

مطالعه مروری اثر نانو الیاف کربن بر سینتیک پخت رزین های اپوکسی

A review study of the effect of carbon nanofibers on the curing kinetics of epoxy resins

محمدحسین کرمی^۱، محمدرضا کلایی^{۱*}، رامین خواجوی^۲، امید مرادی^۳، داود زارعی^۲

۱- مرکز تحقیقات فن آوری نانو، مرکز تحقیقات نانو، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، صندوق پستی: ۴۶۶-۱۹۵۸۵

۲- گروه مهندسی پلیمر، مجتمع فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، صندوق پستی: ۴۶۶-۱۹۵۸۵

۳- گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، صندوق پستی: ۳۷۴-۳۷۵۱۵

چکیده

رزین های اپوکسی یکی از مهمترین پلیمرهای حرارتی است که به دلیل خواص فیزیکی، مکانیکی و مقاومت شیمیایی خوب در صنایع پوشش ها، ساختمان، مواد کامپوزیت با کارایی بالا مورد استفاده قرار می گیرد. معادلات سینتیک پخت برای بهینه سازی رزین های اپوکسی و نانو کامپوزیت های اپوکسی استفاده می شود، و همچنین مطالعه سینتیک پخت می تواند کیفیت محصول نهایی را افزایش دهد. تغییرات در دمای انتقال شیشه ای می تواند بر درجه پخت رزین اپوکسی تاثیر گذار باشد. حضور نانو الیاف کربنی در رزین اپوکسی به بهبود و تسریع فرآیند شبکه ای شدن کمک می کند. جذب مولکول های عامل پخت به درون نانو الیاف کربن، غلظت موثر نانو الیاف کربن را کاهش می دهد. اصلاح سطح نانو الیاف کربنی انرژی اکتیواسیون را کاهش می دهد و باعث بهبود در سرعت واکنش پخت می شود. در این پژوهش به اثر اضافه کردن نانو الیاف کربن و نانو الیاف کربن اصلاح شده بر ریخت شناسی و خواص مکانیکی و رئولوژیکی، مقدار انرژی فعالسازی، سرعت واکنش پخت، درجه پخت، جریان گرمایی، و مدلسازی سینتیک پخت پرداخته می شود.

۱- مقدمه

صفحات و بدون هسته توخالی می باشند [۳]. نانوالیاف کربنی عمدتاً بر اساس روش های تخلیه قوس الکتریکی و سایش لیزری تولید می شوند. از جمله کاربردهای نانوالیاف کربنی شامل منابع نشر الکترونی زمینه، مواد کامپوزیت، نوک های میکروسکوپ پروبی روبشی، مواد حامل برای کاتالیست های مختلف در پتروشیمی، به عنوان مواد الکترود و رفع نشت نفت می باشد [۴]. تاکنون مطالعات بسیاری بر روی سینتیک پخت رزین اپوکسی و نانو ذرات انجام شده است و در مطالعات انجام شده بوسیله آزمون های رئومتر و گرماسنجی روبشی تفاضلی، مقدار درجه پخت، سرعت واکنش پخت و پارامترهای n و m بوسیله معادلات سینتیک پخت بررسی و تعیین می شوند [۵]. رزین اپوکسی دارای مقاومت حرارتی و شیمیایی بیش تر

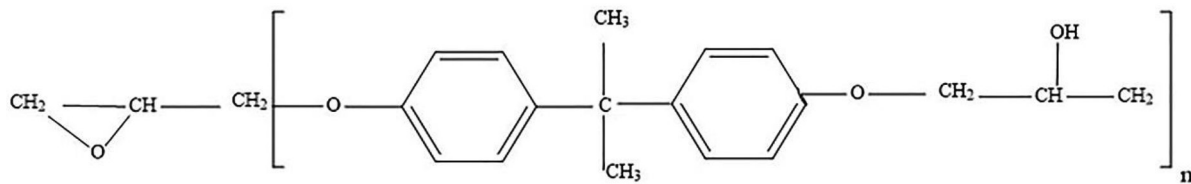
رزین اپوکسی یکی از مهمترین پلیمرهای حرارتی است که به دلیل خواص فیزیکی، مکانیکی و مقاومت شیمیایی خوب در صنایع چسب، پوشش ها، ساختمان و مواد کامپوزیت با کارایی بالا مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. نانو الیاف کربن رشد یافته از بخار از جمله الیاف کربنی کوتاه می باشد که دارای خواص حرارتی، الکتریکی، محافظ فرکانس و مکانیکی می باشد.

خواص منحصر به فرد الیاف های کربن باعث گسترش فناوری در زمینه های مختلف مخصوصاً تولید مواد کامپوزیت منحصر به فرد در دهه های اخیر شده است [۲]. ساختار الیاف کربنی، نانو ساختارهای استوانه ای با لایه های گرافن هستند که به صورت های مخروط انباشته، فنجان،

کلمات کلیدی

نانو الیاف کربن، رزین اپوکسی، سینتیک پخت، مدلسازی.

* مسئول مکاتبات، پیام نگار: mohammad.kalaei@gmail.com

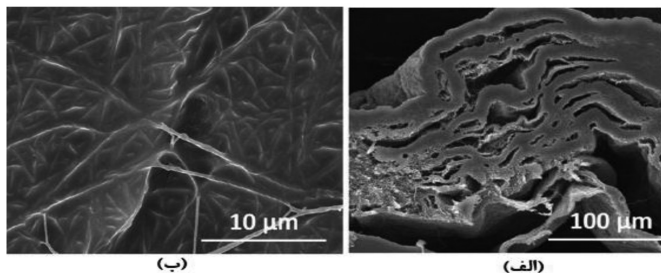


شکل ۱- ساختار رزین اپوکسی [۸].

رزین اپوکسی به خوبی در بین ساختارهای نانوالیاف کربن توزیع شود و همچنین به دلیل عدم وجود فشار بر روی کامپوزیت در طی فرآیند پخت، شکاف بین لایه های نانوالیاف کربن ایجاد می شود [۹].

۳. اثر نانو الیاف کربن بر خواص مکانیکی و رئولوژیکی رزین اپوکسی:

برای ارزیابی سینتیک پخت نانو کامپوزیت های اپوکسی در ابتدا باید به بررسی خواص مکانیکی پرداخته شود و دانستن این مطلب ضروری می باشد زیرا در صورتی که نانو کامپوزیت دچار افت خواص شود، بر روی سیستم پخت تاثیر گذار خواهد بود و پخت نانو کامپوزیت ناقص خواهد شد. در شکل ۳ (الف) اثر درصد های متفاوت نانو الیاف کربن بر استحکام کششی رزین اپوکسی نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مقدار ۰/۲۵ درصد وزنی از نانو الیاف کربنی می تواند بیشترین استحکام کششی را داشته باشد، که به دلیل پراکنش مناسب نانو الیاف کربن در ماتریس اپوکسی می باشد. در شکل ۳ (ب) اثر درصد های وزنی متفاوت نانو الیاف کربن بر مدول کششی رزین اپوکسی بررسی شده است، نتایج نشان داد که با افزودن نانو الیاف کربنی به ماتریس رزین اپوکسی، مدول کششی افزایش یافته و بیشترین افزایش مدول کششی برای مقدار ۱ درصد وزنی بود [۱۰]. برای پخش نانو الیاف کربنی در رزین اپوکسی از دستگاه همزن مافوق صوت استفاده شد. برای انتخاب درصد وزنی مناسب نانو الیاف کربنی در ابتدا باید تغییرات درصد وزنی با زمان همزن مافوق صوت بررسی شود. مشخص شد مقدار درصد وزنی مناسب مقدار ۰/۲۵ درصد وزنی می باشد. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است گرانیروی به تدریج افزایش یافته و بعد از رسیدن به یک مقدار ثابت، کاهش می یابد. برای بررسی تغییرات گرانیروی نانو کامپوزیت های تقویت شده با نانو الیاف کربنی، زمان همزن و انرژی مصرف شده دستگاه مافوق صوت، به عنوان دو عامل مهم معرفی می شوند [۱۰].



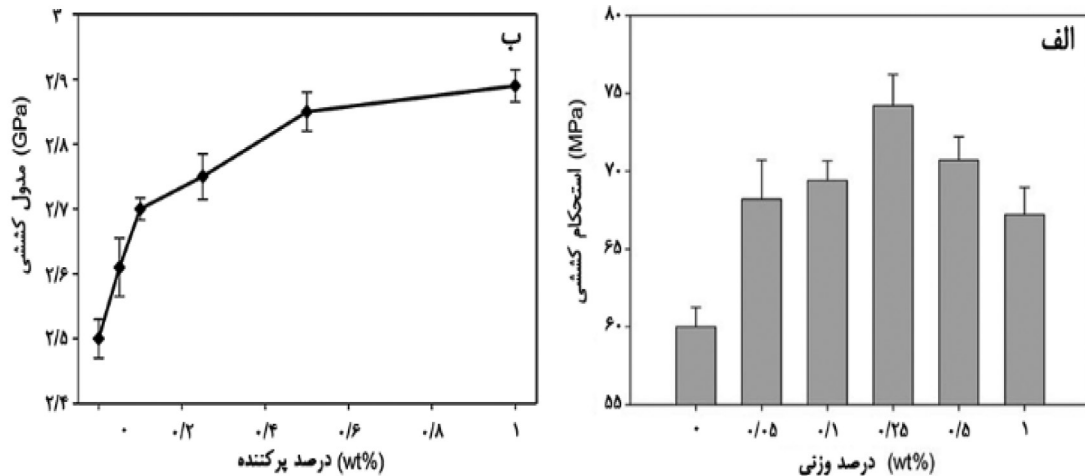
شکل ۲. تصاویر آزمون SEM نمونه نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربن [۹].

در برابر حملات شیمیایی نسبت به گرمانرمها می باشد ولی با وجود تمام این ویژگی ها، دارای معایبی نیز می باشد. عیب اصلی رزین های اپوکسی، ترد بودن آنها می باشد. به عنوان مثال در دمای محیط شکننده و دارای چقرمگی شکست پایینی می باشند و این معایب می تواند بسیاری از کاربردهای رزین های اپوکسی را محدود کند [۶]. برای غلبه بر این این معایب باید از نانو ذرات پلیمری و یا نانو الیاف کربنی استفاده کرد [۹-۱۷]. معادلات سینتیک پخت برای ارزیابی و بهینه سازی فرآیند تولید استفاده می شود. واکنش های پیچیده زیادی در زمان فرآیند پخت رزین اپوکسی وجود دارد، بنابراین برای تعیین خواص نهایی رزین های پلیمری، مطالعه سینتیک پخت می تواند کیفیت محصول نهایی را افزایش دهد [۱۰]. مدلسازی سینتیک پخت به دو روش مدل دار و بدون مدل تقسیم بندی می شود. در روش مدل دار، مدل های متفاوتی بر داده های حاصل از آنالیز حرارتی برازش می شوند. مدلی که بالاترین مجموع مربعات خطا (R^2) را داشته باشد به عنوان بهترین مدل انتخاب می شود، در این روش انرژی اکتیواسیون و درجه واکنش به دست می آید ولی در روش بدون مدل، فقط انرژی اکتیواسیون از شیب نمودار به دست می آید [۱۴-۱۱]. بررسی سینتیک پخت آمیزه رزین اپوکسی / پلی استر در حضور نانو ذرات کربنات کلسیم نشان داد که افزودن ۵ درصد وزنی نانو ذرات کربنات کلسیم به این آمیزه، باعث کاهش انرژی فعالسازی می شود. در این پژوهش به اثر اضافه کردن نانو الیاف کربن و نانو الیاف کربن اصلاح شده بر ریخت شناسی و خواص مکانیکی و رئولوژیکی، مقدار انرژی فعالسازی، سرعت واکنش پخت، درجه پخت، جریان گرمایی، و مدلسازی سینتیک پخت پرداخته شده است.

۲. ساختار رزین اپوکسی و ریخت شناسی نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربن:

رزین اپوکسی از واکنش اپی کلرو هیدرین و بیس فنول A، می باشد و خواص 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. پخت رزین اپوکسی با توجه به سینتیک شیمیایی و تغییرات خواص فیزیکی در حین فرآیند پیچیده می باشد [۸].

در شکل ۲ تصاویر آزمون SEM نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربنی که دارای دو نوع ساختار می باشد مشاهده می شود. شکل ۲ (الف) ساختار به صورت مقطع عرضی و شکل ۲ (ب) ساختار سطح نمونه را نشان می دهد. نتایج آزمون SEM نشان داد که برای اثر گذاری بهتر نانو الیاف کربن بر سیستم پخت رزین اپوکسی، این نوع رزین باید به صورت پیش آغشته در بین نانو الیاف کربن قرار گرفته باشد که باعث می شود



شکل ۳. اثر نانو الیاف کربنی بر (الف) استحکام کششی (ب) مدول کششی رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی [۱۰].

۴. بررسی درجه پخت (روش‌های گرماسنج پویایی دیفرانسیلی و رئومتر) و مدل‌های سینتیک پخت نانو کامپوزیت‌های اپوکسی: α در روش رئومتري براساس مدول ذخیره و در روش گرماسنج پویایی دیفرانسیلی براساس گرمای واکنش محاسبه می‌شود. در روش رئومتري $G'(t)$ در هر زمان، $G'(0)$ مدول ذخیره زمان اولیه شروع واکنش و $G'(\infty)$ مدول ذخیره در زمان بینهایت می‌باشد. در روش گرماسنج پویایی دیفرانسیلی، H گرمای واکنش در هر لحظه و H_T گرمای کلی واکنش پخت می‌باشد [۱۵].

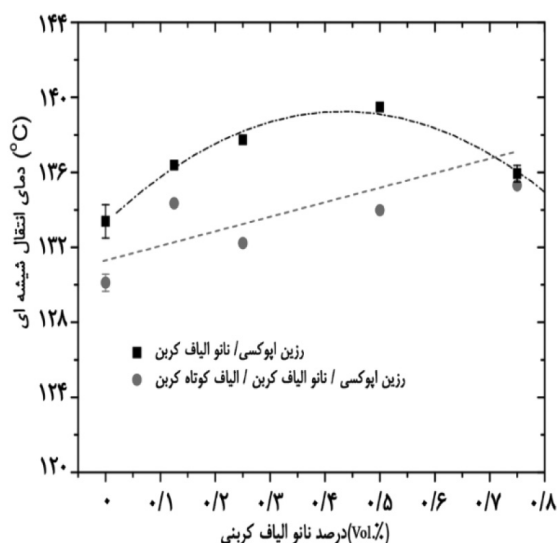
$$\alpha = \frac{G'(t) - G'(0)}{G'(\infty) - G'(0)} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{H}{H_T} \quad (2)$$

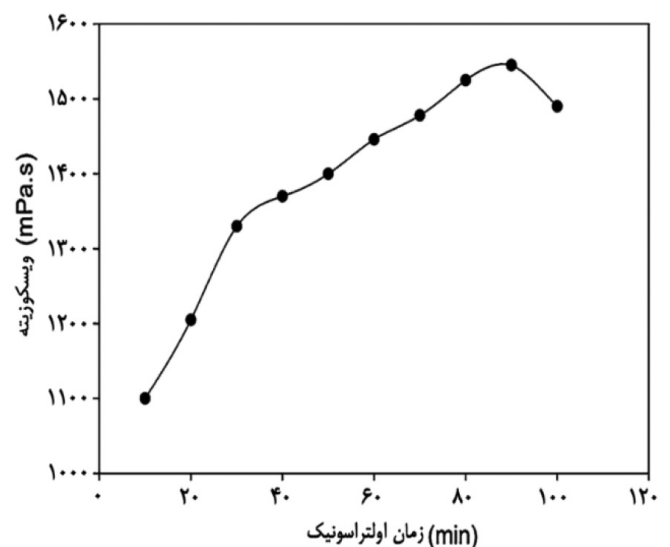
مدل‌های تجربی بسیاری برای توصیف مدل‌سازی سینتیک پخت رزین‌های

زانگ و همکاران [۱۱]، دمای انتقال شیشه‌ای نمونه نانو الیاف کربن / رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربن و الیاف کوتاه کربن را بررسی کردند. نتایج نشان داد (شکل ۵)، عدم حضور الیاف کوتاه کربنی، باعث افزایش دمای انتقال شیشه‌ای می‌شود. تغییرات در دمای انتقال شیشه‌ای می‌تواند بر درجه پخت رزین اپوکسی تاثیر گذار باشد و حضور نانو الیاف کربنی در رزین اپوکسی به بهبود و تسریع فرآیند شبکه‌ای شدن کمک می‌کند.

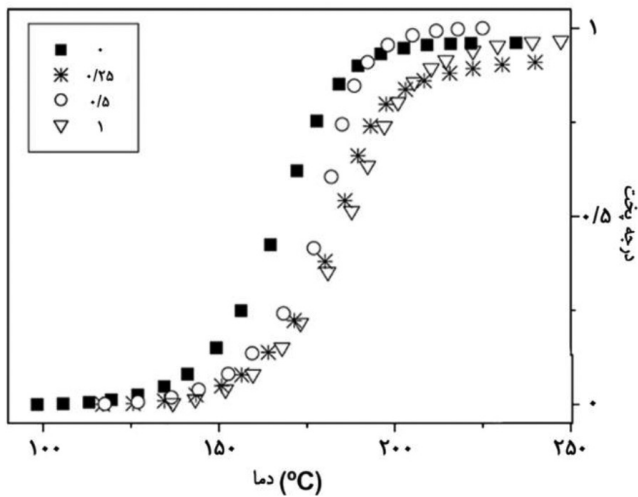
هابرت و همکاران [۱۲] ضریب رسانایی گرمایی نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربن اصلاح شده با گروه سیلانی و نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربنی اکسید شده را بررسی کردند، نتایج نشان داد (شکل ۶) نمونه اصلاح شده با گروه سیلانی ضریب رسانایی گرمایی بیشتری نسبت به نمونه دیگری دارد که به علت گروه عاملی سیلانی است که مقاومت گرمایی فصل مشترک را افزایش می‌دهد.



شکل ۵. دمای انتقال شیشه‌ای نمونه نانو الیاف کربن / رزین اپوکسی (نمونه سیاه) و نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربن و الیاف کوتاه کربن (نمونه قرمز) [۱۱].



شکل ۴. اثر ۰/۲۵ درصد وزنی نانو الیاف کربنی بر گراندروی رزین اپوکسی و تغییرات زمان پراکنش بوسیله دستگاه ما فوق صوت [۱۰].



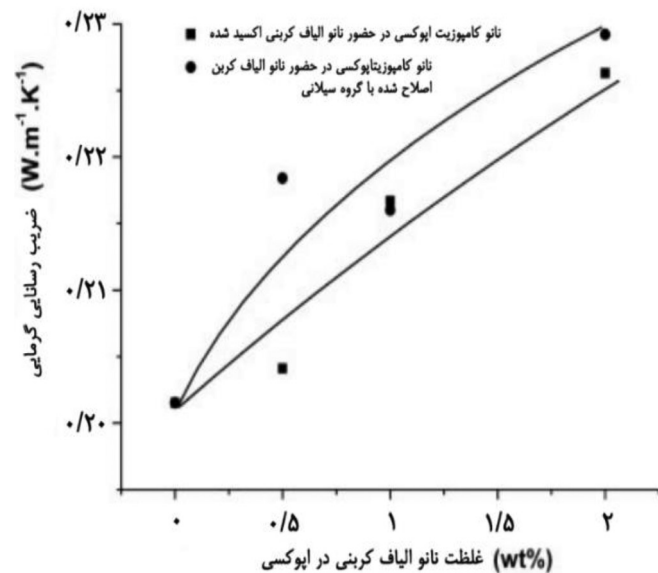
شکل ۷. اثر ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی نانو الیاف کربن بر درجه پخت رزین اپوکسی و سخت کننده متیلن دی آنیلین [۱۸].

درجه پخت رزین اپوکسی و سخت کننده دی آمینو دی فنیل سولفون و نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۱ و ۵ درصد وزنی نانو الیاف کربن پرداختند. نتایج نشان داد که با افزودن نانو الیاف کربن و بدون حضور نانو الیاف کربنی هر سه نمونه، رفتار درجه پخت مشابه یکدیگر دارند. پرولونگو و همکاران [۱۸]، به بررسی اثر ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی نانو الیاف کربن بر درجه پخت رزین اپوکسی و سخت کننده متیلن دی آنیلین پرداختند. نتایج در شکل ۷ نشان داد با افزودن درصد های متفاوت نانو الیاف کربنی، درجه پخت رزین اپوکسی به دماهای بالاتر انتقال پیدا می کند این امر به دلیل جذب احتمالی مولکول های عامل پخت به درون نانو الیاف کربن می باشد، که غلظت موثر نانو الیاف کربن را کاهش می دهد.

سیدیکوی و همکاران [۱۹] به مطالعه درجه پخت رزین اپوکسی/ نانو الیاف کربن و هیبرید نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربن و نانو لوله های کربنی پرداختند. نتایج نشان داد افزودن نانو لوله های کربنی درجه پخت را کاهش می دهد که به علت کاهش تحرک ملکولی و درجه شبکه ای شدن می باشد.

تانگلو و همکاران [۲۰] به بررسی اثر نانو الیاف کربن و نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه سیلانی و گروه اسیدی بر درجه پخت رزین اپوکسی پرداختند. نتایج نشان داد که بوسیله اصلاح سطح نانو الیاف کربن تا حدودی درجه پخت رزین اپوکسی را نسبت به نمونه رزین اپوکسی خالص افزایش می دهد.

ژانگ و همکاران [۲۱] به بررسی درجه پخت نمونه رزین اپوکسی خالص و نمونه نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربن اصلاح شده با گروه اکسی دی آنیلین پرداختند. نتایج نشان داد که اصلاح سطح نانو لوله های کربنی باعث می شود درجه پخت در ابتدای واکنش در مقایسه با نمونه اپوکسی خالص به دماهای کمتر انتقال پیدا کند و این بدان معناست که انرژی گرمایی بیشتری برای شروع واکنش نانو کامپوزیت اپوکسی لازم می باشد.



شکل ۶. نمودار ضریب رسانایی گرمایی نمونه نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربن اصلاح شده با گروه سیلانی و نمونه نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربنی اکسید شده [۱۲].

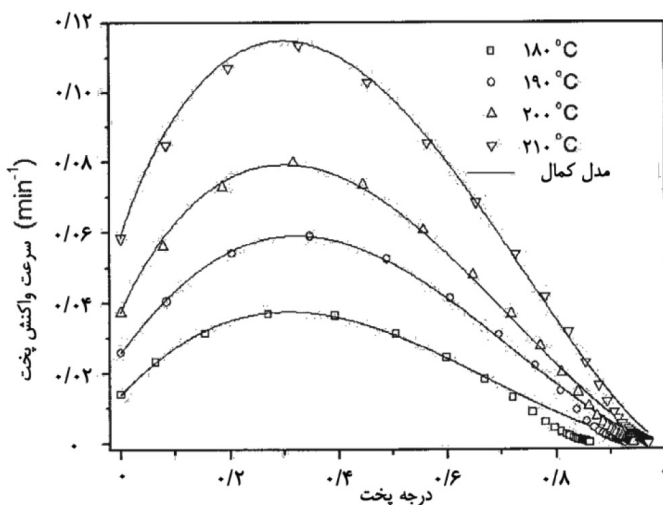
گرماسخت بررسی شده اند که مهمترین آنها در جدول ۱، نشان داده شده است. در این معادلات α درجه پخت، K_1 و K_2 ثابت های سرعت واکنش و پارامترهای n و m نماهای واکنش پخت هستند. همچنین T_p دمای بیشینه پخت و R ثابت جهانی گازها می باشند [۱۶].

۵. اثر نانو الیاف کربن بر درجه پخت رزین اپوکسی :

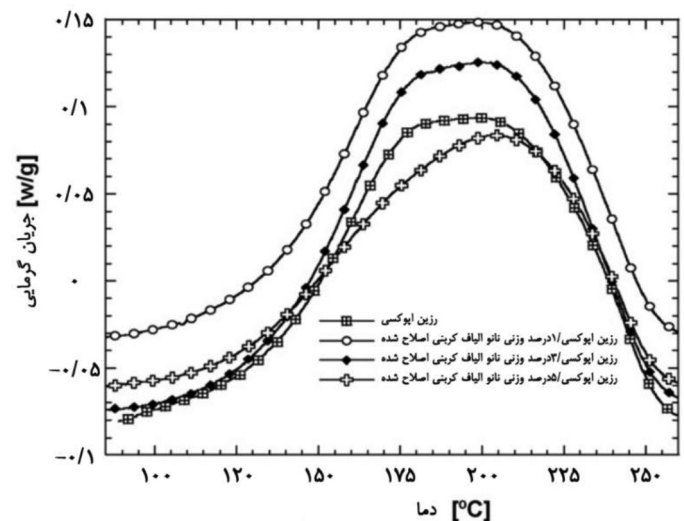
اوساواساتین و همکاران [۱۶]، به بررسی درجه پخت رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۲/۸۶ درصد وزنی نانو الیاف کربن در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد پرداختند. نتایج نشان داد، رفتار درجه پخت هر دو سیستم مشابه با یکدیگر بوده و افزودن نانو الیاف کربنی، درجه پخت رزین اپوکسی را تغییر نمی دهد. ژئی و همکاران [۱۷] به مقایسه

جدول ۱. مدل های سینتیک پخت [۱۵].

معادله	نام مدل
$\frac{d\alpha}{dt} = K_1(1-\alpha)^2 + K_2\alpha(1-\alpha)^2$ (۳)	سیمون - گیلهام
$\ln \frac{B}{T_p^2} = C' + \left(\frac{-E\alpha}{RT_p}\right)$ (۴)	کیسینجر
$\ln B = C'' + \left(\frac{-E\alpha}{RT}\right)$ (۵)	اوزاوا
$\frac{d\alpha}{dt} = k \cdot (1-\alpha)^n$ (۶)	مرتبه n ام
$\frac{d\alpha}{dt} = k\alpha^m \cdot (1-\alpha)^n$ (۷)	سیستاک برگرن
$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha^m) \cdot (1-\alpha)^n$ (۸)	کمال
$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha) \cdot (1-\alpha)^n$ (۹)	هوری



شکل ۹. نمودار سرعت واکنش پخت نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۱ درصد وزنی نانو الیاف کربن در دمای ۱۸۰، ۱۹۰، ۲۰۰ و ۲۱۰ درجه سانتیگراد [۱۷].



شکل ۸. نمودار جریان گرمایی رزین اپوکسی و نمونه نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۱ و ۵ درصد وزنی نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه سیلانی [۲۰].

کای و همکاران (Cai) [۲۲] به مقایسه جریان گرمایی رزین اپوکسی و نمونه نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه پلی آنیلین پرداختند، نتایج نشان داد که اصلاح سطح نانو الیاف کربنی اثر شتاب دهنده دارد و باعث افزایش جریان گرمایی رزین اپوکسی و آنتالپی کل واکنش می شود.

مووا و همکاران [۲۳] به بررسی اثر اصلاح سطح نانو الیاف کربنی با گروه اسیدی و آمینی بر جریان گرمایی رزین اپوکسی پرداختند. نتایج نشان داد که در هر دو روش اصلاح سطح، جریان گرمایی تغییری نمی کند و رفتار مشابه یکدیگر دارند. همچنین اپوکسی خالص، جریان گرمایی بیشتری را نسبت به دیگر نمونه ها دارد.

۷. اثر نانو الیاف کربن بر سرعت واکنش پخت رزین اپوکسی:

در شکل ۹، مطالعه سرعت واکنش نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۱ درصد وزنی نانو الیاف کربن در دمای ۱۸۰، ۱۹۰، ۲۰۰ و ۲۱۰ °C نشان داده شده است. نتایج نشان داد با افزایش دما سرعت واکنش پخت افزایش می یابد و داده های آزمایشگاهی در ابتدای واکنش با مدل کمال توافق خوبی دارد و در انتهای واکنش مقداری اختلاف بین داده های آزمایشگاهی و مدل ارایه شده وجود دارد که به علت پدیده نفوذ می باشد. همچنین افزودن ۵ درصد وزنی نانو الیاف کربن به ماتریس رزین اپوکسی رفتار سرعت واکنش پخت مشابه رزین اپوکسی را دارد [۱۷].

تانگلو و همکاران [۲۰] به بررسی سرعت واکنش نمونه نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۱ درصد وزنی نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه سیلانی و گروه اسیدی در دمای ۱۸۰، ۱۹۰، ۲۰۰ و ۲۱۰ درجه سانتیگراد پرداختند. نتایج نشان داد که داده های آزمایشگاهی با مدل کمال توافق خوبی دارد. اثر نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه اکسی دی آنیلین بر سرعت واکنش پخت رزین اپوکسی و مقایسه با رزین اپوکسی خالص نشان داد که افزودن این نوع نانو الیاف به ماتریس رزین اپوکسی باعث افزایش سرعت واکنش پخت نسبت به رزین اپوکسی خالص شده و واکنش پخت

۶. اثر نانو الیاف کربن بر جریان گرمایی رزین اپوکسی:

پرو لونگو و همکاران [۱۸] به بررسی اثر ۰/۵، ۱ و ۳ درصد وزنی نانو الیاف کربن بر جریان گرمایی رزین اپوکسی و سخت کننده متیلن دی آنیلین پرداختند، نتایج نشان داد با افزودن درصد های متفاوت نانو الیاف کربنی به ماتریس رزین اپوکسی، جریان گرمایی افزایش می یابد و منحنی دارای یک پیک گرمازا می باشد. همچنین محدوده بیشینه دمایی بین ۱۶۵ تا ۱۸۵ درجه سانتیگراد می باشد. سیدی کوی و همکاران [۱۹] به مطالعه جریان گرمایی نمونه رزین اپوکسی/نانو لوله های کربنی پرداختند. نتایج نشان داد با افزودن نانو الیاف کربنی و طراحی هیبرید نانو کامپوزیت اپوکسی، دمای اولیه پخت و دمای بیشینه پخت، تغییر چشمگیری نمی کند [۱۹]. تانگلو و همکاران [۲۰] به بررسی جریان گرمایی نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۱ و ۵ درصد وزنی نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه سیلانی و نمونه رزین اپوکسی خالص پرداختند. نتایج در شکل ۸ نشان داد که با افزودن مقدار ۱ و ۳ درصد وزنی نانو الیاف کربن به ماتریس رزین اپوکسی، آنتالپی واکنش و جریان گرمایی رزین اپوکسی افزایش یافته و نانو کامپوزیت اپوکسی دارای ۵ درصد وزنی نانو الیاف کربنی، رفتار جریان گرمایی مشابه اپوکسی خالص را دارد و همچنین بیشینه دمای پخت هر دو نمونه با افزودن نانو الیاف کربنی تغییری نخواهد کرد.

ژانگ و همکاران [۲۱] به جریان گرمایی اپوکسی خالص و نمونه اپوکسی/نانو الیاف کربنی گرافیتی، در سرعت های گرمادهی ۲، ۵، ۸ و ۱۰ °C/min پرداختند (شرایط غیر همدمای)، نتایج نشان داد که با افزایش سرعت گرمادهی، جریان گرمایی نانو کامپوزیت اپوکسی افزایش می یابد. با افزایش سرعت گرمادهی و زمان واکنش کاهش یافته و واکنش سریعتر انجام می شود. نانو الیاف کربنی باعث کاهش جریان گرمایی در ابتدای واکنش شده و این بدان معنا است که برای شروع واکنش پخت نمونه نانو کامپوزیت اپوکسی در مقایسه با نمونه رزین اپوکسی خالص، دمای بیشتری لازم می باشد.

جدول ۲. انرژی اکتیواسیون نمونه رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربنی [۱۷].

نام نمونه	انرژی اکتیواسیون (kJ/mol)
رزین اپوکسی و سخت کننده دی آمینو دی فنیل سولفون	۸۹
نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۱ درصد وزنی نانو الیاف کربن	۸۵/۴
نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۵ درصد وزنی نانو الیاف کربن	۸۳/۹

اپوکسی و سخت کننده متیلن دی آنیلین بررسی شد، نتایج نشان داد با افزودن درصد های متفاوت نانو الیاف کربنی به ماتریس اپوکسی، انرژی اکتیواسیون افزایش یافته و نانو الیاف کربنی به عنوان یک عامل تاخیری باعث کاهش سرعت واکنش پخت با رزین اپوکسی شده است [۳۱-۳۵]. در پژوهشی دیگر انرژی اکتیواسیون نمونه نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۱ درصد وزنی نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه سیلانی و گروه اسیدی بررسی شد، نتایج نشان داد که هر دو نوع نانو الیاف کربنی اصلاح شده، انرژی اکتیواسیون را کاهش می دهند. همچنین نمونه اصلاح شده با گروه سیلانی نقش شتاب دهنده در ابتدای واکنش پخت با رزین اپوکسی را دارد. انرژی اکتیواسیون نمونه رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت های اپوکسی اصلاح شده با گروه سیلانی و گروه اسیدی به ترتیب برابر با $۵۴/۷۹$ ، $۵۱/۳۴$ و $۴۵/۴۲$ می باشد [۲۷، ۴۲] مطالعه انرژی اکتیواسیون نمونه نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه اسی دی آنیلین و اپوکسی خالص نشان داد که با افزودن این نوع نانو الیاف به رزین اپوکسی باعث افزایش انرژی اکتیواسیون رزین اپوکسی خالص می شود.

همچنین در ابتدای واکنش پخت، نانو الیاف کربنی باعث افزایش انرژی اکتیواسیون می شود و نقش تاخیری در واکنش پخت با رزین اپوکسی دارد و مقدار درجه پخت $۰/۶$ ، انرژی اکتیواسیون کاهش می یابد که می تواند نقش شتاب دهنده در واکنش پخت با رزین اپوکسی را داشته باشد [۴۳-۴۷] مطالعه انرژی اکتیواسیون رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه پلی آنیلین بررسی شد، نتایج نشان داد که اصلاح سطح نانو الیاف کربنی به عنوان یک عامل شتاب دهنده در واکنش پخت عمل می کند و باعث کاهش انرژی اکتیواسیون و افزایش سرعت واکنش پخت با رزین اپوکسی می شود [۴۸-۵۳]. بررسی انرژی اکتیواسیون پخت نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه اسیدی و آمینی در مقایسه با اپوکسی خالص نشان داد که هر دو نمونه نانو الیاف کربنی اصلاح شده باعث کاهش انرژی اکتیواسیون رزین اپوکسی می شوند [۵۴-۵۸].

۹. مدل سازی سینتیک پخت نانو کامپوزیت های اپوکسی در حضور نانو الیاف کربنی:

جدول ۳ به بررسی مدل های ارائه شده در سینتیک پخت نانو کامپوزیت های اپوکسی پرداخته شده است. نتایج نشان داد برای بررسی

سریعتر انجام می شود و بیشینه درجه پخت نانو کامپوزیت اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص افزایش می یابد، بنابراین افزودن نانو الیاف کربنی اصلاح شده، باعث کاهش زمان پخت و ذخیره انرژی می شود [۲۱]. مقایسه سرعت واکنش پخت رزین اپوکسی و نمونه نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه پلی آنیلین بررسی شد، نتایج نشان داد که اصلاح سطح نانو الیاف کربنی به عنوان یک شتاب دهنده در واکنش پخت عمل می کند و باعث افزایش سرعت واکنش پخت می شود [۲۴-۲۷]. بررسی سرعت واکنش پخت نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه اسیدی و آمینی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص نشان داد که با افزایش دما از ۴۵ به ۷۵ درجه سانتیگراد، داده های آزمایشگاهی توافق خوبی با مدل کمال دارند. همچنین بررسی سرعت واکنش هر سه نمونه در سرعت گرمادهی $۱۰^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ، نشان داد که داده های آزمایشگاهی در اواسط واکنش، مقداری انحراف با مدل کمال دارد [۲۸-۳۰].

۸. اثر نانو الیاف کربن بر انرژی اکتیواسیون رزین اپوکسی:

اوساواتین و همکاران [۱۶] به بررسی انرژی اکتیواسیون رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور $۲/۸۶$ درصد وزنی نانو الیاف کربن پرداختند. نتایج نشان داد که با افزودن نانو الیاف کربنی به رزین اپوکسی خالص، انرژی اکتیواسیون نانو کامپوزیت اپوکسی در مقایسه با اپوکسی خالص، کاهش می یابد. مقایسه انرژی اکتیواسیون اپوکسی خالص و سخت کننده دی آمینو دی فنیل سولفون و نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۱ و ۵ درصد وزنی نانو الیاف کربن در جدول ۲ نشان داده شده است، همان طور که ملاحظه می شود با افزودن نانو الیاف کربن، انرژی اکتیواسیون هر دو نمونه نانو کامپوزیت اپوکسی، کاهش می یابد [۱۷]. اثر $۰/۲۵$ ، $۰/۵$ و ۱ درصد وزنی نانو الیاف کربن بر انرژی اکتیواسیون رزین

جدول ۳. اثر نانو الیاف کربنی و نانو الیاف کربنی اصلاح شده بر مدل سازی سینتیک پخت رزین اپوکسی

ردیف	اجزا سازنده نانو کامپوزیت اپوکسی	مدل ارائه شده	مرجع
۱	$۲/۸۶$ درصد وزنی نانو الیاف کربن	کمال	[۵۹]
۲	۵۱ درصد وزنی نانو الیاف کربن	کمال با نفوذ	[۶۰]
۳	$۰/۲۵$ ، $۰/۵$ و ۱ درصد وزنی نانو الیاف کربن	کمال	[۶۱]
۴	۱ درصد وزنی نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه سیلانی و گروه اسیدی	کمال	[۶۲]
۵	$۰/۳$ درصد وزنی نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه اسی دی آنیلین	اوزاوا	[۶۳]
۶	۱ درصد وزنی نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه پلی آنیلین	کمال	[۶۴]
۷	۲۵ درصد وزنی نانو الیاف کربنی اصلاح شده با گروه اسیدی و آمینی	کمال	[۶۵]

دی آمینو دی فنیل سولفون (DDS) و رزین اپوکسی خالص، رفتار درجه پخت مشابه یکدیگر دارند. بررسی جریان گرمایی نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۱ و ۳ و ۵ درصد وزنی نانو الیاف کربنی اصلاح شده در مقایسه با نمونه نانو کامپوزیت اصلاح نشده نشان داد که حضور گروه سیلانی باعث افزایش آنتالپی کل واکنش و جریان گرمایی شده و نمونه نانو کامپوزیت رفتار مشابه با رزین اپوکسی خالص دارد. اصلاح سطح نانو الیاف کربنی با گروه اکسی دی آنیلین سرعت واکنش پخت رزین اپوکسی را افزایش می دهد و اصلاح سطح نانو الیاف کربنی منجر به کاهش زمان پخت و ذخیره انرژی می شود. همچنین اصلاح سطح نانو الیاف کربنی با گروه سیلانی و گروه اسیدی، باعث کاهش انرژی اکتیواسیون رزین اپوکسی شده و گروه سیلانی نقش شتاب دهنده در ابتدای واکنش پخت با رزین اپوکسی دارد. بررسی مدلسازی سینتیک پخت نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور نانو الیاف کربنی نشان می دهد که مدل کمال بهترین مدل برای توصیف واکنش پخت می باشد. برای مدلسازی سینتیک پخت نانو کامپوزیت های اپوکسی در حضور ۱ و ۵ درصد وزنی نانو الیاف کربنی از مدل کمال با نفوذ استفاده شده است و این نمونه در آخر واکنش تحت کنترل نفوذ می باشد.

سینتیک پخت نانو کامپوزیت های اپوکسی در حضور نانو الیاف کربنی، مدل های متفاوتی ارائه شده است که با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۳ مشخص است که مدل کمال بهترین مدل برای توصیف واکنش پخت و مدلسازی سینتیک پخت نانو کامپوزیت های اپوکسی در حضور نانو الیاف کربنی می باشد. همچنین می توان به این نکته توجه داشت که، مدل کمال ماهیت اتوکاتالیک فرآیند را نشان می دهد. بررسی مدلسازی سینتیک پخت نمونه نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۱ و ۵ درصد وزنی نانو الیاف کربنی نشان داد، برای مدلسازی از مدل کمال با نفوذ استفاده شد و این نمونه در آخر واکنش تحت کنترل نفوذ می باشد [۶۶-۶۸].

۱۰. نتیجه گیری:

نتایج بررسی سینتیک پخت نانو کامپوزیت های اپوکسی در حضور نانو الیاف کربنی نشان داد که درجه پخت نمونه های نانو کامپوزیت اپوکسی در حضور ۱ و ۵ درصد وزنی نانو الیاف کربن، رزین اپوکسی و سخت کننده

مراجع:

1. Ahmadi Z., Epoxy in nanotechnology: A short review, Progress in Organic Coatings, 132, 445-448, 2019.
2. Jin.F.L, Li.X, and Park.S.J, Synthesis and application of epoxy resins: A review, J Ind Eng Chem, 29, Pages 1-11, 2015.
3. De Schoenmaker, B., van der Heijden, S., Moorkens, S., Rahier, H., van Assche, G. & De Clerck, K. Effect of nanofibres on the curing characteristics of an epoxy matrix. Compos. Sci. Technol. 79, 35-41 (2013).
4. Shokrieh, M. M., Esmkhani, M., Vahedi, F. & Shahverdi, H. R. Improvement of mechanical and electrical properties of epoxy resin with carbon nanofibers. Iran. Polym. J. 22, 721-727 (2013).
5. Zhang, G., Karger-Kocsis, J. & Zou, J. Synergetic effect of carbon nanofibers and short carbon fibers on the mechanical and fracture properties of epoxy resin. Carbon N. Y. 48, 4289-4300 (2010).
6. Nie, Y. & Hübert, T. Effect of carbon nanofiber (CNF) silanization on the properties of CNF/epoxy nanocomposites. Polym. Int. 60, 1574-1580 (2011).
7. Montserrat S., Málek J., A kinetic analysis of the curing reaction of an epoxy resin, Thermochimica Acta, 228, 47-60, 1993.
8. Málek J., A computer program for kinetic analysis of
9. Ahmadi Z., Epoxy in nanotechnology: A short review, Progress in Organic Coatings, 132, 445-448, 2019.
10. Ray SS., Okamoto M., Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing, Progress in Organic Coatings, 28, 1539-1641, 2003.
11. Al-Saleh, M. H. & Sundararaj, U. Review of the mechanical properties of carbon nanofiber/polymer composites. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 42, 2126-2142, 2011.
12. Iwahori, Y., Ishiwata, S., Sumizawa, T. & Ishikawa, T. Mechanical properties improvements in two-phase and three-phase composites using carbon nano-fiber dispersed resin. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 36, 1430-1439 (2005)
13. Rosso P., Lin Ye., Epoxy/Silica Nanocomposites Nanoparticle-Induced Cure Kinetics and Microstructure, Macromolecular Rapid Communications, 28, 121-126, 2007.
14. Kalae M.R., Famili M.H.N, Mahdavi H., Cure Kinetic of Poly (alkyltetrasulfide) Using a Rheological, Polymer-Plastics Technology and Engineering, 48, 627-632, 2009
15. Jouyandeh M., Rahmati N., Movahedifard E., Hadavand B.S., Karami Z., Ghaffari M., Taheri P., Bakhshandeh E., Vahabi H., Ganjali M.R., Formela K., Saeb M. R., Properties of nano-Fe3O4 incorporated epoxy coatings from Cure Index perspective, Progress in Organic Coatings, 133, 220-

- Resin Composites, Mater. Sci. Technol, 29(9), 1130- 1134, 2013.
29. Chen H.O., Jacobs B., Wua W.G., Rudiger B., and Schadel B., Effect of Dispersion Method On Tribological Properties of Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Resin Composites, Polym. Test, 26, 351-360 ,2007.
 30. Ton T., M T., Ngo T. D., Ding P., Fang G., Cole K. C and etal., Epoxy Nanocomposites: Analysis and Kinetics of Cure, Polym. Eng. Sci, 44, 1132-1141 ,2004.
 31. Tezel G.B., Sarmah A., Desai S. A., Vashisth M., and Green J., Kinetics of Carbon Nanotube-loaded Epoxy Curing: Rheometry, Differential Scanning Calorimetry, And Radio Frequency Heating, Carbon ,175, 1-10, 2021.
 32. [32] Ngo T. D., That T., Hoa M.T., and Cole K. C., Curing Kinetics and Mechanical Properties of Epoxy Nanocomposites Based On Different Organoclays, Polym. Eng. Sci,47, 649-661, 2007.
 33. Jin F.L.,Li X., and Park S.J, Synthesis And Application Of Epoxy Resins: A Review, J Ind Eng Chem, 29, 1-11, 2015.
 34. Schlagenhau f. L., Kuo Y.Y., Bahk Y. K., Nüesch F., and Wang J., Decomposition and Particle Release of a Carbon Nanotube/epoxy Nanocomposite at Elevated Temperatures, J. Nanoparticle Res. 17, 440, 2015.
 35. Zhou Y. X., Wu P. X., Cheng Z. Y., Ingram J. and Jeelani, S., Improvement in Electrical, Thermal and Mechanical Properties of Epoxy by Filling Carbon Nanotube., Express Polym. Lett,2, 40-48 ,2008.
 36. Kim J. A., Seong D. G., Kang T. J., and Youn J. R., Effects Of Surface Modification On Rheological And Mechanical Properties Of CNT/Epoxy Composites,Carbon N. Y., 44, 1898-1905 ,2006.
 37. Málek J., A Computer Program for Kinetic Analysis of Non-Isothermal Thermo analytical Data, Thermochim.Acta, 138, 337-346,1989.
 38. Málek J., The Kinetic Analysis of Non-Isothermal Data., Thermochim.Acta, 200, 257-269, 1992.
 39. Reso D., Cascaval C.N., Mustata F., and Ciobanu C., Cure Kinetics, Epoxy Resins Studied by Nonisothermal DSC Data, Thermochim. Acta, 383, 119-127, 2002.
 40. Vyazovkin S., Burnham A.K., Favergeon L., Koga N., Moukhina E., Luis A., Maqueda P., and etal Ictac Kinetics Committee Recommendations for Analysis Of Multi-step Kinetics, Thermochim. Acta, 689,178597, 2020.
 41. MaP. C., Kim J K., and TangB. Z.,Effects Of Silane Func- non-isothermal thermoanalytical data, Thermochimica Acta,138, 337-346,1989
 15. Vyazovkin S., Burnham A.K., Favergeon L., Koga N., Moukhina E., Luis A., Maqueda P., Sbirrazzuoli N., ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of multi-step kinetics, Thermochimica Acta, 689,178597, 2020.
 16. Aussawasathien, D. & Sancaktar, E. Effect of non-woven carbon nanofiber mat presence on cure kinetics of epoxy nanocomposites. Macromol. Symp. 264, 26–33 (2008).
 17. Xie, H., Liu, B., Sun, Q., Yuan, Z., Shen, J. & Cheng, R. Cure kinetic study of carbon nanofibers/epoxy composites by isothermal DSC. J. Appl. Polym. Sci. 96, 329–335 (2005).
 18. Prolongo, S. G., Gude, M. R., Sanchez, J. & Ureña, A. Nanoreinforced Epoxy Adhesives for Aerospace Industry. J. Adhes. 85, 180–199 (2009).
 19. Siddiqui, N. A., Khan, S. U., Ma, P. C., Li, C. Y. & Kim, J.-K. Manufacturing and characterization of carbon fibre/epoxy composite prepregs containing carbon nanotubes. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 42, 1412–1420 (2011).
 20. Cure kinetics of vapor grown carbon nanofiber (VGCNF) modified epoxy resin.pdf.
 21. Fu, Y. & Zhong, W. H. Cure kinetics behavior of a functionalized graphitic nanofiber modified epoxy resin. Thermochim. Acta 516, 58–63 (2011).
 22. Cai, Z. Q., Movva, S., Chiou, N. R., Guerra, D., Hioe, Y., Castro, J. M. & Lee, L. J. Effect of polyaniline surface modification of carbon nanofibers on cure kinetics of epoxy resin. J. Appl. Polym. Sci. 118, 2328–2335 (2010).
 23. Movva, S., Ouyang, X., Castro, J. & Lee, L. J. Carbon nanofiber paper and its effect on cure kinetics of low temperature epoxy resin. J. Appl. Polym. Sci. 125, 2223–2230 (2012).
 24. Málek J., The kinetic analysis of non-isothermal data, Thermochimica Acta, 200, 257- 269,1992
 25. Ahmadi z., Epoxy in Nanotechnology: A Short Review, Prog. Org. Coat, 132, 445-448, 2019.
 26. Zabihi o., Khayyam H., Fox B.L., and Naebe M., Enhanced Thermal Stability and Lifetime Of Epoxy Nanocomposites Using Covalently Functionalized Clay: Experimental And Modelling, New J. Chem, 39, 2269-2278,2015.
 27. Dzuhri S., Uhana N.Y., and Khairulazfar M., Thermal stability and decomposition study of epoxy/clay nanocomposites, Sains Malays ,44, 441- 448 ,2015.
 28. Singh S., Srivastava V.K., and Prakash R.R., Characterisation of Multi-walled Carbon Nanotube Reinforced Epoxy

51. Starink M.J., The Determination of Activation Energy from Linear Heating Rate Experiments: A Comparison Of The Accuracy Of Isoconversion Methods, *Thermochim. Acta.*, 404, 163-176, 2003
52. Karami M.H., Kalae M.R., Mazinani S., Martínez V.G., Wellen R.M.R., Shanmugaraj A.M., and etal., 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.
53. Karami M.H., and Kalae M.R., Curing of Epoxy/UFNBRP Nano Composites Using Calorimetric Method, Proceeding of the 11th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2020), Tehran University, 15-17 April, 15-17, 2020.
54. Karami M.H., Kalae M.R., and Mazinani S., 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.
55. Karami M.H., and Kalae M.R., 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.
56. Karami M.H., and Kalae M.R., 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
57. Karami M.H. and Kalae M.R., A Review of the Applications of Cross-linked Elastomeric Nanoparticles., *Iran Rubber Mag*, 25, 37-56, 2021.
58. Karami M.H., and Kalae M.R., A review of the curing kinetics of epoxy nanocomposites/nano clay, *Iran Polymer Technology, Research and Development*, 6, 29-38, 2021.
59. Karami M.H. and Kalae M.R., Review of degradation kinetics of epoxy nanocomposites in the presence of clay nanoparticles, *Polymerization*, 2021, DOI: 10.22063/BASPARESH.2021.2895.1552.
60. Karami M.H. and Kalae M.R., Review of curing kinetics of epoxy nanocomposites in the presence of iron oxide nanoparticles, *Polymerization*, 2021, Doi:10.22063/BASPARESH.2021.2824.1537.
- tionalization on The Properties Of Carbon Nanotube/epoxy Nanocomposites, *Compos. Sci. Technol*, 67, 2965-2972 ,2007.
42. Špitalský Z., Matějka L., Šlouf M., Konyushenko E. N., Kovářová J., Zemek J., and Kotek, J., Modification of Carbon Nanotubes And Its Effect On Properties Of Carbon Nanotube/epoxy Nanocomposites , *Polym. Compos*, 30, 1378-1387 ,2009.
43. Ventura I. A., Rahaman A., and Lubineau G., The Thermal Properties of a Carbon Nanotube-enriched Epoxy: Thermal Conductivity, Curing, And Degradation Kinetics., *J. Appl. Polym. Sci.*, 130, 2722–2733, 2013.
44. Li C., Kang N. J., Labrandero S. D., Wan J., González C., and Wang D. Y. Synergistic Effect Of Carbon Nanotube and Polyethersulfone on Flame Retardancy of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites., *Ind. Eng. Chem. Res*, 53, 1040-1047 ,2014.
45. Xue Y., Shen M., Zeng S., Zhang W., Hao L., Yang L., and Song, P., " A Novel Strategy For Enhancing The Flame Resistance, Dynamic Mechanical And The Thermal Degradation Properties Of Epoxy Nanocomposites., *Mater. Res. Express*, 6, 125003 , 2019.
46. Puglia D., Valentini L., and Kenny J. M., Analysis of The Cure Reaction of Carbon Nanotubes/epoxy Resin Composites Through Thermal Analysis and Raman Spectroscopy., *J. Appl. Polymer. Sci.*, 88, 452-458 ,2003.
47. Zheng X., Li D., Feng C., and Chen X., Thermal Properties and Non-Isothermal Curing Kinetics Of Carbon Nanotubes/ionic Liquid/epoxy Resin Systems., *Thermochim. Acta*, 618, 18–25 ,2015.
48. Aradhana R., Mohanty S., and Nayak S. K., High Performance Epoxy Nanocomposite Adhesive: Effect of Nanofillers On Adhesive Strength, Curing and Degradation Kinetics., *Int. J. Adhes. Adhes.*, 84, 238-249 ,2018.
49. Cividanés L. S., Simonetti E. A., Campos T. M., Bettoni T. S., Brunelli D. D., and Thim G. P., Anomalous Behavior of Thermal Stability of Amino-carbon Nanotube–epoxy Nanocomposite., *Journal of Composite Materials*, 49(24), 3067–3073, 2015.
50. Wang Y. T., Wang C. S., Yin H. Y., Wang L. L., Xie H. F., and Cheng R. S., Carboxyl-terminated Butadiene-acrylonitrile-toughened Epoxy/carboxyl-modified Carbon Nanotube Nanocomposites: Thermal and Mechanical Properties., *Express Polym. Lett.*, 6, 719-728 ,2012.

- Temperatures of Epoxy Resin, Proceeding of the 17th National Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2021), Ferdowsi University of Mashhad, 9-11 November, 2021.
65. Karami M.H. and Kalae M.R., Study of thermal degradation kinetics of epoxy composite / carbon nanotubes, Polymerization, 2021, DOI: 10.22063/BASPARESH.2021.3017.1591
66. Hoseinpour, A., Production of nanocomposite film based on epoxy resin. Journal of Textile Science and Technology, 9(3), 45-50, 2020.
67. Gholshan T. H., Mirjalili, M., Valipour, P., Investigation of thermal, mechanical and electrical properties of modified carbon nanotubes reinforced epoxy composites. Journal of Textile Science and Technology, 8(1), 5-11, 2019.
68. Dastan, T., Ahmadi, M. Residual flexural strength and modulus after low-velocity impact in hybrid jute - polyester / epoxy composites. Journal of Textile Science and Technology, 5(3), 45-50, 2015.
61. Karami M.H. and Kalae M.R., Investigation of the effect of carbon nanotubes on modeling of curing kinetics of epoxy resin., Journal of science and engineering elites, 6, 162-175, 2021
62. Karami, M. H., Kalae, M.R., Khajavi, R., Moradi, O., and Zaarei, D., Viscosity Modeling of epoxy Nanocomposites / Elastomeric Nanoparticles, Proceeding of the 17th National Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2021), Ferdowsi University of Mashhad, 9-11 November, 2021.
63. Karami, M. H., Kalae, M.R., Khajavi, R., Moradi, O., and Zaarei, D., 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.
64. Karami, M. H., Kalae, M.R., Khajavi, R., Moradi, O., and Zaarei, D., Effect of Vulcanized Elastomeric Nanoparticles on Thermal Stability and The Maximum Decomposition

Journal of
**Apparel and Textile Science
 and Technology**

Vol. 10, No.1,
 Winter 2021, Quarterly
 Issue No. 37, 51-61
 ISSN: 2151-7162

Keywords
 Carbon nanofiber,
 Epoxy Resin,
 Curing Kinetics,
 Modeling.

A review study of the effect of carbon nanofibers on the curing kinetics of epoxy resins

MohammadHossein Karami^{1,2}, Mohammadreza Kalae^{1,2*}, Ramin Khajavi¹, Omid Moradi³, Davood Zaarei^{1,2}

1. Nano Research Center, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran.

2. Department of Polymer Engineering, Faculty Of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, P.O. Box 19585-466, Tehran, Iran.

3. Department of Chemistry, Shahre-Qods Branch, Islamic Azad University, Shahre-Qods, P.O. Box 37515-374, Tehran, Iran.

Abstract

Epoxy resins are one of the most important thermosetting polymers that are used for various applications including coatings, buildings, and high-performance composite materials due to their good physical-mechanical properties and chemical resistance. The kinetics of curing plays an important role in the properties of the final composite. The presence of reinforcing filler such as carbon nanofibers in the matrix can affect the physical-mechanical properties of the composite. The surface modification of nanofibers reduced the activation energy and improved the curing rate. In this research, the effect of adding carbon nanofibers and modified carbon nanofibers on morphology, mechanical, rheological properties, activation energy, reaction rate, degree of curing, heat flow, and curing kinetics modeling has been investigated.

(* Address Correspondence to M. Kalae, E-mail: mohammad.kalae@gmail.com