

Review Article



DOI: 10.22034/ijche.2022.315883.1154



DOR: 20.1001.1.17355400.1401.21.124.5.3



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

Investigation of Curing Kinetics Modeling of Epoxy Nanocomposites in the Presence of Nano Graphene Oxide: A Review Study

M. H. Karami^{1,2}, M. R. Kalaei^{3,4*}

1- Ph. D. in Polymer Engineering, Department of Polymer Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran

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

3- Associate Professor of Department of Polymer and Chemical Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran

4- Associate Professor of Nano Research Center, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran

E-mail: mohammad.kalaei@gmail.com

(mr_kalaei@azad.ac.ir)

Abstract

The process of curing the epoxy resins with hardeners leads to an increase in crosslink density and the properties of the hardened resin are affected, depending on the curing conditions. To improve the final properties of epoxy resins, the use of organic and inorganic nanoparticles has been suggested. One of the recently attended nanoparticles is graphene oxide and its derivatives. In this paper, various models presented in the curing kinetics of epoxy/graphene oxide hybrid compounds have been evaluated and the reasons for the deviation of laboratory and experimental results with modeling results have been explained. Also, comparison of each of these models with experimental results has shown that Sestak-Berggren and Kamal model has higher adaptation to experimental results than the other models and can be used as a reliable basis for describing the curing process of epoxy resins containing graphene oxide nanoparticles.

Received: 19 November 2021

Accepted: 1 February 2022

Page Number: 71-83

Keywords:

NanoGraphene Oxide,
Epoxy Resin,
Curing Kinetics,
Sestak-Berggren Model,
Kamal Model

Please Cite this Article Using:

Karami, M. H., Kalaei, M. R., "Investigation of Curing Kinetics Modeling of Epoxy Nanocomposites in the Presence of Nano Graphene Oxide: A Review Study", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 21, No. 124, pp. 71-83, In Persian, (2023).



DOI: 10.22034/ijche.2022.315883.1154



DOR: 20.1001.1.17355400.1401.21.124.5.3

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

بررسی مدل سازی سینتیک پخت نانوکامپوزیت های اپوکسی در مجاورت نانو گرافن اکساید: مطالعه مروری

محمدحسین کرمی^{۱،۲}، محمدرضا کلایی^{۳،۴}

۱- دکتری مهندسی پلیمر، دانشکده مهندسی شیمی و پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی،

واحد تهران جنوب، تهران، ایران

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

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی و پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

۴- دانشیار مهندسی پلیمر، مرکز تحقیقات نانو، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

پیام نگار: mohammad.kalaei@gmail.com

(mr_kalaei@azad.ac.ir)

چکیده

فرایند پخت رزین های اپوکسی با سخت کننده ها، منجر به افزایش چگالی شبکه ای می شود و خواص رزین سخت شده، بسته به شرایط پخت، تحت تأثیر قرار می گیرد. برای بهبود خواص نهایی رزین های اپوکسی، استفاده از نانو ذرات آلی و معدنی پیشنهاد شده است. یکی از نانوذراتی که اخیراً طرفدار یافته، گرافن اکساید و مشتقات آن است. در این مقاله، مدل های متنوع ارائه شده در سینتیک پخت ترکیبات هیبریدی اپوکسی/ نانو ذرات گرافن اکساید، ارزیابی و دلایل انحراف نتایج آزمایشگاهی و تجربی با نتایج مدل سازی تشریح شده است. همچنین مقایسه هر یک از این مدل ها با نتایج تجربی نشان داده است که مدل سیستاک برگرن و کمال نسبت به سایر مدل ها دارای انطباق بالاتری با نتایج تجربی است و می تواند به عنوان مبنای قابل اتکایی برای توصیف فرایند پخت رزین های اپوکسی حاوی نانو ذرات گرافن اکساید در نظر گرفته شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲

شماره صفحات: ۷۱ تا ۸۳

کلیدواژه ها:

نانوگرافن اکساید،

رزین اپوکسی،

سینتیک پخت،

مدل سیستاک برگرن،

مدل کمال

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

استناد به مقاله:

کرمی، م. ح.، کلایی، م. ر.، "بررسی مدل سازی سینتیک پخت نانوکامپوزیت های اپوکسی در مجاورت نانو گرافن اکساید: مطالعه مروری"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیست و یکم، شماره ۱۲۴، صص. ۷۱-۸۳، (۱۴۰۱).

۱. مقدمه

رزین اپوکسی یکی از مهم‌ترین پلیمرهای حرارتی است که به دلیل خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی عالی، از جمله مقاومت کششی و فشاری، دمای اعوجاج، مقاومت شیمیایی خوب در صنایع چسب، پوشش، الکترونیک، مواد کامپوزیت با کارایی بالا، توربین‌های بادی و ترکیبات قالب‌گیری به کار می‌رود [۱].

رزین‌های اپوکسی دارای درصد زیادی پیوندهای عرضی هستند که برای دستیابی به خواص مکانیکی و گرمایی مناسب لازم است؛ اما شبکه‌های ایجاد شده در رزین اپوکسی پخت شده با سخت‌کننده که چگالی پیوندهای عرضی زیادی دارند، منجر به مقاومت شکست و ضربه کم و بسیار شکننده می‌شوند.

برای غلبه بر این نقص و افزایش خواص فیزیکی-مکانیکی، با مواد پلیمری دیگر یا با نانوذرات آلی و یا معدنی ترکیب می‌شوند. نانوگرافن دارای ویژگی‌های عالی مانند هدایت الکتریکی زیاد، هدایت حرارتی، مدول الاستیک زیاد و مساحت سطح ویژه است [۱،۲].

گرافن پیوند واندروالسی قوی و ویژگی‌های آب‌گریزی و آسان کلوخه‌ای شدن را دارد که استفاده از آن را بسیار محدود می‌کند، هم‌چنین در خانواده مواد کربنی قرار دارد که به دلیل خواص مکانیکی، مقاومت حرارتی زیاد و هدایت الکتریکی توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. گرافن اکساید ساختار مشابهی با گرافن دارد که به‌عنوان نانو مواد، برای تقویت پلیمرهای گرما نرم و رزین‌های اپوکسی استفاده می‌شود [۲].

نانوگرافن‌ها در تجهیزات الکتریکی، در باطری و خازن به‌عنوان ذخیره انرژی سنسورها و در محیط زیست به‌عنوان یک نانوماده برای حذف آلاینده‌های آب و هوا و در زیست‌پزشکی به‌عنوان نانوحامل‌ها کاربرد دارد و البته گرافن اکساید عایق الکتریکی است [۴،۳].

تا به امروز گرافن اکساید از روش‌های برودی، استود نمایر، هامر و تور ساخته شده است، هم‌چنین از بین روش‌های یادشده، روش اصلاح شده هامر برای تولید گرافن اکساید بیشتر طرفدار پیدا کرده است [۵].

روش‌های تولید گرافن، لایه‌لایه کردن میکرو^۱، رسوب‌دهی شیمیایی بخار^۲، رشد همبافت^۳ روی سطوح عایق الکتریکی و ایجاد

سوسپانسیون‌های کلوتیدی^۴ است [۵،۴].

وجود ترکیبات هیدروکسیل و کربوکسیل در گرافن (هر دو نوع گرافن اکساید و گرافن اکساید کاهش یافته) به‌عنوان بستری منجر به ساخت نانو کامپوزیت‌ها با خواص فیزیکی-مکانیکی منحصر به فرد می‌شود، هم‌چنین گرافن اکساید که از نظر شیمیایی ناپایدار و در شرایط محیطی جاذب رطوبت است، یک نوع ابرمولکول غیر استوکیومتری است [۶،۷].

سینتیک پخت مواد پلیمری به روش‌های بدون مدل^۵ و مدل‌دار^۶ تقسیم‌بندی می‌شود. در روش مدل‌دار مدل‌های گوناگونی بر داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده برازش^۷ می‌شوند و در صورتی که مجموع مربعات^۸ بالاتری داشته باشد، به‌عنوان مدل مناسب انتخاب می‌شود. در این روش انرژی اکتیواسیون و درجه واکنش به دست می‌آید. در روش بدون مدل، فقط انرژی اکتیواسیون از شیب نمودار به دست می‌آید [۸].

معادلات سینتیک پخت برای ارزیابی و بهینه‌سازی فرایند تولید استفاده می‌شود. واکنش‌های پیچیده زیادی در زمان فرایند پخت رزین اپوکسی با سخت‌کننده وجود دارد؛ بنابراین برای تعیین خواص نهایی رزین‌های پلیمری، مطالعه مدل‌سازی سینتیک پخت کیفیت محصول نهایی را افزایش می‌دهد [۶،۷].

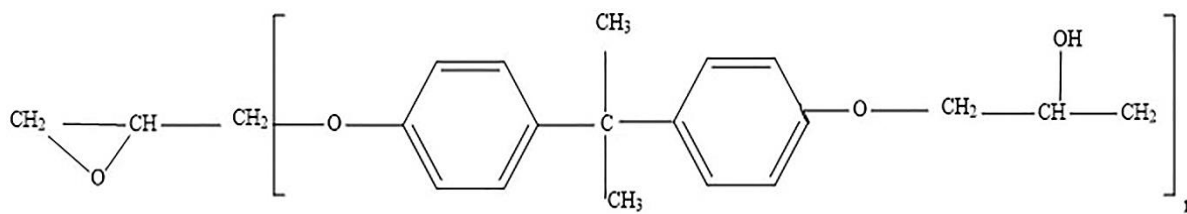
در این پژوهش ابتدا ریخت‌شناسی و معرفی مدل‌های متفاوت سینتیک پخت نانو کامپوزیت‌های اپوکسی مطالعه می‌شود و در ادامه به اثر اضافه کردن نانو گرافن اکساید بر انرژی فعال‌سازی، سرعت واکنش پخت و درجه پخت رزین اپوکسی پرداخته می‌شود و با جمع‌بندی مدل‌های ارائه شده، بهترین مدل برای توصیف و ارزیابی واکنش پخت نانو کامپوزیت‌های اپوکسی ارائه می‌شود.

۲. ساختار و شکل‌شناسی رزین اپوکسی و نانو گرافن اکساید

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 (۱)، ساختار رزین اپوکسی نمایش داده شده است [۷].

4. Colloidal Suspensions
5. Model Free
6. Model Fitting
7. Curve Fitting
8. R²

1. Micro Layering
2. Chemical Vapor Deposition
3. Epitaxial Growth



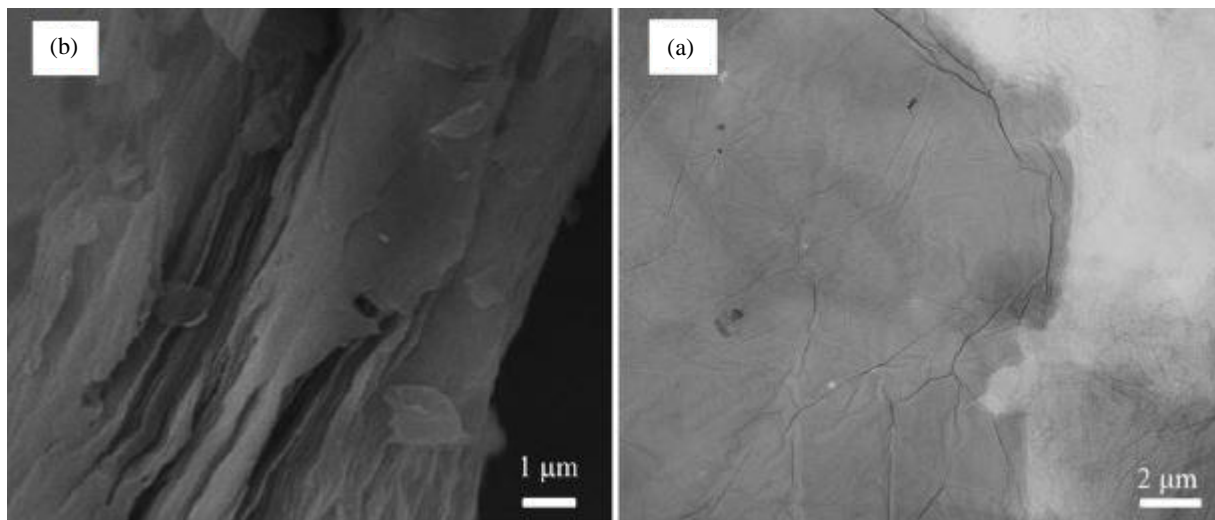
شکل ۱. ساختار رزین اپوکسی [۷].

Figure 1. Epoxy resin structure [7].

است. نتایج (شکل (۳-a) نشان داد که سوسپانسیون نانو گرافن اکساید به صورت صفحه‌ای است و شکل (۳-b)، رزین اپوکسی و نانو گرافن اکساید را نشان می‌دهد که تصویر شفاف‌تر شده است که به رنگ قهوه‌ای کمرنگ است، همچنین نانو گرافن پراکنش خوبی در ماتریس رزین اپوکسی دارد. پراکنش نانو مواد در ماتریس بسیاری رزین‌های اپوکسی عامل بسیار مهمی در سینتیک پخت است و در صورت پخش و توزیع نامناسب نانومواد، سیستم پخت نانوکامپوزیت دچار مشکل می‌شود و خواص فیزیکی- مکانیکی افت می‌کند [۸،۹].

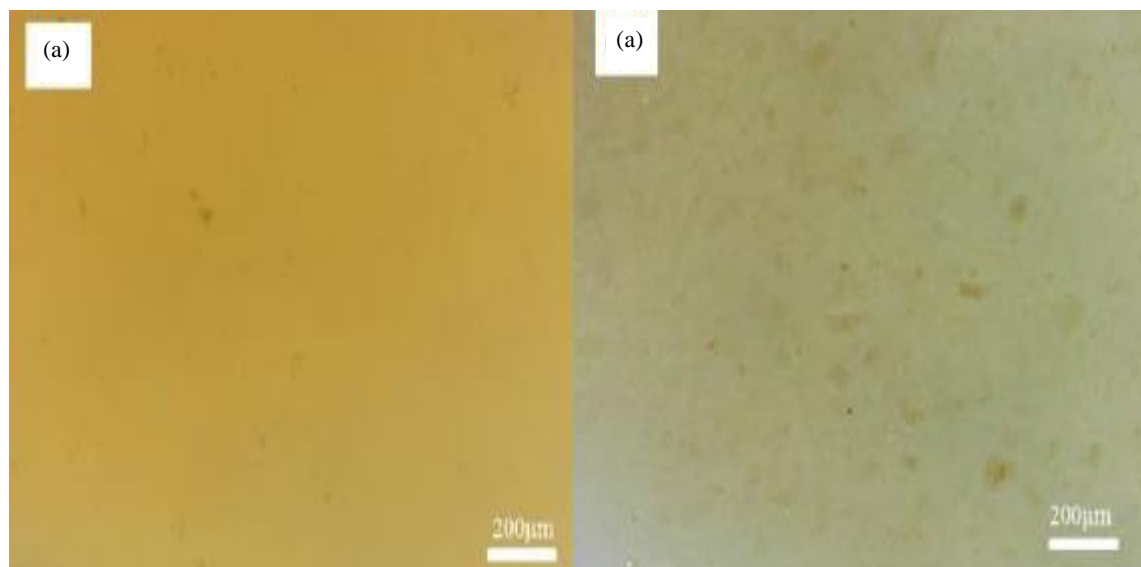
در تصاویر شکل‌شناسی SEM و TEM شکل (۲)، نانوگرافن اکساید نشان داده شده است. در شکل (۲-a)، برخی از ورقه‌های کوچک و نازک نانو گرافن اکساید را می‌توان در تصویر مشاهده کرد، این مشاهدات شکل‌شناسی لایه لایه و بسیار چروکیده نانو گرافن اکساید را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۲-b)، ورقه‌های خشک نانو گرافن اکساید را که از انباشتگی کمتری برخوردار هستند، نمایش می‌دهد.

در شکل (۳)، تصاویر میکروسکوپ دیجیتال نانو گرافن اکساید و نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور نانوگرافن اکساید نشان داده شده



شکل ۲. تصاویر ریخت‌شناسی نانو گرافن اکساید (a). TEM و (b). SEM [۸].

Figure 2. Morphological images of nano graphene Oxide (a). TEM and (b). SEM [8].



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ دیجیتال (a) نانو گرافن اکساید (b). رزین اپوکسی / نانو گرافن اکساید [۸].
 Figure 3. Digital microscope images (a). Nanographene oxide (b). Epoxy resin / nano graphene oxide [8].

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T).f(\alpha) \quad (2)$$

ثابت سرعت واکنش پخت و وابسته به دما و $f(\alpha)$ تابع مدل سینتیکی است. ثابت سرعت در معادله (۲) به شکل معادله آرنیوس نوشته می شود:

$$k(T) = A. \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

که A ضریب پیش‌نمایی و E_a انرژی فعال‌سازی است. با استفاده از شکل لگاریتمی معادله سینتیکی ۲، (روش هم‌تبدیلی) انرژی فعال‌سازی به دست می‌آید.

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \ln[Af(\alpha)] - \left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

از شیب خط $\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ بر حسب T^{-1} برای درجه پخت یکسان، انرژی فعال‌سازی تعیین می‌شود [۱۱]. مدل‌های تجربی بسیاری برای توصیف مدل‌سازی سینتیک پخت رزین‌های گرما سخت بررسی شده که مهم‌ترین آن‌ها در جدول (۱)، جمع‌آوری شده است. در این معادلات α درجه پخت، K_1 و K_2 ثابت‌های سرعت واکنش و شاخص‌های m و n نماهای واکنش پخت هستند. هم‌چنین جهت

۳. معرفی مدل‌های سینتیک پخت نانو کامپوزیت‌های اپوکسی

رزین‌های اپوکسی و سخت‌کننده‌ها، در صنایع متفاوتی کاربرد دارند و معادلات سینتیک پخت برای ارزیابی و بهینه‌سازی فرایند تولید استفاده می‌شود. واکنش‌های پیچیده زیادی در زمان فرایند پخت رزین اپوکسی وجود دارد؛ بنابراین برای تعیین خواص نهایی رزین‌های بسپاری، مطالعه سینتیک پخت کیفیت محصول نهایی را افزایش می‌دهد [۹-۱۱].

تعاریف زیر به صورت ثابت در مدل‌های ارائه شده استفاده می‌شود، α (درجه پخت) و t (زمان واکنش) و Q (شار گرمایی ویژه) و T (دما) و E_a (انرژی اکتیواسیون) و m و n شاخص‌های سینتیک پخت است. سرعت واکنش پخت $\frac{d\alpha}{dt}$ متناسب با شار گرمایی مخصوص (Q) است.

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{Q}{\Delta H} \quad (1)$$

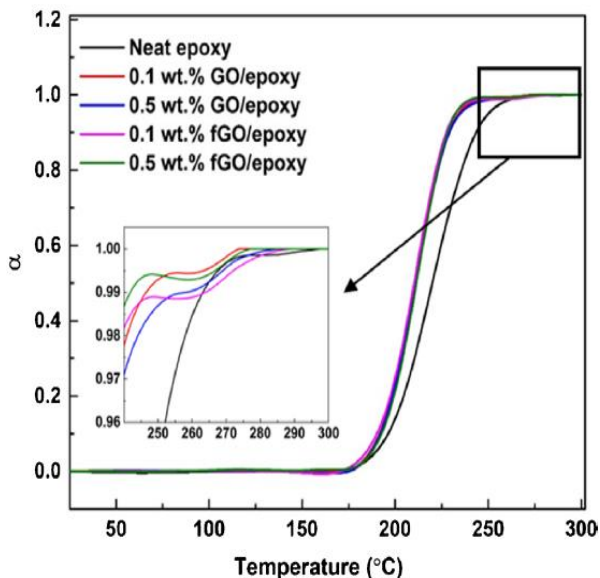
که در آن ΔH گرمای واکنش پخت است و درجه پخت (α) به آسانی از انتگرال جزئی منحنی همدما یا غیر همدما به دست می‌آید. سرعت واکنش پخت به شکل معادله (۲) بیان می‌شود:

ارزیابی و مدل‌سازی سینتیک پخت رزین‌های اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی، مدل‌های دیگری در جدول (۱)، نشان داده شده است [۱۴-۱۲].

جدول ۱. مدل‌های سینتیک پخت [۱۴-۱۲].

Table 1. Curing kinetics models [12-14].

Model type	Model name	Equation
Model fitting	Simon-Gilham	$\frac{d\alpha}{dt} = K_1(1-\alpha)^2 + K_2\alpha(1-\alpha)^2$
Model free	Kissinger	$\ln \frac{B}{T_m^2} = C' + \left(\frac{-Ea}{RT_m}\right)$
Model free	Ozawa	$\ln B = C'' + \left(\frac{-Ea}{RT}\right)$
Model fitting	n th -order	$\frac{d\alpha}{dt} = k. (1-\alpha)^n$
Model fitting	Sistak Bergern	$\frac{d\alpha}{dt} = k\alpha^m. (1-\alpha)^n$
model fitting	Kamal	$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha^m). (1-\alpha)^n$



شکل ۴. نمودار درجه پخت با تغییرات دما، رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی گرافن اکساید و گرافن اکساید اصلاح‌شده [۱۶].

Figure 4. Curing degree of diagram with temperature changes, pure epoxy resin and epoxy nanocomposites containing graphene oxide and modified graphene oxide [16].

اثر نانوغرافن اکساید اصلاح‌یافته با پلی‌آمید آمین بر درجه پخت رزین اپوکسی بررسی شد؛ نتایج نشان داد که درجه پخت نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور نانوغرافن اکساید اصلاح‌یافته، در سرعت‌های گرمادهی متفاوت (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ °C/min) به صورت شکل تابع سیگموئید است و از سازوکار سینتیک پخت خودکاتالیزوری تبعیت می‌کند [۱۷]. در مطالعات دیگری اثر نانوغرافن اکساید بر درجه پخت رزین اپوکسی و عامل پخت دی‌آمینو دی‌فنیل سولفون بررسی شد؛ نتایج نشان داد که افزودن نانوغرافن اکساید نقش شتاب‌دهنده در واکنش پخت دارد و هم‌چنین با افزایش دما، زمان واکنش پخت نانوکامپوزیت اپوکسی کاهش پیدا می‌کند [۱۸]. اثر نانوغرافن اکساید اصلاح‌یافته با گروه عاملی آلیفاتیک آمین و نانوغرافن اکساید اصلاح‌نشده بر درجه پخت رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که اصلاح سطح نانوغرافن اکساید تأثیری بر درجه پخت رزین اپوکسی نداشته است و رفتاری مشابه با نانوغرافن اکساید اصلاح‌نشده دارد [۱۹]. سینتیک پخت رزین اپوکسی و نانوغرافن اکساید اصلاح‌یافته با هگزا متیلن دی‌آمین بررسی شد؛ نتایج ارزیابی درجه پخت نشان داد که با افزودن

۴. اثر نانوغرافن اکساید بر درجه پخت رزین اپوکسی

اثر افزودن نانوغرافن اکساید اصلاح‌شده با پلی‌استر فوق شبکه‌ای بر رزین اپوکسی بررسی شد؛ نتایج نشان داد که با افزایش سرعت گرمادهی، رزین اپوکسی خالص رفتار مشابه نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور نانوغرافن اکساید اصلاح‌یافته با پلی‌استر فوق شبکه‌ای دارد [۱۵]. در پژوهشی دیگر اثر دو نوع نانوغرافن (اصلاح‌شده با فنیل دی‌آمین و اصلاح نشده) بر رزین اپوکسی خالص بررسی شد. همان‌طور که در شکل (۴)، مشخص است در ابتدای واکنش با افزایش دما درجه پخت ثابت می‌ماند تا به دمای پخت برسد و با افزایش دمای پخت، درجه پخت در محدوده دمایی مشخص سریع افزایش می‌یابد تا به درجه پخت مقدار ۱ برسد، هم‌چنین با افزایش سرعت گرمادهی، درجه پخت نانوکامپوزیت اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی عامل‌دار شده افزایش می‌یابد که به دلیل حضور گروه‌های عاملی بر روی سطح نانوغرافن اکساید است که باعث افزایش سرعت واکنش پخت می‌شوند [۱۶].

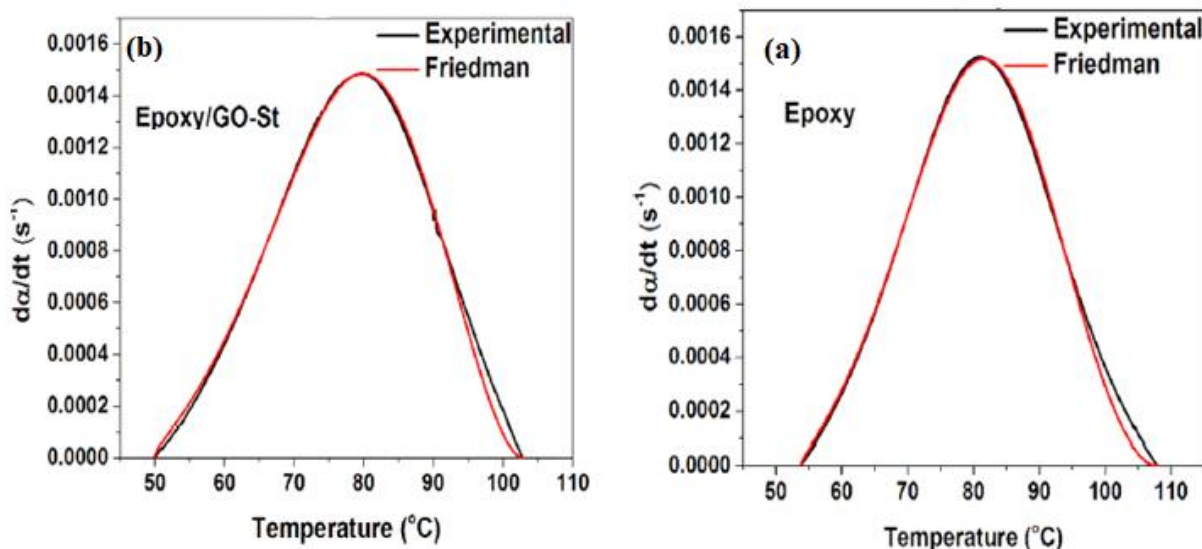
اکساید کاهش یافته، افزایش بیشتری نسبت به نمونه دیگری دارد. هم چنین نتایج مدل سازی نشان داد که داده های آزمایشگاهی با مدل ارائه شده، توافق خوبی دارند [۲۲]. در پژوهشی دیگر، اثر نانوگرافن اصلاح شده با آلیفاتیک آمین بر سرعت واکنش پخت رزین اپوکسی بررسی شد و نتایج نشان داد که مقداری انحراف در آخر واکنش بین مدل ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد که به علت افزایش گرانروی و شبکه ای شدن در آخر واکنش است [۱۹]. مطالعه سرعت واکنش پخت رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت های اپوکسی در حضور نانوگرافن اکساید انجام شد و نتایج نشان داد که با افزایش دما، سرعت واکنش رزین اپوکسی افزایش می یابد و هم چنین با افزایش نانوگرافن اکساید و افزایش دما سرعت واکنش پخت افزایش بیشتری داشته است و بیشینه سرعت پخت نانوکامپوزیت های اپوکسی کمتر می شود که به علت نقش کاتالیزوری نانوگرافن اکساید است [۲۳]. در مطالعه دیگری اثر نانوگرافن اکساید اصلاح شده با هگزامیلن دی آمین بر سرعت واکنش پخت رزین اپوکسی بررسی شد؛ نتایج نشان داد که با افزودن نانوگرافن اکساید اصلاح شده به رزین اپوکسی، سرعت واکنش پخت بهبود می یابد و نتایج مدل سازی با داده های آزمایشگاهی تطابق دارد [۲۰]. سینتیک پخت

نانوگرافن اکساید اصلاح یافته به رزین اپوکسی، درجه پخت نانوکامپوزیت به دمای شروع پخت بالاتری انتقال پیدا می کند و این بدان معناست که واکنش پخت رزین اپوکسی و سخت کننده آمینی در مجاورت نانوگرافن اکساید اصلاح یافته، تمایل به شروع واکنش پخت در دماهای بالاتری دارد [۲۰].

۵. اثر نانوگرافن اکساید بر سرعت واکنش رزین اپوکسی

در شکل (۵)، سرعت واکنش پخت رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور نانوگرافن اکساید اصلاح یافته با نشاسته بررسی شد. نتایج نشان داد که در انتهای واکنش مقداری انحراف بین نتایج آزمایشگاهی و مدل فرایدمن وجود دارد که به علت افزایش گرانروی است. هم چنین در ابتدای واکنش مقدار گرانروی کم است و قبل از حالت ژله ای شدن واکنش شیمیایی به وسیله سینتیک شیمیایی کنترل می شود [۲۱].

اثر نانوگرافن اکساید و نانوگرافن اکساید کاهش یافته بر سرعت واکنش پخت رزین اپوکسی و سخت کننده دی آمینو دی فنیل متان بررسی شد؛ نتایج نشان داد که در هر دو نوع متفاوت نانو، سرعت واکنش پخت برای نمونه نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور نانوگرافن



شکل ۵. نمودار سرعت واکنش پخت با تغییرات دما، نمونه های (a). رزین اپوکسی و (b). رزین اپوکسی و نانوگرافن اکساید عامل دار شده [۲۱].

Figure 5. Curve of curing reaction rate with temperature changes, samples of (a). Epoxy resin and (b). epoxy resin and functionalized nanographene oxide [21].

انرژی اکتیواسیون رزین اپوکسی رفتار مشابه رزین اپوکسی خالص را دارد و همچنین اثر نانوگرافن اکساید اصلاح‌شده با پلی‌استر شاخه‌ای بر مقدار انرژی اکتیواسیون در درجه پخت مساوی و کمتر از مقدار ۰/۴ به صورت کاهشی گزارش شده است. در بیشتر مطالعات اثر نانوگرافن اکساید اصلاح‌شده مقدار انرژی اکتیواسیون را کاهش داده و باعث تسهیل در سرعت واکنش بین رزین اپوکسی و گروه‌های سخت‌کننده است، همچنین اثر نانوگرافن اکساید اصلاح‌شده با گروه آمینی، آلیفاتیک آمین و نشاسته بر مقدار انرژی اکتیواسیون، افزایشی بوده است [۲۰-۱۵]. اصلاح سطح نانوگرافن اکساید به روش‌های فیزیکی و شیمیایی انجام می‌شود. اصلاح سطح باعث پراکنش مناسب نانوگرافن اکساید در ماتریس اپوکسی می‌شود، همچنین خواص فیزیکی- مکانیکی افزایش می‌یابد. اگر اصلاح سطح با آزمون‌های XRD و FTIR تأیید شد و در صورتی که درجه پخت افزایش یافت، این اصلاح سطح منجر به سرعت واکنش پخت می‌شود و انرژی فعال‌سازی کاهش می‌یابد و می‌توان گفت که نانوگرافن اکساید نقش خودکاتالیزوری در واکنش پخت

رزین اپوکسی و سخت‌کننده دی‌آمینو دی‌فنیل متان و نانوگرافن اکساید اصلاح‌شده با گروه عاملی آمین بررسی شد؛ نتایج نشان داد که سرعت واکنش پخت در حضور نانوگرافن اکساید اصلاح‌شده ماهیت خودکاتالیزوری دارد و از مدل خودکاتالیزوری کمال تبعیت می‌کند و اصلاح سطح نانوگرافن اکساید، سازوکار واکنش پخت را تغییر نداد است [۲۴]. بررسی سرعت واکنش پخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور نانوگرافن اکساید اصلاح‌شده با پلی‌اتر آمین نشان داد که با افزودن مقدار نانو اصلاح‌شده سرعت واکنش اصلاح‌شده یافته است و نیز با افزایش غلظت نانوگرافن اکساید اصلاح‌یافته به رزین اپوکسی، سرعت واکنش پخت محدود می‌شود [۲۵].

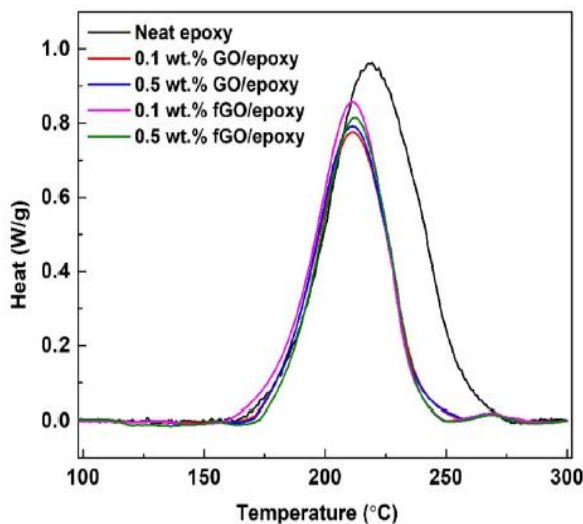
۶. اثر نانوگرافن اکساید بر مقدار انرژی اکتیواسیون رزین اپوکسی

در جدول (۲)، اثر نانوگرافن اکساید و نانوگرافن اکساید اصلاح‌یافته بر مقدار انرژی اکتیواسیون رزین اپوکسی بررسی شد، نتایج نشان داد که اثر نانوگرافن اکساید اصلاح‌شده با پلی‌آمین بر مقدار

جدول ۲. اثر نانوگرافن اکساید و نانوگرافن اکساید اصلاح‌شده بر مقدار انرژی اکتیواسیون رزین اپوکسی.

Table 2. Effect of nano graphene oxide and modified nano graphene oxide on the value of activation energy of epoxy resin.

Epoxy nanocomposite components	Effect of nano on activation energy and behavior of epoxy resin	Reference
Modified nano graphene oxide with branched polyester	decreasing (curing degree less than 0.4)	[10]
Nano Graphene oxide modified with phenylenediamine	decreasing	[11]
Nano Graphene oxide modified with polyamide	Ineffective (similar Behavior to epoxy resin)	[12]
Nano Graphene oxide	Decreasing	[13]
Modified nano graphene oxide with aliphatic amine group	Increasing	[14]
Nano Graphene oxide modified with hexamethylenediamine	Decreasing	[15]
Nano Graphene oxide modified with starch	Increasing	[16]
Reduced nano graphene oxide	Decreasing	[17]
Modified nano graphene oxide with amine group	Increasing	[18]
Nano Graphene oxide modified with polyether amine	Decreasing (Low concentrations)	[19]



شکل ۶. نمودار جریان گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت های اپوکسی در حضور نانوگرافن اکساید و نانوگرافن اکساید عامل دار شده [۱۶].

Figure 6. Heat flow curve of epoxy resin and epoxy nanocomposites in the presence of nanographene oxide and functionalized nanographene oxide [16].

نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور نانوگرافن اکساید اصلاح شده با گروه آلیفاتیک آمین بررسی شد؛ نتایج تحقیق نشان داد که با افزودن این نوع نانو اصلاح شده، مقدار جریان گرمایی افزایش پیدا می کند و باعث تسهیل در واکنش بین رزین اپوکسی و سخت کننده آمینی می شود و حضور گروه آلیفاتیک آمین بر روی سطح نانوگرافن اکساید، نقش شتاب دهنده در واکنش پخت را دارد [۱۹]. بررسی دمای بیشینه نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور نانوگرافن اکساید اصلاح شده با هگزا متیلن دی آمین نشان داد که تغییرات چشم گیری بر دمای بیشینه مشاهده نمی شود [۲۰]. اثر نانوگرافن و نانوگرافن اکساید کاهش یافته بر جریان گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد و نتایج نشان داد که با افزودن نانوگرافن به ماتریس رزین اپوکسی پیک منحنی پهن تر می شود و با افزودن نانوگرافن اکساید کاهش یافته، دمای بیشینه کاهش می یابد که بدان معناست که نانوگرافن اکساید کاهش یافته نقش کاتالیزوری در واکنش پخت با رزین اپوکسی دارد [۲۲]. در مطالعه دیگری در مورد اثر نانوگرافن اکساید اصلاح شده با گروه آمینی بر جریان گرمایی رزین اپوکسی نشان داد که با افزایش سرعت گرمادهی پیک منحنی پهن تر می شود [۳۱-۲۹، ۲۴].

رزین اپوکسی و سخت کننده داشته است. به عنوان مثال برای پراکنش و برهمکنش بهتر بین رزین اپوکسی و نانوگرافن اکساید از جفت کننده های سیلانی استفاده می شود که باعث ایجاد پیوند بین اجزا در فصل مشترک می شود که این کار را با گروه های عاملی بین رزین اپوکسی و نانوگرافن انجام می دهد که منجر به واکنش پخت بهتر می شود [۲۰-۲۲]. تفاوت اصلی بین نانوگرافن اکساید و نانوگرافن اکساید کاهش یافته در این است که اکسید گرافن حاوی گروه های کاربردی حاوی اکسیژن است، در حالی که نانوگرافن اکساید کاهش یافته فاقد گروه های کاربردی حاوی اکسیژن است. نانوگرافن اکساید کاهش یافته به صورت ورقه های اکسید گرافن تک قطبی است. بیشتر مطالعات نشان می دهد که اثر نانوگرافن اکساید بر رفتار حرارتی و سینتیک پخت رزین اپوکسی به علت حضور اکسیژن در ساختار می تواند برهمکنش بهتری با رزین اپوکسی خالص و سخت کننده در مقایسه با نمونه نانوگرافن اکساید کاهش یافته باشد و این نتایج با داده های به دست آمده از انرژی اکتیواسیون در جدول ۱، مطابقت دارد [۲۸-۲۳].

۷. اثر نانو گرافن اکساید بر رفتار پخت رزین اپوکسی

اثر نانوگرافن اکساید بر جریان گرمایی اصلاح شده با فیلین دی آمین بررسی شد؛ همان طور که در شکل (۶) پیداست با افزایش نانوگرافن اکساید و نانوگرافن اکساید عامل دار شده، دمای پیک شدن کاهش می یابد و با افزایش سرعت گرمادهی، زمان انجام واکنش پخت کوتاه تر می شود و واکنش به دماهای بالاتر انتقال پیدا می کند [۱۶]. در مطالعات دیگری، اثر نانوگرافن اکساید اصلاح شده با پلی آمین بر جریان گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد؛ نتایج نشان داد که با افزایش سرعت گرمادهی، جریان گرمایی افزایش می یابد و در سرعت های گرمادهی کمتر، احتمال واکنش های شیمیایی گروه های جانبی بیشتر می شود [۱۷]. در پژوهش دیگری اثر نانوگرافن اکساید بر جریان گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد و نتایج نشان داد که جریان گرمایی در ابتدای واکنش پخت، افزایش می یابد و به نقطه بیشینه می رسد و کاهش می یابد و بعد به یک مقدار ثابت می رسد که به معنی آن است که واکنش شبکه ای شدن به اتمام رسیده است، هم چنین با افزودن نانوگرافن اکساید مقدار جریان گرمایی به زمان های کمتر تغییر می یابد [۱۸]. سینتیک پخت

۸. بررسی مدل‌های ارائه‌شده در سینتیک پخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور نانوگرافن اکساید و نانوگرافن اکساید اصلاح‌شده

در جدول (۳) به بررسی مدل‌های ارائه‌شده در سینتیک پخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی پرداخته شده است. نتایج نشان داد که برای بررسی سینتیک پخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور نانوگرافن اکساید کاهش یافته از مدل کمال دارای فاکتور نفوذ استفاده می‌شود [۳۳-۳۵]، هم‌چنین نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور نانو گرافن اکساید اصلاح‌شده با گروه آمینی از مدل کیسینجر تبعیت می‌کند [۳۶-۳۸]. این بدان معناست که مدل کیسینجر با داده‌های آزمایشگاهی توافق خوبی دارد. مدل‌سازی اصلاح سطح نانوگرافن اکساید با نشاسته و واکنش با رزین اپوکسی بررسی شد [۳۹-۴۲]، نتایج نشان داد که مدل‌های متفاوتی با این نانوکامپوزیت سازگاری دارد و مدل سیستاک برگرن و کمال از بین مدل‌های ارائه‌شده، با توجه به تکرار در مقالات متعدد، بهترین مدل برای توصیف فرایند پخت است [۴۳-۴۶].

۹. نتیجه‌گیری

اثر افزودن نانوگرافن اکساید و نانوگرافن اکساید اصلاح‌شده بر سرعت واکنش پخت رزین اپوکسی بررسی شد؛ نتایج نشان داد که اصلاح سطح نانوگرافن اکساید باعث بهبود سرعت واکنش پخت رزین اپوکسی می‌شود. در بیشتر اثر نانوگرافن اکساید اصلاح‌شده، انرژی اکتیواسیون را کاهش داده و باعث تسهیل در سرعت واکنش بین رزین اپوکسی و گروه‌های سخت‌کننده است، هم‌چنین اثر نانوگرافن اکساید اصلاح‌شده با گروه آمینی، آلیفاتیک آمین و نشاسته بر مقدار انرژی اکتیواسیون، افزایشی بوده است. اثر نانوگرافن اکساید کاهش یافته بر جریان گرمایی رزین اپوکسی نشان داد که دمای بیشینه کاهش پیدا می‌کند که بدان معناست که نانوگرافن اکساید کاهش یافته می‌تواند نقش کاتالیزوری در واکنش پخت داشته باشد. مدل‌سازی سینتیک پخت نانوکامپوزیت اپوکسی در مجاورت گرافن اکساید بررسی شد؛ نتایج نشان داد که مدل‌های متفاوتی با این نانوکامپوزیت سازگاری دارد و مدل سیستاک برگرن و کمال از بین مدل‌های ارائه‌شده، با توجه به تکرار در مقالات متعدد، بهترین مدل برای توصیف فرایند پخت است. با توجه به مطالعه مقالات گوناگون

جدول ۳. اثر نانوگرافن اکساید و نانوگرافن اکساید اصلاح‌شده بر مدل‌سازی سینتیک پخت رزین اپوکسی.

Table 3. Effect of nano graphene oxide and modified nano graphene oxide on modeling of curing kinetics of epoxy resin.

Epoxy nanocomposite components	The model presented	References
Modified nano graphene oxide with branched polyester	Ozawa - isoconversional	[15]
Nano Graphene oxide modified with phenylenediamine	Starink	[16]
Nano Graphene oxide modified with polyamide	Sistak Bergern-Kissinger	[17]
Nano Graphene oxide	Kamal	[18]
Modified nano graphene oxide with aliphatic amine group	Kissinger	[19]
Nano Graphene oxide modified with hexamethylenediamine	Sistak Bergern	[20]
Nano Graphene oxide modified with starch	Ozawa-Friedman-Kissinger-Malek	[21]
Reduced nano graphene oxide	Kamal with diffusion factor	[22]
Modified nano graphene oxide with amine group	Kissinger	[23]

- Industrial and Engineering Chemistry, 29: pp. 1-11, (2015).
- [8] Xue, A., Zhang, B., Sun, M., Zhang, X., Li, J., Wang, L., Song, C., Morphology, thermal and mechanical properties of epoxy adhesives containing well-dispersed graphene oxide", International Journal of Adhesion and Adhesives, 88: pp. 11-18, (2019).
- [9] Liu, Q., Zhou, X., Fan, X., Zhu, C., Yao, X., Liu, Z "Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Resin Nanocomposites Reinforced with Graphene Oxide", Polymer-Plastics Technology and Engineering, 51: pp. 251-256, (2012).
- [10] Reso, D., Cascaval, C. N., Mustata, F., Ciobanu, C., "Cure Kinetics, Epoxy Resins Studied by Nonisothermal DSC Data", Thermochimica. Acta, 383: pp. 119-127, (2002).
- [11] Montserrat, S., Málek, J., "A kinetic analysis of the curing reaction of an epoxy resin", Thermochimica Acta, 228: pp. 47-60, (1993).
- [12] Málek, J., "A computer program for kinetic analysis of non-isothermal thermoanalytical data", Thermochimica Acta, 138: pp. 337-346, (1989).
- [13] Málek, J., "The kinetic analysis of non-isothermal data", Thermochimica Acta, 200: pp. 257-269, (1992).
- [14] Rena, D. R., Xiong, X., Maa, X. Liu. S., Wang, J., Chen, P., Zeng, Y., "Isothermal curing kinetics and mechanism of DGEBA epoxy resin withphthalide-containing aromatic diamine", Thermochimica Acta, 623: pp. 15-21, (2016).
- [15] Li, L., Liao, X., Sheng, X., Liu, P., Hao, Z., He, L., Qin, G., "Influence of surface modified graphene oxide on the mechanical performance and curing kinetics of epoxy resin", Polymers for Advanced Technology, 31: pp. 1865-1874, (2020).
- [16] Wazalwar, A., M, Raichur., "Model-free cure kinetics of tetra-functional epoxy reinforced with GO and p-Phenylenediamine modified GO", Thermochimica Acta, 697: pp. 178857, (2021).
- [17] Nonahal, M., Rastin, H., Saeb, M. R., Sari, M. G., Moghadam, M. H., Zarrintaj, P., Ramezanzadeh, B., "Epoxy/PAMAM dendrimer-modified graphene oxide nanocomposite coatings: Nonisothermal cure kinetics study", Progress in Organic Coatings. 114: pp.233-243, (2018).
- [18] Wang, X., Jin, J., Song, M., Lin, Y., "Effect of graphene oxide sheet size on the curing kinetics and thermal stability of epoxy resins", Material Research Express, 3: pp.105303, (2016).
- [19] Nonahal, M., Saeb M. R., Jafari, S. H., Rastin, H., Khonakdar, H. A., Najafi, F., Simon, F., "Design, preparation, and characterization of fast cure epoxy/amine-functionalized graphene oxide nanocomposites", Polymer Composite, 39: pp. 2016-2027, (2018).

در مورد سینتیک پخت و رفتار حرارتی نانوکامپوزیت های اپوکسی در مجاورت نانوگرافن و نانوگرافن اصلاح شده، مشخص است که یکی از ضعفها در این زمینه استفاده از چند مدل سینتیک پخت رایج است و محققان از چند مدل متفاوت سینتیک پخت را بررسی نکردند تا بهترین مدل را انتخاب و برای توصیف واکنش پخت نانوکامپوزیت ارائه کنند، هم چنین در بعضی از مراجع فقط بحث پخت بررسی شده است. یکی از نقاط قوت این مقاله بررسی سینتیک پخت و رفتار حرارتی، اثر انواع نانوگرافن اکساید به رزین اپوکسی است که با توجه به اطلاعات مقاله، محققان می توانند در ادامه راه به بررسی سینتیک پخت هیبرید نانوکامپوزیت های اپوکسی بپردازند و این نتایج را با نمونه های هیبرید نانوکامپوزیت مقایسه کنند.

مراجع

- [1] Vinodhini, S. P., Xavier, J. R., "Evaluation of corrosion protection performance and mechanical properties of epoxy-triazole/graphene oxide nanocomposite coatings on mild steel", Journal of Materials Science, 56: pp. 7094-110, (2021).
- [2] Li, M., Hu, Q., Shan, H., Yu, W., Xu, Z. X., "Fabrication of copper phthalocyanine/reduced graphene oxide nanocomposites for efficient photocatalytic reduction of hexavalent chromium", Chemosphere, , 263: p. 128250, (2021).
- [3] Olabi, A. G., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., Sayed, E. T., "Application of graphene in energy storage device A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 135: pp. 110026, (2021).
- [4] Hu, B., Cong, Y. H., Zhang, B.Y., Zhang, L., Shen, Y., Huang H. Z., "Enhancement of thermal and mechanical performances of epoxy nanocomposite materials based on graphene oxide grafted by liquid crystalline monomer with Schiff base", Journal of Materials Science, 55: pp. 3712-3727, (2019).
- [5] García-Martínez, V. R., Gude, M., Calvo, S., Martínez-Miranda, M. R., Ureña, A., "Influence of graphene nanoplatelets on curing kinetics and rheological properties of a benzoxazine resin", Materials Today Communications, 24: pp. 100990, (2020).
- [6] Xie, Y., Liu, C., Liu, W., Liang, L., Wang, S., Zhang, F., Shi, H., Yang M. "A novel approach to fabricate polyacrylate modified graphene oxide for improving the corrosion resistance of epoxy coatings", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 593: pp. 124627, (2020).
- [7] Jin, F. L., Li, X., Park, S. J., "Synthesis and application of epoxy resins: A review", Journal of

- [20] Ryu, S. H., Sin, J. H., Shanmugaraj, A. M., "Study on the effect of hexamethylene diamine functionalized graphene oxide on the curing kinetics of epoxy nanocomposites", *European Polymer Journal*, 52: pp. 88-97, (2014).
- [21] Jouyandeh, M., Yarahmadi, E., Didehban, K., Ghiyasi, S., Paran, M. R., Puglia, D., Ali, J. A., Jannesari, A., Saeb, M. R., Ranjbar, Z., Ganjali, M. R., "Cure kinetics of epoxy/graphene oxide (GO) nanocomposites: Effect of starch functionalization of GO nanosheets", *Progress in Organic Coatings*, 136: pp. 105217, (2019).
- [22] Li, L., Zeng, Z., Zou, H., Liang, M., "Curing characteristics of an epoxy resin in the presence of functional graphite oxide with amine-rich surface", *Thermochimica Acta*, 614: pp. 76-84, (2015).
- [23] Tian, J., Yang, C., Yang, J., Shi, S., Hao, S., "The correlated effects of polyetheramine-functionalized graphene oxide loading on the curing reaction and the mechanical properties of epoxy composites", *High Performance Polymer*, 7: pp. 5472-5482, (2021).
- [24] Li, L., Zeng, Z., Zou, H., Mei, Liang, M., "Curing characteristics of an epoxy resin in the presence of functional graphite oxide with amine-rich surface", *Thermochimica Acta*, 614: pp. 76-84, (2015).
- [25] Saeb, M. R., Rastin, H., Shabaniyan, M., Ghaffari, M., Bahlakeh, G. H., "Cure kinetics of epoxy/ β -cyclodextrin-functionalized Fe_3O_4 nanocomposites: Experimental analysis, mathematical modeling, and molecular dynamics simulation", *Progress in Organic Coatings*, 110: pp. 172-181, (2017).
- [26] Aradhana, R., Mohanty, S., Nayak, S. K., "Comparison of mechanical, electrical and thermal properties in graphene oxide and reduced graphene oxide filled epoxy nanocomposite adhesives", *Polymer*, 141: pp. 109-123, (2018).
- [27] Karami, M. H., 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, (2019).
- [28] Karami, M. H., 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, (2019).
- [29] Karami, M. H., Kalae, M. R., "Study of thermal degradation kinetics of epoxy composite / carbon nanotubes", *Polymerization*, In Persian, (2021), DOI:10.22063/basparesh.2021.3017.1591
- [30] Karami, M. H., Kalae, M. R., Khajavi, R., Moradi, O., Zaarei, D., "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*, Ferdowsi University of Mashhad, 9-11 November, (2021).
- [31] Karami, M. H., Kalae, M. R., Khajavi, R., Moradi, O., Zaarei, D., "Viscosity modeling of epoxy nanocomposites / elastomeric nanoparticles", *Proceeding of the 17th National Chemical Engineering Congress & Exhibition*, IChEC, Ferdowsi University of Mashhad, 9-11 November, (2021).
- [32] Chen, M. H., Ke, C. Y., Chiang, C. L., "Preparation and Performance of Ecofriendly Epoxy/Multilayer Graphene Oxide Composites with Flame-Retardant Functional Groups", *Journal of Composites Science*, 2(2): pp. 18, (2018).
- [33] Karami, M. H., Kalae, M. R., Mazinani, S., Martfnez, V. G., Wellen, R. M. R., Hodaifa, G., Shanmugaraj, A. M., Kim, K., "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, pp. 9-10, (2020).
- [34] Karami M. H., 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, (2020).
- [35] Karami, M. H., Kalae, M. R., Khajavi, R., Moradi, O., Zaarei, D., "Thermal stability and thermal degradation of epoxy nanocomposite in the presence of full vulcanized elastomeric nano particles", *Advanced materials& Novel Coatings*, 10: pp. 2758-2770, In Persian, (2021).
- [36] Hosseini, S. M., Abdouss, M., Mazinani, S., Soltanabadi, A., Kalae, M. R., "Modified nanofiber containing chitosan and graphene oxide-magnetite nanoparticles as effective materials for smart wound dressing", *Composites Part B: Engineering*, 231: p. 109557, (2022),
- [37] Karami, M. H., Kalae, M. R., Khajavi, R., Moradi, O., Zaarei, D., "A review study of the effect of carbon nanofibers on the curing kinetics of epoxy resins", *Journal of Textile Science and Technology*, In Persian, (2022).
- [38] Karami, M. H., Kalae, M. R., "A Review of the Applications of Cross-linked Elastomeric Nanoparticles", *Iran Rubber Magazine*, 25: pp. 37-56, In Persian, (2020).
- [39] Karami, M. H., Kalae, M. R., "A review of the

- curing kinetics of epoxy nanocomposites/nano clay", Iran Polymer Technology, Research and Development, 6: pp. 29-38, In Persian, (2021).
- [40] Karami, M. H., Kalae, M. R., "Review of degradation kinetics of epoxy nanocomposites in the presence of clay nanoparticles", Polymerization, In Persian, (2021), DOI: 10.22063/BASPARESH.2021.2895.1552.
- [41] Karami, M. H., Kalae, M. R. "Review of curing kinetics of epoxy nanocomposites in the presence of iron oxide nanoparticles", Polymerization, 11(3): pp. 34-43, In Persian, (2021).
- [42] Karami, M. H., 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: pp. 162-175, In Persian, (2021).
- [43] Xie, F., Qi, S. H., Wu, D., "A facile strategy for the reduction of graphene oxide and its effect on thermal conductivity of epoxy based composites", Express Polymer Letters, 10: pp. 470-478 , (2016).
- [44] Rafiee, M., Nitzsche, F., Laliberte, J., Hind, S., Robitaille, F., Labrosse, M. R., "Thermal properties of doubly reinforced fiberglass/epoxy composites with graphene nanoplatelets, graphene oxide and reduced-graphene oxide", Composites Part B: Engineering, 164: pp. 1-9 , (2019).
- [45] Galukhin, A., Nosov, R., Taimova, G., Nikolaev, I., Islamov, D., Vyazovkin, S., "Polymerization kinetics of adamantane-based dicyanate ester and thermal properties of resulting polymer", Reactive and Functional Polymers, 165: p. 104956, (2021).
- [46] Chhetri, S., Adak, N. C., Samanta, P., Murmu, N. C., Kuila, T., "Functionalized reduced graphene oxide/epoxy composites with enhanced mechanical properties and thermal stability", Polymer Testing, 63: pp. 1-11, (2017).