

Thermal Conductive Polyamide-6/Polyolefin Elastomer/ Aluminum Nitride/Aluminum Oxide Composites

Marjan Shahmir, Shervin Ahmadi*, Hassan Arabi

Faculty of Processing, Iran Polymer and Petrochemical, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 7 May 2024, accepted: 1 September 2024

ABSTRACT

Hypothesis: Polyamide-based blends, like most polymers, are thermally insulating materials, which restrict their application. An effective method to improve the thermal conductivity of polymers is manipulating the morphology and locating conductive fillers selectively at the polymer interfaces to induce heat conduction path way. In this regard, blending polyamide 6 with polyolefin elastomer and fillers such as aluminum nitride (AlN) and aluminum oxide (Al_2O_3) is an effective method to improve the thermal conductivity and mechanical properties.

Methods: The effect of 10% (by wt) aluminum nitride and aluminum oxide fillers and their mixture (with a ratio of 2:1) and different particle sizes on the induction of the structure of both continuous phases and the thermal conductivity of the polyamide-6/polyolefin elastomer mixture (80/20) in the molten state was investigated.

Findings: The results demonstrated that a stable co-continuous structure was formed by selective localization of fillers in the PA6/POE interphase. The xenon flash analysis results showed that the thermal conductivity of samples containing 10% (by wt) of AlN or Al_2O_3 reaches 2.22 and 1.29 W/m.K, respectively, which are 4.8 and 3 times higher than the thermal conductivity of pure sample. However, in the samples containing 10% (by wt) AlN/ Al_2O_3 mixture with a mass ratio of 2:1, thermal conductivity reaches 3.34 W/m.K which is 7.23 times higher than that of pure sample. It can also be pointed to the fact that the gap of large size particle (Al_2O_3) is filled by the small size filler (AlN), therefore, the contact surface area of irregular AlN particles and Al_2O_3 spherical particles increases, which in turn has a synergistic effect on improving the thermal conductivity of the composite. It can be confidently claimed that this is a promising approach for the design of thermally conductive composites with favorable properties, light weight, and low cost.

Keywords:

thermal conductive
composites,
polyamide-6/polyolefin
elastomer,
percolation threshold,
aluminum nitride,
aluminum oxide

(*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: Sh.Ahmadi@ippi.ac.ir

Please cite this article using:

Shahmir M., Ahmadi Sh., Arabi H., Thermal Conductive Polyamide-6/Polyolefin Elastomer/Aluminum Nitride/Aluminum Oxide Composites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, 37, 73-84, 2024.

طراحی کامپوزیت رسانای گرمایی بر پایه پلی آمید ۶-پلی اولفین الاستومر دارای آلومینیم نیتريد و اکسید

مرجان شاهمیر، شروین احمدی^{*}، حسن عربی

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۲-۲۹۷۵

دریافت: ۱۴۰۳/۲/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۱

چکیده

فرضیه: آمیزه‌های بر پایه پلی آمید مانند اکثر پلیمرها عایق گرمایی هستند که این ویژگی بسیاری از کاربردهای آنها را محدود می‌کند. یک روش مؤثر برای بهبود رسانندگی گرمایی و خواص مکانیکی آمیزه‌های پلیمری، تغییر شکل‌شناسی و قراردادن گزینشی پرکننده‌های رسانای گرما در فصل مشترک فازها به منظور ایجاد مسیر رسانای گرماست. در این راستا، اختلاط پلی آمید ۶ با پلی اولفین الاستومر و پرکننده‌هایی مانند آلومینیم نیتريد و آلومینیم اکسید راهکار موثری برای بهبود رسانندگی گرمایی و خواص مکانیکی آمیزه نام‌برده است. **روش‌ها:** اثر ۱۰٪ وزنی از پرکننده‌های آلومینیم نیتريد و آلومینیم اکسید و مخلوط آنها (با نسبت ۲ به ۱) و اندازه ذرات مختلف بر القای ساختار هر دو فاز پیوسته و رسانندگی گرمایی آمیزه پلی آمید ۶-پلی اولفین الاستومر (۸۰/۲۰) در حالت مذاب بررسی شد. **یافته‌ها:** نتایج حاصل بیانگر تشکیل ساختار پیوسته پایدار با انتخاب گزینشی پرکننده‌ها بین دو فاز پلی آمید ۶-پلی اولفین الاستومر است. نتایج رسانش‌سنجی گرمایی نشان می‌دهد، رسانندگی گرمایی نمونه‌های دارای ۱۰٪ وزنی پرکننده آلومینیم نیتريد یا اکسید به ترتیب ۲/۲۲ و ۱/۲۹ W/m.°K افزایش یافت که ۴/۸ و ۳ برابر بیشتر از نمونه خالص است. در حالی که، رسانندگی گرمایی در نمونه دارای ۱۰٪ وزنی از مخلوط پرکننده‌های آلومینیم نیتريد و اکسید با نسبت وزنی به ترتیب ۲ به ۱، به ۳/۳۴ W/m.°K رسید که ۷/۲۳ برابر بیشتر از نمونه خالص است. زیرا، در این حالت ذرات پرکننده ریز، حفره‌های میان ذرات بزرگ را پر می‌کنند و موجب کاهش تخلخل بین پرکننده‌ها و افزایش سطح تماس ذرات بی‌شکل آلومینیم نیتريد و ذرات کروی شکل آلومینیم اکسید می‌شوند. بنابراین رسانندگی گرمایی سامانه به صورت هم‌افزایی افزایش می‌یابد. امید است، پژوهش انجام شده چشم‌انداز مثبتی برای طراحی کامپوزیت‌های پلیمری رسانای گرمایی با خواص مطلوب، سبک و ارزان باشد.

واژه‌های کلیدی

کامپوزیت‌های رسانای گرمایی،
پلی آمید ۶-پلی اولفین الاستومر،
آستانه نفوذپذیری،
آلومینیم نیتريد،
آلومینیم اکسید

^{*} مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

Sh.Ahmadi@ippi.ac.ir

مقدمه

پلی آمیدها از پلیمرهای پرمصرف در صنایع مختلف مانند خودروسازی، صنایع فضایی و بسته‌بندی مواد غذایی هستند. پلی آمیدها مانند اکثر پلیمرها عایق گرمایی بوده و اصلی‌ترین مشکل آن‌ها در بسیاری از کاربردها، رسانندگی گرمایی کم آن‌هاست. پلیمرهای رسانای گرما می‌توانند جایگزین فلزات، سرامیک‌ها و پلاستیک‌های مهندسی برای کاربردهای حساس به گرما شوند [۱]. امروزه یکی از روش‌های مؤثر و کارآمد برای کنترل شکل‌شناسی و بهبود خواص آمیزه‌های پلیمری و ایجاد خواص جدید مانند رسانایی گرمایی، اضافه‌کردن پرکننده به آن‌هاست [۲،۳]. عوامل مختلفی از جمله شرایط اختلاط، تنش بین‌سطحی اجزای پلیمری، خواص رئولوژیکی، جزء حجمی اجزاء، نحوه جاگیری ذرات در سامانه، غلظت، هندسه و قابلیت ذرات به ایجاد ساختار می‌تواند اثر متفاوتی بر ریزساختار نهایی داشته باشد [۴،۵]. پژوهشگران برای بهبود رسانایی گرمایی مواد نارسا مانند پلیمرها، استفاده از انواع پرکننده یا اصلاح ساختاری آن‌ها را بررسی کرده‌اند [۶-۸]. به‌طور کلی، مقدار بهبود رسانندگی گرمایی پرکننده‌ها به عواملی مانند ساختار و ماهیت آن‌ها بستگی دارد. طی سالیان گذشته کاربرد پرکننده‌هایی مطالعه شده است که به بهبود رسانندگی گرمایی پلیمرها منجر می‌شوند. از جمله پرکننده‌های پایه کربنی (دوده و گرافن)، پرکننده‌های فلزی (نقره، مس، آلومینیم و...) و پرکننده‌های سرامیکی (بور نیتريد، آلومینا، آلومینیم نیتريد و...) [۹،۱۰]. بسیاری از پژوهشگران اثر نانولوله‌های کربن بر بهبود رسانندگی گرمایی پلیمرها را به دلیل رسانش پذیری گرمایی بسیار زیاد و نیز ارزان و در دسترس بودن آن‌ها بررسی کرده‌اند [۱۱،۱۲]. نتایج آزمایش‌های اولیه بیانگر افزایش شایان توجه در خواص مکانیکی و الکتریکی پلیمرها بود [۱۳]. در حالی که نتایج رسانندگی گرمایی آن چنان که انتظار می‌رفت (نزدیک به نظری)، نبود. به عبارتی قابلیت رسانندگی گرمایی ذاتی زیاد یک نانولوله کربن به‌طور عمده به دلیل نقص و پراکندگی فونون، کاهش می‌یابد. Aliev و همکاران [۱۴] نشان دادند، چگونه اتصال‌های داخلی لوله‌ای، باعث ایجاد نقص و در نتیجه کاهش رسانندگی گرمایی مؤثر نانولوله کربن از مقدار نظری (3000 W/mK) به مقدار واقعی (50 W/mK) می‌شود. Jia [۱۵] از گرافن و نانولوله‌های کربن برای افزایش رسانش پذیری گرمایی استفاده کردند و رسانش پذیری گرمایی را به 3 W/mK ارتقا دادند. پرکننده‌های نام‌برده گزینه‌های مناسبی برای افزایش رسانش پذیری گرمایی در درصد‌های کم هستند. اما، قیمت زیاد گرافن و نانولوله‌های کربن و فرایند آماده‌سازی پیچیده آن‌ها، کاربردهای صنعتی آن‌ها را محدود کرده است. از طرفی، مواد بر پایه کربن باعث افزایش رسانندگی گرمایی و

الکتریکی به‌صورت هم‌زمان می‌شود و در مواردی که هدف فقط افزایش رسانندگی گرمایی باشد، کاربردی نخواهد داشت [۵]. در بسیاری از مقاله‌ها تأیید شده است، هرچقدر مقدار پرکننده رسانا بیشتر باشد، رسانایی ناشی از آن زیادتر خواهد بود. با وجود این، هیچ زمانی رسانش پذیری گرمایی به مقدار رسانایی پرکننده نخواهد رسید [۵]. Gaska و همکاران [۱۶] نشان دادند، برای اینکه رسانش پذیری گرمایی اپوکسی ۱۰ برابر افزایش یابد، باید حدود ۳۰٪ تا ۵۰٪ وزنی پرکننده آلومینیم نیتريد-سیلیسیم اکسید یا بور نیتريد-سیلیسیم اکسید به آن اضافه شود. Choi و همکاران [۱۷] از ۸۰٪ وزنی نانولوله کربن برای افزایش ۱۰ برابر رسانش پذیری گرمایی پلی‌اکریلات استفاده کردند. Lee و همکاران [۱۸] از ۵۷٪ وزنی آلومینیم نیتريد در ماتریس اپوکسی برای رسیدن به رسانش پذیری گرمایی $3/4 \text{ W/mK}$ استفاده کردند. Altay و همکاران [۱۹] خواص گرمایی، الکتریکی و مکانیکی پلی آمید ۶ پُر شده با پرکننده‌های پودری را بررسی کردند. آن‌ها از پرکننده‌های آلومینیم نیتريد، بور نیتريد و گرافیت سنتزی استفاده کرده و مشاهده کردند، رسانش پذیری گرمایی نمونه‌های دارای بور نیتريد و گرافیت سنتزی در جهت درون‌صفحه‌ای (inplane) بیشتر از جهت میان‌صفحه‌ای (throughplane) است. Yuan و همکاران [۲۰] رسانش پذیری گرمایی پلی آمید ۶، و پلی آمید ۶ و نیز آمیخته آن‌ها با افزودنی آلومینیم نیتريد را بررسی کردند. آن‌ها از ترکیب درصد‌های مختلف آلومینیم نیتريد در این آمیخته با نسبت ۱:۱ (پلی آمید ۶، ۶/۶ پلی آمید ۶) و نیز هر یک به‌تنهایی استفاده کرده و سپس ساختار بلوری آن‌ها را با گرماسنجی پویشی تفاضلی و میکروسکوپی پویشی جفت‌شده با طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو X بررسی کردند. مشاهده شد، وقتی از آمیخته نام‌برده استفاده کردند، ذرات آلومینیم نیتريد به‌صورت گزینشی در فاز قرار می‌گیرند (به‌طور عمده در پلی آمید ۶) و بیشترین تماس بین ذرات آلومینیم نیتريد در این حالت به‌وجود می‌آید. آن‌ها ادعا کردند، با افزودن ۵۰٪ وزنی آلومینیم نیتريد به آمیخته نام‌برده رسانش پذیری گرمایی به 5 W/mK رسید و ۸۸٪ نسبت به پلی آمید ۶، و پلی آمید ۶ خالص افزایش یافت. Xiao و همکاران [۲۱] رسانش پذیری آلومینیم نیتريد-نانوکربن لوله چنددیواره را در آمیخته امتزاج‌ناپذیر پلی آمید ۶، پلی کربنات بررسی کرده و مشاهده کردند، آلومینیم نیتريد و نانوکربن لوله چنددیواره به‌صورت گزینشی در فاز پلی آمید ۶، قرار می‌گیرند و بدین ترتیب توانستند، با افزودن حدود ۲۵٪ وزنی از این پرکننده، رسانش پذیری گرمایی را شش برابر بیشتر از آمیخته پلی آمید ۶-پلی کربنات خالص و دو برابر بیشتر از آمیخته پلی آمید ۶-پلی کربنات-آلومینیم نیتريد افزایش دهند. Li و همکاران [۲۲] اندازه ذرات پرکننده آلومینیم نیتريد و آلومینا را

۲۰٪ پلی اولفین الاستومر (ترکیب درصد بهینه) به عنوان فاز جزئی استفاده شد، تا نه تنها موجب اصلاح خواص ماتریس پلیمری شود، بلکه به واسطه اتصال ذرات پرکننده در فصل مشترک فازها، مقدار پرکننده لازم را برای ایجاد رسانندگی گرمایی کاهش دهد. در کار پژوهشی قبلی [۲۴] از ترکیب درصدی مختلف پرکننده استفاده شد و در ترکیب ۱۰٪ وزنی پرکننده در آمیخته پلیمری مشابه، آستانه نفوذپذیری (رسانایی) حاصل شد. در این پژوهش، از راهکار کاهش آستانه اتصال با قراردادن ذرات پرکننده آلومینیم نیتريد و آلومینیم اکسید با نسبت ۲ به ۱ رسانی گرمایی در فصل مشترک پلی آمید- پلی اولفین الاستومر و تشکیل فاز پیوسته استفاده شد. پژوهشگران در کارهای پژوهشی قبلی [۲۲] به این نتیجه رسیدند، اگر نسبت وزنی پرکننده‌های با اندازه کوچک آلومینیم نیتريد و بزرگ آلومینیم اکسید ۱:۲ باشد رسانش پذیری گرمایی کامپوزیت بسیار زیاد می شود. این ذرات باعث افزایش رسانش پذیری گرمایی می شوند، در حالی که همچنان عایق الکتریکی باقی می ماند. به طور کلی، در این پژوهش هدف اصلی افزایش رسانندگی گرمایی آمیخته پلی آمید- پلی اولفین الاستومر با راهکار کاهش آستانه اتصال ذرات آلومینیم نیتريد و اکسید با اندازه و نسبت‌های مختلف است که به دلیل اثرهای هم افزایی این راهکار، به افزایش چشمگیر رسانایی گرمایی در درصد‌های کم پرکننده منجر خواهد شد. همچنین، برخلاف سایر پژوهش‌های قبلی در این زمینه، محصولی با رسانندگی گرمایی زیاد، خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب، سبک و ارزان با حداقل مقدار پرکننده تولید خواهد شد. نتایج با روش‌های میکروسکوپی الکترونی پویشی، میکروسکوپی نیروی اتمی، تجزیه گرمایی، رسانش سنجی گرمایی زنون فلش و رئومتر بررسی شدند.

مواد

پلی آمید ۶ با نام تجاری Tecomid NB40 NL E، فرمول بندی $-(NH-(CH_2)_5-CO)_n-$ ، از شرکت Eurotech تهیه شد که دارای چگالی 1.13 g/cm^3 ، دمای ذوب 223°C و جرم مولکولی 19547 g/mol بود. پلی اولفین الاستومر کوپلیمر پلی اتیلن-۱-بوتن با نام تجاری TAFMER DF 7350، جرم مولکولی 84165 g/mol شاخص جریان مذاب 35 g/10min (در شرایط وزنه $2/16 \text{ kg}$ و دمای 190°C) فرمول شیمیایی $(C_6H_{12})_n-$ و دمای ذوب 55°C از شرکت میتسو خریداری شد. آلومینیم نیتريد $(Al\equiv N)$ و آلومینیم اکسید (Al_2O_3) با اندازه متوسط ذرات به ترتیب ۷ و $35 \mu\text{m}$ از شرکت Sigma-Aldrich تهیه شدند. از نرمال هپتان به عنوان حلال برای استخراج فاز پلی اولفین الاستومر و نیز آماده سازی نمونه‌ها برای

بر رسانش پذیری گرمایی پلی آمید بررسی کردند و نشان دادند، وقتی از ذرات پرکننده با اندازه‌های مختلف استفاده می شود، رسانش پذیری گرمایی پلی آمید بیشتر از زمانی است که اندازه‌ها یکسان باشند، زیرا ذرات پرکننده ریزحفره‌های بین پرکننده‌های بزرگ را پر می کنند و باعث کاهش تخلخل بین پرکننده‌ها و افزایش مقدار فشردگی شده که در نتیجه باعث تشکیل زنجیره گرمایی می شود. همچنین آن‌ها نشان دادند، وقتی نسبت وزنی پرکننده‌های با اندازه کوچک و بزرگ ۱:۲ باشد، رسانش پذیری گرمایی کامپوزیت بسیار افزایش می یابد. هدف این پژوهش، افزایش رسانش پذیری گرمایی آمیخته پلی آمید-۶- پلی اولفین الاستومر با نسبت به ترتیب ۸۰ به ۲۰ است. در گام اول به منظور طراحی آمیخته پلیمری با رسانش پذیری گرمایی مطلوب و یکنواخت در تمام جهت‌ها، از پرکننده آلومینیم نیتريد و نیز آلومینیم اکسید استفاده شد و با در نظر گرفتن تمایلات ترمودینامیکی پرکننده‌ها از راهکار کاهش آستانه اتصال استفاده شد. یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش آستانه اتصال، تهیه آمیخته‌های دوتایی یا چندتایی و پخش پرکننده رسانی تنها در یکی از فازهای پلیمری است. روش مؤثرتری که برای کاهش چشمگیر آستانه اتصال استفاده می شود، قراردادن پرکننده به صورت گزینشی در فصل مشترک دو فاز پلیمری با شکل شناسی هر دو فاز پیوسته است [۲۳]. بر همین اساس ساختار هر دو فاز پیوسته برای طراحی کامپوزیت‌های رسانایی گرمایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اما، شکل شناسی هر دو فاز پیوسته پایدار اغلب در ترکیب بندی‌های میانی و محدودی قابل تشکیل است. این موضوع دامنه خواص نهایی قابل دستیابی به این ساختار را محدود می کند. نتایج پژوهش‌ها می دهند، وجود ذرات در فاز پراکنده می تواند در ترکیب بندی یکسان ساختار قطره ماتریس را به ساختار هر دو فاز پیوسته تبدیل کند. در صورت وقوع این موضوع، می توان در جزء حجمی کمتری از فاز جزئی به شکل شناسی هر دو فاز پیوسته دست یافت که نه تنها موجب افزایش دامنه خواص کاربردی می شود، بلکه همان طور که بیان شد، می تواند موجب کاهش آستانه اتصال ذرات در سامانه و افزایش کارایی و بهبود خواص کامپوزیت شود. پلی آمید ۶ یک گرمانرم است که به واسطه خواص مطلوب مکانیکی و گرمایی به صورت گسترده در صنعت‌های مختلف استفاده می شود. در مقایسه با سایر پلیمرها، پلی آمیدها دارای خواص ویژه‌ای مانند استحکام مکانیکی و دمای ذوب زیاد و مقاومت زیاد در برابر خوردگی و سایش است. از طرف دیگر، حساسیت به شکاف، مقاومت ضربه کم و پایداری ابعادی کم موجب محدود شدن کارایی این پلیمر می شود. اختلاط پلی آمیدها با سایر پلیمرها به ویژه پلی اولفین‌ها راهکار مناسبی برای بهبود این نقاط ضعف است. بنابراین در پژوهش حاضر، از

جدول ۱- ترکیب‌بندی نمونه‌ها.

Table 1. Composition of samples.

Sample ID	Formulation (phr)		
	PA/POE/ AlN	PA/POE/ AL ₂ O ₃	PA/POE/ AL ₂ O ₃ /AlN
80-20-AO10	80-20-10	-	-
80-20-BO10	-	80-20-10	-
80-20-CO10	-	-	80-20-10
80-20-AO	-	-	-

عکس‌برداری استفاده شد. این حلال از شرکت Sigma-Aldrich آلمان خریداری شد. مشخصات و کدگذاری نمونه‌های بررسی شده در این پژوهش در جدول ۱ آمده است.

دستگاه‌ها و روش‌ها

مخلوط‌کن داخلی

برای اختلاط مذاب اجزای پلیمری و پرکننده‌ها از مخلوط‌کن داخلی Brabender ساخت آلمان با گنجایش ۵۵ mL استفاده شد. اختلاط اجزا با تیغه دوغلتکی و سرعت دورانی ۶۰ rpm انجام شد.

دستگاه قالب‌گیری فشاری

برای آماده‌سازی نمونه‌های آزمون رسانندگی گرمایی و رئومتر، دیسک‌هایی با قطر ۲۵ mm و ضخامت ۲ mm با دستگاه قالب‌گیری فشاری از نوع پرس دستی توپوسیکی ساخت ژاپن تهیه شد. قالب‌گیری در دمای ۲۴۰ °C، فشار ۵۰ MPa و در زمان ۵ min انجام شد. همچنین برای آزمون دینامیکی-مکانیکی نمونه‌هایی با ابعاد ۱/۵×۵ cm به کمک دستگاه قالب‌گیری فشاری تهیه شدند.

نمونه‌سازی

پلی‌آمید به مدت ۲۴ h درون آون خلأ با دمای ۸۰ °C خشک شد. برای تهیه کامپوزیت‌های پلی‌آمید-پلی‌اولفین الاستومر آلومینیم نیتريد و اکسید، پیمانانه اصلی (master batch) با غلظت ۵٪ تا ۲۰٪ وزنی (پلی‌اولفین الاستومر) از پرکننده‌ها در مخلوط‌کن داخلی تهیه شد و نانوکامپوزیت‌های نهایی با این پیمانانه اصلی تهیه شدند. بدین صورت که ابتدا پلی‌اولفین الاستومر درون مخلوط‌کن داخلی اضافه شد و سپس آلومینیم نیتريد و اکسید به مدت ۵ min در سرعت دورانی ۵ rpm اضافه شدند. در ادامه، به مدت ۸ min دمای ۲۴۰ °C و سرعت دورانی

۶۰ rpm اختلاط انجام شد. در قدم بعدی این پیمانانه اصلی با اندازه لازم با پلی‌آمید و پلی‌اولفین الاستومر خالص در دمای ۲۴۰ °C، سرعت دورانی ۶۰ rpm به مدت ۷ min برای تهیه نمونه‌های نهایی مخلوط شدند.

مشخصه‌یابی

برای بررسی شکل‌شناسی کامپوزیت‌ها در این پژوهش از میکروسکوپ الکترونی پویشی گسیل میدانی MIRA 3 TESCAN استفاده شد که افزون بر توان تصویربرداری تا بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰۰۰ برابر، قابلیت تصویربرداری در بزرگ‌نمایی‌های زیاد در ولتاژهای بسیار کم با کیفیت مطلوب را دارد. تصویربرداری‌ها در ولتاژ ۷ kV انجام شد. برای آماده‌سازی نمونه‌های تصویربرداری، ابتدا نمونه‌های قالب‌گیری شده درون نیتروژن مایع شکسته شدند و برای استخراج فاز پلی‌اولفین الاستومر به مدت ۱ h سطح شکست آن‌ها در دمای ۸۰ °C در نرمال هپتان قرار داده شد. سطح شکست سپس با طلا پوشش داده شد و سپس تصویربرداری انجام شد. برای بررسی بهتر مکان‌نگاری (توپوگرافی) سطحی نمونه‌ها از میکروسکوپ نیروی اتمی مدل Nanowizard ساخت آلمان در شیوه تماسی استفاده شد.

رفتار بلورینگی

رفتار بلورینگی نمونه‌ها با استفاده از گرماسنج پویشی تفاضلی ساخت شرکت Linseise آلمان بررسی شد. این آزمون شامل سه مرحله گرمایش اولیه، سرمایش و گرمایش دوباره است. حدود ۵ mg از نمونه‌ها از دمای محیط تا ۲۴۰ °C در جو نیتروژن و با سرعت گرمادهی ۱۰ °C/10min گرم شدند و در این دما به مدت ۳ min نگه داشته شدند تا تاریخچه گرمایی آن‌ها حذف شود. سپس، با سرعت ۵ °C/10min تا دمای ۱۰۰ °C- خنک شدند. گرمادهی دوباره نمونه از دمای ۱۰۰ °C- تا دمای ۲۴۰ °C با سرعت ۱۰ °C/10min انجام شد. درجه بلورینگی پلی‌آمید از معادله (۱) محاسبه شده است:

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{o_m} \times \phi_{PA6}} \quad (1)$$

در اینجا ΔH_m آنتالپی ذوب پلی‌آمید در نمونه‌ها و ΔH_{o_m} آنتالپی ذوب پلی‌آمید با درصد بلورینگی ۱۰۰ است که برای پلی‌آمید ۶، این مقدار ۱۹۰/۸ J/g در نظر گرفته می‌شود.

آزمون رئولوژی

آزمون‌های دینامیکی پویش بسامد در حالت صفحه‌های موازی (با

به عنوان چگالی نهایی گزارش شد.

آزمون گرماوزن سنجی

برای بررسی پایداری گرمایی نمونه‌ها گرماوزن سنجی با گرماوزن سنج STA1000 ساخت شرکت Linseis آلمان در بازه دمایی محیط تا 700°C با سرعت گرماده $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ و در جو خنثی (تادمای 550°C) و سپس در جو اکسیژن (از دمای 550°C تا 700°C) انجام شد.

نتایج و بحث

بررسی شکل شناسی

اصلی ترین نیروی محرکه برای مهاجرت ذرات، تمایل ترمودینامیکی میان ذرات و ماتریس است. عوامل سینتیکی افزون بر تمایلات ترمودینامیکی می توانند از رسیدن ذرات به مکان مطلوب ترمودینامیکی جلوگیری کنند. نتایج در پژوهش قبلی [۲۴] به شرح زیر است:

(الف) اگر ذرات آلومینیم نیتريد یا آلومینیم اكسيد ابتدا با فاز پلی آمید خیس شوند، در این فاز باقی می ماند و در نتیجه پراکندگی بیشتری در این فاز مشاهده می شود و مهاجرت ذرات به فصل مشترک انجام نمی شود.

(ب) وقتی که ذرات به کمک فاز پلی اولفین الاستومر خیس می شوند، بر اساس محاسبات ترمودینامیکی آن‌ها تمایل دارند که به سطح مشترک مهاجرت کنند. همچنین ذرات خیس شده با پلی آمید برای اینکه بتوانند زنجیرهای پلی آمید را با زنجیرهای پلی اولفین الاستومر جایگزین کنند و در فصل مشترک دوفاز قرار گیرند، به انرژی فعال سازی زیادی نیاز دارند که در زمان فرایند مهیا نمی شود. بنابراین در این بخش از پژوهش، فقط از پیمانده اصلی پلی اولفین الاستومر دارای ذرات آلومینیم نیتريد یا آلومینیم اكسيد استفاده شد تا امکان مهاجرت ذرات به فصل مشترک میسر شود. در ادامه جاگیری ذرات در سامانه های مختلف با میکروسکوپ الکترونی عبوری و میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی شد.

در شکل ۱ تصاویر میکروسکوپی نمونه‌ها نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، در نمونه خالص قطره های کروی شکل تشکیل شده که این قطره های کوچک بیانگر افزایش شکست و تشکیل ساختار قطره ماتریس است [۲۵]. در پژوهش قبلی [۲۴] مشخص شد، با اضافه کردن ۵٪ پرکننده قطره ها بزرگ تر و کشیده می شوند. با افزایش مقدار پرکننده تا ۱۰٪، این قطره های کشیده شده با یکدیگر ادغام و تشکیل ساختار هر دو فاز پیوسته را می دهند. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی در نمونه های 80-20-AO10 و

قطر ۲۵ mm) و فاصله دو صفحه ۱ mm با دستگاه رثومتر MCR 502 ساخت شرکت Anton paar انجام شد. در این آزمون ها مدول ذخیره و اتلاف برحسب تابعی از بسامد زاویه ای اندازه گیری شد. این اندازه گیری در محدوده بسامد $100-0.1 \text{ rad/s}$ انجام شد. برای بررسی تغییرات خواص گرانروکشسانی نمونه ها طی زمان، آزمون پویس زمانی در دمای 240°C در ناحیه گرانروکشسان خطی در جو نیتروژن و بسامدهای مختلف انجام شد. داده های گزارش شده رثولوژیکی میانگین حداقل سه تکرار هستند.

آزمون دینامیکی مکانیکی

آزمون دینامیکی مکانیکی با دستگاه TA instrument (Q800) در حالت پایه و خمشی در بسامد ۱ Hz و کرنش ۱٪ انجام شد. نمونه ها از دمای 100°C تا دمای 240°C با سرعت $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ گرم شدند و مدول ذخیره و اتلاف و $\tan\delta$ ، در دماهای مختلف اندازه گیری شد. داده های گزارش شده میانگین حداقل دو تکرار هستند.

آزمون رسانندگی گرمایی

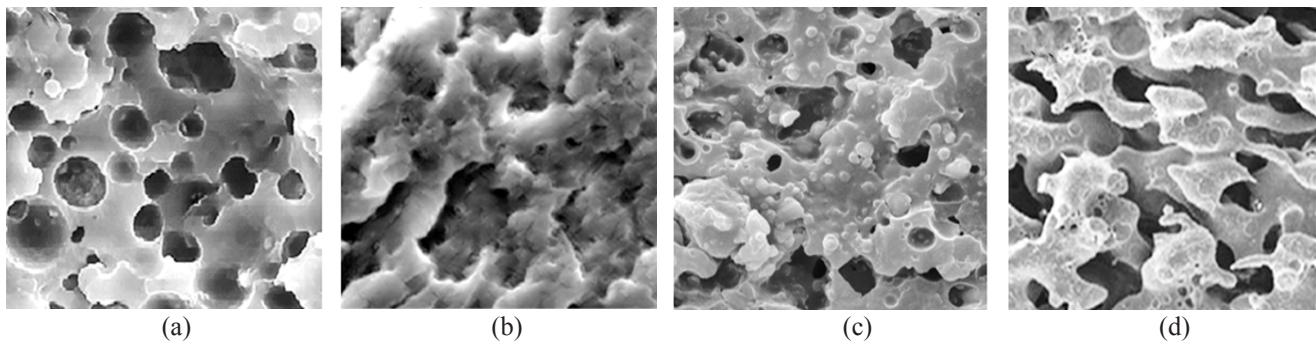
برای بررسی نفوذپذیری گرمایی نمونه ها از دستگاه XFA 500 ساخت شرکت Linseis آلمان استفاده شد. نمونه های به صورت دیسکی با قطر ۲۵ mm و ضخامت ۲ mm آماده سازی و با گرافیت پوشش دهی شدند. تمام نمونه ها در خلأ و در دمای محیط تا 100°C با سرعت گرمادهی $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ آزمون شدند. در هر دما حداقل ۱۰ پالس زنون روی نمونه ها زده شد و میانگین آن ها در نظر گرفته شد. برای محاسبه رسانندگی گرمایی از معادله (۲) استفاده شد:

$$K = \alpha \times C_p \times \rho \quad (2)$$

در این معادله، α ، ضریب نفوذپذیری گرمایی (cm^2/s)؛ C_p ، ظرفیت گرمایی (J/g)؛ ρ چگالی (g/cm^3) و K رسانش پذیری گرمایی ($\text{W}/\text{K}\cdot\text{m}$) است. آزمون رسانندگی گرمایی هر نمونه حداقل پنج مرتبه تکرار شده و میانگین آن گزارش شد.

تعیین چگالی

برای تعیین چگالی نمونه ها از روش غوطه وری استفاده شد، بدین ترتیب که نمونه هایی با وزن حدود ۳ g و مربع شکل آماده سازی شدند و پیش از انجام آزمون به مدت ۲۴ h درون آون با دمای 80°C و سپس به مدت ۲ h درون خشکانه قرار گرفتند و با دمای محیط هم دما شدند. آزمون چگالی هر نمونه حداقل پنج مرتبه تکرار شد و میانگین آن



شکل ۱- تصاویر FE-SEM نمونه‌ها با بزرگ‌نمایی $10\ \mu\text{m}$: (a) 80-20-AO، (b) 80-20-AO10، (c) 80-20-BO10، و (d) 80-20-CO10. Fig. 1. FE-SEM graphs of samples: (a) 80-20-AO, (b) 80-20-AO10, (c) 80-20-BO10, and (d) 80-20-CO10, Scale-bars are $10\ \mu\text{m}$.

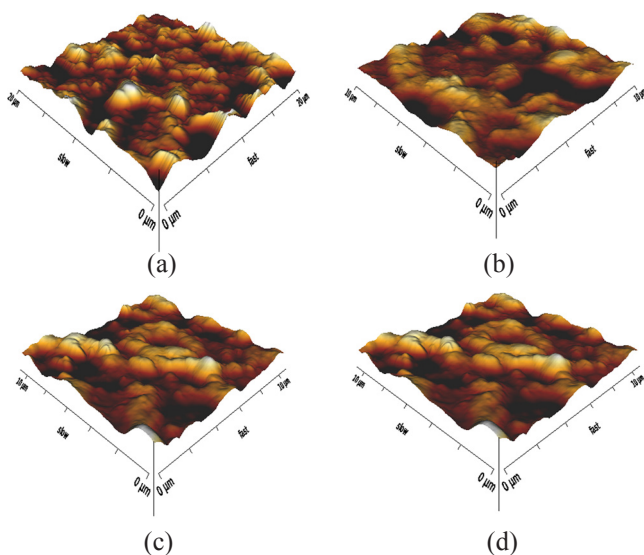
کرده‌اند، می‌توانند با تغییر در انرژی آزاد اختلاط باعث افزایش انحلال‌پذیری شوند. در صورتی که انرژی آزاد برهم‌کنش منفی باشد، یا به عبارتی اگر ذرات با زنجیرهای پلیمری برهم‌کنش خوبی داشته باشند، پایداری ترمودینامیکی و انحلال‌پذیری اجزا در سطح مشترک افزایش می‌یابد. بدین ترتیب انتظار می‌رود، در صورت جاگیری ذرات آلومینیم نیتريد یا آلومینیم اکسید در فصل مشترک و افزایش انحلال‌پذیری در کامپوزیت‌ها، دمای گذار شیشه‌ای پلی‌آمید پهن‌تر شده و کاهش یابد. زیرا، تعداد زنجیرهای پلی‌آمید با دمای گذار شیشه‌ای کمتر افزایش یافته است. از طرفی وجود ذرات در فصل مشترک باعث افزایش دمای گذار شیشه‌ای فاز پلی‌اولفین الاستومر نیز

80-20-BO10 و نیز 80-20-CO10 شکل‌گیری ساختار هر دو فاز پیوسته به خوبی قابل دیدن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نواحی فاز پلی‌اولفین الاستومر کشیده شده با یکدیگر ادغام و تشکیل یک فاز پیوسته را در سامانه داده‌اند. در شکل ۱ (d) مربوط به نمونه 80-20-CO10، پیوستگی فازها به وضوح بزرگ‌تر از نمونه‌های قبلی است. این تغییر شکل‌شناسی به واسطه شکل‌گیری نواحی کشیده شده پلی‌اولفین الاستومر است که حاصل اثر ذرات بر گرانروی و کشسانی این فاز است. بنابراین ساختار نهایی کامپوزیت‌های دارای پرکننده و کنترل محل قرارگیری ذرات پرکننده می‌تواند به یک ساختار هر دو فاز پیوسته پایدار منجر شود.

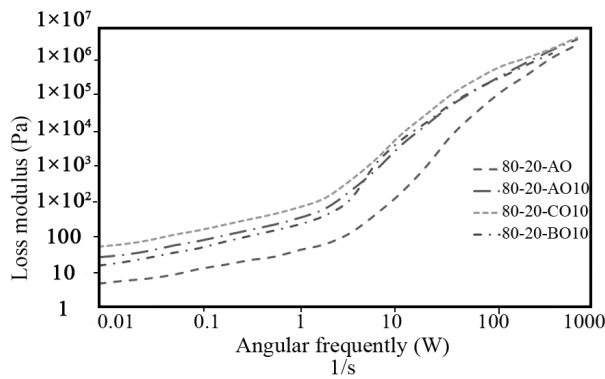
در ادامه، بررسی مکان‌نگاری (توپوگرافی سطحی) نمونه‌ها با میکروسکوپ نیروی اتمی انجام شد. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، خطوط زرد رنگ به فاز پلی‌اولفین الاستومر با کمترین سختی، نواحی قهوه‌ای رنگ به پلی‌آمید و نواحی تیره رنگ به پرکننده با بیشترین سختی مربوط هستند. در شکل‌های ۲ (b) و (c) و (d) برخلاف شکل ۲ (a) پیوستگی بین نواحی سیاه رنگ دیده می‌شود که نشان‌دهنده ایجاد پیوستگی میان ذرات در مجاور فازهاست. همچنین پیوستگی در نواحی زرد و قهوه‌ای رنگ نیز بیانگر پیوستگی بین فازهاست. این نتایج تأییدکننده نتایج میکروسکوپ الکترونی هستند [۲۶].

اثر جاگیری ذرات بر پاسخ گرمای مکانیکی

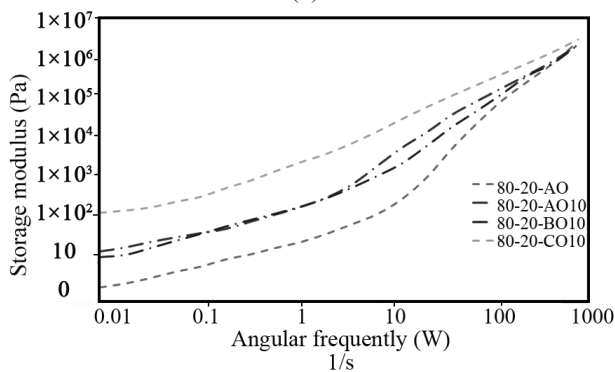
برای بررسی بیشتر جاگیری ذرات در نمونه‌ها، خواص دینامیکی مکانیکی اندازه‌گیری شد، زیرا تصاویر میکروسکوپ الکترونی فقط مؤید بخش کوچکی از نمونه‌ها هستند. در تمام نمونه‌ها دو پیک اصلی در دمای‌های $45\ ^\circ\text{C}$ - و $80\ ^\circ\text{C}$ دیده می‌شوند که به ترتیب دمای گذار شیشه‌ای پلی‌اولفین الاستومر و پلی‌آمید هستند. Nesterov و همکاران [۲۷] نشان دادند، ذراتی که در فصل مشترک مهاجرت



شکل ۲- تصاویر AFM با بزرگ‌نمایی $10\ \mu\text{m}$: (a) 80-20-AO، (b) 80-20-AO10، (c) 80-20-BO10، و (d) 80-20-CO10. Fig. 2. AFM graphs of samples: (a) 80-20-AO, (b) 80-20-AO10, (c) 80-20-BO10, and (d) 80-20-CO10, (Scale-bars are $10\ \mu\text{m}$ for all samples).



(a)



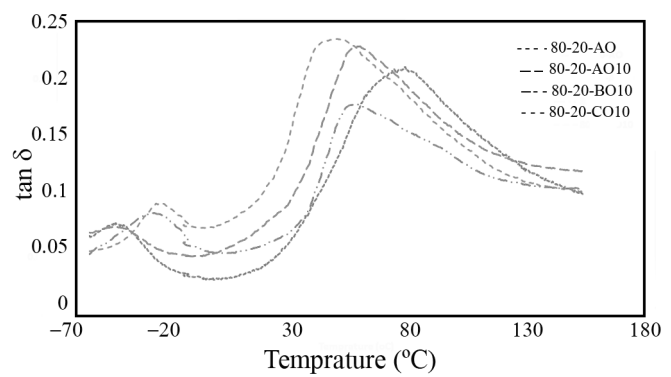
(b)

شکل ۴- (a) مدول ذخیره و (b) اتلاف نمونه‌ها.

Fig. 4. (a) Storage modulus and (b) loss modulus of samples.

۱ Hz است و در بسامدهای کمتر از آن $G'' < G'$ است و پس از محل تلاقی دارای رفتار گرانرو ($G'' > G'$) است. با افزودن ذرات آلومینیم نیتريد و آلومینیم اکسید به پلی‌آمید این محل تلاقی به بسامدهای کمتر جابه‌جا می‌شود که بیانگر افزایش سازگاری بین فازهاست. در نمونه‌های 80-20-AO10، 80-20-BO10 و 80-20-CO10 رفتار شبه‌جامد دیده می‌شود که به دلیل ایجاد ساختار هر دو فاز پیوسته با سطح مشترک زیاد است. در مقایسه، نمونه 80-20-CO10 دارای مدول ذخیره بیشتری نسبت به سایر نمونه‌هاست. این موضوع به دلیل جاگیری ذرات بیشتری در فصل مشترک اجزا و ایجاد ساختار قوی‌تر است. به عبارتی با وجود ذرات آلومینیم نیتريد و اکسید به صورت هم‌زمان و شکل‌گیری نواحی فازی کشیده‌شده، رفتار شبه‌جامد دیده شد و مدول ذخیره به مقادیر بیشتر منتقل می‌شود که حاکی از افزایش استحکام شبکه سه‌بعدی از ذرات پرکننده در سامانه نام‌برده است. به طور کلی، روند افزایش مقدار ناحیه مسطح مدول ذخیره نیز تشکیل شبکه سه‌بعدی قوی‌تری را در نمونه 80-20-CO10 نشان می‌دهد.

همچنین مقایسه مدول ذخیره سامانه نشان می‌دهد، کاهش مدول ذخیره در مقدار پرکننده یکسان برای 80-20-CO10 کمتر از سایر



شکل ۳- تجزیه مکانیکی دینامیکی نمونه‌ها.

Fig. 3. Dynamic mechanical analysis of samples.

خواهد شد. نتایج آزمون ترمودینامیکی در شکل ۳ نشان می‌دهد، در نمونه خالص 80-20-AO دو پیک اصلی در دمای‌های -45 و 80 °C مشاهده می‌شود. با افزایش ۱۰٪ پرکننده پیک پلی‌آمید کمی به کمتر و پیک مربوط به پلی‌اولفین الاستومر کمی به دماهای بیشتر منتقل شده است. اما با افزایش درصد ذرات این دو پیک پهن‌تر شده و به یکدیگر نزدیک شده‌اند. این مشاهدات بیانگر وجود ذرات در فصل مشترک و افزایش انحلال‌پذیری (سازگاری) اجزای پلیمری است. افزون بر این، وجود ذرات آلومینیم نیتريد و آلومینیم اکسید به طور هم‌زمان نیز باعث نزدیکی بیشتر پیک پلی‌آمید و پلی‌اولفین الاستومر به یکدیگر شده است که بیانگر افزایش سازگاری دو فاز نسبت به وجود ذرات به تنهایی در سامانه است. به طور کلی این نتایج مؤید مهاجرت ذرات از فاز پلی‌اولفین الاستومر به فصل مشترک و بهبود برهم‌کنش بین فازهاست.

خواص رئولوژیکی سامانه

بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده [۲۸] پراکنش بهتر ذرات صفحه‌ای مانند نانورس موجب افزایش مدول ذخیره و ایجاد ناحیه مسطح با مقدار بیشتری می‌شود. در نمونه‌های 80-20-AO10 و 80-20-BO10 نمودار مدول اتلاف و ذخیره زاویه‌های کمتری نسبت به محور Xها دارند که به دلیل وجود ذرات در فصل مشترک و ایجاد ساختار است. اما، در نمونه 80-20-CO10 این زاویه کاهش پیدا کرده که بیانگر جاگیری نانوذرات در فصل مشترک دو فاز است. شکل ۴ مدول ذخیره و اتلاف را در ناحیه گرانروکشان خطی برحسب بسامد برای سامانه ۲۰/۸۰ دارای ۱۰٪ وزنی آلومینیم نیتريد و آلومینیم اکسید نشان می‌دهد. نمونه خالص دارای رفتار گرانرو ($G'' > G'$) بوده که مطابق با رفتار شکل‌شناسی قطره-ماتریس تشکیل شده در این نمونه است. در نمونه خالص محل تلاقی G' و G'' در بسامد حدود

جدول ۲- نتایج گرماسنجی پویشی تفاضلی.

Table 2. DSC analysis.

Sample code	T _m (°C)	T _{m2} (°C)	T _c (°C)	ΔH _m (J/g)	ΔH _c (J/g)	X _c (%)	std
PA6	218.81±0.01	-	192.1±0.01	99.80±0.01	87.70±0.01	52.30±0.01	0.129
80-20-AO	219.34±0.01	-	192.1±0.01	79.31±0.01	74.24±0.01	51.95±0.01	0.454
80-20-AO ₁₀	220.08±0.01	-	191.9±0.01	63.41±0.01	61.02±0.01	41.54±0.01	0.258
80-20-BO ₁₀	220.12±0.01	-	192.0±0.01	64.27±0.01	62.88±0.01	42.10±0.01	0.081
80-20-CO ₁₀	219.81±0.01	-	191.8±0.01	55.50±0.01	53.17±0.01	36.36±0.01	0.339

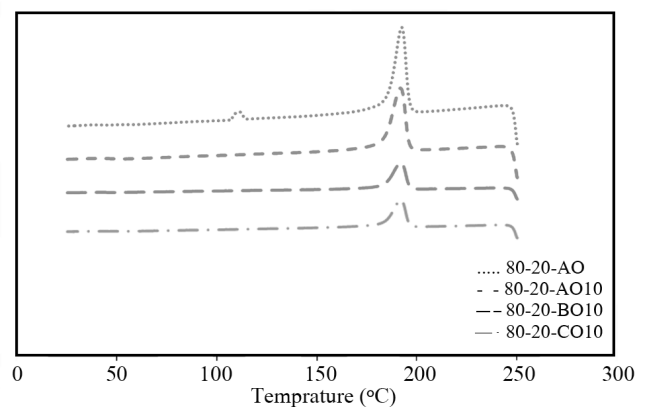
اضافه کردن فاز پلی‌اولفین الاستومر به فاز پلی‌آمید بلورینگی پلی‌آمید کاهش پیدا می‌کند. این کاهش در نمونه‌های خالص مشهود است. در نمونه خالص یک پیک کوچک در دمای ۱۱۲ °C ایجاد می‌شود که به بلورینگی تفکیک شده فاز پلی‌آمید مربوط است. این رفتار بلورینگی در آمیزه‌ها با شکل‌شناسی قطره ماتریس جایی رخ می‌دهد که تعداد عوامل هسته‌زای ناهمگن از تعداد قطره‌ها بیشتر است، این فرایند دارای دمای بلورینگی کمتری است و موجب پیدایش پیک در دماهای کم می‌شود. طبق مشاهدات شکل‌شناسی، در این نمونه ساختار هر دو فاز پیوسته تشکیل شده حین اختلاط به ساختار قطره ماتریس شکسته می‌شود.

مطابق با نتایج جدول ۲، درصد بلورینگی در نمونه‌های 80-20-BO₁₀، 80-20-AO₁₀ و 80-20-CO₁₀ کاهش یافته است. این کاهش به دلیل افزایش سطح مشترک فاز پلی‌اولفین الاستومر با پلی‌آمید به واسطه تشکیل شکل‌شناسی هر دو فاز پیوسته پایدار است. به طور کلی در آمیزه‌های پلیمری به منظور رشد گویچه‌ها (spherulite)، فازی که قابلیت بلورینگی دارد، باید فاز دیگر را پس بزند. با افزایش سطح مشترک، انرژی لازم برای این فرایند افزایش و به دنبال آن بلورینگی کاهش می‌یابد. فصل مشترک پلی‌اولفین الاستومر و پلی‌آمید نمی‌تواند به عنوان عامل هسته‌زا عمل کند و فرایند بلورینگی را سرعت ببخشد، زیرا دمای بلورینگی در آمیخته‌های خالص دوتایی تفاوتی با پلی‌آمید خالص ندارد. کاهش بلورینگی در نمونه 80-20-CO₁₀ بیشتر از سایر نمونه‌هاست که به دلیل افزایش فصل مشترک در نمونه دارای ذرات آلومینیم نیتريد و اکسید به طور هم‌زمان است. در حالی که در نمونه‌های دارای فقط آلومینیم نیتريد یا اکسید با مقادیر یکسان تغییر چندانی در اعداد کاهش یافته‌شده دیده نشد. به طور کلی، نتایج رفتار بلورینگی نمونه‌ها بیانگر پیوستگی بیشتر فازها در نمونه 80-20-CO₁₀ است که نتایج رئولوژیکی و

نمونه‌هاست که به دلیل فصل مشترک بیشتر (پیوستگی بیشتر) در این سامانه است. بدین ترتیب نمونه 80-20-CO₁₀ به دلیل پیوستگی فازی بیشتر و نیز قرار گرفتن ذرات ریز و درشت پرکننده‌های آلومینیم نیتريد و اکسید در سطح مشترک فازها دارای بهترین خواص رئولوژیکی است. روند افزایش مقدار ناحیه مسطح مدول ذخیره نیز تشکیل شبکه سه‌بعدی قوی‌تری را در نمونه 80-20-CO₁₀ نشان می‌دهد. این نتایج، مشاهدات مبنی بر افزایش پیوستگی فاز پلی‌اولفین الاستومر و ایجاد مسیر پیوسته بین ذرات در نمونه نام‌برده را تأیید می‌کند.

رفتار بلورینگی در سامانه

پلی‌اولفین الاستومر دارای بلورینگی بسیار کمی است و در این بخش فقط بلورینگی پلی‌آمید بررسی شده است. بلورینگی و نتایج حاصل از گرماسنجی پویشی تفاضلی و انحراف استاندارد درصد بلورینگی در جدول ۲ و شکل ۵ خلاصه شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رود، با



شکل ۵- منحنی سرمایش نمونه‌ها در گرماسنجی پویشی تفاضلی.

Fig. 5. Cooling curve of samples from differential scanning calorimeter.

جدول ۳- رسانندگی گرمایی نمونه‌ها.

Table 3. Thermal conductivity of samples.

Sample code	Thermal Diffusivity (cm ² /s)	Density (g/cm ³)	Heat Capacity (J/g.oC)	Thermal Conductivity (W/m.k)	std
80-20AO	0.0021±0.0005	1.08±0.01	2.07±0.01	0.46±0.01	0.0239
80-20-AO ₁₀	0.0095±0.0005	1.20±0.01	1.95±0.01	2.22±0.01	0.0652
80-20-BO ₁₀	0.0066±0.0005	1.24±0.01	1.70±0.01	1.39±0.01	0.0292
80-20-CO ₁₀	0.0185±0.0005	1.28±0.01	1.41±0.01	3.34±0.01	0.0245

دارای حالت بی شکل هستند که با افزودن ذرات آلومینیم کروی شکل، تماس بین ذرات بیشتر می شود و در نتیجه باعث افزایش رسانندگی گرمایی نمونه‌ها می شود. به عبارتی در سامانه 80-20-CO₁₀ بیشترین رسانندگی گرمایی مشاهده شد که به واسطه تشکیل ساختار هر دو فاز پیوسته در کسر حجمی کمتری از فاز پلی اولفین الاستومر است.

نتیجه گیری

در این پژوهش، به منظور افزایش رسانش پذیری گرمایی آمیخته پلی آمید ۶ و پلی اولفین الاستومر (۲۰/۸۰)، از قراردادن پرکننده‌های رسانا به طور گزینشی در سطح مشترک دو پلیمر و ایجاد فاز پیوسته پایدار استفاده شد. بدین منظور ۱۰٪ وزنی ذرات آلومینیم نیتريد و اکسید به تنهایی و هم‌زمان با نسبت به ترتیب ۲ به ۱ و اندازه ذرات متفاوت به کار گرفته شدند. نتایج میکروسکوپ الکترونی و میکروسکوپ نیروی اتمی نشان می دهند، وجود ۱۰٪ درصد وزنی از ذرات آلومینیم نیتريد یا آلومینیم اکسید به تنهایی باعث ایجاد یک فاز پیوسته می شود، اما وجود توأم ذرات آلومینیم نیتريد و اکسید باعث افزایش پیوستگی بین دو فاز شده است. نتایج رسانش سنجی گرمایی نشان می دهد، رسانایی گرمایی 80-20-AO₁₀ و 80-20-BO₁₀، دارای ۱۰٪ وزنی تک پرکننده، به ترتیب ۴/۸ و ۳ برابر بیشتر از نمونه خالص است. در حالی که در 80-20-CO₁₀ دارای ۱۰٪ وزنی آلومینیم نیتريد (AlN) و پرکننده آلومینیم اکسید (Al₂O₃) به ترتیب با نسبت ۲ به ۱، رسانش گرمایی ۷/۲۳ برابر بیشتر از نمونه‌های خالص است. به عبارتی رسانندگی گرمایی نمونه دارای ذرات آلومینیم نیتريد و اکسید به طور هم‌زمان حدود دو برابر بیشتر از زمانی است که فقط از یک نوع پرکننده با همان درصد وزنی استفاده شود. نتایج تجزیه

شکل شناسی را تأیید می کند و انتظار می رود، به دلیل جهت یابی ذرات در فصل مشترک فازها، بیشترین مقدار رسانندگی گرمایی در این نمونه دیده شود، بدین منظور رسانندگی گرمایی در بخش بعدی بررسی شده است.

بررسی رسانندگی گرمایی سامانه

همان طور که در بخش مشخصه یابی اشاره شد، برای محاسبه ضریب رسانندگی گرمایی نمونه‌ها، باید ضریب نفوذ پذیری گرمایی، چگالی و ظرفیت گرمایی سامانه اندازه گیری شوند، مقادیر نام برده به همراه انحراف استاندارد ظرفیت گرمایی در جدول ۳ خلاصه شده اند. ضریب نفوذ پذیری گرمایی نمونه‌های دارای ذرات پرکننده، مقدار شایان توجهی بیشتر از نمونه خالص است. در نمونه 80-20-AO₁₀ رسانندگی گرمایی ۶/۱۶ برابر بیشتر از پلی آمید و ۴/۸ برابر بیشتر از نمونه خالص و در نمونه 80-20-BO₁₀ رسانندگی گرمایی ۳/۸۶ برابر پلی آمید و ۳ برابر بیشتر از نمونه خالص شدند که به دلیل ایجاد آستانه نفوذ پذیری در این نمونه هاست. در نمونه 80-20-CO₁₀ رسانندگی گرمایی ۹/۲۵ برابر پلی آمید و ۷/۲۳ برابر نمونه خالص ارتقا یافت. پژوهشگران اثبات کردند [۲۲] وقتی از ذرات پرکننده با اندازه‌های مختلف استفاده می شود، رسانش پذیری گرمایی پلی آمید بیشتر از زمانی است که اندازه‌ها یکسان باشند، زیرا ذرات پرکننده ریزخفیه‌های بین پرکننده‌های بزرگ را پُر می کنند و باعث کاهش تخلخل میان پرکننده‌ها و تشکیل زنجیره گرمایی می شوند. از آنجا که این پژوهش در راستای نتایج بهینه به دست آمده در مقاله مزبور است، می توان استنباط کرد، افزایش شایان توجه رسانندگی گرمایی در نمونه 80-20-CO₁₀ بیانگر کاهش تخلخل بین پرکننده‌ها و افزایش مقدار فشردگی است که در نتیجه باعث تشکیل زنجیره گرمایی و کاهش آستانه نفوذ پذیری ذرات شده است. ذرات آلومینیم نیتريد نیز

پایدار است. کاهش بلورینگی در نمونه 80-20-CO10 بیشتر از سایر نمونه‌هاست که به دلیل افزایش فصل مشترک در نمونه دارای ذرات آلومینیم نیتريد و اکسید به صورت توأم است. به طور کلی، در این پژوهش رسانندگی گرمایی آمیخته پلی‌آمید-پلی‌اولفین الاستومر با راهکار کاهش آستانه اتصال به مقدار شایان توجهی افزایش یافت که می‌تواند نویدبخش طراحی و ساخت کامپوزیت‌های رسانندگی گرمایی با خواص مکانیکی مطلوب، سبک و ارزان با فرایندپذیری خوب باشد.

مراجع

- Mumtaz N., Li Y., Artiaga R., Farooq Z., Mumtaz A., Guo Q., and Un-Nisa F., Fillers and Methods to Improve the Effective (out-plane) Thermal Conductivity of Polymeric Thermal Interface Materials—A Review, *Heliyon*, 10, 2024.
- Baruch A.-E., Bielenki L., and Regev O., Thermal Conductivity Improvement of Electrically Nonconducting Composite Materials, *Rev. Chem. Eng.*, **28**, 61-71, 2012.
- Idumah C.I. and Hassan A., Recently Emerging Trends in Thermal Conductivity of Polymer Nanocomposites, *Rev. Chem. Eng.*, **32**, 413-457, 2016.
- Burger N., Laachachi A., Ferriol M., Lutz M., Toniazzo V., and Ruch D., Review of Thermal Conductivity in Composites: Mechanisms, Parameters and Theory, *Prog. Polym. Sci.*, **61**, 1-28, 2016.
- He L., Zhang W., Liu X., and Tong L., Substantial Improvement of Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Polymer Composites by Incorporation of Boron Nitride Nanosheets and Modulation of Thermal Curing Reaction, *Polym. Compos.*, **45**, 2215-2231, 2024.
- Chen H., Ginzburg V.V., Yang J., Yang Y., Liu W., Huang Y., Du L., and Chen B., Thermal Conductivity of Polymer-Based Composites: Fundamentals and Applications, *Prog. Polym. Sci.*, **59**, 41-85, 2016.
- Sun Y., Zhou L., Han Y., and Cui L., Numerical Analysis on the Direction to Improve Thermal Conductivity of Polymer Composites Filled with Spherical Particles, *Comput. Mater. Sci.*, **233**, 112697, 2024.
- Šupová M., Martynková G.S., and Barabaszová K., Effect of Nanofillers Dispersion in Polymer Matrices: A Review, *Sci. Adv. Mater.*, **3**, 1-25, 2011.
- Gaxiola D.L., Keith J.M., King J.A., and Johnson B.A., Nielsen Thermal Conductivity Model for Single Filler Carbon/Polypropylene Composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **114**, 3261-3267, 2009.
- Ma A., Chen W., Hou Y., and Zhang G., The Preparation and Cure Kinetics Researches of Thermal Conductivity Epoxy/AlN Composites, *Poly.-Plast. Technol. Eng.*, **49**, 354-358, 2010.
- Chen S., Xu N., Gorbatikh L., and Seveno D., Find the Maximum Thermal Conductivity of Graphene Reinforced Polymer Composite: A Molecular Dynamics Approach, *Polym. Compos.*, **45**, 302-314, 2024.
- Hadaeghnia M., Ahmadi S., Ghasemi I., and Wood-Adams P.M., Fractal Structures of PA6/POE Blend Nanocomposites and Their Dynamic Properties, *J. Rheol.*, **67**, 183-196, 2023.
- Diez-Pascual A.M., Guan J., Simard B., and Gómez-Fatou M.A., Poly(phenylene sulphide) and Poly(ether ether ketone) Composites Reinforced with Single-Walled Carbon Nanotube Buckypaper: II—Mechanical Properties, Electrical and Thermal Conductivity, *Composites Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **43**, 1007-1015, 2012.
- Aliev A.E., Lima M.H., Silverman E.M., and Baughman R.H., Thermal Conductivity of Multi-Walled Carbon Nanotube Sheets: Radiation Losses and Quenching of Phonon Modes, *Nanotechnology*, **21**, 035709, 2009.
- Jia Y., He H., Yu P., Chen J., and Lai X., Synergistically Improved Thermal Conductivity of Polyamide-6 with Low Melting Temperature Metal and Graphite, *Express Polym. Lett.*, **10**, 679-692, 2016.
- Gaska K., Rybak A., Kapusta C., Sekula R., and Siwek A., Enhanced Thermal Conductivity of Epoxy-Matrix Composites with Hybrid Fillers, *Polym. Adv. Technol.*, **26**, 26-31, 2015.

17. Choi S.W., Yoon K.H., and Jeong S.-S., Morphology and Thermal Conductivity of Polyacrylate Composites Containing Aluminum/Multi-Walled Carbon Nanotubes, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **45**, 1-5, 2013.
18. Lee E.S., Lee S.M., Shanefield D.J., and Cannon W.R., Enhanced Thermal Conductivity of Polymer Matrix Composite via High Solids Loading of Aluminum Nitride in Epoxy Resin, *J. Am. Ceramic Soc.*, **91**, 1169-1174, 2008.
19. Altay L., Seki Y., Sever K., Sen I., Uysalman T., Atagur M., and Sarikanat M., Thermal, Electrical, and Mechanical Properties of Various Thermal Conductive Powder Filled Polyamide 6 Composite Materials for Thermal Management Applications, *Acta Physica Polonica, A*, 134, 2018.
20. Yuan D., Gao Y.F., Guo Z.X., and Yu J., Improved Thermal Conductivity of Ceramic Filler-Filled Polyamide Composites by Using PA6/PA66 1:1 Blend as Matrix, *J. Appl. Polym. Sci.*, **134**, 45371, 2017.
21. Xiao C., Leng X., Zhang X., Zheng K., and Tian X., Improved Thermal Properties by Controlling Selective Distribution of AlN and MWCNT in Immiscible Polycarbonate (PC)/Polyamide 66 (PA66) Composites, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **110**, 133-141, 2018.
22. Li D., Zeng D., Chen Q., Wei M., Song L., Xiao C., and Pan D., Effect of Different Size Complex Fillers on Thermal Conductivity of PA6 Thermal Composites, *Plast. Rubber Compos.*, **48**, 347-355, 2019.
23. Yenier Z., Seki Y., Aker S., Öner F., Altay L., and Sarikanat M., The Effect of Hybrid Thermal Fillers on Thermal Conductivity of Carbon Fiber Reinforced Polybutylene Terephthalate Composites, *Polym. Int.*, **73**, 484-493, 2024.
24. Shahmir M., Ahmadi S., and Arabi H., Improved Thermal Conductivity of Immiscible Polyamide 6 (PA6)/Polyolefin Elastomer (POE) Blend by Controlling Selective Localization of Aluminum Nitride (AlN), *Iran. Polym. J.*, **33**, 1-10, 2024.
25. DeRoussel P., Khakhar D., and Ottino J., Mixing of Viscous Immiscible Liquids. Part 1: Computational Models for Strong-Weak and Continuous Flow Systems, *Chem. Eng. Sci.*, **56**, 5511-5529, 2001
26. Modarresi-Alam A.R., Soleimani M., Pakseresht M., Farzaneh-Jobaneh E., Zeraatkar V., Tabatabaei F.A., Shabzendedar S., and Movahedifar F., Preparation of New Conductive Nanocomposites of Polyaniline and Silica under Solid-State Condition, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **29**, 387-398, 2016.
27. Nesterov A. and Lipatov Y., Compatibilizing Effect of a Filler in Binary Polymer Mixtures, *Polymer*, **40**, 1347-1349, 1999.
28. Cassagnau P., Melt Rheology of Organoclay and Fumed Silica Nanocomposites, *Polymer*, **49**, 2183-2196, 2008.