



مدلسازی درجه پخت در فرآیند ساخت پیش‌آغشته اپوکسی-شیشه

حمیدرضا خلفی^۱، مهرزاد مرتضایی^{۲*}، ایرج امیری امرائی^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۲- استادیار، مهندسی کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۳- دانشیار، مهندسی کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۳۸۷۷۶۳۶۸۱، mortezaee@mut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: آذر ۹۳	درجه پخت پیش‌آغشته، یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های آن به‌شمار می‌رود، به‌طوری‌که با تغییر در آن مشخصه‌های دیگر پیش‌آغشته مانند چسبناکی و جریان‌پذیری نیز تغییر می‌کند. برای کنترل و پیش‌بینی درجه پخت باید ارتباط کمی آن با پارامترهای فرآیندی مانند سرعت خط تولید پیش‌آغشته، دمای آون و میزان رزین تعیین شود. در این مقاله معادله انتقال حرارت حاکم بر سیستم پخت پیش‌آغشته اپوکسی-شیشه هم‌زمان با معادله سرعت پخت رزین اپوکسی، به‌روش عددی و به‌کمک برنامه رایانه‌ای نوشته شده در محیط نرم افزار میپل حل شد. همچنین پارامترهای سینتیک پخت رزین با استفاده از اطلاعات آزمون گرماسنجی پوششی تفاضلی هم‌دما به‌دست آمده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که هر چه میزان رزین پیش‌آغشته بیشتر باشد، در ابتدا دما و درجه پخت کمتر خواهد بود اما با آزاد شدن گرمای واکنش پخت، سرعت تغییرات دما و درجه پخت افزایش می‌یابد. همچنین نوع الیاف نیز بر درجه پخت پیش‌آغشته اثر گذار است به‌طوری‌که هر چه الیاف مورد استفاده چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه بالاتری داشته باشد، دما و درجه پخت پیش‌آغشته کمتر خواهد بود. همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش دمای آون، درجه حرارت پیش‌آغشته افزایش یافته و به‌طبع آن درجه پخت نیز افزایش خواهد یافت، درحالی‌که با افزایش سرعت خط تولید پیش‌آغشته، دما و درجه پخت پیش‌آغشته کاهش می‌یابد.
کلیدواژگان: پیش‌آغشته مدلسازی درجه پخت معادله انرژی روش حل عددی	

Modeling of Degree of Cure in Epoxy-glass Prepreg

Hamidreza Khalafi, Mehrzad Mortezaei*, Iraj Amiri Amraei

Department of Composite Engineering, Maleke Ashtar University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 1387763681, Tehran, Iran, mortezaee@mut.ac.ir

Keywords

Prepreg,
Modeling,
Degree of Cure,
Energy Equation,
Numerical solution techniques

Abstract

Degree of cure is one of the most important properties of prepregs, so that the change in degree of cure will cause the changing the of other properties such as, mechanical properties, tack and resin flow. In order to predict and monitor degree of cure, the quantitative relation with processing parameters such as line speed, oven temperature and resin content have to be determined. In this paper, the heat transfer equation governing epoxy-glass prepreg curing systems, together with the equation for the rate of epoxy resin curing is solved using numerical methods and computer programs written in the MAPLE software. The kinetic parameters of the curing reaction of epoxy resin are also evaluated by using isothermal differential scanning calorimetry data. According to results, initially, the temperature and the degree of cure will be reduced by increasing the amount of resin. However, releasing of the heat of curing increases both the temperature variation rate and the degree of curing. Moreover, the fiber types affect the degree of curing; the higher the density and specific heat capacity of the fibers, the less the temperature and degree of curing. Finally, increasing the oven temperature raised the temperature and degree of cure, as expected. On the other hand, increasing the line speed decreased the temperature and the degree of cure.

۱- مقدمه
خواص کامپوزیت تولیدی دو مورد از مزایای استفاده از پیش‌آغشته‌ها می‌باشد

[۴-۱].

روش‌های مختلفی برای ساخت پیش‌آغشته استفاده می‌شود که طرح کلی یک نمونه آن در شکل ۱ نشان داده شده است. در این دستگاه الیاف پس از آغشته‌سازی در حمام رزین، وارد ستون حرارتی تا به صورت جزئی پخت شود. پس از خارج شدن پیش‌آغشته از آون حرارتی دو لایه فیلم جدا

پیش‌آغشته محصول واسطه‌ای شامل الیاف تقویت‌کننده و ماده پلیمری است که به صورت جزئی پخت شده است. پیش‌آغشته‌ها آماده شکل‌گیری و تبدیل به محصول نهایی کامپوزیتی هستند. بیشترین کاربرد پیش‌آغشته‌ها در ساخت قطعات کامپوزیتی حساس مانند محفظه موتور موشک‌ها، فداشونده‌ها و قطعات هواپیما است. امکان کنترل مناسب فرآیند پخت و یکنواخت بودن

Please cite this article using:

Khalafi, H. Mortezaei, M. and Amiri Amraei, I., "Modeling of Degree of Cure in Epoxy-glass Prepreg" Journal of Science and Technology of Composite, Vol. 1, No. 2, pp. 43-48, 2015.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

www.SID.ir

استفاده از اطلاعات آزمون گرماسنجی پویایی تفاضلی همدم، پخت در طول آون به شکل دینامیک عمل کند.

۲- مدل‌سازی

در شکل ۲ یک المان از مجموعه الیاف آغشته شده به رزین، در حال حرکت درون آون نشان داده شده است. در المان مورد نظر چهار نوع گرما شامل گرمای ورودی و خروجی ناشی از هدایت گرمایی، گرمای ورودی و خروجی ناشی از حرکت الیاف آغشته شده به رزین، گرمای ورودی از آون و گرمای تولید شده در حین فرآیند پخت وجود دارد. با توجه به ضخامت کم المان، تغییرات دما در جهت ضخامت بسیار ناچیز است. فرآیند در حالت پایدار قرار دارد و دما نیز در سرتاسر آون ثابت است. از اثر دما بر تغییرات چگالی و ظرفیت گرمایی، صرف نظر می‌شود.

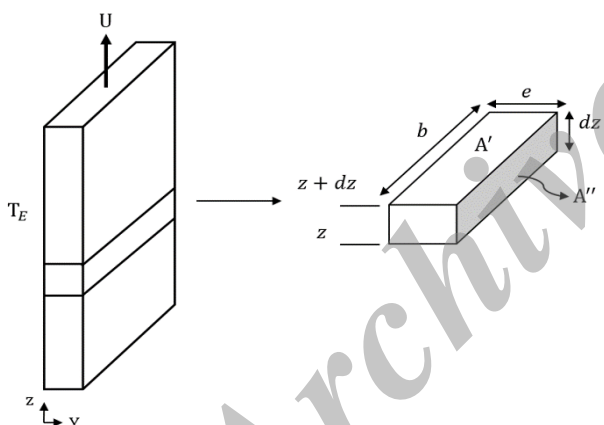
با در نظر گرفتن فرضیات بالا معادله موازنه انرژی حاکم بر این سیستم

به صورت رابطه (۱) می‌باشد [۱۴-۱۸].

$$[\dot{m}c_p T + (-KA' \frac{dT}{dz})]_z - [\dot{m}c_p T + (-KA' \frac{dT}{dz})]_{z+dz} - hA''(T - T_E) + \rho_R \phi V \Delta H \frac{d\alpha}{dt} = 0 \quad (1)$$

با توجه به تعریف مشتق وقتی $dz \rightarrow 0$ ، رابطه (۲) برقرار است.

$$-\rho_p U c_p \frac{dT}{dz} + K \frac{d^2 T}{dz^2} - \frac{2h}{e}(T - T_E) + \rho_R \phi \frac{d\alpha}{dt} \Delta H = 0 \quad (2)$$



شکل ۲ المان در نظر گرفته شده برای الیاف آغشته شده به رزین در داخل آون

اگر از انتقال حرارت به روش هدایت در مقابل انتقال حرارت ناشی از جریان صرف نظر شود، معادله نهایی به صورت رابطه (۳) خواهد بود.

$$-\rho_p U c_p \frac{dT}{dz} - \frac{2h}{e}(T - T_E) + \rho_R \phi \frac{d\alpha}{dt} \Delta H = 0 \quad (3)$$

شرط مرزی معادله ۳ درجه پخت ثابت در دمای اولیه می‌باشد (رابطه (۴)).

$$\alpha(T = T_0) = \alpha_0 \quad (4)$$

چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه پیش‌آغشته در معادله ۳ به صورت روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شوند [۱۹].

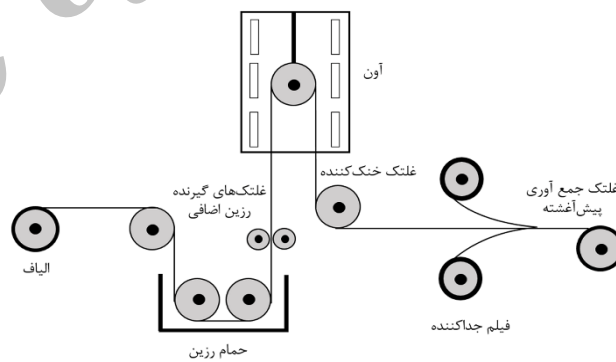
$$\rho_p = \phi \rho_R + (1 - \phi) \rho_F \quad (5)$$

$$c_p = \frac{\rho_R}{\rho_p} \phi c_{R_p} + (1 - \phi) \frac{\rho_F}{\rho_p} c_{F_p} \quad (6)$$

کننده در دو طرف آن قرار گرفته و سپس پیش‌آغشته بر روی غلتک جمع و در انبار نگهداری می‌شود [۵، ۶].

درجه پخت پیش‌آغشته معمولاً به عنوان یکی از مشخصه‌های پیش‌آغشته گزارش می‌شود اما در عین حال بر روی خواص دیگر پیش‌آغشته مانند خواص مکانیکی، جریان‌پذیری و چسبناکی نیز اثر گذار است [۷، ۸]. برای پیش‌بینی و کنترل درجه پخت، باید بتوان ارتباطی بین درجه پخت با پارامترهای فرآیندی مانند سرعت خط تولید پیش‌آغشته، دمای حمام آغشته‌سازی، ضخامت پیش‌آغشته، نوع الیاف و دمای آون برقرار نمود. دو روش می‌تواند مطرح شود: در روش اول (روش تجربی) این ارتباط با انجام آزمون‌های متعدد بدست می‌آید که مستلزم صرف هزینه و زمان است. در روش دوم این ارتباط با استفاده از مدلسازی ریاضی فرآیند بدست می‌آید. در نتیجه مدلسازی فرآیند تولید پیش‌آغشته‌ها با وجود پیچیده بودن به‌عنوان روش بهتر مطرح می‌شود.

تاکنون مطالعات بسیاری بر روی سینتیک پخت رزین اپوکسی و پیش‌آغشته‌های گرما سخت انجام شده است. در اکثر این مطالعات با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجزیه گرمایی به کمک دستگاه گرماسنج پویایی تفاضلی^۱، درجه پخت بر اساس تغییرات جریان گرما و تنها به عنوان تابعی از نوع رزین، دمای پخت و مدت زمان قرارگیری در دمای پخت با روش برازش^۲ مدل می‌شود [۹]. از این جمله سان و همکاران با انجام آزمون گرماسنجی پویایی تفاضلی دینامیک بر روی پیش‌آغشته کربن-اپوکسی، درجه پخت را با روش برازش مدل کردند [۱۰]. حیاتی و همکاران نیز در پژوهشی مشابه بر روی پیش‌آغشته شیشه-اپوکسی انجام دادند [۱۱].



شکل ۱ طرح کلی دستگاه پیش‌آغشته‌ساز

تفاوت عمده تحقیقات انجام شده، در یافتن یک مدل تجربی با دقت بیشتر برای برقراری ارتباط میان درجه پخت پیش‌آغشته با دما و زمان است. برخی تحقیقات به سمت محاسبه درجه پخت با استفاده از دمای انتقال شیشه‌ای سوق پیدا کرد که از این جمله نیز می‌توان به مقالات سبزواری [۱۲]، وانگ [۱۳] اشاره کرد.

در این مقاله با مدلسازی فرآیند انتقال گرما در حین عبور الیاف آغشته شده از داخل آون، درجه پخت پیش‌آغشته بر حسب پارامترهای فرآیندی مانند سرعت خط تولید، دمای آون، ضخامت پیش‌آغشته و مواردی این چنین تعیین می‌شود که تاکنون در این زمینه پژوهشی انجام نشده است. همچنین به بررسی اثر پارامترهای دیگری چون نوع الیاف و میزان رزین نیز پرداخته می‌شود. روش حل عددی به‌کار برده شده نیز به نحوی است که در عین

1. DSC
2. Fitting

تفاضلی بر روی رزین اپوکسی به صورت همدا، در محیط گاز نیتروژن با خلوص (۹۹/۹۹٪) و در ۵ دمای ۱۵۵، ۱۶۰، ۱۶۵، ۱۷۰ و ۱۷۵ درجه سانتیگراد انجام پذیرفت. بر این اساس در هر دما اطلاعات درجه پخت بر حسب زمان حاصل می‌شود که با برازش بر روی معادله ۷ پارامترهای سینتیک پخت رزین محاسبه می‌شود.

برای محاسبه پارامترهای سینتیک پخت رزین معادله ۷ به شکل معادلات (۱۴) تا (۱۶) بازنویسی شد.

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \ln(k_1 + k_2\alpha^m) + n\ln(1-\alpha) \quad (14)$$

$$\ln\left[\frac{\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)}{(1-\alpha)^n} - k_1\right] = \ln k_2 + m\ln\alpha \quad (15)$$

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) - \ln(k_1 + k_2\alpha^m) = n\ln(1-\alpha) \quad (16)$$

شیب نمودار $\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ بر حسب $\ln(1-\alpha)$ در معادله ۱۴، n را برای استفاده در معادله ۱۵ در اختیار قرار می‌دهد. ثابت سرعت k_1 برابر با مقدار سرعت تبدیل در زمان آغاز واکنش ($\alpha=0$) است، بنابراین با استفاده از شیب و نقطه تلاقی نمودار $\ln\left[\frac{\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)}{(1-\alpha)^n} - k_1\right]$ بر حسب $\ln(\alpha)$ ، مقادیر m و k_2 بدست می‌آیند که با قرار دادن آن‌ها در معادله ۱۶ و رسم نمودار $\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) - \ln(k_1 + k_2\alpha^m)$ بر حسب $\ln(1-\alpha)$ مقدار جدید n حاصل می‌شود. این محاسبات آنقدر تکرار شد تا اختلاف مقدار n بدست آمده با مقدار ماقبلش کمتر از یک درصد شود.

جدول ۱ مشخصات رزین اپوکسی مورد استفاده [۲۴].

مقدار	واحد	کمیت
۱۹۲-۱۸۵	$\frac{\text{gr}}{\text{eq}}$	وزن اکسی والان
۱۵۰-۱۱۰	p	گرانروی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد
۲/۱	$\frac{\text{J}}{\text{gr} \cdot ^\circ\text{K}}$	ظرفیت گرمایی ویژه
۱/۱۳	$\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$	چگالی

در ادامه کار برای محاسبه Ea_1 ، A_1 ، A_2 و Ea_2 ، معادله (۸) و (۹) به صورت روابط (۱۷) و (۱۸) بازنویسی شد.

$$\ln k_1 = \ln A_1 - \frac{Ea_1}{RT} \quad (17)$$

$$\ln k_2 = \ln A_2 - \frac{Ea_2}{RT} \quad (18)$$

با استفاده از شیب نمودارهای $\ln k_1$ و $\ln k_2$ بر حسب $\frac{1}{T}$ به ترتیب مقادیر $\frac{Ea_1}{R}$ و $\frac{Ea_2}{R}$ و با استفاده از عرض از مبدا آن‌ها به ترتیب مقادیر $\ln A_1$ و $\ln A_2$ بدست آمد.

۵- نتایج و بحث

پارامترهای سینتیک رزین اپوکسی با استفاده از نتایج آزمون گرماسنجی پوششی تفاضلی و براساس مدل کمال در جدول ۲ آورده شده است. همچنین

معادله خود کاتالیستی کمال برای بیان سرعت پخت رزین به صورت رابطه (۷) می‌باشد [۲۰-۲۲].

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha^m)(1-\alpha)^n \quad (7)$$

ثوابت سرعت در معادله ۷ بر اساس رابطه آرنیوس و مطابق معادله (۸) و (۹) محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$k_1 = A_1 e^{-\frac{Ea_1}{RT}} \quad (8)$$

$$k_2 = A_2 e^{-\frac{Ea_2}{RT}} \quad (9)$$

۳- روش حل مدل

با استفاده از نرم افزار میپل^۱ برنامه رایانه‌ای نوشته شد که اساس آن بر حل عددی به روش تکرار است. در این برنامه ابتدا طول آون (L) به بازه‌های بسیار کوچک (i قسمت) تقسیم می‌شود. در هر بازه یک دما حدس زده می‌شود ($T_{i,j}$ در $j=1$)، سپس با استفاده از معادلات ۱۰ و ۱۱ $\left(\frac{dT}{dz}\right)_{i,j}$ محاسبه می‌شود. در نهایت با استفاده از معادله ۱۲ دمای تکرار بعدی به دست می‌آید.

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{i,j} = A \exp\left(-\frac{E}{RT_{i,j}}\right) \alpha_{i-1,j}^m (1-\alpha_{i-1,j})^n \quad (10)$$

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{i,j} = -\frac{2h}{\rho_p U c_p e} (T_{i,j} - T_E) + \frac{\rho_R \phi}{\rho_p U c_p} \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{i,j} \Delta H \quad (11)$$

$$T_{i,j+1} = \left(\frac{dT}{dz}\right)_{i,j} dz + T_{i,j} \quad (12)$$

اگر $T_{(i,j+1)} - T_{(i,j)} \leq \xi$ یا $T_{(i,j+1)} - T_{(i,j)} \geq \xi$ عنوان دمای بازه i ثبت می‌شود. در این صورت برای یافتن درجه پخت بازه i از معادله ۱۳ استفاده می‌شود. سپس یک واحد به i اضافه می‌شود و روند بیان شده دوباره تکرار می‌شود.

$$\alpha_{i,j} = \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{i,j} dt + \alpha_{i-1,j} \quad (13)$$

اگر $T_{(i,j+1)} - T_{(i,j)} \geq \xi$ یا $T_{(i,j+1)} - T_{(i,j)} \leq \xi$ باشد آنگاه یک واحد به j اضافه می‌شود و روند بیان شده دوباره تکرار می‌شود. در این حالت دمای بدست آمده از معادله ۱۲ به عنوان حدس بعدی استفاده می‌شود. نکته قابل توجه این است که با این روش حل، دما در هر بازه ثابت است (پخت همدا) ولی در مجموع شاهد یک پخت دینامیک هستیم.

۴- تجزیه

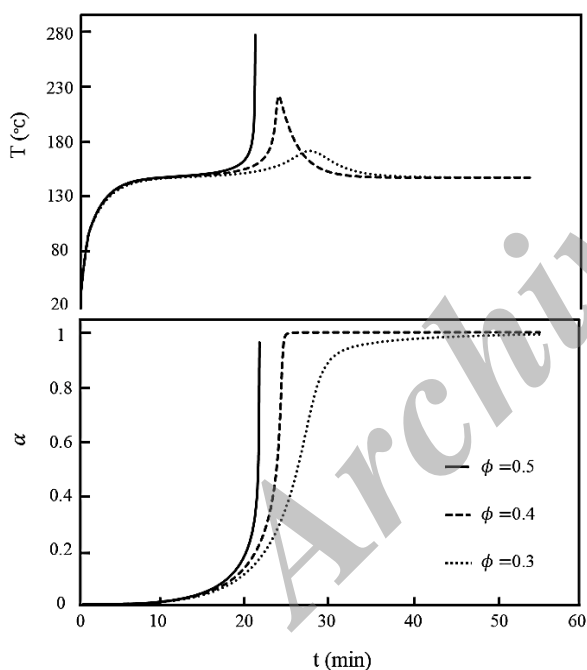
در این پژوهش از رزین اپوکسی مایع با کد تجاری ایپون ۸۲۸ محصول شرکت شل^۲ استفاده شده است. مشخصات رزین اپوکسی در جدول ۱ آمده است [۲۴]. همچنین از دی سیان دی آمید^۳ محصول شرکت مرک^۴ با ابعاد کمتر از ۱۰ میکرون به عنوان عامل پخت استفاده شده است.

برای بدست آوردن پارامترهای سینتیک پخت رزین، از گرماسنج پوششی تفاضلی ساخت شرکت متلر^۵ استفاده شده است. آزمون گرماسنجی پوششی

1. MAPLE
2. Shell
3. DICY
4. Merck
5. Mettler

نکته قابل توجه این است که اندازه پیک دمایی بدست آمده به میزان رزین بستگی دارد در حالیکه در آزمون گرماسنجی پویشی تفاضلی مقدار رزین ثابت و بسیار ناچیز است. همچنین با خروج الیاف آغشته‌شده به رزین از داخل آون، دما به صورت یک تابع نمایی کاهش می‌یابد تا به دمای محیط برسد. زمان یا مسافت لازم جهت رسیدن به دمای محیط خود یکی دیگر از نکات مهم دستگاه پیش‌آغشته‌ساز است.

در شکل ۴ نمودارهای دما و درجه پخت بر حسب زمان برای الیاف شیشه آغشته‌شده به رزین اپوکسی در سه کسر حجمی مختلف رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هرچه کسر حجمی رزین (با فرض ثابت بودن ضخامت پیش‌آغشته) افزایش یابد درجه پخت پیش‌آغشته در زمان‌های کمتر به درجه مشخصی (معمولاً بین ۰/۲ تا ۰/۳ در پیش‌آغشته‌های تجاری) می‌رسد. دلیل این امر آن است که با افزایش کسر حجمی رزین گرمای ناشی از واکنش پخت افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به کمتر بودن ظرفیت گرمایی رزین اپوکسی نسبت به الیاف شیشه، افزایش کسر حجمی رزین ظرفیت گرمایی پیش‌آغشته را نیز کاهش می‌دهد و در نتیجه گرمای کمتری برای افزایش دما نیاز دارد. نکته قابل توجه در شکل ۴ این است که در کسر حجمی ۰/۵ آنقدر گرمای آزاد شده توسط رزین زیاد است که با افزایش ناگهانی و بسیار دما، سیستم به سمت سوختن محصول خروجی پیش می‌رود.



شکل ۴ تغییرات دما و درجه پخت بر حسب زمان برای الیاف شیشه آغشته‌شده به رزین اپوکسی با سه کسر حجمی مختلف.

نوع الیاف مورد استفاده در ساخت پیش‌آغشته نیز بر درجه پخت تاثیر می‌گذارد. در شکل ۵ دما و درجه پخت بر حسب زمان عبور از آون برای سه نوع الیاف کربن، شیشه و کولار رسم شده است.

اثر گذاری نوع الیاف با تغییر دو پارامتر چگالی و ظرفیت گرمایی پیش‌آغشته خواهد بود. در جدول ۴ مقادیر چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه برای سه نوع الیاف شیشه، کربن و کولار آمده است. به طور کلی افزایش چگالی و ظرفیت گرمایی الیاف باعث افزایش چگالی و ظرفیت گرمایی

برای انجام محاسبات عددی، چگالی الیاف طبق [۲۵] برابر $2/5 \frac{gr}{cm^3}$ و طبق [۲۶] ظرفیت گرمایی ویژه آن $\frac{1}{756} \frac{J}{g \cdot mol \cdot K}$ در نظر گرفته شد. ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز $2 - 5/54 \times 10^{-2} \frac{J}{cm^2 \cdot min \cdot K}$ است [۲۷] و فرض اولیه مقادیر پارامترهای مدل در جدول ۳ آمده است.

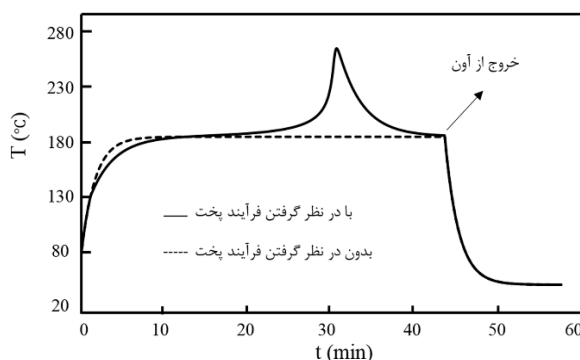
تصور غالب این است که با ورود الیاف شیشه آغشته‌شده به رزین به داخل آون، دمای این مجموعه افزایش یافته تا به دمای آون برسد. برای بررسی این موضوع، معادله ۱۳ یکبار با در نظر گرفتن پخت و بار دیگر بدون در نظر گرفتن پخت حل شد (شکل ۳).

جدول ۲ مقادیر پارامترهای سینتیکی مدل کمال

پارامتر	واحد	مقدار
A ₁		$7/702 \times 10^{11}$
A ₂		$1/021 \times 10^{11}$
Ea ₁	$\frac{J}{g \cdot mol}$	۱۲۴۸۰۹/۷۶۸
Ea ₂	$\frac{J}{g \cdot mol}$	۹۹۶۰۱/۷۲
m	-	۰/۹۳۲
n	-	۱/۱۹۸
R	$\frac{J}{g \cdot mol \cdot K}$	۸/۳۱۴
ΔH	$\frac{J}{g}$	۱۲۰

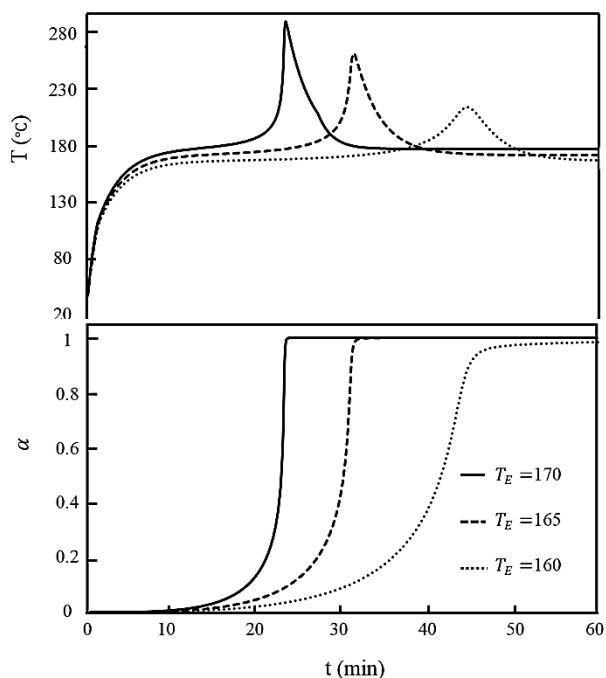
جدول ۳ فرض اولیه مقادیر پارامترهای فرآیندی

کمیت	واحد	مقدار
سرعت خط تولید پیش‌آغشته	$\frac{m}{min}$	۰/۶
دمای آون	°C	۱۷۰
کسر حجمی رزین اپوکسی	-	۰/۴



شکل ۳ تغییرات دمای الیاف شیشه آغشته‌شده به رزین اپوکسی بر حسب زمان در دو حالت با در نظر گرفتن فرآیند پخت و بدون لحاظ فرآیند پخت.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود تنها در حالتی که فرآیند پخت در سیستم اتفاق نیفتد، دمای الیاف آغشته‌شده به رزین از دمای محیط آغاز و در نهایت با دمای آون هم‌دما خواهد شد و با وجود فرآیند پخت، دما ابتدا کمتر از حالت بدون پخت و در ادامه بیشتر از دمای آون نیز خواهد شد. این پدیده بدلیل این است که فرآیند پخت در ابتدا نیازمند گرفتن گرما برای آغاز واکنش پخت است ولی با توجه به گرمازا بودن واکنش پخت رزین اپوکسی، در نهایت دمای الیاف آغشته‌شده به رزین از دمای آون بیشتر می‌شود.



شکل ۶ تغییرات دما و درجه پخت برحسب زمان برای الیاف شیشه آغشته شده به رزین اپوکسی در سه دمای آن مختلف.

همان گونه که انتظار می‌رفت با افزایش سرعت خط تولید پیش‌آغشته، درجه پخت در یک زمان مشخص کاهش می‌یابد. این به دلیل زمان کمتر حضور الیاف آغشته شده به رزین در داخل آن است. بدیهی است هر چه زمان پخت کمتر شود، درجه پخت نیز کاهش یابد. نکته قابل توجه این است که تغییری کوچک در سرعت خط تولید پیش‌آغشته، موجب تغییر بسیار زیادی بر درجه پخت خواهد شد.

با توجه به نتایج بدست آمده از مدل می‌توان گفت نتایج روند کیفی صحیح و مشخصی دارد. همچنین مقایسه نتایج مدل با نتایج تجربی بدست آمده از دستگاه پیش‌آغشته‌ساز و اصلاح مدل ارائه شده از جمله فعالیت هایی است که در پژوهش‌های بعدی دنبال می‌شود.

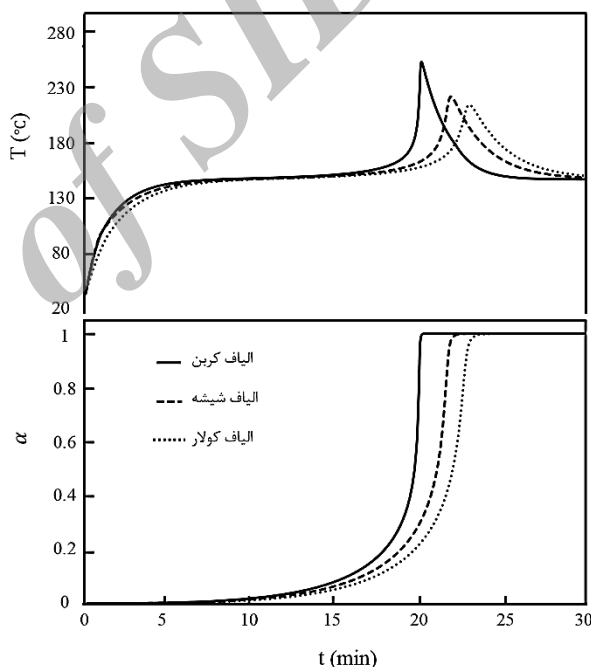
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با نوشتن معادله موازنه انرژی برای الیاف آغشته شده به رزین در داخل آن، معادله انتقال حرارت حاکم بر سیستم بدست آمد. سپس معادلات انتقال حرارت در پیش‌آغشته و سینتیک پخت رزین به طور همزمان به کمک برنامه رایانه‌ای در محیط نرم افزار میپل حل شد. نتایج بدست آمده نشان داد که هر چه میزان رزین پیش‌آغشته بیشتر باشد، در ابتدا دما و درجه پخت کمتر خواهد بود اما با آزاد شدن گرمای واکنش پخت، سرعت تغییرات دما و درجه پخت افزایش می‌یابد. همچنین نوع الیاف نیز بر درجه پخت پیش‌آغشته اثر گذار است بطوریکه هر چه الیاف مورد استفاده چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه بالاتری داشته باشد، دما و درجه پخت پیش‌آغشته کمتر خواهد بود. در پایان نیز همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش دمای آن، دما و در نتیجه درجه پخت پیش‌آغشته افزایش و با افزایش سرعت خط تولید پیش‌آغشته، دما و درجه پخت پیش‌آغشته کاهش می‌یابد.

پیش‌آغشته می‌شود. هر چه ظرفیت گرمایی پیش‌آغشته بیشتر باشد، برای رسیدن به درجه پخت مشخصی، به میزان گرمای بیشتری نیاز دارد. هر چه چگالی الیاف بیشتر باشد میزان گرمای آزاد شده توسط رزین کمتر خواهد بود. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود هر چند الیاف کولار نسبت به الیاف کربن و شیشه چگالی کمتری دارد اما دلیل اینکه ظرفیت گرمایی آن دو برابر الیاف شیشه و کربن است در نهایت دمای پیش‌آغشته آن کمتر است و در زمان بیشتری به درجه پخت مشخصی می‌رسد.

جدول ۴ مقادیر چگالی و ظرفیت گرمایی برای الیاف مختلف [۲۵-۲۶].

نوع الیاف	چگالی ($\frac{gr}{cm^3}$)	ظرفیت گرمایی ویژه ($\frac{J}{gr \cdot ^\circ K}$)
شیشه	۲/۵	۰/۷۵۶
کربن	۱/۷۶	۰/۷۹۴
کولار	۱/۴۴	۱/۴۲۰

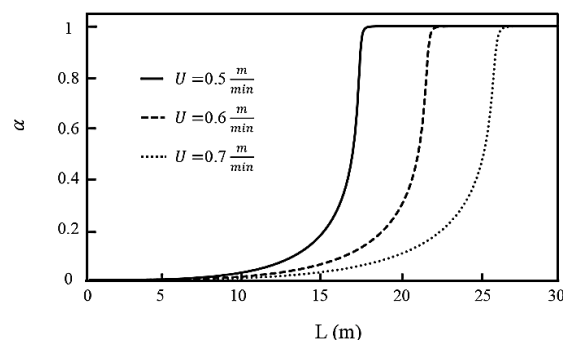


شکل ۵ تغییرات دما و درجه پخت برحسب زمان برای سه نوع الیاف مختلف آغشته‌سازی شده با رزین اپوکسی.

در شکل ۶ درجه پخت الیاف شیشه آغشته شده به رزین اپوکسی در سه دمای آن متفاوت بر حسب طول آن ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای آن، در یک زمان مشخص، درجه پخت پیش‌آغشته افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه تاثیر پذیری زیاد درجه پخت از دمای آن است. با افزایش دما، پیک گرمای که نشان دهنده‌ی واکنش پخت می‌باشد، به سمت زمان‌های کمتر میل می‌کند. بدیهی است که هر چه دما بالاتر باشد انرژی اکتیواسیون لازم جهت انجام واکنش پخت سریعتر تامین می‌شود و این واکنش در زمان‌های کمتر شروع می‌شود.

سرعت خط تولید پیش‌آغشته یکی از مهمترین عوامل اثر گذار بر درجه پخت پیش‌آغشته است. در شکل ۷ درجه پخت الیاف شیشه آغشته شده به رزین بر حسب طول آن در سرعت خط تولید پیش‌آغشته مختلف نشان داده شده است.

- [2] Beheshty, M. H. and Heidary, A.R. "Science and Technology of Prepregs", Iran Journal Polymer Science and Technology, Vol. 4, No. 1, pp. 34-47, 1991. (In Persian)
- [3] Mazumdar, S. K., "Composites manufacturing : materials, product, and process engineering", pp. 58-59, USA :CRC Press LLC, 2000.
- [4] Vafayan, M. Beheshty, M. H. Ghoreishy, M. H. R. Abedini, H., "Advanced integral isoconversional analysis for evaluating and predicting the kinetic parameters of the curing reaction of epoxy prepreg", Thermochimica Acta, Vol. 557, pp. 37-43, 2013.
- [5] Hayes, B. S. Seferis, J. C., "Simulation Engineering of Polymeric Prepreg Composite Systems", PhD Thesis, University of Washington, Washington, 1997.
- [6] prepreg, <http://www.hexcel.com>, available in March 2005
- [7] Shaghghi, S. Beheshty, M. H. Rahimi, H., "Preparation and Rheological Characterization of Phenolic/Glass Prepregs", Iran Polymer Journal, Vol. 20, No. 12, pp. 969-977, 2011.
- [8] Shaghghi, S. Beheshty, M. H. Rahimi, H. "Preparation of phenolic-glass prepregs and investigation the effect of phenolic resin type on their properties", MSc Thesis, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, 2010. (In Persian)
- [9] Jubslip, C. Punson, K. Takeichi, T. Rimdusit, S., "Curing Kinetics of Benzoxazine- Epoxy Copolymer Investigated by non-Isothermal Differential Scanning Calorimetry", Polymer Degradation and Stability, Vol. 95, pp. 918-924, 2010.
- [10] Sun, L. Pang, S. Sterling, A. M. Negulescu, I. I. Stubblefield, M. A., "Dynamic Modeling of Curing Process of Epoxy Prepreg", Journal of applied polymer science, Vol. 86, pp. 1911-1923, 2002.
- [11] Hayaty, M. Beheshty, M. H. Esfandeh, M., "Cure Kinetics of a Glass/Epoxy Prepreg by Dynamic Differential Scanning Calorimetry", Journal of applied polymer science, Vol. 120, pp. 62-69, 2011.
- [12] Sabzevari, S. M. Alavi-Soltani, S. Minaie, B., "New Method for Estimating the Extent of Curing of Thermosetting Prepregs", Journal of applied polymer science, Vol. 121, pp. 883-891, 2011.
- [13] Wang, Q. Storm, B. K. Houmoller, L. P., "Study of the Isothermal Curing of an Epoxy Prepreg by Near-Infrared Spectroscopy", Journal of applied polymer science, Vol. 87, pp. 2295-2305, 2003.
- [14] Zhang, J. Xu, Y.C. Huang, P., "Effect of Cure Cycle on Curing Process and Hardness for Epoxy Resin", Express Polymer Letters, Vol. 3, No. 9, pp. 534-541, 2009.
- [15] Blest, D. C. Duffy, B. R. Mckee, S. Zulkifly, A. K., "Curing Simulation of Thermoset Composites", Composite: Part A, Vol. 30, pp. 1289-1309, 1999.
- [16] Ghoreishy, M. H. R. Rafei, M. Bakhshandeh, G. R. Nasiri, M., "Computer Simulation of Cure Process of an Axisymmetric Rubber Article Reinforced by Metal Plates Using Extended Abaqus Code", Iran Journal Polymer Science and Technology, Vol. 23, No. 2, pp. 121-131, 2010. (In Persian)
- [17] Loos, A. C. Springer, G. S., "Curing of Epoxy Matrix Composites, Composite Materials", Vol. 17, pp. 135-169, 1983.
- [18] Ghoreishy, M. H. R. Naderi, G., "The Three Dimensional Simulation and Development of a Computer Software for Rubber Curing Process by Finite Element Method", Iran Journal Polymer Science and Technology, Vol. 17, No. 1, pp. 21-28, 2004. (In Persian)
- [19] Behzad, T. Sain, M. "Finite Element Modeling of Polymer Curing in Natural Fiber Reinforced Composites", Composites Science and Technology, Vol. 67, pp. 1666-1673, 2007.
- [20] Atarsia, A. Boukhili, R., "Relationship Between Isothermal and Dynamic Cure of Thermosets Via the Isoconversion Representation", polymer Engineering and Science, Vol. 40, No. 3, pp. 607-620, 2000.
- [21] Kamal, M. R. Sourour, S., "Kinetics and thermal characterization of thermoset cure", polymer Engineering and Science, Vol. 13, pp. 59-64, 1973.
- [22] Kamal, M. R. Sourour, S., "Differential Scanning Calorimetry of Epoxy Cure: Isothermal Cure Kinetics", Thermochimica Acta, Vol. 14, pp. 41-59, 1976.
- [23] Lam, P. W. K. Plaumann, H. P. Tran, T., "An Improved Kinetic Model for the Autocatalytic Curing of Styrene-Based Thermoset Resins", Journal of applied polymer science, Vol. 41, pp. 3043-3057, 1990.
- [24] Technical data sheet-Epon828, <http://www.Momentive.com>, available in September 2005.
- [25] Krug, D. J. Asuncion, M. Z. Popova, V. Laine, R. M., "Transparent Fiber Glass Reinforced Composites", Composites Science and Technology, Vol. 77, pp. 95-100, 2013.
- [26] Bitzer, T., "Honeycomb technology—materials, design, manufacturing, applications and testing", pp. 86, London: Chapman and Hall, 1997.
- [27] Ahn, K. J. Seferis, J. C., "Prepreg Process Analysis", Polymer Composite, Vol. 14, No. 4, pp. 349-360, 1993.



شکل ۷ تغییرات درجه پخت الیاف شیشه آغشته شده به رزین اپوکسی بر حسب طول آون در سرعت خط تولید پیش‌آغشته مختلف.

۷- فهرست علائم

A	فاکتور پیش‌نمایی واکنش پخت
A'	سطح مقطع المان پیش‌آغشته
A''	سطح جانبی المان پیش‌آغشته
b	طول المان پیش‌آغشته
C	ظرفیت گرمایی
e	ضخامت المان پیش‌آغشته
Ea	انرژی فعالساز
h	ضریب انتقال گرمای جابجایی
K	ضریب انتقال گرمای هدایتی
k	ثابت سرعت واکنش پخت
L	طول آون
\dot{m}	سرعت جرمی جریان پیش‌آغشته
n و m	نماهای واکنش پخت
R	ثابت قانون گازها
T	متغیر دمای پیش‌آغشته
t	متغیر زمان
U	سرعت خط تولید پیش‌آغشته
V	حجم المان پیش‌آغشته
y	مختصات جهت عمود بر حرکت پیش‌آغشته
z	مختصات جهت حرکت پیش‌آغشته
علائم یونانی	
α	درجه پخت پیش‌آغشته
ΔH	گرمای کل واکنش پخت
ξ	مقدار بسیار ناچیز
ρ	چگالی
ϕ	کسر حجمی رزین اپوکسی
زیر نویس‌ها	
E	محیط (آون)
F	الیاف
P	پیش‌آغشته
R	رزین

۸- مراجع

- [1] Hoseini, S. A. V., Pol, M. H., "Investigation of the tensile and the flexural properties of the glass/epoxy composites reinforced with nanoclay particles", Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 7, pp. 103-108, 2014. (In Persian)