



بررسی پخت محیطی رزین‌های فنولی و کامپوزیت‌های آن

محمدحسین بهشتی*^۱، کاوه دوستخواه^۲

۱- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵

۲- تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، کدپستی ۱۴۱۸۷۶۱۱۳۵

دریافت: ۸۵/۳/۱۶، پذیرش: ۸۶/۲/۵

چکیده

رزین‌های فنولی یکی از رزین‌های مصنوعی گرماسخت با وزن مولکولی کم هستند که به روش تراکمی پلیمر و پخت می‌شوند. از خواص مهم این رزین‌ها می‌توان به مقاومت زیاد در برابر عوامل جوی، اکسایش گرمایی و مواد شیمیایی اشاره کرد. پخت این رزین‌ها به دو روش گرمایی و اسیدی دسته‌بندی می‌شود. پخت گرمایی رایج‌ترین روش پخت این رزین‌هاست که معمولاً در محدوده دمایی ۱۳۰-۱۸۰°C انجام می‌شود، ولی امکان پخت اسیدی آنها در دمای محیط نیز وجود دارد. در این مقاله، پخت محیطی رزین‌های فنولی نوع رزول به کمک پاراتولون سولفونیک اسید بررسی شده است. مقدار اسید مصرفی مناسب برای پخت محیطی دو نوع رزول برای حصول سختی و زمان ژل شدن مناسب معین شده است. به منظور بررسی رفتار پخت و پایداری گرمایی رزین‌های مورد بررسی، آزمون‌های DSC و TGA به کار گرفته شده است. همچنین، قطعات کامپوزیتی با آمیختن الیاف سوزنی پیوسته با رزین تهیه و به روش گرمایی و اسیدی زیر پرس پخت شده‌اند. با انجام آزمون‌های پایداری گرمایی، خواص مکانیکی و مقاومت شیمیایی کامپوزیت‌های پخت شده به دو روش اسیدی و گرمایی مقایسه شده است، نتایج نشان می‌دهد که مقدار بهینه اسید مصرفی برای پخت محیطی رزول با توجه به مقدار سختی و زمان ژل شدن برابر ۲۰ درصد وزنی رزین مصرفی است. با توجه به آزمون‌های انجام شده می‌توان گفت که خواص مکانیکی و پایداری شیمیایی نمونه‌های پخت شده به روش اسیدی مطلوب است. اما با این روش نمی‌توان به خواصی دست یافت که از راه پخت گرمایی حاصل می‌شود.

واژه‌های کلیدی

رزین فنولی،
پخت محیطی، رزول، مقاومت شیمیایی،
پاراتولون سولفونیک اسید

*مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
m.beheshty@ippi.ac.ir

Studying Room Temperature Curing of Phenolic Resin and their Composites

M.H. Beheshty¹ and K. Doustkhah²

1. Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14965/115, Tehran, Iran
2. South Tehran Branch, Islamic Azad University, Postal Code: 1418761135, Tehran, Iran

Abstract

Phenolic resins are synthetic low molecular weight thermoset resins which are polymerized and cured to higher molecular weights by condensation method. These resins have high weathering resistance, high oxidative thermal properties and good chemical resistance. Phenolic resins can be cured thermally or by acid curing. The most common method of curing phenolic resin is by thermal curing that takes place in the range of 130-180°C. At room temperature, however, phenolic resins are cured by acid catalysts. In this paper, room temperature curing of resol phenolic resin by para toluene sulphonic acid has been investigated. The acid quantity has been determined for room temperature curing of two types of resols to achieve a reasonable hardness and gelation time. Temperature curing and thermal stability of respective resins have been investigated by DSC and TGA, respectively. A glass-phenolic composite plate has been prepared and cured by these two methods. The results show that the optimum amount of acid is 20% by weight. Optimum mechanical properties, chemical resistance and thermal properties have been achieved for acid cured system. The hot cured resin, however, has better properties.

Key Words

phenolic resin,
room temperature curing,
resol, chemical resistance,
para toluene sulphonic acid

(* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: m.beheshty@ippi.ac.ir

مقدمه

رزین‌های فنولی یکی از رزین‌های ارزان و مقاوم گرمایی هستند که با وجود گذشت بیش از ۱۰۰ سال از ورود آنها به بازار [۱] هم‌چنان از کاربردهای قابل توجهی برخوردارند و روز به روز بر مقدار مصرف آنها افزوده می‌شود. لنت ترمز، صفحه کلاچ خودرو [۲]، آجرهای دیرگداز مورد استفاده در ساخت کوره‌ها، عایق‌های گرمایی صنعتی و کامپوزیت‌های فداشونده به کار رفته در صنایع هوا - فضا [۳] از نمونه کاربردهای این رزین است.

رزین‌های فنولی از واکنش فنول یا مشتقات آن با آلدهید در مجاورت کاتالیزور تهیه می‌شوند. بسته به نسبت مولی فنول و فرمالدهید و اسیدی یا بازی بودن کاتالیزور، رزین حاصل می‌تواند رزول یا نووالاک باشد [۴]. رزین‌های رزول به طور ذاتی گرماسخت‌اند و در اثر اعمال گرما شبکه‌ای و پخت می‌شوند.

رزین‌های نووالاک به تنهایی گرمانرم‌اند، اما با افزودن عامل پخت هگزامین به آنها قابل پخت شده و در اثر اعمال گرما پخت می‌شوند. واکنش‌های پخت گرمایی هر دو نوع رزین فنولی از نوع واکنش‌های تراکمی است و با آزاد شدن ماده‌ای با وزن مولکولی کم نظیر آمونیاک و آب همراه است. به همین دلیل، اعمال فشار زیاد در ساخت قطعات فنولی برای خروج این گازها لازم است [۴].

پژوهش‌های زیادی تا کنون درباره این رزین‌ها انجام شده است. بررسی متغیرهای مختلف سنتز این رزین‌ها [۵-۷]، چقرمه‌سازی به کمک لاستیک نیتریل [۸،۹] و سینتیک پخت گرمایی [۱۰] از نمونه این پژوهش‌هاست. در سال‌های اخیر، بعضی از پژوهشگران کاربرد در زمینه‌های نانو این ترکیبات را بررسی کرده‌اند [۱۱،۱۲]. پخت معمول و رایج رزین‌های فنولی، پخت گرمایی است که در محدوده دمایی ۱۳۰ تا ۱۷۰°C انجام می‌شود.

عمده پژوهش‌های انجام شده، در زمینه سامانه پخت گرمایی این رزین‌هاست. این رزین‌ها در دمای محیط یا در دماهای متوسط (۹۰°C-۵۰) به کمک ترکیبات اسیدی نیز پخت می‌شوند. پخت رایج اسفنج‌های فنولی، روش پخت اسیدی است [۱۳]، اما در این کاربرد تهیه قطعه‌ای متخلخل یعنی اسفنج مدنظر است. با این وجود، پخت اسیدی رزین‌های فنولی به ویژه برای تهیه قطعه‌ای عاری از تخلخل از موضوعاتی است که کمتر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

ولفرام (Wolfrum) و هرنشتاین (Ehrenstein) در پژوهشی، اثر غلظت اسید و دمای پخت را بر خواص مکانیکی دو نوع رزول مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۴]. آنها از پاراتولون سولفونیک اسید به مقدار ۲ تا ۱۷ درصد برای پخت در دماهای ۴۰ تا ۸۰°C استفاده کردند. تایدمن و

سن کلمنت (Tiedeman and Sanclemente)، با اصلاح شیمیایی رزول به وسیله موادی مانند آمین‌های آروماتیک، سرعت پخت را افزایش داده و زمان آن را از چند دقیقه در دمای زیاد، به چند ثانیه در دمای محیط کاهش دادند. محصول پخت شده، خواص مشابهی با رزین‌های پخت شده در روش‌های گرمایی داشته است [۱۵].

هانگ (Hong) و همکاران اثر سالیسیلیک اسید و مشتقات آن را بر پخت رزول بررسی کردند [۱۶]. مطالعات DSC آنها نشان می‌دهد که سرعت پخت با افزودن سالیسیلیک اسید افزایش می‌یابد، ولی خواص مکانیکی رزین تضعیف می‌شود.

در این سامانه، واکنش پخت نسبت به حالت معمول در دمای ۱۶۰°C، ۲۰°C زودتر شروع می‌شد. لازا (Laza) و همکاران اثر پاراتولون سولفونیک اسید را در غلظت‌های ۷۵ تا ۴ درصد بر پخت رزول مورد مطالعات گرمایی و رئولوژیکی قرار دادند [۱۷]. آنها گزارش کردند که هنگام پخت در دمای معین با افزایش مقدار اسید، T_g کاهش می‌یابد. همچنین، در غلظتی معین، با افزایش دمای پخت هم دما، T_g کاهش می‌یابد.

در این پژوهش، نظر به اهمیت پخت محیطی کامپوزیت‌های فنولی و همچنین اطلاعات کم منتشر شده در این زمینه، پخت دو نوع رزین فنولی نوع رزول در دمای محیط به کمک پاراتولون سولفونیک اسید به منظور حصول قطعه‌ای عاری از تخلخل بررسی شده است.

تجربی

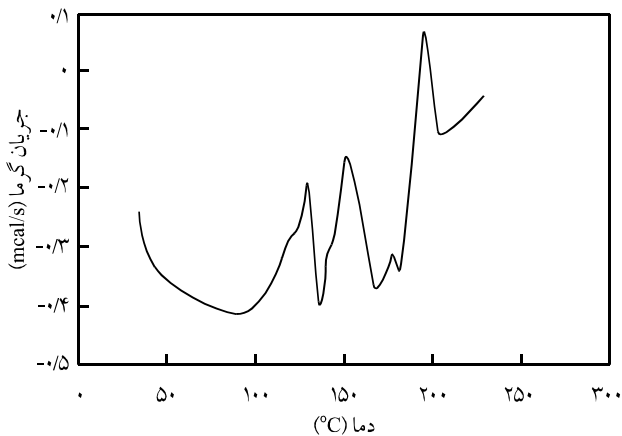
مواد

در این پژوهش، از رزین‌های رزول شرکت‌های فنول رزین (کد PR-۳۴۰) و آبشینه (کد PRR-۴۶۰۱) استفاده شده است. در ادامه برای اختصار، این رزین‌ها به ترتیب با عنوان‌های A و B نامیده می‌شوند. این رزین‌ها به حالت محلول و با حدود ۷۵ درصد وزنی مواد جامد به بازار عرضه می‌شوند.

برای پخت محیطی این رزین‌ها از پاراتولون سولفونیک اسید تجاری، برای تهیه صفحه‌های کامپوزیتی از پارچه الیاف شیشه سوزنی پیوسته (continuous filament mat) نوع E با وزن واحد سطح ۳۵۰ g/m^۲ تجاری و همچنین به منظور آزمون مقاومت شیمیایی از استون صنعتی استفاده شده است.

دستگاه‌ها

در این پژوهش، پرس پخت معمولی با ظرفیت ۳۰ تن، سختی سنج شور



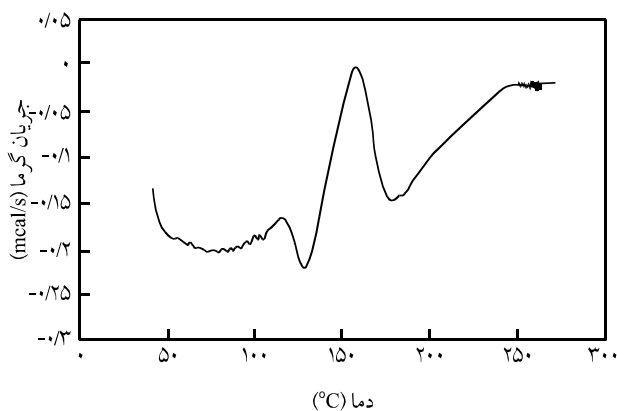
شکل ۱- گرمانگاشت رزین A با سرعت گرمادهی $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

پخت در دمای 159°C اتفاق افتاده است. مطابق شکل های ۱ و ۲ پخت این رزین ها، گرمایی است و رفتاری همانند عموم رزین های فنولی نشان می دهند.

بررسی زمان ژل شدن

شکل ۳ تغییرات زمان ژل شدن را در مقادیر مختلف پاراتولون سولفونیک اسید برای رزین های A و B نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش مقدار اسید، زمان ژل شدن ابتدا به سرعت کاهش می یابد، ولی پس از ۲۰ درصد برای رزین A و ۳۰ درصد برای رزین B این تغییرات بسیار کند می شود و افزایش بیشتر اسید تغییر چندانی بر زمان ژل شدن رزین ندارد.

نکته قابل توجه زمان ژل شدن طولانی تر رزین B در مقایسه با رزین A است. به عبارت دیگر رزین A سرعت واکنش دهی بیشتری دارد. این امر با نتایج پخت گرمایی رزین نیز تطابق دارد. همان طور که در بخش



شکل ۲- گرمانگاشت رزین B با سرعت گرمادهی $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

D از شرکت Zwick و دستگاه اندازه گیری زمان ژل شدن از شرکت Coudenhove & Hubner به کار گرفته شد. آزمون خمش به روش سه نقطه ای بر اساس استاندارد ASTM D790، با استفاده از دستگاه شرکت MTS با سرعت $5\text{mm}/\text{min}$ انجام شد و نتایج ذکر شده متوسط پنج اندازه گیری است. آزمون DSC با استفاده از دستگاه DSC ساخت PL و آزمون گرماوزنسنجی با استفاده از دستگاه TGA مدل ۱ Pyris ساخت شرکت Perkin Elmer با سرعت گرمادهی $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ در محیط خنثی انجام شد.

روش ها

از پاراتولون سولفونیک اسید به دلیل سازگاری خوب آن با رزین و همچنین قدرت اسیدی متوسط به عنوان عامل پخت استفاده شد. این ماده به همان شکلی که خریداری شده بود، در مقادیر مختلف به رزین فنولی اضافه و پس از اختلاط کامل، زمان ژل شدن آن اندازه گیری شد. همچنین، سختی آنها در زمان های مختلف معین شد.

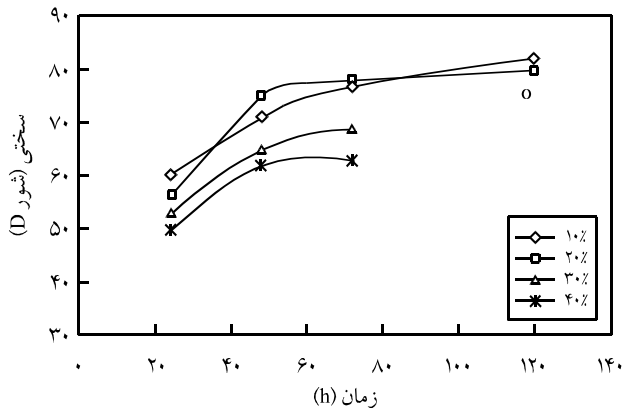
پارچه الیاف شیشه سوزنی به ابعاد $20 \times 20\text{ cm}$ با رزین فنولی قبل و بعد از افزودن اسید به مقدار ۲۰ درصد وزنی رزین، به روش دستی آغشته سازی شده و سپس چهار لایه آغشته شده روی هم قرار داده شد. نمونه عاری از اسید در فشار 120 bar در دمای 160°C به مدت 25 min زیر پرس پخت شد. نمونه حاوی اسید نیز در دمای محیط با همین فشار برای اطمینان از متراکم شدن لایه ها به هم پخت شد. مقدار الیاف این قطعات پس از پخت حدود ۶۵ درصد وزنی بوده است. نمونه های آزمون خمش از ورق های کامپوزیتی پخت شده به ابعاد $10 \times 60\text{ mm}$ به کمک دستگاه برش که تیغه آن به کمک آب سرد می شد، بریده شدند.

نتایج و بحث

بررسی رفتار پخت گرمایی

رفتار پخت رزین های فنولی مورد استفاده در این پژوهش قبل از افزودن ماده ای به آنها با DSC بررسی شد که نتایج آن در شکل های ۱ و ۲ آورده شده است. همان طور که شکل ۱ نشان می دهد، پخت رزین A از دمای حدود 110°C شروع و تا دمای 200°C ادامه دارد. بیشترین سرعت پخت رزین A در دمای 155°C مشاهده می شود.

ظهور پدیده پخت به شکل ۳ پیک متوالی، موضوعی در خور تأمل است و ممکن است ناشی از ساختار خاص این رزین یا غلبه موضعی واکنش های گرمایی در نتیجه تبخیر مواد فرار حاصل از پخت باشد که در رزول ها به طور عمده آب است. شکل ۲ نشان می دهد که پخت رزین B از دمای 130°C شروع و تا دمای 180°C ادامه دارد و بیشترین سرعت



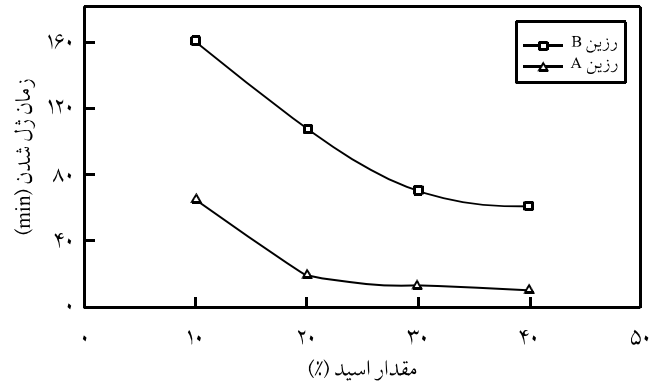
شکل ۵- تغییرات سختی بر حسب زمان در مقادیر مختلف اسید برای رزین B.

است و حتی پس از گذشت ۱۶ روز نیز سختی کمتری دارد. این امر می‌تواند ناشی از آن باشد که مقداری از اسید صرف پخت رزین می‌شود. اما، در صورت استفاده بیشتر از آن مقدار، اسید به حالت واکنش نکرده در رزین باقی مانده و سبب سختی کمتر آن می‌شود. شکل ۵ رفتار مشابهی را برای رزین B نشان می‌دهد. دست‌یابی به سختی مشخص در زمان کوتاه‌تر برای رزین B بیانگر سرعت واکنش دهی بیشتر این رزین است که با نتایج بخش‌های قبل تطابق دارد. نمونه‌ای از رزین‌های A و B به روش گرمایی کاملاً پخت شدند و سپس با اندازه‌گیری سختی مقدار ۹۲ شور D حاصل شد. این مقدار حداکثر سختی است که می‌توان در این رزین‌ها به دست آورد. با توجه به مقدار حداکثر سختی ۸۳ شور D حاصل از روش پخت اسیدی، می‌توان نتیجه گرفت که در روش پخت اسیدی نمی‌توان به حداکثر سختی لازم و به عبارت دیگر به همان مقدار چگالی اتصالات عرضی دست یافت، اما می‌توان به ۹۰ درصد آن نایل شد. از نتایج شکل‌های ۳ تا ۵ می‌توان نتیجه گرفت که مقدار بهینه پاراتولون سولفونیک اسید برای پخت محیطی رزین‌های رزول مورد استفاده در این پژوهش برابر ۲۰ درصد وزنی رزین مصرفی است.

بررسی پایداری گرمایی

پایداری گرمایی نمونه‌ای از رزین A که به روش گرمایی و همچنین نمونه‌ای که به روش اسیدی (با مقدار ۲۰ درصد) به طور کامل پخت شده بود به روش گراموزن سنجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمون در شکل ۶ آورده شده است.

همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد کاهش وزن نمونه پخت شده به روش گرمایی از دمای حدود ۲۰۰°C آغاز می‌شود، در حالی که برای



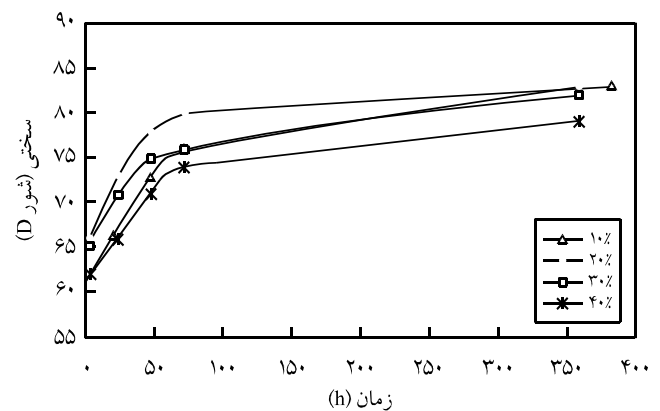
شکل ۳- تغییرات زمان ژل شدن رزین‌های A و B در مقادیر مختلف اسید.

قبل مشاهده شد، شروع پخت گرمایی رزین A در دماهای کمتری نسبت به رزین B آغاز می‌شود.

بررسی تغییرات سختی با زمان

سختی رزین گرماسخت پس از پخت بیانگر مقدار اتصالات عرضی و تأییدی بر مقدار پخت آن است. به همین دلیل تغییرات سختی این رزین‌ها با مقادیر مختلف اسید بر حسب زمان اندازه‌گیری و بررسی شد که نتایج آن در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش زمان، سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد که تا حدود ۷۵ min سرعت این افزایش بسیار زیاد است. اما، پس از آن سرعت افزایش سختی کاهش می‌یابد.

نکته قابل توجه رسیدن نمونه‌های دارای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد اسید به سختی ثابت حدود ۸۲ شور D پس از گذشت حدود ۱۶ روز است. از طرفی نمونه دارای ۴۰ درصد اسید همواره از سختی کمتری برخوردار



شکل ۴- تغییرات سختی بر حسب زمان در مقادیر مختلف اسید برای رزین A.

جدول ۲- نتایج آزمون مقاومت شیمیایی قطعات کامپوزیتی پخت شده به دو روش گرمایی و اسیدی.

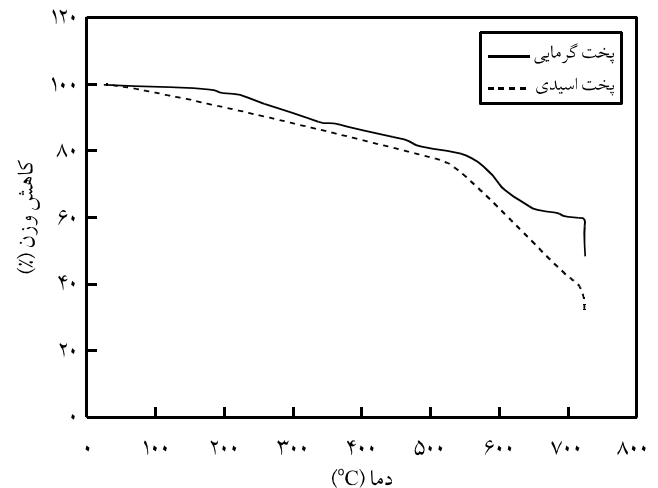
پس از ۴۸ h		پس از ۲۴ h		در ابتدا		نوع رزین و روش پخت
ضخامت (mm)	وزن (g)	ضخامت (mm)	وزن (g)	ضخامت (mm)	وزن (g)	
۲/۵۶	۰/۷۲	۲/۴۹	۰/۷۱	۲/۷۶	۰/۷	A - اسیدی
۲/۱۰	۰/۶۱	۲/۱۱	۰/۶۲	۲/۱۴	۰/۶۱	A - گرمایی
۱/۷۲	۰/۶۰	۱/۶۴	۰/۵۸	۱/۴۵	۰/۵۸	B - اسیدی
۲/۴۴	۰/۷۴	۲/۴۹	۰/۷۷	۲/۴۵	۰/۷۴	B - گرمایی

دو روش گرمایی و اسیدی را برای هر دو رزین نشان می‌دهد. اگرچه تلاش شده بود که مقدار الیاف قطعات تولید شده یکسان باشد، اما با توجه به روش تهیه دستی آمیزه‌ها و همچنین تفاوت در دو روش قالبگیری، مقادیر آنها متفاوت بود. به همین دلیل خواص خمشی اندازه‌گیری شده به مقدار الیاف آنها تقسیم و مقادیر خواص ویژه محاسبه شد، تا بتوان مقایسه بهتری انجام داد.

بررسی مقاومت شیمیایی

مقاومت شیمیایی یکی از ویژگی‌های مهم یک قطعه کامپوزیتی است. بنابراین، نمونه قطعاتی از هر دو سامانه پخت شده به روش‌های گرمایی و اسیدی تهیه و پس از توزین و اندازه‌گیری ضخامت، در حلال استون قرار داده شدند و تغییرات وزن و ضخامت آنها پس از ۲۴ h و ۴۸ h اندازه‌گیری شد. نتایج این آزمون در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ نشان می‌دهد که تغییرات قابل توجهی در وزن و ضخامت نمونه‌ها پس از گذشت ۴۸ h در مقابل استون که یکی از حلال‌های قوی



شکل ۶- منحنی‌های TGA رزین‌های رزول پخت شده به دو روش اسیدی و گرمایی.

نمونه پخت شده به روش اسیدی کاهش وزن از دمای ۱۱۰°C شروع می‌شود. نکته قابل توجه تشابه رفتار هر دو نمونه تا دمای نهایی آزمون یعنی ۷۲۰°C است. اگرچه نمونه پخت شده به روش اسیدی پایداری گرمایی خوبی دارد، اما مقدار زغال باقی مانده در انتهای آزمون این نمونه، ۲۰ درصد کمتر از نمونه پخت شده به روش گرمایی (۴۰ درصد در مقایسه با ۶۰ درصد) است که در کاربردهای فداشوندگی این موضوع اهمیت خاصی دارد. علت اختلاف مشاهده شده، به پژوهش‌های بیشتری نیاز دارد. با توجه به نتایج بخش قبل، شاید ناشی از چگالی اتصالات عرضی کمتر رزین پخت شده با سامانه اسیدی باشد.

بررسی خواص مکانیکی

جدول ۱ نتایج آزمون خمش روی قطعات کامپوزیتی پخت شده به هر

جدول ۱- نتایج آزمون خمش قطعات کامپوزیتی پخت شده به روش‌های گرمایی و اسیدی (اعداد داخل پرانتز مقادیر انحراف معیار داده‌ها را نشان می‌دهند).

رزین B		رزین A		نوع رزین و روش پخت	خواص
اسیدی	گرمایی	اسیدی	گرمایی		
۱۳۴/۹ (۱۰/۷)	۶۵/۸ (۲۴/۳)	۵۷/۴ (۵/۷)	۹۳/۷ (۱۰/۷)	استحکام خمشی (MPa)	استحکام خمشی ویژه
۳۷۴/۷	۲۱۹/۳	۱۱۹/۵	۲۹۲/۸		
۲۴۴۲۹/۸ (۲۸۱۰/۲)	۶۵۸۰/۸ (۱۵۳۶/۹)	۶۲۸۲/۴ (۶۲۳۳/۴)	۷۸۲۵/۴ (۹۲۳/۰)	مدول خمشی (MPa)	مدول خمشی ویژه
۶۷۸۶۰/۵	۲۱۹۳۶/۲	۱۳۰۸۷/۵	۲۴۴۵۴/۳		
۰/۷ (۰/۱)	۱/۷ (۰/۵)	۱/۲ (۰/۱)	۱/۶ (۰/۳)	مقدار خمش (%)	مقدار خمش ویژه
۱/۹۴	۵/۶۶	۲/۵	۵		

داشت، ولی خواص مناسب و قابل قبولی از پخت اسیدی نیز می توان به دست آورد. با توجه به مقدار کاهش وزن نمونه های پخت شده به روش اسیدی و گرمایی، نمونه های پخت شده به روش اسیدی پایداری گرمایی مطلوبی دارند، اما به مقدار پایداری گرمایی بیشتری به ویژه از نقطه نظر مقدار زغال گذاری در پخت گرمایی می توان دست یافت. نمونه های پخت شده به روش اسیدی خواص خمشی مناسب و مقاومت خوب در برابر حلال استون نشان می دهند. به طور کلی می توان گفت که قطعات کامپوزیتی پخت شده به روش اسیدی از خواص مکانیکی، شیمیایی و گرمایی مناسبی برخورداراند.

است، مشاهده نشده است. بنابراین، در این ترکیبات می توان به مقاومت شیمیایی خوبی به کمک سامانه پخت اسیدی دست یافت.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می دهد که مقدار بهینه پاراتولوئن سولفونیک اسید برای پخت محیطی رزین های رزول مورد استفاده با توجه به مقدار سختی و زمان ژل شدن مطلوب، ۲۰ درصد وزنی رزین مصرفی است. هر چند که پخت گرمایی رزین فنولی بهترین نتیجه را از هر لحاظ خواهد

مراجع

- Konp A. and Pilato L.A., *Phenolic Resins, Chemistry, Application and Performance*, Springer-Verlag, Berlin, 244-264, 1985.
- Jafari S.H., Fallahzadeh F. and Rona 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.
- Mohseni Lavi R., Kokabi M. and Beheshty M.H., Thermal Degradation Kinetics of Phenolic Resins Used in Ablative Heat Shield, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **15**, 245-250, 2002.
- Beheshty M.H. and Rezadoust A.M., *Reinforced Plastics (Polymer Composites)*, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran, 2005.
- Barikani M., Mirzataheri M. and Tavakoli A., Synthesis and Characterization of Suitable Resole for Preparation of Phenolic Foam, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **16**, 319-325, 2003.
- Burkhart T., Oberresel P. and Oldring P.K.T., *The Chemistry and Applications of Phenolic or Phenoplast*, John Wiley & Sons, UK, **5**, 1-120, 1998.
- So S. and Rudin A.L., Analysis of the Formation and Curing Reactions of Resole Phenolics, *J. Appl. Polym. Sci.*, **41**, 205-232, 1990.
- Beheshty M.H., Afzali S.K. and Naderi G., The Compounding of Phenolic Nitrile Blends: I- Effect of Phenolic Resin, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **14**, 309-315, 2002.
- Beheshty M.H., Afzali S.K. and Naderi G., The Compounding of Phenolic Nitrile Blends: II- Effect of Nitrile Elastomer Type, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **14**, 317-322, 2002.
- Morshedian J. and Jahani Y., An Investigation on Cure Kinetics of Phenolic-Novolac Resins, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **5**, 18-29, 1992.
- Choi M.H., Chung I.J. and Lee J.D., Morphology and Curing Behaviors of Phenolic Resin-Layered Silicate Nanocomposites Prepared by Melt Intercalation, *Chem. Mater.*, **12**, 2977-2983, 2000.
- Byun H.Y., Choi M.H. and Chung I.J., Synthesis and Characterization of Resol Type Phenolic Resin/Layered Silicate Nanocomposites, *Chem. Mater.*, **13**, 4221-4226, 2001.
- Barikani M., Mirzataheri M. and Tavakoli A., Studying the Effective Parameters on Preparation of Resol Used in Phenolic Foam, *Iran. J. Polym. Sci. Technol.*, **17**, 43-54, 2004.
- Wolfum J. and Ehrenstein G.W., Interdependence between the Curing, Structure, and the Mechanical Properties of Phenolic Resins, *J. Appl. Polym. Sci.*, **74**, 3173-3185, 1999.
- Tiedeman G.T. and Sanclemente M.R., The Chemistry of Fast-curing Phenolic Adhesives, *J. Appl. Polym. Sci.*, **17**, 1813-1818, 1973.
- Hong K.C., Ravasi M., Keil N., Vigant B. and Ma Y., Effect of Organic Acids on the Mechanical Properties of Phenolic Resin Composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **76**, 642-647, 2000.
- Laza J.M., Vilas J.L., Rodriguez M., Garay M.T., Mijangos F. and Leon L.M., Analysis of the Crosslinking Process of a Phenolic Resin by Thermal Scanning Rheometry, *J. Appl. Polym. Sci.*, **83**, 57-65, 2002.