

بررسی آثار تیتان آکریلات بر خواص گرمایی و شیمیایی رزینهای اپوکسی اصلاح شده

The Effect of Titanium Acrylate on Thermal and Chemical Properties of Modified Epoxy Resins

نورالدین گودرزبان، سیدمحمد سیدمحقق، مجید شایان^۱، مهرداد قاضی‌زاد^۲

۱- مرکز تحقیقات پلیمر ایران؛ ۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب، دانشکده تحصیلات تکمیلی

دریافت: ۷۴/۴/۴، پذیرش: ۷۴/۶/۱۹

چکیده

با رشد و توسعه صنایع پتروشیمی، پلیمرها از تنوع بیشتری برخوردار شده‌اند و تکنولوژی ساخت آنها رشد فزاینده‌ای یافته است. تنوع در ساختار شیمیایی مواد اولیه، عامل پخت، زنجیرافزاها و افزودنیهای بکاررفته در ساخت رزینهای اپوکسی باعث شده است که در رزینهای حاصل خواص بسیار متفاوتی ایجاد کرد و از آنها در کاربردهای گوناگون بهره جست. امروزه، رزینهای اپوکسی در پوششها، رنگها، عایقهای الکتریکی و کامپوزیتها به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این مقاله، ابتدا سنتز رزینهای اصلاح شده دی‌گلیسیدیل اتریس فنول A بوسیله تیتان آکریلات و نتایج شناسایی آنها با فنون آزمایشگاهی و طیف‌سنجی گزارش می‌شود. آن‌گاه، رفتار پخت این رزینها با عامل پخت آمینی اوزیایی و رزین پخت‌شده از نظر مقاومت گرمایی و شیمیایی با نمونه‌های گزارش شده مقایسه می‌گردد. در پایان، چگونگی بدست آوردن نسبت اختلاط عامل پخت با روشهای تجزیه گرمایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: تیتان آکریلات، رزین اپوکسی، خواص شیمیایی، واکنشگر پلیمری، چسب

Key Words: titanium acrylate, epoxy resin, chemical properties, polymeric reagent, adhesive

مقدمه

رزینهای اپوکسی از جدیدترین پلاستیکهای مهندسی بشمار می‌روند. این رزینها از نظر نوع رزین و عامل پخت بسیار گوناگونند و کاربردهای زیادی دارند. یکی از مهم‌ترین رزینهای اپوکسی به‌وسیله گلیسیددار کردن بیس فنول A با اپی‌کلروهیدرین حاصل می‌شود. گروههای اپوکسی انتهایی در این نوع رزینها می‌توانند با خود (به کمک کاتالیزور یا دما) یا مولکولهای دیگر واکنش دهند و بسته به نوع گروههای عاملی رزین، مولکولهای واسطه به عنوان عامل رشد زنجیر یا پخت عمل کنند. این مولکولهای واسطه معمولاً از نوع انیدرید، الکل،

آمید یا آمین هتد. گروههای اپوکسی واکنش دهنده از خود محصول جانی به جانی گذارند. بنابراین، مشکل ایجاد حباب در جریان پخت را ندارند.

رزینهای اپوکسی مقاومت شیمیایی، خواص الکتریکی، مقاومت مکانیکی و انعطاف‌پذیری خوبی دارند و جمع‌شدگی آنها پس از پخت کم است. افزون بر این، تخریب در رزینهای اپوکسی ناچیز و پایداری آنها در برابر گرما، اکسایش و نور خوب است. این رزینها جهت کاهش قیمت، افزایش سختی و مات‌شدگی (برای رفع رنگ پلیمر)، کم‌شدن شکم‌دهی گرمایی و اصلاح سایر پارامترهای

روشها

تهیه تیتان آکریلات

به یک بالن ۱۰۰۰ ml، مقدار $90/02$ g (۱/۲۵ مول) آکریلیک اسید، $80/04$ g (۱/۰۰۰ مول) تیتان اکسید و 250 ml تولوئن منتقل و محتوای بالن در دمای 70°C به مدت ۱۰ ساعت بهم زده و گرم شد. آن گاه، آب تولید شده در واکنش به وسیله تقطیر آزنوتروبی باتولون گرفته شد. پس از گذشت مدت زمان یادشده رسوب حاصل صاف و پس از شستشو با استون در دمای 60°C تا 70°C و شرایط خلاء تا ثابت ماندن وزن خشک گردید [۸].

تهیه رزین اپوکسی DGEBA (EP)

به یک بالن دو دهانه 500 ml، مقدار $11/80$ g (۰/۰۷۷ مول) بیس فنول A، 71 g (۰/۷۷ مول) اپی کلروهیدرین و 100 ml تولوئن منتقل و محتوای بالن بازروانی شد. در حین بازروانی طی مدت ۴ ساعت به آرامی مقدار 7 g (۰/۱۷۵ مول) محلول الکلی سدیم هیدروکسید اضافه شد. پس از ۶ ساعت مخلوط واکنش جهت جداسازی نمک NaCl تشکیل شده صاف گردید و اپی کلروهیدرین و تولوئن اضافی به روش تقطیر در خلاء جداسازی و محصول گرانرو نهایی در دسیکاتور نگهداری شد [۳].

تهیه رزین اپوکسی حامل تیتان آکریلات (EPT۱)

روش تهیه این رزین مانند رزین قبلی بود، با این تفاوت که بعد از اضافه کردن اپی کلروهیدرین، بیس فنول A و تولوئن، مقدار $1/66$ g (۰/۰۰۵ مول) تیتان آکریلات به مخلوط واکنش اضافه شد. برای تهیه اپوکسی رزینهای EPT۲ و EPT۳ به ترتیب واکنش در مجاورت $3/22$ g (۰/۰۱ مول) و $6/6$ g (۰/۰۲ مول) تیتان آکریلات انجام شد.

تعیین وزن مولکولی

در رزینهای اپوکسی، بویژه رزینهای DGEBA، جرم مولکولی و میزان اپوکسی موجود بشدت وابسته به فرایند تولید آنهاست. از میان روشهای تعیین جرم مولکولی از کروماتوگرافی ژل تراوایی استفاده شد و وزن مولکولی متوسط رزین EP برابر ۳۷۳ با چندپراکسی $1/138$ و وزن مولکولی سایر نمونه‌ها از 408 تا 685 بدست آمد (جدول ۱).

تعیین هم‌ارز اپوکسی

برای تعیین هم‌ارز اپوکسی موجود در رزینها، $1/5$ g رزین به ارلن مایر 125 ml منتقل و 25 ml پروپانول نرمال به آن اضافه شد و محتوای بالن ضمن بهم خوردن گرم شد تا به جوش آید. پس از حل شدن رزین

فرایند، اغلب همراه با پرکننده‌های پودری مصرف می‌شوند. رزینهای اپوکسی با وزن مولکولی کم، فشار بخار زیادی دارند و می‌توانند مسمومیت بوجود آورند. از سوی دیگر، رزینهای اپوکسی دارای وزن مولکولی زیاد با کاهش هم‌ارز اپوکسی همراه هستند [۱-۳].

گزارش استفاده از فاز مس برای افزایش فشار بخار و هم‌ارز اپوکسی این رزینها نخستین بار در سال ۱۹۹۲ منتشر شد و در پی آن در ۱۹۹۴ از فلز روی به منظور افزایش مقاومت گرمایی و شیمیایی رزینهای اپوکسی استفاده شد [۴-۷]. هیچ‌یک از این دو فلز نتوانسته‌اند اثر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش کارایی این نوع رزینها در دمای بالا داشته باشند و در این زمینه هنوز باید تحقیقات بیشتری انجام گیرد.

در این مقاله، ابتدا سنتز رزینهای اپوکسی اصلاح شده بر پایه دی گلیسیدیل اتریس فنول A (DGEBA) به وسیله فرایند تافی (Taffy) گزارش می‌شود. آن گاه، اثر تیتان آکریلات بر ساختار رزین و در نتیجه هم‌ارز اپوکسی، کلمر موجود در رزین و هم‌ارز هیدروکسیل و همچنین مقاومت رزین در دماهای بالا و اثر حلالهای مختلف آلی، اسیدها و بازها بر آن بررسی می‌شود. در ضمن، مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده و گزارش شده انجام می‌گیرد [۷].

تجربی

مواد و دستگاهها

بیس فنول A، اپی کلروهیدرین، حلالها و مواد معدنی از شرکتهای بی‌دی‌ایج، فلوکا و مرک تهیه شد. خواص فیزیکی این مواد در مقایسه با نتایج گزارش شده در مراجع به وسیله دستگاههای مختلف مورد تایید قرار گرفت. از دستگاههای طیف‌سنجی IR فیلیس مدل ۹۷۱۲ PU، FTIR بروکر مدل ۴۸ IFS، NMR ژئول مدل ۶۰ PMX و گرماسنج پوشی سفاسلی - تجزیه گرماوزنی (DSC-TG) پلیمر لاب مدل STA-۶۲۵ برای شناسایی نمونه‌ها استفاده شد. برای اندازه‌گیری گرانروی محصول، گرانروی‌سنج بروکفیلد در دماهای مختلف بکار گرفته شد. همچنین برای تایید وجود تیتان در رزین از میکروسکوپ الکترون پوشی (SEM) کمبریج مدل استرواسکن ۳۶۰ و دستگاه تجزیه انرژی تفکیکی پرتو X (EDXA) لینک مدل XR ۳۰۰ استفاده شد. برای تعیین جرم مولکولی از دستگاه کروماتوگرافی ژل تراوایی (GPC) میلی‌پور مدل واترز C-۱۵۰ و برای اندازه‌گیری ضریب شکست از دستگاه شکست‌سنج کارل زایس مدل GENA استفاده شد.

جدول ۱ - خصوصیات فیزیکی رزینهای اپوکسی تهیه شده.

خواص	EP	EPT ₁	EPT ₂	EPT ₃	EP(Zn)
هم ارز اپوکسی	۱۶۱	۲۰۱	۲۸۳	۳۰۷	۲۳۴
گرانروی ویژه (η_{sp})	۱/۵۰	۱/۶۱	۱/۷۲	۱/۹۴	۱/۶۳
هم ارز هیدروکسیل	۰/۰۸۹	۰/۱۰۰	۰/۱۲۰	۰/۱۸۰	۰/۱۲۵
درصد کلر قابل هیدرولیز	۰/۴۹	۰/۳۶	۰/۴۵	۰/۵۵	۱/۸۲
ضریب شکست	۱/۵۷۹۶	۱/۵۷۵۲	۱/۵۷۰۳	۱/۵۶۵۸	۱/۵۶۴۰
وزن مولکولی	۳۷۲	۳۰۸	۵۷۸	۶۸۵	۴۶۵

تعیین مقدار کلر موجود در رزین اپوکسی

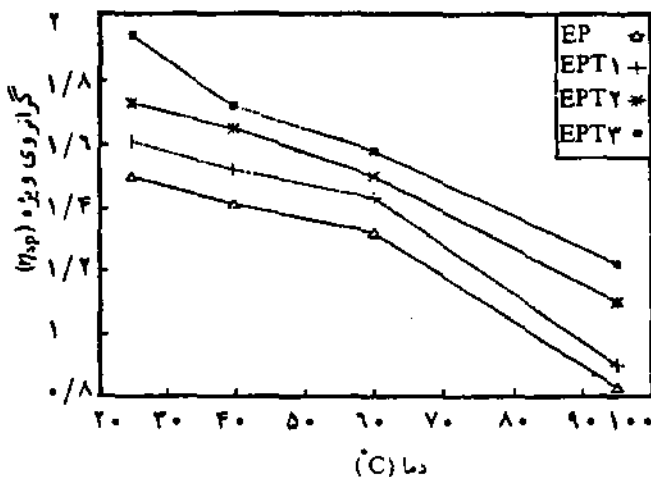
۱/۵ g نمونه رزین به یک ارلن مایر ۲۵۰ ml منتقل و به آن ۵۰ ml محلول الکل ۰/۱ N پتاسیم هیدروکسید (g ۵/۶۱ پتاسیم هیدروکسید در یک لیتر متانول) و ۱۵ ml تولوئن اضافه شد و ضمن بهم زدن به مدت ۱۵ دقیقه بازروانی شد. پس از سرد شدن، ۵ ml متانول و سه قطره شناساگر فنول فتالین به محلول افزوده و با کلریدریک اسید ۰/۱ N تا ناپدید شدن رنگ صورتی تیترا گردید. با استفاده از رابطه زیر مقدار کلر قابل هیدرولیز محاسبه شد:

$$\text{کلر قابل هیدرولیز} = \frac{2/55(V_1 - V_2)N}{W}$$

که در آن V_1 و V_2 به ترتیب حجم اسید مصرفی برای تیتراسیون شاهد و نمونه، N نرمالیت اسید و W وزن نمونه است.

پخت رزینهای اپوکسی

از آنجا که کاربرد عمده رزینهای اپوکسی در دماهای بالاست، برای پخت رزینها و بررسی خصوصیات آنها از عوامل پخت استفاده شد که ضمن



شکل ۱ - تغییرات η_{sp} نسبت به دما در رزینهای اپوکسی مختلف.

بسرعت ۲۰ قطره شناساگر برموفنول آبی (g ۰/۱۸ در ۹۹/۹۸) پروپانول نرمال و محلول KI تازه تهیه شده (g ۳ از KI در ۵g آب مقطر) به مخلوط اضافه شد و در حین بازروانی مخلوط با HCl نرمال تا رسیدن به نقطه پایان زرد رنگ و پایدار ماندن آن تیترا شد. میزان هم ارز اپوکسی برای نمونه‌های مختلف از رابطه زیر با خطای ۱-۲٪ بدست آمد [۳].

$$\text{هم ارز اپوکسی} = \frac{VN}{W}$$

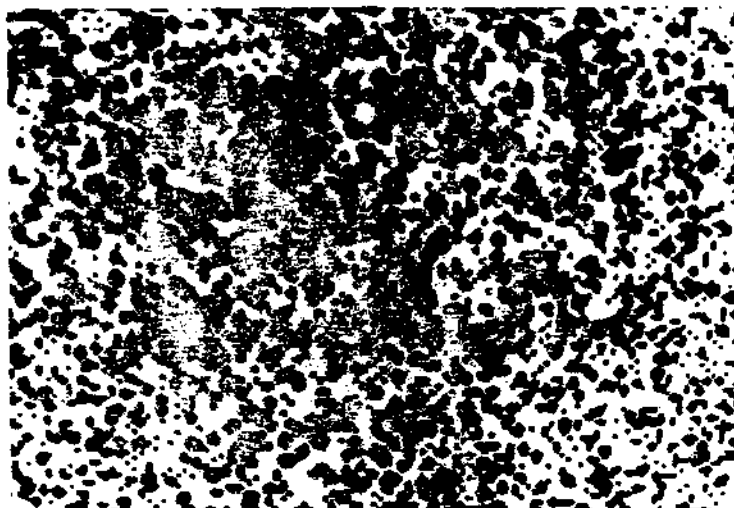
که در آن V و N به ترتیب حجم و نرمالیت HCl و W وزن نمونه است.

تعیین هم ارز هیدروکسیل

۱/۵ g رزین در ۱۰ ml دیوکسان در اثر گرما (۶۰-۵۰ C) در یک بالن ۲۵۰ ml حل شد و پس از سرد شدن تا دمای معمولی به آن ۱۰ ml محلول ۱/۵ نرمال استیل کلرید در تولوئن اضافه و تا صفر درجه سانتیگراد سرد شد. آن گاه، به آرامی ۲ ml پیریدین به محلول اضافه گردید و در حمام آب در دمای $C \pm 1$ قرار گرفت و مرتب هم زده شد. در مرحله بعد مخلوط به مدت یک ساعت در حمام یخ قرار گرفت و به آن ۲۵ ml آب مقطر اضافه و ۳۰ دقیقه بهم زده شد. و پس از افزودن ۲۵ ml استون، امولسیون بدست آمد که به آن چند قطره شناساگر کروزول قرمز ۰/۱٪ در اتانول ۵۰٪ اضافه شد و با محلول سدیم هیدروکسید ۰/۵ N تا پایدار شدن رنگ بنفش تیترا گردید. با استفاده از رابطه زیر هم ارز هیدروکسیل (eq/۱۰۰g) بدست آمد [۳].

$$\text{هم ارز هیدروکسیل} = \frac{W}{170(V_1 - V_2)N}$$

که در آن W وزن نمونه، V_1 و V_2 به ترتیب حجم سود مصرفی برای تیترا کردن شاهد و نمونه و N نرمالیت آن است.



شکل ۲- ریزعکس میکروسکوپ الکترونی نمونه EPT1

EP از ۰/۰۸۹ تا ۰/۱۸۰ (eq/۱۰۰ g) متغیر است که نتایج در جدول ۱ برای هر مورد مشخص شده است [۳].

رزیتهای اپوکسی تهیه شده با اپی کلروهیدرین دارای مقداری کلر قابل هیدرولیزند که ناشی از اضافه شدن اپی کلروهیدرین به صورت غیرعادی، بوجود آمدن ۱ و ۲- دی کلرو هیدرین و واکنشهای فرعی است که کلر آنها قابل هیدروهالوژن گیری نیست [۴]. میزان کلر قابل هیدرولیز برای نمونه‌های مختلف طبق روش یادشده اندازه گیری و نتایج در جدول ۱ مقایسه شده‌اند. افزودن تیتان آکریلات تا میزان مناسب، کلر قابل هیدرولیز را در رزیتهای اپوکسی اصلاح شده کاهش می‌دهد. با افزایش میزان تیتان آکریلات، گرانیوی ویژه (η_{sp}) افزایش می‌یابد. برای اندازه گیری η_{sp} محلول ۴۰٪ رزین در بوتیل کربنول تهیه شد (جدول ۱). تغییرات دما نیز نقش مهمی در گرانیوی رزیتهای دارد. طبق شکل ۱ با افزایش دما گرانیوی رزین کاهش می‌یابد.

با استفاده از میکروسکوپ الکترونی میزان تیتان نمونه‌های مختلف رزین اپوکسی و پراکندگی فلز در بستر پلیمر مشخص شد. تیتان به صورت لکه‌های سفید پراکندگی یکنواختی دارد و درصد آن در پلیمر در بهترین نمونه برابر ۳/۲۱ است (شکل ۲).

طیف IR و FTIR نمونه‌های رزین اپوکسی جذبی در ناحیه $3450-3400 \text{ cm}^{-1}$ نشان می‌دهد که مربوط به گروه OH است. طیف جذبی در ناحیه $2924-2916 \text{ cm}^{-1}$ (شکل ۳) مشخص کننده گروههای CH_2 و CH -آلیفاتیک و در ناحیه 3036 cm^{-1} نشان دهنده CH -آروماتیک است. فرکانس کششی ناحیه $1650-1150$ و ناحیه 836 cm^{-1} مربوط به گروه اپوکسید و جذب در ناحیه $1520-1650$ و $2000-2500 \text{ cm}^{-1}$ نشان دهنده حلقه آروماتیک

پخت مناسب، مقاومت گرمایی لازم را در رزین ایجاد کند. اشاره می‌شود که بهترین مواد برای این منظور دی آمینهای آروماتیک هستند. به همین جهت پارافنیلن دی آمین انتخاب شد و پس از آماده سازی، به نسبت استوکیومتری با هم‌ارز اپوکسی رزین مخلوط و به مدت ۲۴ ساعت در دمای 100°C پخت شد. برای پخت کاملتر نمونه‌ها، پخت آنها در چند مرحله انجام گرفت. بدین ترتیب که نمونه‌ها به مدت ۸ ساعت ابتدا در 50°C و سپس در $70-80^\circ\text{C}$ و سرانجام در 100°C قرار داده شدند [۹].

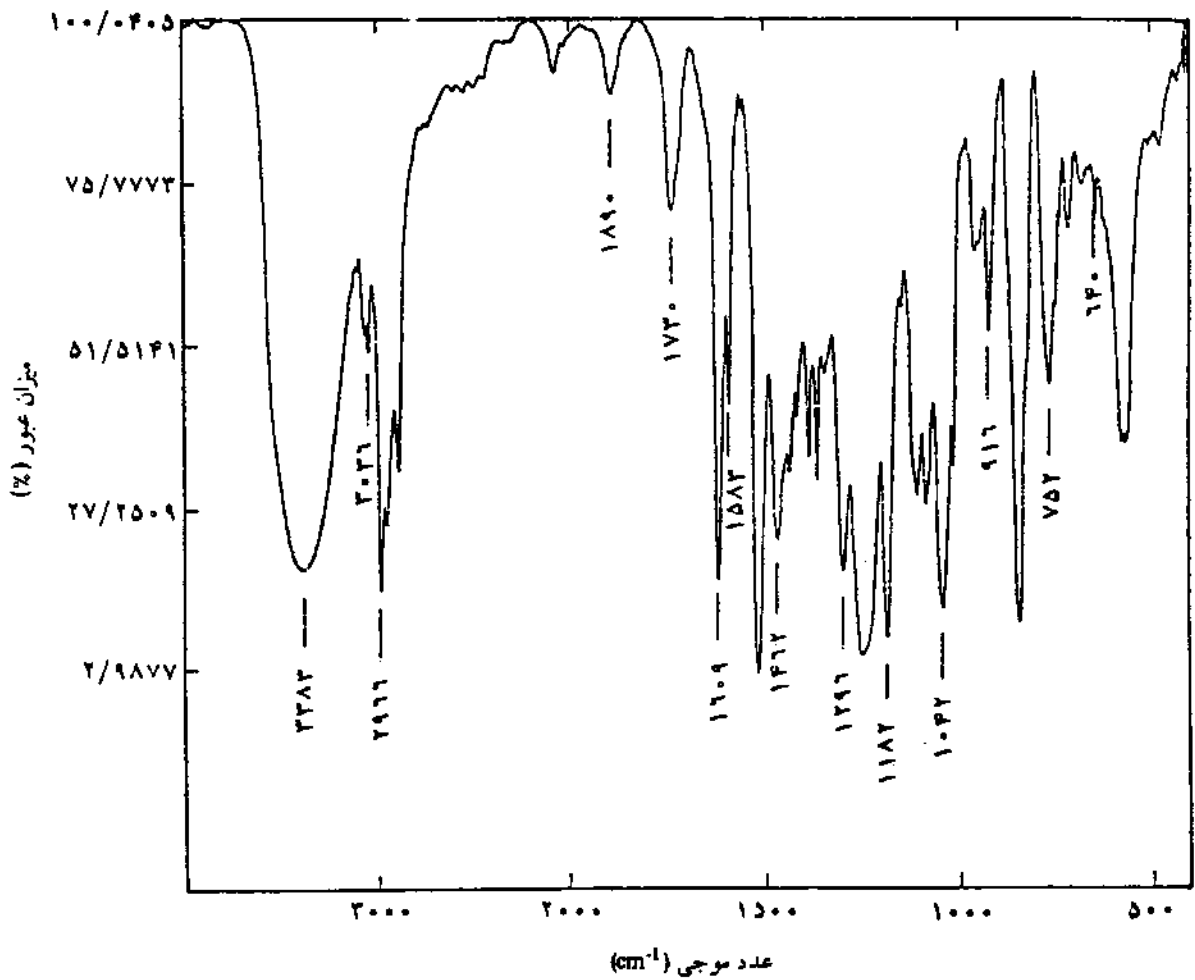
نتایج و بحث

واکنش تشکیل اپوکسید گرماده بوده و گرانیوی محصول نهایی با زیاد شدن میزان تیتان آکریلات افزایش می‌یابد. سرانجام محصول به شکل جامد در می‌آید. در عین حال ضریب شکست نمونه‌های EPT1، EPT2 و EPT3 کمتر از EP است (جدول ۱).

رزین EP از نظر خصوصیات فیزیکی مایعی گرانیوی به رنگ کرم روشن و دارای ضریب شکست $1/5796$ است. گرانیوی EPT1 کرم رنگ بیشتر از EP است. گرانیوی EPT2 و EPT3 با رنگ کرم تیره به ترتیب زیاد و زیادتر می‌شود.

هم‌ارز اپوکسی رزیتهای EPT1 و EPT2 به ترتیب ۲۰۱ و ۲۸۳ بوده که در حدود نصف وزن مولکولی آنهاست و نشان می‌دهد که تقریباً به ازای هر مولکول پلیمر دو گروه اپوکسی وجود دارد [۳]. در درصدهای زیاد تیتان آکریلات یا در غیاب آن میزان هم‌ارز اپوکسی کمتر است (جدول ۱).

هم‌ارز هیدروکسیل نمونه‌های مختلف اپوکسی اصلاح شده و



شکل ۳- طیف FTIR رزین اپوکسی EPT1

اپوکسی EP در شرایط یادشده و در محلول HCl نرمال حدود

جدول ۲- انحلال پذیری نمونه های مختلف رزین اپوکسی پخت شده.

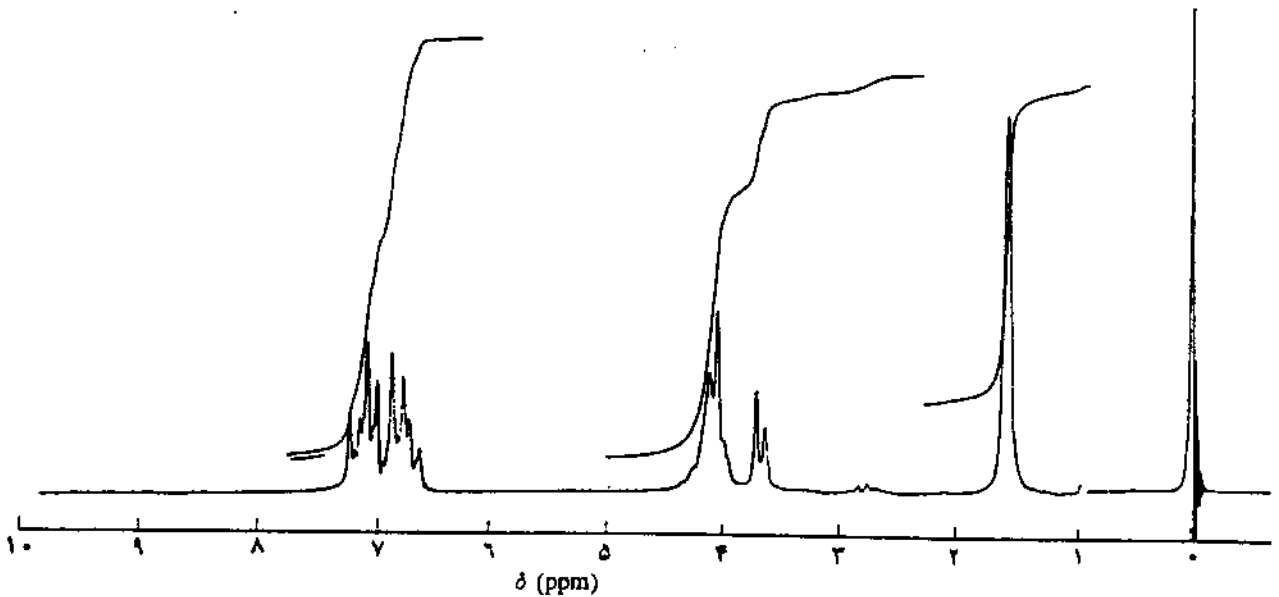
EPT3	EPT2	EPT1	EP	حلال
ن	ن	ن	ن	تولون
ن	ن	ن	ن	اتانول
ن	ن	ن	ن	بنزن
ن	ن	ن	ن	بیریدین
ن	ن	ن	ن	کلروفرم
ن	ن	ن	ن	CCl ₄
ک	ک	ن	ن	(N)HCl
ک	ک	ن	ن	(N)NaOH
م	م	م	م	(N)H ₂ SO ₄

توضیح: ک علامت کم محلول، م محلول و ن نامحلول است.

است. اختلاف جذب نمونه های رزین معمولی EP و رزینهای اصلاح شده در ناحیه $1700-1750 \text{ cm}^{-1}$ کاملاً محسوس است که مربوط به گروه استری حاصل از تیتان آکریلات در رزینهای اصلاح شده است [۱۰].

طیف ¹H NMR، اثر فلز تیتان را در محل و چگونگی رزونانس طیفها نشان می دهد. گروه اپوکسی در ناحیه ۲/۷-۳/۱ ppm در رزین اصلاح شده نسبت به رزین EP جابه جایی پیدا کرده و رزونانس گروه -CH و -CH₂ نیز زیر تاثیر فلز تیتان الگوی شکستگی متفاوتی یافته است (شکل ۴).

جدول ۲ انحلال پذیری رزینها (فیلمی به ضخامت ۰/۱mm) را نشان می دهد. رزینهای اصلاح شده حالت اولیه خود را پس از قرار گرفتن در حلالهای قطبی و غیر قطبی به مدت چهار روز کاملاً حفظ می کنند. مقاومت رزینهای اصلاح شده در کلریدریک اسید نرمال و محلول سدیم هیدروکسید نرمال کاملاً قابل توجه است. رزین

شکل ۴- طیف $^1\text{H NMR}$ رزین اپوکسی EPT1

از 300°C اتفاق می‌افتد (شکل ۵). پایداری گزارش شده نمونه‌های رزینهای اصلاح‌شده با آکریلاتهای روی و مس کمتر است و تخریب سریع پلیمر در دمای پایتر انجام می‌گیرد [۴]. در ضمن Tg رزین پخت شده EPT1 برابر $124/96^\circ\text{C}$ بدست آمده است. با توجه به این شواهد و اثری که تیتان آکریلات بر پایداری گرمایی رزینهای اصلاح شده دارد و نیز نتایج مطالعات طیف‌نمایی، اثر فلز واسطه تیتان بر رزینها کاملاً مشهود است. مکانیسم پیشنهادی بر اساس تشکیل کمپلکس بین تیتان و اکسیژن بیس فنول A و اکسیژن گروه اپوکسید است.

نتیجه‌گیری

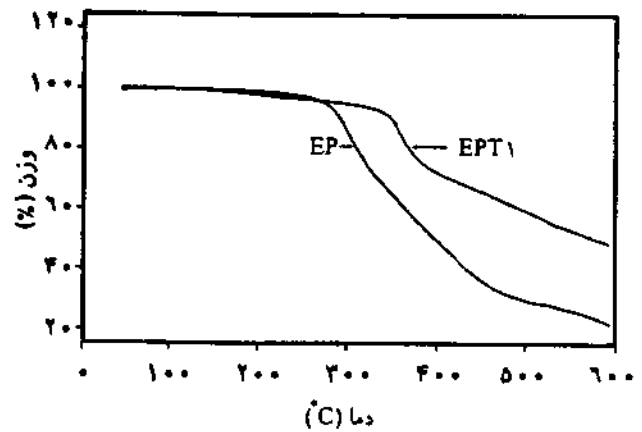
فلز تیتان بهتر از فلزات روی و مس، که در گزارشها آمده است، می‌تواند با گروه‌های اکسیژن پیوند کوئوردیناسی تشکیل دهد و اکسیژن به عنوان گروه الکترون‌دهنده و تیتان با اربیتال d خالی به شکل الکترون‌گیرنده عمل کند. بدین ترتیب، کمپلکس حاصل با گروه‌های آکریلات اطراف تیتان به عنوان یک مانع فضایی از رشد رزین جلوگیری می‌کند و این عامل باعث افزایش هم‌ارز اپوکسی رزینها می‌گردد.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد تیتان آکریلات بیش از غلظتی معین، به عنوان پرکننده عمل می‌کند و با جلوگیری از حرکت زنجیرهای پلیمر باعث افزایش گرانش می‌شود. در نتیجه، گرانشی نمونه‌های EPT2 و EPT3 از EPT1 کمتر است.

از آنجا که در غلظتهای کم، وجود تیتان در رزین به صورت کمپلکس به دلیل تشکیل پیوند کوئوردیناسی با اکسیژن است. یعنی به

۱۲٪ کاهش وزن نشان می‌دهد، درحالی‌که رزین EPT1 تنها ۷/۲٪ کاهش وزن دارد. اشاره می‌شود که در نسبتهای بالاتر تیتان آکریلات مقاومت شیمیایی رزین اپوکسی در برابر اسید کمتر است که می‌تواند ناشی از حضور فیزیکی تیتان آکریلات اضافی در بستر رزین اپوکسی باشد.

اثر ساختار تیتان آکریلات بر مقاومت گرمایی رزینهای اپوکسی و Tg نمونه‌ها با سیستمهای TGA و DSC بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که رزین اپوکسی EP حداکثر تادمای 160°C مقاوم است و پس از آن سرعت تجزیه می‌شود، درحالی‌که نمونه اصلاح‌شده EPT1 در دمای 266°C تنها ۸٪ کاهش وزن دارد و تخریب سریع آن در دمای بالاتر



شکل ۵- گرمانگاشت رزین اپوکسی اصلاح شده EPT1.

- 4 Anand M. and Srivastava A. K.; *J. Appl. Polym. Sci.*; 51, 2, 203, 1994.
- 5 Sandler S. R. and Karo W.; *Polymer Synthesis*; 2, Academic, 1977.
- 6 Nishikubo T., Imaura M., Muzuko T. and Takaoka T.; *J. Appl. Polym. Sci.*; 13, 3445, 1974.
- 7 Anand M. and Srivastava A. K.; *High Performance Polym.*; 4, 93, 1992.
- 8 Gronowski A. and Wojtczak Z.; *J. Therm. Anal.*; 26, 233, 1983.
- 9 Zukas W. X.; *J. Appl. Polym. Sci.*; 53, 429, 1994.
- 10 Klaus G. R., Matlok F. and Gremlich A. U.; *Merck FTIR Atlas*; VCH, 1988.

شکل پرکننده و فیزیکی نیست، در نتیجه پراکندگی تیتان در بستر پلیمر یکواخت تر است (نمونه ۱ (EPT)).

قدردانی

از مرکز تحقیقات پلیمر ایران به دلیل حمایت مالی از این طرح پژوهشی قدردانی می‌شود.

مراجع

- 1 Dusek K. and Apicella A.; *Epoxy Resin and Composites*; Springer Verlag, Berlin, 1985.
- 2 Flick E. W.; *Epoxy Resins: Curing Agents, Compounds and Modifiers*; Noyes, New Jersey, 1987.
- 3 Lee H. and Neville K.; *Handbook of Epoxy Resins*; McGraw Hill, New York, 1967.