

مطالعه سینتیک پخت و پایداری گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور نانوذرات سیلیکا

S Study of curing kinetics and thermal stability of epoxy nanocomposites in the presence of silica nanoparticles

چکیده:

رزین اپوکسی به‌عنوان پوشش، چسب و ماده زمینه برای کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود و در صنایع اتومبیل، الکترونیک و ساختمانی کاربرد فراوانی دارد و در ساخت توربین بادی استفاده می‌شود. اصلاح سطح نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور نانوذرات سیلیکا، به علت افزایش چسبندگی و پیوند کووالانسی، باعث افزایش استحکام ضربه‌ای می‌شود و همچنین با افزودن نانوذرات سیلیکا به رزین اپوکسی، مدول یانگ به صورت خطی افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش پراکنش نانوذرات و کاهش تمرکز تنش است. با افزودن نانوذرات سیلیکا به رزین اپوکسی، دمای بیشینه جریان گرمایی، کاهش و سرعت پخت افزایش می‌یابد و همچنین منحنی جریان گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی پهن‌تر می‌شود. حضور نانوذرات سیلیکا، انرژی فعال‌سازی را کاهش می‌دهد و علاوه بر این، نانوذرات سیلیکا، در واکنش پخت با رزین اپوکسی نقش کاتالیزور را دارند. دو عامل مهم در کاهش تخریب حرارتی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی، پراکنش مناسب نانوذرات و عدم کلوخه‌ای شدن است. نانوذرات سیلیکا باعث افزایش دمای بیشینه تخریب گرمایی، پایداری گرمایی و درصد ذغال باقی‌مانده می‌شود. در این پژوهش، به بررسی سینتیک پخت، ریخت شناسی، خواص رئولوژیکی و مکانیکی، انرژی فعال‌سازی، درجه پخت، جریان گرمایی و پایداری گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی پر شده با نانوذرات سیلیکا پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: نانو سیلیکا، نانو سیلیکا اصلاح شده، رزین اپوکسی، سینتیک پخت، پایداری گرمایی

نوع مقاله: مروری

محمدحسین کریمی^۱، محمدرضا کلایی^{۲*}

۱- دانشجو دکترا، گروه مهندسی پلیمر، مجتمع فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات نانو، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران
۲- دکترای تخصصی، دانشیار، گروه مهندسی پلیمر، مجتمع فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات نانو، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

ایمیل نویسندگان و عهده‌دار مکاتبات:

1- karami.polymerphd@gmail.com
2- *mohammad.kalaei@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۰

علمی-فنی: مطالعه سینتیک پخت و پایداری گرمایی ... ۳۷

مقدمه

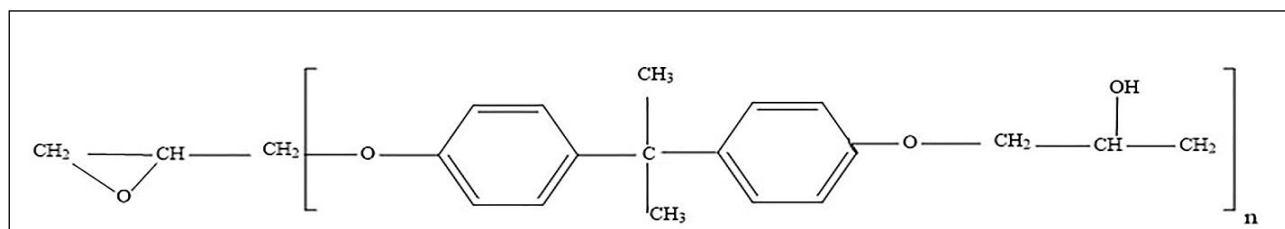
محصول طراحی شده، می‌شود [۵]. در ابتدای بررسی سینتیک پخت باید درجه پخت محاسبه شود و با مدل‌های متفاوت سرعت واکنش پخت برازش داده شده و بهترین مدل انتخاب شود، و در نهایت، پارامترهای سینتیک پخت (Ea,n,A) به دست می‌آیند [۶]. مدل‌سازی سینتیک پخت به دو روش، مدل‌دار (model fitting)، بدون مدل (model free) تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش مدل‌دار، مدل‌های متفاوتی بر روی داده‌های حاصل از آنالیز حرارتی برازش (curve fitting) می‌شوند، مدلی که بالاترین مجموع مربعات خطا (R2) را داشته باشد به عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود، و در این روش انرژی فعال‌سازی و درجه واکنش به دست می‌آیند. در روش بدون مدل، فقط انرژی فعال‌سازی از شیب نمودار به دست می‌آید [۷]. در این پژوهش، به بررسی سینتیک پخت، ریخت‌شناسی، خواص رئولوژیکی و مکانیکی، انرژی فعال‌سازی، درجه پخت، جریان گرمایی و پایداری گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی پر شده با نانوذرات سیلیکا پرداخته شده است.

ساختار رزین اپوکسی و ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت

اپوکسی

از واکنش اپی کلرو هیدرین و بیس فنول A، رزین اپوکسی تولید می‌شود. خواص آن‌ها بستگی به ترکیب خاص نوع رزین‌های اپوکسی و عوامل پخت مورد استفاده دارد. در شکل شماره ۱، واکنش تولید رزین اپوکسی نمایش داده شده است.

یکی از مهم‌ترین پلیمرهای گرماسخت رزین اپوکسی است که به عنوان پوشش، چسب و ماده زمینه برای کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود، و همچنین در صنایع اتومبیل، الکترونیک، و ساختمانی کاربرد فراوانی دارند [۱]. ساختار بسیار شبکه‌ای رزین اپوکسی باعث شکننده بودن این رزین می‌شود و افزایش چقرمگی رزین‌های اپوکسی در حضور نانوذرات پلیمری، یکی از زمینه‌های مورد توجه پژوهشگران است [۲]. نانوسیلیکا به شکل‌های متفاوتی در محصولاتی متنوع استفاده شده و در بسیاری از کاربردها مانند کاتالیزورها یا جاذب‌ها به علت داشتن مقاومت شیمیایی بالا و پایداری حرارتی مناسب و نیز سازگار بودن با بسیاری از مواد مورد توجه قرار می‌گیرند. از نانوسیلیکا در تقویت بتن، زیست پزشکی، ساخت جوهر چاپ و لوازم آرایشی استفاده می‌شود [۳]. مقالات گوناگونی به بررسی سینتیک پخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور نانوذرات پلیمری پرداخته است و پخت مواد بوسیله آزمون‌های رنومتر و گرماسنجی روبشی تفاضلی بیشترین مقالات را به خود اختصاص داده‌اند [۴]. معادلات سینتیک پخت برای ارزیابی و بهینه‌سازی فرآیند تولید استفاده می‌شود. واکنش‌های پیچیده زیادی در زمان فرآیند پخت رزین اپوکسی وجود دارد، بنابراین، برای تعیین خواص نهایی رزین‌های پلیمری با مطالعه سینتیک پخت، می‌توان کیفیت محصول نهایی را افزایش داد. مدل‌سازی سینتیک تخریب گرمایی، به ابزاری اساسی برای مهندسان تبدیل شده است که منجر به کاهش هزینه‌ها و توسعه

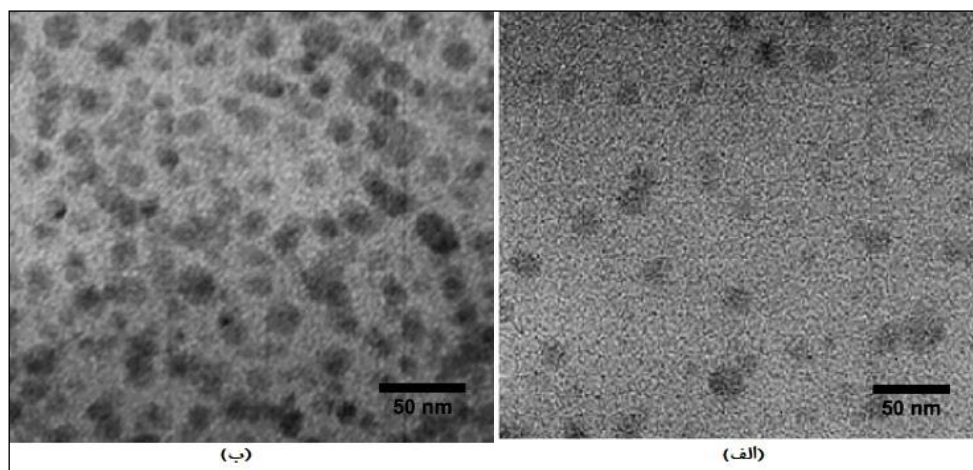


شکل ۱- ساختار رزین اپوکسی [۸].

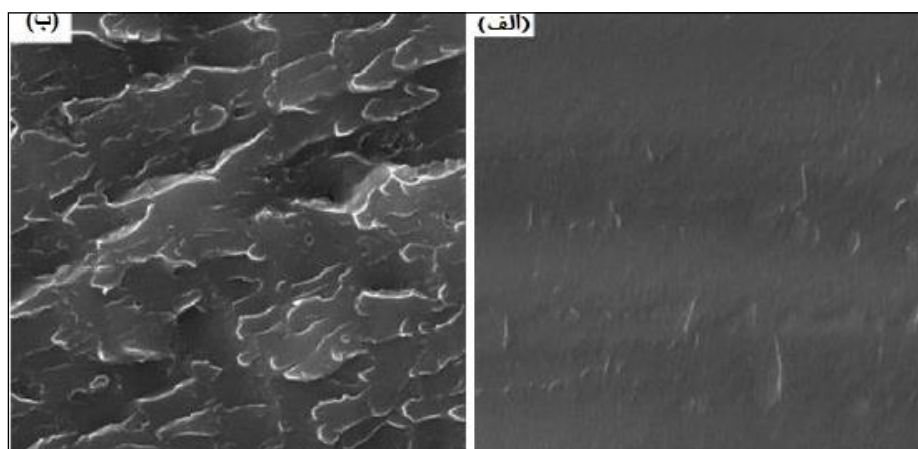
در دو حالت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی پراکنش مناسبی دارند و اثری از کلوخه‌ای شدن مشاهده نمی‌شود [۹]. در شکل ۳، تصاویر SEM^۲ سطوح شکست رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور ۱ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا نشان داده شده است. نتایج نشان داد سطح شکست نمونه رزین اپوکسی خالص بسیار یکنواخت و به صورت خطوط رودخانه (river lines) است و با افزودن نانوذرات سیلیکا به ماتریس رزین اپوکسی، سطح شکست نانوکامپوزیت اپوکسی غیریکنواخت و زیر می‌شود و باعث کاهش رشد ترک، افزایش چقرمگی و استحکام نانوکامپوزیت اپوکسی می‌شود [۹].

در شکل ۲، تصاویر TEM^۱، نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور ۱/۳ و ۱۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا نشان داده شده است. نمونه (الف) حاوی ۱/۳ درصد وزنی نانو سیلیکا پراکنش مناسبی دارد و همچنین اثری از کلوخه‌ای شدن مشاهده نمی‌شود. با افزایش درصد وزنی نمونه (ب)، مقدار بسیار کمی کلوخه‌ای شدن دیده شده است و شفافیت نوری (optical transparency) افزایش یافته است [۹].

در پژوهشی دیگر اثر ۵، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا در دو حالت پراکنشی به وسیله اختلاط برشی زیاد و کم بر ریخت‌شناسی رزین اپوکسی بررسی شد، نتایج نشان داد که در



شکل ۲- تصاویر TEM نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور نانو سیلیکا (الف). ۱/۳ درصد وزنی (ب). ۱۵ درصد وزنی نانو سیلیکا [۹].



شکل ۳- تصاویر SEM سطح شکست نمونه (الف). رزین اپوکسی (ب). نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۱ درصد وزنی نانو سیلیکا [۹].

1. Transmission electron microscopy 2. scanning electron microscope

بررسی درجه پخت (روش‌های گرماسنج پویشی دیفرانسیلی و رئومتري) و مدل‌های سینتیک پخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی

α (درجه پخت) در روش رئومتري، براساس مدول ذخیره و در روش گرماسنج پویشی دیفرانسیلی بر اساس گرمای واکنش محاسبه می‌شود. در روش رئومتري $G'_{(t)}$ مدول ذخیره در هر زمان و $G'_{(0)}$ مدول ذخیره در زمان اولیه شروع واکنش است، همچنین $G'_{(\infty)}$ بیانگر مدول ذخیره در زمان بی‌نهایت است. در روش گرماسنج پویشی دیفرانسیلی، ΔH_t به معنای گرمای واکنش در هر لحظه و ΔH_T به معنی گرمای کلی واکنش پخت است.

$$\alpha = \frac{G'(t) - G'(0)}{G'(\infty) - G'(0)} \quad (1)$$

$$\Delta H_t = \alpha \cdot \Delta H_T \quad (2)$$

مدل‌های تجربی بسیاری برای توصیف مدل‌سازی سینتیک پخت رزین‌های گرماسخت بررسی شده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها در جدول ۱، نشان داده شده است. در این معادلات α درجه پخت، K_1 و K_2 ثابت‌های سرعت واکنش و پارامترهای m و n نماهای واکنش پخت هستند و همچنین T_p ، دمای بیشینه پخت و R ثابت جهانی گازها است [۱۵-۵].

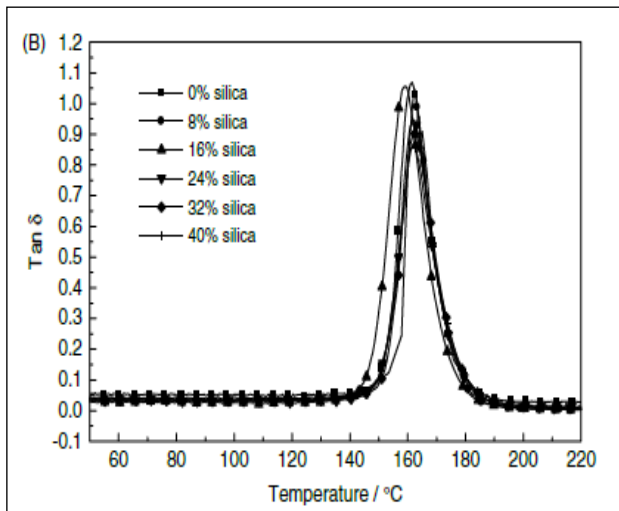
در جدول ۱، E انرژی فعال‌سازی برحسب (kJ/mol) ، β سرعت گرمادهی (C°/min) و C' ، C'' پارامترهای ثابت بدون بعد هستند [۱۵-۱۲].

اثر نانوذرات سیلیکا بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی

مطالعه مدول ذخیره رزین اپوکسی در حضور ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا نشان داد که با افزودن نانوذرات سیلیکا به رزین اپوکسی، مدول ذخیره افزایش می‌یابد [۱۶]. مقایسه

جدول ۱- مدل‌های سینتیک پخت [۱۵-۵].

معادله	نام مدل
$K_1(1 - \alpha)^2 + K_2\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (3)$	سیمون - گیلهام
$\ln \frac{B}{T_p^2} = C' + \left(\frac{-Ea}{RT_p} \right) \quad (4)$	کیسینجر
$\ln B = C'' + \left(\frac{-Ea}{RT} \right) \quad (5)$	اوزاوا
$\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot (1 - \alpha)^n \quad (6)$	مرتبه n ام
$\frac{d\alpha}{dt} = k\alpha^m \cdot (1 - \alpha)^n \quad (7)$	سیستاک برگرن
$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha^m) \cdot (1 - \alpha)^n \quad (8)$	کمال



شکل ۵- آزمون دینامیکی- مکانیکی نمونه نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور درصدهای متفاوت نانوذرات سیلیکا [۱۹].

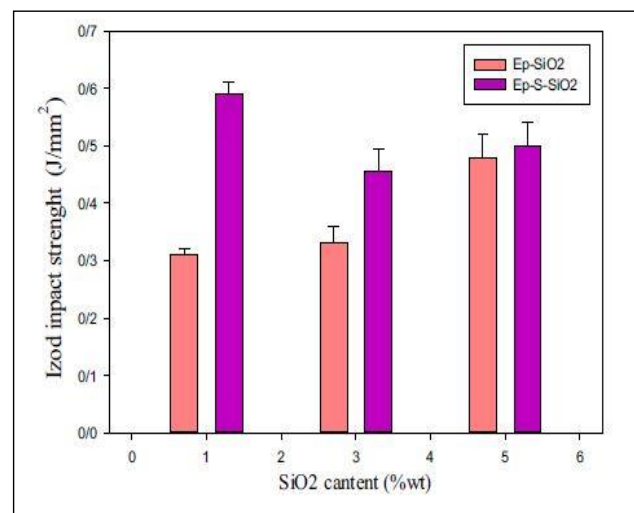
در جدول ۲، مدول نمونه رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش درصد وزنی نانوذرات سیلیکا به رزین اپوکسی، مدول افزایش می‌یابد، که این می‌تواند به دلیل ایجاد اتصالات شبکه‌ای مناسب میان نانوذرات سیلیکا و رزین اپوکسی باشد [۲۰].

جدول ۲- مدول رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور درصدهای متفاوت نانوسیلیکا [۲۰].

مدول (Gpa)	نمونه
۲/۹۶	رزین اپوکسی
۳/۲۰	نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور ۴ درصد وزنی نانوسیلیکا
۳/۴۲	نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور ۸ درصد وزنی نانوسیلیکا
۳/۶۰	نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور ۱۵ درصد وزنی نانوسیلیکا

در پژوهشی دیگر، بررسی مدول رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا نشان داد که با افزودن نانوذرات سیلیکا به رزین اپوکسی، مدول یانگ به صورت خطی افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش پراکنش نانوذرات

استحکام ضربه نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور نانوذرات سیلیکا و نانوذرات سیلیکا اصلاح شده با گروه آمینی در شکل ۴، نشان داده شده است. اصلاح سطح نانوکامپوزیت‌های اپوکسی باعث افزایش استحکام ضربه شده است که به علت افزایش چسبندگی و پیوند کووالانسی ایجاد شده بین رزین اپوکسی و نانوذرات سیلیکا اصلاح شده است [۱۷].



شکل ۴- مقایسه استحکام ضربه نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور نانوذرات سیلیکا و نانوذرات سیلیکا اصلاح شده با گروه آمینی [۱۷].

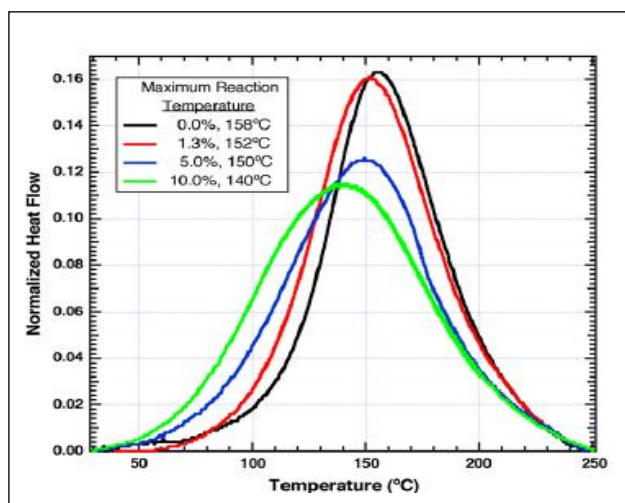
در پژوهشی دیگر اثر ۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا با اندازه ذرات ۳۰ و ۱۳۰ نانومتر بر چقرمگی شکست رزین اپوکسی نشان داد که افزایش نانوذرات با هر دو اندازه ذره باعث افزایش چقرمگی شکست شده و تقریباً رفتاری مشابه یکدیگر را دارند [۱۸]. آزمون دینامیکی مکانیکی (DMTA) نمونه نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور درصدهای متفاوت نانوذرات سیلیکا برای بررسی $Tan\delta$ در شکل ۵، نشان داده شده است. با افزودن نانوذرات سیلیکا به رزین اپوکسی دمای انتقال شیشه‌ای تغییر چشمگیری ندارد و نمونه رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقریباً مقدار $Tan\delta$ برابری دارند [۱۹].

در پژوهشی دیگر، اثر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا در سرعت گرمادهی $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ، بر جریان گرمایی رزین اپوکسی و سخت کننده دی آمینو دی فنیل آمین (DDA) بررسی شد و نتایج نشان داد که حضور گروه OH در ساختار نانوذرات سیلیکا در واکنش پخت با رزین اپوکسی به عنوان یک کاتالیست عمل می کند و واکنش پخت به محدوده دمای کمتر انتقال پیدا می کند و همچنین دمای بیشینه پخت با افزودن نانوذرات سیلیکا، کاهش می یابد [۲۲]. بررسی جریان گرمایی نمونه رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت های اپوکسی در حضور نانوذرات سیلیکا و نانوذرات سیلیکا اصلاح شده با گروه سیلان نشان داد که رفتار جریان گرمایی نمونه اصلاح شده با نمونه رزین اپوکسی مشابه یکدیگر است و گروه سیلانی از نقش کاتالیزوری گروه OH نانوذرات سیلیکا در واکنش پخت با رزین اپوکسی جلوگیری می کند، و نمونه اصلاح نشده باعث کاهش دمای پخت نانوکامپوزیت می شود [۲۳]. مطالعه اثر افزودن نانوذرات سیلیکا بر جریان گرمایی رزین اپوکسی نشان داد که در سرعت های گرمادهی $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ و $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ، افزایش دما منجر به پیک های کوچکی در منحنی جریان گرمایی می شود که به دلیل فرآیند اتری شدن و کمبود گروه آمینی و فراوانی گروه OH در ساختار نانوذرات سیلیکا در واکنش پخت با رزین اپوکسی است [۲۴]. مقایسه دمای بیشینه پخت رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور نانوذرات سیلیکا نشان داد که رفتار مشابه یکدیگر دارند و افزودن پلی اتیلن گلیکول (PEG)، به نانوکامپوزیت اپوکسی باعث افزایش دمای بیشینه جریان گرمایی می شود [۲۵]. اثر اصلاح سطح فیزیکی نانوذرات سیلیکا با پلی اتیلن ایمین (PEI) بر روی رفتار جریان گرمایی رزین اپوکسی در سرعت های گرمادهی $2/5$ ، 5 ، 7 و $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ بررسی شد و نتایج نشان دادند که اصلاح سطح باعث کاهش دمای بیشینه نانوکامپوزیت اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص می شود و فرآیند پخت تک مرحله ای است. گروه NH_2 در ساختار پلی اتیلن ایمین باعث افزایش واکنش گروه آمین نوع دوم و سوم می شود و باز شدن حلقه

سیلیکا در ماتریس رزین اپوکسی و کاهش تمرکز تنش است [۲۰].

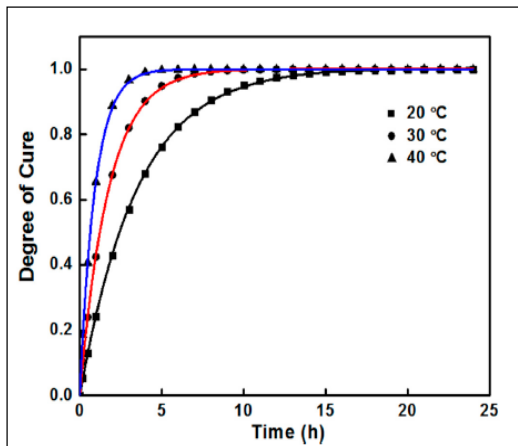
اثر نانوذرات سیلیکا بر جریان گرمایی و درجه پخت رزین اپوکسی

مطالعه جریان گرمایی رزین اپوکسی و سخت کننده دی اتیل دی آمینو تولوئن و نانوکامپوزیت های اپوکسی در حضور $1/3$ ، 5 و 10 درصد وزنی نانوذرات سیلیکا بررسی شد. نتایج در شکل ۶، نشان داد که با افزودن نانوذرات سیلیکا به رزین اپوکسی دمای بیشینه جریان گرمایی و دمای پخت نانوکامپوزیت کاهش می یابد و همچنین آنتالپی کل واکنش تغییری نمی کند و افزودن نانوذرات سیلیکا باعث پهن تر شدن منحنی جریان گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی می شود. در ابتدای واکنش، رزین اپوکسی و سخت کننده آمینی برای شروع واکنش نیاز به دمای بیشتری دارند و پیک نمودار باریک است و با افزودن نانوذرات سیلیکا و حضور گروه OH در ساختار این نوع نانوذرات باعث افزایش واکنش پخت رزین اپوکسی و سخت کننده می شود و با افزایش درصد وزنی نانوذرات سیلیکا، (حضور بیشتر گروه OH) واکنش پخت سریعتر انجام می شود و به دماهای کمتر انتقال پیدا می کند و باعث پهن تر شدن پیک نمودار می شود [۲۱، ۲۲].



شکل ۶- نمودار جریان گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت های اپوکسی در حضور $1/3$ ، 5 و 10 درصد وزنی نانوذرات سیلیکا [۲۱].

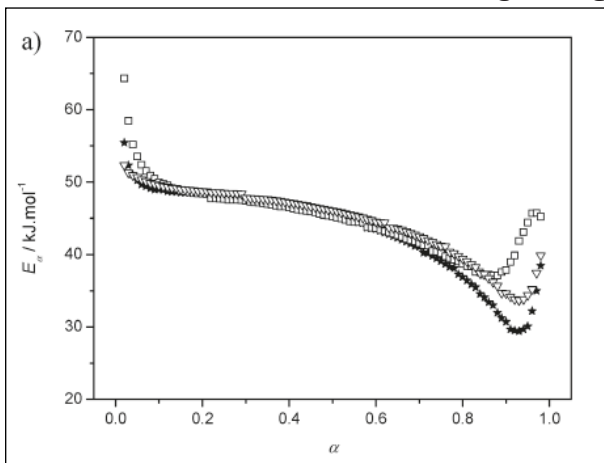
آمین در دماهای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. نتایج نشان دادند که دما و زمان دو عامل مهم برای درجه پخت است و پخت مناسب برای این نانوکامپوزیت، دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۳ ساعت است [۳۰].



شکل ۷- نمودار نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور نانوذرات سیلیکا و سخت‌کننده فنولیک آمین در دماهای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد [۳۰].

اثر نانوذرات سیلیکا بر انرژی فعالسازی رزین اپوکسی

شکل ۸، نمودار انرژی فعالسازی رزین اپوکسی خالص (نمونه ستاره) و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی را در حضور نانوذرات سیلیکا (نمونه مربع) و نانوذرات سیلیکا اصلاح‌شده با گروه سیلان (نمونه مثلث) نشان می‌دهد. نتایج نشان دادند که به غیر از ابتدا و انتهای واکنش.



شکل ۸- نمودار انرژی فعالسازی رزین اپوکسی خالص (نمونه ستاره) و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور نانوذرات سیلیکا (نمونه مربع) و نانوذرات سیلیکا اصلاح شده با گروه سیلان (نمونه مثلث) [۲۳].

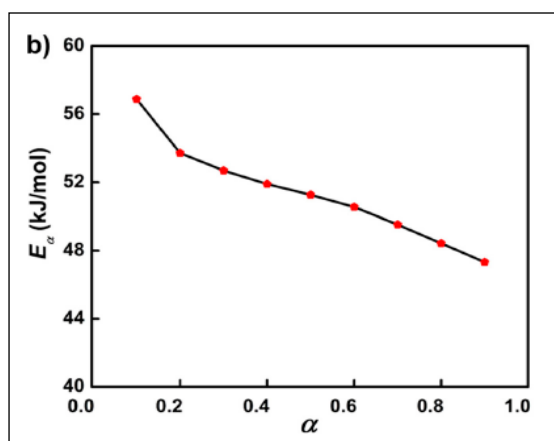
اپوکسی (ring opening)، راحت‌تر انجام می‌شود و در نتیجه اصلاح سطح فیزیکی باعث تسهیل واکنش پخت نانوکامپوزیت اپوکسی می‌شود [۲۶]. بررسی اثر ۳، ۵ و ۱۰ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا بر جریان گرمایی رزین اپوکسی از نوع پودری (Powder)، نشان داد که حضور نانوذرات تاثیر چشمگیری بر جریان گرمایی رزین اپوکسی ندارد و رفتاری مشابه رزین اپوکسی خالص دارد [۲۷]. مقایسه درجه پخت نمونه نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور ۱۰ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا و رزین اپوکسی خالص و سخت‌کننده دی آمینو دی فنیل آمین (DDA) نشان داد که نانوذرات سیلیکا باعث افزایش درجه پخت می‌شود و زمان واکنش پخت کاهش پیدا می‌کند و این بدان معناست که نانوذرات سیلیکا می‌تواند نقش کاتالیزوری در واکنش پخت داشته باشد [۲۲]. در جدول ۳، اثر ۳، ۵ و ۱۰ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا بر درجه پخت بررسی شده است. نتایج نشان داد حضور نانوذرات سیلیکا درجه پخت را افزایش داده است [۲۸].

جدول ۳- درجه پخت رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور درصد‌های متفاوت نانو سیلیکا [۲۸].

درجه پخت	نمونه
۰/۸۵	رزین اپوکسی
۰/۹۳	نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۱ درصد وزنی نانوسیلیکا
۰/۹۶	نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۳ درصد وزنی نانوسیلیکا
۰/۹۹	نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۵ درصد وزنی نانوسیلیکا

اثر 10phr، نانوذرات سیلیکا اصلاح‌شده با گروه سیلانی بر درجه پخت رزین اپوکسی در دماهای ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۲۰، ۱۳۰ و ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که این نوع نانوذرات در این دماها، تاثیر چندانی بر مقدار درجه پخت ندارد و درجه پخت نانوکامپوزیت اپوکسی در دماهای بالاتر کاهش می‌یابد [۲۹]. شکل ۷، درجه پخت نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور ۱/۵ درصد نانوذرات سیلیکا و سخت‌کننده فنولیک

در شکل ۱۰، نمودار انرژی فعال‌سازی نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور ۱/۵ درصد نانوذرات سیلیکا و سخت‌کننده فنولیک آمین نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که در ابتدای واکنش انرژی فعال‌سازی افزایش می‌یابد و پس از آن کاهش می‌یابد. فرآیند واکنش پخت به علت آنکه سخت‌کننده آمینی پیوند هیدروژنی دارد باعث باز شدن حلقه‌های رزین اپوکسی می‌شود و از نوع اتوکاتالیک است، و انرژی فعال‌سازی را کاهش می‌دهد. در ابتدای واکنش مقدار گروه‌های OH زیاد نیست و رفتار اتوکاتالیک مشاهده نمی‌شود و با افزایش گروه OH در واکنش بین رزین اپوکسی و نانوذرات، انرژی فعال‌سازی کاهش می‌یابد [۳۰].

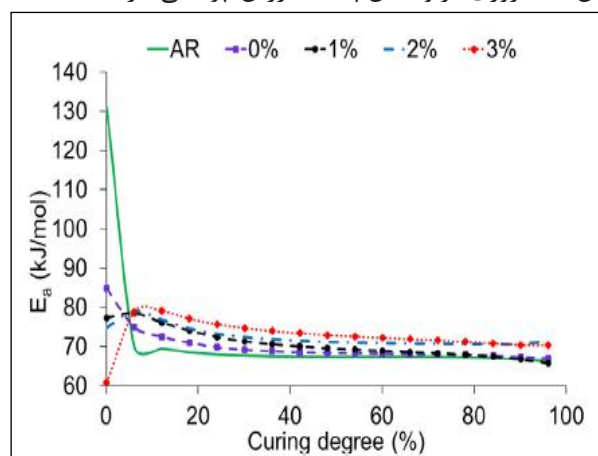


شکل ۱۰- نمودار انرژی فعال‌سازی نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور ۱/۵ درصد نانوذرات سیلیکا و سخت‌کننده فنولیک آمین [۳۰].

بررسی پایداری گرمایی و سنتیک تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور نانوذرات سیلیکا

شکل ۱۱، نمودار آنالیز گرماوزن‌سنجی رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور ۳،۱ و ۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا در محیط نیتروژن در سرعت گرمادهی ۲۰ C°/min از دمای محیط تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. نتایج نشان دادند با افزودن نانوذرات سیلیکا به رزین اپوکسی دمای بیشینه تخریب گرمایی و درصد ذغال باقیمانده تخریب حرارتی، افزایش می‌یابد و این بدان معناست که نانوذرات سیلیکا باعث افزایش

هر سه نمونه رفتاری مشابه یکدیگر دارند. در ابتدای واکنش، نانوکامپوزیت‌ها، در محدوده درجه پخت بین صفر تا ۰/۱، رفتار اتوکاتالیک از خود نشان می‌دهند که این به علت حضور گروه OH در ساختار نانوذرات سیلیکا است که یون اکسونیم (oxonium ion) تولید می‌کند و با سخت‌کننده وارد واکنش می‌شود و در انتهای واکنش تحت شرایط نفوذ کنترل (Diffusion control) قرار می‌گیرد [۲۳]. مقایسه مقدار انرژی فعال‌سازی به دست آمده از مدل‌های کیسینجر، اوزاوا و KAS نشان داد که مقدار انرژی فعال‌سازی نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور نانوذرات سیلیکا و پلی اتیلن گلاکول، رفتاری مشابه یکدیگر ندارند. و مقدار انرژی فعال‌سازی روش اوزاوا بیشتر از دو روش دیگر است. مقدار انرژی فعال‌سازی از مدل‌های کیسینجر، اوزاوا و KAS به ترتیب برابر ۹۶/۸۲، ۹۴/۱۴ و ۹۸/۶۹ kJ.mol⁻¹ است و در انتهای واکنش با توجه به شبکه‌ای شدن نانوکامپوزیت اپوکسی و کم شدن تحرک ملکولی، واکنش تحت شرایط نفوذ کنترل قرار می‌گیرد [۲۵]. در شکل ۹، نمودار انرژی فعال‌سازی نمونه رزین اپوکسی پودری و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور ۳،۱ و ۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا از روش بدون مدل (model free) نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که رزین اپوکسی خالص در ابتدای واکنش، انرژی فعال‌سازی بیشتری برای شروع واکنش نیاز دارد و با افزودن نانوذرات سیلیکا، انرژی فعال‌سازی کاهش پیدا می‌کند و نانوذرات سیلیکا نقش کاتالیزوری در واکنش پخت با رزین اپوکسی دارد [۲۷].

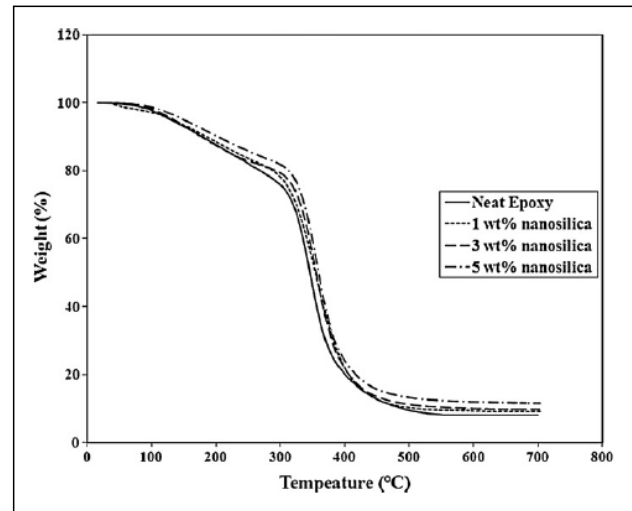


شکل ۹- نمودار انرژی فعال‌سازی رزین اپوکسی پودری و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور ۳،۱ و ۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا [۲۷].

پایداری گرمایی شده است [۳۱].

گرمادهی $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ از دمای محیط تا 650°C درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که با افزودن نانوذرات سیلیکا به رزین اپوکسی، درصد ذغال باقیمانده و دمای بیشینه تخریب گرمایی افزایش می‌یابد و پایداری گرمایی بهبود می‌یابد و همچنین دمای 10°C درصد کاهش وزن (T_{10}) کاهش می‌یابد. سنتیک تخریب گرمایی با استفاده از مدل هورویتمزترگر بررسی شد و نتایج نشان دادند که حضور نانوذرات سیلیکا باعث افزایش پایداری گرمایی شده است [۳۳].

نانوکامپوزیت اپوکسی در دمای 400°C تا 650°C درجه سانتی‌گراد می‌تواند باعث بهبود پایداری گرمایی شود و از دمای محیط تا 400°C درجه سانتی‌گراد نمونه رزین اپوکسی خالص، رفتار تخریب گرمایی مشابه نانوکامپوزیت اپوکسی دارد [۳۳]. پایداری گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور ۲۰ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا و ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی میکروذرات تیتانیوم اکساید در محیط نیتروژن از دمای محیط تا 700°C درجه سانتی‌گراد بررسی شد. نتایج نشان دادند که حضور میکروذرات تیتانیوم اکساید بیش از ۵ درصد وزنی باعث افزایش کلوخه‌ای شدن می‌شود و پایداری گرمایی کاهش می‌یابد و همچنین حضور ۵ درصد وزنی میکروذرات تیتانیوم اکساید در رزین اپوکسی/ نانوسیلیکا، باعث افزایش پایداری گرمایی می‌شود که به علت افزایش چگالی شبکه‌ای شدن (crosslinking density) است [۳۴]. مقایسه دمای بیشینه تخریب گرمایی رزین اپوکسی خالص و سخت‌کننده انیدریدی و نانوکامپوزیت اپوکسی و ۵، ۱۳ و ۲۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا نشان دادند که حضور نانوذرات سیلیکا باعث افزایش دمای بیشینه تخریب گرمایی شده و پایداری گرمایی را افزایش می‌دهد و این



شکل ۱۱- نمودار آنالیز گرمای نانوکامپوزیت رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور ۳، ۱ و ۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا در محیط نیتروژن [۳۱].

در پژوهشی دیگر، اثر نانوذرات سیلیکا بر رزین اپوکسی و سخت‌کننده دی‌آمینو دی‌فنیل سولفون (DDS)، در محیط اکسیژن از دمای محیط تا دمای 800°C درجه سانتی‌گراد بررسی شد. نتایج نشان دادند که با افزودن نانوذرات سیلیکا به مقدار ۲۰ و ۴۰ درصد وزنی، درصد ذغال باقیمانده، دمای 50°C درصد کاهش وزن (T_{50})، و پایداری گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص افزایش یافته است [۳۲] در جدول ۴، داده‌های آنالیز گرمای نانوکامپوزیت رزین اپوکسی و سخت‌کننده دی‌آمینو بنزامید (DQPB) و نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور ۱۰ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا که در محیط نیتروژن و سرعت

جدول ۴- داده‌های آنالیز گرمای نانوکامپوزیت رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور ۱۰ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا [۳۳].

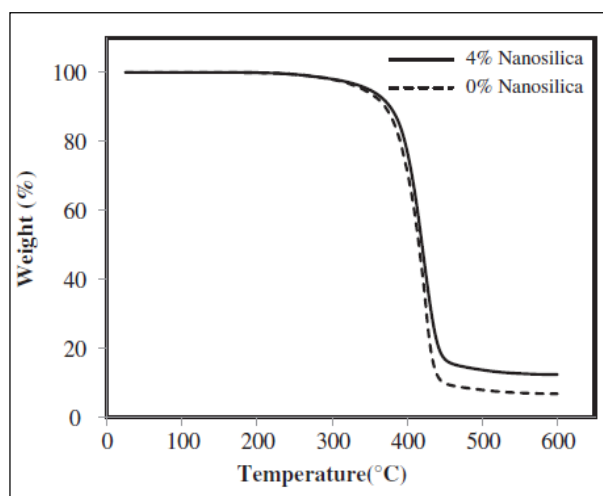
نمونه	$T_{10} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{max}} (^{\circ}\text{C})$	انرژی اکتیواسیون (kJ/mol)
رزین اپوکسی	۳۹۰	۴۳۰	۱۴۸
نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور ۱۰ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا	۳۹۰	۴۳۶	۱۶۰

حضور سخت‌کننده (DEP) حاوی گروه فسفر (phosphorous) در ترکیب رزین اپوکسی/نانوذرات سیلیکا باعث افزایش پایداری گرمایی می‌شود و همچنین گروه فسفر با نانوذرات سیلیکا اثر هم‌افزایی دارد [۳۹-۴۸].

نتیجه‌گیری

نتایج عکس‌های آنالیز TEM مربوط به نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور ۱/۳ و ۱۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا نشان داد که نمونه حاوی ۱/۳ درصد وزنی نانوسیلیکا پراکنش مناسبی دارد و همچنین اثری از کلوخه‌ای شدن مشاهده نمی‌شود و با افزایش درصد وزنی، مقدار بسیار کمی کلوخه‌ای شدن دیده شده است و شفافیت نوری افزایش یافته است. با افزودن نانوذرات سیلیکا به رزین اپوکسی، دمای انتقال شیشه‌ای تغییر چشمگیری ندارد و نمونه رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقریباً مقدار $Tan\delta$ برابری دارند. اثر اصلاح سطح فیزیکی نانوذرات سیلیکا با پلی‌اتیلن ایمین بر روی رفتار جریان گرمایی رزین اپوکسی نشان داد که اصلاح سطح باعث کاهش دمای بیشینه نانوکامپوزیت اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص می‌شود و فرآیند پخت تک‌مرحله‌ای است. مقایسه درجه پخت نمونه نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور ۱۰ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا و رزین اپوکسی خالص و سخت‌کننده دی‌آمینو دی‌فنیل آمین نشان داد که حضور نانوذرات سیلیکا باعث افزایش درجه پخت و کاهش زمان واکنش پخت شده است، که این بدان معناست که نانوذرات سیلیکا می‌توانند نقش کاتالیزوری در واکنش پخت داشته باشند. مقدار انرژی فعالسازی نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور نانوذرات سیلیکا و پلی‌اتیلن گلاکول، رفتار مشابه یکدیگر ندارند و مقدار انرژی فعالسازی روش اوزاوا بیشتر از دو روش دیگر است و در انتهای واکنش با توجه به شبکه‌ای شدن نانوکامپوزیت اپوکسی و کم شدن تحرک ملکولی، واکنش تحت شرایط نفوذ کنترل است. حضور نانوذرات سیلیکا باعث افزایش پایداری گرمایی و کاهش تخریب حرارتی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی می‌شود که به

بدان معناست که پیوند فصل مشترک رزین اپوکسی و نانوذرات بسیار قوی است [۳۵]. پایداری گرمایی رزین اپوکسی و سخت‌کننده تولون دی‌آمین (TDA)، در مقایسه با هیبرید نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور همزمان ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا و نانوذرات گرافن اکساید نشان داد که با توجه به تشکیل پیوند کووالانسی و اثر هم‌افزایی (synergistic) نانوذرات پلیمری، پایداری گرمایی افزایش می‌یابد [۳]. اثر اصلاح سطح نانوذرات سیلیکا با گروه آمینوسیلان بر تخریب گرمایی رزین اپوکسی از دمای محیط تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در محیط اکسیژن بررسی شد. نتایج نشان دادند که اصلاح سطح باعث بهتر شدن فرایند شبکه‌ای شدن می‌شود و پایداری گرمایی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص بهبود می‌یابد که این به دلیل پراکنش مناسب نانوذرات اصلاح شده در ماتریس اپوکسی است که می‌تواند از تخریب گرمایی رزین اپوکسی جلوگیری کند [۳۷]. در شکل ۱۲، اثر ۴ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا بر رفتار تخریب حرارتی رزین اپوکسی دارای گروه وینیل استر نشان داده شده است. با افزودن نانوذرات سیلیکا دمای بیشینه تخریب گرمایی و درصد ذغال باقیمانده نانوکامپوزیت اپوکسی و همچنین پایداری گرمایی افزایش یافته است. نانوذرات سیلیکا به دلیل کم بودن پتانسیل انرژی سطح می‌تواند به مانند یک عایق عمل کند و تخریب گرمایی را کاهش دهد [۳۸-۴۸].



شکل ۱۲. نمودار درصد کاهش وزن رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی [۳۸].

نانوذرات سیلیکا، نمی‌توان گزارش کافی و اطلاعات زیادی در مورد سینتیک تخریب گزارش کرد.

سپاسگزاری

IRM ...

دلیل کم بودن پتانسیل انرژی سطح می‌تواند به مانند یک عایق عمل کند و تخریب گرمایی را کاهش دهد. حضور همزمان نانوذرات سیلیکا با میکروذرات تیتانیوم اکساید و گرافن اکساید باعث بهبود پایداری گرمایی شده است. با توجه به عدم اطلاعات کافی و تحقیق در زمینه سینتیک تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور

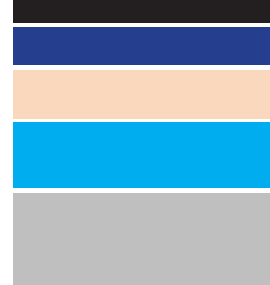
مراجع

- Ahmadi Z., Epoxy in nanotechnology: A short review, Prog. Org. Coat,132, 445-448, (2019).
- Martone A, Formicola C, Giordano M, Zarrelli M. Reinforcement efficiency of multi-walled carbon nanotube/epoxy nano composites. Compos. Sci. Technol, 70, 1154- 1160,(2010).
- Hsieh, T.H.; Kinloch, A.J.; Masania, K.; Taylor, A.C.; Sprenger, S. The mechanisms and mechanics of the toughening of epoxy polymers modified with silica nanoparticles, Polym, 51, 6284-6294, (2010).
- Tezel G.B , Sarmah A, Desai S, Vashisth A, Micah J. G, Kinetics of carbon nanotube-loaded epoxy curing: Rheometry, differential scanning calorimetry, and radio frequency heating, Carbon ,175,1-10,(2021).
- Ngo T. D., Ton That., Hoa M.T., Cole K. C., Curing kinetics and mechanical properties of epoxy nanocomposites based on different organoclays., Polym. Eng.Sci ,47, 649-661, (2007)
- H. Zhang, L. Tang, Z. Zhang, L. Gu, Y. Xu, C. Eger, Wear-resistant and transparent acrylate-based coating with highly filled nanosilica particles, Tribol. Int. 43 , 83–91,(2010).
- Florian H. Gojny, Malte H.G. Wichmann, Bodo Fiedler, Karl Schulte, Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study, Compos. Sci .Technol, 65 , 2300-2313, ,(2005).
- Forcellese A, Simoncini M, Vita A, Giovannelli A, Leonardi L, Performance analysis of MWCNT/Epoxy composites produced by CRTM, J. Mater. Process. Technol., 286 , 116839, (2020).
- Fulmali, A. O., Kattaguri, R., Mahato, K. K., Prusty, R. K. & Ray, B. C. Effect of CNT addition on cure kinetics of glass fiber/ epoxy composite. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 338, 012003, (2018).
- Ahn SN, Lee HJ, Kim BJ, Tan LS, Baek JB. Epoxy/Amine-Functionalized Short- Length Vapor Grown Carbon Nanofiber Composites. J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem. , 46, 7473-7482,(2008).
- Cha J, Jun GH, Park JK, Kim JC, Ryu HJ, Hong HS. Improvement of modulus, strength and fracture toughness of CNT/Epoxy nanocomposites through the functionalization of carbon nanotubes. Compos Part B-Eng., 129, 169-179,(2017).
- Cha J, Jin S, Shim JH, Park CS, Ryu HJ, Hong SH. Functionalization of carbon nanotubes for fabrication of CNT/epoxy nanocomposites. Mater. Des. , 95, 1-8,(2016)

13. Dutta AK, Penumadu D, Files B. Nanoindentation testing for evaluating modulus and hardness of single-walled carbon nanotube-reinforced epoxy composites. *J MATER RES*, 19 (1), 158-164,(2004)
14. J.C. Dominguez. J.c, M.V. Alonso,m.v, M. Oliet.M, E. Rojo, F. Rodríguez, Kinetic study of a phenolic-novolac resin curing procesby rheological and DSC analysis, *Thermochim. Acta*, 498 , 39-44,(2010).
15. Málek J , A computer program for kinetic analysis of non-isothermal thermoanalytical data, *Thermochim. Acta*,138, 337-346,(1989).
16. Allahverdi, A., Ehsani, M., Janpour, H. & Ahmadi, S. The effect of nanosilica on mechanical, thermal and morphological properties of epoxy coating. *Prog. Org. Coatings* 75, 543–548 (2012).
17. Kamran-Pirzaman, A., Rostamian, Y. & Babatabar, S. Surface improvement effect of silica nanoparticles on epoxy nanocomposites mechanical and physical properties, and curing kinetic. *J. Polym. Res.* 27, 13 (2020).
18. Conradi, M., Zorko, M., Kocijan, A. & Verpoest, I. Mechanical properties of epoxy composites reinforced with a low volume fraction of nanosilica fillers. *Mater. Chem. Phys.* 137, 910–915 (2013).
19. Pethrick, R. A., Miller, C. & Rhoney, I. Influence of nanosilica particles on the cure and physical properties of an epoxy thermoset resin. *Polym. Int.* 59, 236–241 (2010).
20. Sprenger, S. Epoxy resin composites with surface-modified silicon dioxide nanoparticles: A review. *J. Appl. Polym. Sci.* 130, 1421–1428 (2013).
21. Chen, C., Justice, R. S., Schaefer, D. W. & Baur, J. W. Highly dispersed nanosilica-epoxy resins with enhanced mechanical properties. *Polymer (Guildf)*. 49, 3805–3815 (2008).
22. Alzina, C., Sbirrazzuoli, N. & Mija, A. Epoxy-amine based nanocomposites reinforced by silica nanoparticles. Relationships between morphologic aspects, cure kinetics, and thermal properties. *J. Phys. Chem. C* 115, 22789–22795 (2011).
23. Tikhani, F., Jouyandeh, M., Jafari, S. H., Chabokrow, S., Ghahari, M., Gharanjig, K., Klein, F., Hampp, N., Ganjali, M. R., Formela, K. & Saeb, M. R. Cure Index demonstrates curing of epoxy composites containing silica nanoparticles of variable morphology and porosity. *Prog. Org. Coatings* 135, 176–184 (2019).
24. Ghaemy, M., Nasab, S. M. A. & Barghamadi, M. Nonisothermal cure kinetics of diglycidylether of bisphenol-A/amine system reinforced with nanosilica particles. *J. Appl. Polym. Sci.* 104, 3855–3863 (2007)
25. H. Nowruzi Varzeghani, I. Amiri Amraei, S.R. Mousavi, Dynamic Cure Kinetics and Physical-Mechanical Properties of PEG/ Nanosilica/Epoxy Composites, *Int. J. Polym. Sci.* 2020 (2020).
26. S. Ghiyasi, M.G. Sari, M. Shabaniyan, M. Hajibeygi, P. Zarrintaj, M. Rallini, L. Torre, D. Puglia, H. Vahabi, M. Jouyandeh, F. Laoutid, S.M.R. Paran, M.R. Saeb, Hyperbranched poly(ethyleneimine) physically attached to silica nanoparticles to facilitate

- curing of epoxy nanocomposite coatings, *Prog. Org. Coatings*. 120 , 100-109,(2018).
27. M. Fernández-Álvarez, F. Velasco, A. Bautista, J. Abenojar, Effect of silica nanoparticles on the curing kinetics and erosion wear of an epoxy powder coating, *J. Mater. Res. Technol.* 9,455–464,(2020).
28. P. Rosso, L. Ye, Epoxy/Silica Nanocomposites: Nanoparticle-Induced Cure Kinetics and Microstructure, *Macromol. Rapid Commun.* 28 , 121–126, (2007).
29. C.F. Yang, L.F. Wang, S.M. Wu, C.C. Su, Characterization and curing kinetics of epoxy/silica nano-hybrids, *Materials (Basel)*. 8 , 7032–7040, (2015).
30. T. Zheng, X. Wang, C. Lu, X. Zhang, Y. Ji, C. Bai, Y. Chen, Y. Qiao, Studies on curing kinetics and tensile properties of silica-filled phenolic amine/epoxy resin nanocomposite, *Polymers (Basel)*. 11 (2019).
31. A. Allahverdi, M. Ehsani, H. Janpour, S. Ahmadi, The effect of nanosilica on mechanical, thermal and morphological properties of epoxy coating, *Prog. Org. Coatings*,75 , 543-548, (2012).
32. T.-M. Lee, C.-C.M. Ma, Nonaqueous synthesis of nanosilica in epoxy resin matrix and thermal properties of their cured nanocomposites, *J. Polym. Sci. Part A Polym. Chem.* 44 ,757–768, (2006).
33. M. Ghaemy, M. Bazzar, H. Mighani, Effect of nanosilica on the kinetics of cure reaction and thermal degradation of epoxy resin, *Chinese J. Polym. Sci. (English Ed.)* 29, 141–148,(2011).
34. M. Parimalam, M.R. Islam, R.M. Yunus, Effects of nanosilica and titanium oxide on the performance of epoxy–amine nanocoatings, *J. Appl. Polym. Sci.* 136, 47901, (2019).
35. A. Jumahat, N.R. Zamani, C. Soutis, N.R.N. Roseley, Thermogravimetry analysis of nanosilica-filled epoxy polymer, *Mater. Res. Innov.* 18 , S6-274-S6-279, (2014).
36. R. Wang, D. Zhuo, Z. Weng, L. Wu, X. Cheng, Y. Zhou, J. Wang, B. Xuan, A novel nanosilica/graphene oxide hybrid and its flame retarding epoxy resin with simultaneously improved mechanical, thermal conductivity, and dielectric properties, *J. Mater. Chem. A*. 3 (2015)
37. M.M.A. Nikje, A.B. Garmarudi, Z.M. Tehrani, M. Haghshenas, S. Shakhesi, Thermal and Mechanical Evaluation of Epoxy Resin Composites by Synthesis of Amine-Based Coupling Agent-Nano Silica Complex, *Polym. Plast. Technol. Eng.*,50, 646–650, (2011).
38. V. Arabli, A. Aghili, The effect of silica nanoparticles, thermal stability, and modeling of the curing kinetics of epoxy/silica nanocomposite, *Adv. Compos. Mater.* 24 ,561–577, (2015).
39. Y.-L. Liu, W.-L. Wei, K.-Y. Hsu, W.-H. Ho, Thermal stability of epoxy-silica hybrid materials by thermogravimetric analysis, *Thermochim. Acta.* 412, 139-147, (2004).

40. M.H.Karami, M.R. Kalae, Review of curing kinetics of epoxy nanocomposites in the presence of iron oxide nanoparticles, *Polymerization*,(2021), DOI:10.22063/BASPARESH.2021.2824.1537.
41. M.H.Karami, M.R. Kalae, S. Mazinani, V.G.Martínez, R.M.R.Wellen , 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, Tehran, Iran, 9-12 November, 10 (2020) Part4,9-10.
42. M.H.Karami, M.R. Kalae, Curing of Epoxy/UFNBRP Nano Composites Using Calorimetric Method, *Proceeding of the 11th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2020)*, Tehran University ,Fouman, Iran, 15-17 April (2020) 15-17.
43. M.H.Karami, M.R. Kalae, 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, Tehran, Iran, 17-18 December ,(2019)104-105 .
44. M.H.Karami, M.R. Kalae, 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, Tehran, Iran, 3 March, (2021)209-216.
45. M.H.Karami, M.R. Kalae, 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, Tehran, Iran, 3 March ,(2021)234-241 .
46. M.H.Karami, M.R. Kalae, A review of the applications of cross-linked elastomeric nanoparticles, *Iranian Rubber Magazine*, 25 (2021)37-56 .
47. M.H.Karami, M.R. Kalae, A review of the curing kinetics of epoxy nanocomposites/nano clay, *Iran polymer technology, Research and development*, 6, 29-38 (2021).
48. M.H.Karami, M.R. Kalae, Review of degradation kinetics of epoxy nanocomposites in the presence of clay nanoparticles, *Polymerization*, (2021), DOI: 10.22063/BASPARESH.2021.2895.1552.



S Study of curing kinetics and thermal stability of epoxy nanocomposites in the presence of silica nanoparticles

M.H. Karami¹, M.R. Kalai^{*2}

1. PhD Student, Department of Polymer Engineering, Technical and Engineering Complex, Nano Research Center, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran
2. PhD, Associate Professor, Department of Polymer Engineering, Technical and Engineering Complex, Nano Research Center, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran

*Corresponding author Email: mohammad.kalae@gmail.com

Abstract: Epoxy resin is used as a wind turbine, coating, adhesive and base material for composites and is widely used in automotive, electronics, and construction industries. Modification of the surface of epoxy nanocomposites in the presence of silica nanoparticles, due to increased adhesion and covalent bonding, increases the impact strength and Also, by adding silica nanoparticles to epoxy resin, the Young's modulus increases linearly, which is due to the increase in nanoparticle dispersion and reduced stress concentration. By adding silica nanoparticles to epoxy resin, the maximum heat flow temperature decreases and the curing rate increases, and also causes the heat flow curve of epoxy nanocomposite to be wider. The presence of silica nanoparticles reduces the activation energy and silica nanoparticles act as a catalyst in the curing reaction with epoxy resin. Two important factors in reducing the thermal degradation of epoxy nanocomposites are proper dispersion of nanoparticles and non-agglomeration. Silica nanoparticles increase the maximum temperature of thermal degradation, thermal stability and the percentage of residual char. In this research, the modeling of curing kinetics of epoxy nanocomposites on morphology, rheological and mechanical properties, activation energy, curing degree, heat flow and investigation of thermal stability and thermal degradation has been reported.

Keywords: NanoSilica, Modified NanoSilica, Epoxy Resin, Curing Kinetics, Thermal Stability