

مطالعه اثر نانو صفحه‌های گرافن اکساید بر سینتیک تخریب گرمایی نانوچندسازه‌های اپوکسی

محمدحسین کرمی^۱ و محمدرضا کلایی^{۱،۲*}

۱- دانشکده مهندسی شیمی و پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

۲- مرکز تحقیقات نانو، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

چکیده

رزین اپوکسی با توجه به، مقاومت در برابر تنش حرارتی و تخریب یکی از مهمترین بسپارهای گرماسخت است که کاربرد وسیعی در پوشش‌ها و چندسازه‌های بسپاری دارد. با مطالعه سینتیک تخریب رزین اپوکسی و نانو چندسازه‌های اپوکسی، محدوده دمایی و طول عمر سیستم مشخص می‌شود. مدلسازی سینتیک تخریب ابزاری برای مهندسان است که دوام حرارتی مواد را پیش از به کارگیری در صنعت پیش‌بینی می‌کند، که منجر به کاهش هزینه‌ها و کیفیت فرآورده طراحی شده می‌شود. بررسی پراکنش، مقدار درصد وزنی، نوع فرآیند تولید و نسبت منظر نانوصفحه‌های گرافن اکساید، چهار عامل مهم در بررسی پایداری گرمایی نانو چندسازه‌های اپوکسی در حضور نانو صفحات گرافن اکساید است. در این پژوهش، به اثر نانوصفحه‌های گرافن اکساید و نانوصفحه‌های گرافن اکساید اصلاح شده بر ریخت شناسی، ویژگی مکانیکی، پایداری گرمایی و سینتیک تخریب رزین اپوکسی پرداخته شده است.

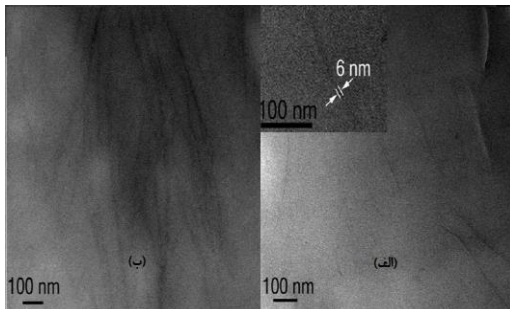
کلمات کلیدی: نانوصفحه‌های اکسید گرافن، نانوصفحه‌های گرافن اکساید اصلاح شده، رزین اپوکسی، سینتیک تخریب، مدلسازی، آنالیز گرما وزن، سنج

ایمیل نویسنده مسئول: mohammad.kalaei@gmail.com

۱- مقدمه

رزین اپوکسی با توجه به، مقاومت در برابر تنش گرمایی، و تخریب یکی از مهمترین بسپارهای گرماسخت است که کاربرد وسیعی در پوشش‌ها و چندسازه‌های بسپاری دارد. با این حال، یک اشکال جدی در رزین‌های اپوکسی، مقاومت ضعیفی است که در بسیاری از موارد، کاربرد آنها را بسیار محدود می‌کند. بررسی تخریب گرمایی نانوچندسازه‌های اپوکسی بسیار مهم است زیرا می‌تواند محدوده دمایی و طول عمر سیستم را مشخص کند. سینتیک تخریب به کاهش هزینه‌ها و کیفیت محصول طراحی شده کمک می‌کند. نانوصفحه‌ها گرافن دارای ویژگی‌های عالی مانند هدایت الکتریکی بالا، هدایت حرارتی، مدول الاستیک بالا، مساحت سطح ویژه و اثر کسری کوانتومی دارد [۱]. گرافن دارای نیروی قوی واندروالس است و همچنین، گرافن ویژگی‌های آبریزی و آسان کلوخه‌ای شدن را دارد که تا حد زیادی استفاده از گرافن را محدود می‌کند. اکسید گرافن ساختار مشابهی با گرافن دارد و می‌تواند به عنوان نانوصفحه‌ها مناسبی برای تقویت بسپارها استفاده شود [۲]. گرافن یک ماده کاربردی جدید در خانواده مواد کربنی است که به دلیل ویژگی مکانیکی سفتی بالا، هدایت حرارتی بالا و هدایت الکتریکی مورد توجه فراوان قرار گرفته است.

روشهای تولید گرافن، لایه لایه کردن میکرو شامل رسوب دهی شیمیایی بخار مکانیکی گرافیت، رشد همبافت روی سطوح عایق الکتریکی، ایجاد سوسپانسیونهای کلئیدی می‌باشد [۳]. یکی از مشتقات پرکاربرد گرافن، گرافن اکسید و گرافن اکسید کاهش یافته هستند، زیرا وجود ترکیبات هیدروکسیل و کربوکسیل در آنها می‌تواند به عنوان بستری برای دیگر مواد جهت ساخت نانوچندسازه‌ها کارآمد باشد. گرافن اکساید به طور طبیعی وجود ندارد و یک نوع ابرملکول غیراستوکیومتری است که از نظر شیمیایی ناپایدار است و در شرایط محیطی جاذب رطوبت است. گرافن اکسید عایق الکتریکی است و پس از کاهش، رسانایی الکتریکی می‌شود [۴]. تا به امروز گرافن اکساید از روشهای برودی، استود نمایر، هامر و تور ساخته شده است. همچنین، روش اصلاح شده هامر متداولترین دستورالعمل مورد استفاده برای تولید گرافن اکسید است. کاهش گرافن اکسید روشی برای حذف گروههای عاملی اکسیژنی و ترمیم بیشتر اتصالات غیر کوالانسی است [۵]. نانوصفحه‌ها گرافن در تجهیزات الکتریکی، در باتری و خازن به عنوان ذخیره انرژی سنسورها و محیط زیست از گرافن به عنوان یک نانوماده برای حذف آلاینده‌های آب و هوا و در زیست پزشکی به عنوان نانوحامل-ها کاربرد دارد [۶]. یکی از کاربردهای آزمون گرما وزن سنجی (TGA)، مربوط به بررسی سینتیک تخریب گرمایی بسپارها و نانوچندسازه‌های بسپاری است. تغییرات وزن نمونه در اثر واکنش‌های تخریب اندازه‌گیری می‌شود و با میزان درصد



شکل ۲. تصاویر TEM نانو چندسازه های اپوکسی در حضور ۱ درصد وزنی (الف) و ۱/۵ درصد وزنی (ب) نانو صفحه ها گرافن اکساید [۹].

۳- مدل های سینتیک تخریب

سرعت واکنش تخریب حرارتی بر حسب درجه تخریب، به صورت زیر است:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T) \cdot f(\alpha) \quad (۱)$$

k ، ثابت سرعت واکنش تخریب و وابسته به دما و $f(\alpha)$ تابع مدل سینتیکی است. ثابت سرعت در معادله ۱ به شکل معادله آرنیوس نوشته می شود:

$$k(T) = A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (۲)$$

که A ضریب پیشنمایی و E_a انرژی فعالسازی، به طور کلی تابع درجه تخریب هستند. انرژی فعالسازی به کمک روش تبدیل با استفاده از شکل لگاریتمی معادله سینتیکی ۲، به دست می آید [۱۰-۱۲].

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \ln[Af(\alpha)] - \left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (۳)$$

و همچنین، مدل واکنش انتگرالی $g(\alpha)$ ، به صورت فرمول زیر ارائه می شود:

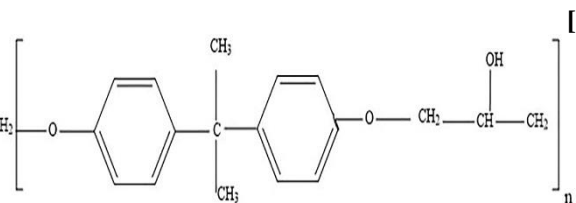
$$g(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{B} \int_{T_0}^T \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) dT \approx \frac{A}{B} \int_0^T \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) dT \quad (۴)$$

در جدول ۱، α درجه تخریب، K_1 و K_2 ثابت های سرعت واکنش تخریب و پارامترهای m و n نماهای واکنش تخریب هستند و همچنین T_M دمای بیشینه تخریب و R ثابت جهانی گازها هستند، باشد و همچنین، θ در فرمول شماره ۱۱، برابر است با اختلاف دمای بیشینه تخریب و دمای تخریب و t زمان تخریب است [۱۰-۱۴]. مدلسازی سینتیک تخریب گرمایی از روشهای مدل دار (model fitting)، بدون مدل (model free) و روش مکمل (Complementary)، استفاده می شود. در روش مدل دار، مدلی که بهترین برازش را داشته باشد انتخاب می شود و مقدار انرژی فعالسازی و

کاهش وزن (α) نمونه، به میزان واکنش تخریب (Conversion) ارتباط داده می شود، از آنجایی که واکنش تخریب در این آزمون به زمان وابسته است، بنابر این با سینتیک واکنش مواجه خواهیم بود که در نهایت با حل معادلات سینتیک تخریب پارامترهای انرژی فعالسازی (E_a)، درجه واکنش (n) به دست می آید. مدلی که بالاترین مجموع مربعات خطا (R^2) را داشته باشد به عنوان بهترین مدل انتخاب می شود. در این پژوهش به اثر نانوصفحه ها گرافن اکساید و نانوصفحه ها گرافن اکساید اصلاح شده بر سینتیک تخریب رزین اپوکسی و بررسی مدل های متفاوت سینتیک تخریب، انرژی فعالسازی واکنش تخریب، آنالیز گرما وزن سنجی و درصد کاهش وزن، و اثر انواع متفاوت نانو صفحه ها گرافن اکساید بر سینتیک تخریب رزین اپوکسی و درصد ذغال باقیمانده در اثر تخریب گرمایی و بررسی پایداری گرمایی گزارش شده است.

۲- ساختار و شکل شناسی رزین اپوکسی و نانو صفحه ها گرافن اکساید

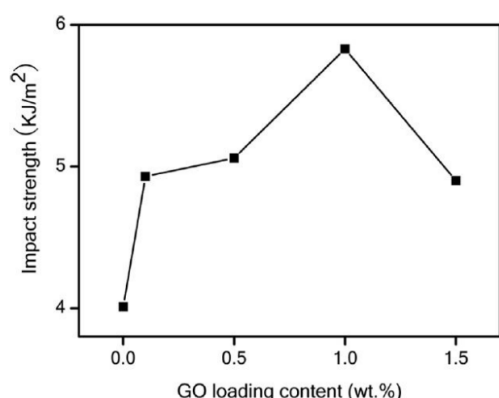
از واکنش اپی کلرو هیدرین و بیس فنول A، رزین اپوکسی تولید می شود. ویژگی آنها بستگی به ترکیب خاص نوع رزین های اپوکسی و عوامل پخت مورد استفاده دارد. در شکل شماره ۱، ساختار رزین اپوکسی نمایش داده شده است [۷].



شکل ۱: ساختار رزین اپوکسی [۷].

تصاویر TEM (شکل ۲)، نمونه نانوحندسازه های اپوکسی در حضور ۱ و ۱/۵ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید در شکل زیر مشاهده می کنید، بررسی ریخت شناسی رزین اپوکسی و نانوحندسازه اپوکسی نشان داد که با افزودن مقدار ۱ درصد وزنی نانوصفحه ها گرافن اکساید (فاصله بین صفحه ها ۶ نانومتر)، به ماتریس رزین اپوکسی، پراکنش مناسبی مشاهده می شود (شکل الف) و همچنین افزودن مقدار ۱/۵ درصد وزنی نانوصفحه ها گرافن اکساید (شکل ب)، باعث کلوخه ای شدن و پراکنش نامناسب می شود [۸،۹].

همچنین، بررسی استحکام ضربه رزین اپوکسی و نانو چندسازه های اپوکسی در حضور ۰/۵، ۱، و ۱/۵ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید نشان داد (شکل ۳)، که با افزودن مقدار ۱ درصد وزنی نانوصفحه ها گرافن اکساید، مقدار استحکام ضربه به مقدار $5/83 \text{ (kJ/m}^2\text{)}$ افزایش می یابد، و در صورت افزودن مقدار ۱/۵ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید، استحکام ضربه نانوحندسازه اپوکسی کاهش پیدا می کند که به علت افزایش کلوخه ای شدن است [۹].



شکل ۳. نمودار استحکام ضربه رزین اپوکسی و نانو چندسازه های اپوکسی در حضور ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید [۹].

اثر مقدار ۰/۱ تا ۰/۵ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید بر ویژگی مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شد، نتایج در شکل ۴، نشان داد که با افزودن ۰/۱ تا ۰/۴ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید به رزین اپوکسی استحکام کششی افزایش می یابد و با افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن استحکام کششی کاهش می یابد که به علت اثر کلوخه ای شدن نانو صفحه ها در ماتریس رزین اپوکسی می باشد و همچنین، مقدار مدول یانگ رزین اپوکسی 367 Mpa است و با افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید به رزین اپوکسی خالص، مقدار مدول یانگ به مقدار 750 Mpa افزایش می یابد و این بدان معناست نانو چندسازه اپوکسی در حضور ۰/۴ درصد وزنی، در مقایسه با نمونه رزین اپوکسی خالص پایداری ابعادی بیشتری دارد، و مدول یانگ به مقدار دو برابر افزایش داشته است. [۱۵].

فاکتور فرکانس به دست می آید و در روش های بدون مدل فقط انرژی فعال سازی گزارش می شود [۱۰-۱۴].

جدول ۱: مدل های سینتیک تخریب [۱۰-۱۴].

معادله	نام مدل	نوع مدل
$K_1(1-\alpha)^2 + K_2\alpha(1-\alpha)^2$ (۵)	سیمون-گیلام	با مدل
$Ln \frac{B}{T_m^2} = C' + \left(\frac{-Ea}{RT_m}\right)$ (۶)	کینسجر	بدون مدل
$Ln B = C'' + \left(\frac{-Ea}{RT}\right)$ (۷)	لوزاوا	بدون مدل
$\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot (1-\alpha)^n$ (۸)	مرتبه n ام	با مدل
$\frac{d\alpha}{dt} = k\alpha^m \cdot (1-\alpha)^n$ (۹)	سینتاک برگرن	با مدل
$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha^m) \cdot (1-\alpha)^n$ (۱۰)	کمال	با مدل
$ln[ln(1-\alpha)^{-1}] = \frac{Et}{RT_{Max}^2} \theta$ (۱۱)	هورو ویتز متزگر	با مدل

برای بررسی مکانیسم های سینتیک تخریب گرمایی از فرمول های شماره ۱ و ۴، و جدول ۲، استفاده می شود. در این جدول توابع $g(\alpha)$ و $f(\alpha)$ با عنوان نام مدل و مکانیسم ها آورده شده اند.

جدول ۲: مدل های سینتیک حالت جامد [۱۷].

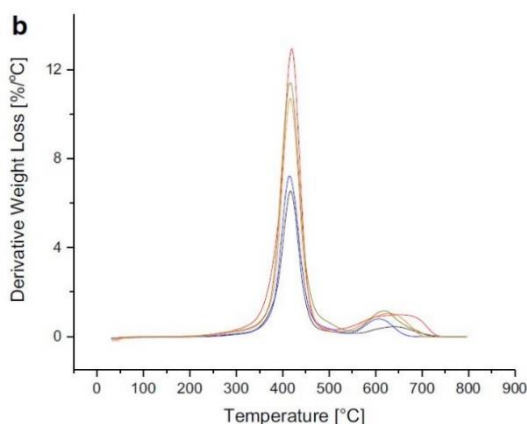
مدل	$g(\alpha)$	$f(\alpha)$	مکانیسم سینتیک
معادله آوری (n=2)	$2(1-\alpha)[-ln(1-\alpha)]^{1/2}$	$[-ln(1-\alpha)]^{1/2}$	A2
معادله آوری (n=3)	$3(1-\alpha)[-ln(1-\alpha)]^{2/3}$	$[-ln(1-\alpha)]^{2/3}$	A3
هسته گذاری و رشد (آوری)	$4(1-\alpha)[-ln(1-\alpha)]^{3/4}$	$[-ln(1-\alpha)]^{3/4}$	A4
انقباضی (Contracting)	$[2(1-\alpha)]^{1/2}$	$[1-(1-\alpha)^{1/2}]$	R2
کروی (Contracting)	$[3(1-\alpha)^{2/3}]$	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]$	R3
نمود یک بعدی	$1/2\alpha^{-1}$	α^2	D1
نمود دو بعدی	$[-ln(1-\alpha)]^{-1}$	$(1-\alpha)ln(1-\alpha) + \alpha$	D2
نمود سه بعدی	$[3/2(1-\alpha)^{2/3}][1-(1-\alpha)^{1/3}]^{-1}$	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]^2$	D3
درجه اول	$(1-\alpha)$	$-ln(1-\alpha)$	F1
هسته گذاری تصادفی	$(1-\alpha)^{-1} - 1$	$(1-\alpha)^2$	F2
نمود سه بعدی	$1 - \frac{2\alpha}{3} (1-\alpha)^{2/3}$	$3/2((1-\alpha)^{-1/3} - 1)$	D4
درجه صفر	1	α	R1
هسته گذاری تصادفی	$(1-\alpha)^3$	$[-1 + (1-\alpha)^{-2}]$	F3

۴- بررسی اثر نانو صفحه ها گرافن اکساید بر ویژگی مکانیکی رزین اپوکسی

بررسی اثر افزودن ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید بر استحکام خمشی رزین اپوکسی نشان داد که با افزودن این مقادیر، ویژگی مکانیکی افزایش می یابد و همچنین، با افزودن مقدار ۱/۵ درصد وزنی کاهش می یابد و

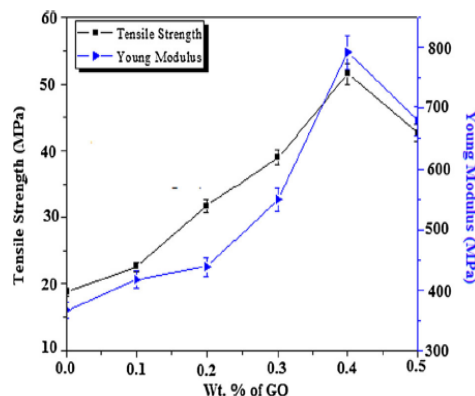
علت نسبت منظر (Aspect Ratio) بالای نانو صفحه ها گرافن اکساید می باشد و حضور این نوع نانو صفحه ها به مانند یک عامل سد کننده و تاخیری در مقابل تخریب گرمایی رزین اپوکسی/ سیانات استر رفتار می کند و پایداری گرمایی را با کاهش در انتشار ملکول های گاز، افزایش می دهد [۱۶].

آنالیز گرما وزن سنجی نمونه های رزین اپوکسی و نانو چندسازه اپوکسی در حضور نانو ذرات نیتریل بوتادین شبکه ای شده و نمونه هیبرید نانو چندسازه اپوکسی در حضور همزمان گرافن اکساید کاهش یافته و نانو ذرات نیتریل بوتادین شبکه ای شده در محیط نیتروژن از دمای محیط تا 800°C بررسی شد. نتایج نشان داد پایداری گرمایی نانو چندسازه هیبرید بیشتر از نانو چندسازه اپوکسی در حضور نانو ذرات نیتریل بوتادین است که به علت ظرفیت گرمایی بالای نانوصفحه ها گرافن اکساید کاهش یافته است که می تواند به صورت یک عامل سد کننده و تاخیری در مقابل واکنش تخریب شود [۱۷]. در شکل ۶، نمودار مشتق توزین حرارتی (Derivative Thermal Gravimetric) نمونه های رزین اپوکسی و نانو چندسازه های اپوکسی در حضور نانو صفحه ها گرافن اکساید کاهش یافته در محیط اکسیژن و در دمای 30°C تا 800°C نشان داده شده است. نتایج نشان داد با افزودن نانوصفحه ها گرافن اکساید کاهش یافته به رزین اپوکسی، پایداری گرمایی کاهش می یابد و نمونه های نانو چندسازه اپوکسی زودتر از رزین اپوکسی تخریب می شوند و همچنین با افزودن مقدار 0.5 و 1 و 2 درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید کاهش یافته به رزین اپوکسی در دمای 400°C ، سرعت تخریب افزایش می یابد که به علت حضور تعداد زیاد گروه اکسیژن در نانوصفحه ها گرافن اکساید کاهش یافته است [۱۸].



شکل ۶- نمودار DTG رزین اپوکسی و نانو چندسازه های اپوکسی در حضور نانو صفحه ها گرافن اکساید کاهش یافته [۱۸].

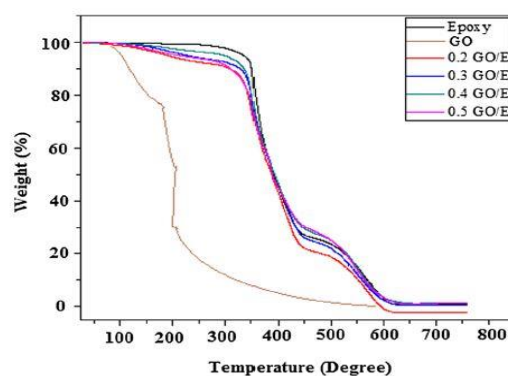
آنالیز گرما وزن سنجی رزین اپوکسی و نانو چندسازه اپوکسی در حضور نانوصفحه ها گرافن اکساید و گرافن اکساید اصلاح شده با تاخیر انداز شعله دی هیدرواکسا فسفا فنانترن اکسید (DOPO) در محیط نیتروژن از دمای محیط تا



شکل ۴. ویژگی مکانیکی رزین اپوکسی و نانو چندسازه های اپوکسی [۱۵].

۵- اثر نانو صفحه ها گرافن اکساید بر تغییرات دما و درصد کاهش وزن رزین اپوکسی

مطالعه رفتار حرارتی و آنالیز گرما وزن سنجی رزین اپوکسی و نانو چندسازه های اپوکسی در حضور گرافن اکساید در دمای محیط تا 800°C در سرعت گرمادهی تخریب $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ بررسی شد. نتایج شکل ۵، نشان داد که با افزودن 0.4 درصد وزنی به رزین اپوکسی، پایداری گرمایی افزایش یافته است. نمونه نانوصفحه ها گرافن اکساید نسبت به رزین اپوکسی و نانو چندسازه های اپوکسی رفتار تخریب حرارتی کمتری دارد که به علت حضور گروه عاملی اکسیژن در ساختار نانو صفحه ها گرافن اکساید است. همچنین، در ابتدای فرایند تخریب، درصد کاهش وزن نمونه نانو چندسازه اپوکسی، به علت حذف رطوبت و گروه عاملی باقیمانده در سیستم است [۱۵].



شکل ۵. نمودار درصد کاهش وزن سامانه های رزین اپوکسی و نانو چندسازه های اپوکسی در حضور نانو صفحه ها گرافن اکساید [۱۵].

اثر نانوصفحه ها گرافن اکساید بر درصد کاهش وزن رزین اپوکسی و سیانات استر در محیط نیتروژن و از دمای محیط تا 800°C بررسی شد، نتایج نشان داد که با افزودن نانو صفحه ها گرافن اکساید پایداری گرمایی نسبت به نمونه رزین اپوکسی و سیانات استر بهبود پیدا کرده است که به

جدول ۳: داده های آنالیز گرما وزن سنجی رزین اپوکسی و نانو چندسازه اپوکسی در حضور نانو صفحه ها گرافن اکساید [۲۲]

نام نمونه	دمای بیشینه تخریب (°C)	درصد وزنی ذغال باقیمانده
رزین اپوکسی	۳۸۸	۱۱/۲۷
اپوکسی در حضور ۰/۱ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید	۳۹۲	۱۱/۵۰
نانو چندسازه اپوکسی در حضور ۰/۵ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید	۳۹۱	۱۴/۲۲
نانو چندسازه اپوکسی در حضور ۱ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید	۳۸۸	۱۶/۶۵
نانو چندسازه اپوکسی در حضور ۱/۵ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید	۳۸۸	۱۶/۷۸

آنالیز گرما وزن سنجی رزین اپوکسی و سخت کننده دی آمینو دی فیل سولفون (DDS) و نانو چندسازه های اپوکسی در حضور نانو ذرات گرافن اکساید در محیط اکسیژن و از دمای ۵۰ تا ۸۰۰ °C بررسی شد، نتایج نشان داد که با افزودن نانو صفحه ها گرافن اکساید، دمای اولیه تخریب رزین اپوکسی به مقدار ۲۰ °C کاهش می یابد که به علت حضور نانو ذرات گرافن اکساید است که می تواند باعث جلوگیری از نفوذ اکسیژن و مواد فرار از فرایند تخریب شود و در نتیجه تخریب دیرتر انجام می شود و مقدار درصد ذغال باقیمانده در دمای ۴۵۰ °C بیشتر می شود و همچنین، کاهش اندازه صفحه های نانو صفحه ها گرافن اکساید، اثری بر پایداری گرمایی رزین اپوکسی ندارد [۲۳]. سینتیک تخریب رزین اپوکسی و هیبرید نانو چندسازه اپوکسی در حضور نانو صفحه ها گرافن اکساید و نانو ذرات سریم اکساید (CeO₂) در محیط نیتروژن از دمای ۲۵ تا ۷۰۰ °C بررسی شد، نتایج آنالیز گرما وزن سنجی نشان داد که با افزودن نانو ذرات سریم اکساید به رزین اپوکسی/ نانو صفحه ها گرافن اکساید، دمای اولیه تخریب (T_i) و درصد مقدار وزن ذغال باقیمانده هیبرید نانو چندسازه اپوکسی، افزایش می یابد و پایداری گرمایی بهبود می یابد [۲۴]. تخریب گرمایی رزین اپوکسی و رزین اپوکسی/ پیوند (Grafting) زنجیره های رزین اپوکسی با نانو صفحه ها گرافن اکساید و نانو چندسازه های اپوکسی در حضور نانو ذرات گرافن اکساید در دمای محیط تا ۶۰۰ °C در محیط نیتروژن بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که پیوند زنی رزین اپوکسی با نانو ذرات گرافن اکساید در مقایسه با دیگر نمونه ها، به مقدار ۳۰ °C، پایداری گرمایی را افزایش می دهد که به علت پراکنش بهتر و بهبود فصل مشترک رزین اپوکسی می باشد که با عمل پیوند زنی ایجاد می شود [۲۵]. آنالیز گرما وزن سنجی نمونه های رزین اپوکسی و سخت

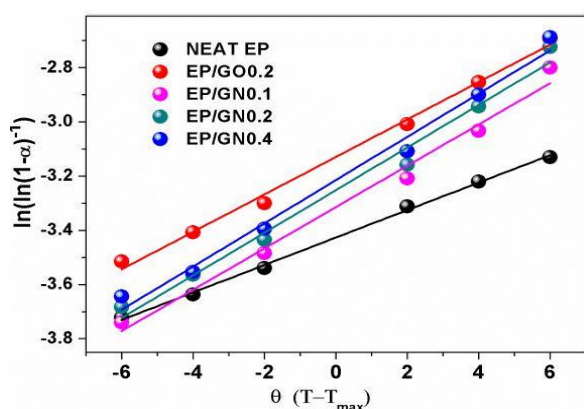
۷۰۰ °C بررسی شد، نتایج نشان داد که ذغال باقیمانده نانو چندسازه اپوکسی اصلاح شده نسبت به نمونه های رزین اپوکسی و نانو چندسازه اپوکسی، به مقدار کمی افزایش یافته است و پایداری گرمایی بهبود یافته است و مقدار دمای بیشینه تخریب با افزودن تاخیر انداز شعله به مقدار کمی افزایش یافته است [۱۹]. بررسی پایداری گرمایی نمونه های رزین اپوکسی و هیبرید نانو چندسازه اپوکسی در حضور نانو صفحه ها گرافن اکساید و نانو ذرات اکسید آهن ۳، در محیط نیتروژن و از دمای محیط تا ۶۰۰ °C بررسی شد، نتایج نشان داد که حضور نانو ذرات اکسید آهن ۳، می تواند به افزایش پایداری گرمایی نانو چندسازه اپوکسی در حضور نانو صفحه ها گرافن اکساید کمک کند و آن را به مقدار قابل توجهی افزایش دهد و همچنین، ذغال باقیمانده در تخریب واکنش هم افزایش زیادی داشته است که می تواند به علت اثر سد کنندگی نانو ذرات اکسید آهن ۳، که باعث محدود شدن ورود اکسیژن در فرایند واکنش تخریب، و در نتیجه پایداری گرمایی افزایش می یابد [۲۰]. آنالیز رفتار حرارتی و تخریب نمونه های رزین اپوکسی خالص و نانو چندسازه اپوکسی در حضور گرافن اکساید و هیبرید نانو چندسازه اپوکسی در حضور نانو صفحه ها گرافن اکساید و نانوالماس در محیط نیتروژن و از دمای محیط تا ۸۰۰ °C بوسیله آنالیز گرما وزن سنجی بررسی شد، نتایج نشان داد که حضور نانو صفحه ها باعث بهبود پایداری گرمایی شده است و همچنین، پایداری گرمایی نمونه نانو چندسازه اپوکسی/ در حضور گرافن اکساید از نمونه هیبرید نانو چندسازه کمتر است که به علت حضور اکسیژن در گروه عاملی نانو صفحه ها گرافن اکساید است. حضور نانوالماس در چندسازه رزین اپوکسی/ گرافن اکساید، می تواند به صورت یک عامل جلوگیری کننده و یک عایق، باعث کاهش سرعت واکنش تخریب شود [۲۱]. در پژوهشی دیگر (جدول ۲)، اثر ۰/۱، ۰/۵، و ۱/۵ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید بر رفتار تخریب رزین اپوکسی در محیط نیتروژن از دمای محیط تا ۸۰۰ °C بررسی شد نتایج نشان داد که حضور نانو صفحه ها گرافن اکساید تاثیر چشمگیری بر دمای بیشینه تخریب ندارد و با افزودن مقادیر ۰/۵ و ۰/۱ درصد وزنی نانو صفحه ها گرافن اکساید به ماتریس رزین اپوکسی، دمای بیشینه تخریب افزایش می یابد. همچنین، این نوع نانو صفحه ها تاثیری بر پایداری گرمایی نانو چندسازه های اپوکسی ندارند [۲۲].

حضور ۳ درصد وزنی نانو صفحه‌ها گرافن اکساید کاهش یافته نشان داد که با افزودن نانو صفحه‌ها گرافن اکساید کاهش یافته به رزین اپوکسی، دمای اولیه تخریب به مقدار $^{\circ}\text{C}40$ افزایش می‌یابد که به علت پایداری گرمایی و پراکنش مناسب نانو صفحه‌ها گرافن اکساید کاهش یافته در رزین اپوکسی می‌باشد و همچنین فرایند تولید این نوع نانو صفحه‌ها که به روش اکسیژن زدایی (de-oxygenation) سریع بوسیله آلومینیوم در محلول آلكالی می‌باشد، همچنین با توجه به ایجاد مساحت سطح بالای این روش، پایداری گرمایی را افزایش می‌دهد. [۳۰]. اثر نانو صفحه‌ها گرافن (nanoplatelets)، بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی در محیط نیتروژن و از دمای محیط تا $^{\circ}\text{C}550$ بررسی شد، نتایج نشان داد که تخریب گرمایی در ۸۰ درصد کاهش وزن، در گستره دمایی بین $^{\circ}\text{C}275$ تا $^{\circ}\text{C}375$ مشاهده می‌شود و همچنین دمای بیشینه تخریب نانو چندسازه اپوکسی کم‌تر از رزین اپوکسی خالص است که به علت کلوخه‌ای شدن نانو صفحه‌ها گرافن با رزین اپوکسی است که منجر به کاهش فرایند شبکه‌ای شدن شده است. [۳۱].

۶- اثر نانو صفحه‌ها گرافن اکساید بر انرژی فعالسازی

واکنش تخریب رزین اپوکسی

برای تعیین انرژی فعالسازی و بررسی سینتیک تخریب رزین اپوکسی و نانو چندسازه اپوکسی در حضور نانو صفحه‌ها گرافن اکساید و نانو چندسازه‌های هیبریدی در حضور نانو صفحه‌ها گرافن اکساید و نانوالماس از فرمول شماره ۱۱، روش هورویتز متزگر (Horowitz-Metzger)، استفاده شد (شکل ۷). نتایج نشان داد با افزودن هم‌زمان دو نوع نانو صفحه‌ها و نانو الماس به رزین اپوکسی، انرژی فعالسازی نسبت به رزین اپوکسی خالص و نانو چندسازه اپوکسی در حضور نانو صفحه‌ها گرافن اکساید افزایش می‌یابد و پایداری گرمایی بهبود می‌یابد [۲۱].



شکل ۷. نمودار $\ln[\ln(1-\alpha)^{-1}]$ بر حسب اختلاف دمای تخریب و دمای بیشینه تخریب [۲۱].

بررسی تغییرات انرژی فعالسازی درجه تخریب نمونه‌های رزین اپوکسی و هیبرید نانو چندسازه اپوکسی در حضور

کننده تری اتلن تترا آمین (TETA) و نانو چندسازه‌های اپوکسی در حضور مقادیر ۰/۵ و ۱ درصد وزنی از نانوذرات گرافن اکساید و نانوذرات گرافن اکساید کاهش یافته در محیط نیتروژن و از دمای $^{\circ}\text{C}30$ تا $^{\circ}\text{C}700$ بررسی شد، نتایج نشان داد نمونه‌های نانو چندسازه اپوکسی پایداری گرمایی بهتری از نمونه رزین اپوکسی دارد که به دلیل حضور نانو صفحه‌ها گرافن اکساید است که می‌تواند باعث جلوگیری از نفوذ گاز و فرایند تخریب شود و استفاده از نانو صفحه‌ها گرافن اکساید کاهش یافته با توجه به پراکنش مناسب در رزین اپوکسی، تحرک ملکولی را کم می‌کند و فرایند تخریب گرمایی دیرتر انجام می‌شود و همچنین با افزودن هر دو نوع نانو صفحه‌ها به ماتریس رزین اپوکسی، واکنش تخریب گرمایی مکانیسم دو مرحله‌ای از خود نشان می‌دهد [۲۶]. مطالعه رفتار تخریب حرارتی رزین اپوکسی / نووالاک و رزین اپوکسی / نووالاک/ نانو صفحه‌ها گرافن اکساید اصلاح شده با سیانورات در محیط نیتروژن و از دمای محیط تا $^{\circ}\text{C}900$ بررسی شد، نتایج نشان داد که دمای ۵ درصد کاهش وزن (T_5)، با افزایش مقدار درصد وزنی در ابتدا افزایش و بعد کاهش می‌یابد که به علت پراکنش نامناسب و کلوخه‌ای شدن نانو صفحه‌ها اصلاح شده در ماتریس رزین اپوکسی است و همچنین با افزایش مقدار درصد وزنی نانو صفحه‌ها گرافن اکساید اصلاح شده به رزین اپوکسی، درصد وزنی ذغال باقیمانده در دمای $^{\circ}\text{C}900$ ، افزایش می‌یابد که باعث افزایش در پایداری گرمایی می‌شود [۲۷]. بررسی دمای تخریب نانو چندسازه‌های اپوکسی در حضور نانو صفحه‌ها گرافن اکساید و گرافن اکساید کاهش یافته در دمای $^{\circ}\text{C}700$ نشان داد که با افزودن ۱/۵، ۱، ۰/۵ درصد وزنی از هر دو نوع نانو صفحه‌ها به رزین اپوکسی، دمای اولیه تخریب و سرعت تخریب گرمایی کاهش پیدا می‌کند و همچنین افزودن نانو صفحه‌ها گرافن اکساید کاهش یافته به رزین اپوکسی، دمای ۵۰ درصد کاهش وزن را به مقدار $^{\circ}\text{C}650$ در مقایسه با نانو صفحه‌ها گرافن اکساید، را افزایش می‌دهد که به علت پیوند قوی بین سطحی (Interfacial bonding)، رزین اپوکسی و نانو صفحه‌ها گرافن اکساید کاهش یافته می‌باشد [۲۸]. در پژوهش‌های دیگری، اثر اصلاح سطح نانو صفحه‌ها گرافن اکساید کاهش یافته با پیرولیدون بر تخریب حرارتی رزین اپوکسی از دمای $^{\circ}\text{C}40$ تا $^{\circ}\text{C}730$ در محیط نیتروژن بررسی شد، نتایج این پژوهش نشان داد که اصلاح سطح نانو صفحه‌ها باعث می‌شود پایداری گرمایی در مقایسه با رزین اپوکسی افزایش یابد که به دلیل نسبت منظر بالای ماده پیرولیدون است که به صورت یک عامل جلوگیری کننده از نفوذ ملکول‌های کوچک گازها می‌شود و در نتیجه باعث کاهش سرعت تخریب می‌شود و همچنین ظرفیت گرمایی بالای این ماده در مقابل با رزین اپوکسی، به افزایش پایداری گرمایی کمک می‌کند [۲]. مقایسه آنالیز گرما وزن سنجی رزین اپوکسی و نانو چندسازه اپوکسی در

نانوصفحه‌ها گرافن اکساید و نانوذرات سریم اکساید نشان داد که، انرژی فعالسازی با درجه تخریب از مقدار صفر تا یک، تغییری ندارد و مستقل از درجه تخریب است که این بدان معناست که فرایند واکنش تخریب گرمایی، تک مرحله ای است [۲۴]. انرژی فعالسازی رزین اپوکسی و نانو چندسازه‌های اپوکسی در حضور ۱۰ درصد وزنی نانو صفحه‌ها گرافن اکسید اصلاح شده با گروه سیلان تاخیر انداز شعله، با استفاده از مدل اوزاوا (Ozawa) محاسبه شد. نتایج نشان داد، که مقدار انرژی فعالسازی نمونه‌های رزین اپوکسی و نانو چندسازه اپوکسی به ترتیب برابر با $130/3$ (kJ/mol) و $180/2$ است و این افزایش در مقدار انرژی فعالسازی بدان معناست که پایداری گرمایی بهبود یافته است و اصلاح سطح نانوصفحه‌ها گرافن اکساید با گروه سیلانی و افزودن به رزین اپوکسی باعث می‌شود که به عنوان یک عامل تاخیرانداز شعله عمل کند [۳۲-۳۸].

۷- نتیجه‌گیری

بررسی ریخت شناسی سامانه‌های رزین اپوکسی و نانوحندسازه‌های اپوکسی نشان داد که با افزودن مقدار $1/5$ درصد وزنی نانوصفحه‌ها گرافن اکساید، پراکنش نامناسب خواهد بود و کلوخه‌ای شدن مشاهده می‌شود. مطالعه ویژگی مکانیکی رزین اپوکسی نشان داد با افزودن مقدار $0/5$ درصد وزنی نانوصفحه‌ها گرافن اکساید، استحکام کششی و مدول ینانگ کاهش می‌یابد و با افزودن مقدار $1/5$ درصد وزنی، استحکام ضربه، نانوحندسازه اپوکسی کاهش می‌یابد. اثر اصلاح سطح نانو صفحه‌ها گرافن اکساید کاهش یافته با پیرولیدون بر تخریب حرارتی نشان داد که، پایداری گرمایی در مقایسه با رزین اپوکسی افزایش می‌یابد که به دلیل نسبت منظر بالای ماده پیرولیدون است که به صورت یک عامل جلوگیری کننده از نفوذ ملکول‌های کوچک گازها می‌شود. همچنین، ظرفیت گرمایی بالای این ماده در مقابل با رزین اپوکسی، به افزایش پایداری گرمایی کمک می‌کند و همچنین، کاهش اندازه صفحه‌های نانو صفحه‌ها گرافن اکساید، اثری بر پایداری گرمایی رزین اپوکسی ندارد. فرایند تولید نانو صفحه‌ها گرافن اکساید در صورتی که به روش اکسیژن زدایی سریع در محلول آلكالی انجام شود، باعث افزایش مساحت سطح نانو صفحه‌ها می‌شود و پایداری گرمایی را افزایش می‌دهد. افزودن هم زمان دو نوع نانو ذرات و هیبریدی شدن نانوحندسازه‌های اپوکسی در حضور نانو ذرات اکسید آهن، نانو ذرات سربوم اکساید، نانو الماس و اصلاح سطح نانو صفحه‌ها گرافن اکساید با گروه عاملی سیلان باعث افزایش پایداری گرمایی رزین اپوکسی شده است. با توجه مطالعه مقالات این مقاله مروری مشخص است که حضور نانو صفحه‌ها گرافن اکساید باعث کاهش درصد ذغال باقیمانده می‌شود و به عنوان یک عامل جلوگیری کننده، تخریب گرمایی رزین اپوکسی را کاهش می‌دهد و همچنین عواملی مثل، درصد وزنی نانولوله‌های کربنی در

ماتریس رزین اپوکسی، سرعت نرخ گرمایی، نوع سخت کننده، و محیط تخریب گرمایی (اکسیژن یا نیتروژن)، حضور هم زمان دو نوع نانوذره در رزین اپوکسی (هیبرید نانو چندسازه)، بر بررسی اثر تخریب گرمایی نانو صفحه‌ها گرافن اکساید / رزین اپوکسی موثر است. در بیشتر موارد، اصلاح سطح نانو صفحه‌ها گرافن اکساید باعث تاخیر در سرعت تخریب گرمایی نانوحندسازه‌های اپوکسی تقویت شده با نانو صفحه‌ها گرافن اکساید شده و باعث افزایش مقاومت گرمایی می‌شود. بررسی سینتیک تخریب رزین اپوکسی و نانو چندسازه‌های اپوکسی نشان داد که با اصلاح سطح نانو صفحه‌ها گرافن اکساید با گروه سیلان، انرژی فعالسازی فرایند تخریب افزایش می‌یابد و همچنین، بررسی مدلسازی سینتیک تخریب سامانه نانوحندسازه‌های اپوکسی در حضور نانوصفحه‌ها گرافن اکساید نشان داد که با توجه به کم بودن مقالات پژوهشی در این حوزه و عدم مدلسازی واکنش‌های تخریب، نیازمند پژوهش و مطالعه بیشتری در مورد ارایه بهترین مدل برای مدلسازی سینتیک تخریب و بررسی داده‌های آزمایشگاهی با مدل ارایه شده است.

۸. منابع

- [1] S.P. Vinodhini, J.R. Xavier, Journal of Materials Science, 56,7094-110,(2021).
- [2] M.Li, Q.Hu, H.Shan, W.Yu, Z.X.Xu, Chemosphere, 263,128250,(2021).
- [3] A.G.Olabi, M.A.Abdelkareem, T.Wilberforce, E.T.Sayed, Renewable and Sustainable Energy Reviews,135,110026,(2021).
- [4] B.Hu, Y.Cong, Y.hua, B.Zhang, B.yan, L.Zhang,Y. Shen, H.Huang, H.zhou, Journal of Materials Science, 55,3712-3727,(2019).
- [5] V.R.G. Martínez, M.Gude, S. Calvo, M.R.M. Miranda, A. Ureña, Materials Today Communications, 24,100990,(2020).
- [6] Y.Xie, C.Liu,W. Liu, L.Liang, S.Wang, F.Zhang, H.Shi, M.Yang, Physicochemical and Engineering Aspects,593,124627,(2020).
- [7] F.L. Jin, X.Li, S.J. Park, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 29, 1-11,(2015).
- [8] A.Xue, B.Zhang, M. Sun, X.Zhang, J.Li, L.Wang, C.Song, International Journal of Adhesion and Adhesives, 88, 11-18,(2019).
- [9] S.Chhetri, A.N.C.Chandra,P. Samanta, N.C.Murmu, T.Kuila, Polymer Testing, 63,1-11,(2017).
- [10] D.Reso,C.N. Cascaval,F. Mustata, C.Ciobanu, Thermochemic.Acta, 383, 119-127, (2002).
- [11] S.Montserrat, J.Málek, Thermochemica. Acta, 228, 47-60,(1993).



- [29] O.Zabihi, M.Aghaie, H.Aghaie, K. Zare, Y. Saghapour, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 117, 53-61, (2014).
- [30] M. Jouyandeh, M.R.Ganjali, A.Jagar, M.Aghazadeh, F.J.Stadler, M.R. Saeb, *Progress in Organic Coatings*, 136, 105199, (2019).
- [31] M. H. Karami, M. R. Kalaei, S.Mazinani, V.G. Martínez, R.M.R.Wellen, G.Hodaifa, A.M.Shanmugaraj, K.Kim, *Isoconversional Model Approach and Cure Kinetics of Epoxy/ NBR Nanocomposites*, *Proceeding of the 14th International Seminar on Polymer Science and Technology (ISPST 2020)*, Tarbiat Modares University, 9-12 November, 9-10, (2020).
- [32] M. H. Karami, M. R. Kalaei, *Curing of Epoxy/UFNBRP Nano Composites Using Calorimetric Method*, *Proceeding of the 11th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (ICChEC 2020)*, Tehran University, 15-17 April, 15-17, (2020).
- [33] M. H. Karami, M. R. Kalaei, S. Mazinani, *Chemorheology Of Nano Acrylonitrile Butadiene Rubber (n-NBR)/Epoxy Nanocomposites*, *Proceeding of the 1st International Conference on Rheology (ICOR)*, Iran Polymer and Petrochemical Institute, 17-18 December, 104-105, (2019).
- [34] M. H. Karami, M. R. Kalaei, *Modeling of Curing Kinetics of Epoxy Nanocomposites by Time Sweep Method*, *Proceeding of the National Conference on Advanced Technologies in Energy, Water and Environment*, Sharif Energy Research Institute, 3March, 234-241, (2019).
- [35] M. H. Karami, M. R. Kalaei, *Chemorheology of Epoxy Nanocomposites in The Presence of Elastomeric Nanoparticles*, *Proceeding of the National Conference on Advanced Technologies in Energy, Water and Environment*, Sharif Energy Research Institute, 3March, 209-216, (2019).
- [36] M. H. Karami, M. R. Kalaei, *A Review of the Applications of Cross-linked Elastomeric Nanoparticles.*, (Persian), *Iran Rubber Mag*, 25, 37-56, (2021).
- [37] M. H. Karami, M. R. Kalaei, *A review of the curing kinetics of epoxy nanocomposites/nano clay* (Persian), *Iran Polymer Technology, Research and Development*, 6, 29-38, (2021).
- [38] M. H. Karami, M. R. Kalaei, *Review of degradation kinetics of epoxy nanocomposites in the presence of clay*
- [12] J. Málek, *Thermochimica .Acta*, 138, 337-346, (1989).
- [13] J. Málek, *Thermochimica .Acta*, 200, 257-269, (1992).
- [14] D.R.Rena, X.Xiong, X.Maa, S.Liu, J.Wang, P. Chen, Y. Zeng, *Thermochimica .Acta*, 623, 15-21, (2016).
- [15] L. Li, X. Liao, X. Sheng, P. Liu, Z. Hao, L. He, G. Qin, *In Polymers for Advanced Technology*, 31, 1865-1874, (2020).
- [16] A.Wazalwar, M. Raichur, *Thermochimica .Acta*, 697, 178857, (2021).
- [17] M. H. Karami, M. R. Kalaei, R. Khajavi, O. Moradi, D.Zaarei, *Thermal Stability and Thermal Degradation of Epoxy Nanocomposite in The Presence of Full Vulcanized Elastomeric Nano particles*, *Advanced materials& Novel Coatings*, 10, 2758-2770, (2021).
- [18] X. Wang, J. Jin, M. Song, Y. Lin, *Material Research Express*, 3, 105303, (2016).
- [19] M.Nonahal, M.R.Saeb, S.H. Jafari, H.Rastin, H.A. Khonakdar, F.Najafi, F. Simon, *Polymer Composite*, 39, 2016-2027, (2018).
- [20] S.H.Ryu, J.H.Sin, A.M.Shanmugaraj, *European Polymer Journal*, 52, 88-97, (2014).
- [21] M.Jouyandeh, E.Yarahmadi, K.Didehban, S. Ghiyasi, M.R. Paran, D. Puglia, J.A.Ali, A.Jannesari, M.R.Saeb, Z. Ranjbar, M.R. Ganjali, *Progress in Organic Coatings*, 136, 105217, (2019).
- [22] L.Li, Z. Zeng, J.H. Zou, M. Liang, *Thermochimica .Acta*, 614, 76-84, (2015).
- [23] J.Tian, C. Yang, J.Yang, S.Shi, S.Hao, T. High Performance Polymer, 7, 5472-5482, (2021).
- [24] L.Li, Z.Zeng, H. Zou, M.M. Liang, *Thermochimica .Acta*, 614, 76-84, (2015).
- [25] M.R.Saeb, H.Rastin, M. Shabanian, M.Ghaffari, G.H.Bahlakeh, *Progress in Organic Coatings*, 110, 172-181, (2017).
- [26] O.Zabihi, A.Hooshafza, F.Moztarzadeh, P.Payravand, A.Afshar, R.Alizadeh, *Thermochimica .Acta*, 527, 190-198, (2012).
- [27] M.Jouyandeh, N.Rahmati, E.Movahedifard, B.SH. Hadavand, Z. Karami, M. Ghaffari, M.Taheri, E. Bakhshandeh, H.Vahabi, M.R. Ganjali, K. Formela, M.R. Saeb, *Progress in Organic Coatings*, 133, 220-228, (2019).
- [28] M.R.Saeb, M.Nonahal, H.Rastin, M.Shabanian, M. Ghaffari, G.H. Bahlakeh, S.Ghiyasi, H.A.Khonakdar, V.Goodarzi, P.Vijayan, D. Puglia, *Progress in Organic Coatings*, 112, 176-186, (2017).

nanoparticles, (Persian), Polymerization, (2021), DOI: 10.22063/BASPARESH.2021.2895.1552.

[39] M. H. Karami ,M. R. Kalaei, Review of curing kinetics of epoxy nanocomposites in the presence of iron oxide nanoparticles, (Persian), Polymerization, (2021), DOI:10.22063/BASPARESH.2021.2824.1537.

[40] M. H. Karami ,M. R. Kalaei, Investigation of the effect of carbon nanotubes on modeling of curing kinetics of epoxy resin., (Persian), Journal of science and engineering elites,6,162-175,(2021).

[41] M. H. Karami ,M. R. Kalaei,R. Khajavi, O. Moradi, D.Zaarei, Effect of vulcanized elastomeric nanoparticles on thermal stability and the maximum decomposition temperatures of epoxy resin,Proceeding of the 17th National Chemical Engineering Congress & Exhibition (ICHEC 2021), FerdowsiUniversity of Mashhad, 9-11November , (2021).

[42] M. H. Karami ,M. R. Kalaei,R. Khajavi, O. Moradi, D.Zaarei , Viscosity modeling of epoxy nanocomposites / elastomeric nanoparticles , Proceeding of the 17th National Chemical Engineering Congress & Exhibition (ICHEC 2021), FerdowsiUniversity of Mashhad, 9-11November , (2021).

[43] M.Nonahal, H.Rastin, M.R.Saeb, M.G.Sari,M.H. Moghadam, P.Zarrintaj , B.Ramezanzadeh, Progress in Organic Coatings, 114 , 233-243,(2018).



دنیای نانو، سال هفدهم (۱۴۰۰)، شماره شصت و پنج

Study of the effect of graphene oxide nanoplatelets on the thermal degradation kinetics of epoxy nanocomposites

M.H. Karami¹, M.R. Kalaei^{1,2*}

¹Department of Polymer Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran

²Nano Research Center, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran

Abstract:

Epoxy resin is one of the most important thermoset polymers due to its resistance to thermal stress and degradation, which is widely used in coatings and polymer composites. By studying the degradation kinetics of epoxy resins and epoxy nanocomposites, the temperature range and long life of the system are determined. Degradation kinetics modeling is tool for engineers to predict the thermal durability of materials before use in industry, which leads to reduced costs and quality of the designed product. The four most important factors in the study of thermal stability of epoxy nanocomposites in the presence of graphene oxide nanoplatelets are dispersion, weight percentage, type of sample preparation and aspect ratio. In this study, the effect of graphene oxide nanoplatelets and modified graphene oxide nanoplatelets on morphology, mechanical properties, thermal stability and degradation kinetics of epoxy resin has been reported.

Keywords: graphene oxide nanoplatelets, Modified graphene oxide nanoplatelets, Epoxy Resin, Degradation Kinetics, Modeling, Thermal Gravimetric Analysis(TGA)