶۲]	۷/۴۵	۲۰٪ وزنی MgO-rGO	NFC
[۱۱۰]	۱۴/۳۲	۳/۷۱٪ حجمی SiC	EP
[۱۱۱]	۱۰/۲۶	۶/۵۲٪ حجمی 3D-SiC	EP
[۱۱۲]	۹/۴۸	۴۲/۷۶٪ حجمی AlN	EP
[۷۸]	۷/۳۶	۱۲٪ حجمی $\text{CFs}+30\% \text{ Al}_2\text{O}_3$	SR
[۱۱۳]	۳/۶۳	۵۵٪ وزنی BN و ۳۰٪ وزنی Al_2O_3	PDMS
[۸]	۴/۱۹	۸۰٪ وزنی AlN	PDMS
[۱۱۴]	۴/۲۰	۲۵٪ وزنی AlN	CNF

۴-۳- پرکننده‌های فلزی/کامپوزیت‌های پلیمری

پرکننده‌های فلزی ویژگی‌های برجسته‌ای در زمینه هدایت حرارتی و الکتریکی دارند. برای نمونه، میزان هدایت حرارتی نقره، مس و آلومینیوم به ترتیب می‌تواند به 430 ، 350 – 400 و $234 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ برسد [۴۰]. این پرکننده‌ها برای تولید TCPCهایی با عملکرد قدرتمند در حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی مناسب هستند. ژو

مقایسه روش‌های تقویت هدایت حرارتی در نانوکامپوزیت‌های پلیمری از نظر سرعت انتقال در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

۵- کاربردهای کامپوزیت‌های پلیمری حرارتی هادی

۵-۱- دستگاه‌های الکترونیکی (الکترونیک پوشیدنی)

با پیشرفت فناوری، یکپارچگی و توانایی دستگاه‌های الکترونیکی دائماً در حال افزایش است که این امر باعث ایجاد مشکلات جدی در تجمع حرارت می‌شود. کامپوزیت‌های پلیمر رسانای گرما (TCPC) به دلیل کارایی بالای خود در مدیریت حرارت به مواد اصلی در دستگاه‌ها و سیستم‌های الکترونیکی مدرن تبدیل شده‌اند [۱۲۱]. TCPC ها خواص مطلوب هدایت حرارتی و عایق الکتریکی مواد معدنی را با مزایای سبک‌وزنی، فرآوری آسان و هزینه پایین پلیمرهای آلی ترکیب می‌کنند. این ویژگی‌ها باعث استفاده گسترده از آنها در مواد زیرپرکننده و مواد انتقال حرارت (TIM) شده است. کامپوزیت‌های رزین اپوکسی به دلیل هزینه کم و سهولت فرآوری، جایگاه ویژه‌ای در بسته‌بندی الکترونیکی

جدول ۸. شاخص‌های سرعت عملکرد کامپوزیت‌های پلیمری در انتقال حرارت [۱۲۰].

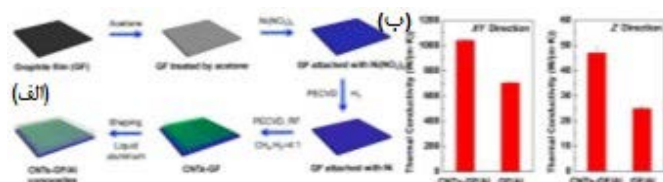
شاخص	توضیح
هدایت حرارتی (k , W/m $\cdot$ K)	میزان گرمای منتقل شده در واحد زمان، مساحت و شیب دمایی.
دیفوزیویته حرارتی / $\alpha = k / \rho C_p$	سرعت پاسخ سیستم به تغییر دما، وابسته به چگالی (ρ) و ظرفیت گرمایی ویژه (C_p). هرچه α بیشتر باشد، انتقال حرارت سریع‌تر است.

جدول ۹. عوامل مؤثر در سرعت انتقال حرارت نانوکامپوزیت‌های پلیمری [۱۲۰].

عامل	تأثیر
نوع نانوذرات پرکننده (فاز رسانا)	نانوذراتی مانند گرافن، CNT، یا BN هدایت بالایی دارند و سرعت انتقال را افزایش می‌دهند.
ساختار و آرایش نانوذرات	هم‌ترازی و تشکیل شبکه‌های پرکولاسیون باعث جهش ناگهانی در k و کاهش زمان پاسخ حرارتی می‌شود.
مقاومت حرارتی فصل مشترک (ITR)	مقاومت زیاد در فصل مشترک، انتقال حرارت را کند می‌کند، حتی اگر k نانوذره بالا باشد.
پخش و توزیع نانوذرات	توزیع یکنواخت نانوذرات باعث ایجاد مسیرهای مؤثر و کاهش زمان انتشار گرما می‌شود.

نانوکامپوزیت با هدایت حرارتی عالی $2/65$ W/m $\cdot$ K با بار کم ۱۵ درصد حجمی شدند. چانگ و همکارانش [۴۰] روش CVD تقویت شده با پلاسما را استفاده کردند تا نانولوله‌های کربنی بر روی سطح فیلم گرافیتی رشد دهند، که عملکرد فصل مشترک و حرارتی کامپوزیت‌های Al/GF را بهبود می‌بخشیدند. در نتیجه، این کامپوزیت‌ها ویژگی‌های مکانیکی و مدیریت حرارتی بهتری دارند و به ترتیب هدایت حرارتی درون صفحه‌ای بالا برابر با $W/m\cdot K$ و 1042 و هدایت عمود بر صفحه 47 W/m $\cdot$ K را نشان دادند (شکل ۲۱). جدول ۷ مربوطه هدایت حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری با پرکننده‌های فلزی را ارائه می‌کند.

سرعت عملکرد کامپوزیت‌های پلیمری در انتقال حرارت به ظرفیت آن‌ها برای هدایت حرارتی (Thermal Conductivity, k) و پاسخ حرارتی (Thermal Response Time) بستگی دارد [۱۲۰]. در اینجا ابتدا مفهوم سرعت انتقال حرارت در چارچوب مهندسی توضیح داده می‌شود، سپس روش‌های مختلف افزایش هدایت حرارتی در نانوکامپوزیت‌های پلیمری از نظر سرعت انتقال بررسی و مقایسه می‌شوند. در مهندسی انتقال حرارت، سرعت عملکرد معمولاً با دو شاخص اصلی جدول ۸ بیان می‌شود. همچنین عوامل مؤثر در سرعت انتقال حرارت نانوکامپوزیت‌های پلیمری در جدول ۹ خلاصه شده است.



شکل ۲۱. (الف) طرح واره فرآیند ساخت بلوک‌های کامپوزیت لایه‌ای CNTs-فیلم گرافیتی (b) هدایت حرارتی Al/GF، Al/GF، CNTs در جهت‌های xy و z [۴۰].

جدول ۷. هدایت حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری با پرکننده‌های فلزی

زمینه	ترکیب پرکننده و مقدار آن	λ (W/m $\cdot$ K)	مرجع
EP	۲۰٪ وزنی Te/MoS $_2$ /Ag	۱۰/۴	[۱۱۶]
PVA	۱۰٪ وزنی Ag-GNPs	۸/۴۵	[۱۱۷]
Polybenzoxazine	۲۵٪ وزنی BN/Cu	۱/۰۴۹	[۱۱۸]
PI	۱۵٪ وزنی Ag/rGO	۲/۱۲	[۵۳]
PMMA	۵۰٪ وزنی Cu/PMMA	۳/۳۸	[۱۱۹]

جدول ۱۰. مقایسه روش‌های تقویت هدایت حرارتی در نانوکامپوزیت‌های پلیمری از نظر سرعت انتقال [۱۲۰].

روش تقویت	توضیح	تأثیر بر سرعت انتقال حرارت	مزایا	معایب
CNT	دارای k بالا	بسیار مؤثر در افزایش α در مسیرهای هم‌تراز	سبک، مؤثر	تمایل به تجمع، هزینه بالا
ورق‌های گرافنی	$k \sim 3000$ W/m·K	بالا، مخصوصاً در جهت صفحه‌ای	پخش خوب = پاسخ سریع	اثر ITR قابل توجه در مرز با پلیمر
h-BN	عایق الکتریکی، هدایت بالا	خوب برای سیستم‌های حساس به جریان	پایداری عالی	نیاز به حجم پرکننده بالا
پرکننده‌های هیبریدی (مثلاً CNT + BN)	ترکیب ویژگی‌ها	بهبود هم‌افزایی در α	بهینه‌سازی چند ویژگی	کنترل ترکیب دشوار
هم‌ترازی نانوذرات (Alignment)	با میدان مغناطیسی یا برشی	افزایش مسیرهای مستقیم و افزایش سرعت	عملکرد بالا در جهت خاص	جهت‌گیری محور، پیچیدگی فرایند

دارند. شیائو و همکارانش [۱۲۲] روشی ساده و دوستدار محیط زیست برای تهیه کامپوزیت‌های رزین اپوکسی و نانوصفحه‌های BN با هدایت حرارتی بالا ارائه دادند. این ماده کامپوزیتی به دلیل ساختار متصل خود، عملکرد حرارتی بسیار خوبی را در همه جهات نشان داده و آینده‌ساز کاربردهای مدیریت حرارت در دستگاه‌های الکترونیکی است. افزون بر این، پایداری حرارتی این ماده کامپوزیتی به شدت افزایش یافته و دمای تجزیه ۲۰ درصد آن به میزان ۳/۲۲۷ درجه سانتی‌گراد نسبت به رزین اپوکسی خالص بالاتر است. یان و گروهش [۱۲۳] کامپوزیت‌های رزین اپوکسی با هدایت حرارتی بالا را با استفاده از ۶۰ درصد وزنی $f\text{-Al}_2\text{O}_3$ ۳ درصد وزنی نانو لوله‌های کربنی چند دیواره و ۸ درصد وزنی

نانوذرات SiO_2 تولید کردند. از طریق پراکندگی یکنواخت و اثر ترکیب مخلوط‌سازی، اجزای مختلف ترکیب شده و یک شبکه حرارتی متصل ایجاد کردند که به هدایت حرارتی کارآمد دست یافت. ماده کامپوزیتی هدایت حرارتی عمود بر صفحه‌ای برابر با ۷۳/۱ وات بر متر کلون داشت که برای مدیریت حرارت در دستگاه‌های الکترونیکی مناسب دارد.

لیو و همکاران [۱۲۴] موفق به ساخت یک ماده فصل مشترک حرارتی (TIM) با قابلیت هدایت حرارتی بالا و بازیافت‌پذیری کامل شدند که بر پایه ویتیرمر اپوکسی و نانوصفحه‌های BN توسعه یافته است. استفاده از پرس گرم ساده به همراه ۴۰ درصد وزنی پرکننده BN، باعث افزایش هدایت حرارتی تا ۳/۸۵ وات بر متر کلون شد که سی برابر بیشتر از رزین اپوکسی اولیه است و به طور قابل توجهی در بهبود دفع حرارت دستگاه‌های الکترونیک مؤثر است. این کامپوزیت اپوکسی BN-40 wt% همچنین از دمای تخریب حرارتی آغازین بالایی معادل ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد برخوردار بوده که نشانه‌ای از پایداری حرارتی عالی آن است. یان و همکاران روش کارآمدی را برای تولید نانوصفحه‌های BN با نسبت ابعادی بسیار بالا ارائه کردند که بر پایه فناوری میکروسیال قرار دارد. نانوصفحه‌ها با دستیابی به نسبت طول به عرض تقریباً ۱۵۰۰ و حداقل نقص‌ها، توانستند فیلم‌های کامپوزیت BNNS تهیه شده با PVA را با هدایت حرارتی درون‌صفحه‌ای به میزان ۶۷/۶ وات بر متر کلون در محتوای ۸۳ درصد وزنی BNNS نشان دهند که بیانگر افزایش هدایت حرارتی حدود ۳۵۵۰۰ برابر است. این فیلم کامپوزیتی به عنوان هیت سینک برای ماژول‌های LED با توان بالا استفاده شده و عملکرد فوق‌العاده‌ای در دفع حرارت نشان داده است. لی و همکاران یک ساختار نوآورانه متقاطع ارائه دادند که پلیمر الکتروکالوریک را با مسیرهای حرارتی بسیار هادی ترکیب می‌کند. این پیکربندی منجر به افزایش ۲۴۰ درصدی در عملکرد الکتروکالوریک و افزایش ۳۰۰ درصدی در هدایت حرارتی پلیمر شده است. با بهره‌گیری از این کامپوزیت الکتروکالوریک، یک دستگاه نمونه‌سازی مقیاس‌پذیر طراحی شد که به ویژه برای خنک‌سازی نقطه حرارتی یک تراشه 5G طراحی شده و شامل عملگر الکترومغناطیسی است [۱۲۵].

به دلیل طراحی‌های فشرده، دستگاه‌های پوشیدنی در شرایط عملیاتی با فرکانس بالا ممکن است دچار انباشت حرارتی شوند.

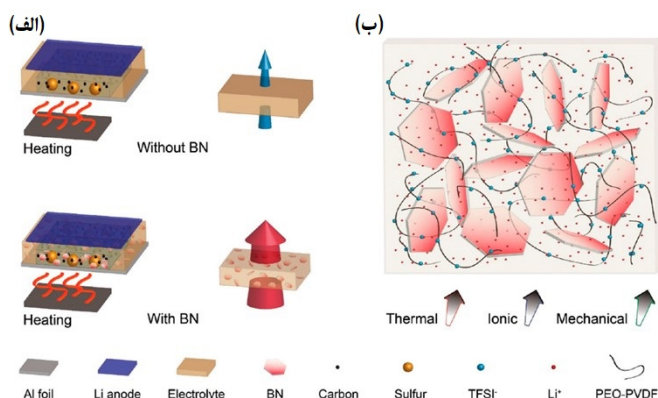
این دستگاه‌ها به دلیل تماس مستقیم با پوست انسان، نباید دمایشان به طور قابل توجهی از دمای بدن انسان فراتر رود؛ از این رو باید از مواد با هدایت حرارتی بالا در بخش‌بندی استفاده شود تا خنک‌سازی و ایمنی دستگاه تضمین گردد. الکترونیک‌های پوشیدنی مینیاتوری که دارای چگالی توان بالایی هستند، نیازمند مدیریت حرارتی پیشرفته، انعطاف‌پذیری ایده‌آل و نفوذپذیری عالی هستند. ایجاد تعادل میان این الزامات به دلیل تناقض طبیعی میان هدایت حرارتی و ویژگی‌های انعطاف‌پذیری و نفوذپذیری، بسیار چالش‌برانگیز است. با وجود این چالش‌ها، استفاده از نانوکامپوزیت‌های پلیمری حرارتی هادی، در بهبود ویژگی‌های حرارتی دستگاه‌های پوشیدنی انعطاف‌پذیر پیشرفت‌های چشمگیری حاصل کرده است. این نانوکامپوزیت‌های الاستومری با هدایت حرارتی بالا، علاوه بر اطمینان از دفع سریع حرارت تولید شده درون دستگاه، به سرعت به تغییرات حرارتی پاسخ داده و عملکردهای گرمایش و خنک‌سازی را ارائه می‌دهند. مواد پلی ایمید (PI) به دلیل مقاومت حرارتی و پایداری استثنایی خود برای کاربردهای صنعتی الکترونیک بسیار مناسب ارزیابی می‌شوند. با استفاده از روش‌های پلیمریزاسیون درجا، ریسندگی مرطوب و کشش حرارتی، پژوهشی توسط فانگ و همکارانش منجر به پراکندگی یکنواخت نانوپرکننده‌ها و ایجاد پیوند کووالانسی بین BNNS@PDA و زمینه PI با چینش پرکننده‌ها شد. این فرآیند باعث بهبود قابل توجه انتشار حرارت گردید، به گونه‌ای که افزودن ۱۰ درصد وزنی نانوپرکننده TC به هدایت حرارتی $3/44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ دست یافت. ویلامنت حاوی ۵/۰ درصد وزنی BNNS@PDA حداکثر استحکام کششی ۲/۹ GPa را نشان داد. پراکندگی مناسب پرکننده و تعاملات بین سطحی قوی بین BNNS@PDA و زمینه PI که توسط پیوندهای شیمیایی ایجاد شده‌اند، در بهبود ویژگی‌های مکانیکی و هدایت حرارتی الیاف کامپوزیتی نقش مهمی ایفا می‌کنند [۱۲۶].

در مطالعه‌ای دیگر، یان و همکاران بر بهبود هدایت حرارتی پلی ایمید با تمرکز بر تقویت جهت‌گیری زنجیره‌ای و تعاملات بین‌مولکولی کار کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که یک نانوالیاف پلی ایمید الکترورسی شده و فیلم آن پس از پرس گرم به ترتیب دارای هدایت حرارتی ۰/۴۴ و ۰/۹۸ وات بر متر بر کلون در دمای محیط بودند. فرآیند الکترورسی به بهبود جهت‌گیری

زنجیره‌ای کمک کرد، در حالی که فشار بالا و درمان حرارتی در پرس گرم، توسعه پیوندهای $\pi-\pi$ را تسهیل کرده و به طور قابل توجهی هدایت حرارتی افزایش یافته را سبب شد. پس از ۳۰۰۰ چرخه استفاده، هیچ ترک یا لایه‌زدایی بین لایه‌های متناوب مشاهده نشد که نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری و دوام استثنایی ماده سنتز شده است [۱۲۷]. علاوه بر این، روان و همکاران یک فیلم پلی ایمید کریستالی مایع با هدایت حرارتی بالا توسعه دادند که از طریق بهینه‌سازی دامنه مایع کریستالی با دمای پخت حاصل شد [۱۲۸]. هدایت‌های حرارتی درون‌صفحه‌ای و عمود بر صفحه‌ای این فیلم در دمای اتاق به ترتیب ۲/۱۱ و ۰/۳۲ وات بر متر بر کلون بود که به طور قابل توجهی بالاتر از فیلم‌هایی است که خارج از دامنه کریستال مایع پخته می‌شوند. این فیلم همچنین خواص مکانیکی و حرارتی عالی نشان داد که بیانگر پتانسیل آن برای استفاده در دستگاه‌های الکترونیکی انعطاف‌پذیر با دمای بالا است. ساختارها و عملکردهای خودترمیم سریع در دمای اتاق از مواد کامپوزیتی دارای چشم‌اندازهای کاربردی وسیعی هستند؛ با این حال، چالش‌های ساختاری و ترکیبات این مواد باعث پیچیدگی فرآیند خودترمیم می‌شود. یو و همکاران یک ماده کامپوزیتی خودترمیم با هدایت حرارتی بالا توسعه دادند، که قادر به خودترمیم کامل در عرض ۱۰ دقیقه در دمای اتاق است [۱۲۹]. این ماده دارای استحکام کششی شکستگی بالا و هدایت حرارتی مناسب بود و توانست کارایی خودترمیم را به میزان قابل توجهی حفظ کند که نتیجه تعاملات فوق‌مولکولی بین پلیمرها و گرافن بود. تحقیقات و کاربردهای حاصل از این مواد کامپوزیتی منجر به ارزش قابل توجهی در دستگاه‌های الکترونیکی انعطاف‌پذیر می‌شود و پتانسیل پذیرش گسترده آن‌ها در بسیاری از کاربردهای عملی آینده وجود دارد. چه برای بسته‌بندی‌های الکترونیکی یا دستگاه‌های پوشیدنی، چشم‌اندازهای کاربردی این مواد بسیار وسیع است و انتظار می‌رود تأثیر بسیاری بر توسعه فناوری الکترونیکی داشته باشند.

۵-۲- دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی

با پیشرفت سریع خودروهای الکتریکی و انرژی‌های تجدیدپذیر، تقاضا برای دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی به شدت افزایش یافته و باتری‌های یونی لیتیوم و ابرخازن‌ها به نقاط کانونی توجه تبدیل شده‌اند. این دستگاه‌های ذخیره‌سازی در طول چرخه‌های شارژ و



شکل ۲۲. طراحی منطقی الکترولیت پلیمری حالت جامد با افزودنی BN، (الف) تصویر باتری‌های Li-S حالت جامد با الکترولیت‌های مبتنی بر پلیمر و مقایسه شماتیکی انتقال حرارت از طریق الکترولیت‌ها با و بدون افزودنی‌های BN و (ب) طرح یک الکترولیت کامپوزیتی متشکل از ورقه‌های 2D BN و یک پلیمر مخلوط PEO-PVDF با LiTFSI [۱۳۴].

جهت‌گیری ترجیحی گرافن و پارامترهای چاپ دقیق کنترل شده در ساختارهای چند مقیاسه متراکم بود. چنگ و همکارانش [۱۳۳] یک ساختار مدیریت حرارتی کامپوزیت سه‌گانه^۱ PCM باتری مبتنی بر گرافیت منبسط شده، پلیمر و پارافین را توسعه دادند که دارای هدایت حرارتی و الکتریکی بالاست. این ساختار با طراحی دو لایه، از حرارت ژول برای پیش‌گرمایش باتری‌ها استفاده می‌کند و دما را به سرعت به میزان ۲۰/۵ درجه سلسیوس بر دقیقه افزایش داده و کارایی تخلیه را ۳۵/۵ درصد بهبود می‌بخشد.

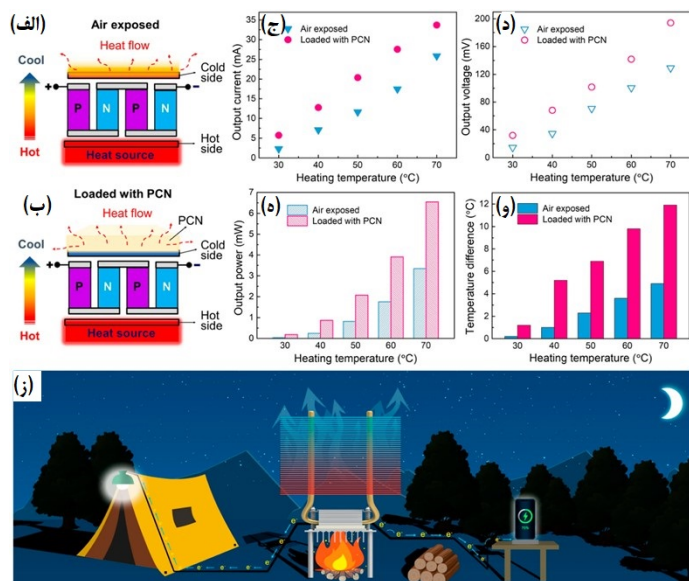
در ابرخازن‌ها، به دلیل چگالی توان بالا، سرعت شارژ و تخلیه سریع و عمر طولانی چرخه، TCPC‌ها اهمیت زیادی دارند. این مواد می‌توانند عملکرد الکتروشیمیایی و هدایت الکتریکی الکترودهای ابرخازن‌ها را به صورت قابل توجهی بهبود دهند. لی و همکاران نانوکامپوزیتی پلیمری شامل نانوصفحه‌های BN توسعه داده‌اند که در دامنه وسیع دماها و فرکانس‌ها خواص دی‌الکتریک استثنایی نشان می‌دهد. افزودن نانوصفحه‌های BN منجر به افزایش قابل توجه TC ماده شده و پایداری عملیاتی در دماهای بالا را ارتقا داده است. این نانوکامپوزیت همچنین سبک بوده، قابلیت الگوگیری دقیق با فتولیتوگرافی داشته و انعطاف‌پذیری مکانیکی عالی دارد. تحقیقات چن بر روی کوپلیمرهای لادِرپان، موادی با هدایت الکتریکی پایین تحت میدان‌های الکتریکی و دماهای بالا، مکانیزم خودآرایی منحصر به فردی را از طریق تعاملات $\pi-\pi$ نشان داد که

تخلیه حرارت قابل توجهی تولید می‌کنند و مدیریت ناکارآمد حرارت می‌تواند منجر به کاهش عملکرد یا حتی خطرات ایمنی شود. TCPC‌ها، که به خاطر هدایت حرارتی عالی خود شناخته شده‌اند، به مواد کلیدی در مدیریت حرارتی دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی تبدیل شده‌اند [۱۳۰].

در طول شارژ و تخلیه، اگر حرارت تولید شده توسط باتری‌ها به طور مؤثر دفع نشود، می‌تواند به دماهای بیش از حدی منجر شود که به طور منفی بر عمر و عملکرد آن‌ها تأثیر می‌گذارد. TCPC‌ها به طور گسترده‌ای در TIM‌ها و جداکننده‌های باتری‌ها استفاده می‌شوند و به دفع سریع حرارت کمک کرده و عملکرد باتری را در محدوده دمای ایمن حفظ می‌کنند. به عنوان مثال، هوانگ و همکاران یک ماده کامپوزیتی انعطاف‌پذیر جدید، استایرن بوتادین استایرن@پارافین/گرافیت منبسط شده (SBS@PA/EG) توسعه دادند. در آزمایش‌های کاربرد باتری، ماژول‌های باتری که از این ماده استفاده می‌کردند، حداکثر دما را در طول تخلیه 5°C زیر 46°C حفظ کردند و اختلاف دما را در محدوده 4°C کنترل کردند که کارایی و عملی بودن آن را در مدیریت حرارتی باتری ثابت می‌کند [۱۳۱].

تیم تحقیقاتی یین با افزودن نانوصفحه‌های دو بعدی BN به الکترولیت مبتنی بر اکسید پلی‌اتیلن، یک الکترولیت با پاسخ حرارتی بهبود یافته توسعه داد (شکل ۲۲). اضافه کردن BN نه تنها پایداری حرارتی الکترولیت را بهبود بخشید، بلکه هدایت یونی و خواص مکانیکی آن را نیز ارتقا داد. این پیشرفت مسیر مهمی برای افزایش ایمنی و عملکرد باتری‌های حالت جامد فراهم می‌کند. گو و تیم تحقیقاتی‌اش [۱۳۲] توانستند کامپوزیت‌های ترموپلاستیک پلی یورتان (TPU) پر شده با گرافن را طی فرآیند چاپ سه‌بعدی توسعه دهند و به هم‌راستایی نامتقارن گرافن دست پیدا کنند. این ساختار چاپ شده سه‌بعدی با هم‌راستایی عمودی، هدایت حرارتی قابل توجهی درون صفحه‌ای با مقدار ۱۱۲ وات بر متر بر کلون در محتوای ۴۵ درصد وزنی گرافن نشان داد. این مقدار هشت برابر بیشتر از ساختارهایی است که به صورت افقی چاپ شده‌اند و به وضوح از کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با ذرات سنتی پیشی می‌گیرد. افزایش چشمگیر هدایت حرارتی عمدتاً به دلیل

^۱ Phase Change Material



شکل ۲۳. کاربرد مدیریت حرارتی فیلم PEG@TPU/BNNS-es (با محتوای ۳۲ wt% BNNSs) در ژنراتور ترموالکتریک (TEG). (الف) مکانیزم TEG در معرض هوا (بالا) و (ب) بارگذاری شده با PEG@TPU/BNNS-es (PCN) (پایین). (ج-ه) جریان خروجی، ولتاژ خروجی و توان خروجی TEGها به ترتیب با/بدون PCC دماهای مختلف گرمایش. (و) اختلاف دما بین طرف‌های گرم و سرد در مقابل دمای گرمایش TEGها. (ز) نمودار مفهومی کاربرد بالقوه TEGها که با فیلم PEG@TPU/BNNS-es برای فعالیت‌های خارج از منزل یکپارچه شده‌اند [۱۳۷].

استراتژی موفق، PCNها را به عنوان گزینه‌ای ایده‌آل برای خنک‌سازی دستگاه‌های با چگالی توان بالا معرفی می‌کند و پتانسیل زیادی در کاربردهای مدیریت حرارتی دارد. ترانسفورماتورها و سایر دستگاه‌های قدرت مانند تجهیزات سوئیچینگ با عایق جامد و راکتورهای اشباع‌شونده، با چالش گرمای بیش از حد مواجه‌اند. وی و تیمش مدلی برای خنک‌سازی ترموفلویید راکتورهای اشباع‌شونده طراحی کردند تا تلفات حرارتی در سیستم‌های جریان مستقیم با ولتاژ بالا کاهش یابد [۱۳۸]. مطالعات آن‌ها نشان داد که افزایش قابلیت هدایت حرارتی لایه عایق رزین اپوکسی (از ۰/۸ به ۱/۲ وات بر متر بر کلون) خنک‌کنندگی را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد و دماهای هسته را کاهش می‌دهد، و بهینه‌سازی این ضریب هدایت حرارتی باعث افزایش کارایی در دفع حرارت می‌شود. به طور کلی، توسعه و استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری با هدایت حرارتی بالا منجر به پیشرفت‌های مهمی در سیستم‌های انتقال قدرت شده است. این مواد نه تنها چالش‌های مدیریت حرارت را حل می‌کنند، بلکه راندمان و اعتمادپذیری دستگاه‌های قدرت را افزایش می‌دهند. با پیشرفت علم مواد، انتظار می‌رود این مواد نقش بیشتری در

آرایه‌های منظمی تشکیل می‌دهد و باعث TC عمودی برابر با $1.0 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \pm 0.06$ می‌شود. این فیلم‌های کوپلیمر به طور مؤثر حرارت را دفع کرده و ثبات چرخه‌ای فوق‌العاده‌ای را در شرایط چالش‌برانگیز ارائه می‌دهند. TCPCها با مدیریت مؤثر حرارت، کاربردهای دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی را متحول کرده و عملکرد و ایمنی دستگاه را بهبود می‌بخشند و نوآوری در فناوری ذخیره‌سازی انرژی را تقویت می‌کنند. با پیشرفت‌های مستمر، انتظار می‌رود TCPCها به توسعه بیشتر فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی کمک زیادی کنند [۱۳۵].

۳-۵- سیستم‌های انتقال

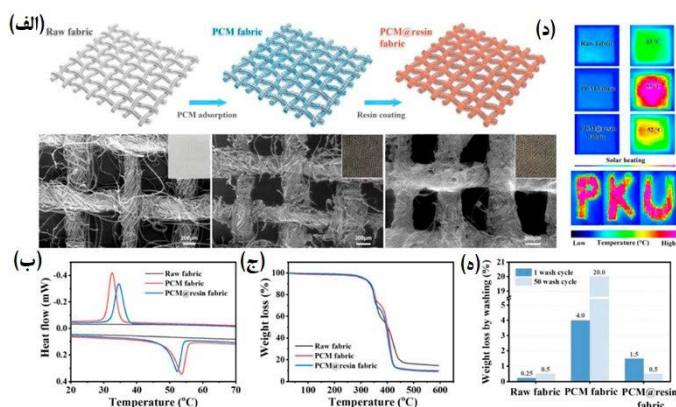
در حوزه سیستم‌های انتقال قدرت، مدیریت حرارتی مواد عایق برای بهبود عملکرد و افزایش عمر تجهیزات بسیار حائز اهمیت است. مواد عایق با هدایت حرارتی پایین معمولاً باعث تجمع حرارت در هنگام عملیات می‌شوند که خطر خرابی و کاهش کارایی را به همراه دارد. پیشرفت‌های اخیر در زمینه کامپوزیت‌های پلیمری با هدایت حرارتی بالا نشان داده‌اند که این مشکلات قابل حل هستند [۱۳۶]. افزایش هدایت حرارتی عایق کابل می‌تواند به طور مؤثر دمای داخلی کابل را کاهش داده و در نتیجه ظرفیت حمل جریان و پایداری عملیاتی آن را افزایش دهد. این بهبودها نه تنها هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهند بلکه عمر کابل را نیز افزایش می‌دهند. برای رفع چالش‌های مواد دی‌الکتریک در اتصالات کابل و مسائل مربوط به مدیریت حرارتی، چی و همکارانش تحقیقاتی را انجام دادند که در آن نانوذرات نقره (Ag NPs) بر روی بور نیتريد هگزاگونال رشد داده شد و سپس با پلیمر اتیلن پروپیلن دی ان (EPDM) ترکیب گردید تا یک ماده کامپوزیت ایجاد شود. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش محتوای نانوذرات نقره منجر به بالا بردن هدایت الکتریکی غیرخطی و هدایت حرارتی کامپوزیت می‌شود. افزایش هدایت حرارتی مواد عایق اصلی می‌تواند دمای عملیاتی داخل ژنراتورها را کاهش داده و ظرفیت خروجی و کارایی آن‌ها را بهبود بخشد. لین و همکارانش با استفاده از الکتروریسی هم‌محور و دیگر روش‌ها، نانوکامپوزیتی برای تغییر فاز (PCN) توسعه دادند (شکل ۲۳). این فیلم PCN، که حاوی ۳۲ درصد وزنی نانوصفحه‌های هم‌راستا و متصل BN است، هدایت حرارتی استثنایی معادل ۳/۲۸ وات بر متر کلون نشان داده است. این

خورشیدی کارآمد است (شکل ۲۴). گائو و همکاران [۱۴۰] یک چارچوب حرارتی سه بعدی با ترکیب نانوالیاف آرامید (ANF) و نانوصفات گرافن (GNP) از طریق روش های آسیاب گلوله ای ایجاد کردند تا تعاملات بین سطحی را تقویت کنند. استفاده از روش ریختن یخ یک طرفه برای تولید ساختاری متخلخل و شش ضلعی با جهت گیری بالا باعث شد که ماده کامپوزیت PCM به TC برابر با $3/9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ دست یابد، که به طور قابل توجهی نرخ و ثبات شارژ و تخلیه حرارتی را افزایش داد. همچنین، استفاده از TCPC ها در ماژول های فتوولتائیک توجه زیادی را به خود جلب کرده است. سلول های فتوولتائیک در حین تبدیل انرژی خورشیدی، بخش قابل توجهی از تابش خورشیدی را به عنوان حرارت از دست می دهند که موجب کاهش کارایی سلول ها می شود. افزودن پرکننده های با TC بالا و عایق الکتریکی در مواد پوششی می تواند دفع حرارت سلول های خورشیدی را به طور مؤثری افزایش دهد.

هوانگ و همکاران [۱۴۱] از نانوصفات گرافن به عنوان پرکننده استفاده کردند و موفق شدند یک ماده کامپوزیت پلی وینیل بوتیرال (PVB) با TC به طور قابل توجهی افزایش یافته تولید کنند. این ماده کامپوزیت PVB حاوی 30 wt% از نانوصفات گرافن به TC برابر با $4/521 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ دست یافت که ۲۰/۵۵

سیستم های قدرت آینده ایفا کنند. ذخیره سازی حرارتی خورشیدی نقش اساسی در افزایش کارایی استفاده از انرژی خورشیدی دارد. مواد تغییر فاز (PCMs)، با توانایی جذب یا آزاد کردن حرارت زیاد هنگام تغییر فاز، برای ذخیره سازی حرارتی خورشیدی مناسب هستند. اما هدایت حرارتی پایین این مواد چالش هایی در کاربردها در تابش خورشیدی متمرکز با دمای بالا ایجاد می کند. افزودن نانوپرکننده ها با هدایت حرارتی بالا به PCM ها عملکرد حرارتی آن ها را بهبود بخشیده و کارایی سیستم های ذخیره سازی حرارتی خورشیدی را افزایش می دهد. PCM ها در جمع آوری و ذخیره سازی انرژی خورشیدی گسترده استفاده می شوند. این مواد حرارت نهان را بدون تغییر دما ارائه کرده و ناپیوستگی در تامین انرژی خورشیدی را کاهش می دهند. هرچند هدایت حرارتی پایین این مواد می تواند نقاط داغ ایجاد کند، که از هدایت یکنواخت جلوگیری کرده و منجر به کارایی کمتر تبدیل انرژی و آسیب احتمالی ساختار مواد می شود. بهبود هدایت حرارتی PCM ها بسیار مهم است. محققان برای بهبود عملکرد، آزمایش هایی با افزودن نانوپرکننده ها انجام داده اند. پنگ و همکاران یک کامپوزیت آئرژل گرافن آنیزوتروپیک با ساختار بهینه شده از طریق انجماد جهت دار و پردازش در دماهای بالا توسعه دادند که به هدایت حرارتی عرضی بالا و طولی رسید و نرخ نگهداری حرارت نهان بالایی داشت.

در یک کار تحقیقاتی یک کامپوزیت جدید PCM مبتنی بر پلی اتیلن گلیکول (PEG 2000) با استفاده از فوم Ti3C2Tx@PVA توسعه داده شد. شکافتن PEG به اسکلت سه بعدی متصل به هم، از طریق روش های نفوذ در خلاء و خشک کردن انجمادی صورت گرفت، که باعث شد TC به $0/428 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ برسد، میزانی که ۴/۲ برابر بیشتر از PEG 2000 خالص است. این ساختار نه تنها TC را بهبود داد بلکه دارای قابلیت اطمینان حرارتی و شیمیایی عالی نیز بود. آفتاب و همکاران [۱۳۹] یک راه حل مؤثر برای ذخیره سازی حرارتی خورشیدی ایجاد کردند که شامل قرار دادن ورقه های نانوفسفرین (PNFs) تهیه شده از بلورهای فسفر سیاه با کیفیت بالا، در یک زمینه PCM جامد-جامد مبتنی بر پلی یورتان (PU) بود. این روش توزیع یکنواخت PNF ها را تضمین کرده و ثبات ساختاری و عملکرد حرارتی کامپوزیت را افزایش می دهد، ارائه دهنده یک مسیر فناوری مؤثر برای ذخیره سازی حرارتی



شکل ۲۴. پارچه ذخیره سازی حرارت خورشیدی. (الف) شمایی از آماده سازی پارچه و تصاویر SEM مربوطه. تصویر کوچک در تصاویر SEM نشان دهنده عکس های واقعی از پارچه های مربوطه است. (ب) ترموگرام های DSC پارچه خام، پارچه های PCM و پارچه PCM@رزین. (ج) ترموگرام های TGA پارچه خام، پارچه های PCM و پارچه PCM@رزین. (د) تصاویر IR پارچه خام، پارچه های PCM و پارچه PCM@رزین قبل و بعد از ۲ دقیقه تابش خورشیدی در 80 mW/cm^2 الگوی حروف PKU در تصاویر IR پارچه های توسعه یافته پس از ۲ دقیقه تابش خورشیدی است. (ه) نمودار میله ای نشان دهنده کاهش وزن پارچه پس از شستشو [۱۳۹].

برابر بیشتر از PVB خالص است. به طور کلی، کاربرد TCPC ها در بخش خورشیدی نه تنها کارایی سیستم های ذخیره سازی حرارتی را افزایش می دهد بلکه مدیریت حرارتی سلول های فتوولتائیک را بهینه سازی کرده و کارایی تبدیل و عمر آن ها را بهبود می بخشد. با ادامه پیشرفت های علم مواد و نانو فناوری انتظار می رود این مواد جدید نقش بیشتری در فناوری خورشیدی ایفا کنند و به بهره برداری و توسعه انرژی های تجدیدپذیر کمک کنند.

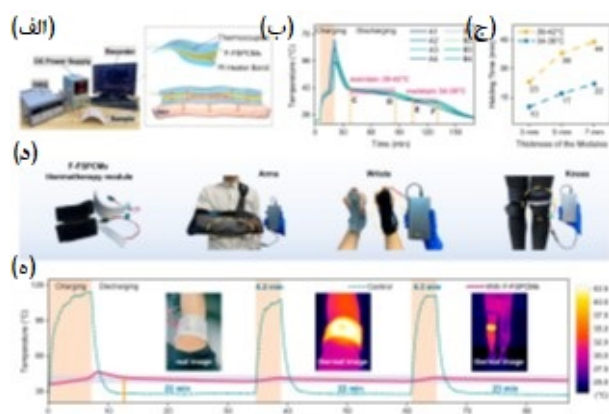
۵-۴- مدیریت حرارتی شخصی

کاربرد کامپوزیت های ترموپلاستیک در مدیریت حرارتی شخصی روز به روز اهمیت بیشتری پیدا می کند، زیرا ادغام آن ها در پارچه ها و لباس ها می تواند فرآیند انتقال حرارت بین بدن انسان و محیط را کارآمدتر کند و به تنظیم دما کمک کند. این کامپوزیت ها در این زمینه، توان بالقوه بالایی نشان می دهند [۱۴۲]. ساختارهای متخلخل در پارچه ها و ترکیب الیاف و هوا نقش مهمی در هدایت حرارتی ایفا می کنند. در محیط های سرد، کامپوزیت هایی با هدایت حرارتی پایین به حفظ گرما کمک می کنند و بالعکس، در محیط های گرم، مواد با هدایت حرارتی بالا، عامل دفع حرارت و کاهش تنش حرارتی هستند. این ویژگی های چندمنظوره، پایه گذار توسعه لباس هایی هستند که با نیازهای مختلف محیطی و فعالیتی سازگارند. سونگ و همکاران یک فیلم کامپوزیت چندلایه از جنس BN-GNP/TPU تولید کردند که از نظر ساختاری با پرکننده های BN و GNP تقویت شده بود. این فیلم دارای هدایت حرارتی بالای ۶/۸۶ وات بر متر بر کلون با غلظت نوزده درصد وزنی BN و GNP است که نسبت به TPU خالص تقریباً سی برابر بیشتر است. پس از ۵۰۰۰ چرخه خمشی، هدایت حرارتی آن به ۶/۲۵ وات بر متر بر کلون باقی ماند و بعد از ۱۰ چرخه شستشو نیز در سطح ۶/۸۵ وات بر متر بر کلون حفظ شد و نشانگر پایداری مکانیکی و آبگریزی عالی آن است که کاربردش را برای لباس های خنک کننده هوشمند بسیار مناسب می کند. هوانگ و همکاران [۱۴۳] یک روش مستقیم برای تولید پارچه های الکترورسی مبتنی بر الاستومر TPU با ویژگی های جانبی دوگانه پیشنهاد کردند که با استفاده از بارگذاری نانوصفات گرافن حاصل شده است. پارچه های نهایی مدیریت حرارتی و کنترل رطوبت عالی داشتند و هدایت حرارتی آن ها معادل ۰/۳۰۷ وات بر متر بر کلون

بود، که مقاومت حرارتی کل را به ۱۰/۶۲ کلون سانتی متر مربع بر وات کاهش داد. آزمایش های انجام شده در شرایط زمستانی نشان داد که سطح پارچه در تماس با پوست انسان ۲/۹ تا ۳/۱ درجه سانتی گراد گرم تر از پارچه های معمولی بود، که نشان دهنده عملکرد عالی دفع حرارت آن هاست. در نهایت، شی و همکاران [۱۴۴] یک روش ساده و مقیاس پذیر برای تولید غشاء نانوفیبر قابل تنفس با هدایت حرارتی بالا و خواص فوق آب گریز توسعه دادند که هدف آن بهبود مدیریت حرارتی پارچه های خنک کننده شخصی است (شکل ۲۵). ویژگی هایی از قبیل هدایت حرارتی ۱۷/۹ وات بر متر بر کلون درون صفحه ای، نرخ انتقال بخار آب ۱۱/۶ کیلوگرم بر متر مربع در روز و زاویه تماس آب ۱۵۳ درجه آن را برای نسل جدید پارچه های خنک کننده بسیار عملی و مؤثر می سازد. جینگ و همکاران نیز یک روش پیوند شیمیایی برای توسعه کامپوزیت های تغییر فاز بر پایه پلیمر انعطاف پذیر پیشنهاد دادند که شامل یک شبکه سه بعدی از کوپلیمرهای اولفینی و استایرن-اتیلن-بوتیلن-استایرن در موم پارافین است [۱۴۵]. این روش خواص مکانیکی و حرارتی مواد را بهبود بخشیده و محدودیت های روش های ترکیب فیزیکی سنتی را پشت سر گذاشته است.

۵-۵- هوافضا

استفاده از کامپوزیت های تقویت شده حرارتی (TCPC) در صنعت



شکل ۲۵. (الف) تنظیم آزمایشی برای ارزیابی ذخیره سازی/آزادسازی حرارت مازول F-FSPCMs. (ب) دمای سطح مازول F-FSPCMs در طول یک چرخه ذخیره سازی/تخلیه حرارت (ضخامت ۷ میلی متر). (ج) زمان نگهداری دما در مازول F-FSPCMs با تأمین حرارت یکسان برای ضخامت های ۳ میلی متر، ۵ میلی متر و ۷ میلی متر. (د) چندین نوع مازول F-FSPCMs یکپارچه و قابل حمل برای حفاظت حرارتی شخصی. (ه) تکامل دما در دستگاه عایق بندی مبتنی بر مازول F-FSPCMs (ضخامت ۵ میلی متر) که بر روی زانو در حین شارژ و تخلیه عمل می کند [۱۴۵].

خواهد یافت. این مواد نه تنها نیازهای وزنی و استحکامی فضاپیماها را برآورده می‌کنند بلکه توسعه سیستم‌های مدیریت حرارتی را نیز تسریع می‌کنند. در مجموع، توسعه TCPC ها نه تنها عملکرد فضاپیماها را ارتقا داده بلکه مسیر جدیدی را برای فناوری هوافضا گشوده است و ظرفیت بالای علم مواد مدرن را در شرایط خاص محیطی نشان می‌دهد.

طول عمر نانوکامپوزیت‌های پلیمری با هدایت حرارتی بالا در کاربردهای مختلف مانند الکترونیک پوشیدنی، ذخیره‌سازی انرژی، مدیریت حرارتی شخصی، انتقال حرارت، و هوافضا، تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی، مکانیکی، حرارتی و شیمیایی قرار دارد. در ادامه به بررسی طول عمر این مواد در هر کاربرد خاص به‌صورت خلاصه پرداخته می‌شود:

➤ الکترونیک پوشیدنی [۱۲۱]

- شرایط کاری: دمای پایین تا متوسط، تماس مستقیم با پوست، رطوبت، تنش‌های مکانیکی متناوب (خم شدن، کشش).
- چالش‌ها: نیاز به انعطاف‌پذیری بالا، مقاومت در برابر تعریق و شستشو.
- طول عمر معمول: ۶ ماه تا ۳ سال بسته به طراحی، ضخامت و کیفیت پیوند بین اجزا.
- راهکار افزایش طول عمر: استفاده از نانوکامپوزیت‌های قابل کشش، تقویت‌شده با گرافن یا CNT با پوشش‌های مقاوم در برابر رطوبت.

➤ ذخیره‌سازی انرژی [۱۳۰]

- شامل: باتری‌ها، ابرخازن‌ها، سیستم‌های ماژول خنک‌کننده.
- نیازمندی‌ها: پایداری شیمیایی بالا در محیط‌های الکترولیتی، حفظ خواص حرارتی در دماهای بالا.
- طول عمر معمول: ۵ تا ۱۰ سال در سیستم‌های بسته صنعتی.

هوافضا نشانه‌ای از پیشرفت‌های چشمگیر فناوری است. این مواد نقش بسیار مهمی در طراحی و کارکرد فضاپیماها و هواپیماها به ویژه در مدیریت حرارت تحت شرایط دمایی بسیار متغیر دارند. مدیریت موثر حرارتی یکی از چالش‌های کلیدی مهندسی است که برای حفظ عملکرد و افزایش عمر تجهیزات فضایی ضروری می‌باشد. در این راستا، TCPC ها به دلیل وزن سبک، استحکام بالا و هدایت حرارتی پیشرفته، بیش از مواد فلزی مرسوم مورد توجه قرار گرفته‌اند. این کامپوزیت‌ها با اضافه کردن موادی چون نانولوله‌های کربنی، گرافن و اکسیدهای فلزی، که با فناوری نانومتری ارتقا یافته‌اند، تقویت شده‌اند. این امر نه تنها به بهبود انتشار حرارت کمک می‌کند، بلکه محافظت الکترومغناطیسی و مقاومت در برابر خوردگی را نیز افزایش داده و این مواد را برای کاربردهای پیچیده هوافضا بسیار مناسب ساخته است [۱۴۶]. به عنوان مثال، TCPC ها به طور گسترده در ساخت بدنه‌های خارجی، بال‌ها و سایر اجزای ساختاری اصلی فضاپیماها به کار می‌روند که باعث بهبود خواص مکانیکی کلی و کاهش وزن می‌شوند. در سیستم‌های مدیریت حرارتی فضاپیماها، این مواد با کارایی بالا می‌توانند تفاوت دما را که ناشی از قرارگیری یک طرف فضاپیما در معرض نور خورشید و طرف دیگر در برابر فضای سرد است، مدیریت کنند. استفاده از TCPC مناسب تضمین می‌کند که دما متعادل بماند و از گرم شدن بیش از حد جلوگیری شود تا از خرابی تجهیزات الکترونیکی جلوگیری گردد. پیشرفت‌ها در فناوری‌های میکرو و نانو منجر به ایجاد سیستم‌های خنک‌کننده میکروسیالی و ساختارهای محصورسازی نوینی شده که کارایی مدیریت حرارتی را بیشتر افزایش می‌دهد. مطالعات نشان داده‌اند که فیلم‌های کامپوزیت با درصد بالای پرکننده می‌توانند هدایت حرارتی بسیار خوبی داشته باشند و حفاظت عالی EMI را فراهم آورند. به عنوان نمونه، فیلم‌های کامپوزیت TPU با ۳۰ درصد حجمی پرکننده به هدایت حرارتی ۱۵/۱۱ وات بر متر بر کلون دست یافته‌اند و بیش از ۲۹ دسی‌بل محافظت EMI ارائه داده‌اند. ریو و همکاران [۱۴۷] با استفاده از الیاف کامپوزیتی پلی‌آمید آروماتیک و نانولوله‌های BN فرآیندهایی را توسعه داده‌اند که ثبات حرارتی فوق‌العاده و حفاظت موثر حرارتی نوترونی ارائه می‌دهد. در آینده، با ادامه پیشرفت‌های نانوفناوری و علم مواد، کاربردهای TCPC ها به مراتب افزایش

¹ Wearable Electronics

- پیشنهاد: استفاده از نانوکامپوزیت‌های با پوشش‌های مقاوم به UV و حرارت بالا (مثلاً نانوذرات سرامیکی).

۵-۶- سایر موارد

TCPCها در زمینه‌های نوظهور، به ویژه در فناوری‌های حیاتی مانند مصالح ساختمانی، حمل و نقل و دستگاه‌های پزشکی به دلیل خواص حرارتی و مکانیکی استثنایی خود، پتانسیل کاربرد گسترده‌ای نشان می‌دهند. در حوزه ساخت و ساز، TCPCها به دلیل ظهور ساختمان‌های سبز و هوشمند نقش محوری برعهده دارند. این مواد در تثبیت دمای داخلی و افزایش کارایی انرژی بسیار مؤثرند. در تولید مصالح ساختمانی عایق و رسانا، TCPCها به تنظیم توزیع حرارت داخلی در سازه‌ها کمک کرده و مصرف انرژی سیستم‌های گرمایشی، تهویه و تهویه مطبوع را کاهش می‌دهند که به صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار کمک می‌کند. در بخش حمل و نقل، TCPCها پتانسیل عظیمی از خود نشان می‌دهند. سیستم‌های مدرن خودروسازی و ریلی برای تضمین ثبات و ایمنی به مدیریت حرارتی کارآمد نیاز دارند. بسیاری از اجزای اصلی این سیستم‌ها از خواص حرارتی پیشرفته کامپوزیت‌های TCPC بهره‌مند شده و به حفظ عملکرد اجزا در دماهای بهینه کمک می‌کنند که ایمنی و کارایی زیرساخت‌های حمل و نقل را تضمین می‌کند [۱۴۸]. کاربرد TCPCها در دستگاه‌های پزشکی نیز قابل ملاحظه است. بسیاری از دستگاه‌های پزشکی هنگام کار حرارت زیادی تولید می‌کنند که نیازمند راه‌حل‌های خنک‌کننده کارآمد برای اطمینان از عملکرد صحیح و ایمن دستگاه‌ها است. TCPCها به تولید اجزای مؤثر مدیریت حرارتی مانند پدهای هادی و صفحات خنک‌کننده کمک کرده و دمای ثابت عملیاتی برای تجهیزات پزشکی را حفظ می‌کنند. این امر قابلیت اطمینان و عمر دستگاه‌ها را افزایش داده و ایمنی بیمار را تضمین می‌کند [۱۴۹]. با پیشرفت‌های نانوفناوری و علم مواد، انتظار می‌رود TCPCها تأثیرات خود را در زمینه‌های مختلف بیشتر گسترش دهند. این مواد نه تنها نیازهای فناوری مدرن به خواص حرارتی بالا و استحکام مکانیکی را برآورده می‌کنند، بلکه با طراحی هوشمند، عملکرد و اطمینان دستگاه‌های مختلف را نیز بهبود می‌بخشند.

۶- چشم‌انداز

- عامل تخریب: تجزیه پلیمری در دمای بالا، خرابی در فصل مشترک نانوذرات.
- پیشنهاد: استفاده از پلیمرهای مهندسی با نانوپرکننده‌های پایدار مثل BN، ALN یا گرافن اکسید کاهش‌یافته.
- سیستم‌های انتقال حرارت (TIMs) [۱۴۰]
- عملکرد: انتقال مؤثر حرارت بین اجزای داغ مانند CPU و هیت‌سینک.
- چالش‌ها: پایداری در چرخه‌های حرارتی متوالی، حفظ چسبندگی و عدم خشک شدن.
- طول عمر معمول: ۳ تا ۷ سال (بسته به نوع پلیمری، سیلیکونی یا اپوکسی).
- استاندارد ارزیابی: ASTM D5470 (برای TIM).
- بهبود دوام: استفاده از چسب‌های هیبریدی و پرکننده‌هایی با توزیع اندازه بهینه.
- مدیریت حرارتی شخصی [۱۴۲]
- مثال‌ها: لباس‌های خنک‌کننده، پارچه‌های هوشمند.
- ویژگی‌ها: انعطاف‌پذیر، سبک، سازگار با بدن انسان.
- طول عمر معمول: ۱ تا ۲ سال در استفاده عادی.
- چالش‌ها: کاهش هدایت حرارتی با شستشو، جذب آلودگی.
- بهبود دوام: استفاده از نانوکامپوزیت‌های با پوشش ضدآب و ضدباکتری.
- هوافضا [۱۴۶]
- نیازمندی‌ها: پایداری در شرایط شدید حرارتی و تشعشعی، وزن سبک، مقاومت در برابر خوردگی.
- مثال‌ها: عایق‌های حرارتی، لایه‌های محافظ در سامانه‌های فضایی.
- طول عمر معمول: ۱۰ تا ۲۰ سال (در صورت استفاده از پلیمرهای مهندسی مانند PEEK، PI).
- چالش‌ها: اکسیداسیون در دمای بالا، تجزیه بر اثر UV.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در فناوری کامپوزیت‌های پلیمری انتقال حرارتی (TCPC)، هنوز چالش‌های بسیاری باقی مانده است. آینده توسعه این مواد باید بر پایه کاربردهای خاص باشد و بر چندین پیشرفت کلیدی تمرکز کند. با رشد مداوم فناوری، انتظار می‌رود پرکننده‌های حرارتی جدید و کارآمدتر، مانند مواد دو بعدی و پرکننده‌های شبکه سه‌بعدی مثل فسفر سیاه و MXenes، توسعه یابد. این مواد به دلیل ویژگی‌های خاص هدایت حرارتی و ساختاری خود به نقاط کانونی تحقیقات تبدیل شده‌اند. با توسعه روش‌های پیشرفته و درمان سطحی، پیوند بهینه بین پرکننده‌ها و زمینه پلیمری می‌تواند منجر به افزایش کارایی هدایت حرارتی شود، که برای بسته‌بندی الکترونیکی و سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی بسیار مهم است. در آینده، طراحی TCPC‌ها احتمالاً بر بهینه‌سازی ساختارهای چند مقیاسی تمرکز خواهد داشت. کنترل دقیق پراکندگی، جهت‌گیری و ساختار شبکه پرکننده‌ها در مقیاس نانو تا ماکرو می‌تواند مسیرهای بهتری برای هدایت حرارتی ایجاد کند. بهبود هدایت حرارتی کلی نیازمند ترکیبی از روش‌های فیزیکی و شیمیایی به همراه مدل‌سازی محاسباتی و شبیه‌سازی‌ها برای طراحی بهتر مواد است. با افزایش تقاضا برای TCPC‌ها، توسعه فرآیندهای تولید کارآمد و مقرون به صرفه ضروری است. فناوری‌هایی مانند چاپ سه‌بعدی و الکتروریسی می‌توانند کمک مهمی به تولید مؤثر این مواد کنند. علاوه بر این، بهینه‌سازی پارامترهای تولید و تجهیزات برای افزایش کارایی و ثبات مواد اهمیت دارد. TCPC‌های آینده باید علاوه بر انتقال حرارتی عالی دارای ویژگی‌هایی مانند عایق الکتریکی، استحکام مکانیکی و ثبات محیطی باشند. این چند عملکردی برای صنعت‌های الکترونیک و خودروسازی بسیار ضروری است. طراحی دقیق و بهینه‌سازی عملکردی می‌تواند مواد کامپوزیتی با عملکرد بالا تولید کند که نیازهای خاص کاربردی را برآورده کنند. بارگذاری زیاد پرکننده‌ها می‌تواند تجمع ایجاد کند و تأثیر منفی بر خواص مکانیکی و هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها داشته باشد. اگرچه اصلاح شبکه‌های هدایت حرارتی می‌تواند هدایت حرارتی را افزایش دهد، اما محتوای پرکننده باید بیش از ۲۰ درصد وزنی باشد تا هدایت حرارتی مطلوب را ارائه دهد. اما این مقدار بر خواص مکانیکی اثر منفی می‌گذارد. بنابراین دستیابی به خواص مطلوب در محتوای کم پرکننده یکی از چالش‌های بزرگ است. علی‌رغم پیشرفت‌های موجود،

مکانیزم‌های حرارتی TCPC‌ها نیازمند بررسی دقیق‌تر هستند. در بررسی نظری این مواد کامپوزیتی، شکل‌های هدایت حرارتی ساده انگارانه هستند و تئوری‌های موجود عمق کافی ندارند. تحقیقات بیشتر در زمینه مکانیزم‌های حرارتی، هدایت فونون‌ها و انتقال آن‌ها در سطوح ضروری است. به طور کلی، تحقیقات در زمینه TCPC‌ها به سمت مواد کارآمدتر، هوشمندتر و سازگارتر با محیط زیست حرکت می‌کند. با کشف مواد جدید و استفاده از فناوری‌های نوین، انتظار می‌رود که این مواد کاربرد گسترده‌تری در صنایع مانند انرژی، الکترونیک و خودرو پیدا کنند و راه‌حل‌های مؤثری برای مشکلات مدیریت حرارتی ارائه دهند. نتیجه‌گیری‌ها و چشم‌اندازها نشان‌دهنده باز بودن مسیرهای تحقیقاتی جدید برای ارتقای طراحی و تولید این مواد هستند.

با توجه به وضعیت تحقیق و روند توسعه TCPC‌ها، همچنین نیاز به انجام تحقیقات زیر احساس می‌شود:

۱. مکانیزم هدایت حرارتی TCPC‌ها هنوز به طور کامل درک نشده است. برای تحلیل دقیق‌تر دلایل تشکیل شبکه حرارتی توسط پرکننده‌های حرارتی در زمینه پلیمری و افزایش هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها، نیاز به ایجاد مدل‌های نظری دقیق‌تری داریم.
۲. تأثیر مقاومت حرارتی رابط بر هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها باید به طور عمیق‌تری مورد بررسی قرار گیرد. فرآیندهای انتقال انرژی و اتلاف انرژی در هدایت حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری نیز باید با ترکیب ریاضیات، کامپیوترها و نرم‌افزارهای مرتبط شبیه‌سازی شوند و مدل‌های ریاضی مربوطه ایجاد شوند.
۳. هدایت حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری حرارتی ذاتی نیاز به تحقیقات بیشتری دارد، به ویژه در مورد تأثیر جهت‌گیری زنجیره‌های مولکولی بر هدایت حرارتی در این نوع کامپوزیت‌ها.
۴. با توجه به نواقص موجود در روش‌های تهیه TCPC‌ها، باید روش‌های نوآورانه، مؤثر و پیشرفته‌تری برای بهبود هدایت حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری پیشنهاد شود.
۵. TCPC‌هایی که در حال حاضر در آزمایشگاه تهیه می‌شوند، دارای هدایت حرارتی برتری هستند و حتی از مواد حرارتی تجاری نیز بهتر عمل می‌کنند. با این حال، با توجه به محدودیت‌های هزینه و فرآیند، دستیابی به تولید صنعتی دشوار است. بنابراین، باید به

تحقیقات بنیادی TCPC ها در کاربردهای صنعتی توجه کنیم و ارتقاء محصولات صنعتی را ترویج دهیم.

باور بر این است که پس از غلبه بر این چالش ها، TCPC ها نقش غیرقابل جایگزینی در زمینه های صنعت نظامی، هوافضا، هوش مصنوعی و میکروالکترونیک ایفا خواهند کرد.

۷- نتیجه گیری ها

در کامپوزیت های پلیمری، به دست آوردن هدایت حرارتی عالی همراه با خواص جامع برتر یک چالش بزرگ است. با افزودن پرکننده های حرارتی به زمینه پلیمری، می توان یک مسیر حرارتی عالی ایجاد کرد و نرخ انتشار فونون ها در این مسیر افزایش می یابد. توانایی مدیریت حرارتی TCPC ها تقویت می شود تا بتوانند به طور مؤثرتری در تجهیزات الکترونیکی مورد استفاده قرار گیرند. پیشرفت های انقلابی در نانومواد و فناوری پردازش مواد، توسعه سریع انواع جدید پرکننده های حرارتی را ممکن ساخته و امکانات زیادی برای تهیه کامپوزیت های پلیمری با عملکرد بالا فراهم کرده است. در این مرور، مکانیزم هدایت حرارتی کامپوزیت های پلیمری، عوامل مؤثر بر هدایت حرارتی آن ها و روش های مختلف برای بهبود قابلیت هدایت حرارتی این کامپوزیت ها بررسی شد. همچنین برخی مدل های نظری سیستم های هدایت حرارتی، روش های شبیه سازی مختلف برای تحلیل فرآیند هدایت حرارت و کاربرد TMM ها معرفی شده است. بر این اساس، نتایج اصلی زیر قابل استخراج است:

۱. انتقال فونون مکانیزم اصلی هدایت حرارتی در پلیمرها است. زنجیره های پلیمری نامنظم و تعاملات ضعیف بین مولکولی می توانند منجر به پراکندگی شدید فونون ها و مانع از انتقال آن ها شوند که این امر دلیل هدایت حرارتی ضعیف پلیمرها است. پرکننده های مبتنی بر کربن، پرکننده های مبتنی بر گرافیت، پرکننده های غیرآلی و فلزی و پرکننده های ترکیبی دارای هدایت حرارتی بالایی هستند. مهم ترین روش برای بهبود هدایت حرارتی کامپوزیت های پلیمری، ساخت مسیر انتقال فونون ها در زمینه پلیمری با استفاده از پرکننده های حرارتی است.

۲. عوامل متعددی بر هدایت حرارتی کامپوزیت ها تأثیر می گذارند، از جمله نوع پرکننده، اندازه و شکل آن، پراکندگی و توزیع پرکننده

در زمینه و محتوای پرکننده. با استفاده از روش های فیزیکی و شیمیایی مختلف می توان شبکه های حرارتی را برای بهبود هدایت حرارتی کامپوزیت ها در زمینه پلیمری ایجاد کرد.

۳. بر اساس اشکال و انواع مختلف پرکننده ها، مدل های نظری که می توانند با نتایج تجربی سازگار باشند، پیشنهاد شده اند و این مدل ها به تدریج در حال تکامل هستند. بر اساس این مدل ها، می توان کامپوزیت ها را بهتر تحلیل و کاربردی کرد. با این حال، با افزایش روش های تهیه TCPC ها و تنوع بیشتر در انواع پرکننده ها و زیرلایه ها، لازم است که در آینده مدل های نظری جدید و مناسب تری ارائه شود. علاوه بر مدل های نظری، ضروری است که روش های مختلفی برای شبیه سازی هدایت حرارتی کامپوزیت ها هنگام مطالعه مکانیزم هدایت حرارتی و هدایت حرارتی ایجاد شود. در این میان، مدل دینامیک مولکولی و تحلیل المان محدود ANSYS دو روش رایج هستند. نتایج شبیه سازی باید با نتایج تجربی ترکیب شوند تا هدایت حرارتی و عملکرد حرارتی کامپوزیت های پلیمری به طور بهتری تحلیل شود.

۴. با ورود به عصر 5G و کوچک سازی، قدرت بالا و ادغام بالا در دستگاه های الکترونیکی، حرارت انباشته شده در مدار به شدت بر عملکرد و عمر آن ها تأثیر می گذارد، بنابراین بسیار ضروری است که TCPC ها در TIM ها به کار روند. TIM ها در CPU برخی از گوشی های هوشمند یا کامپیوترها برای برآورده کردن نیازهای دفع حرارت دستگاه های الکترونیکی استفاده می شوند. در توسعه آینده دستگاه های الکترونیکی، تحقیق در مورد TIM ها کانون توجه دانشمندان خواهد بود.

منابع

1. J.S. Kang, M. Li, H. Wu, H. Nguyen, Y. Hu, Science, 361, 575-578(2018).
2. S. Wang, Y. Liu, Y. Guo, Y. Lu, Y. Huang, H. Xu, D. Wu, J. Sun, Mater. Today Commun., 25, 101206(2020).
3. S. Li, Q. Zheng, Y. Lv, X. Liu, X. Wang, P.Y. Huang, D.G. Cahill, B. Lv, Science, 361, 579-581(2018).

16. G.-H. Kim, D. Lee, A. Shanker, L. Shao, M.S. Kwon, D. Gidley, J. Kim, K.P. Pipe, *Nat. Mater.*, 14, 295-300(2015).
17. J. Gu, C. Xie, H. Li, J. Dang, W. Geng, Q. Zhang, *Polym. Compos.*, 35, 1087-1092(2014).
18. Y. Su, J.J. Li, G.J. Weng, *Carbon*, 137, 222-233(2018).
19. A. Oluwalowo, N. Nguyen, S. Zhang, J.G. Park, R. Liang, *Carbon*, 146, 224-231(2019).
20. H. Ma, B. Gao, M. Wang, Z. Yuan, J. Shen, J. Zhao, Y. Feng, *J. Mater. Sci.*, 56, 1064-1086(2021).
21. M.G. Rasul, A. Kiziltas, B. Arfaei, R. Shahbazian-Yassar, *NPJ 2D Mater Appl.*, 5, 56(2021).
22. Y. Liu, M. Lu, K. Wu, S. Yao, X. Du, G. Chen, Q. Zhang, L. Liang, M. Lu, *Compos. Sci. Technol.*, 174, 1-10(2019).
23. G. Fugallo, A. Cepellotti, L. Paulatto, M. Lazzeri, N. Marzari, F. Mauri, *Nano Lett.*, 14, 6109-6114(2014).
24. J. Li, Y. Xiong, X. Wang, S. Yan, C. Yang, W. He, J. Chen, S. Wang, X. Zhang, S. Dai, *Mater. Sci. Eng. A*, 626, 400-405(2015).
25. B. Shen, W. Zhai, W. Zheng, *Adv. Funct. Mater.*, 24, 4542-4548 (2014).
26. N. Song, D. Cao, X. Luo, Q. Wang, P. Ding, L. Shi, *Compos. - A: Appl. Sci.*, 135, 105912(2020).
27. E. Pop, D. Mann, Q. Wang, K. Goodson, H. Dai, *Nano Lett.*, 6, 96-100(2006).
28. H. Chen, V.V. Ginzburg, J. Yang, Y. Yang, W. Liu, Y. Huang, L. Du, B. Chen, *Prog. Polym. Sci.*, 59, 41-85(2016).
4. W. Si, J. Sun, X. He, Y. Huang, J. Zhuang, J. Zhang, V. Murugadoss, J. Fan, D. Wu, Z. Guo, *J. Mater. Chem. C.*, 8, 3463-3475(2020).
5. J. Zhuang, W. Hu, Y. Fan, J. Sun, X. He, H. Xu, Y. Huang, D. Wu, *Microsyst. Technol.*, 25, 381-388(2019).
6. N. Song, D. Jiao, S. Cui, X. Hou, P. Ding, L. Shi, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 9, 2924-2932(2017).
7. Y. Li, X. Tian, W. Yang, Q. Li, L. Hou, Z. Zhu, Y. Tang, M. Wang, B. Zhang, T. Pan, *Chem. Eng. J.*, 358, 718-724(2019).
8. C.-R. Yang, C.-D. Chen, C. Cheng, W.-H. Shi, P.-H. Chen, T.-P. Teng, *Int. J. Therm. Sci.*, 155, 106431(2020).
9. D. Wu, J. Sun, Y. Liu, Z. Yang, H. Xu, X. Zheng, P. Gou, *Polym. Eng. Sci.*, 57, 268-274(2017).
10. X. Chen, J.S.K. Lim, W. Yan, F. Guo, Y.N. Liang, H. Chen, A. Lambourne, X. Hu, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 12, 16987-16996(2020).
11. D. Zhang, H. Yang, J. Pan, B. Lewis, W. Zhou, K. Cai, A. Benatar, L.J. Lee, J.M. Castro, *Compos. B: Eng.*, 182, 107646(2020).
12. N. Burger, A. Laachachi, M. Ferriol, M. Lutz, V. Toniazzo, D. Ruch, *Prog. Polym. Sci.* 61, 1-28(2016).
13. Y. Guo, K. Ruan, X. Shi, X. Yang, J. Gu, *Compos. Sci. Technol.*, 193, 108134(2020).
14. Y. Zhang, Y.-J. Heo, Y.-R. Son, I. In, K.-H. An, B.-J. Kim, S.-J. Park, *Carbon*, 142, 445-460(2019).
15. Y. Guo, Z. Lyu, X. Yang, Y. Lu, K. Ruan, Y. Wu, J. Kong, J. Gu, *Compos. B: Eng.*, 164, 732-739(2019).

42. S. Yuan, J. Bai, C.K. Chua, J. Wei, K. Zhou, *Compos. - A: Appl. Sci. Manuf.*, 90, 699-710(2016).
43. Z. Lule, J. Kim, *Compos. - A: Appl. Sci. Manuf.*, 124, 105506(2019).
44. Y. Sohn, T. Han, J.H. Han, *Carbon*, 149, 152-164(2019).
45. X. Wang, C. Zhang, T. Zhang, C. Tang, Q. Chi, J. Che. *Phys.*, 160, 15 (2024).
46. X. Wang, P. Wu, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 9 23, 19934-19944(2017).
47. A. Giri, P.E. Hopkins, *Adv. Funct. Mater.*, 30 (2019).
48. S.M. Ha, H.L. Lee, S.-G. Lee, B.G. Kim, Y.S. Kim, J.C. Won, W.J. Choi, D.C. Lee, J. Kim, Y.T. Yoo, *Compos. Sci. Technol.*, 88, 113-119(2013).
49. F. Zhang, K. Fan, F. Saba, J. Yu, *Carbon*, 169, 416-428(2020).
50. C. Liang, H. Qiu, Y. Han, H. Gu, P. Song, L. Wang, J. Kong, D. Cao, J. Gu, *J. Mater. Chem. C.*, 7, 2725-2733(2019).
51. X. Wang, P. Wu, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 11, 21946-21954(2019).
52. Y. Zhang, J.R. Choi, S. Park, *Compos. - A: Appl. Sci. Manuf.*, 109, 498(2018).
53. Y. Guo, X. Yang, K. Ruan, J. Kong, M. Dong, J. Zhang, J. Gu, Z. Guo, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 11, 25465-25473(2019).
54. C. Ji, C. Yan, Y. Wang, S. Xiong, F. Zhou, Y. Li, R. Sun, C.-P. Wong, *Compos. B: Eng.*, 163, 363-370(2019).
55. H. Liu, S. Gu, H. Cao, X. Li, Y. Li, *Compos. Commun.*, 19, 25-29(2020).
29. B. Guo, Z. Tang, L. Zhang, *Prog. Polym. Sci.*, 61, 29-66(2016).
30. B.-H. Xie, X. Huang, G.-J. Zhang, *Compos. Sci. Technol.*, 85, 98-103(2013).
31. B. Liu, Y. Li, T. Fei, S. Han, C. Xia, Z. Shan, J. Jiang, *Chem. Eng. J.*, 385, 123829(2020).
32. Z. Zeng, T. Sun, J. Zhu, X. Huang, Z. Yin, G. Lu, Z. Fan, Q. Yan, H.H. Hng, H. Zhang, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 51, 9052-9056(2012).
33. X. Liu, Y. Gao, Y. Shang, X. Zhu, Z. Jiang, C. Zhou, J. Han, H. Zhang, *Polymer*, 203, 122763(2020).
34. Y. Ouyang, G. Hou, L. Bai, B. Li, F. Yuan, *Compos. Sci. Technol.*, 165, 307-313(2018).
35. K. Zhao, G. Liu, W. Cao, Z. Su, J. Zhao, J. Han, B. Dai, K. Cao, J. Zhu, *Polymer*, 206, 122885(2020).
36. C. Fu, C. Yan, L. Ren, X. Zeng, G. Du, R. Sun, J. Xu, C.-P. Wong, *Compos. Sci. Technol.*, 177, 118-126(2019).
37. T. Xu, S. Zhou, S. Cui, N. Song, L. Shi, P. Ding, *Compos. B: Eng.*, 178, 107495(2019).
38. H. Sun, N. Deng, J. Li, G. He, J. Li, *J. Mater. Sci. Technol.*, 61, 93-99(2021).
39. Y. Guo, K. Ruan, X. Yang, T. Ma, J. Kong, N. Wu, J. Zhang, J. Gu, Z. Guo, *J. Mater. Chem. C.*, 7, 7035-7044(2019).
40. J. Chang, Q. Zhang, Y. Lin, C. Zhou, W. Yang, L. Yan, G. Wu, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 10, 38350-38358(2018).
41. C. Teng, L. Su, J. Chen, J. Wang, *Compos. - A: Appl. Sci. Manuf.*, 124, 105498(2019).

70. B. Anis, H. El Fllah, T. Ismail, W.M. Fathallah, A. Khalil, O. Hemeda, Y.A. Badr, J. Mater. Res. Technol., 9, 2934-2945(2020).
71. Z.-G. Wang, Y.-L. Yang, Z.-L. Zheng, R.-T. Lan, K. Dai, L. Xu, H.-D. Huang, J.-H. Tang, J.-Z. Xu, Z.-M. Li, Compos. Sci. Technol., 194, 108190(2020).
72. X. He, Y. Huang, Y. Liu, X. Zheng, S. Kormakov, J. Sun, J. Zhuang, X. Gao, D. Wu, J. Mater. Sci., 53, 14299-14310(2018).
73. H. Zhang, X. Zhang, D. Li, X. Yang, D. Wu, J. Sun, Compos. Commun., 22, 100509(2020).
74. H. Wang, L. Li, Y. Chen, M. Li, H. Fu, X. Hou, X. Wu, C.-T. Lin, N. Jiang, J. Yu, ACS Omega, 5, 1170-1177(2020).
75. Y.-H. Zhao, Y.-F. Zhang, S.-L. Bai, X.-W. Yuan, Compos. B: Eng., 94, 102-108(2016).
76. M. Owais, J. Zhao, A. Imani, G. Wang, H. Zhang, Z. Zhang, Compos. A: Appl. Sci. Manuf., 117, 11-22(2019).
77. J. Wei, M. Liao, A. Ma, Y. Chen, Z. Duan, X. Hou, M. Li, N. Jiang, J. Yu, Compos. Commun., 17, 141-146(2020).
78. J. Ji, S.-W. Chiang, M. Liu, X. Liang, J. Li, L. Gan, Y. He, B. Li, F. Kang, H. Du, Thermochim. Acta., 690, 178649(2020).
79. T. Goto, T. Ito, K. Mayumi, R. Maeda, Y. Shimizu, K. Hatakeyama, K. Ito, Y. Hakuta, K. Terashima, Compos. Sci. Technol., 190, 108009(2020).
80. F. Xu, Y. Cui, D. Bao, D. Lin, S. Yuan, X. Wang, H. Wang, Y. Sun, Chem. Eng. J., 388, 124287(2020).
56. W. Chen, K. Wu, Q. Liu, M. Lu, Polymer, 186, 122075(2020).
57. C. Du, M. Cao, M. Li, H. Guo, R. Liu, B. Li, Compos. Sci. Technol., 192, 108106(2020).
58. B. Yang, Y. Pan, Y. Yu, J. Wu, R. Xia, S. Wang, Y. Wang, L. Su, J. Miao, J. Qian, Polym. Test., 89, 106575(2020).
59. S. Gong, X. Cheng, Y. Li, X. Wang, Y. Wang, H. Zhong, Powder Technol., 367, 32-39(2020).
60. C. Li, L.-Y. Tan, X.-L. Zeng, D.-L. Zhu, R. Sun, J.-B. Xu, C.-P. Wong, Compos. Sci. Technol., 188, 107970(2020).
61. J. He, H. Wang, Q. Qu, Z. Su, T. Qin, Y. Da, X. Tian, Mater. Today Commun., 25, 101584(2020).
62. M. Ma, L. Xu, L. Qiao, S. Chen, Y. Shi, H. He, X. Wang, Chem. Eng. J., 392, 123714(2020).
63. X. He, Y. Wang, Ind. Eng. Chem. Res., 59, 1925-1933(2020).
64. H.-Y. Wang, Y.-b. You, J.-W. Zha, Z.-M. Dang, Compos. Sci. Technol., 200, 108405(2020).
65. R. Wang, C. Xie, S. Luo, H. Xu, B. Gou, L. Zeng, Mater. Today Commun., 24, 100985(2020).
66. X. Wang, P. Wu, ACS Appl. Mater. Interfaces., 10, 34311-34321(2018).
67. M.K. Smith, V. Singh, K. Kalaitzidou, B.A. Cola, ACS Appl. Mater. Interfaces., 8, 14788-14794(2016).
68. S. Moradi, Y. Calventus, F. Román, J.M. Hutchinson, Polymers, 11, 1156(2019).
69. H. Guo, Q. Wang, J. Liu, C. Du, B. Li, Appl. Surf. Sci., 487, 379-388(2019).

93. G. Xiao, J. Di, H. Li, J. Wang, *Compos. Sci. Technol.*, 189, 108021(2020).
94. A. Shi, Y. Li, W. Liu, J.Z. Xu, D. Yan, J. Lei, Z.M. Li, *Compos. Sci. Technol.*, 184, 107858(2019).
95. Z. Wang, W. Liu, Y.-H. Liu, Y. Ren, L. Yanpu, L. Zhou, J.Z. Xu, J. Lei, Z.M. Li, *Compos. B-Eng.*, 180, 107569 (2020).
96. X. Jia, Q. Li, C. Ao, R. Hu, T. Xia, Z. Xue, Q. Wang, X. Deng, W. Zhang, C. Lu, *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.*, 129, 105710 (2020).
97. Q. Li, Z. Xue, J. Zhao, C. Ao, X. Jia, T. Xia, Q. Wang, X. Deng, W. Zhang, C. Lu, *Chem. Eng. J.*, 383, 123101 (2020).
98. Y.J. Hwang, J.M. Kim, L.S. Kim, J.Y. Jang, M. Kim, S. Jeong, J.Y. Cho, G.-R. Yi, Y.S. Choi, G. Lee, *Compos. Sci. Technol.*, 200, 108456 (2020).
99. M.W. Akhtar, J.S. Kim, M.A. Memon, M.M. Baloch, *Compos. Sci. Technol.*, 195, 108183(2020).
100. B. Hu, H. Guo, Q. Wang, W. Zhang, S. Song, X. Li, Y. Li, B. Li, *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.*, 137, 106038 (2020).
101. Z. Liu, J. Li, X. Liu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12, 6503-6515(2020).
102. Y. Ouyang, X. Li, F. Ding, L. Bai, F. Yuan, *Compos. Sci. Technol.*, 190, 108019(2020).
103. Y. Han, X. Shi, X. Yang, Y. Guo, J. Zhang, J. Kong, J. Gu, *Compos. Sci. Technol.*, 187, 107944(2020).
104. B. Wu, R. Chen, R. Fu, S. Agathopoulos, X. Su, H. Liu, *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.*, 137, 105993(2020).
81. J. Ma, T. Shang, L. Ren, Y. Yao, T. Zhang, J. Xie, B. Zhang, X. Zeng, R. Sun, J.-B. Xu, *Chem. Eng. J.*, 380, 122550(2020).
82. L. Guo, Z. Zhang, M. Li, R. Kang, Y. Chen, G. Song, S.-T. Han, C.-T. Lin, N. Jiang, J. Yu, *Compos. Commun.*, 19, 134-141(2020).
83. C. Yu, Q. Zhang, J. Zhang, R. Geng, W. Tian, X. Fan, Y. Yao, *ACS Appl. Nano Mater.*, 1, 4875-4883(2018).
84. T. Ma, Y. Zhao, K. Ruan, X. Liu, J. Zhang, Y. Guo, X. Yang, J. Kong, J. Gu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12, 1677(2019).
85. L. Zhao, L. Yan, C. Wei, Q. Li, X. Huang, Z. Wang, M. Fu, J. Ren, *J. Phys. Chem. C*, 124, 12723-12733(2020).
86. T. Huang, Y. Li, M. Chen, L. Wu, *Compos. Sci. Technol.*, 198, 108322(2020).
87. X. Chen, J.S.K. Lim, W. Yan, F. Guo, Y.N. Liang, H. Chen, A. Lambourne, X. Hu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12, 16987(2020).
88. J. You, H.-H. Choi, Y.M. Lee, J. Cho, M. Park, S.-S. Lee, J.H. Park, *Compos. B: Eng.*, 164, 710 (2019).
89. X. Wang, P. Wu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 28943(2019).
90. B. Liu, Y. Li, T. Fei, H. Shuai, C. Xia, Z. Shan, J. Jiang, *Chem. Eng. J.*, 385, 123829 (2020).
91. M. Li, M. Wang, X. Hou, Z. Zhan, H. Wang, H. Fu, C.T. Lin, L. Fu, N. Jiang, J. Yu, *Compos. B-Eng.*, 184, 107746(2020).
92. L. Xin, Y. Gao, Y. Shang, X. Zhu, Z. Jiang, Z. Chenyi, H. Jinxuan, H. Zhang, *Polymer*, 203, 122763 (2020).

117. T. Ha, D.-G. Kim, J.-W. Ka, Y.S. Kim, W.-G. Koh, H.S. Lim, Y. Yoo, Compos. A: Appl. Sci. Manuf., 138, 106045 (2020).
118. Y. Wang, W. Wu, D. Drummer, C. Liu, W. Shen, F. Tomiak, K. Schneider, X. Liu, Q. Chen, Mater. Des., 191, 108698 (2020).
119. M.C. Vu, Q.-V. Bach, D.D. Nguyen, T.S. Tran, M. Goodarzi, Compos. B: Eng., 175, 107105 (2019).
120. X. Xu, J. Zhou, J. Chen, Adv. Funct. Mater., 30, 1904704 (2020).
121. Y. Wen, C. Chen, Y. Ye, Z. Xue, H. Liu, X. Zhou, Y. Zhang, D. Li, X. Xie, Y.-W. Mai, Adv. Mater., 34 (2022).
122. C. Xiao, Y. Tang, L. Chen, X. Zhang, K. Zheng, X. Tian, Compos. A: Appl. Sci. Manuf., 121, 330(2019).
123. R. Yan, F.-j. Su, L. Zhang, C. Li, Compos. A: Appl. Sci. Manuf., 220, 67(2019).
124. J. Liu, H. Feng, J. Dai, K. Yang, G. Chen, S. Wang, D. Jin, X. Liu, Chem. Eng. J., 469, 143963 (2023).
125. M.-D. Li, X.-Q. Shen, X. Chen, J.-M. Gan, F. Wang, J. Li, X.-L. Wang, Q. Shen, Nat. Commun., 13 (2022).
126. Q. Ma, X. Wang, Y. Chen, L. Chen, L. Zhang, X. Zhao, N. Bing, W. Yu, H. Xie, ACS Appl. Nano Mater., 6, 14733 (2023).
127. H.-B. Chen, Y. Ding, G. Zhu, Y. Liu, Q. Fang, X. Bai, Y. Zhao, X. Li, X. Huang, T. Zhang, B. Li, B. Sun, npj Flex. Electron., 7, 1-9(2023).
128. K. Ruan, Y. Guo, J. Gu, Macromolecules, 54, 4934-4944(2021).
105. C. Li, B. Liu, Z. Gao, H. Wang, M. Liu, S. Wang, C. Xiong, J. Appl. Polymer Sci., 135, 46454(2018).
106. R. Yan, F. Su, L. Zhang, C. Li, Compos. A: Appl. Sci. Manuf., 125, 105496(2019).
107. C. Xiao, L. Chen, Y. Tang, X. Zhang, K. Zheng, X. Tian, Compos. A: Appl. Sci. Manuf., 124, 105511 (2019).
108. Y. Yuan, Z. Li, L. Cao, B. Tang, S. Zhang, Ceram. Int., 45, 16569-16576(2019).
109. C. Guan, Y. Qin, L. Li, M. Wang, C.-T. Lin, X. He, K. Nishimura, J. Yu, J. Yi, N. Jiang, Compos. B: Eng., 198, 108167(2020).
110. M.C. Vu, W.-K. Choi, S.G. Lee, P.J. Park, D.H. Kim, M.A. Islam, S.-R. Kim, ACS Appl. Mater. Interfaces, 12, 23388-23398 (2020).
111. M.C. Vu, N.A.T. Thieu, W.K. Choi, M.A. Islam, S.-R. Kim, Compos. A: Appl. Sci. Manuf., 138, 106028 (2020).
112. Z. Wei, W. Xie, B. Ge, Z. Zhang, W. Yang, H. Xia, B. Wang, H. Jin, N. Gao, Z. Shi, Compos. Sci. Technol., 199, 108304(2020).
113. M. Liu, S.-W. Chiang, X. Chu, J. Li, L. Gan, Y. He, B. Li, F. Kang, H. Du, Ceram. Int., 46, 20810-20818(2020).
114. K. Zhang, P. Tao, Y. Zhang, X. Liao, S. Nie, Carbohydr. Polym., 213, 228-235(2019).
115. C. Ji, Y. Wang, Z. Ye, L. Tan, D. Mao, W. Zhao, X. Zeng, C. Yan, R. Sun, D.J. Kang, ACS Appl. Mater. Interfaces, 12, 24298-24307(2020).
116. C. Yan, T. Yu, C. Ji, D.J. Kang, N. Wang, R. Sun, C.P. Wong, Adv. Electron. Mater., 5, 1800548(2019).

140. J. Gao, G. Han, J. Song, C. He, J. Hu, W.H. Wang, Y. Feng, C. Liu, *Mater. Today Phys.*, 27, 100811 (2022).
141. X. Huang, Y. Lin, G. Fang, *Sol. Energy*, 161, 187-193(2018).
142. X. Zhang, X. Chao, L. Lou, J. Fan, Q. Chen, B. Li, L. Ye, D. Shou, *Compos. Commun.*, 100595(2020).
143. X. Huang, Z. Li, Y. Li, X. Wu, C. Liu, H. Xie, W. Yu, *ACS Appl. Nano Mater.*, 7, 8229(2024).
144. X. Yu, Y. Li, X. Wang, Y. Si, J. Yu, B. Ding, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12, 32078 (2020).
145. Y. Jing, Z. Zhao, X. Cao, Q. Sun, Y. Yuan, T. Li, *Nat. Commun.*, 14, 8060 (2023).
146. Y.-G. Lv, Y.-G. Lv, Y. Wang, T. Meng, Q. Wang, W.-X. Chu, *Energy Storage and Saving*, 3, 153(2024).
147. K.H. Ryu, M. Kang, J. Kim, N.-H. You, S.G. Jang, K.U. Jeong, S. Ahn, D.Y. Kim, *Adv. Fiber Mater.*, 6, 1509(2024).
148. A. Verma, *Appl. Sci. Eng. Progress*, 15, 5727(2022).
149. C. Zhang, Y. Li, W. Kang, X. Liu, Q. Wang, *Sus. Mat*, 1, 127 - 147 (2021).
129. H. Yu, C. Chen, J. Sun, H. Zhang, Y. Feng, M. Qin, W. Feng, *Nanomicro Lett.*, 14 (2022).
130. A.U. Application, H. Agobi, T.O. Louis, P.M. Magu, J. Dass, *Chem. Rev.*, 1, 19(2019).
131. Q. Huang, X. Li, G. Zhang, J. Deng, C. Wang, *Appl. Therm. Eng.*, 183, 116151 (2021).
132. H. Guo, H. Zhao, H. Niu, Y. Ren, H. Fang, X. Fang, R. Lv, M. Maqbool, S. Bai, *ACS Nano*, 15, 6917 (2021).
133. G. Cheng, Z. Wang, X. Wang, Y. He, *Appl. Energy*, 322, 119509 (2022).
134. X. Yin, L. Wang, Y. Kim, N. Ding, J. Kong, D. Safanama, Y. Zheng, J. Xu, D.V.M. Repaka, K. Hippalgaonkar, S.W. Lee, S. Adams, G.W. Zheng, *Adv. Sci.*, 7 (2020).
135. J. Chen, Y. Zhou, X. Huang, C. Yu, D. Han, A. Wang, Y. Zhu, K. Shi, Q. Kang, P. Li, P. Jiang, X.H. Qian, H. Bao, S. Li, G. Wu, X. Zhu, Q. Wang, *Nature*, 615, 62-66(2023).
136. F.S. Hwang, T. Confrey, C. Reidy, D. Picovici, D. Callaghan, D. Culliton, C. Nolan, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 225, 120248 (2024).
137. Y. Lin, Q. Kang, Y. Liu, Y. Zhu, P. Jiang, Y.-W. Mai, X. Huang, *Nano-Micro Lett.*, 15 (2023).
138. P. Li, X. Huang, Thermally conductive polymer composites for high voltage insulation, 22nd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2021), 2021 (2021) 30-37.
139. W. Aftab, M.S. Khurram, J. Shi, H. Tabassum, Z. Liang, A. Usman, W. Guo, X. Huang, W. Wu, R. Yao, Q. Yan, R. Zou, *Energy Storage Mater.*, 32, 199-207(2020).



Review of polymer nanocomposites with high thermal conductivity and their applications

Majid Mirzaee*, Majid Rezaei Abadchi, Alimorad Rashidi

Non-Metallic Materials Research Group, Niroy Research Institute, P. O. Box: 14665517, Tehran, Iran

Abstract: The rapid accumulation and dissipation of heat in electronic equipment and related sectors are among the main limiting factors for miniaturization and power enhancement of these devices. This significantly affects the performance and lifespan of electronic devices. Therefore, improving the thermal conductivity of polymer composites (TCPCs) is the primary solution to this problem. Unlike producing polymer composites with inherent thermal conductivity, filling the polymer matrix with thermally conductive fillers can more effectively enhance the thermal conductivity of the composites. This article begins by reviewing the mechanism of thermal conductivity and describes the factors that influence the thermal conductivity of polymer composites, including the type and morphology of the filler, the distribution method, and the functionalization of the fillers. Finally, the applications are described, and the challenges and future of TCPCs are reviewed.

Keywords: Nanocomposite, Polymer, Thermal Conductivity, Filler.