



اثر نانو ذرات سبز کیتوسان بر پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی نانو کامپوزیت های اپوکسی: پیشرفت های نوین

محمد حسین کریمی^{۱*}، امید معینی جزینی^{۲*}، محمد علی اطمینانی اصفهانی^۳

^۱پژوهشگر پسا دکترا و دستیار تحقیقاتی، مهندسی پلیمر، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان،

اصفهان، ایران

^۲دانشیار، مهندسی پلیمر، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۳استادیار، مهندسی پلیمر، گروه علوم مهندسی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده

نانوذرات کیتوسان و مشتقات اصلاح شده آن، به ویژه در ترکیب با رزین های اپوکسی، تأثیر قابل توجهی در بهبود خواص ریخت شناسی، مکانیکی و پایداری گرمایی نانو کامپوزیت های اپوکسی دارند. این نانوذرات با توزیع یکنواخت و ایجاد تعاملات قوی بین فازها، موجب افزایش استحکام کششی، مدول یانگ، چقرمگی و مقاومت گرمایی می شوند. اصلاح سطح کیتوسان با ترکیباتی مانند پلی سیلوکسان ها و آمونوم فیتات، باعث تشکیل لایه های ذغالی متراکم تر هنگام گرمادیدگی شده و مقاومت به شعله و پایداری گرمایی را افزایش می دهد. افزودن کیتوسان به رزین اپوکسی باعث افزایش پایداری گرمایی می شود زیرا ساختارهای شبکه ای قوی تری ایجاد می کند و پیوندهای مولکولی مستحکمی به وجود می آورد که مقاومت در برابر تخریب گرمایی را بالا می برد. همچنین، توزیع بهینه نانوذرات و جلوگیری از تجمع ذرات، ساختار همگن و کارایی بالاتر مواد را تضمین می کند. خواص زیستی، ضدباکتریایی و قابلیت تجزیه پذیری کیتوسان، این ماده را به گزینه ای مناسب و دوستدار محیط زیست برای کاربردهای علمی متفاوت در صنعت تبدیل کرده است. در این پژوهش، اثر نانوذرات کیتوسان اصلاح شده بر ریخت شناسی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی نانو کامپوزیت های اپوکسی مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد. همچنین در ادامه، به پیشرفت های اخیر در زمینه نانو کامپوزیت های اپوکسی حاوی نانوذرات اصلاح شده پرداخته شده و مهم ترین نکات و یافته ها به صورت جامع جمع بندی شده اند.

واژه های کلیدی: رزین اپوکسی، نانو ذرات کیتوسان اصلاح شده، ریخت شناسی، خواص مکانیکی، تخریب گرمایی.

ایمیل نویسندگان مسئول

(karami.polymerpostdoc@gmail.com and mh.karami@eng.ui.ac.ir); o.moini@eng.ui.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۱۸

مقدمه

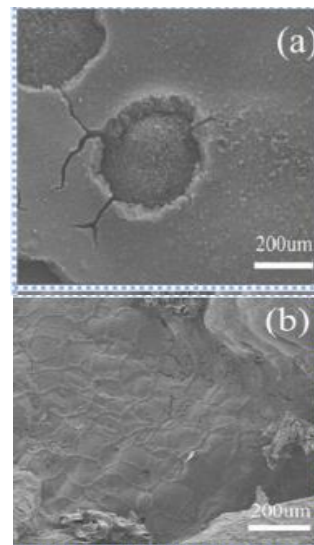
رزین‌های اپوکسی به دلیل داشتن ویژگی‌های مکانیکی برجسته، پایداری شیمیایی مناسب و توانایی سازگاری با مواد متنوع، در بسیاری از صنایع کاربرد وسیعی دارند. افزودن نانوذرات به ساختار این رزین‌ها، روشی کارآمد برای ارتقاء ویژگی‌های فیزیکی و عملکردی آنها به شمار می‌آید؛ زیرا نانوذرات با افزایش سطح تماس و تعاملات بین‌فازی، قادرند مقاومت مکانیکی، پایداری در برابر گرما و مقاومت به خوردگی را به طور قابل توجهی بهبود بخشند [۱]. از این رو، تلفیق رزین اپوکسی با نانوذرات، افقی نوین در توسعه مواد پیشرفته و با کارایی بالا گشوده است. در سال‌های اخیر، توسعه مواد نانوکامپوزیتی مبتنی بر رزین‌های اپوکسی و نانوذرات زیست پایه همچون کیتوسان به عنوان روشی مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی، ریخت شناسی و پایداری گرمایی مورد توجه گسترده قرار گرفته است [۲]. کیتوسان، به دلیل ساختار زیستی، قابلیت تجزیه‌پذیری و خواص ضدباکتریایی طبیعی، به عنوان ماده‌ای اصلاح‌کننده و دوستدار محیط زیست، جایگاه ویژه‌ای در مهندسی مواد یافته است [۳]. افزودن نانوذرات کیتوسان و مشتقات اصلاح‌شده آن به سامانه‌های اپوکسی باعث افزایش استحکام کششی، مدول یانگ، چقرمگی و مقاومت گرمایی می‌شود که این ارتقا ناشی از توزیع یکنواخت نانوذرات و تعاملات قوی بین فازهای پلیمری و نانوذرات است [۴]. نانوذرات کیتوسان هنگام ترکیب با رزین اپوکسی، به طور قابل توجهی مقاومت مواد را در برابر تخریب گرمایی بهبود می‌بخشند. این نانوذرات با ایجاد ساختارهای شبکه‌ای قوی و تشکیل لایه‌های زغالی محافظ، از آسیب گرمای به ماتریس اپوکسی جلوگیری کرده و پایداری گرمایی کامپوزیت را افزایش می‌دهند [۵]. بنابراین، افزودن نانو کیتوسان به رزین اپوکسی، روشی مؤثر برای تقویت مقاومت گرمایی و بهبود عملکرد مواد در دماهای بالا محسوب می‌شود. علاوه بر این، اصلاح سطح کیتوسان با گروه‌های شیمیایی خاص مانند پلی‌سیلوکسان‌ها و آمونیم فیتات، خواص ریخت شناسی مواد را بهبود بخشیده و تشکیل لایه‌های زغالی متراکم‌تر هنگام گرمادیدگی را تسهیل می‌کند که نقش مهمی در افزایش مقاومت به شعله و

پایداری گرمایی ایفا می‌نماید [۷]. هم‌افزایی نانوذرات کیتوسان با سایر افزودنی‌ها، از جمله نانوذرات معدنی و تقویت‌کننده‌های آلی، موجب ارتقای همزمان خواص مکانیکی، گرمایی و عملکردی در کامپوزیت‌های اپوکسی می‌گردد. بنابراین، استفاده از کیتوسان و مشتقات آن به عنوان نانوذرات اصلاح‌شده، نه تنها عملکرد فنی مواد را بهبود می‌بخشد، بلکه گامی مهم در توسعه راهکارهای پایدار و دوستدار محیط زیست در صنایع پیشرفته محسوب می‌شود [۸]. در این پژوهش، اثر نانوذرات کیتوسان اصلاح‌شده بر ریخت شناسی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. همچنین در ادامه، به پیشرفت‌های اخیر در زمینه نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات اصلاح‌شده پرداخته شده و مهم‌ترین نکات و یافته‌ها به صورت جامع جمع‌بندی شده‌اند.

مورفولوژی نانو کامپوزیت های اپوکسی

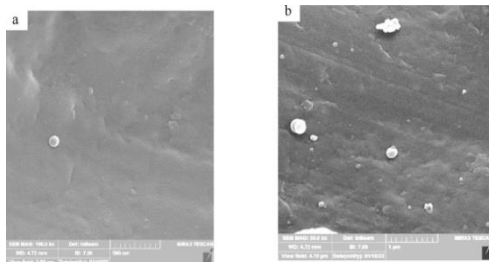
آزمون میکروسکوپ الکترونی برای بررسی تصویری، ذغال باقیمانده رزین اپوکسی خالص و نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی نانو ذرات کیتوسان اصلاح شده با آمونیم فیتات انجام شد (شکل ۱). نتایج نشان داد که، باقی‌مانده‌ی ذغال رزین اپوکسی خالص بسیار نازک بوده و قادر به پوشاندن کامل فویل آلومینیومی زیرین نیست؛ حفره‌ها و شکاف‌های واضحی وجود دارد و ضخامت لایه‌ی کربنی تشکیل شده کمتر از ۱ سانتی‌متر است. با این حال، پس از افزودن نانو ذرات اصلاح شده، ضخامت لایه‌ی کربنی منبسط شده در نانو کامپوزیت سنتز شده افزایش یافته و ساختاری متراکم پیدا می‌کند، به طوری که می‌تواند فویل آلومینیومی زیرین را به طور کامل ساختار به صورت پیوسته و متراکم درآمده است. این ساختار متراکم نقش مهمی در جلوگیری از ورود اکسیژن (O_2) به داخل زیرلایه رزین اپوکسی و ممانعت از ادامه‌ی سوختن ماده ایفا می‌کند [۹].

سیستم می‌شود [۱۱]. ریخت شناسی فیلم‌های اپوکسی حاوی نانو ذرات کیتوسان و گروه های پلی‌سیلوکسان بررسی شد. نتایج نشان داد که، با افزایش مقدار پلی‌سیلوکسان در فیلم‌های سنتز شده، فازهای بیشتری از گروه های سیلوکسان بر روی سطح فیلم‌ها ظاهر شدند که نشان‌دهنده غنی شدن سطح از گروه های سیلوکسان است. این مشاهده توسط تحلیل طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس (XPS) نیز تأیید شده است، که این نتیجه، نشان دهنده این است که سطح فیلم‌ها از عنصر سیلیسیم (Si) غنی شده است [۹]. در مقایسه با فیلم کیتوسان خالص، حفره‌های دایره‌ای و یکنواخت‌تری بر روی سطح نانو کامپوزیت ساخته شده مشاهده شد. این ریخت شناسی خاص به ویژگی کشش سطحی پایین، گروه های پلی‌سیلوکسان نسبت داده می‌شود، که در طی فرآیند خشک شدن به آرامی به سمت سطح مشترک فیلم و هوا مهاجرت کرده و منجر به تشکیل فاز غنی از گروه های پلی‌سیلوکسان می‌شود. در مقدار ۴ درصد وزنی، به دلیل غنی شدن سطح از گروه های پلی‌سیلوکسان، جدایش فاز بین گروه های پلی‌سیلوکسان آب‌گریز و کیتوسان آب‌دوست رخ میدهد که در نهایت منجر به پدیده‌ی عدم تشکیل فیلم می‌شود. همچنین ایجاد فازهای غنی از گروه های سیلوکسان، باعث اختلال در تبلور و آرایش منظم بین ماکرومولکول‌های نانو ذرات کیتوسان شده‌اند [۱۰]. پژوهشگران نشان دادند که ترکیب پلی‌گلیکولیک اسید (PGA) قابل تجزیه در آب دریا با افزودن ترکیبات ضدباکتریایی شامل کیتوسان، اپوکسی و گروه های آنتی‌اکسیدان فسفیت آلی، منجر به بهبود قابل توجه در خواص مکانیکی، گرمایی و ضدباکتریایی این کامپوزیت‌ها می‌شود. در این پژوهش، برای بررسی ویژگی‌های ریزساختاری کامپوزیت‌های آنتی‌باکتریال بر پایه پلی‌گلیکولیک استفاده شد [۱۱]. هدف از این تحلیل، مشاهده نحوه پراکندگی فازها، میزان یکنواختی ساختار داخلی و بررسی تأثیر افزودنی‌های مختلف بر سطح شکست نمونه‌ها بود. نمونه پلی‌گلیکولید خالص به‌عنوان نمونه پایه و بدون هیچ‌گونه افزودنی در نظر گرفته شد تا امکان مقایسه دقیق با سایر نمونه‌های اصلاح‌شده فراهم گردد. در نمونه حاوی رزین اپوکسی و ذرات حاوی گروه های فسفیتی،



شکل ۱. تصاویر آزمون میکروسکوپ الکترونی (a). رزین اپوکسی و (b). نانو کامپوزیت اپوکسی

اثر نانو ذرات کیتوسان بر ریخت شناسی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج آزمون میکروسکوپ نیروی اتمی نشان داد که، در مقادیر وزنی پایین‌تر کیتوسان، توزیع نسبتاً یکنواختی از پرکننده حاصل شده است، به طوری که توپوگرافی سطح حالت یکنواخت‌تری پیدا کرده است. در نمونه‌های رزین اپوکسی خالص تا غلظت ۲/۵ درصد وزنی کیتوسان، سطوح صاف و یکنواختی مشاهده شد، اما پس از آن، پدیده‌ی تجمع ذرات (agglomeration) به وضوح قابل رؤیت است. در غلظت ۵ درصد وزنی کیتوسان، ذرات شروع به تجمع کرده و جدایش فاز آشکاری را نشان می‌دهند [۱۰]. این رفتار احتمالاً ناشی از برهم‌کنش‌های گروه های آب‌دوست و آب‌گریز بین رزین اپوکسی و پرکننده کیتوسان در غلظت‌های بالا است. همچنین، نامحلول بودن و تجمع کیتوسان در سامانه‌ی اپوکسی با افزایش مقدار پرکننده، به صورت فزاینده‌ای مشهودتر می‌شود. نتایج این مطالعات نشان داد که گروه‌های آمینی ($-NH_2$) موجود در ساختار کیتوسان می‌توانند به‌عنوان سایت‌های واکنش‌پذیر برای اپوکسی عمل کنند. این واکنش در مقادیر پایین پرکننده منجر به یکنواختی و همگن‌سازی سیستم می‌شود. چنین واکنشی مشابه با واکنش متقابل اپوکسی و سخت‌کننده در سیستم‌های شبکه‌ای (crosslinked systems) است. با این حال، در مقادیر بالای پرکننده، برهم‌کنش‌های بین گروه های آب‌دوست و آب‌گریز اپوکسی و کیتوسان بر اثر گروه‌های آمینی غلبه یافته و موجب کاهش سازگاری



شکل ۲. تصاویر آزمون میکروسکوپ الکترونی (a). رزین اپوکسی و (b). نانو کامپوزیت اپوکسی

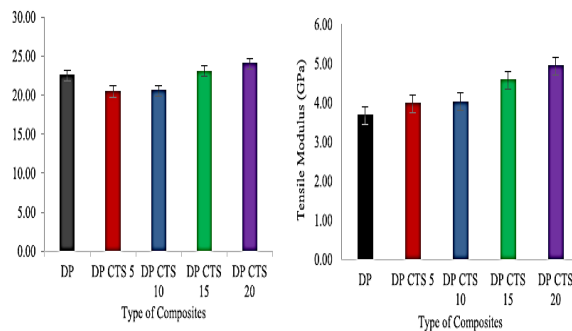
خواص مکانیکی نانو کامپوزیت های اپوکسی

اثر الیاف پالم (برگ یا تنه درخت نخل)، و نانو ذرات کیتوسان بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شد (شکل ۳). نتایج نشان داد که، نانو کامپوزیت‌های حاوی ۲۰ درصد وزنی از نانو ذرات کیتوسان، دارای استحکام کششی (۲۴/۰۴ مگاپاسکال) و مدول (۴/۹۳ گیگاپاسکال) بالاتری نسبت به سایر کامپوزیت‌ها هستند که این امر به وجود درصد بیشتر کیتوسان در کامپوزیت نسبت داده می‌شود که توانایی تحمل بارهای بالاتری را ایجاد می‌کند [۱۱]. این بهبود می‌تواند ناشی از انتقال مؤثرتر تنش میان زنجیره‌های مجاور نانو ذرات کیتوسان، به دلیل پیوندهای الکترواستاتیک قوی بین گروه‌های $-NH_2$ و $-NH_3$ باشد [۱۲]. با انتقال مؤثر تنش از ماتریس اپوکسی، ذرات کیتوسان به‌عنوان یک عامل تقویت‌کننده عمل کرده و خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها را به‌طور چشمگیری نسبت به کامپوزیت اپوکسی بهبود می‌بخشند. این بهبود عمدتاً به توزیع یکنواخت ذرات کیتوسان با نسبت ابعادی بالا در ماتریس زیست‌اپوکسی، و ایجاد چسبندگی بین‌سطحی بسیار بالا و پیوندهای یونی میان کیتوسان، الیاف و رزین زیست‌اپوکسی نسبت داده می‌شود [۱۳].

به ترتیب ۰/۵ درصد وزنی از عامل پراکنش‌دهنده (ADR) و ۰/۵ درصد وزنی از عامل آنتی‌اکسیدان یا آنتی‌باکتریال (AO) به پلی‌گلیکولید افزوده شد. نمونه حاوی کیتوسان شامل پلی‌گلیکولید با ۱/۵ درصد وزنی نانوذرات کیتوسان بود که با هدف ایجاد خاصیت آنتی‌باکتریال در ساختار کامپوزیت تهیه شد [۱۲]. در نمونه ترکیبی نیز پلی‌گلیکولید به‌همراه ۱/۵ درصد وزنی کیتوسان و مقادیر مساوی (۰/۵ درصد وزنی) از ADR و AO استفاده گردید تا اثر هم‌افزایی این افزودنی‌ها بر ساختار نهایی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج سطح شکست نمونه‌ها نشان داد که، در تصویر مربوط به پلی‌گلیکولید خالص، سطح شکست کاملاً صاف و یکنواخت مشاهده شد که نشان‌دهنده شکنندگی و عدم انعطاف‌پذیری قابل توجه ماده است. در نمونه حاوی ADR و AO، سطح شکست زبرتر و ناصاف‌تر بود که بیانگر افزایش چقرمگی و انعطاف‌پذیری کامپوزیت می‌باشد؛ این یافته با نتایج مکانیکی نظیر افزایش ازدیاد طول تا شکست نیز همخوانی دارد [۱۳]. در تصویر مربوط به نمونه حاوی کیتوسان، ذرات کیتوسان به‌صورت نسبتاً بزرگ و مجزا در بستر پلی‌گلیکولید پراکنده شده بودند که گویای پراکندگی غیریکدست نانوذرات در ماتریس زمینه است. در نهایت، تصویر نمونه ترکیبی نشان داد که افزودن ADR و AO در کنار کیتوسان موجب ایجاد ساختاری یکنواخت‌تر، کاهش اندازه ذرات کیتوسان و توزیع بهتر آن‌ها در سطح کامپوزیت شده است. این بهبود در پراکندگی و یکنواختی، به ارتقاء خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت منجر شده است [۱۴].

اثر نانو ذرات کیتین و کیتوسان بر ریخت‌شناسی رزین اپوکسی بررسی شد (شکل ۲). نتایج نشان داد که، نانوذرات کیتوسان تمایل بیشتری به تجمع و کلوخه‌شدن نشان می‌دهند. از سوی دیگر، به دلیل عدم وجود پیوند قوی بین نانوذرات و ماتریس اپوکسی، انتظار می‌رود که توزیع یکنواخت‌تر ذرات تأثیر بهتری بر رفتار خوردگی پوشش اپوکسی داشته باشد. پوشش اپوکسی حاوی ۲ درصد وزنی نانو ذرات کیتین، توزیع یکنواخت‌تری از نانوذرات را نشان داد [۱۰].

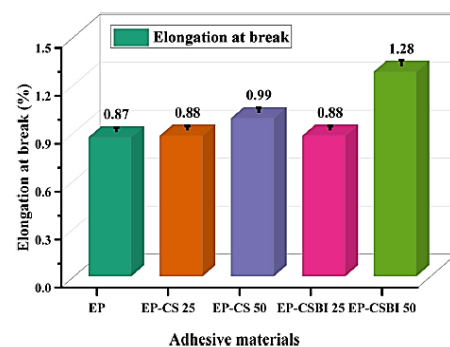
نانوکامپوزیت اپوکسی با ترکیب همزمان ۱ درصد وزنی POSS و ۱ درصد وزنی سیلیکا اصلاح شده با کیتوسان تهیه شد. نتایج نشان داد که این ترکیب باعث افزایش قابل توجه خواص مکانیکی شد. به گونه‌ای که مدول یلنگ نمونه از ۴۱۷ مگاپاسکال در حالت خالص به ۷۱۷ مگاپاسکال در نانوکامپوزیت تغییر یافت. علاوه بر این، مقدار باقی‌مانده پس از سوختن (ash content) از ۹/۴۸ درصد به ۱۱/۷۳ درصد افزایش پیدا کرد که بیانگر بهبود پایداری گرمایی و کاهش تخریب گرمایی است. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که اصلاح سطح سیلیکا با کیتوسان باعث پراکنش بهتر ذرات در ماتریس اپوکسی و در نتیجه بهبود چقرمگی شکست شده است [۱۶]. در پژوهشی دیگر، نانوکامپوزیت رزین اپوکسی با افزودن نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO₂) اصلاح شده با کیتوسان به میزان ۱/۵ درصد وزنی تهیه شد. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که این نانوذرات باعث افزایش قابل توجهی در خواص مکانیکی رزین اپوکسی شدند، به طوری که مدول یانگ نمونه از مقدار اولیه به حدود ۶۰۰ مگاپاسکال افزایش یافت. همچنین مقاومت کششی نمونه‌ها به حدود ۴۸ مگاپاسکال رسید که نشان‌دهنده بهبود ۲۰ درصدی نسبت به نمونه خالص است. علاوه بر این، آزمون‌های چقرمگی شکست بیانگر افزایش قابلیت مقاومت در برابر گسترش ترک‌ها بود. این بهبودها عمدتاً به دلیل اصلاح سطح نانوذرات TiO₂ با کیتوسان و برهم‌کنش بهتر بین فاز تقویت‌کننده و ماتریس اپوکسی بوده است که موجب انتقال مؤثر تنش و پراکنش بهتر ذرات در شبکه رزین گردیده است [۱۷]. پژوهشگران، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی ۱ درصد وزنی نانوذرات کیتوسان و نانو ذرات سیلیکا راستتز کردند. نتایج نشان داد که، این ترکیب، منجر به بهبود چشمگیر خواص مکانیکی نمونه‌ها شد. مدول یلنگ نمونه به حدود ۷۰۰ مگاپاسکال افزایش یافت که نسبت به رزین اپوکسی بدون افزودنی، رشد قابل توجهی را نشان می‌دهد. همچنین مقاومت کششی به حدود ۵۳ مگاپاسکال رسید که این نشان‌دهنده ارتقای قابل توجه مقاومت ماده است. نتایج آزمون چقرمگی شکست نیز بیانگر افزایش طولنایی نمونه در مقابله با گسترش ترک‌ها بود که مقدار آن حدود ۱/۱۵ مگاپاسکال بر متر به توان نیم گزارش شد. این بهبودها عمدتاً به دلیل تعاملات شیمیایی و فیزیکی



شکل ۳. نمودار استحکام کششی و مدول کششی کامپوزیت

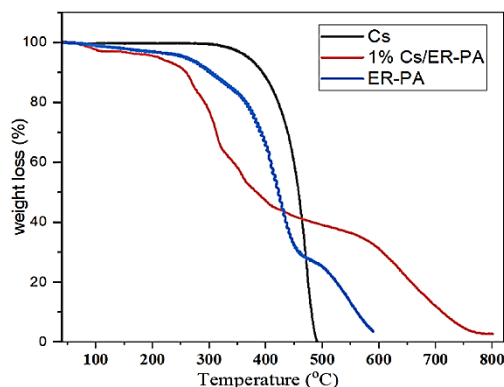
اپوکسی و نانو کامپوزیت های اپوکسی

در پژوهشی دیگر، اثر ایزوسیانات سنتز شده از کیتوسان بر نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی نانو ذرات کیتوسان بررسی شد (شکل ۴). داده‌های ازدیاد طول در نقطه شکست همبستگی خوبی با مقادیر استحکام برشی نشان می‌دهند که بیانگر آن است که اصلاحات بوسیله نانو ذرات کیتوسان باعث بهبود خواص مکانیکی چسب اپوکسی می‌شوند. به طور مشخص، نمونه نانو کامپوزیت اپوکسی (حاوی ۵۰ درصد وزنی از نانو ذرات اصلاح شده) بیشترین میزان ازدیاد طول در نقطه شکست (۱/۲۸ درصد) و بیشترین استحکام برشی (۶۱ مگاپاسکال) را نشان می‌دهد [۱۴]. این بهبود حاکی از آن است که افزایش انعطاف‌پذیری، که با ازدیاد طول در نقطه شکست مشخص می‌شود، امکان توزیع بهتر تنش را فراهم کرده و در نتیجه به ایجاد پیوند قوی‌تر تحت تنش برشی کمک می‌کند. بهبودهای مشاهده شده در ازدیاد طول در نقطه شکست با افزایش تدریجی استحکام برشی همراه است که نشان‌دهنده اثر ترکیبی کیتوسان و نانو ذرات کیتوسان اصلاح شده با پلی ایزوسیانات بر انعطاف‌پذیری و استحکام چسبندگی در فرمولاسیون چسب است [۱۵].



شکل ۴. نمودار کرنش در نقطه شکست رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی

ماده تا دمای ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد کمی پایدار است و سپس تخریب سریع‌تری را تجربه می‌کند که در نهایت در دمای ۵۹۰ درجه سانتی‌گراد کامل می‌شود. قابل توجه است که افزودن کیتوسان به کامپوزیت ساخته شده، رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد؛ ابتدا مشابه رفتار کامپوزیت اپوکسی است، اما پس از از دست دادن ۶۵ درصد وزن در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد، پایداری خود را حفظ می‌کند و تا دمای ۶۳۰ درجه سانتی‌گراد ادامه می‌دهد، و سپس تخریب آمورف و آهسته می‌شود و تا دمای ۷۸۰ درجه سانتی‌گراد ادامه می‌یابد. این یافته‌ها نشان‌دهنده افزایش پایداری گرمایی در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با کیتوسان است که آن را برای کاربردهایی که نیازمند پایداری در دماهای بالا و دوام طولانی هستند، بسیار مناسب می‌سازد [۱۸].



شکل ۵. نمودار گرما وزن سنجی نانو کامپوزیت اپوکسی

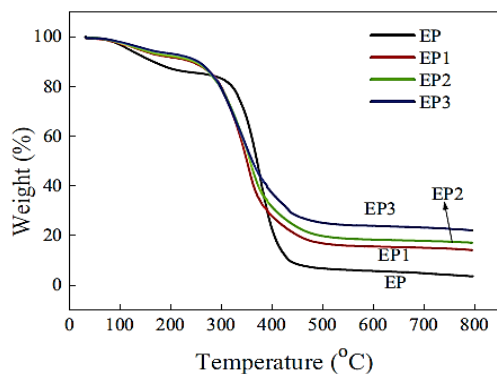
پژوهشگران اثر نانو ذرات کربید سیلیکون بر پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی، نانو کامپوزیت اپوکسی اصلاح شده با گروه‌های سیلانی و ذرات کیتوسان بررسی کردند (شکل ۶). نتایج نشان داد که، تخریب گرمایی تمامی نانو کامپوزیت به صورت تک‌مرحله‌ای می‌باشند. در مرحله نخست، تخریب گرمایی در بازه دمایی ۲۵۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد که در این مرحله کاهش وزن نمونه به دلیل تبخیر رطوبت موجود در نمونه یا تبخیر ترکیبات با فرآریت بالا رخ می‌دهد [۱۹]. در بازه دمایی حدود ۴۳۰-۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، تخریب گرمایی کامل نمونه‌ها مشاهده می‌شود و کاهش وزن با افزایش درصد نانو ذرات کربید سیلیکون بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، رفتار گرمایی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانو ذرات کربید سیلیکون در

مؤثر میان کیتوسان و نانوسیلیکا و همچنین توزیع یکنواخت ذرات در ماتریس اپوکسی اتفاق افتاده است، که انتقال مؤثر تنش را در ساختار کامپوزیت تسهیل می‌کند. علاوه بر این، اصلاح سطح نانوذرات با کیتوسان باعث بهبود سازگاری بین فاز تقویت‌کننده و ماتریس رزین شده و در نتیجه خواص مکانیکی و چقرمگی نمونه‌ها را ارتقا داده است [۱۸].

۴- پایداری گرمایی و تخریب گرمایی نانو کامپوزیت‌های اپوکسی اصلاح شده

آنالیز گرمایی بر روی فیلم‌های اپوکسی خالص، کیتوسان خالص و فیلم‌های نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی کیتوسان انجام شد. نتایج نشان داد که فرآیند تخریب در هر سه نمونه چندمرحله‌ای است و شامل مراحل مختلفی از جمله حذف آب، حذف گروه‌های جانبی، شروع فرآیند پیرولیز و تخریب زنجیره‌های پلیمری می‌باشد [۱۵]. در فیلم‌های اپوکسی خالص، تخریب در یک مرحله صورت گرفت که مربوط به تجزیه مولکول‌های DGEBA آزاد است. در حالی که در فیلم‌های اپوکسی حاوی کیتوسان، فرآیند تخریب در سه مرحله رخ داد که نشان‌دهنده وجود پیوندهای شبکه‌ای متقاطع و حضور مولکول‌های کیتوسان و DGEBA باقی‌مانده است. با افزایش نسبت مولی کیتوسان، میزان مولکول‌های باقی‌مانده و پیوندهای شبکه‌ای در نمونه‌ها افزایش می‌یابد؛ این نتایج اهمیت کنترل نسبت‌های مولی در طراحی مواد کامپوزیتی بر پایه اپوکسی و کیتوسان را تأیید می‌کند و پتانسیل بالای این مواد در کاربردهای نیازمند مقاومت گرمایی و ساختاری بالا را نشان می‌دهد [۱۶]. در پژوهشی دیگر، آنالیز گرمایی رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی پلی‌امید و کیتوسان بررسی شد (شکل ۵). نتایج نشان داد که، که مواد مورد بررسی، به ویژه کامپوزیت‌های حاوی کیتوسان، دارای پایداری گرمایی و رفتار تخریب متفاوتی هستند. در مطالعه کیتوسان خالص، شروع تخریب کمی در دمای ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد و تخریب کامل در بازه دمایی ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد [۱۷]. در مقابل، کامپوزیت اپوکسی حاوی پلی‌امید، نشان‌دهنده الگوی تخریب آمورف است که از دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد شروع شده و تا ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد کاهش وزن تدریجی دارد، و پس از آن تا ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد کاهش وزن بیشتری را نشان می‌دهد. این

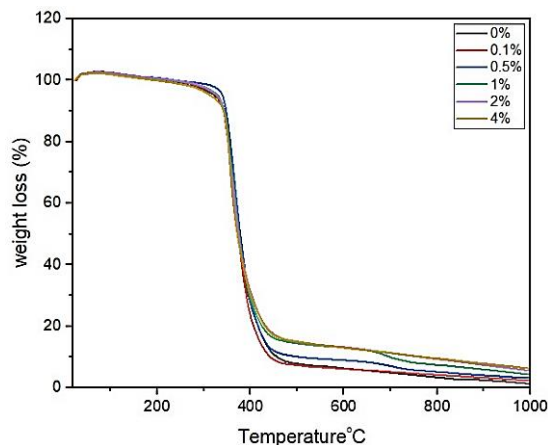
با افزایش مقدار نانو ذرات کیتوسان اصلاح شده اتوکسی ملامین فسفات، باقیمانده ذغال نیز افزایش یافت. در نمونه EP3 مقدار ذغال باقیمانده برابر با ۲۲/۲ درصد بود که بیش از پنج برابر مقدار ذغال باقیمانده در اپوکسی خالص است. این نتایج به روشنی نشان می‌دهد که استفاده از بازدارنده شعله متورم‌شونده باعث بهبود پایداری گرمایی کامپوزیت اپوکسی می‌شود و نقش مؤثری در ممانعت از انتقال گرما و جلوگیری از تخریب پلیمر ایفا می‌کند [۲۳].



شکل ۷. نمودار آنالیز گرما وزن سنجی رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت های اپوکسی

اثر نانو ذرات کیتوسان و سینام‌آلدئید (یک ترکیب آلی با فرمول شیمیایی C_9H_8O است که در عطر و طعم‌دهنده‌ها به خصوص در دارچین یافت می‌شود. این ماده دارای بوی مشخص دارچینی است و کاربردهای گسترده‌ای در صنایع غذایی، عطرسازی، داروسازی و همچنین در سنتز مواد شیمیایی دارد. سینام‌آلدئید یک آلدئید آروماتیک محسوب می‌شود)، بر تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد [۱۷]. نتایج نشان داد که، نمونه رزین اپوکسی (EP) یک فرایند تخریب گرمایی تک مرحله‌ای دارد، در حالی که نمونه‌های اصلاح‌شده با نانو ذرات کیتوسان و سینام‌آلدئید نیز رفتار مشابهی در کاهش وزن نشان دادند. با افزایش مقدار نانو ذرات کیتوسان و سینام‌آلدئید به رزین اپوکسی (۳/۵ گرم از کیتوسان و سینام‌آلدئید)، دمای شروع ۵ درصد شروع کاهش وزن، کاهش یافته و از دمای ۳۵۵/۶ درجه سانتی‌گراد (رزین اپوکسی) به دمای ۳۴۱/۳ درجه سانتی‌گراد میرسد. همچنین دمای بیشینه تخریب گرمایی نمونه‌های نانو کامپوزیت افزایش می‌یابد، که این امر نشان‌دهنده بهبود پایداری گرمایی در دمای بالاتر است. میزان ذغال باقیمانده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد برای نمونه رزین اپوکسی و

مقایسه با سیستم نانو کامپوزیت بدون حضور نانو ذرات کربید سیلیکون بهبود یافته است. [۲۰].



شکل ۶. نمودار گرما وزن سنجی نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی نانو ذرات کربید سیلیکون، نانو ذرات کیتوسان و گروه‌های سیلانی

پایداری گرمایی رزین اپوکسی خالص و نانو کامپوزیت های اپوکسی حاوی نانو ذرات کیتوسان اصلاح شده اتوکسی ملامین فسفات و نانو ذرات رس بررسی شد (شکل ۷). نتایج نشان می‌دهد که دمای کاهش وزن ۵ درصد و دمای حداکثر کاهش وزن در اپوکسی خالص کمتر از نمونه‌های تقویت‌شده با بازدارنده شعله است، در حالی که دمای مربوط به کاهش وزن ۵۰ درصد در نمونه‌های کامپوزیتی کاهش یافته است [۲۱]. کاهش وزن ۵ درصد عمدتاً به فرایند آب‌زدایی مربوط می‌شود، در حالی که کاهش وزن ۵۰ درصد ناشی از فرایند پیرولیز است. دمای پیرولیز بالاتر در نمونه اپوکسی خالص قابل انتظار بود و این رفتار با پیش‌بینی اولیه درباره نانو ذرات کیتوسان اصلاح شده اتوکسی ملامین فسفات مطابقت دارد. دمای حداکثر کاهش وزن نشان‌دهنده مقاومت ماده در برابر تخریب گرمایی است. همان‌طور از نمودار مشخص است، دمای حداکثر کاهش وزن در نمونه EP3 (۸۲ درصد اپوکسی، ۱۵ درصد نانو ذرات کیتوسان اصلاح شده و ۳ درصد نانو ذرات رس) برابر با ۵۰۸ درجه سانتی‌گراد بوده که ۷۲ درجه بیشتر از اپوکسی خالص است، که این افزایش دما بیانگر کاهش نرخ انتقال گرما به دلیل حضور لایه ذغال محافظ ایجادشده توسط نانو ذرات کیتوسان اصلاح شده اتوکسی ملامین فسفات و ماتریس اپوکسی است [۲۲]. علاوه بر این، مقدار باقیمانده ذغال در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز از این نتیجه حمایت می‌کند، به طوری که

نانو کامپوزیت اپوکسی به ترتیب برابر با ۱۷/۴۲ و ۲۲/۵۲ درصد است. همچنین این افزایش نشان دهنده بهبود مقاومت گرمایی و پایداری گرمایی نانو کامپوزیت ساخته شده می باشد [۱۸]. در پژوهشی دیگر، آنالیز گرما وزن سنجی رزین اپوکسی، کیتوسان و نانو کامپوزیت اپوکسی اصلاح شده حاوی پلی ایزوسیانات سبز سنتز شد. نتایج نشان داد که، تمام نمونه ها دارای تخریب گرمایی تک مرحله ای هستند. این آنالیز نشان دهنده این است که اصلاح سطح در مکانیسم تخریب گرمایی تغییری ایجاد نکرده است. دمای اولیه تخریب گرمایی برای رزین اپوکسی در مقایسه با دیگر نمونه ها کمتر گزارش شد [۱۹]. همچنین مشاهده شد که، مقدار ذغال باقیمانده رزین اپوکسی در مقایسه با نمونه های نانو کامپوزیت بیشتر بود. این کاهش در ذغال باقیمانده به دلیل ساختار شبکه ای متراکم و واکنش پذیری بالا نسبت داده میشود. در مجموع، اصلاح نانو کامپوزیت اپوکسی، منجر به ایجاد ساختار شبکه ای قوی تر شده و تعاملات بین مولکولی ب در ماتریس اپوکسی بیشتر شده است. این بهبود ساختاری باعث ارتقاء چسبندگی به ورق های فلزی و افزایش پایداری گرمایی سیستم های اصلاح شده نسبت به اپوکسی خالص شده است [۲۰].

پژوهشگران اثر نانو ذرات کیتین و کیتوسان را بر پایداری گرمایی و تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی کردند (جدول ۱). نتایج نشان داد که، افزودن نانو ذرات کیتین و کیتوسان به پوشش های اپوکسی موجب تغییر در رفتار تخریب گرمایی نمونه ها می شود. دمای اولیه تخریب گرمایی (Ti) برای نمونه های اپوکسی خالص، نانو کامپوزیت حاوی ۲ درصد کیتین، و نانو کامپوزیت حاوی ۲ درصد کیتوسان به ترتیب برابر با ۲۸۷/۵۴، ۲۹۰/۵۴ و ۲۸۸/۵۴ درجه سانتی گراد تعیین شد [۲۱]. همچنین، هر سه نمونه در دمای حدود ۷۷/۵۴ درجه سانتی گراد حدود ۸/۶ درصد کاهش وزن نشان دادند که مربوط به تبخیر رطوبت جذب شده بود. اپوکسی خالص و نمونه حاوی کیتوسان عملاً دچار تخریب گرمایی در یک مرحله شدند، در حالی که نمونه نانو کامپوزیت ۲ درصد دو مرحله تخریب را تجربه کرد که در مرحله دوم، در دمای ۲۹۰/۵۴ درجه سانتی گراد حدود ۸۳/۳ درصد کاهش وزن داشته است. این امر نشان دهنده تخریب کامل و تبدیل به خاکستر است.

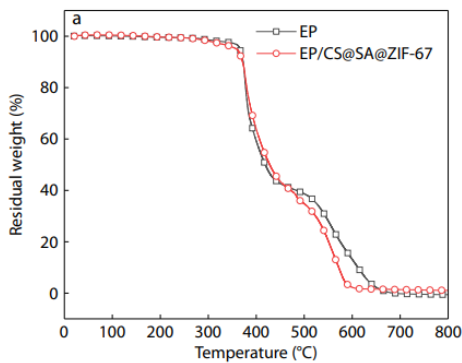
همچنین دیگر نتایج نشان داد که نانو کامپوزیت حاوی کیتین از پایداری گرمایی بالاتری نسبت به کیتوسان برخوردار است. این برتری به وجود گروه های استیل در ساختار کیتین نسبت داده می شود که طبق گزارش ها موجب افزایش پایداری گرمایی آن می گردد [۲۲].

جدول ۱. داده های آنالیز گرمایی رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت

های اپوکسی

نمونه	دمای اولیه تخریب گرمایی (°C)	دمای پایانی تخریب گرمایی (°C)	درصد وزن کاهش یافته	درصد ذغال باقیمانده در دمای (°C)
رزین اپوکسی	۲۸۷/۵۴	۵۳۵/۵۴	۸۲/۵	۴/۳
نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی ۲ درصد وزنی کیتین	۲۹۰/۵۴	۵۸۷/۵۴	۸۲/۳	۲/۳
نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی ۲ درصد وزنی کیتوسان	۲۸۰/۵۴	۵۸۳/۵۴	۸۳	۳/۳

اثر درصد های وزنی نانو ذرات کیتوسان بر تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که، افزودن نانو ذرات کیتوسان به رزین اپوکسی می تواند پایداری گرمایی کامپوزیت را به ویژه در مقادیر متوسط (۵/۰ و ۷/۵ درصد وزنی) به طور قابل توجهی افزایش دهد. این بهبود به افزایش اتصالات عرضی میان گروه های آمینی کیتوسان و ماتریس اپوکسی نسبت داده می شود [۲۳]. با این حال، در غلظت های بالاتر کیتوسان (۱۰ درصد وزنی و بیشتر)، به دلیل تجمع ذرات و کاهش مشارکت در واکنش های اتصال عرضی، پایداری گرمایی اندکی کاهش می یابد. بنابراین، اگرچه کیتوسان به عنوان یک پایدار کننده گرمایی مؤثر در کامپوزیت های اپوکسی عمل می کند، اما مقدار بهینه آن باید به دقت کنترل شود تا از اثرات منفی ناشی از بارگذاری بیش از حد جلوگیری گردد [۲۴]. در پژوهشی دیگر اثر نانو ذرات کیتوسان، گلیسرول، سیلیکا بر خواص تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که، نانو کامپوزیت ساخته شده در مقایسه با نانو ذرات کیتوسان، در دماهای پایین تر پایداری بیشتری از خود نشان می دهند، اما با افزایش میزان پیش ماده، پایداری کاهش می یابد. همچنین، استحکام ساختاری ناشی از پیوندهای کووالانسی و هیدروژن در زیست هیبرید ذرات کیتوسان، گلیسرول، و سیلیکا می



شکل ۸. نمودار آنالیز گرما وزن سنجی رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی

پیشرفت های اخیر در نانو کامپوزیت های اپوکسی حاوی نانو ذرات کیتوسان اصلاح شده

در پژوهشی، اثر نانو ذرات کیتوسان اصلاح شده با پلی کربامات بر رزین اپوکسی بررسی شد. افزایش تقاضا برای مواد پایدار و با کارایی بالا، نیاز به جایگزین های دوستدار محیط زیست در صنایع رنگ و پلیمر را افزایش داده است. در این پژوهش رویکردی نوین را برای بهبود پوشش های اپوکسی با استفاده از مشتقات پلی کربامات و کیتوسان و سنتز آن ها از طریق مسیر غیرایزوسیانات معرفی می کند که ایمنی و پایداری بیشتری در فرآیند تولید فراهم می آورد [۱۷]. تأیید موفقیت آمیز تشکیل ایزوسیانات از پلی کربامات و کیتوسان نشان دهنده صحت این روش است. ایزوسیانات تولید شده، خواص مکانیکی، شیمیایی و گرمایی پوشش های اپوکسی مبتنی بر DGEBA و TETA را بهبود بخشید، به طوری که زمان پخت افزایش یافته و چگالی اتصال عرضی بیشتر شد، که منجر به افزایش دو برابری مقاومت کششی (۵۱ Mpa) نسبت به نمونه های اصلاح نشده (24Mpa) گردید. همچنین، این پوشش های اصلاح شده انعطاف پذیری، سفتی، مقاومت شیمیایی، پایداری در برابر اشعه UV از خود را نشان دادند [۱۸]. سیستم پلی کربامات و کیتوسان، راه حلی اقتصادی و قابل توسعه برای صنایع در جستجوی جایگزین های سبز در پوشش های حفاظتی، چسب ها و برنامه های پیشرفته پلیمر است. یافته های این مطالعه، راه را برای پذیرش صنعتی مواد زیستی، با کارایی بالا و دوستدار محیط زیست هموار ساخته و توازن بین پایداری زیست محیطی و عملکرد را امکان پذیر

باشد [۲۰]. پژوهشگران اثر نانو ذرات کیتوسان اصلاح شده با تری آزین دی هیدرازید (triazine dihydrazide)، بر خواص تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که، اصلاح سطح کیتوسان با تری آزین دی هیدرازید منجر به افزایش پایداری گرمایی نمونه ها شده است و همچنین شروع دمای تخریب نشان از بهبود تخریب گرمایی نانو کامپوزیت اپوکسی اصلاح شده دارد. افزایش درصد ذغال باقی مانده در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد در نمونه های اصلاح شده نسبت به کیتوسان خالص، تأیید کننده تشکیل ساختارهای متقاطع حلقوی کربن و نیتروژن در اثر پیوند با تری آزین دی هیدرازید است. این نتایج به روشنی اثبات می کنند که افزایش جرم مولکولی کیتوسان، محتوای گروه های آمینی را افزایش داده و در نتیجه میزان پیوند آن با تری آزین دی هیدرازید را بهبود می بخشد [۲۱].

برای ساخت نانو کامپوزیت اپوکسی (سخت کننده دی آمینو دی متیل متان) با خواص ضدشعله از نانو ذرات کیتوسان، سدیم آلزینات و نانو ذرات چارچوب های آلی فلزی استفاده شد (شکل ۸). نتایج آنالیز تخریب گرمایی نشان داد که رزین اپوکسی خالص و نانو کامپوزیت ساخته شده دارای مکانیسم تخریب گرمایی دو مرحله ای هستند و دارای دو دمای بیشینه تخریب گرمایی هستند. دمای ۵ درصد کاهش وزن برای نمونه رزین اپوکسی بیشتر از نانو کامپوزیت اپوکسی می باشد و همچنین این مقدار به ترتیب برابر با ۳۶۵/۷ و ۳۵۸/۸ درجه سانتیگراد می باشد [۲۲]. مقدار ذغال باقیمانده در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد، با اصلاح سطح نانو کامپوزیت اپوکسی افزایش می یابد که این بدان معناست که اصلاح سطح ذرات، منجر به پایداری گرمایی نانو کامپوزیت اپوکسی شده است. مقدار درصد ذغال باقیمانده رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی به ترتیب برابر با ۰/۲۱ و ۱/۳۸ می باشد [۲۳].

می‌سازد [۱۹]. خواص نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی گروه‌های سیلانی (POSS) و نانوذرات سیلیکا اصلاح‌شده با کیتوسان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اصلاح نانوذرات سیلیکا با کیتوسان، منجر به بهبود قابل توجه در خواص مکانیکی و گرمای نانوکامپوزیت‌ها شد، که از جمله آن‌ها می‌توان به افزایش مقاومت کششی، پایداری گرمای و ذغال باقیمانده اشاره کرد. افزودن ۱ درصد وزنی از گروه‌های سیلان و سیلیکا به نانوکامپوزیت‌ها، باعث افزایش مدول یانگ شد که به از مقدار ۴۱۷ مگا پاسکال به مقدار ۷۱۷ مگا پاسکال افزایش یافت. علاوه بر این، افزایش محتوای گروه‌های سیلانی در نانوکامپوزیت‌ها، منجر به افزایش هیدروفوبیته شد که می‌تواند مقاومت در برابر آلودگی‌های باکتریایی و میکروبی را کاهش دهد. بررسی‌های ریخت‌شناسی نشان داد که اصلاح سطح سیلیکا با کیتوسان، باعث بهبود چقرمگی شکست و یکنواختی توزیع نانوذرات در ماتریس اپوکسی شد. در کل، نتایج نشان می‌دهد که اصلاح سطح سیلیکا با کیتوسان، می‌تواند خواص نانوکامپوزیت‌ها را با تنظیم میزان گروه‌های سیلانی و بهینه‌سازی کند و پتانسیل کاربرد این نانوکامپوزیت‌ها در زیست‌پوشش‌ها و حوزه‌های پزشکی را تایید می‌کند [۲۰]. در پژوهشی دیگر، با افزودن کیتوسان، یک پلیمر زیستی پایدار استخراج شده از صدف خرچنگ، به کامپوزیت‌های اپوکسی-پلی‌آمید، بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی و گرمایی این مواد حاصل شد. نتایج نشان داد که، کیتوسان به طور مؤثری در ساختار کامپوزیت‌ها وارد شده و همگن و پایدار توزیع شده است. نتایج نشان می‌دهند که در حضور یک درصد از نانو ذرات کیتوسان بهترین عملکرد را در افزایش مدول یانگ، مقاومت در برابر شکست و استحکام کششی دارد، و خواص گرمایی آن نیز با افزایش دما و بهبود پایداری گرمایی افزایش می‌یابد. این یافته‌ها پتانسیل بالای کیتوسان را در بهبود خواص فنی و گرمایی کامپوزیت‌های اپوکسی-پلی‌آمید نشان می‌دهد، و آن را برای کاربردهای مهندسی نیازمند استحکام و دوام بالا مناسب می‌سازد. بدین ترتیب، این پژوهش گامی مؤثر در جهت توسعه مواد نوین و پایدار با کارایی بالا در صنعت مواد کامپوزیت است [۲۱]. افزودن کیتوسان و پلی‌ایزوسیانات استخراج شده از کیتوسان (CSBI) به سیستم اپوکسی DGEBA و تری‌اتیلن ترا

آمین باعث بهبود قابل توجه در تعاملات بین سطحی و انعطاف‌پذیری بین رزین اپوکسی و چسبندگی به سطح فولادی شده است. این اصلاحات منجر به افزایش قابل توجه در قدرت چسبندگی و مقاومت برشی نهایی شد، به طوری که استحکام برشی نزدیک به ۷۰ درصد نسبت به چسب اپوکسی خالص افزایش یافته است [۲۲]. تحلیل‌های TGA، DSC و FT-IR نیز نشان‌دهنده تغییر در مکانیزم شکست شده است که بیانگر بهبود کیفیت اتصال و افزایش استحکام نهایی چسب است. این یافته‌ها اهمیت اصلاح سطح و ترکیب مواد در بهبود عملکرد چسب‌های اپوکسی در کاربردهای صنعتی را برجسته می‌سازد و نشان می‌دهد که استفاده از پلی‌ایزوسیانات اصلاح‌شده با کیتوسان، راهکار مؤثری برای ارتقاء خواص چسبندگی و دوام مواد است [۲۳]. فرآیند ویتریمرسازی رزین‌های اپوکسی یکی از مراحل مهم در تولید رزین اپوکسی است که به منظور بهبود خواص مکانیکی، شیمیایی و فرآیندی آن انجام می‌شود. پژوهشگران اثر نانو ذرات کیتوسان و زینک استات را بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از کیتوسان به عنوان جایگزین پایدار در فرآیند سنتز نانو کامپوزیت، منجر به بهبود قابل توجه در خواص مکانیکی، مقاومت در برابر حلال‌ها و زمان آسایش تنش شده است [۲۴]. افزودن ۱۵ درصد وزنی از کیتوسان بدون نیاز به کاتالیزور خارجی، مدول الاستیک و مقاومت کششی رزین اپوکسی را به ترتیب ۱۰۰ و ۳۵ درصد افزایش داد و زمان آسایش تنش را تا حدود ۸۰۰ ثانیه کاهش داد، که این مقدار بسیار کمتر از ویتریمرهای سلولزی در مطالعات پیشین است. در حضور استات روی، این زمان به ۱۵۰ ثانیه کاهش یافته و خواص مکانیکی نیز به مراتب بهبود یافته است، که این اثرات ناشی از گروه‌های آمین و هیدروکسیل کیتوسان است که فرآیندهای دینامیکی را تسهیل می‌کنند و نقش خودکاتالیزور را ایفا می‌نمایند [۲۴]. علاوه بر این، تعاملات منسجم با یون‌های روی در شبکه‌های پلیمر، تقویت خواص مکانیکی را سبب شده است. بررسی پارامترهای چگالی اتصال و انرژی فعال‌سازی نشان می‌دهد که این عوامل بر رفتار آسایش تنش و دمای انتقال شیشه اثر گذارند. ویژگی‌های چندشبکه‌ای و آسایش تنش این مواد، آنها را به گزینه‌هایی مناسب برای کاربردهای مختلف تبدیل می‌کند.

بهبود یافته است. این یافته‌ها نه تنها رویکردی نوین و زیستی در توسعه مواد مقاوم در برابر حریق ارائه می‌دهد، بلکه پتانسیل بالایی برای کاربرد در صنایع مختلف با نیاز به مواد مقاوم در برابر حریق را دارا می‌باشد [۳۰]. اصلاح فیلم‌های اپوکسی حاوی کیتوسان و گروه‌های پلی‌سیلوکسان یک راهکار نوآورانه و مؤثر برای بهبود خواص ضدآب، ضدچربی و مقاومتی در برابر شرایط جوی است. این فیلم‌های اصلاح‌شده نه تنها دارای خواص سطحی بهبود یافته مانند مقاومت در برابر رطوبت و گرما هستند، بلکه با داشتن ویژگی‌های حفاظتی در برابر اشعه UV و کاهش انرژی سطحی، عملکردهای بیولوژیکی و محیط‌زیستی برتری را نشان می‌دهند [۲۷]. کاربرد این فناوری در بسته‌بندی‌های سبز و دوست‌دار محیط‌زیست، پتانسیل زیادی برای کاهش زباله‌های پلاستیکی و ترویج راهکارهای کم‌کربن دارد. این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب طراحی آزمایش و تحلیل نتایج، مسیری نوین برای توسعه مواد بسته‌بندی زیستی و پایدار فراهم می‌کند، که می‌تواند نقش مهمی در آینده‌ی صنعت بسته‌بندی ایفا کند [۲۸]. یک ماده ضد اشتعال دوستدار محیط زیست به‌طور موفقیت‌آمیز از طریق تعامل الکتروستاتیک بین گروه NH_2 در ساختار سلولز و گروه OH در پلی‌آمید استات سنتز شد و سپس با آمونیم (NH_4^+) هیدرولیز شده توسط اوره واکنش نشان داد. فرآیند تولید این ماده کاملاً سبز و سازگار با محیط زیست بوده و بدون استفاده از حلال‌های آلی انجام شد. استفاده از این ضدشله سبز، منجر به بهبود مقاومت در برابر آتش در کامپوزیت‌های اپوکسی می‌شود. این نتایج، نشان‌دهنده بهبود چشمگیر خواص ضد آتش در ماتریس اپوکسی است [۲۹]. برای درک مکانیزم ضد اشتعال نانو ذرات کیتوسان اصلاح شده با آمونیم فیتات، باقی‌مانده‌های ذغالی نمونه‌ها با استفاده از تکنیک‌های XPS، FTIR، SEM و طیف‌سنجی رامان مورد تحلیل قرار گرفتند. یافته‌ها نشان دادند که در فرآیند سوختن، نانو ذرات اصلاح شده، می‌تواند لایه‌ای ضخیم و پف‌دار از ذغال سنگ غنی از فسفر تولید کند که نقش یک مانع محافظتی را ایفا کرده و از داخل ماتریس اپوکسی حفاظت می‌کند، در نتیجه میزان تولید دود و گرما کاهش می‌یابد [۳۰]. علاوه بر این، رادیکال‌های حاوی فسفر مانند PO و HPO و گازهای

این پژوهش اولین استفاده از کیتوسان در فرآیند ویتریمرسازی رزین‌های اپوکسی ترموست است و گامی مهم در توسعه مواد پایدار و قابل بازیافت ترموست‌های مقاوم است [۲۵]. پژوهشگران نشان دادند که ترکیب پلی‌گلیکولیک اسید (PGA) قابل تجزیه در آب دریا با افزودن ترکیبات ضدباکتریایی شامل کیتوسان، اپوکسی و گروه‌های آنتی‌اکسیدان فسفیت آلی، منجر به بهبود قابل توجه در خواص مکانیکی، گرمایی و ضدباکتریایی این کامپوزیت‌ها می‌شود. استفاده از این مواد، علاوه بر حفظ خواص فیزیکی و شیمیایی، باعث افزایش اثربخشی ضدباکتریایی و پایداری گرمایی شده و قابلیت‌های کاربردی در صنایع پیشرفته مانند مراقبت‌های بهداشتی را تقویت می‌نماید [۲۶]. این نتایج، افق‌های جدیدی را برای توسعه مواد زیست‌تخریب‌پذیر و مقاوم در برابر عوامل محیطی در حوزه‌های مختلف صنعتی فراهم می‌آورد، و گامی مهم در جهت توسعه مواد سبز و پایدار با کاربری‌های گسترده است [۲۷]. در پژوهشی دیگر، که استفاده از پوشش دوپایه متشکل از تانیک اسید، کیتوسان و یون‌های آهن (Fe^{3+}) به عنوان روشی سازگار با محیط زیست، به طور قابل توجهی خواص اتصال سطحی فیبرهای کربن به پلیمر را بهبود بخشیده است. این روش با توجه به واکنش‌های کووالانسی، و شبکه‌های پایدار و مقاوم روی سطح فیبر ایجاد می‌کند که منجر به افزایش قابل توجه در مقاومت برشی لایه‌ای و مقاومت برشی سطحی می‌شود [۲۸]. تحلیل‌های میکروسکوپی و مکانیکی مؤید بهبود یکنواختی و کارایی انتقال تنش در رابط است. در نتیجه، این رویکرد نوین و غیرسمی، راهکار مؤثری برای توسعه نانو کامپوزیت‌های با کارایی بالا و سازگار با محیط زیست محسوب می‌شود [۲۹]. نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی نانو ذرات کیتوسان، فیتیک اسید و بورون نیتريد سنتز شد. نتایج نشان داد که، افزودن نانوذرات بورون نیتريد (BN) و پوشش‌های فلزی-آلی اصلاح‌شده موجب افزایش چشمگیر مقاومت در برابر آتش، کاهش نرخ انتقال گرما و تشکیل لایه‌های ذغالی متراکم و پیوسته شد که نقش مؤثری در مهار انتقال گرما، گاز و اکسیژن داشت. همچنین نمونه‌های اصلاح‌شده، به‌ویژه ترکیب با بورون نیتريد، عملکرد ضدحریق قابل توجهی از خود نشان داده و سطح چسبندگی و ساختار لایه ذغالی آن‌ها

بی‌اثر حاصل از تجزیه نانو ذرات اصلاح شده، می‌تواند رادیکال‌های فعال مانند H. و OH. را خنثی کرده و اکسیژن موجود در محیط را رقیق کند؛ این اثر هم‌افزاینده بین فاز گازی و فاز جامد به‌طور قابل توجهی مقاومت در برابر آتش را در ماتریس اپوکسی افزایش می‌دهد. همچنین، نتایج مربوط به خواص دینامیکی و مکانیکی نشان دادند در حالی که افزودن نانو ذرات اصلاح شده مقداری از خواص مکانیکی ماتریس اپوکسی را کاهش می‌دهد، اما هنوز در دامنه مورد نیاز برای کاربردهای مهندسی قرار دارد [۳۱].

پژوهشگران، یک پوشش نانوکامپوزیتی اپوکسی زیست‌سازگار و نوآورانه با خاصیت ضد خوردگی سنتز کردند که در آن از کیتوسان برای اصلاح نیتريد کربن گرافیتی (g-C3N4) استفاده کردند. نتایج نشان دادند که گروه‌های آمینی و هیدروکسیل فراوان موجود در ساختار کیتوسان، به‌طور قابل توجهی پراکندگی و سازگاری بین سطحی نیتريد کربن گرافیتی را در ماتریس اپوکسی بهبود بخشیدند. همچنین، با افزایش مقدار کیتوسان، مقاومت خوردگی پوشش‌ها به‌صورت تدریجی افزایش یافت و نانو کامپوزیت اصلاح شده، بالاترین عملکرد ضد خوردگی را از خود نشان داد. نانو کامپوزیت اصلاح شده پس از ۳۰ روز غوطه‌وری در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم، مقاومتی بیش از پوشش اپوکسی خالص از خود نشان داد [۳۲]. آزمایش‌های غوطه‌وری بلندمدت نیز تأیید کردند که افزایش میزان حضور نانو ذرات کیتوسان، موجب بهبود پوشش‌دهی سطح و یکپارچگی بافت پلیمری در برابر نفوذ عوامل خوردنده می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای این نانوپوشش سبز برای کاربردهای صنعتی محافظت از فلزات در محیط‌های خوردنده است [۲۹]. در پژوهشی دیگر، یک بازدارنده شعله زیست‌پایه جدید با استفاده از کیتوسان و ترکیب فسفردار دی هیدروکسی فنیل آلانین (DOPA) سنتز شد. افزودن تنها ۴ درصد وزنی از این ماده به رزین اپوکسی موجب بهبود قابل توجه عملکرد ضد شعله در هر دو فاز گازی و جامد شد. این ترکیب توانست نرخ اوج آزادسازی گرما، تولید کل دود، تولید مونوکسید کربن و نرخ تولید دود را به ترتیب تا ۵۵ درصد، ۳۴ درصد، ۴۵ درصد و ۴۶ درصد کاهش دهد [۳۰]. کیتوسان و ترکیب فسفردار دی هیدروکسی فنیل آلانین با تسهیل تشکیل لایه‌ی کربنی

مقاوم به اکسایش گرمایی در فاز جامد و آزادسازی رادیکال‌های آزاد غیرقابل احتراق حاوی فسفر در فاز گازی، نقش مؤثری در مهار شعله ایفا می‌کند. افزون بر این، این نانو کامپوزیت، مقاومت خوبی در برابر آب، خواص مکانیکی مطلوب و شفافیت مناسبی دارد، به‌طوری که استحکام کششی و خمشی آن به ترتیب ۱۲/۷ درصد و ۱۳/۹ درصد بهبود یافته و حتی پس از تماس با آب نیز استحکام بالای خود را حفظ می‌کند. این پژوهش رویکردی سبز، مؤثر و ساده را برای استفاده از کیتوسان ارائه می‌دهد و گامی مهم در جهت توسعه مواد پلیمری مقاوم به شعله و دوستدار محیط زیست به شمار می‌رود [۳۱]. امکان‌سنجی و میزان کارایی بهبود چسبندگی بین‌سطحی در کامپوزیت‌ها با استفاده از پوشش‌دهی الیاف کربن با نانوذرات ساختاریافته پلی‌دوپامین (PDA) و کیتوسان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که مقاومت برشی بین‌سطحی تا حد قابل توجهی به مقدار ۳/۹۲ مگاپاسکال افزایش یافته است، که این افزایش نسبت به الیاف شاهد (بدون پوشش)، و الیاف اصلاح شده تنها با PDA یا کیتوسان به ترتیب ۵۰/۱ درصد و حدود ۱۵/۷ تا ۱۶/۲ درصد بهبود نشان می‌دهد [۳۲]. بررسی ریخت‌شناسی سطح و پایداری گرمایی الیاف نشان داد که نانوذرات پلی‌دوپامین به‌واسطه حضور کیتوسان به‌خوبی به سطح الیاف چسبیده‌اند و اثرات ابعاد نانومتری و خاصیت چسبندگی ذاتی پلی‌دوپامین را برجسته کرده‌اند. وجود پوشش ترکیبی کیتوسان حاوی پلی‌دوپامین با خاصیت ترشوندگی بالا، سبب شکل‌گیری تعاملات بین‌سطحی قوی و متراکمی همچون پیوند کووالانسی، پیوند هیدروژنی، برهم‌کنش الکترواستاتیکی و مزدوج‌های π - π شده است که همگی موجب انتقال مؤثر تنش بین الیاف و ماتریس می‌گردند [۳۳]. استفاده از رزین‌های اپوکسی حاوی کیتوسان نه تنها تنوع در رزین‌های اپوکسی نیمه زیست‌پایه را افزایش داده و خواص برتر را ارائه می‌دهد، بلکه قابلیت‌های مهمی مانند حافظه شکل، مقاومت در برابر آب و قابلیت تجزیه‌پذیری سریع را نیز نشان می‌دهد. این رزین در کاربردهای مختلف از جمله چسب‌های چوب و مواد مقاومتی، عملکرد قابل توجهی دارد و با افزودن آن به سیستم‌های رزین اپوکسی حاوی متیلن دی‌آنیلین، خواص مکانیکی و سختی رزین‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است.

رزین اپوکسی به شمار می‌روند و بهینه‌سازی آن‌ها نقش کلیدی در ارتقای فرایند تولید و گسترش کاربردهای عملی دارد. پژوهشگران، با استفاده از نانوذرات اکسید روی اصلاح‌شده با کیتوسان (CS) و تریس(گلیسی دیلوکسی) پروپان، یک ساختار سخت و انعطاف‌پذیر میان رزین اپوکسی و نانوذرات ایجاد شد [۳۵]. نتایج آنالیز گرماسنج پویشی تفاضلی غیرایزوترمال نشان داد که نانو کامپوزیت سنتز شده با داشتن انرژی فعال‌سازی به مقدار ۵۱/۴۸۲ کیلوژول بر مول، لثر تقویتی قابل توجهی در واکنش پخت دارد. برخلاف نانو ذرات اکسید روی که به دلیل تجمع ذرات مانع ژل شدن می‌شود، سیستم نانو کامپوزیت ژل شدن را در مدت کوتاه‌تری (۲/۶ دقیقه) انجام داده و پس از پخت، مدولی نزدیک به ۱ گیگاپاسکال به دست آورد. آزمون‌های مکانیکی نشان دادند که استحکام کششی، خمشی و فشاری این سیستم به ترتیب ۴۸/۵۲ درصد، ۳۲/۶۷ و ۴۵/۰۱ درصد افزایش یافت و مدول‌های خمشی و فشاری نیز به ترتیب ۱۵/۱۴ درصد و ۱۵/۷۶ درصد بهبود پیدا کردند. این نتایج نشان می‌دهد که ساختار سخت و انعطاف‌پذیر نه تنها موجب پراکندگی بهتر نانوذرات در ماتریس اپوکسی می‌شود، بلکه چسبندگی بین سطحی را نیز به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۳۶]. در پژوهشی دیگر، اثر نانوالماس‌ها بر کیتوسان بررسی شد. نتایج نشان دادند که اصلاح پارامترهای فرایندی باعث کاهش ۳۹ درصدی اندازه سیستم سنتز شده و بهبود ساختار آن‌ها گردید. رلندمان تولید و بازده تثبیت نانوالماس‌ها به ترتیب به مقادیر قابل توجه ۹۶/۲ درصد و ۹۳/۸ درصد رسید [۳۷]. بررسی‌های ساختاری، عنصری، بلوری، ریخت‌شناسی و گرمایی به کمک تکنیک‌های FTIR، EDX، XRD، SEM و TGA انجام شد که همگی تأییدکننده پایداری گرمایی مناسب، استحکام مکانیکی مطلوب و ریخت‌شناسی یکنواخت نانو کامپوزیتی ساخته شده بودند. در ادامه، این میکروکپسول‌های هیبریدی در رزین اپوکسی بارگذاری شده و به‌عنوان پوشش خودترمیم‌شونده روی زیرلایه فولادی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که پوشش اصلاح‌شده توانایی ترمیم با رلندمان ۹۷/۳ درصد و محافظت در برابر خوردگی با کارایی ۹۹/۴ درصد را داراست. این یافته‌ها کارایی بالای کپسول‌های هیبریدی

بنابراین، این نانو کامپوزیت به‌عنوان یک گزینه نوآورانه و سازگار با محیط زیست، پتانسیل بالایی برای توسعه مواد کامپوزیتی و پوشش‌های پایدار در صنعت دارد [۳۴]. آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ با وجود استحکام بالا، قابلیت ماشین‌کاری مناسب و تحمل‌پذیری خوب در برابر آسیب، در معرض خوردگی قرار دارد. از این رو، توسعه پوشش‌های محافظ خوردگی برای این آلیاژ ضروری است. در این پژوهش، نانو کامپوزیت حاوی نانو رس اصلاح‌شده با کیتوسان و دوپ‌شده با یون سریم (Ce^{3+}) به روش تبادل یونی تهیه شد و عملکرد ضد خوردگی این نانو کامپوزیت اپوکسی بررسی گردید [۳۱]. نتایج آنالیزهای الکتروشیمیایی نشان داد که بازده مهار خوردگی در محلول حاوی سریم به ۹۵/۵۲ درصد رسید، که نسبت به محلول‌های کلرید سدیم و نانو رس عملکرد بهتری داشت. همچنین، مطالعات خوردگی پوشش‌ها نشان دادند که نرخ حفاظت نانو کامپوزیت در حضور کیتوسان به ۹۵/۸۲ درصد رسید که بالاتر از نانو کامپوزیت بدون نانو کیتوسان با نرخ ۹۱/۸۳ درصد بود. این یافته‌ها بیانگر مقاومت بالاتر در برابر انتقال بار و اثر بازدارندگی بهتر یون‌های خورنده الکترولیت در این پوشش نسبت به نمونه‌های دیگر بوده و عملکرد حفاظتی بسیار مطلوبی را تأیید می‌کند [۳۲]. تأثیر افزودن گروه‌های سیلانی شده و ترکیب هیبریدی الیاف آریکا و چرم دباغی شده ضایعاتی بر خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی حاوی نانو ذرات کیتوسان بررسی شد. نتایج نشان داد که حضور ۱ درصد حجمی از گروه سیلان‌دار، به‌طور معناداری باعث بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت گردید. مقاومت در برابر ضربه‌های کم‌سرعت در نمونه‌های هیبریدی افزایش قابل توجهی یافت، به‌طوری که برای نمونه‌های اصلاح نشده برابر با ۱۱/۸ ژول و برای نمونه‌های حاوی ۱ درصد سیلان‌دار به ۱۲/۴۴ ژول رسید [۳۳]. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب بهینه‌سازی شده‌ای از چیدمان هیبریدی الیاف و چرم با تقویت گروه‌های سیلان‌دار می‌تواند منجر به تولید کامپوزیت‌هایی با چقرمگی بالا شود. این نوع نانو کامپوزیت‌ها برای کاربرد در صنایع خودروسازی، و سازه‌ای که به استحکام و دوام بالا نیاز دارند، بسیار مناسب خواهند بود [۳۴]. نرخ پخت، مدول پس از پخت و استحکام مکانیکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکردی در کامپوزیت‌های پایه

کیتوسان حاوی نانوالماس را به عنوان سامانه‌ای مؤثر برای کاربردهای خودترمیمی و ضدخوردگی تأیید می‌نماید [۳۸]. برای بهبود مقاومت خوردگی رزین اپوکسی در برابر محیط‌های خورنده مانند محلول کلرید سدیم، نانوکامپوزیت جدیدی از کیتوسان-نقره (Chitosan-Ag) سنتز و به عنوان پوشش محافظ مورد استفاده قرار گرفت. تحلیل‌های ساختاری شامل FTIR، XRD، طیف‌سنجی رامان و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) تشکیل موفق نانوکامپوزیت را تأیید کردند. نتایج حاصل از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) نشان دادند که پوشش نانوکامپوزیتی Chitosan-Ag نرخ خوردگی کمتری نسبت به پوشش اپوکسی خالص دارد. همچنین، مقاومت پوششی نمونه‌های پوشش داده‌شده با نانوکامپوزیت (۳۹۶ کیلو اهم سانتی‌متر مربع) به طور قابل توجهی بالاتر از پوشش خالص اپوکسی (۱۲۴ کیلو اهم سانتی‌متر مربع) بود. این یافته‌ها بیانگر آن است که ترکیب کیتوسان و نانوذرات نقره می‌تواند عملکرد ضدخوردگی پوشش‌های اپوکسی را به طور مؤثری افزایش دهد و گزینه‌ای مناسب برای حفاظت از زیرلایه‌های فلزی در محیط‌های خورنده محسوب می‌شود [۳۹].

پژوهشگران، اثر نانوذرات اکسید گرافن کپسوله‌شده با کیتوسان زیست‌تخریب‌پذیر بر ریزساختار و خواص کامپوزیت‌های اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب و مقدار هیبریدی نانو ذرات در ماتریس، نقش مؤثری در توزیع یکنواخت فیلرها درون زمینه اپوکسی دارد. بررسی‌های مکانیکی و گرمایی، بیانگر آن بود که میزان بارگذاری نانو ذرات و نسبت کیتوسان به گرافن اکساید، عوامل کلیدی در بهبود استحکام کامپوزیت‌ها هستند. آزمایش کشش نشان داد که حضور هیبریدی نانو ذرات، منجر به افزایش ۶۵ درصدی مدول الاستیسیته به دلیل انتقال بهتر تنش و تعاملات بین‌سطحی مؤثر میان نانو ذرات و ماتریس شد [۴۰]. همچنین، آنالیز DMTA افزایش دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) به میزان حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد را در حضور نانو ذرات تأیید کرد. نتایج آزمون آنالیز گرما وزن سنجی، نیز حاکی از بهبود پایداری گرمایی و افزایش دمای تخریب گرمایی در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانوذرات بود. در مجموع، تقویت رزین اپوکسی با هیبرید نانو ذرات، به دلیل اثر هم‌افزایی میان کیتوسان و

گرافن اکساید و نیز تشکیل ساختارهای سه‌بعدی درون ماتریس، به بهبود چشمگیر خواص مکانیکی و گرمایی منجر شده است [۴۱]. در پژوهشی دیگر، رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های پایه اپوکسی، تقویت‌شده با پرکننده دوگانه کیتوسان (CTS) و الیاف خرمایی (DP)، مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، ارزیابی تأثیر افزودن ذرات کیتوسان بر بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی بود. نمونه‌ها با بارگذاری ۴۰ درصد الیاف خرما و نسبت‌های مختلفی از کیتوسان (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) تهیه شدند و نتایج با نمونه کنترل بدون کیتوسان مقایسه گردید [۳۴]. نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی نشان داد که نمونه حاوی ۱۶ گرم کیتوسان و ۳۲ گرم الیاف خرما، بهترین عملکرد را از نظر خواص مکانیکی داشته و به ترتیب دارای بیشترین استحکام کششی (۲۴/۰۴ مگا پاسکال)، مدول کششی (۴/۹۳ مگا پاسکال)، استحکام خمشی (۴۵/۱۱ مگا پاسکال) و مقاومت ضربه‌ایبه مقدار $2/70 \text{ J/m}^2$ است. با این حال، افزایش مقدار کیتوسان باعث جذب رطوبت بیشتر و کاهش پایداری ابعادی شد. بررسی‌های ریزساختاری با میکروسکوپ الکترونی نشان داد که خواص سطحی الیاف و ماتریس، نقش کلیدی در انتقال تنش و عملکرد مکانیکی دارند. به طور کلی، ترکیب این مواد، علاوه بر ارائه بهترین عملکرد مکانیکی، بیشترین جذب آب و تورم ضخامت را نیز داشت که نشان‌دهنده لزوم بهینه‌سازی بیشتر در طراحی و اصلاح سطحی الیاف طبیعی و تقویت ماتریس اپوکسی برای کاهش اثرات منفی رطوبت است. یافته‌های این تحقیق درک عمیق‌تری از پتانسیل استفاده از پرکننده‌های زیستی و پایدار در توسعه محصولات سبز و دوستدار محیط‌زیست فراهم می‌سازد و راهکارهایی برای بهبود پیوند بین ماتریس و الیاف ارائه می‌دهد [۳۵]. در این مطالعه، ترکیبات پایه روغن سویا اپوکسیدایز شده (ESO) در حضور اسید سالیسیلیک و ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی کیتوسان سنتز شد. ساختارهای شیمیایی و مکانیسم‌های پخت این ترکیبات با استفاده از طیف‌سنجی طیف‌فرو بنفش تبدیل شده (FTIR) ارزیابی شدند. نتایج نشان می‌دهد که فرمولاسیون‌های با مقدار کم نانو ذرات کیتوسان، یعنی ۱ و ۳ درصد، واکنش‌های بالایی داشته و با آنتالپی واکنش‌های بالا همراه بودند. رزین‌های زیستی به‌دست آمده با ویژگی‌هایی مانند جذب آب، نسبت تورم،

کامپوزیت های اپوکسی اصلاح شده با نانو ذرات کیتوسان جمع آوری شده است [۴۰-۴۱].

جدول ۲. مهمترین نکات در پیشرفت های اخیر در نانو کامپوزیت های اپوکسی حاوی نانو ذرات کیتوسان اصلاح شده

مهمترین نتایج	سال	نام نمونه
سنتر سبز - پایداری در برابر اشعه UV	۲۰۲۵	اپوکسی - پلی کاربامات - کیتوسان
کاربرد در زیست پوشش	۲۰۲۵	اپوکسی - کیتوسان - نانو ذرات سیلیکا - نانو ذرات کیتوسان - گروه های سیلیلی
افزایش خواص مکانیکی	۲۰۲۵	اپوکسی - پلی آمید - کیتوسان
افزایش خواص چسبندگی	۲۰۲۵	اپوکسی - کیتوسان اصلاح شده با پلی ایزو سیالات - تری آمین تترا آمین
استفاده از کیتوسان در فرآیند ویتریفیکاسیون رزین های اپوکسی	۲۰۲۵	اپوکسی - کیتوسان - زینک استات
خواص ضد باکتری، بهبود خواص مکانیکی، و حرارتی	۲۰۲۵	اپوکسی - پلی گلیکولیک اسید - کیتوسان - فسفات
نانو کامپوزیت دوستدار محیط زیست - افزایش در مقاومت برشی لایه ای و مقاومت برشی سطحی	۲۰۲۵	اپوکسی - کیتوسان - تالیپک اسید - یون های آهن ۲ - الیاف کربن
بهبود خواص ضد شعله	۲۰۲۵	کیتوسان - فیتیک اسید - نانو ذرات چارچوب های آهن فلزی - بورون نیتريد
صنعت بسته بندی	۲۰۲۵	کیتوسان - اپوکسی - پلی دی متیل سیلوکسان
ضد شعله و دوستدار محیط زیست	۲۰۲۴	کیتوسان - اپوکسی - فیتالیک اسید، اوره
ضد خوردگی	۲۰۲۴	اپوکسی - کیتوسان - گرافیت کربن نیتريد
بهبود خواص ضد شعله	۲۰۲۴	اپوکسی - کیتوسان - دی هیدروکسی فینیل آلانین
افزایش چسبندگی بین سطحی	۲۰۲۴	اپوکسی - کیتوسان - پلی دوامین - الیاف کربن
افزایش خواص مکانیکی	۲۰۲۴	اپوکسی - کیتوسان - عامل پخت پلی آمید یا متیلن دی آلیلین
خواص ضد خوردگی	۲۰۲۴	اپوکسی - کیتوسان - نانو رس - یون سیروم
افزایش استحکام مکانیکی	۲۰۲۴	اپوکسی - سیلان - کیتوسان - الیاف آرکا
افزایش استحکام چسبندگی	۲۰۲۴	اپوکسی - نانو ذرات کیتوسان - اکسید روی - تریس (گلیسی دیلوکسی) پروپان
پوشش خود ترمیمی	۲۰۲۴	اپوکسی - کیتوسان - نانو الفاس
ضد خوردگی	۲۰۲۴	اپوکسی - کیتوسان - سیلیکا - بنزو تری آزل
ضد خوردگی	۲۰۲۳	اپوکسی - کیتوسان - نانو ذرات مس
بهبود خواص مکانیکی	۲۰۲۳	اپوکسی - کیتوسان - گرانول
بهبود خواص مکانیکی	۲۰۲۳	اپوکسی - الیاف درخت خرما - کیتوسان
ضد باکتری - ضد قارچ - ضد خوردگی	۲۰۲۳	اپوکسی - کیتوسان - نانو ذرات نقره - نانو ذرات تیتانیوم اکساید - پلی وینیل الکل

نتیجه گیری

افزودن نانوذرات کیتوسان و ترکیبات اصلاح شده آن، از جمله آمونیم فیتات و گروه های پلی سیلوکسان، به رزین های اپوکسی و سامانه های پلیمری مشابه، تأثیر چشمگیری در بهبود خواص ریخت شناسی، مکانیکی، گرمایی و عملکردی این مواد دارد. این نانوذرات با ایجاد ساختارهای متراکم و یکنواخت، علاوه بر افزایش استحکام کششی، مدول یانگ، چقرمگی و مقاومت برشی، موجب ارتقای پایداری گرمایی و بهبود مقاومت در برابر شعله و خوردگی می شوند. حضور کیتوسان در مقادیر بهینه، توزیع یکنواخت فازها را تضمین می کند و از تجمع و جدایش فازی جلوگیری می کند، هر چند افزایش بیش از حد آن می تواند موجب کاهش سازگاری شود. اصلاح سطح نانوذرات با گروه های پلی سیلوکسان و ترکیبات آلی-معدنی، علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، باعث افزایش پایداری گرمایی و کاهش تخریب در دماهای بالا می شود. در سامانه های ترکیبی، هم افزایی بین کیتوسان، اپوکسی، افزودنی های آنتی اکسیدان و عوامل پراکنش دهنده موجب بهبود پراکندگی نانوذرات و افزایش خواص

چگالی شبکه سازی و پایداری گرمایی مورد بررسی قرار گرفتند. این نتایج یک جایگزین جدید برای توسعه رزین های زیستی بر پایه روغن سویا اپوکسیدایز شده، اسید سالیسیلیک و کیتوسان ارائه می دهد که قابلیت های کاربردی مانند مواد ترمیم کننده یا مواد کامپوزیتی را دارا می باشند [۳۶]. پژوهشگران، نانوالیاف کیتوسان و پلی وینیل الکل (پوسته) و هسته ای از نانوذرات نقره و نانو ذرات تیتانیوم اکساید با روش الکتروروسی جهت بهبود خواص اپوکسی سنتز کردند. نتایج نشان داد که، پوشش اپوکسی حاوی نانو الیاف فعالیت ضدباکتری بسیار خوبی در مقابل باکتری استافیلوکوکوس اورتوس از خود نشان میدهد، به طوری که حداکثر نرخ خواص ضدباکتری ۸۷ درصد پس از ۲۴ ساعت غوطه وری در محلول نمک فسفات بود. نانو الیاف توسعه یافته که در داخل پوشش اپوکسی قرار گرفته اند، با داشتن خواص ضدخوردگی و ضدباکتری بهبود یافته، می توانند در حوزه های مختلف دریایی کاربردهای امیدوارکننده ای برای دستیابی به خواص ضدخوردگی و ضدآلودگی در یک سیستم پوشش دهی ارائه دهند [۳۷]. بهره گیری از اثر هم افزایی و استفاده از ترکیبات مختلف، روشی مؤثر در طراحی مواد کامپوزیت چندمنظوره نوآورانه است. پژوهشگران، پوشش ضدخوردگی اپوکسی را در حضور گرافن اکساید کاهش یافته، پلی انیلین و کیتوسان سنتز کردند [۳۸]. نتایج آزمون چسبندگی قبل و بعد از آزمایش خوردگی نشان داد که کامپوزیت های نانویی سه گانه نقش مهمی در بهبود استحکام چسبندگی بین اپوکسی و سطح فولاد ایفا می کنند. اندازه گیری زاویه تماس آب نیز تغییرات در خواص ضد آب سطح اپوکسی پس از تقویت با مواد نانویی دوتایی و سه گانه را تأیید کرد [۳۹]. همچنین، آزمایش های خوردگی نشان داد که حتی پس از گذشت ۴۵ روز قرارگیری در محلول کلرید سدیم، امپدانس در پایین ترین فرکانس برای کامپوزیت های اپوکسی، (حدود ۱۰۸ اهم سانتی متر مربع) باقی مانده است، این نتایج نشان دهنده سطح حفاظت بالای این نوع کامپوزیت ها در مقابل خوردگی است. ویژگی های مشاهده شده، بیانگر آن است که نانو کامپوزیت های سه گانه توسعه یافته، گزینه ای مناسب برای کاربردهای حفاظتی در مقابل خوردگی هستند. در جدول ۲، مهمترین نکات در پیشرفت های اخیر در نانو



Macromol. 2025;318(Part 2):144993. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.144993.

[4] Esmailzadeh M, Tammari E, Safarpour T, Razavian SM, Pezzato L. Anti-corrosion effect of chitin and chitosan nanoparticles in epoxy coatings. Mater. Chem. Phys. 2024;317:129097. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2024.12909.

[5] Sarmin SN, Jawaid M, Zaki SA, Radzi AM, Fouad H, Khiari R, Rahayu S, Mohamad Amini MH. Enhancing the properties of date palm fibre reinforced bio-epoxy composites with chitosan – Synthesis, mechanical properties, and dimensional stability. J. King Saud Univ. Sci. 2023;35(7):102833. DOI: 10.1016/j.jksus.2023.102833.

[6] Gunasekaran E, Govindarajan S. Enhanced adhesion and ductility in steel bonding with thermally activated blocked-polyisocyanate derived from chitosan as reinforced cross-linker epoxy resin. Prog. Org. Coat. 2025;200:109008. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2025.10900.

[7] Hu G, Khan H, Ali F. Crab shell chitosan infusion: optimizing epoxy-polyamide composites membrane for improved mechanical and thermal properties. Colloid Polym. Sci. 2025;303:277–286. DOI: 10.1007/s00396-024-05347-7.

[8] Amasee YM, Salih SM. Thermal and Mechanical properties investigations of Epoxy-biobased matrix reinforced with SiC nanoparticles. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2025;1507:012084. DOI: 10.1088/1755-1315/1507/1/012084.

[9] Haihua Y, Xiuhang X, Yunfei X, Mingzhen P, Nighat Z, Bo P, Ur Rahman A, Min W, Henmei N. Synthesis of a novel modified chitosan as an intumescent flame retardant for epoxy resin. e-Polymers.

آنتیباکتریال می‌شود. علاوه بر این، ترکیب کیتوسان با نانوذرات پیشرفته‌ای مانند گرافن اکساید، پلی‌آنیلین، سیلیکون کاربید و ساختارهای بیوهیبرید، خواص ضدآب، ضدخوردگی و خودترمیم‌شوندگی را به شکل قابل توجهی ارتقا می‌دهد. مکانیزم تخریب گرمایی چندمرحله‌ای، همراه با تشکیل لایه‌های ذغالی مقاوم، نقش مهمی در افزایش پایداری گرمایی کامپوزیت‌ها ایفا می‌کند. خواص ضدباکتریایی طبیعی و قابلیت تجزیه‌پذیری کیتوسان، به‌ویژه در سنتزهای دوستدار محیط زیست، آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای پزشکی، پوشش‌های حفاظتی و توسعه مواد پایدار و پیشرفته تبدیل کرده است. در مجموع، طراحی مهندسی‌شده نانو کامپوزیت‌های اپوکسی بر پایه کیتوسان و نانوذرات اصلاح‌شده، مسیر نوینی برای تولید مواد با عملکرد مکانیکی برتر، پایداری گرمایی بالاتر و کاربردهای چندمنظوره در صنایع مختلف فراهم می‌آورد که ضمن حفظ سازگاری زیست‌محیطی، قابلیت‌های فنی گسترده‌ای را ارائه می‌کند.

تعارض در منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافی را اعلام نکرده‌اند.

منابع

[1] Chen W, Liu H, Yan Q, Chen Q, Hong M, Zhou Z-X, Fu H. Straightforward synthesis of novel chitosan bio-based flame retardants and their application to epoxy resin flame retardancy. Compos. Commun. 2024;48:101949. DOI: 10.1016/j.coco.2024.101949.

[2] Ma D, Liao X, Li X, Liu Y, Zhang X. Preparation and characterization of chitosan film modified with polydimethylsiloxane capped by mono-terminal epoxy groups. Int. J. Biol. Macromol. 2025;298:139912. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.139912.

[3] Tang X, Ji X, Zhang R, Xu N, Feng Y, Pan L. Preparation and properties of a green material: a seawater degradable polyglycolic acid (PGA)/chitosan (CS) antibacterial composite material. Int. J. Biol.



- Eng. Asp. 2025;707:135924. . DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.135924.
- [16] Guo S, Wu K, Pan Z, Zhou H, Zhou C. Flame retardant, high mechanical strength, transparent and water-resistant epoxy composites modified with chitosan derivatives. *Int. J. Biol. Macromol.* 2024;260(Part 2):129580. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2024.129580 .
- [17] Wu Q, Xiao B, Li Y, Yao R, Jin D, Lei Y, Yang D, Zhu J. Bioactive chitosan/polydopamine nanospheres coating on carbon fiber towards strengthening epoxy composites. *Int. J. Biol. Macromol.* 2024;275(Part 1):133568. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.133568 .
- [18] Zhang L, Feng T, Chen H, Dong W, Xu Y, Shen J, Wang X. A multifunctional partially bio-based epoxy resin by renewable chitosan as reaction raw material: Shape memory effect, bonding property, excellent degradability, and toughening performance. *Polymer.* 2024;315:127851. DOI:10.1016/j.polymer.2024.127851.
- [19] Li G, Li Y, Lin C, Peng H, Xue Y, Qin W, Zhao X, Zhou B. Corrosion protective properties on 2024-T3 of chitosan-modified montmorillonite epoxy coatings based on Ce³⁺ loading. *J. Appl. Polym. Sci.* 2024;141(41):e56080. DOI:10.1002/app.56080.
- [20] Surianarayanan P, Balaji N, Balasubramanian K. Mechanical, drop load impact and fatigue properties of silane-treated chitosan and waste leather and areca fibre epoxy composite. *Silicon.* 2024;16:1015–1024. DOI: 10.1007/s12633-023-02715-w.
- [21] Liang M, Liu X, Liu D, Li X, Li T-T, Lin J-H, Chang B, Chen J. Construction of epoxy composites with double alternating
- 2020;20(1):303–316. DOI: 10.1515/epoly-2020-0031 .
- [10] Chen R, Luo Z, Yu X, Tang H, Zhou Y, Zhou H. Synthesis of chitosan-based flame retardant and its fire resistance in epoxy resin. *Carbohydr. Polym.* 2020;245:116530. DOI:10.1016/j.carbpol.2020.116530 .
- [11] Shetranjiwalla S, Fasulo A, Rhoden S. Eco-design and tunable structure-properties of chitosan-epoxy-glycerol-silicate biohybrids using integrated crosslinking. *Carbohydr. Polym.* 2023;299:120187. doi: 10.1016/j.carbpol.2022.120187 .
- [12] Xu N, Qiu G-F, Jin L-P, et al. Preparation and properties of fire-retardant epoxy resin containing an environmentally friendly bio-based CS@SA@ZIF-67 core-shell nano-hybrid. *Chin. J. Polym. Sci.* 2025;43:828–836. doi: 10.1007/s10118-024-3364-5 .
- [13] Gunasekaran E, Sumalatha V, Govindarajan S. Thermally switchable chitosan-polycarbamate cross-linked epoxy resin composites with enhanced mechanical strength and UV-A shielding. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2025;64(16):8211–8825. DOI:10.1021/acs.iecr.5c00039.
- [14] Sajadifar M, Ehsani M, Zaarei D, Khonakdar HA. Epoxy resin/POSS/chitosan-modified silica nanocomposite: Characterization of thermal and mechanical properties. *Polym. Eng. Sci.* 2025;65(1):135–148. DOI: 10.1002/pen.26997.
- [15] Yang L, Liu C, Zhang D, Yang Z, Wei Z, Fan H, Huang X, Zhao S, He C. Chitosan-functionalized graphitic carbon nitride for enhanced corrosion resistance in epoxy coatings. *Colloids Surf. A Physicochem.*

Appl. Polym. Mater. 2025;7(2):1103–1117.
DOI: 10.1021/acsapm.4c03738.

[28] Song Z, Zhou J, Jin L, et al. Influence of a novel biobased coating decorated with UiO-66/BN in persistent flame-retardant hybrids on the fire safety and thermal degradation of epoxy resin. *Front. Chem. Sci. Eng.* 2025;19:43. DOI: 10.1007/s11705-025-2545-2.

[29] O Z, Wang Y, Zhang K, Xia A, Li Q, Yang L, Yu M, Wang D. Synthesis of a fully bio-based tannic acid/chitosan/ferric ions double cross-linked coating: A green and sustainable strategy to enhance the carbon fiber/epoxy composites. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2025;13(17):6367–6378. DOI: 10.1021/acssuschemeng.5c01406.

[30] Shaisundaram VS, Sengottaiyan S, Mohan R, Gurunathan V. Assessment of mechanical, thermal, and sliding wear performance of chemically treated alumina-filled biocomposites using machine learning and response surface methodology. *Polym. Compos.* 2025;advance online publication. DOI: 10.1002/pc.29798

[31] Sengottaiyan S, Subbarayan S, Natarajan R, Gurunathan V. Enhancing mechanical, degradation, and tribological properties of biocomposites via treatment and alumina content. *J. Reinf. Plast. Compos.* 2025;advance online publication. DOI: 10.1177/0731684425132166.

[32] Saravanakumar S, Sathiyamurthy S, Vinoth V, Others. Effect of alumina on epoxy composites with banana fiber: Mechanical, water resistance and degradation property analysis. *Fibers Polym.* 2024;25:275–287. DOI: 10.1007/s12221-023-00405-3.

[33] Ghaderi H, Semnani A, Moini Jazani O. A new platform for designing high-performance epoxy film adhesive with

“rigid-flexible” structures: Curing kinetics and thermal/mechanical properties. *Chem. Eng. J.* 2024;502:157547. DOI: 10.1016/j.cej.2024.157547.

[22] El-Shamy OAA, Deyab MA. Novel anticorrosive coatings based on nanocomposites of epoxy, chitosan, and silver. *Mater. Lett.* 2023;330:133298. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.133298.

[23] Sharif M, Tavakoli S. Biodegradable chitosan-graphene oxide as an effective green filler for improving properties in epoxy nanocomposites. *Int. J. Biol. Macromol.* 2023;233:123550. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123550.

[24] Nepomuceno NC, Fook MVL, Ries A, et al. Bio-based epoxy resins of epoxidized soybean oil cured with salicylic acid loaded with chitosan: Evaluation of physical–chemical properties. *J. Polym. Environ.* 2023;31:2566–2575. DOI: 10.1007/s10924-022-02585-8.

[25] Ji X, Ji W, Pourhashem S, et al. (TiO₂/Ag nanoparticles)@(chitosan-polyvinyl alcohol) core-shell nanofibers as novel anticorrosion and antibacterial improvers for epoxy coating systems. *J. Polym. Res.* 2023;30:244. DOI: 10.1007/s10965-023-03569-x.

[26] Kumar AM, Jose J, Hussein MA. Novel polyaniline/chitosan/reduced graphene oxide ternary nanocomposites: Feasible reinforcement in epoxy coatings on mild steel for corrosion protection. *Prog. Org. Coat.* 2022;163:106678. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106678.

[27] Shadmand M, Alizadeh F, Razavi Aghjeh MK. Chitosan-enhanced vitrimerization of thermoset epoxy resins: Multiple-dynamic networks for sustainable approaches, improved mechanical properties, and rapid stress relaxation. *ACS*



insulation. *Chin. J. Polym. Sci.* 2025;43:40–52. DOI: 10.1007/s10118-025-3254-5.

[39] Zhang T, Chao X, Liang J, Wang B, Sun M. Enhanced mechanical properties of epoxy composites reinforced with silane-modified Al_2O_3 nanoparticles: An experimental study. *J. Compos. Sci.* 2025;9(5):252. DOI: 10.3390/jcs9050252.

[40] Awais M, Xia F, Zhang T, Rahman TU, Zhao Y, Chen X, Paramane A. Interplay between curing kinetics and thermal aging dynamics of epoxy hybrid composites under different frequencies. *Polym. Compos.* 2025;advance online publication. DOI: 10.1002/pc.29847.

[41] Paraskar P, Bari P, Mishra S. Influence of amine functionalized graphene oxide on mechanical and thermal properties of epoxy matrix composites. *Iran Polym. J.* 2020;29(1):47–55. DOI: 10.1007/s13726-019-00772-w.

poly(butyl acrylate-block-styrene) block copolymer and alumina nanoparticles in aluminum–aluminum bonded joints: Preparation and analysis of the mechanical, adhesion, and thermal properties. *Polym. Compos.* 2024;45(8):7689–7700. DOI: 10.1002/pc.28297.

[34] Sari NH, Suteja S, Pruncu CI, Setyawan I, Ilyas RA, Lamberti L. Physicomechanical, water absorption and thermal properties and morphology of *Paederia foetida* fiber– Al_2O_3 powder hybrid-reinforced epoxy composites. *Polym. Int.* 2024;73(7):573–585. DOI: 10.1002/pi.6632.

[35] Arpitha GR, Mohit H, Madhu P, Others. Effect of sugarcane bagasse and alumina reinforcements on physical, mechanical, and thermal characteristics of epoxy composites using artificial neural networks and response surface methodology. *Biomass Convers. Biorefin.* 2024;14:12539–12557. DOI: 10.1007/s13399-023-03886-7.

[36] Wang Y, Others. Effects of thermal properties on insulation breakdown behaviors of epoxy/ Al_2O_3 composite with boron nitride doping. *Procedia (IEEE 5th ICD)* 2024;1–4. DOI: 10.1109/ICD59037.2024.10613220

[37] Khaleel NA, Salih RM, Musa BH. Effect of nanopowders on the surface and adhesion properties of epoxy and polyester-based polymeric coatings. *J. Elastomers Plast.* 2025;advance online publication. DOI: 10.1177/00952443251326195.

[38] Yang KR, Dai J-Y, Wang S-P, Others. Bio-based epoxy composites demonstrating high temperature breakdown strength and thermal conductivity for high voltage



Effect of Green Chitosan Nanoparticles on Thermal Stability and Degradation Behavior of Epoxy Nanocomposites: Recent Advances

Mohammad Hossein Karami^{1*}, Omid Moini Jazani^{2*}, Mohammad Ali Etminani Isfahane³

¹Postdoctoral Researcher and Research Assistant, Polymer Engineering, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, P.O. Box 81746-73441, Isfahan, Iran.

²Associate Professor, Polymer Engineering, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, P.O. Box 81746-73441, Isfahan, Iran.

³ Assistant Professor, Polymer Engineering, Department of Engineering Sciences, Technical and Vocational University(TVU), Tehran, Iran

Abstract

Chitosan nanoparticles and their modified derivatives, particularly when combined with epoxy resins, have shown a remarkable impact on improving the morphological, mechanical, and thermal stability properties of epoxy nanocomposites. These nanoparticles, through uniform dispersion and strong interfacial interactions, enhance tensile strength, Young's modulus, toughness, and thermal resistance. Surface modification of chitosan with compounds such as polysiloxanes and ammonium phytate leads to the formation of denser char layers during heating, thereby improving flame resistance and thermal stability. The incorporation of chitosan into epoxy resin enhances thermal stability by creating stronger cross-linked networks and robust molecular bonds that increase resistance to thermal degradation. Moreover, optimized nanoparticle distribution and prevention of agglomeration ensure structural homogeneity and higher material performance. The biocompatibility, antibacterial activity, and biodegradability of chitosan make it an environmentally friendly and versatile candidate for various industrial applications. In this study, the effects of modified chitosan nanoparticles on the morphology, mechanical properties, thermal stability, and degradation behavior of epoxy nanocomposites are analyzed and discussed. In addition, recent advancements in epoxy nanocomposites containing modified nanoparticles are reviewed, and the key insights and findings are comprehensively summarized.

Keyword: Epoxy resin, Modified chitosan nanoparticles, Morphology, Mechanical properties, Thermal degradation, Fibroblast