



Journal of Applied Research of Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Review Paper

Effect of Cellulose Nanoparticles on the Thermal Degradation Behavior of Epoxy Nanocomposites: Recent Advances

Mohammad Hossein Karami¹, Omid Moini Jazani^{1,*}, Mohammad Ali Etminani Isfahane², Ali Kordi¹

¹ Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Department of Engineering Sciences, Faculty of Engineering Science, Technical and Vocational University(TVU), Tehran, Iran

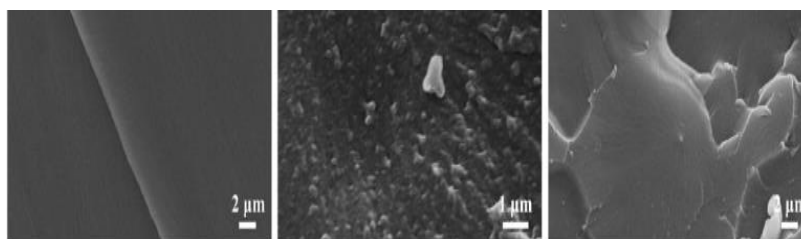
ARTICLE INFO

Received 2025-12-15
Accepted 2026-01-28
Available online 2026-06-10
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:

Epoxy Resin
Modified Nanocellulose
Morphology
Mechanical Properties
Thermal Degradation

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: Cellulosic nanomaterials, including cellulose nanocrystals, cellulose nanofibers, and bacterial cellulose, have attracted significant attention as reinforcing agents in epoxy matrices due to their low density, high mechanical strength, suitable elastic modulus, and renewable nature. However, the inherent hydrophilicity of cellulose nanoparticles and their poor interfacial adhesion with epoxy resins impose critical limitations on the mechanical and thermal performance of epoxy nanocomposites. Consequently, surface modification of cellulosic nanomaterials has emerged as a key strategy to enhance interfacial compatibility and improve the overall properties of epoxy-based nanocomposites.

Research approach: This study presents a comprehensive review and analysis of research published between 2023 and 2025, focusing on various surface modification techniques for cellulosic nanomaterials. These techniques include silane treatments, hydrophobic coatings, esterification reactions, and other chemical modifications. The primary objective of these approaches is to reduce the hydrophilicity of cellulose nanofibers, enhance interfacial adhesion between the reinforcing phase and the epoxy matrix, and promote uniform dispersion of nanomaterials within the nanocomposite structure.

Main results: The results of this study demonstrate that surface modification of cellulose nanoparticles significantly enhances their interfacial interactions and dispersion within the epoxy matrix, leading to a noticeable increase in the onset and peak thermal degradation temperatures, a reduction in the thermal degradation rate, and a measurable increase in char residue at elevated temperatures. Improved dispersion and reduced agglomeration of nanofibers result in substantial enhancements in mechanical properties, including tensile strength, elastic modulus, and stiffness, along with improved fracture behavior and effective inhibition of crack propagation. Quantitative analysis indicates that the surface modification method, functional group chemistry and density, nanofiber loading level, and dispersion uniformity play decisive roles in optimizing both thermal stability and mechanical performance. Overall, this work provides a systematic, quantitatively driven engineering framework for the design of durable, high-performance epoxy nanocomposites suitable for high-temperature and demanding industrial applications.

* Corresponding author: o.moini@eng.ui.ac.ir

Copyright © 2025, The Authors. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



مقاله مروری

اثر نانوذرات سلولزی بر رفتار تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی: پیشرفت‌های نوین

محمد حسین کرمی^۱، امید معینی جزنی^{۱*}، محمد علی اطمینانی اصفهانی^۲، علی کردی^۱

^۱ گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ گروه علوم مهندسی، دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: نانومواد سلولزی، شامل نانوبلور سلولز، نانوالیاف سلولزی و سلولز باکتریایی، به دلیل وزن کم، استحکام مکانیکی بالا، مدول کشسانی مناسب و قابلیت تجدیدپذیری، به عنوان تقویت‌کننده‌های مؤثر در ماتریس‌های اپوکسی مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. با این حال، آب‌دوستی ذاتی این نانوذرات و چسبندگی ضعیف آن‌ها با رزین اپوکسی، چالش‌هایی اساسی در بهبود عملکرد مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌ها ایجاد می‌کند. از این رو، اصلاح سطح نانوذرات سلولزی به عنوان راهکاری کلیدی برای ارتقای سازگاری بین فازها و بهبود خواص نهایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی مطرح است.

روش تحقیق: در این پژوهش، مطالعات منتشر شده در بازه زمانی ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۵ مورد مرور و تحلیل قرار گرفته‌اند. تمرکز اصلی بر روش‌های مختلف اصلاح سطح نانوذرات سلولزی، از جمله استفاده از سیلان‌ها، پوشش‌های آب‌گریز، واکنش‌های استری شدن و سایر اصلاحات شیمیایی بوده است. این روش‌ها با هدف کاهش آب‌دوستی نانوالیاف، افزایش چسبندگی بین فاز تقویت‌کننده و ماتریس اپوکسی و بهبود پراکندگی یکنواخت نانوذرات در ساختار نانوکامپوزیت‌ها بررسی شده‌اند.

نتایج اصلی: نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اصلاح سطح نانوذرات سلولزی، از طریق بهبود برهم‌کنش فصل مشترک و توزیع یکنواخت در ماتریس اپوکسی، موجب افزایش محسوس دمای آغاز و بیشینه تخریب حرارتی، کاهش نرخ تخریب و افزایش مقدار زغال باقی‌مانده در دماهای بالا می‌شود. این اصلاحات همچنین با کاهش تجمع نانوالیاف، منجر به افزایش قابل توجه مقاومت کششی، مدول کشسانی و سفتی و بهبود رفتار شکست و مهار گسترش ترک‌ها می‌شود. نتایج کمی حاکی از آن است که نوع روش اصلاح سطح، ماهیت و تراکم گروه‌های عاملی، درصد بهینه بارگذاری و یکنواختی پراکندگی نانوالیاف نقش کلیدی در میزان ارتقای خواص حرارتی و مکانیکی ایفا می‌کنند. در مجموع، این مقاله با جمع‌بندی پیشرفت‌های اخیر، چارچوبی کمی، منظم و مهندسی‌شده برای طراحی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی پایدار، مقاوم و قابل کاربرد در دماهای بالا و محیط‌های صنعتی چالش‌برانگیز ارائه می‌دهد.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸

دسترس آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

کلیدواژه‌ها

رزین اپوکسی

نانوسلولز اصلاح‌شده

مورفولوژی

خواص مکانیکی

تخریب گرمایی

* نویسنده مسئول: o.moini@eng.ui.ac.ir

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، نویسندگان. این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

۱ مقدمه

در دهه‌های اخیر، نانوکامپوزیت‌های اپوکسی به‌عنوان مواد پیشرفته با کاربرد گسترده در صنایع هوافضا، خودرو، الکترونیک و ساخت قطعات مهندسی مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. این کامپوزیت‌ها به دلیل وزن سبک، خواص مکانیکی بالا و مقاومت حرارتی مناسب، جایگزین مناسبی برای مواد سنتی محسوب می‌شوند [۱-۳]. با این حال، محدودیت‌های ذاتی ماتریس‌های اپوکسی مانند شکنندگی بالا، مقاومت حرارتی متوسط و چسبندگی ضعیف با تقویت‌کننده‌ها، همواره یکی از چالش‌های اصلی در توسعه این مواد بوده است. استفاده از نانوذرات سلولزی به‌عنوان تقویت‌کننده، یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های اپوکسی است [۴]. نانوذرات سلولزی شامل نانوبلور سلولز (CNC)، نانوالیاف سلولزی (CNF) و سلولز باکتریایی (BC)، هر یک دارای ویژگی‌های منحصر به فردی مانند وزن کم، استحکام کششی بالا، مدول کشسانی بالا و قابلیت تجدیدپذیری هستند. این ویژگی‌ها نانوذرات سلولزی را به گزینه‌ای مناسب برای طراحی مواد با عملکرد بالا تبدیل کرده است [۵]. با وجود این مزایا، آبدوستی بالای نانوذرات سلولزی و تمایل آن‌ها به تجمع در ماتریس اپوکسی، باعث محدودیت در چسبندگی بین‌فازی و پراکندگی یکنواخت شده و عملکرد مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌ها را کاهش می‌دهد [۶]. در پاسخ به این چالش، اصلاح سطح نانوذرات سلولزی با روش‌های شیمیایی و فیزیکی، مانند سیلان‌زنی، اصلاح آب‌گریز، استری شدن، پوشش‌دهی با پلیمرهای انعطاف‌پذیر و ترکیب با مواد معدنی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این اصلاحات باعث افزایش سازگاری شیمیایی و فیزیکی بین نانوذرات و ماتریس رزین شده و پراکندگی یکنواخت نانوالیاف را در ساختار کامپوزیت تضمین می‌کند [۷]. مطالعات اخیر (۲۰۲۳ تا ۲۰۲۵) نشان می‌دهند که اصلاح سطح نانوذرات سلولزی اثر قابل توجهی بر پایداری حرارتی و الگوی تخریب گرمایی دارد. نانوالیاف اصلاح‌شده موجب افزایش دمای آغاز و بیشینه تخریب گرمایی، کاهش سرعت تخریب و افزایش مقدار زغال باقی‌مانده در دماهای بالا می‌شوند [۸]. این تغییرات نه تنها دوام حرارتی ماده را افزایش می‌دهد، بلکه منجر به عملکرد مکانیکی بهتر و مقاومت بالاتر در برابر گسترش ترک‌ها می‌شود. همچنین، انتخاب نوع اصلاح سطح، میزان بارگذاری نانوالیاف و یکنواختی پراکندگی آن‌ها از عوامل کلیدی در بهبود خواص نانوکامپوزیت محسوب می‌شوند. علاوه بر بهبود خواص حرارتی و مکانیکی، اصلاح سطح نانوذرات سلولزی مزایای دیگری نیز دارد [۹]. این فرایند می‌تواند مقاومت در برابر رطوبت، نفوذ اکسیژن و هوازگی را افزایش داده، محدوده کاربرد نانوکامپوزیت‌ها را گسترش دهد و امکان طراحی مواد سبک، مقاوم و سازگار با محیط زیست را فراهم کند. به علاوه، نتایج بررسی‌های مورفولوژیکی نشان داده‌اند که نانوکامپوزیت‌های اصلاح‌شده با نانوالیاف سلولزی دارای شبکه داخلی منسجم و پراکندگی یکنواخت هستند که از انتقال تنش مؤثر و جلوگیری از تشکیل خوشه‌های نانوالیاف حمایت می‌کند [۱۰].

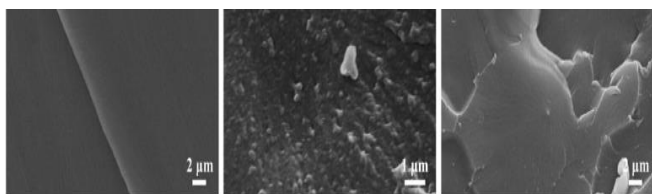
با توجه به اهمیت اصلاح سطح نانوذرات سلولزی در بهبود عملکرد نانوکامپوزیت‌های اپوکسی و کاربردهای صنعتی گسترده، مرور پیشرفت‌های نوین در این زمینه، بررسی اثرات روش‌های مختلف اصلاح سطح بر خواص

حرارتی و مکانیکی و تحلیل الگوهای تخریب گرمایی، گامی ضروری برای طراحی مواد پیشرفته و پایدار است. هدف از این مقاله ارائه جمع‌بندی جامع از تحقیقات ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۵ در حوزه اصلاح سطح نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات سلولزی و اثرات آن بر پایداری حرارتی، تخریب گرمایی و خواص مکانیکی است.

۲ مورفولوژی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی

در سال‌های اخیر، تحقیقات فراوانی بر روی مورفولوژی نانوسلولز در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی انجام شده است که نشان می‌دهد اصلاح سطح، نوع نانوسلولز و نحوه پراکنش تأثیری اساسی در ساختار بین‌فازی و خواص مکانیکی کامپوزیت دارند. به‌طور خاص، در مطالعه‌ای نانوالیاف سلولزی را با اصلاح سطح دومرحله‌ای شیمیایی (الکلی سپس استون) اصلاح کردند تا سازگاری آن با رزین اپوکسی افزایش یابد [۱۱]. نتایج نشان داد که نانوالیاف اصلاح‌شده پراکنش یکنواختی در ماتریس اپوکسی دارند و هیچ تجمع بزرگی دیده نمی‌شود. این پراکنش یکنواخت به واسطه‌ی تعاملات سطحی بهبود یافته و تشکیل ناحیه بین‌فازی قوی‌تر رخ داده است [۱۲].

در پژوهشی دیگر، مورفولوژی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوبلور سلولز بررسی شد، تا پراکنش این نانوذرات در ماتریس‌های اپوکسی مشخص شود (شکل ۱). نتایج نشان داد که تجمع قابل توجهی که در نمونه نانوکامپوزیتی مشاهده می‌شد، در نمونه اصلاح‌شده از بین رفته است. نانوذرات سلولز بدون اصلاح، در حلال‌های مختلف به سرعت ته‌نشین و تجمع می‌کنند، در حالی که نمونه‌های اصلاح‌شده پراکنش پایدار و یکنواخت‌تری از خود نشان می‌دهند [۱۳]. این یافته‌ها نشان می‌دهد که اصلاح سطح با گروه‌های سیلانی، انعطاف‌پذیری را روی سطح نانوذرات به‌طور مؤثری عملکرد پراکنش آن‌ها را بهبود می‌بخشد. به علاوه، اصلاح سطح نانوذرات سلولز، محدودیت‌های ذاتی ناشی از خاصیت آبدوستی را کاهش داده، امکان استفاده گسترده‌تر از این نانوذرات در ماتریس‌های پلیمری را فراهم می‌کند. به عبارت دیگر، اصلاح سطح نه تنها پایداری پراکنش را افزایش می‌دهد، بلکه محدوده کاربردی نانوبلورهای سلولزی در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی را نیز گسترش می‌دهد [۱۴].



شکل ۱ از چپ به راست رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت اپوکسی و نانوکامپوزیت

اپوکسی اصلاح‌شده [۱۴]

Figure 1 From left to right: epoxy resin, epoxy nanocomposite, and surface-modified epoxy nanocomposite [14]

پژوهشگران به بررسی مورفولوژی سطح شکست نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با نانوالیاف سلولزی و پارچه کتان پرداختند تا توزیع نانوالیاف، چسبندگی بین فازها و مسیر گسترش ترک‌ها مشخص شود. تصاویر آزمون میکروسکوپ الکترونی (SEM)، نشان داد که سطح شکست رزین اپوکسی در نمونه‌های بدون نانوالیاف صاف است، که این موضوع نشان‌دهنده شکنندگی ماده و مقاومت پایین در برابر گسترش ترک‌ها است [۱۵].

همچنین سطح پارچه کتان نیز صاف بود و هیچ رزین باقی‌مانده‌ای روی آن دیده نمی‌شد، که حاکی از چسبندگی ضعیف بین الیاف و رزین است. در نمونه‌های حاوی نانوالیاف سلولزی، سطح شکست زبر و دارای شکل‌های کشیده الیاف بود که اثر تقویت‌کننده نانوالیاف را نشان می‌دهد [۱۶]. سطح زبر شکست بیانگر اتلاف انرژی بیشتر در حین گسترش ترک‌ها است و معمولاً منجر به بهبود خواص مکانیکی می‌شود. در نمونه حاوی ۰/۳ درصد نانوالیاف سلولزی، نانوالیاف به صورت یکنواخت پراکنده بودند و هیچ تجمع قابل توجهی مشاهده نشد. این پراکنش یکنواخت باعث افزایش چسبندگی بین نانوالیاف، پارچه کتان و رزین اپوکسی شده و به بهبود مقاومت کششی و مدول کشسانی نانوکامپوزیت منجر شده است. در مقابل، در نمونه حاوی ۱ درصد نانوالیاف سلولزی، تجمع نانوالیاف مشاهده شد که موجب کاهش چسبندگی بین فازها و توزیع نامتوازن تنش در کامپوزیت شد. این موضوع منجر به کاهش مقاومت کششی و مدول نسبت به نمونه بهینه ۰/۳ درصد شد. به‌طور کلی، نتایج آزمون میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که پراکنده‌گی و توزیع مناسب نانوالیاف سلولزی نقش کلیدی در تعیین خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با پارچه کتان دارد [۱۷]. در سال ۲۰۲۴، پژوهشگران نانوالیاف سلولزی را با اصلاح سطح شیمیایی دومرحله‌ای (الکلی و استون) اصلاح کردند تا سازگاری آن‌ها با ماتریس اپوکسی افزایش یابد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که نانوالیاف به‌صورت یکنواخت در ماتریس پراکنده شده و تجمع قابل توجهی مشاهده نشد که این امر نشان‌دهنده بهبود چسبندگی بین نانوالیاف و رزین بود [۱۸]. در مطالعه‌ای دیگر، سه نوع نانوسلولز شامل بلوری، نانوالیاف و الیاف میکروسلولزی اصلاح‌شده آب‌گریز به رزین اپوکسی افزوده شد. بررسی مورفولوژی نشان داد که نانوسلولز اصلاح‌شده آب‌گریز پراکنش بهتری در ماتریس دارد و ذرات آن یکنواخت‌تر توزیع شده‌اند [۱۹]. پژوهشگران نشان دادند که، نانوالیاف سلولزی در مقایسه با نانوالیاف دارای لیگنین، پراکنش یکنواخت‌تری در رزین اپوکسی دارند و شبکه الیاف یکنواختی در ماتریس تشکیل دادند. درحالی‌که نانوالیاف دارای لیگنین تمایل بیشتری به تجمع کردن داشتند و منجر به تجمع ذرات نانوالیاف در ماتریس شدند [۲۰].

۳ اصلاح سطح نانوذرات سلولز

پژوهشگران در سال‌های اخیر توجه قابل توجهی به اصلاح سطح نانوذرات سلولزی برای بهبود سازگاری آن‌ها با رزین اپوکسی داشته‌اند. در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۴، نانوالیاف سلولزی با روش دومرحله‌ای شیمیایی شامل اصلاح سطح الکلی و استون اصلاح شد تا سطح آن با اپوکسی سازگارتر شود. این اصلاح باعث پراکنش یکنواخت‌تر نانوذرات سلولز در ماتریس اپوکسی و بهبود چسبندگی بین آن‌ها شد، به طوری که تنش کششی در مقایسه با اپوکسی خالص از حدود ۱۱/۱۸ به ۶۶/۸ مگاپاسکال افزایش یافت [۲۱].

در مطالعه‌ای دیگر، نانوسلولزهایی با مورفولوژی‌های مختلف، از جمله نانوبلور سلولز، نانوالیاف سلولزی و الیاف میکروسلولزی اصلاح‌شده آب‌گریز (mCMF) به رزین اپوکسی (پایه آبی) افزوده شدند. نتایج نشان داد که اصلاح سطحی الیاف سلولزی منجر به کاهش گرانشی، پراکنش بهتر و بهبود چسبندگی می‌شود. در غلظت ۰/۷۵ درصد وزن، برای نانوالیاف سلولزی، مدول کشسانی تقریباً ۵۰ درصد و سفتی حدود ۳۷ درصد در مقایسه با

رزین اپوکسی خالص، افزایش یافت [۲۲].

همچنین، در بررسی تأثیر اصلاح سطح شیمیایی بر روی نانوسلولز در نانوکامپوزیت‌های زیستی اپوکسی، مشخص شد که افزودن نانوسلولز اصلاح‌شده (NC/SM) موجب ارتقای مدول ذخیره (Storage Modulus) بیش از ۶۰ درصد در دمای اتاق می‌شود. این بهبود به دلیل پراکنش بهتر و چسبندگی قوی‌تر بین گروه‌های (متیل) روی سطح سلولز و ماتریس اپوکسی است که از طریق پیوند هیدروژنی تقویت شده است [۲۳].

در نهایت، مرور جامع در سال ۲۰۲۵ بر روی نانوبلور سلولز نشان داد که اصلاح سطح یکی از راهبردهای مهم برای کنترل ساختار بین‌فازی و بهبود رفتار مکانیکی در کامپوزیت‌های اپوکسی است. این مرور، روش‌های رایج اصلاح شامل اکسایش TEMPO، استری‌سازی و سیلان‌کاری را جمع‌بندی کرده و بیان می‌کند که چنین اصلاح‌هایی نقش اساسی در بهبود پراکنش، پایداری سطحی و خواص نهایی ماده دارند. در جدول ۱، به‌صورت خلاصه مهم‌ترین نکات برای اصلاح سطح نانوذرات سلولز جمع‌آوری شده است [۲۴]. در پژوهش‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای اصلاح سطح نانوذرات سلولزی به‌منظور بهبود پراکنش و چسبندگی آن‌ها در ماتریس اپوکسی توسعه یافته است. اصلاح با سیلان یکی از رایج‌ترین روش‌هاست که با استفاده از ترکیبات سیلان فعال مانند آمینو یا اپوکسی، گروه‌های شیمیایی سطح سلولز را با رزین پیوند می‌دهد و باعث افزایش چسبندگی و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شود [۲۵]. روش اکسایش TEMPO با ایجاد گروه‌های کربوکسیل و آلدهید روی سطح نانوذرات، توانایی تعامل آن‌ها با اپوکسی را افزایش می‌دهد و پراکنش یکنواخت و پایداری حرارتی بهتری فراهم می‌کند. استری‌سازی با اتصال گروه‌های استری به گروه‌های هیدروکسیل سلولز، آب‌گریزی سطح را افزایش داده، جذب آب را کاهش می‌دهد و باعث بهبود رفتار حرارتی و مکانیکی می‌شود [۲۶]. شاخه‌ای کردن پلیمر و پوشش‌دهی با پلیمرهای محلول در اپوکسی، مانند پلی‌اتیلن گلیکول و پلی‌وینیل‌الکل، تجمع ذرات را کاهش داده، باعث افزایش مدول و سفتی می‌شود. اصلاح سطح شیمیایی با اسیدها و بازها، گروه‌های هیدروکسیل سطح سلولز را فعال می‌کند و چسبندگی با رزین اپوکسی را بهبود می‌بخشد. پوشش آب‌گریز با موم یا سیلیکون، جذب رطوبت را کاهش داده، پراکنش نانوذرات را در ماتریس اپوکسی پایه آبی بهبود می‌بخشد [۲۷].

در برخی موارد، آلانین سطحی با یون‌های فلزی مانند روی یا آلومینیوم نیز انجام شده است که باعث تغییر خواص سطحی و افزایش پایداری حرارتی و عملکرد مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها می‌شود. انتخاب روش اصلاح سطح، شدت اصلاح سطح و نوع گروه‌های شیمیایی نقش کلیدی در عملکرد نهایی کامپوزیت دارد و می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی، حرارتی و مقاومتی اپوکسی داشته باشد [۲۸].

۴ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی

پژوهشگران نانوسلولز به‌دست‌آمده از ضایعات آناناس را به رزین اپوکسی افزودند و اثر آن بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن درصد کمی نانوسلولز باعث افزایش مقاومت کششی، خمش و سفتی نسبت به اپوکسی خالص شد و چسبندگی بین نانوسلولز و ماتریس نقش مهمی در انتقال تنش داشت [۲۹].

جدول ۱ مهم‌ترین نکات در مورد اصلاح سطح نانوذرات سلولز

Table 1 Key considerations in the surface modification of cellulose nanoparticles

Surface Modification Method	Method Description	Advantages and Effects on Epoxy	Key Points	References
Silane modification	Use of active silane compounds such as amino, epoxy, or methacrylate silanes to bond with hydroxyl groups on the cellulose surface	Increased adhesion between nanoparticles and the epoxy matrix; uniform dispersion; improved mechanical properties	The type and amount of silane should be carefully selected to prevent particle agglomeration	[24]
TEMPO oxidation	Oxidation of aldehyde/carboxyl groups on the cellulose surface using TEMPO and NaClO	Enhanced interaction with the resin; improved dispersion; moisture control	Reaction conditions must be controlled to preserve the crystalline structure	[20]
Esterification	Attachment of ester groups to cellulose hydroxyl groups using acids or anhydrides	Increased surface hydrophobicity; reduced moisture absorption; improved thermal stability	The type of esterifying agent directly affects the mechanical properties of the nanocomposite	[21]
Polymer grafting	Grafting epoxy-soluble polymer chains, such as polyethylene glycol or polyvinyl alcohol, onto the cellulose surface	Reduced agglomeration; enhanced dispersion; improved modulus and stiffness	The polymer chain length and molecular weight should be compatible with the resin	[22]
Acid/base surface modification	Surface activation of cellulose using HCl, HNO ₃ , or NaOH to create active hydroxyl groups	Increased interaction with the resin; improved adhesion and mechanical properties	Modification time and concentration must be controlled to prevent degradation of the cellulose surface	[23]
Hydrophobic coating, such as wax or silicone	Formation of a hydrophobic layer on the cellulose surface to reduce water absorption	Improved dispersion in waterborne epoxy matrix; enhanced thermal and mechanical stability	The coating thickness should not prevent hydrogen bonding with the resin	[24]
Metal doping	Substitution or incorporation of metal ions such as Zn ²⁺ or Al ³⁺ on the cellulose surface	Modified surface properties; increased thermal stability and mechanical performance	The doped metal should be compatible with the resin and should not cause agglomeration	[25]

بین نانوذرات سلولزی و ماتریس اپوکسی می‌شود. این بهبود برهم‌کنش بین‌سطحی، به‌طور مستقیم منجر به افزایش مدول کشسانی و استحکام کششی کامپوزیت‌ها شده، نقش مؤثر اصلاح سطح در ارتقای عملکرد مکانیکی سامانه‌های اپوکسی تقویت‌شده با نانوسلولز را تأیید می‌کند [۳۲]. مطالعه‌ای دیگر نشان داد که نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با نانوالیاف سلولزی باکتریایی در مقایسه با نمونه‌های حاوی نانوالیاف سلولزی استخراج‌شده از چوب، مدول یانگ و مقاومت کششی بالاتری از خود نشان می‌دهند. این بهبود عملکرد مکانیکی به ساختار منظم‌تر، درجه بلورینگی بالاتر و نسبت ابعادی مطلوب نانوالیاف سلولزی باکتریایی نسبت داده شده است که موجب انتقال مؤثرتر تنش و توزیع یکنواخت‌تر بار در ماتریس اپوکسی می‌شود [۳۳].

پژوهشگران نشان دادند که افزایش درصد نانوسلولز در ماتریس اپوکسی تا حدی بهینه، منجر به ارتقای خواص مکانیکی می‌شود. با این حال، بارگذاری بیش از حد نانوسلولز ممکن است باعث تجمع و کلوخه‌ای شدن ذرات شود و اثر تقویت‌کننده را کاهش دهد. این یافته نشان‌دهنده اهمیت بهینه‌سازی میزان بارگذاری و پراکندگی نانوسلولز برای دستیابی به عملکرد مکانیکی مطلوب در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی است [۳۴].

مطالعات نشان داده‌اند که نانوسلولز اصلاح‌شده، با ایجاد پیوندهای هیدروژنی قوی با ماتریس اپوکسی، موجب افزایش استحکام کششی و مدول خمشی کامپوزیت‌ها و ایجاد رفتار مکانیکی پایدارتر می‌شود [۳۵]. در پژوهشی دیگر،

در بررسی برخی خواص مکانیکی، گزارش و تحلیل رفتار مواد در آزمون‌های تنش-کرنش یا دینامیکی-مکانیکی (DMA) می‌تواند اطلاعات عمیق‌تری نسبت به صرفاً ارائه مقادیر نهایی فراهم کند؛ چراکه در بسیاری از موارد، الگوی تغییر رفتار مکانیکی، نحوه انتقال تنش و سازوکارهای تقویت یا شکست از اهمیت بیشتری نسبت به اعداد نهایی برخوردار است. در این راستا، پژوهشی با افزودن نانوبلور سلولز به ماتریس اپوکسی و انجام آزمون‌های کشش و خمش نشان داد که با افزودن ۰/۷۵ درصد وزنی نانوبلور سلولز، استحکام کششی تا حدود ۳۹/۹۱ مگاپاسکال افزایش یافت و در نمونه‌های حاوی ۱ درصد وزنی نانوبلور سلولز، استحکام خمشی به حدود ۶۵/۷۸ مگاپاسکال رسید. این نتایج بیانگر نقش تقویت‌کنندگی مؤثر نانوسلولز و بهبود پاسخ تنش-کرنش سامانه اپوکسی است [۳۰].

ترکیب نانوسلولز با الیاف طبیعی، از جمله الیاف حاصل از پالم روغنی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر هم‌افزایی بین نانوسلولز و الیاف طبیعی منجر به افزایش قابل توجه استحکام کششی تا حدود ۷۷ درصد شده است که بیانگر تقویت مؤثر ماتریس و بهبود چشمگیر خواص مکانیکی کامپوزیت است. این بهبود به افزایش سطح تماس، برهم‌کنش بهتر فصل مشترک و انتقال کارآمدتر تنش بین اجزای کامپوزیت نسبت داده می‌شود [۳۱].

پژوهشگران در سال ۲۰۲۴ گزارش کردند که اصلاح سطح سلولز با عوامل شیمیایی نظیر سیلان‌ها یا اسیدها موجب افزایش چسبندگی فصل مشترک

تخریب گرمایی و مقدار زغال باقی‌مانده است که به‌عنوان معیارهای مقایسه‌ای اصلی گزارش شده‌اند [۳۸].

در پژوهشی خواص گرمایی، اپوکسی تقویت‌شده با نانوبلور سلولز اصلاح‌شده با سیلان و پوشش سیلیکا بررسی شد. نتایج نشان داد که اصلاح سطحی موجب افزایش چشمگیر پایداری حرارتی می‌شود. همچنین نمونه‌های حاوی نانوذرات اصلاح‌شده، افزایش قابل‌توجهی در دمای اولیه تخریب گرمایی از خود نشان دادند که ناشی از ایجاد پیوندهای قوی‌تر بین فاز سلولزی و ماتریس اپوکسی و همچنین اثر ممانعت‌کننده پوشش سیلیکایی است. افزایش معنی‌دار باقیمانده کربنی در دماهای بالا مشاهده شد که به‌دلیل حضور سیلیکا و تشکیل ساختارهای مقاوم در برابر تخریب گرمایی است. این رفتار معمولاً نشانه‌ای از ماندگاری بیشتر ساختار شبکه پلیمری در طی تخریب گرمایی است [۳۹].

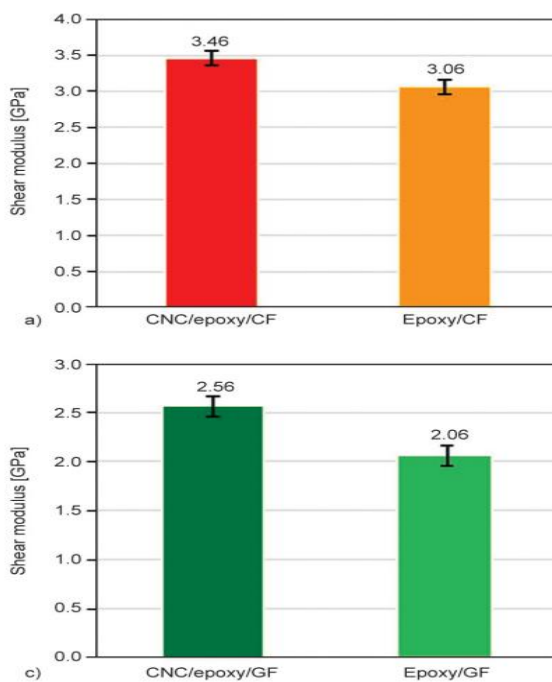
در پژوهشی دیگر که بر روی فیلم‌های اپوکسی شفاف حاوی نانوبلور سلولز انجام شد، پژوهشگران گزارش کردند که پراکنش مناسب و جهت‌گیری درست نانوبلور سلولز داخل ماتریس اپوکسی باعث افزایش ملایم اما قابل‌اعتماد در دمای اولیه تخریب گرمایی و بیشینه تخریب گرمایی می‌شود. آن‌ها نشان دادند که وقتی مقدار نانوبلور سلولز کم باشد، نانوبلور سلولز، مانند تقویت‌کننده میان‌فازی عمل کرده، شروع تخریب زنجیره‌های اپوکسی را کمی به عقب می‌اندازد. با وجود اینکه خود نانوبلور سلولز، پایداری حرارتی زیادی ندارد و معمولاً در محدوده ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد شروع به تخریب گرمایی می‌کند، اما زمانی که داخل شبکه اپوکسی قرار می‌گیرد و با پلیمر اتصالات هیدروژنی و فیزیکی برقرار می‌کند، عملکردش تغییر می‌کند. این برهم‌کنش‌ها نوعی اثر محافظتی دوطرفه ایجاد می‌کنند؛ به این معنا که هم نانوبلور سلولز دیرتر تخریب می‌شود و هم بخش‌های پلیمری اپوکسی در برابر گرما پایدارتر می‌شوند و در دماهای بالاتری شروع به تخریب می‌کنند [۴۰].

محققان در بررسی جامعی نشان دادند که نوع نانوسلولز، میزان بلورینگی آن، روش استخراج و حتی نحوه خشک‌کردن آن می‌تواند تأثیر زیادی بر نتایج آزمون‌های گرمایی داشته باشد. نتایج نشان داده که نانوسلولزهایی که با روش‌هایی مانند استری‌سازی، سیلان‌زنی یا اصلاحات مشابه آماده می‌شوند، معمولاً در مقایسه با نمونه‌های اصلاح‌نشده، دمای آغاز تخریب گرمایی و دمای بیشینه تخریب گرمایی را حدود ۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهند. همچنین مشخص شد که اصلاح سطحی باعث افزایش مقدار ماده باقی‌مانده در پایان آزمون حرارتی می‌شود، زیرا این اصلاحات شبکه‌ای پایدارتر و مقاوم‌تر در برابر گرما ایجاد می‌کنند و مانع تخریب سریع‌تر ساختار آن می‌شوند [۴۱].

پژوهشگران در یک بررسی تحلیلی نشان دادند که یکنواختی پراکنش نانوسلولز در ماتریس اپوکسی مهم‌ترین عامل برای بهبود رفتار حرارتی این نانوکامپوزیت‌ها است. آن‌ها توضیح دادند که اگر نانوسلولزها به‌طور مناسب در کل نمونه پخش نشوند و در برخی نواحی تجمع داشته باشند، یا اگر اصلاح سطحی آن‌ها کامل و مؤثر نباشد، انتقال حرارت در ماده یکنواخت انجام نمی‌شود و بخش‌هایی از نمونه زودتر از حد معمول دچار تخریب می‌شوند. این وضعیت می‌تواند موجب کاهش دمای تجزیه و همچنین کم‌شدن مقدار ماده باقی‌مانده در پایان آزمون حرارتی شود. پژوهشگران در

افزودن نانوسلولز به ماتریس اپوکسی سبب بهبود هم‌زمان خواص مکانیکی و حرارتی شد، زیرا نانوسلولز علاوه بر انتقال مؤثر بار، مقاومت حرارتی شبکه اپوکسی را نیز افزایش می‌دهد. همچنین، نشان داده شده است که پراکنندگی یکنواخت نانوالیاف سلولزی در ماتریس، تحمل تنش را افزایش و تمرکز تنش در نقاط ضعف کامپوزیت را کاهش می‌دهد و در نتیجه خواص مکانیکی نهایی را بهبود می‌بخشد [۳۶].

رفتار برشی کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت‌شده با الیاف کربن، شیشه و نانوسلولز نیز مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲). نتایج نشان داد که در کامپوزیت اپوکسی حاوی نانوسلولز و الیاف کربن، مدول برشی حدود ۱۳/۰۷ درصد و مقاومت برشی ۱۰/۸۱ درصد نسبت به نمونه کنترل، افزایش یافته است. درحالی‌که در کامپوزیت حاوی نانوسلولز و الیاف شیشه، افزایش ۲۷/۲۴ درصد در مدول برشی و ۱۰/۳۶ درصد در مقاومت برشی مشاهده شد. این داده‌ها نشان می‌دهد که افزودن نانوسلولز به هر دو نوع کامپوزیت هیبریدی موجب بهبود خواص مکانیکی برشی و تقویت قابل‌توجه ماتریس می‌شود [۳۷].



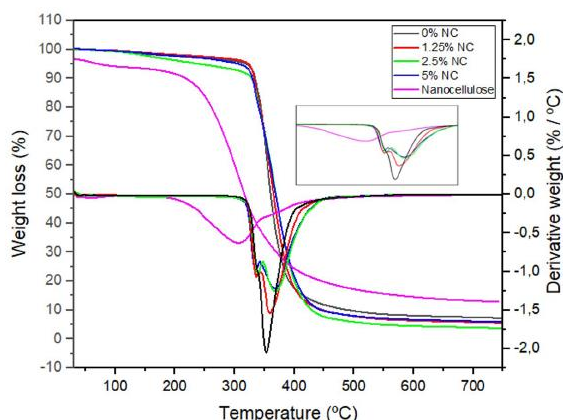
شکل ۲ مدول برشی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی [۳۷]

Figure 2 Shear modulus of epoxy nanocomposites [37]

۵ پایداری گرمایی و تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات سلولز اصلاح‌شده

در سال‌های اخیر (۲۰۲۳ تا ۲۰۲۵) بررسی‌های گسترده‌ای در خصوص پایداری گرمایی و رفتار تخریب حرارتی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با نانومواد سلولزی از جمله نانوبلور سلولز، نانوالیاف سلولزی و سلولز باکتریایی انجام شده است. این مطالعات به‌طور مشترک نشان می‌دهند که ماهیت نانوسلولز، نوع اصلاح سطحی، میزان بارگذاری و پراکنش مناسب مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده عملکرد حرارتی این دسته از نانوکامپوزیت‌ها هستند. نتایج آزمون‌های گرماوزن‌سنجی، در اکثر این پژوهش‌ها شامل سه شاخص اصلی دمای اولیه تخریب گرمایی، دمای بیشینه

ابتدا کاهش وزن اندکی مشاهده شد که ناشی از دست‌رفتن رطوبت بود و پس از آن روند تخریب گرمایی آغاز شد. آزمون گرم‌وزن‌سنجی، نشان داد که برای نانوکامپوزیت‌هایی با صفر، ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ درصد نانوسلولز، دمای بیشینه تخریب گرمایی به ترتیب برابر با ۳۵۲/۸۳، ۳۶۲/۸۶، ۳۶۸/۶۴ و ۳۶۶/۶۷ درجه سانتی‌گراد است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد تقویت نانومقیاس در کامپوزیت‌ها، دمای تخریب گرمایی افزایش می‌یابد. همچنین قله‌ای جدید تخریب گرمایی در دمای پایین‌تر ظاهر شد که به کاهش جرم حرارتی نانوسلولز نارگیل نسبت داده می‌شود. این یافته‌ها حاکی از تأثیر مثبت نانوسلولز در بهبود پایداری حرارتی و تغییر رفتار تخریب حرارتی کامپوزیت‌ها است [۴۷].



شکل ۳ آزمون گرم‌وزن‌سنجی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی [۴۷]
Figure 3 Thermogravimetric analysis of epoxy resin and epoxy nanocomposites [47]

پژوهشگران، با مطالعه سلولز باکتریایی در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی نشان دادند که حتی بدون اصلاح سطحی نیز، سلولز باکتریایی به دلیل شبکه منظم و بلورین خود، به افزایش پایداری گرمایی و مقدار زغال باقی‌مانده کمک می‌کند. با این حال، هنگامی که سلولز باکتریایی با مواد معدنی یا اصلاحات شیمیایی ترکیب می‌شود، پایداری حرارتی به طور قابل توجهی افزایش یافته، تأخیر تخریب و کاهش نرخ کاهش جرم است. در جدول ۲، مهم‌ترین نکات جمع‌آوری شده است [۴۸].

۶ پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده

نانوکامپوزیت‌ها نقش بسیار مهمی در بهبود عملکرد رزین‌های اپوکسی ایفا می‌کنند، اما ناسازگاری و غیرقابل‌باز یافت بودن پرکننده‌های نانومواد معدنی سنتی چالش‌هایی زیست‌محیطی ایجاد کرده است. پژوهشگران، با استفاده از نانوبلورهای سلولز و گروه‌های سیلانی، نشان دادند که در غلظت‌های کمتر، این نانوکامپوزیت می‌تواند بالاترین رسانایی گرمایی را داشته باشد [۴۶]. در این پژوهش مشخص شد که نانوبلور سلولز اصلاح‌شده، به‌ویژه نوع اصلاح‌شده با متیل‌متاکریلات، سازگاری بسیار بهتری با رزین اپوکسی نسبت به نمونه‌ی اصلاح‌نشده دارد و موجب بهبود قابل توجه در چقرمگی و پایداری حرارتی مواد کامپوزیتی می‌شود. نتایج تجربی همچنین نشان داد که میزان اصلاح سطح در نمونه متیل‌متاکریلات بیشتر از نمونه اصلاح‌شده با گروه‌های سیلانی بوده، این تفاوت منجر به تعامل مؤثرتر میان فازهای

ادامه تأکید کردند که برای مقایسه درست نتایج مطالعات مختلف، باید شرایط آزمون حرارتی به طور دقیق گزارش شود. عواملی مانند سرعت گرم‌کردن نمونه، نوع گاز محیط آزمایش (مانند نیتروژن یا هوا) و محدوده دمایی آزمون، هر کدام می‌توانند اثر قابل توجهی بر نتیجه داشته باشند. حتی تغییرات کوچک در این عوامل ممکن است باعث تفاوت‌های چشمگیر در داده‌های حرارتی شود و ارزیابی یکسان نتایج پژوهش‌های مختلف را با دشواری روبه‌رو کند [۴۲].

بررسی اپوکسی‌های زیستی و همچنین اپوکسی‌های بازیافتی تقویت‌شده با نانوبلور سلولز اصلاح‌شده گزارش کردند که نوع گروه‌های عاملی اعمال‌شده بر سطح نانوسلولز نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوی تخریب حرارتی دارد. به‌ویژه نشان داده شد که گروه‌هایی مانند استرها، زنجیرهای آلیفاتیک یا ترکیبات سیلانی هر کدام مسیر تخریب حرارتی متفاوتی ایجاد می‌کنند و میزان پایداری گرمایی را به شکل قابل توجهی تغییر می‌دهند. آن‌ها دریافتند که اصلاحات آب‌گریز قوی‌تر، به دلیل کاهش نفوذ رطوبت و اکسیژن به ساختار، موجب افزایش محسوس دمای اوج تجزیه می‌شود [۴۳]. این افزایش بیانگر آن است که شبکه پلیمری در برابر شروع و پیشرفت تخریب گرمایی مقاوم‌تر شده، انرژی بیشتری برای گسسته‌شدن پیوندها نیاز دارد. همچنین نتایج نشان داد که نمونه‌های اصلاح‌شده در دماهای حدود ۶۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار ماده کربنی باقی‌مانده بیشتری تولید می‌کنند. این افزایش در زغال باقی‌مانده به طور مستقیم با میزان پیوندهای عرضی و انسجام شبکه اپوکسی مرتبط است؛ بدین معنا که هرچه شبکه پایدارتر باشد، سهم بیشتری از ساختار در برابر تبخیر و گسست کامل حفظ شده، به‌صورت زغال پایدار باقی می‌ماند [۴۴].

در پژوهشی دیگر، نانوکامپوزیت‌های اپوکسی بر پایه لیگنین که با نانوالیاف سلولزی تقویت شده بودند، اثر هم‌افزایی نانوالیاف سلولز و لیگنین را مورد مطالعه قرار دادند. به گفته آنان، حضور نانوالیاف سلولز باعث شکل‌گیری شبکه الیافی داخلی در ماتریس اپوکسی می‌شود و لیگنین که خود ماده‌ای طبیعی با میزان بالای باقی‌مانده کربنی است، مقدار زغال باقی‌مانده نهایی را افزایش می‌دهد. در این مطالعه افزایش در هر سه شاخص دمایی، نشان‌دهنده نقش نانوالیاف سلولزی در تأخیر شروع تخریب زنجیره‌های پلیمری و همچنین افزایش چگالی کربن باقی‌مانده در ساختار نانوکامپوزیت است [۴۵].

با بررسی جامع نانوالیاف سلولزی حاصل از منابع مختلف، تأکید کردند که نانوالیاف سلولزی با طول و قطر مناسب و پراکنش یکنواخت می‌توانند به‌عنوان تقویت‌کننده حرارتی مؤثر در ماتریس اپوکسی عمل کنند. آن‌ها نشان دادند که در اغلب موارد، افزودن نانوالیاف سلولزی موجب افزایش تدریجی دمای تجزیه و همچنین افزایش مقدار ماده باقی‌مانده در پایان آزمون حرارتی می‌شود، مگر آنکه ناخالصی‌ها، درصد بالای ساختارهای آمورف یا روش خشک‌سازی نامناسب باعث کاهش مقاومت حرارتی نمونه شود [۴۶].

اثر نانوذرات سلولز تهیه‌شده از پوست نارگیل بر خواص تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد (شکل ۳). نتایج نشان داد که دمای اوج تخریب گرمایی در رزین خالص در حدود ۳۵۲ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد که عمدتاً به دلیل تجزیه عامل پخت رزین نسبت داده می‌شود. در نانوکامپوزیت‌ها،

سلولزی را در حلال‌های آلی افزایش داد و پیوند میان فاز نانوپرکننده و ماتریس اپوکسی را تقویت کرد [۴۸]. پوشش‌های تهیه‌شده با نانوبلور سلولز اصلاح‌شده (M-NCC/EP) مقاومت بالایی در برابر حلال از خود نشان دادند و پدیده تورم و لایه‌لایه شدن در حلال‌های استات اتیل و N,N-دی‌متیل‌فرم‌امید را به‌طور چشمگیری کاهش دادند. در مجموع، نتایج این پژوهش راهکاری مؤثر و پایدار برای طراحی پوشش‌های محافظ فلزی با عملکرد بالا و سازگار با محیط‌زیست ارائه می‌دهد و چشم‌اندازهای جدیدی برای توسعه‌ی پوشش‌های اپوکسی پیشرفته بادوام و مقاومت شیمیایی برتر فراهم می‌سازد [۴۹].

نانوپرکننده و ماتریس اپوکسی شده است. این یافته‌ها اهمیت انتخاب روش اصلاح سطح مناسب را در طراحی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با عملکرد مکانیکی و حرارتی برتر برجسته می‌سازد [۴۷].

در پژوهشی دیگر، نانوبلور سلولز (NCC) با استفاده از عامل‌های جفت‌کننده سیلانی شامل هگزادسیل‌تری‌متوکسی‌سیلان (HDTMS) و ۳-آمینوپروپیل‌تری‌متوکسی‌سیلان (APTMS) اصلاح شد تا سازگاری آن با رزین اپوکسی و عملکرد حفاظتی پوشش‌های ضد خوردگی بهبود یابد. اصلاح سطح نانوبلورهای سلولزی موجب ایجاد زنجیره‌های آلکیلی آب‌گریز و گروه‌های آمینی فعال بر سطح آن شد که پراکنش‌پذیری نانوبلورهای

جدول ۲ مهم‌ترین نکات در مورد آزمون تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی

Table 2 Key points regarding the thermal degradation analysis of epoxy nanocomposites

Modified Nanocomposite	Year	Thermal Results	Key Points	References
Silane-modified and silica-coated cellulose nanocrystals	2023	Increase in the initial and maximum degradation temperatures; increase in residual char content.	Surface modification leads to strong bonding with the matrix and provides a protective effect.	[29–32]
Cellulose nanocrystals with proper dispersion and orientation	2023	Mild increase in the initial and maximum degradation temperatures; delay in the onset of chain degradation.	Cellulose nanocrystals act as an interfacial reinforcing agent and create a dual protective effect.	[33]
Various cellulose nanoparticles prepared by different extraction and modification methods	2023	Increase of 5–30 °C in degradation temperatures; increase in residual char content.	The type of nanocellulose, crystallinity, extraction method, and surface modification strongly affect thermal behavior.	[35]
Modified nanocellulose	2024	Reduction in degradation temperature and residual char content in the case of incomplete dispersion or agglomeration.	Uniform dispersion is the most important factor for thermal performance; test parameters should be accurately reported.	[37]
Cellulose nanocrystals modified with hydrophobic groups	2024 and 2025	Increase in peak decomposition temperature; higher residual char content at 600–650 °C.	Hydrophobic groups prevent moisture and oxygen penetration and enhance the stability of the network.	[40]
Cellulose nanofibers + lignin	2024	Increase in the initial and maximum decomposition temperatures and residual char content.	Cellulose nanofibers form an internal fibrous network, and lignin increases the residual char content.	[42]
Cellulose nanofibers with appropriate length and diameter and uniform dispersion	2024	Gradual increase in decomposition temperature and residual char content.	The quality and dispersion of nanofibers determine thermal reinforcement; impurities or improper drying can reduce thermal resistance.	[47]
Bacterial cellulose	2025	Increase in thermal stability and residual char content even without surface modification.	The ordered and crystalline network of bacterial cellulose delays degradation and reduces the mass-loss rate.	[45]

اصلاح‌کننده‌های زیست‌پایه مؤثر برای بهبود عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت (BFRP) عمل کنند. با پیوند زنی (Graft)، نانوبلورها و نانوالیاف سلولزی روی سطح الیاف بازالت با عملکرد سیلانول، پیوند بین الیاف و ماتریس اپوکسی به‌طور چشمگیری تقویت شد و مشکل ضعف چسبندگی معمول در الیاف بازالت اصلاح‌نشده برطرف شد. این روش نوآورانه مبتنی بر پراکنش آبی نه‌تنها عملکرد کامپوزیت‌ها را بهبود می‌بخشد، بلکه راهکاری سازگار با محیط‌زیست برای تقویت پیوند الیاف و ماتریس در کامپوزیت‌های الیاف بازالت ارائه می‌دهد [۵۲].

در پژوهشی دیگر، از نانوذرات سلولز و الیاف موز بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. این پژوهش رفتار حرارتی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف موز (BF) را که شامل ۵ درصد وزنی از نانوبلور سلولز (NC) مشتق از پوسته برنج از طریق گرماکافت اسیدی است، مورد

برای بهبود پایداری بلندمدت و استحکام مکانیکی پوشش‌های اپوکسی پایه‌آبی (WEP)، از نانوبلور سلولز اصلاح‌شده استفاده شد. نتایج نشان داد اصلاح سطحی نانوبلورهای سلولزی با عامل‌های سیلانی HDTMS و TMPEDA موجب بهبود سازگاری بین‌سطحی و افزایش خواص فیزیکوشیمیایی پوشش‌ها Si-NCC/WEP می‌شود. نتایج آزمون‌ها نشان داد که پوشش حاوی یک درصد نانوذرات اصلاح‌شده، بهترین عملکرد را داشته و مدول یانگ آن ۲۵ درصد افزایش یافته است [۵۰]. همچنین، پوشش‌ها در محیط‌های خنثی و قلیایی پایداری بالایی نشان دادند، اما در محیط اسیدی به‌دلیل ناپایداری هیدرولیتیکی نانوبلورهای سلولزی افت عملکرد مشاهده شد. این پژوهش رویکردی نوین و سازگار با محیط‌زیست برای طراحی پوشش‌های اپوکسی مقاوم در برابر خوردگی ارائه می‌دهد [۵۱]. پژوهشگران نشان دادند نانوبلورها و نانوالیاف سلولزی می‌توانند به‌عنوان

افزودن نانوسولز تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی و حرارتی سامانه اپوکسی دارد. به‌ویژه، افزایش مقاومت فشاری و ضربه‌ای و بهبود پایداری حرارتی مواد با افزایش درصد نانوسولز مشاهده شد [۵۹]. این یافته‌ها نشان‌دهنده امکان‌پذیری فنی استفاده از نانوسولز پوست نارگیل به‌عنوان ماده تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها بوده، علاوه بر ارتقای خواص مواد، ارزش افزوده‌ای برای ضایعات کشاورزی ایجاد کرده، به کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کند. به‌طور کلی، این مطالعه تأییدی بر قابلیت استفاده پایدار و مؤثر از الیاف طبیعی در توسعه کامپوزیت‌های پیشرفته است [۶۰].

الیاف فلکس (Flax fibers) الیاف طبیعی هستند که از گیاه کتان (Flax Plant) استخراج می‌شوند و یکی از منابع تجدیدپذیر مهم برای تقویت مواد گرماسخت هستند. در چند دهه اخیر، این الیاف به‌دلیل خواص مکانیکی خوب، سبکی و قابلیت تجزیه‌پذیری، به یکی از رایج‌ترین الیاف طبیعی برای تولید کامپوزیت‌ها تبدیل شده‌اند. پژوهشگران، نانوسولزهای الیافی را به‌عنوان مواد تقویت‌کننده مؤثر برای کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف فلکس به‌کار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن ۰/۳ درصد وزنی از نانوالیاف سلولزی، موجب بهینه‌سازی قابل توجه مدول یانگ کامپوزیت شد و افزایش چشمگیر در مقاومت مکانیکی آن ایجاد کرد. افزودن نانوالیاف سلولزی به الیاف فلکس قبل از تزریق رزین، در مقدار بهینه ۰/۳ درصد وزنی، افزایش چشمگیر ۲۰۴/۰۲ درصدی در مدول یانگ و ۱۱/۰۱ درصدی در مقاومت کششی حاصل شد [۶۱]. این یافته‌ها نشان‌دهنده قابلیت بالای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانوالیاف سلولزی و الیاف فلکس برای توسعه مواد پایدار و با عملکرد بالا است و امکان کاربرد گسترده آن‌ها در زمینه‌های مهندسی و صنعتی را فراهم می‌کند [۶۲].

نانوسولزهای کروی (SCNCs)، ذرات سلولزی با ساختار بلوری و شکل کروی هستند که سطح ویژه بالا و استحکام مکانیکی زیاد دارند. این نانوذرات به‌خوبی در ماتریس‌های پلیمری پراکنده می‌شوند و می‌توان آن‌ها را با زنجیره‌های شیمیایی اصلاح کرد تا سازگاری و چسبندگی بهبود یابد. پژوهشگران نانوسولزهای کروی زیست‌پایه را به‌عنوان تقویت‌کننده مؤثر برای کامپوزیت‌ها و چسب‌های اپوکسی با عملکرد بالا معرفی کردند [۶۳]. با طراحی ساختار منحصربه‌فرد ساختار هسته-کرونا (Core-Corona) و اتصال کووالانسی زنجیره‌های آلی انعطاف‌پذیر به سطح نانوسولزهای کروی، مشکلات تجمع نانوذرات برطرف و پراکندگی یکنواخت در ماتریس اپوکسی حاصل شد. نتایج نشان داد که کامپوزیت‌ها و چسب‌های اپوکسی تقویت‌شده با نانوسولزهای کروی دارای مقاومت چسبندگی بالا (۲۰/۶۴ مگاپاسکال)، و چقرمگی مناسب (۱۹۰۲۷ N/m) دارد و منجر به بهبود خواص گرمایی می‌شوند. این یافته‌ها قابلیت بالای این نانوکامپوزیت را برای توسعه مواد پایدار و با عملکرد بالا و کاربرد آن‌ها در مهندسی مواد و صنایع سازه‌ای نشان می‌دهد و دامنه کاربرد نانوالیاف بدون حلال را گسترش می‌دهد [۶۴].

پژوهشگران، با ارائه‌ی راهبرد ترکیبی نوینی بر پایه گرافیت و نانوسولز توانستند، نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با ریزساختار لایه‌ای منظم و عملکرد مکانیکی برجسته تولید کنند. نتایج نشان دادند که این ساختار مهندسی‌شده موجب افزایش چشمگیر چقرمگی شکست تا ۴/۶۷ برابر در مقایسه با اپوکسی خالص می‌شود. تحلیل‌های تجربی و نظری حاکی از آن است که

بررسی قرار داد [۵۳]. تصاویر میکروسکوپ نوری توزیع نزدیک به همگن الیاف موز در ماتریس اپوکسی را تأیید کردند. نتایج آزمایش‌های حرارتی نشان داد که نانوبلور سلولز حاصل از گرماکافت اسیدی به‌طور جزئی پایداری حرارتی را کاهش می‌دهد، درحالی‌که الیاف موز به‌عنوان عایق‌های حرارتی مؤثر عمل کرده، رسانایی حرارتی کامپوزیت‌ها را کاهش می‌دهند. به‌طور کلی، ترکیب الیاف موز و نانوبلور سلولز امکان ساخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با پایداری حرارتی بالا، رسانایی حرارتی کم، ضریب انبساط حرارتی قابل‌تنظیم و مقاومت حرارتی بهبود یافته را فراهم می‌کند و بینش‌های ارزشمندی برای توسعه کامپوزیت‌های پلیمری پایدار ارائه می‌دهد [۵۴].

تأثیر نوع و میزان نانوالیاف سلولزی بر عملکرد کامپوزیت‌های اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که نانوالیاف سلولزی لایه‌برداری‌شده نسبت به نانوالیاف سلولزی حاوی لیگنین عملکرد تقویتی بالاتری دارد. بیشترین بهبود مکانیکی در غلظت ۰/۷۵ درصد نانوالیاف سلولزی لایه‌برداری شده مشاهده شد، به‌طوری‌که مقاومت ضربه‌ای و مدول کشسانی به ترتیب ۴۱ و ۷۹ درصد، افزایش و شکنندگی کاهش یافت [۵۵]. این بهبود عملکرد، ناشی از تعامل قوی‌تر نانوالیاف با ماتریس اپوکسی است. در مقابل، نانوالیاف سلولزی حاوی لیگنین مقاومت حرارتی بالاتری ارائه داد، اما تقویت مکانیکی کمتری داشت. همچنین، بارگذاری بیش از حد نانوالیاف سلولزی لایه‌برداری شده (۱ درصد) باعث کاهش خواص مکانیکی شد که احتمالاً به‌دلیل تجمع نانوالیاف است. این نتایج اهمیت بهینه‌سازی نوع و میزان نانوالیاف سلولزی برای دستیابی به خواص مکانیکی و گرمایی دلخواه را نشان داده، راهکاری مناسب برای توسعه کامپوزیت‌های زیست‌بنیان با عملکرد بالا ارائه می‌کند [۵۶].

چسب‌های اپوکسی به‌دلیل توان باربری بالا و تطبیق‌پذیری گسترده، نقش حیاتی در صنایع مختلف از جمله هوافضا و خودرو دارند. با این حال، حساسیت آن‌ها به شکست مکانیکی و مقاومت شکست محدود، در شرایط بارگذاری ترکیبی، چالشی مهم محسوب می‌شود. نانوبلورهای سلولزی، که منبعی پایدار و تجدیدپذیر با قابلیت مقاومت بالا هستند، به‌عنوان جایگزینی دوستدار محیط‌زیست برای نانومواد سنتی مطرح هستند [۵۷]. بر خلاف مطالعات پیشین که تنها بر تقویت مکانیکی اپوکسی با نانوبلورهای سلولزی تمرکز داشته‌اند، در این تحقیق به‌طور ویژه انرژی شکست در حالت ترکیبی و خواص الاستوپلاستیک را بررسی شده است. نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی نشان داده که با افزودن یک درصد وزنی از این نوع نانوذرات، مدول یانگ به مقدار ۹ درصد و مقاومت کششی ۱۶ درصد افزایش یافته است. همچنین با افزایش غلظت، تجمع نانوبلورها منجر به کاهش عملکرد شده، که این امر راهنمای مهمی برای استفاده بهینه از نانوسولز نانوکامپوزیت‌های اپوکسی است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی یکنواختی پراکندگی نانوبلورهای سلولزی تا غلظت یک درصد و شبیه‌سازی‌های امان محدود صحت پیش‌بینی مدل ناحیه چسبندگی را تأیید کرده است. این نتایج طراحی چسب‌های اپوکسی تقویت‌شده با نانوبلورهای سلولزی برای اتصالات هوافضا یا چسب‌های خودروبی را پیش برده، ترکیبی از پایداری محیط‌زیست و مقاومت مکانیکی برتر ارائه می‌کند [۵۸].

در پژوهشی دیگر، نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با استفاده از نانوسولز استخراج‌شده از الیاف پوست نارگیل تهیه شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که

بهبود مقاومت در برابر رشد ترک ناشی از هم‌افزایی چندین سازوکار تقویت‌کننده است، از جمله پیوندهای بین‌سطحی قوی، قفل‌شدگی مکانیکی و پدیده‌های کشش الیاف و شکست ورقه‌ای که مسیر انتشار ترک را منحرف و انرژی شکست را بهینه توزیع می‌کنند. [۶۵]. افزون بر این، معماری لایه‌ای منحصربه‌فرد موجب ایجاد مسیرهای پرپیچ‌وخم برای ترک شده و اتلاف انرژی را به صورت مؤثری افزایش می‌دهد. یافته‌های این تحقیق چشم‌اندازی نو برای طراحی و ساخت نسل آینده‌ی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با خواص مکانیکی مهندسی شده و عملکرد بالا فراهم می‌آورد [۶۶].

در پژوهشی دیگر، نانوذرات پودر پوسته نارگیل (CSNPs) با اندازه متوسط حدود ۵۲/۴۳ نانومتر سنتز و به‌عنوان فاز تقویتی در پوشش‌های اپوکسی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج آزمون‌های الکتروشیمیایی و ریزساختاری نشان داد که افزودن درصد بهینه‌ی ۲ درصد وزنی CSNP به رزین اپوکسی منجر به بهبود چشمگیر خواص چسبندگی و مقاومت در برابر خوردگی پوشش شد. داده‌های حاصل از آزمون EIS و قطبش پتانسیودینامیک بیانگر افزایش قابل‌ملاحظه‌ی مقاومت انتقال بار و کاهش نرخ خوردگی در نمونه‌های حاوی نانوذرات بودند [۶۷]. بررسی‌های آزمون میکروسکوپ الکترونی نیز توزیع یکنواخت نانوسلولز و نانوذرات پوسته نارگیل را در ماتریس اپوکسی تأیید کرد که این امر نقش مهمی در ایجاد مسیرهای نفوذ دشوار برای یون‌های خورنده دارد. در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که ترکیب بهینه‌ی نانوسلولز و نانوذرات زیست‌پایه‌ی پوسته نارگیل می‌تواند به‌عنوان رویکردی پایدار و کارآمد برای توسعه‌ی پوشش‌های اپوکسی ضد خوردگی با عملکرد برتر مورد استفاده قرار گیرد [۶۷].

با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از استفاده‌ی گسترده از کامپوزیت‌های پلیمری پایه نفتی، نانوسلولز به‌عنوان تقویت‌کننده‌ی زیست‌پایه، تجدیدپذیر و سازگار با محیط‌زیست توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. با وجود مزایای عملکردی قابل‌توجه، ناسازگاری نانوسلولز با ماتریس‌های پلیمری آب‌گریز و پایداری حرارتی پایین آن، چالشی اساسی در مسیر تجاری‌سازی گسترده به شمار می‌رود [۶۸]. نتایج مطالعات پژوهشی، نشان می‌دهد که اصلاح یا عاملی‌سازی شیمیایی نانوسلولز می‌تواند از طریق ایجاد پیوندهای کووالانسی یا یونی با زنجیره‌های پلیمری، برهم‌کنش میان‌سطحی را بهبود داده، پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌های پلیمری حاصل را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. بررسی‌های انجام‌شده با استفاده از آزمون گرمایابی (TGA) صحت این فرضیه را تأیید کرده، نشان داده که نانوسلولز عاملی‌شده نقش مؤثری در افزایش دمای تجزیه‌ی حرارتی و تأخیر در شروع فرایند تخریب دارد [۶۹].

در پژوهشی دیگر، اثر هم‌افزایی نانوالیاف سلولز (CNFs) به‌عنوان زیست‌نانوماده لیگنوسلولزی و آلیاژ نیکل و تیتانیوم (NiTi) به‌عنوان ماده‌ی فلزی هوشمند حافظه‌دار بر خواص حرارتی نانوکامپوزیت‌های پایدار اپوکسی بررسی قرار گرفت. نمونه‌های نانوکامپوزیتی با درصدهای مختلف نانوالیاف سلولز (۱، ۳ و ۵ درصد وزنی) و درصد ثابت ۳ درصد آلیاژ نیکل و تیتانیوم به روش ریخته‌گری تهیه شدند. نتایج تحلیل‌های گرمایابی و مشتق‌گرمایابی (DTG) نشان دادند که گروه‌های تقویت‌شده با آلیاژ نیکل و تیتانیوم دارای دمای تخریب گرمایی بالاتر، پایداری حرارتی بیشتر و محتوای باقی‌مانده‌ی زیادتری در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به

گروه کنترل هستند. همچنین نتایج گرماسنجی تفاضلی (DSC) و آزمون تحلیل مکانیکی حرارتی دینامیکی (DMTA) نشان دادند که افزودن نانوالیاف سلولز باعث افزایش مدول ذخیره (E')، مدول اتلافی (E'')، تان دلتا ($\tan \delta$) و دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) می‌شود، که بیانگر بهبود خواص کشسانی و ویسکوکشسانی سامانه است. در مجموع، نانوکامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانوالیاف سلولز، عملکرد حرارتی و مکانیکی به‌مراتب بهتری نسبت به اپوکسی خالص از خود نشان دادند و به‌دلیل پایداری حرارتی بالا و ویژگی‌های پاسخ‌پذیر هوشمند، می‌توانند در کاربردهای پیشرفته‌ی مهندسی، به‌ویژه در حوزه‌های نیازمند مقاومت حرارتی و عملکرد چندمنظوره، مورد استفاده قرار گیرند [۷۰].

افزودن نانوالیاف سلولزی حاصل از روغن پالم به‌عنوان نانوپرکننده به ماتریس اپوکسی سبز حاصل از منابع زیست‌توده، موجب بهبود چشمگیر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های حاصل می‌شود. فرایند اختلاط محلولی با استفاده از استون و بهره‌گیری هم‌زمان از هم‌زدن مکانیکی و حمام فراصوت، منجر به پراکندگی یکنواخت نانوالیاف سلولزی درون ساختار اپوکسی شد که نتایج میکروسکوپ الکترونی نیز آن را تأیید کرد. هرچند کاهش جزئی در پایداری حرارتی (حدود ۰/۸ درصد) مشاهده شد، اما نتایج آزمون‌های مکانیکی نشان دادند که سفتی نمونه‌ها به میزان ۳/۱۳ درصد و استحکام کششی به میزان ۴۵/۶ درصد نسبت به اپوکسی سبز خالص افزایش یافته است [۷۱]. به‌طور کلی، یافته‌های این تحقیق بیانگر آن است که نانوکامپوزیت‌های سبز تقویت‌شده با نانوالیاف سلولزی، ضمن حفظ پایداری مناسب، عملکرد مکانیکی قابل‌توجهی از خود نشان داده، می‌توانند به‌عنوان موادی پایدار و دوستدار محیط‌زیست در کاربردهای صنعتی و ساختاری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵۵].

در پژوهشی دیگر، اثر نانوذرات و میکروذرات سلولز بر رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد، افزودن پرکننده‌های پایه‌سلولزی، شامل نانوبلورهای سلولز و سلولز میکروبلور (MCC)، می‌تواند عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری اپوکسی را به‌طور مؤثری بهبود بخشد. نتایج حاکی از آن است که افزودن مقادیر کمتر از ۵ درصد وزنی از نانوذرات و میکروذرات سلولز، موجب افزایش استحکام کششی و چقرمگی شکست بدون ایجاد اثر منفی بر ویژگی‌های سطحی و پایداری حرارتی کامپوزیت‌ها می‌شود [۵۶]. بیشترین بهبود در استحکام کششی و چقرمگی شکست به‌ترتیب در غلظت‌های ۲ و ۴ درصد وزنی برای نانوذرات و میکروذرات سلولز مشاهده شد، که نشان‌دهنده‌ی تأثیرگذاری بیشتر نانوذرات سلولز، به‌دلیل اندازه ذرات کوچک‌تر و برهم‌کنش سطحی بهتر با ماتریس اپوکسی است. به‌طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد که پرکننده‌های سلولزی، به‌ویژه نانوذرات سلولز، می‌توانند به‌عنوان تقویت‌کننده‌های سازگار با محیط زیست برای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی در کاربردهای سازه‌ای و مقاوم در برابر ضربه مورد استفاده قرار گیرند [۵۷].

پژوهشگران، کامپوزیت سبز تجزیه‌پذیر، سبک‌وزن و با استحکام بالا با استفاده از رزین اپوکسی زیست‌پایه وانیلین (VE) و تقویت‌کننده‌های الیاف بلند نانوسلولزی جهت‌دار (UD-NCLF) با روش قالب‌گیری تزریق رزین به کمک خلأ و سپس پرس حرارتی تهیه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد به‌کارگیری UD-NCLF باعث ایجاد ساختاری منظم و هم‌راستا در

طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه نشان داد که نانوبلورهای سلولز با رزین اپوکسی E44 پیوند کووالانسی برقرار کرده‌اند. بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی نشان داد که نانوذرات از پراکندگی یکنواخت و سازگاری بین‌سطحی خوبی در ماتریس اپوکسی برخوردارند [۶۴]. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری تأیید کرد که اندازه‌ی نانوذرات در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ نانومتر است. افزودن تنها ۰/۳ درصد وزنی نانوذرات، موجب افزایش ۲۴ درصدی استحکام کششی، ۲۶ درصدی مدول کششی، ۶۱ درصدی ازدیاد طول در شکست و ۱۰۱ درصدی چقرمگی کششی نانوکامپوزیت شد. بنابراین، این تحقیق نوعی نانوذره سلولزی نوآورانه معرفی می‌کند که می‌تواند به‌طور هم‌زمان موجب افزایش استحکام و چقرمگی رزین اپوکسی شود [۶۵].

نانوسلولز حاصل از دو منبع طبیعی در دسترس پوست هندوانه و برگ‌های سنبل آبی با استفاده از فرایندهای شیمیایی شامل اصلاح سطح اسیدی، قلیایی و سفیدگری شیمیایی (Bleaching)، استخراج شد. طیف‌سنجی فروسرخ نشان داد که همی‌سلولز، پکتین و لیگنین به‌طور مؤثری حذف شده و سلولز خالص از هر دو پیش‌ماده جداسازی شده است. نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) بیانگر حضور بالای نانوبلورهای سلولزی در نمونه‌های فراوری شده بود [۶۶]. آزمون‌های گرم‌اثری و گرماسنجی تفاضلی نشان دادند که هر دو نوع نانوبلورهای سلولزی دارای پایداری حرارتی بسیار مطلوبی هستند. بررسی ویژگی‌های کامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با نانوبلورهای سلولزی نیز بهبود چشمگیر خواص مکانیکی، پایداری حرارتی و رسانایی گرمایی را نسبت به پلیمر خالص نشان داد. در مجموع، این مطالعه نشان می‌دهد که نانوسلولز استخراج‌شده از منابع طبیعی ارزان‌قیمت می‌تواند به‌عنوان تقویت‌کننده‌ی زیست‌پایه و کارآمد برای توسعه‌ی کامپوزیت‌های پلیمری با عملکرد بالا مورد استفاده قرار گیرد [۶۷]. مهم‌ترین نکات در مورد پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات سلولز در جدول ۳، جمع‌آوری شده است.

۷ رویکردها و راهکارهای نوین

در سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۵، پژوهشگران با چالش‌های متعددی در زمینه نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات سلولزی روبرو بودند. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها، آبدوستی ذاتی نانوذرات سلولزی بود که باعث جذب بالای آب و کاهش چسبندگی با ماتریس اپوکسی می‌شود و در نتیجه عملکرد مکانیکی و حرارتی کامپوزیت را محدود می‌کند [۶۵]. همچنین تجمع و خوشه‌سازی نانوذرات در ماتریس، پراکندگی نامتوازن ایجاد کرده، نقاط ضعف در انتقال تنش و رفتار حرارتی را افزایش می‌دهد. انتخاب روش اصلاح سطح مناسب نیز چالش دیگری بود، زیرا برخی واکنش‌های شیمیایی با ماتریس سازگاری کافی نداشتند یا خواص نانوذرات را کاهش می‌دادند. علاوه بر این، بهینه‌سازی میزان بارگذاری نانوالیاف اهمیت داشت؛ افزایش بیش از حد نانوذرات موجب تجمع و کاهش عملکرد مکانیکی می‌شد و کنترل فرایندهای شیمیایی و خشک‌سازی نانوالیاف نیز از عوامل مؤثر بر بلورینگی و پایداری حرارتی به شمار می‌رفت [۶۶]. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، رویکردهای متعددی مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از سیلان‌ها و گروه‌های آب‌گریز باعث بهبود چسبندگی بین نانوذرات و رزین

کامپوزیت شد که منجر به بهبود چشمگیر خواص مکانیکی، به‌ویژه استحکام و سفتی خمشی، نسبت به رزین اپوکسی VE خالص شد [۵۸]. پیوندهای میان‌سطحی قوی بین گروه‌های هیدروکسیل UD-NCLF و گروه‌های عاملی رزین VE نقش مهمی در افزایش استحکام و پایداری حرارتی و مقاومت در برابر آب ایفا کردند. افزون بر این، کامپوزیت توسعه‌یافته قابلیت تجزیه‌پذیری عالی در محلول متانول و اسیدکلریدریک (۰/۷۵ مولار) از خود نشان داد که می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش آلودگی پلاستیکی و مشکلات دفن پسماندهای پلیمری فراهم آورد [۵۹].

در پژوهشی دیگر، امکان به‌کارگیری نانوبلورهای سلولزی و نوع سولفات‌شده‌ی آن (S-NCC) به‌عنوان افزودنی‌های پایدار و زیست‌پایه برای بهبود عملکرد ضد خوردگی پوشش‌های اپوکسی با موفقیت نشان داده شد. نتایج تحلیل‌های ساختاری و مورفولوژیکی تأیید کرد که فرایند سولفات‌کردن منجر به ایجاد گروه‌های استرسولفات بر سطح نانوبلورهای سلولزی شده، بدون آنکه اندازه نانوذرات (در محدوده ۴۰ تا ۵۰ نانومتر) به‌طور قابل‌توجهی تغییر کند [۶۰]. آزمون‌های الکتروشیمیایی نشان دادند که افزودن نانوبلورهای سلولزی و نوع سولفات‌شده‌ی آن به ماتریس اپوکسی موجب افزایش چشمگیر مقاومت در برابر خوردگی شده است، به‌گونه‌ای که پوشش حاوی ۲۰ درصد وزنی نانوبلورهای سلولزی و نوع سولفات‌شده‌ی آن بالاترین کارایی (تا ۷/۹۹ درصد) را نشان داد. سازوکار حفاظت در برابر خوردگی نیز به پدیده‌ی دافعه‌ی الکترواستاتیکی یون‌های کلرید از سطح فولاد نسبت داده شد. در مجموع، نتایج این مطالعه بیانگر کارایی و اهمیت استفاده از نانوبلورهای سلولزی سولفات‌شده در بهبود عملکرد ضد خوردگی پوشش‌های اپوکسی، به‌ویژه در کاربردهای دریایی است [۶۱].

نانوکامپوزیت‌های پلی‌آنیلین حاوی نانوالیاف سلولزی (PANI-CNF) از طریق پلیمری‌شدن درجا (InSitu) آنیلین بر روی نانوالیاف سلولزی اکسیدشده با TEMPO سنتز شدند. نتایج طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نشان‌دهنده‌ی پلیمری‌شدن موفق آنیلین بر سطح CNF ها بود [۶۲]. نانوکامپوزیت‌های حاصل به‌عنوان نانوپرکننده در مقادیر مختلف به رزین اپوکسی پایه‌آب (WER) افزوده شدند و پوشش‌های کامپوزیتی بر روی ورق‌های فولاد Q235 تهیه شد. ارزیابی مقاومت خوردگی پوشش‌ها با استفاده از آزمون‌های قطبش پتانسیودینامیک و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) انجام شد. نتایج نشان داد که پوشش حاوی ۰/۵ درصد وزنی پلی‌آنیلین حاوی نانوالیاف سلولزی دارای بهترین عملکرد ضد خوردگی است. همچنین مشخص شد که افزودن پلی‌آنیلین حاوی نانوالیاف سلولزی موجب بهبود قابل‌توجه مقاومت خوردگی پوشش‌های اپوکسی پایه‌آبی شده، این عملکرد حتی پس از ۴۰ روز غوطه‌وری در محلول NaCl نیز حفظ می‌شود. بهبود عملکرد ضد خوردگی به اثر هم‌افزایی میان سازوکار سدکنندگی و غیرفعال‌سازی نسبت داده شد. در مجموع، این مواد کامپوزیتی زیست‌پایه توسعه‌یافته، چشم‌انداز بسیار مناسبی برای بهبود حفاظت خوردگی فولادهای کم‌کربن دارند و می‌توانند نقش مؤثری در توسعه‌ی پایدار پوشش‌های پایه‌آب ایفا کنند [۶۳].

در پژوهشی دیگر، برای بهبود خواص مکانیکی رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت‌های سلولزی با استفاده از روش واکنش درجا تهیه شدند. نتایج

نانوذرات، به‌ویژه در محدوده ۰/۳ تا ۱ درصد، عملکرد مکانیکی و حرارتی بهینه را فراهم کرد. این پیشرفت‌ها نشان‌دهنده اهمیت اصلاح سطح و کنترل دقیق عوامل فرایندی برای طراحی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با عملکرد بالا و پایداری حرارتی مناسب است [۶۸-۷۱].

اپوکسی و افزایش پراکندگی یکنواخت نانو الیاف شد. روش‌های استری کردن و پوشش دهی با پلیمرهای انعطاف‌پذیر نیز مانع تجمع نانوذرات شدند [۶۷]. ترکیب نانوذرات سلولزی با مواد معدنی یا سایر پرکننده‌ها، پایداری حرارتی و مقاومت مکانیکی را افزایش داد. بهینه‌سازی میزان بارگذاری

جدول ۳ مهم‌ترین نکات در پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده

Table 3 Key points in recent advances in epoxy nanocomposites containing modified zinc oxide nanoparticles

Sample Name	Year	Main Results	References
Epoxy–nanocellulose–silane and methacrylate groups	2025	Improved mechanical properties; enhanced thermal conductivity	[47]
Epoxy–nanocellulose–silane groups	2025	Anticorrosion performance	[49]
Epoxy–nanocellulose–silane groups	2025	Protective coatings; improved mechanical properties	[48]
Epoxy–nanocellulose–basalt fibers	2025	Environmentally friendly system; improved adhesion properties	[50]
Epoxy–nanocellulose from rice husk–banana fibers	2025	Improved thermal properties; increased thermal resistance	[52]
Epoxy–cellulose nanofibers–lignin	2025	Improved mechanical properties	[53]
Epoxy–cellulose nanofibers	2025	Improved adhesion properties; enhanced mechanical properties	[55]
Epoxy–cellulose nanofibers from coconut shell	2025	Improved thermal properties; enhanced mechanical properties	[56]
Epoxy–cellulose nanofibers–flax fibers	2025	Improved mechanical properties	[57]
Epoxy–spherical cellulose nanofibers	2025	Improved adhesion properties; enhanced mechanical properties	[58]
Epoxy–graphite–nanocellulose	2024	Improved mechanical properties	[60]
Epoxy–coconut shell powder/nanocellulose	2024	Improved anticorrosion properties	[61]
Epoxy–nickel–titanium alloy–nanocellulose	2024	Improved thermal properties	[62]
Epoxy–cellulose nanofibers from palm oil	2024	Improved mechanical properties; green chemistry benefits	[64]
Epoxy–cellulose nanoparticles or cellulose microparticles	2023	Improved mechanical properties	[67]
Vanillin-based epoxy–nanocellulose	2024	Improved mechanical properties; enhanced polymer-waste disposal/management	[65]
Epoxy–sulfated nanocellulose	2023	Improved corrosion resistance for marine applications	[58]
Epoxy–polyaniline–cellulose nanoparticles–TEMPO	2023	Improved corrosion resistance	[59]
Epoxy–nanocellulose	2023	Improved mechanical properties	[64]
Epoxy–nanocellulose from watermelon rind or water hyacinth	2023	Improved thermal properties	[60]

نانوذرات و ماتریس رزین، پراکندگی یکنواخت نانوالیاف و کاهش تجمع آن‌ها شده، در نتیجه مقاومت کششی، مدول کشسانی، سفتی و مقاومت در برابر گسترش ترک‌ها به شکل قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. از نظر حرارتی، نانوکامپوزیت‌های اصلاح‌شده دمای آغاز و بیشینه تخریب حرارتی بالاتری از خود نشان داده و مقدار زغال باقی‌مانده در دماهای بالا افزایش یافته است که بیانگر پایداری حرارتی بیشتر، کاهش نرخ تخریب و دوام طولانی‌تر ماده

۴ نتیجه‌گیری

تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که اصلاح سطح نانوذرات سلولزی، از جمله نانوبلور سلولزی، نانوالیاف سلولزی و سلولز باکتریایی، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای خواص مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی دارد. استفاده از روش‌های مختلف اصلاح سطح مانند سیلان‌زنی، پوشش‌های آب‌گریز، استردار کردن و سایر واکنش‌های شیمیایی موجب افزایش چسبندگی بین

10. Gharieh, A., Sharifian, A., & Dadkhah, S. (2025). Enhanced long-term corrosion resistance and self-healing of epoxy coating with HQ-Zn-PA nanocomposite. *Scientific Reports*, 15, 8154.
 11. Zhang, L., Yang, D., Li, Z., Zhai, Z., Li, X., de La Vega, J., & Wang, D.-Y. (2024). Ultrafine iron oxide decorated mesoporous carbon nanotubes as highly efficient flame retardant in epoxy nanocomposites via catalytic charring effect. *Sustainable Materials and Technologies*, 39, e00845.
 12. Ali, Z., Yaqoob, S., & D'Amore, A. (2024). Impact of dispersion methods on mechanical properties of carbon nanotube (CNT)/iron oxide (Fe₃O₄)/epoxy composites. *Journal of Carbon Research*, 10(3), 66.
 13. Sengottaiyan, S., Subbarayan, S., Natarajan, R., & Gurunathan, V. (2025). Enhancing mechanical, degradation, and tribological properties of biocomposites via treatment and alumina content. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Advance online publication.
 14. Shariatmadar, M., Gholamhosseini, P., Abdorrezaee, Z., Ghorbanzadeh, S., Feizollahi, S., Hosseini, F. S., Azad Shahraki, F., & Mahdavian, M. (2024). Leveraging polyaniline-grafted micaceous iron oxide as a dual active-barrier pigment for anti-corrosion polymer coatings. *Surface and Coatings Technology*, 479, 130501.
 15. Zhong, F., Yang, X., Chen, C., Wang, M., Wang, B., Xia, H., & Song, J. (2025). Cobalt-doped iron-based Prussian blue analogue cubes anchored to phosphorus-nitrogen-covered BN surfaces for enhancing the flame retardancy of epoxy coatings. *Progress in Organic Coatings*, 198, 108843.
 16. Mishra, A., Shukla, M., Shukla, M. K., Srivastava, D., & Nagpal, A. K. (2022). Thermal and mechanical characterization of alumina-modified multifunctional novolac epoxy nanocomposites. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 09673911221098579.
 17. Khalil, M. M., Gouda, M. M., & Abbas, M. I. (2024). Impact of nano-Fe₂O₃ on radiation parameters of epoxy reinforced with nano carbon. *Scientific Reports*, 14, 21940.
 18. Wang, B., Zhang, C., Huang, B., Wang, H., Miao, X., & Deng, W. (2024). A facile dip-coating approach to prepare robust superhydrophobic fabric modified by γ -Fe₂O₃/epoxy resin/lauric acid for oil/water separation, lossless water transportation, and flame retardancy. *Surfaces and Interfaces*, 45, 103896.
 19. Sengottaiyan, S., Subbarayan, S., Natarajan, R., & Gurunathan, V. (2025). Enhancing mechanical, degradation, and tribological properties of biocomposites via treatment and alumina content. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Advance online publication.
 20. Wei, Z., Guan, J., Yan, L., & Niu, G. (2024). The role of nano-Fe₂O₃ crystal structure on the thermal stability, flame retardancy, and smoke suppression of intumescent flame-retarded epoxy resins. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 31(1), 59-70.
 21. Mishra, A., Shukla, M., Shukla, M. K., Srivastava, D., & Nagpal, A. K. (2022). Thermal and mechanical characterization of alumina-modified multifunctional novolac epoxy nanocomposites. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 09673911221098579.
 22. Khalil, N. Z., Johanne, M. F., & Ishak, M. (2019). Influence of Al₂O₃ nanoreinforcement on the adhesion and thermomechanical properties for epoxy adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 172, 9-15.
 23. Nur Zalikha Khalil, Mohamed Feisal Johanne, Mahadzir Ishak, (2019). Influence of Al₂O₃ nanoreinforcement on the adhesion and thermomechanical properties for epoxy adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 172, 9-15.
 24. Maghsoudian, S., Salimi, A., & Mirzataheri, M. (2019). The effect of nanoalumina silanisation in tetraglycidylether epoxy adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 87, 108497.
- است. همچنین، انتخاب روش اصلاح سطح مناسب، نوع گروه‌های عاملی، میزان بارگذاری نانوذرات و کنترل فرایندهای پراکندگی و خشک‌سازی از عوامل کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد نهایی نانوکامپوزیت‌ها محسوب می‌شوند. به‌طور کلی، پیشرفت‌های اخیر در زمینه اصلاح سطح نانوذرات سلولزی مسیر مؤثری برای طراحی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با عملکرد مکانیکی و حرارتی بهینه، پایداری بالا و قابلیت کاربرد در محیط‌های دما بالا و شرایط چالش‌برانگیز صنعتی فراهم کرده است. این یافته‌ها امکان تولید مواد سبک، مقاوم و بادوام طولانی‌مدت برای کاربردهای مهندسی پیشرفته، خودرو، هوافضا و صنایع الکترونیک را به شکل مؤثری افزایش می‌دهند و نشان‌دهنده اهمیت اصلاح سطح نانوذرات برای توسعه نسل جدید نانوکامپوزیت‌های با عملکرد بالا است.

مراجع

1. Karami, M. H., Kalaei, M. R. (2022). Investigation of curing kinetics modeling of epoxy nanocomposites in the presence of nano graphene oxide: A review study. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 21(124), 71-83. In Persian.
2. Ehdizadeh, H., & Moradi, G. R. (2024). Investigation and optimization of effective parameters in the process of desalination of crude oil by electrostatic method. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(136), 22-34. In Persian.
3. Abbasi, H., Hashemizadeh, A., Navaie, F. (2023). Evaluation of the efficiency of polymers, polymeric nanoparticles, and surfactant additives in improving the rheology and loss control of drilling fluids: A review. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(129), 7-25. In Persian.
4. Mousavi, S. A., Khademzadeh Yeganeh, J. (2023). Effect of nanoclay and its hybrid with carbon black on physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(126), 66-81. In Persian.
5. Masoudi, M., Salem, S. (2025). Simultaneous removal of chromium (VI) and methylene blue by nano titanium dioxide/graphene oxide/carbon nanotube photocatalyst and P25. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(137), 75-87. In Persian.
6. Karami, M. H., Moeini Jazni, O., & Bagheri, A. (2025). Epoxy nanocomposites reinforced with metal-organic framework nanoparticles: Study and analysis of morphology, mechanical properties, and thermal degradation. *Iran Polymer Technology, Research and Development*, 9(4), 51-64.
7. Saputri, D. D., Saraswati, T. E., Raharjo, W. W., & Anggoro, P. A. (2024). Reinforcement of epoxy resin-polyimide composites using magnetic-carbon nanofiber and titanium dioxide as hybrid filler for electromagnetic interference shielding material. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 28(5), 1012-1031.
8. Bai, G., Niu, C., Lang, L., Liang, X., Gu, W., Wei, Z., Chen, K., Bohinc, K., & Guo, X. (2024). In-situ formation of dual-gradient hydrogels through microfluidic mixing and co-extrusion for constructing an engineered antibacterial platform. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 187, 108497.
9. Klinthoophamrong, N., Thanawan, S., Schrodj, G., Mougin, K., Goh, K.-L., & Amornsakchai, T. (2023). Synergistic toughening of epoxy composite with cellulose nanofiber and continuous pineapple leaf fiber as sustainable reinforcements. *Nanomaterials*, 13, 1703.

40. Nipu, S. M. A., Rahman, M. Z., Alam, S. S., & Dev, B. (2024). Mechanical, thermal and morphological characterization of graphene/Al₂O₃-reinforced epoxy hybrid nanocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 309(12), 2400180.
41. Goyat, M. S. (2024). Epoxy-Al₂O₃ nanocomposites with enhanced T_g and thermal stability. *RW Materials*, 2(1), 71–82.
42. Biswal, M. K., Kuila, C., Maji, A., et al. (2024). Thermal and mechanical behavior of APTES-modified Al₂O₃-embedded unidirectional carbon fiber/epoxy composites: An experimental and statistical approach. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33, 10427–10439.
43. Karthik, A., Surendhiran, S., Savitha, S., Jagan, K. S. G., Vidaarth, T. M. N., Senthilmurugan, R., & Cheran, V. (2025). Oleic acid-tailored Al₂O₃-ZrO₂/epoxy resin coating with enhanced wettability, mechanical property, and controlled surface porosity for anticorrosion applications. *Ceramics International*, 51(3), 4872–4884.
44. Shin, D. I., Lee, J., Kim, C., et al. (2024). Reduced interfacial thermal resistance in acidic alumina-filled adhesives for heat dissipative applications. *Macromolecular Research*, 32, 885–895.
45. Kaliappan, S., & Natrayan, L. (2024). Impact of Kenaf fiber and inorganic nanofillers on mechanical properties of epoxy-based nanocomposites for sustainable automotive applications. *SAE Technical Paper 2023-01-5115*.
46. Wu, X., Liu, W., Yang, L., & Zhang, C. (2024). Construction of alumina framework with a sponge template toward highly thermally conductive epoxy composites. *Polymer Engineering & Science*, 64(4), 1812–1821.
47. Guven, C., Kisa, M., Demircan, G., Ozen, M., & Kirar, E. (2024). Effect of seawater aging on mechanical, buckling, structural, and thermal properties of nano Al₂O₃ and TiO₂-doped glass-epoxy nanocomposites. *Polymer Composites*, 45(8), 7376–7390.
48. Simunin, M. M., Voronin, A. S., Fadeev, Y. V., Dobromyslov, S. S., Kuular, A. A., Shalygina, T. A., Shabanova, K. A., Chirkov, D. Y., Voronina, S. Y., & Khartov, S. V. (2023). Influence of the addition of alumina nanofibers on the strength of epoxy resins. *Materials*, 16(4), 1343.
49. Hou, Y., Chu, F., Qiu, S., Guo, W., Zhang, S., Xu, Z., & Hu, Y. (2020). Construction of graphite oxide modified black phosphorus through covalent linkage: An efficient strategy for smoke toxicity and fire hazard suppression of epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(37), e49405.
50. Pandey, J. C., & Singh, M. (2020). Evidences of interphase formation and concomitant change in the dielectric properties of epoxy-alumina nanocomposites. *Polymer Testing*, 91, 106802.
51. Zhang, D., Feng, X., Jiang, J., Zhang, T., Yang, Z., & Zhang, G.-J. (2025). Preparation method and performance study of nanocellulose/epoxy resin composite materials modified by multiple approaches. *High Voltage*. Advance online publication.
52. Kang, L., Zeng, Q., Fan, J., et al. (2025). Improvement of anti-swelling property and anticorrosion performance of epoxy coatings by the introduction of nanocrystalline cellulose composite. *Scientific Reports*, 15, 27706.
53. Zhang, D., Feng, X., Jiang, J., Zhang, T., Yang, Z., & Zhang, G.-J. (2025). Preparation method and performance study of nanocellulose/epoxy resin composite materials modified by multiple approaches. *ACS Omega*, 10(23).
54. Musa, A. A., Park, J., Hong, G., Yoon, S. H., Onwualu, A. P., & Kim, M. (2025). Development of high-performance basalt fiber-reinforced polymer composite using a nanocellulose-based surface modification strategy. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 199, 92, 119–124.
25. Sari, N. H., Suteja, S., Pruncu, C. I., Setyawan, I., Ilyas, R. A., & Lamberti, L. (2024). Physicomechanical, water absorption and thermal properties and morphology of *Paederia foetida* fiber-Al₂O₃ powder hybrid-reinforced epoxy composites. *Polymer International*, 73(7), 573–585.
26. Zhang, X., Huang, Y., Gao, H., Luo, X., Liang, Z., & Tontiwachwuthikul, P. (2019). Zeolite catalyst-aided tri-solvent blend amine regeneration: An alternative pathway to reduce the energy consumption in amine-based CO₂ capture process. *Applied Energy*, 240, 827–841.
27. Wang, Y., & Others. (2024). Effects of thermal properties on insulation breakdown behaviors of epoxy/Al₂O₃ composite with boron nitride doping. In *2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD)* (pp. 1–4).
28. Khaleel, N. A., Salih, R. M., & Musa, B. H. (2025). Effect of nano powders on the surface and adhesion properties of epoxy and polyester-based polymeric coatings. *Journal of Elastomers & Plastics*. Advance online publication.
29. Yang, K. R., Dai, J. Y., Wang, S. P., & Others. (2025). Bio-based epoxy composites demonstrating high temperature breakdown strength and thermal conductivity for high voltage insulation. *Chinese Journal of Polymer Science*, 43, 40–52.
30. Mao, D., Chen, J., Ren, L., Zhang, K., Yuen, M. M. F., Zeng, X., Sun, R., Xu, J.-B., & Wong, C.-P. (2019). Spherical core-shell Al@Al₂O₃ filled epoxy resin composites as high-performance thermal interface materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 123, 260–269.
31. Awais, M., Xia, F., Zhang, T., Rahman, T. U., Zhao, Y., Chen, X., & Paramane, A. (2025). Interplay between curing kinetics and thermal aging dynamics of epoxy hybrid composites under different frequencies. *Polymer Composites*. Advance online publication.
32. Paraskar, P., Bari, P., & Mishra, S. (2020). Influence of amine functionalized graphene oxide on mechanical and thermal properties of epoxy matrix composites. *Iranian Polymer Journal*, 29(1), 47–55.
33. Peng, C., Yu, Z., Liao, K., Li, K., Chen, J., Chen, Y., & Han, Y. (2025). Robust, photothermal superhydrophobic epoxy anti-corrosion coating based on micro nano structured Al₂O₃-TiN. *Chemical Engineering Science*, 315, 121843.
34. Saravanakumar, S., Sathiyamurthy, S., Vinoth, V. et al. Effect of Alumina on Epoxy Composites with Banana Fiber: Mechanical, Water Resistance and Degradation Property Analysis. *Fibers Polym*, 25, 275–287 (2024).
35. Cho, J., Jang, E., Kim, J., Kim, M., Su, P.-C., & Kim, J. (2025). Development of boron nitride hydroxide/aluminum oxide/epoxy resin spheres and graphene oxide-loaded L-ascorbic acid aerogel for enhanced thermal conductivity and insulation via hot-pressing. *Polymers for Advanced Technologies*, 36(2), e70120.
36. Arunachalam, S. J., Saravanan, R., Othman, N. A., Thanikodi, S., Giri, J., Azizi, M., & Saidani, T. (2025). Artificial intelligence-driven prediction and optimization of tensile and impact strength in natural fiber/aluminum oxide polymer nanocomposites. *Engineering Reports*.
37. Hemalatha, C. K., Venkatachalam, G., & Bhuvaneshwari, M. (2025). Investigation of thermal conductivity of *Prosopis juliflora* / *Acacia leucophloea* / *Acacia nilotica* fibers / ceramic fillers / epoxy composites. *Results in Engineering*, 25, 104225.
38. Zhou, Y., Tian, X., Cao, X., Wang, Q., Wang, J., Xu, Y., Luo, M., & Wang, Z. (2025). Enhanced thermal conductivity and electrical insulation properties of liquid crystalline epoxy composites by using optimized alumina hybrid fillers. *Materials Today Physics*, 54, 101719.
39. Zhang, Y., & Ke, L. (2025). Application effect of nano modified epoxy resin adhesive materials in the repair of cracks in building concrete. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 18(1–2).

- Renewable Resources*, 14(3), 157–172.
71. Song, P., Cai, Z., Li, J., He, M., Qiu, H., Ren, F., Zhang, Y., Guo, H., & Ren, P. (2025). Construction of rGO-MXene@FeNi/epoxy composites with regular honeycomb structures for high-efficiency electromagnetic interference shielding. *Journal of Materials Science & Technology*, 217, 311–320.
 55. Balakrishnan, D. (2025). Thermal studies on nanocellulose and banana fiber-reinforced polymer composite. *2025 5th International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, 1–5.
 56. Alvarez Marin, L., Mahani, Z. N., & Peresin, M. S. (2025). Comparative study of bleached and lignin-containing cellulose nanofibrils as reinforcements in epoxy composites. *Wood Science and Technology*, 59, 98.
 57. Mohammadian, H., Abdollahi, H., & Khabaz-Aghdam, A. (2025). Cellulose nanocrystal (CNC) effect on mechanical and damage characteristics of epoxy adhesive. *Journal of Applied Polymer Science*, 142(33), e57313.
 58. Zhang, L., Chen, Z., Mao, J., Wang, S., & Zheng, Y. (2020). Quantitative evaluation of inclusion homogeneity in composites and the applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 6790–6807.
 59. Yu, R., Prabhakar, M. N., Feng, J., Yang, Y., Hong, S. H., & Song, J.-I. (2025). Enhancing the mechanical properties of flax fiber-reinforced epoxy composites through cellulose nanofiber incorporation. *Industrial Crops and Products*, 223, 120113.
 60. Li, N., Liu, T., Shi, C., Shi, X., Qian, H., Cao, Q., Chen, J., Huang, Y., Yu, X., & Jiang, B. (2025). Biobased solvent-free fluids based on spherical cellulose nanocrystals for epoxy nanocomposite adhesive reinforcement. *Composites Science and Technology*, 261, 111007.
 61. Li, D., Peng, E., Shen, Y., Li, Y., Cong, F., Liu, L., Huang, Y., & Hu, Z. (2024). Toughening epoxy nanocomposites with graphite-nanocellulose layered framework. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 182, 108159.
 62. Alwan Nassif, R., Hilal, R. H., & Khalef, W. K. (2024). Enhancing anticorrosive characteristics of epoxy through nanocellulose reinforcement. *Iraqi Journal of Industrial Research*, 11(3), 45–54.
 63. Yildirim, M., Mutlu, I., & Candan, Z. (2024). Thermal properties of cellulose nanofibrils and nickel–titanium alloy-reinforced sustainable smart composites. *Wood Material Science & Engineering*, 19(3), 557–563.
 64. Yusuf, J., Sapuan, S. M., Rashid, U., Ilyas, R. A., & Hassan, M. R. (2024). Thermal, mechanical, and morphological properties of oil palm cellulose nanofibril-reinforced green epoxy nanocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 278(3), 134421.
 65. Semaan, P., Zahran, A., Schlapp-Hackl, I., Tehrani-Bagha, A. R., & Mustapha, S. (2024). Enhanced mechanical properties of epoxy composites using cellulose micro- and nano-crystals. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(14), e55180.
 66. Adil, S., Kumar, B., & Kim, J. (2024). Degradable, lightweight, and high-performance unidirectional nanocellulose-long-filament-reinforced vanillin epoxy composites for structural applications. *ACS Applied Polymer Materials*, 6(14), 7932–7937.
 67. Mamudu, U., Hussin, M. R., Santos, J. H., & Lim, R. C. (2023). Synthesis and characterisation of sulfated-nanocrystalline cellulose in epoxy coatings for corrosion protection of mild steel. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 5, 100306.
 68. Zhao, Y., Huang, M., Gao, Z., He, H., Chen, Y., He, F., Lin, Y., Yan, B., & Chen, S. (2023). Preparation of polyaniline/cellulose nanofiber composites with enhanced anticorrosion performance for waterborne epoxy coatings. *Polymer Engineering & Science*, 63(5), 1613–1622.
 69. Li, X., Xia, W., Shen, L., Tan, W., & Luo, X. (2023). Preparation of cellulose nanoparticles/epoxy resin composites using the in-situ reaction method for strengthening and toughening epoxy resin film simultaneously. *Materials Letters*, 349, 134790.
 70. PK, R., MS, M., Sunil, A., KS, A., Joseph, J., & TU, J. (2023). Synthesis and characterization of nanocellulose from watermelon rinds and water hyacinth. *Polymers from*