

بهینه سازی پخت رزین های فنولی تقویت شده با الیاف پنبه نسوز

Cure Optimization of Asbestos Reinforced Phenolic Resins

محمدحسین بهشتی^{۱*}، هادی دلبری^۲

۱ - تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند، گروه کامپوزیت و چسب

صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵

۲ - بابل، دانشگاه علوم و فنون مازندران، گروه مهندسی شیمی، صندوق پستی ۷۳۴

دریافت: ۸۳/۵/۲۷، پذیرش: ۸۳/۷/۱

چکیده

رزین فنولی یکی از رزین های گرماسخت و پرمصرف است که از قدمت زیادی برخوردار است. ویژگی های برجسته این رزین همچون پایداری گرمایی زیاد، مقاومت شیمیایی خوب و ارزان بودن سبب شده است که کاربردهای قابل توجهی داشته باشد. فرایند پخت این پلیمر فرایندی پیچیده و سخت است، زیرا علاوه بر نیاز به دما و فشار زیاد برای پخت، به دلیل تراکمی بودن واکنش پخت آن، برخی محصولات جانبی به شکل گاز آزاد می شود. این محصولات در قطعات کامپوزیتی به شکل حباب باقی می ماندند که پس از سخت شدن به شکل حفره های ریز داخلی ظاهر می شوند و بشدت بر خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه اثر نامطلوب می گذارند. بنابراین، کنترل چرخه پخت و بهینه کردن آن دارای اهمیت است. در این پژوهش، چرخه پخت اولیه ای با توجه به گرمانگاشت DSC رزین، برای کامپوزیت رزین فنولی تقویت شده با الیاف آزبست معین شد. نمونه هایی از این کامپوزیت در شرایط مختلف دما، فشار و زمان، قالبگیری شده و خواص آنها بدست آمد. سپس، شرایط پخت بهینه برای این سیستم با توجه به نتایج آزمایش ها مشخص شد. نتایج نشان می دهد که برای دست یابی به خواص مکانیکی مطلوب دمای ۱۶۰°C، فشار ۶۰ bar و زمان ۶۰ min برای این سیستم شرایط بهینه است.

واژه های کلیدی

رزین فنولی، پنبه نسوز، کامپوزیت، بهینه سازی، چرخه پخت

مقدمه

شکندگی بیش از حد قطعات پخت شده آنهاست. اولین بار بیکلند به روش های کنترل و توسعه واکنش آنها برای بدست آوردن محصولی مفید پی برد و با افزودن پرکننده های معدنی و پودر چوب، موادی مناسب بدست آورد و آنها را تحت فشار و دما قالبگیری کرد [۱-۳].

رزین های فنولی به سبب داشتن مزایایی چون مقاومت گرمایی عالی، مقاومت شیمیایی و محیطی، خواص الکتریکی خوب و همچنین قیمت کم جایگاه ویژه ای داشته و مصارف روزافزونی یافته اند. یکی از محدودیت های استفاده از این رزین ها، جمع شدگی زیاد و

Key Words

phenolic resin, asbestos, composite, optimization, cure cycle

فنولی مایع بر پایه رزول با شماره IL ۸۰۰ محصول شرکت رزیتان، با چگالی 1.17 g/cm^3 و گرانیوی $2-3 \text{ Pa.s}$ در 20°C برای آغشته‌سازی الیاف استفاده شد. پخت این رزین بدون استفاده از کاتالیزور اسیدی و در دماهای زیاد که در قسمت‌های بعد به آن اشاره می‌شود انجام شده است. لازم به یاد آوری است که هنگام پخت در دمای محیط این رزین‌ها معمولاً از کاتالیزور اسیدی استفاده می‌شود.

دستگاه‌ها

بررسی رفتار گرمایی رزین به کمک دستگاه STA مدل ۶۲۵ ساخت شرکت Polymer Laboratory انجام شد. آزمون خمش مطابق روش استاندارد ASTM DV۹۰ و به روش سه نقطه‌ای با استفاده از دستگاه Instron مدل ۶۰۲۵ انجام گرفت. همچنین، از سختی سنج Zwick مدل ۳۱۰۰ برای تعیین سختی نمونه‌های کامپوزیتی مطابق روش استاندارد ASTM D۲۲۴۰ استفاده شد. آزمون ضربه به روش آیزود روی نمونه‌های شکاف دار براساس روش استاندارد ASTM D۲۵۶ و با استفاده از دستگاه Zwick مدل ۵۱۰۲ انجام شد.

از پرس قالبگیری فشاری آزمایشگاهی Davanport ساخت انگلستان با محدوده دمایی قابل استفاده $30-300^\circ\text{C}$ و ظرفیت پرس ۲۵ ton (245 kN) برای پخت نمونه‌ها به شکل قالبگیری فشاری و همچنین، از گرمخانه‌ای با چرخه هوا برای پیش پخت کردن قطعات استفاده شد.

روش‌ها

روش تهیه قطعات کامپوزیتی

ابتدا از پارچه الیاف نمونه‌هایی در اندازه $11 \times 13 \text{ cm}^2$ بریده و بدقت توزین و سپس، به کمک غلتک‌های دستی به رزین فنولی نوع رزول آغشته شدند. پیش پخت نمونه‌ها در گرمخانه‌ای با دمای حدود $110-115^\circ\text{C}$ به مدت ۲۰ min انجام شد. سپس پارچه‌های پیش آغشته شده در شرایط مختلف در پرس آزمایشگاهی به شکل ورق (plate) به ابعاد $11 \times 13 \times 0.4 \text{ cm}^3$ پخت شدند. درصد وزنی الیاف نمونه‌ها با توجه به وزن اولیه پارچه‌ها و وزن نهایی ورق قالبگیری شده معین و سپس نمونه لازم برای آزمایش‌های خواص مکانیکی از آنها تهیه شد.

نتایج و بحث

برای تعیین شرایط اولیه پخت رزین، آزمون DSC روی آن انجام شد. نتایج این آزمون در شکل ۱ آمده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، نمودار دارای سه قسمت فرورفتگی و برآمدگی در دماهای ۶۸، ۱۲۶ و 164°C است. فرورفتگی اول پدیده‌ای گرماگیر را نشان می‌دهد که

خواص رزین فنولی پخت شده و کامپوزیت‌های آن، تابع میزان پیوندهای عرضی زنجیرهای پلیمر در واحد حجم پلیمر پخت شده است. این پیوندها به روش واکنش‌های موسوم به پخت ایجاد می‌شوند. واکنش‌های یاد شده برگشت‌ناپذیرند و از راه تشکیل پیوندهای شیمیایی میان زنجیرهای پلیمر خطی ایجاد و ساختاری سه بعدی پدید می‌آید. این واکنش‌ها از نوع پلیمرشدن تراکمی است و محصولات جانبی آزاد شده در صورت حبس شدن در قطعه، سبب به وجود آمدن حفره‌هایی در محصول و افت خواص کامپوزیت می‌شوند [۴،۵]. در رزین‌های فنولی نوع رزول علاوه بر گازهای آزاد شده از واکنش تراکمی، گاهی مقادیری حلال و رطوبت باقیمانده نیز آزاد می‌شود که باید برطرف شوند [۲]. بنابراین، پخت گرماسخت‌ها غالباً تحت فشار و در چرخه زمانی خاصی انجام می‌گیرد. فشار در خروج حباب‌ها و افزایش درصد حجمی الیاف مؤثر است و در صورت اعمال خلأ، رسیدن به قطعات بدون حفره را آسانتر می‌کند [۶].

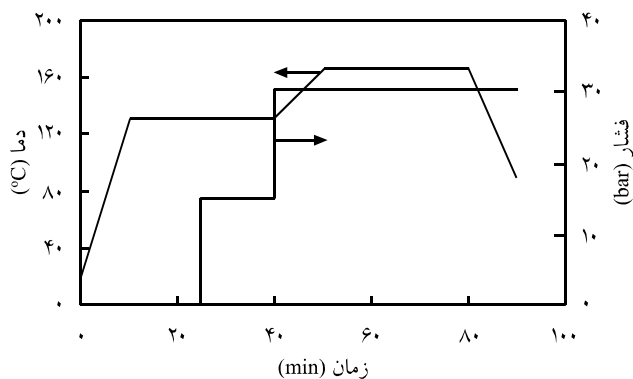
برگشت‌ناپذیری واکنش و اثر اساسی و تعیین‌کننده دما، فشار و زمان پخت بر روش و میزان تشکیل پیوندهای عرضی و در نتیجه بر خواص قطعه پخت شده، کنترل شرایط در حین فرایند پخت را بسیار مهم و قابل توجه می‌کند. با توجه به اثر شرایط پخت بر خواص قطعات کامپوزیتی و همچنین اقتصاد فرایند، بهینه‌سازی چرخه پخت از اهمیت زیادی برخوردار است و توجه بسیاری از پژوهشگران را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است [۷،۸].

استفاده از الیاف پنبه‌نسوز به دلیل مشکلات زیست محیطی، در کاربردهای عمومی بسیار محدود شده است و عمده مقالات منتشر شده در خصوص کامپوزیت‌های آن به سال‌های بسیار قدیم مربوط می‌شود [۹،۱۰]. در مقالات دهه اخیر [۱۱،۱۲] بطور عمده به جایگزینی الیاف دیگر و یا بهبود سیستم رزین پرداخته شده است. البته هنوز در کشور ما متأسفانه از این الیاف در ساخت لنت ترمز [۱۳] و همچنین قطعات سیمانی تقویت شده با آن استفاده می‌شود. لازم به یادآوری است که استفاده از کامپوزیت‌های الیاف پنبه‌نسوز در صنایع هوا فضا به دلیل خواص فداشوندگی خوب آنها همچنان ادامه دارد. بنابراین در این پژوهش، بهینه‌سازی شرایط پخت (شامل دما، فشار و زمان چرخه قالبگیری) کامپوزیت‌های فنولی تقویت شده با الیاف پنبه‌نسوز بررسی شده است.

تجربی

مواد

برای تهیه قطعات کامپوزیتی، از پارچه الیاف پنبه‌نسوز نوع کریزوتایل تهیه شده از بازار داخلی با چگالی $2/5 \text{ g/cm}^3$ و با آرایش (۹۰ و ۰) و سازگار با رزین فنولی و وزن واحد سطح 1100 g/cm^2 و همچنین از رزین



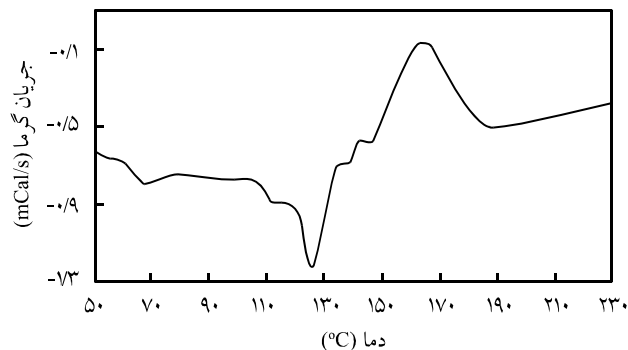
شکل ۲- نمودار چرخه پخت اولیه کامپوزیت پنبه‌نسوز - رزین فنولی.

در صورت استفاده از این چرخه، کیفیت ظاهری نمونه‌ها از نقطه نظر لخت شدن الیاف (نواحی عاری از رزین)، نواحی غنی از رزین و صافی سطح مطلوب است بنابراین، می‌توان از این چرخه به عنوان چرخه پخت اولیه استفاده کرد. برای بررسی متغیرهای فرایند پخت یعنی فشار قالبگیری، دما و زمان پخت، نمونه‌هایی در شرایط مختلف پخت و خواص آنها بررسی شد.

فشار قالبگیری بر میزان و نوع حباب‌های محبوس در قطعه، جریان رزین و در نهایت خواص قطعه تولیدی مؤثر است. در قالبگیری فشاری، فشار اعمال شده بر سطح قطعه مدنظر است. حداکثر فشارهای مورد نظر در این پژوهش شامل سه مقدار ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ bar است. بهتر آن است که اعمال فشار در چند مرحله انجام گیرد چون در این صورت رزین بخوبی جریان یافته و الیاف نیز به اندازه کافی خیس می‌شود و از بیرون زدن بیش از حد رزین به بیرون از قالب جلوگیری می‌شود و از طرفی حباب‌های بوجود آمده فرصت رشد ندارند و براحتی منتقل می‌شوند. در این پژوهش، فشار در دو مرحله اعمال شده است. در مرحله اول فشار ۱۵ bar و در مرحله دوم حداکثر مقادیر یاد شده در نظر گرفته شده است. با توجه به این نکات فشار در دو مورد اثر بیشتری خواهد گذاشت:

- فشرده شدن الیاف به همدیگر و بیشتر شدن کسر وزنی الیاف: بدین منظور میزان الیاف قطعات قالبگیری شده در فشارهای قالبگیری مختلف معین شد که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که با بیشتر شدن فشار، کسر وزنی الیاف بیشتر می‌شود. بنابراین اگر هدف افزایش کسر وزنی الیاف باشد اعمال فشار بیشتر روشی خوب (ولی محدود) است زیرا افزایش بیش از حد کسر وزنی الیاف سبب مهاجرت الیاف به سطح قطعه (لخت شدن الیاف) و در نتیجه کم شدن مقاومت محیطی قطعه تولیدی می‌شود.

- کاهش میزان حباب: با استفاده از روش استاندارد ASTM D 2۷۳۴

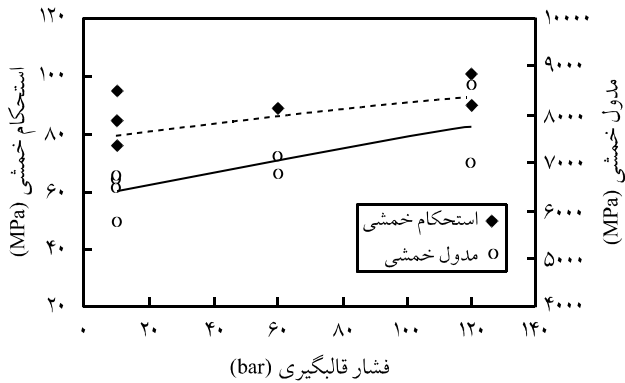


شکل ۱ - گرمانگاشت DSC رزین رزول با سرعت گرمادهی $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

احتمالاً ناشی از تبخیر حلال موجود در رزین است. فرورفتگی دوم نیز بیانگر پدیده‌ای گرماگیر است که می‌تواند باتوجه به دمای شروع آن از دمای 105°C ناشی از تبخیر آب موجود در رزین و همچنین بخارات آب ناشی از واکنش‌های تراکمی پخت باشد که این پدیده بر گرمایی پخت غلبه کرده است. واکنش‌های تراکمی پخت که در دماهای بیشتر نیز اتفاق می‌افتد همراه با آزاد سازی آب است که به شکل بخار خارج خواهد شد. بنابراین، تقابل دو واکنش گرمای پخت و گرماگیر تبخیر آب آزاد شده سبب می‌شود که به شکل پیکی گرماگیر با حداکثر سرعت در دمای 126°C ظاهر شود. دمای سوم یعنی 164°C دمایی را نشان می‌دهد که حداکثر سرعت پخت رزین در آن اتفاق می‌افتد. بدیهی است که این دما به سرعت گرمادهی بستگی دارد [۱۴] و با افزایش آن به دماهای بیشتر و با کاهش آن به دماهای کمتر انتقال می‌یابد [۱۵].

برای تعیین شرایط پیش پخت و چرخه اولیه پخت نمونه‌ها می‌توان از معیاری کیفی کمک گرفت. این معیار توجه به شکل ظاهری قطعات، میزان حفره موجود و صافی سطح آنهاست.

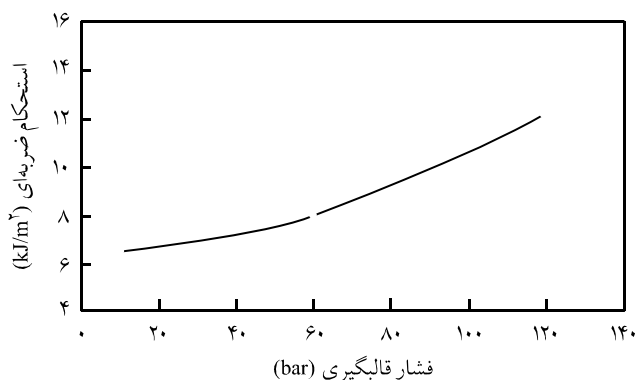
از طرفی، چون واکنش شبکه‌ای شدن در محدوده دمایی انجام می‌شود، بنابراین بهتر است با استفاده از چرخه پخت دومرحله‌ای، از احتمال افزایش بیش از حد دما جلوگیری و در نتیجه فشار را بهتر کنترل کرد به این ترتیب، قطعه تا دمای نهایی گرم می‌شود و در نتیجه کیفیت قطعات بهبود می‌یابد. چنانچه از چرخه پخت یک مرحله‌ای استفاده شود رزین بسیار زیادی از درون قالب به بیرون جریان می‌یابد و سبب جدا شدن رزین از الیاف می‌شود. اگر تمامی موارد یاد شده رعایت شود در نهایت قطعه‌ای با کمترین میزان حباب، سطح کاملاً صاف و شکل ظاهری مطلوب بدست می‌آید. باتوجه به موارد پیش گفته و همچنین گرمانگاشت رزین، نمونه‌هایی در شرایط مختلف پخت و کیفیت ظاهری آنها بررسی شد. با توجه به این قالبگیری‌ها، چرخه پخت اولیه‌ای که بهترین نمونه را نتیجه می‌دهد در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۴ - نمودار تغییرات استحکام و مدول خمشی بر حسب فشار قالبگیری.

افزایش استحکام و مدول خمشی می‌شود. نکته قابل توجه کاهش میزان پراکندگی نتایج در فشارهای زیاد قالبگیری است. این امر می‌تواند ناشی از کاهش میزان حفره‌ها و همچنین افزایش ۸ درصد مقدار الیاف باشد. نتایج آزمون استحکام ضربه‌ای در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استحکام ضربه‌ای نیز با افزایش فشار قالبگیری زیاد شده است که ناشی از افزایش مقدار الیاف و کاهش حفره‌هاست.

دما بیشترین اثر را بر میزان پخت قطعات دارد. اگر دمای قالبگیری از مقداری حداقل (که در آزمون DSC معلوم می‌شود) کمتر شود، هیچ‌گونه واکنش پختی به شکل مؤثر شروع نخواهد شد و اگر از حدی بخصوص بیشتر شود، سطح قطعه ممکن است بیش از حد پخت یا تخریب شود در حالی که عمق آن پخت نشده است. در این پژوهش، برای بررسی اثر دما بر خواص قطعه از دماهای قالبگیری نهایی ۱۴۰، ۱۶۰ و ۱۷۰°C استفاده شده است. افزایش دما در چند مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله اول دما حدود ۱۵ min در ۱۲۵°C ثابت نگه داشته می‌شود تا



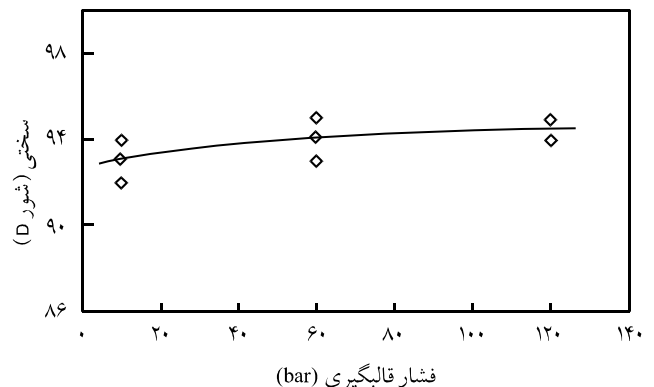
شکل ۵ - نمودار تغییرات استحکام ضربه‌ای بر حسب فشار قالبگیری.

جدول ۱ - نتایج آزمون اندازه‌گیری کسر وزنی الیاف، میزان حباب (درصد حفره) در فشارهای مختلف.

میزان حفره (%)	چگالی تجربی (g/cm ³)	چگالی نظری (g/cm ³)	الیاف (درصد وزنی)	فشار قالبگیری (bar)
۹/۵	۱/۵۲۷	۱/۶۸۸	۴۲/۳	۱۰
۴/۵	۱/۵۲۳	۱/۵۹۴	۴۹/۵	۶۰
۴/۳	۱/۵۲۳	۱/۵۹۱	۵۰/۳	۱۲۰

میزان حباب محبوس در قطعات تولید شده در فشارهای مختلف اندازه گرفته شد. نتایج حاصل از این آزمون نیز در جدول ۱ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که تغییر فشار نهایی قالبگیری از ۱۰ به ۶۰ bar در کاهش میزان حباب بسیار مؤثر است ولی، بعد از آن تغییرات کند شده است. البته با اعمال فشارهای بیشتر می‌توان به میزان حباب کمتری همان‌گونه که در مرجع [۸] اشاره شده دست یافت.

برای بررسی اثر فشار بر خواص مکانیکی قطعات کامپوزیتی آزمون‌های سختی و خمش نیز روی این قطعات انجام گرفت. سختی قطعه کامپوزیتی در صورتی که طی چرخه قالبگیری، الیاف آن لخت نشده باشد، فقط به سختی سطح آن برمی‌گردد و سختی سطح این قطعات بیش از همه به میزان پیشرفت واکنش پخت رزین آن مربوط می‌شود. نتایج این آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش فشار قالبگیری اثر چندانی بر سختی قطعات ندارد بنابراین، نظر می‌رسد که افزایش فشار در محدوده مورد بررسی در سینتیک پخت این نوع رزین‌ها بی‌اثر است. تغییرات استحکام و مدول خمشی بر حسب فشارهای مختلف قالبگیری در شکل ۴ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که افزایش فشار قالبگیری سبب

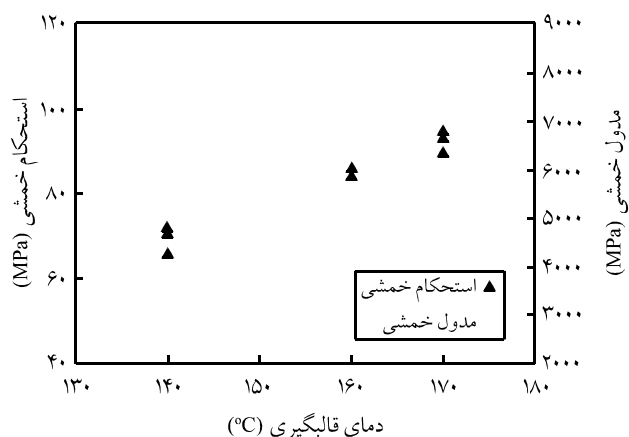


شکل ۳ - نمودار تغییرات سختی بر حسب فشار قالبگیری کامپوزیت پنبه‌نسوز - رزین فنولی.

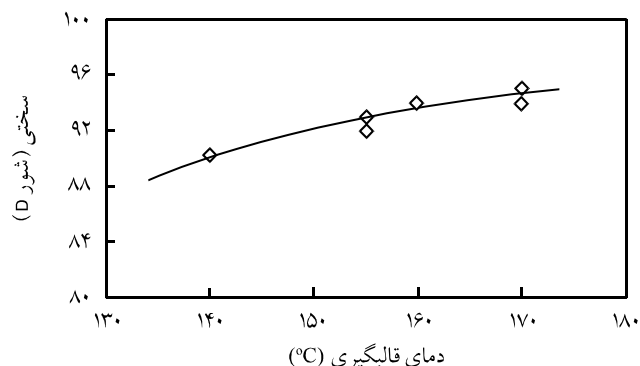
استحکام خمشی و مدول خمشی بر حسب دمای قالبگیری در شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که از این شکل پیداست، افزایش مقاومت خمشی همزمان با افزایش دمای قالبگیری است. گرچه در دمای حدود 170°C این تغییرات کند شده است که نشان‌دهنده نزدیک شدن میزان پیوندها به مقدار حداکثر آن است. همچنین، افزایش دمای پخت سبب کم شدن میزان خمش و بالا رفتن مدول خمشی قطعات می‌شود. این امر نیز به دلیل عدم امکان جابه‌جایی زنجیرهای پلیمری و کم شدن امکان تحرک آنها در اثر افزایش میزان پیوندهای عرضی است.

استحکام ضربه‌ای

نتایج آزمون استحکام ضربه‌ای این قطعات (شکل ۸) نشان‌دهنده افزایش نسبتاً قابل توجه این پارامتر در اثر افزایش دمای نهایی پخت است. دلیل این افزایش بیشتر شدن چگالی پیوندهای عرضی و کامل شدن پخت و در نتیجه افزایش استحکام ضربه‌ای پلیمر پخت شده است. بعد از دمای حدود 160°C این تغییرات تقریباً کند می‌شود. زمان چرخه قالبگیری بیشتر بر میزان پخت قطعه و میزان پخت نیز بر سایر خواص و مشخصه‌ها مؤثر است. زمان کامل شدن پخت معمولاً وابسته به دمای چرخه قالبگیری و ضخامت قطعه و نوع مواد اولیه است، بطوری که این پارامترها باید با هم موازنه شوند، بدین ترتیب که هر چه دمای پخت بیشتر شود از چرخه‌های کوتاه‌تر و هر چه دمای پخت کمتری انتخاب گردد از چرخه‌های پخت طولانی‌تر استفاده می‌شود. معمولاً تمایل کاربر و در نتیجه طراح، به استفاده از دماهای تا حد امکان بیشتر و چرخه‌های کوتاه‌تر برای رسیدن به حداکثر تولید است. با توجه به موارد یاد شده، چند قطعه با زمان‌های قالبگیری ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه شدند. دمای نهایی در تمام این قطعات 160°C و فشار نهایی قالبگیری



شکل ۷ - نمودار تغییرات استحکام و مدول خمشی بر حسب دمای قالبگیری.



شکل ۶ - تغییرات سختی بر حسب دمای قالبگیری.

احتمال افزایش بیش از حد دما در حین عملیات پخت از بین برود. مدت زمانی که نمونه در دمای نهایی نگه داشته می‌شود برابر ۳۰ min است. فشار نهایی نیز در حد ۶۰ bar تنظیم شده است.

نتایج آزمون سختی در شکل ۶ آورده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست بیشتر شدن دمای قالبگیری، سبب افزایش سختی شده که به دلیل پیشرفت بیشتر واکنش و کامل شدن واکنش تشکیل پیوندهای عرضی است. ولی، تغییرات آن در دماهای ۱۶۰ تا 170°C زیاد قابل توجه نیست چون واکنش در حدود این دما نسبتاً کامل می‌شود.

جریان یافتن رزین

میزان جریان یافتن هر سیال با گرانیوی آن نسبت عکس دارد. گرانیوی نیز با دما تغییر می‌کند. در عمل، هرگاه از دماهای بیشتر در قالبگیری استفاده شود میزان رزینی که از کناره‌های قالب بیرون می‌زند بیشتر خواهد بود. این امر (حتی اگر از پیش آغشته‌هایی با درصد وزنی الیاف تقریباً برابر استفاده شود) سبب افزایش درصد وزنی الیاف نمونه کاملاً پخت شده در دماهای بیشتر می‌شود که در نهایت به ارتقای خواص مکانیکی در نمونه خواهد انجامید. لازم به یادآوری است که مقدار بیرون زدن رزین به گونه‌ای نیست که سبب فقر رزینی یا نقاط خشک (dry spots) قطعه شود. فقر رزینی زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار الیاف بسیار زیاد و شرایط قالبگیری به ویژه سرعت و فشار قالبگیری نامطلوب باشد.

مقاومت خمشی قطعه

مقاومت خمشی قطعه علاوه بر میزان الیاف، به چگالی پیوندهای عرضی که خود وابسته به دماست بستگی دارد. مقدار پیوندهای عرضی وابسته به سینتیک واکنش تشکیل پیوندهای عرضی است که بطور مستقیم تحت تأثیر دمای قالبگیری قرار می‌گیرد. آزمون خمش برای قطعات پخت شده در دماهای گوناگون انجام شده و نتایج به شکل تغییرات

تغییرات استحکام و مدول خمشی (شکل ۱۰) در زمان‌های مختلف پخت نیز نشان می‌دهد که زمان ۶۰ min، زمان مناسبی برای پخت این نمونه هاست. این زمان، گرچه برای پخت قطعه‌ای آزمایشگاهی طولانی بنظر می‌رسد ولی طبیعت کند پخت رزین‌های فنولی رزول و قالبگیری فشاری که در آن زمان تابع ضخامت قطعه نیز است چنین زمان‌هایی را نتیجه می‌دهد.

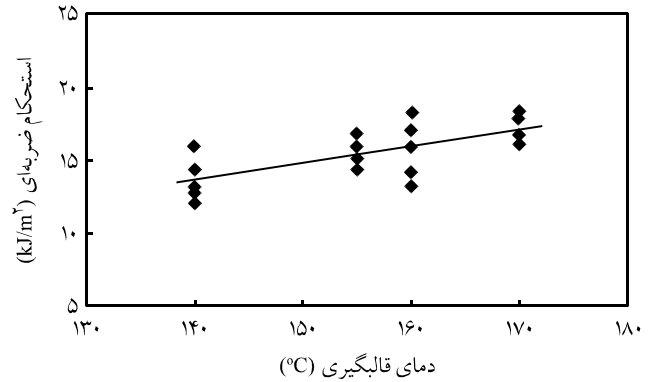
نتیجه‌گیری

با توجه به پژوهش‌های انجام شده نتایج زیر را می‌توان به شکل خلاصه بیان کرد:

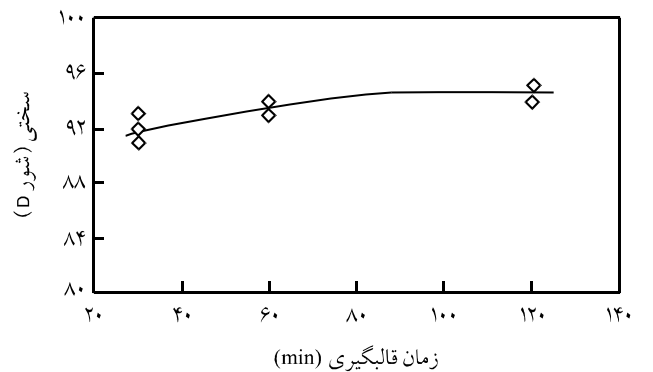
- در نمونه‌های کامپوزیتی پخت شده، افزایش دمای پخت سبب افزایش استحکام، مدول خمشی و استحکام ضربه‌ای قطعات شده است. این امر به دلیل افزایش چگالی پیوندهای عرضی و در نتیجه افزایش انرژی پیوندهای بین زنجیری است. این تغییرات پس از کامل شدن پخت، کند و بتدریج متوقف می‌شوند. همچنین، افزایش دمای پخت سبب افزایش دمای رزین و در نتیجه کاهش بیشتر گرانیوی در ابتدای واکنش پخت می‌شود. این امر در نهایت منجر به سیلان بیشتر رزین پس از اعمال فشار و در نتیجه بیشتر شدن کسر وزنی الیاف و تقویت خواص مکانیکی قطعه می‌شود. با توجه به تمام موارد یاد شده، بهترین دمای پخت برای سیستم کامپوزیت پنبه‌نسوز - رزین فنولی ۱۶۰°C پیشنهاد می‌شود.

- افزایش زمان پخت، از طرفی بشدت بر اقتصاد مسأله اثر منفی می‌گذارد و از طرفی دیگر اثری مطلوب بر خواص مکانیکی قطعات پخت شده دارد. بنابراین در مباحث پخت انتخاب میزان بهینه آن از مهمترین عوامل مسأله است. در نمونه مورد نظر در این پژوهش، افزایش زمان پخت سبب افزایش خواص فیزیکی و مکانیکی شد. این تغییرات پس از طی زمان حدود ۶۰ min چنان کند می‌شود که باتوجه به جنبه‌های اقتصادی فرایند زمان ۶۰ min برای سیستم مورد بررسی بهینه بنظر می‌رسد.

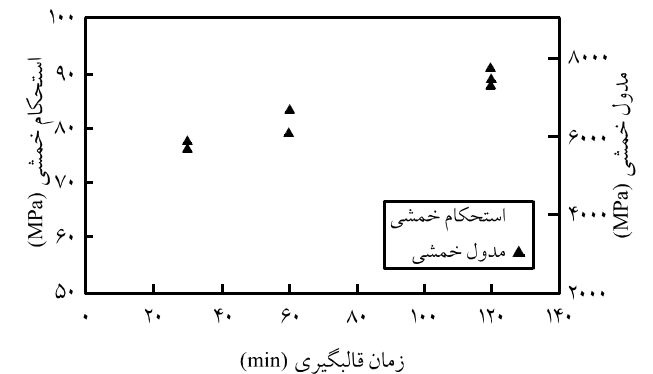
- افزایش فشار پخت برای نمونه‌های مورد نظر در این پژوهش، بیشترین اثر خود را بر چگالی و کسر وزنی الیاف داشت. ولی باید توجه داشت که استفاده از فشارهای بیشتر هزینه بیشتری را نیز در بر خواهد داشت. بهترین میزان برای این سیستم بخصوص، ۶۰ bar پیشنهاد می‌شود. این امر کاملاً در توافق با نتایج آزمون‌های خمشی و استحکام ضربه‌ای قطعات کامپوزیتی است.



شکل ۸- نمودار تغییرات استحکام ضربه‌ای بر حسب دمای قالبگیری.



شکل ۹- نمودار تغییرات سختی بر حسب زمان قالبگیری.



شکل ۱۰- نمودار تغییرات استحکام و مدول خمشی بر حسب زمان قالبگیری.

۶۰ bar بود. سپس سختی سطح نمونه‌ها اندازه‌گیری و تغییرات آن بر حسب زمان چرخه قالبگیری بررسی شد. همان‌طور که از شکل ۹ پیداست تغییرات سختی پس از زمان حدود ۶۰ min بسیار کند می‌شود که نشان‌دهنده کامل شدن نسبی پخت در حدود همین زمان است.

مراجع

1. Mark H.F., Bikales M.N., Overberger C.G., Menges G. and Kroschwitz J.I. (Eds.), *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, 2nd ed., **11**, John Wiley and Sons, New York, 45-95, 1987.
2. Knop A. and Pilato L.A., *Phenolic Resins: Chemistry, Applications and Performance*, Springer Verlag, Berlin, Chap. 12, 1985.
3. Brydson J.A., *Plastics Materials*, 5th ed., Butter Worts, London, 572-593, 1989.
4. Christopher C., Phenol Formaldehyde, In *HandBook of Thermoset Plastics*, Goodman S.H., 2nd ed., Noyes, Westwood, 26-67, 1998.
5. Kroschwitz I.J., Concise S.H., *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, Wiley, New York, 716-719, 1990.
6. Gutowski T.G., *Advanced Composites Manufacturing*, John Wiley and Sons, New York, 62-77, 1997.
7. Boey F.Y.C. and Lye S.W., Void Reduction in Autoclave Processing of Thermoset Composites: Part 1: High Pressure Effects on Void Reduction, *Composites*, **23**, 261-265, 1992.
8. Wang Q., He T., Xia P., Chen T. and Huang B., Cure Processing Modeling and Cure Cycle Simulation of Epoxy Terminated Poly (phenylene ether ketone), III-Determination of the Time of Pressure Application, *J. Appl. Polym. Sci.*, **66**, 1745-1750, 1997.
9. Shuman W.P. and Wronski J.P., Evaluation of Methods for the Determination of Resin Advancement in Asbestos-phenolic Prepregs, *Polym. Eng. Sci.*, **6**, 79-82, 1966.
10. Jacko M.G., Thermal Analysis of Friction Materials, *Polym. Prepr.*, **9**, 1026-1032, 1968.
11. Zlotnikov I.I., Obsekov G.V., Lisovskii V.V., Muradov G.S. and Solov ev G.N., Development of a New Binder for Friction Materials with Improved Ecological Properties, *Int. Polym. Sci. Technol.*, **20**, 70-71, 1993.
12. Jayashree B., Composites as Friction Materials: Recent Developments in Non-Asbestos Fiber Reinforced Friction Materials: A Review, *Polym. Compos.*, **18**, 378-396, 1997.
13. Jafari S.H., Fallahzadeh F. and Rana S.K., Effect of Post-curing on Frictional Behaviour of Non-woven Phenolic Composite in Automobile Clutch Facing, *Iran. Polym. J.*, **8**, 143-148, 1999.
14. Lam P.W.K., The Characterization of Thermoset Cure Behaviour by Differential Scanning Calorimetry, *Polym. Compos.*, **8**, 427-436, 1987.
15. Kiran E. and Iyer R., Cure Behaviour of Paper-Phenolic Composite Systems: Kinetic Modeling, *J. Appl. Polym. Sci.*, **51**, 353-364, 1994.