



نهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران

دانشگاه علم و صنعت ایران
۳-۵ آذر، ماه ۱۳۸۳

بررسی تأثیر فرمولاسیون و شرایط فرآیند بر روی میزان هدایت الکتریکی کامپوزیت اپوکسی - دوده

وحید حدادی اصل*، مهدی مقری بیدگلی، سید جعفر صادقی حسینی

دانشکده مهندسی پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Haddadi@aut.ac.ir

چکیده

امروزه از افزودن دوده هادی به مواد پلیمری به منظور افزایش هدایت الکتریکی پلیمرها استفاده می شود. در این میان قابل ذکر است که معمولاً رابطه بین درصد دوده و میزان هدایت الکتریکی پلیمر غیر خطی می باشد. در درصدهای کم دوده، هدایت الکتریکی پلیمر تغییر چندانی نمی کند، به عبارت دیگر وقتی میزان دوده مصرفی از یک مقدار حدی کمتر باشد، دوده تأثیر چندانی بر روی ازدیاد هدایت الکتریکی پلیمر ندارد. پس از آن وقتی که درصد دوده به نقطه حدی موسوم به "آستانه تجمع" رسید، هدایت الکتریکی به اندازه قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. نتایج تحقیق حاضر نشانگر این نکته بودند که با افزایش ساختار دوده، اعمال برش ملایم، افزودن مواد یونی به دلیل خنثی سازی بارهای الکترواستاتیکی حاصل در فرایند اختلاط و همچنین افزایش دمای پخت که به دلیل کاهش ویسکوزیته و تشکیل آسانتر شبکه های هادی رخ می دهد سبب می شود که آستانه هدایت به درصدهای پایینتری منتقل شود. با افزایش دمای محیط آزمایش تا نزدیکی دمای شیشه ای شدن، هدایت الکتریکی کاهش یافته، حال آنکه در نزدیکی دمای شیشه ای شدن، هدایت الکتریکی افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: هدایت الکتریکی، دوده، درصد حجمی، کامپوزیتهای پلیمری

مقدمه

این نکته که مواد پلیمری، الکترونها یا حاملهای جریان الکتریسیته را از خود عبور نمی دهند، سبب به وجود آمدن مواد نارسانای ایده آل شده است. اما نارسایی پلیمرها همیشه به عنوان یک مزیت به شمار نمی رود. در برخی کاربردها در صورتیکه پلیمرها رسانای جریان برق باشند، انتخابی بی رقیب خواهند بود. به همین دلیل تلاشهای زیادی برای هادی سازی پلیمرها انجام گرفته است. پلیمرهای هادی ویژگیهای عمومی مواد پلیمری از نظر سبکی، انعطاف پذیری، سهولت فرآیند، مقاومت شیمیایی و قیمت ارزان را به دنیایی جدید در رقابت با دنیای فلزات وارد کرده اند. امروزه می توان ماده ای را در اختیار داشت که هم ویژگیهای پلیمرها را داشته باشد و هم جریان الکتریسیته را از خود عبور دهد و علاوه بر آن در مواردی به عنوان هادی و در مواردی دیگر به عنوان عایق رفتار کند.

برای هادی کردن پلیمرها سه روش وجود دارد: الف) در نظر گرفتن زنجیر اصلی نیمه هادی برای پلیمر و ایجاد زنجیر اصلی پلیمر با الکترونها آزاد که بارها را شبیه به حالت فلزات انتقال دهند. ب) قرار دادن پوشش هادی الکتریسیته بر روی سطح پلیمر. ج) اضافه کردن ماده هادی الکتریسیته به آمیزه پلیمری [۱]. در این میان هزینه پایین، وزن سبک، پایداری مکانیکی، آسانی فرآیندپذیری و هدایت الکتریکی و حرارتی خوب سبب شده است که بیشتر از روش آمیزه سازی پلیمرها با مواد پرکننده هادی استفاده شود. این گونه مواد برای بسیاری از کاربردهای فنی مورد استفاده قرار می گیرند [۲].

از میان انواع مختلف پرکننده های مورد مصرف در پلیمرها، استفاده از دوده یکی از مرسومترین و مؤثرترین روشها می باشد. اضافه کردن دوده هادی به منظور ایجاد هدایت الکتریکی قابل قبول انجام می شود. معمولاً بین درصد دوده و میزان هدایت الکتریکی پلیمر رابطه خطی وجود ندارد، بلکه عملکرد هدایتی مخلوط پلیمری غیر خطی می باشد. در درصدهای کم دوده، هدایت الکتریکی پلیمر تغییر نمی کند، به عبارت دیگر وقتی میزان دوده مصرفی از یک مقدار حدی کمتر باشد، دوده تأثیری بر روی ازدیاد هدایت الکتریکی پلیمر ندارد. بعد از آن وقتی که درصد دوده به نقطه حدی موسوم به "آستانه تجمع" رسید، هدایت الکتریکی به اندازه قابل ملاحظه ای افزایش می یابد، که در این نقطه اجزاء ماده پرکننده به نحوی با یکدیگر تماس پیدا میکنند که یک شبکه هادی پیوسته ایجاد می شود [۲].

وقتی دوده به آمیزه اضافه می شود، تغییراتی رخ می دهد که به موجب آن خواص مخلوط حاصل با خواص پلیمر اولیه متفاوت می گردد. این تغییرات شامل تغییر در رنگ تا تغییر کامل در خواص فیزیکی و یا فرآیندپذیری می باشد که کامپوزیت پلیمری را از لحاظ الکتریکی هادی می سازد. بنابراین کامپوزیت حاصل دیگر بسیاری از خواص پلیمر اولیه را نخواهد داشت.

تحقیقات بسیاری در مورد پلاستیکها و پلیمرهای هادی انجام شده است [۳-۵]. اپستین هدایت الکتریکی پلیمرهای ذاتاً هادی و پلیمرهایی که در آنها پیوند دوگانه به صورت یک در میان قرار دارد را بررسی کرده است [۶]. ویکی و همکاران فرآیندپذیری پلی آنیلین هادی را مورد بررسی قرار داده است [۷]. اخیراً همچنین کامپوزیتهای پلیمری هادی با "آستانه تجمع" پایین بسیار مورد توجه قرار گرفته اند [۸-۱۳]. فنگ و چن خواص الکتریکی و مورفولوژی آلیاژ امتزاج ناپذیر پلی (وینیل فلورید) و پلی اتیلن با دانسیته بالا مخلوط شده با دوده را بررسی کرده اند [۱۴]. نارکیس و همکاران نیز ارتباط بین مورفولوژی و هدایت الکتریکی

آمیزه های پلیمری امتزاج ناپذیر را مطالعه کرده اند [۱۱]. نیکسون نیز خواص رئولوژیکی کامپوزیت‌های هادی الکتریسیته را بررسی کرده است [۱۵]. وبر و کمال نیز ضمن ارائه دو مدل ریاضی جدید، مقاومت حجمی کامپوزیت‌های لیفی را تخمین زده اند [۱۶]. لی و کیم نیز تأثیر عملیات حرارتی را بر روی هدایت الکتریکی فیلم پلی پیرول تهیه شده از روش محلولی مطالعه کرده است [۱۷]. دانسکو و زابرنن تأثیر فرایند اختلاط را در تشکیل پلیمرهای هادی بررسی کرده است [۱۸-۱۹]. حدادی اصل و محمدی نیز اثر روش و شرایط فرآیند را بر روی خواص کامپوزیت‌های پلی الفین- دوده مورد بررسی قرار داده اند [۲۰]. همچنین حدادی اصل مورفولوژی و خواص کامپوزیت‌های هادی پلی الفین- دوده را مورد بررسی قرار داده است [۲۱]. کلیه این تحقیقات بیانگر این نکته است که مقاومت الکتریکی ویژه کامپوزیت‌های پلیمر- دوده شدیداً به نوع و میزان دوده مصرفی، چگونگی پراکنده شدن دوده در ماتریس پلیمری و ساختار دوده مصرفی بستگی دارد.

تجربیات و آزمایشات

مواد مورد استفاده

در این تحقیق از دو نوع رزین اپوکسی از نوع بیس فنل A، هاردنر از نوع انیدریدی، شتاب دهنده دارای گروه ایمیدازول و چند نوع دوده هادی استفاده شد. دوده مورد استفاده با نامهای تجاری Ketjen ,Printex XE2B, Vulcan XE72,Black می باشد که سطح تماس آنها به ترتیب ۱۴۸۰،۹۵۰ و ۲۵۷ متر مربع بر گرم می باشد. اندازه ذرات دوده های مصرفی به ترتیب ۵،۱۸ و ۳۰ نانومتر و میزان جذب روغن در این سه نوع دوده به ترتیب برابر ۳۳۰،۳۵۰ و ۲۶۵ میلی لیتر بر ۱۰۰ گرم می باشد.

تجهیزات مورد استفاده

برای انجام کارهای آزمایشگاهی، همزن آزمایشگاهی با دور متغیر حداکثر ۵۰۰۰ دور بر دقیقه، دستگاه اندازه گیری هدایت الکتریکی در محدوده یک پیکوآمپر تا صد میکروآمپر، آون مجهز به خلا و دستگاه اندازه گیری خواص کششی ساخت شرکت MONSANTO مورد استفاده قرار گرفت.

تولید نمونه‌هایی با فرمولاسیون متغیر

به منظور بررسی تأثیر میزان و نوع مواد افزودنی بر روی میزان مقاومت الکتریکی، نمونه‌هایی با فرمولاسیون ارائه شده در جدول ۱ تهیه شد.

جدول ۱- فرمولاسیون نمونه های مورد استفاده

کد نمونه	نوع رزین	WPE*(gr/eq)	هاردنر (phr)	شتاب دهنده (phr)
۱	E825	۱۷۵	۸۵	۱
۲	E828	۱۸۶	۸۰	۱

*وزن رزینی که حاوی یک اکی والان گرم از گروههای اپوکسیدی باشد.

ابتدا مواد به به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون قرار داده شد. سپس در ترکیب درصدهای حجمی ۰/۲، ۰/۵، ۲/۰، ۲/۱، ۲/۲، ۲/۲، ۷/۵ و ۳/۰ عملیات اختلاط رزین اپوکسی و سه نوع دوده اشاره شده در همزنی با

سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه و به مدت یک ساعت انجام گردید. پس از یک ساعت و مطابق فرمولاسیون ارائه شده در جدول ۱ شتاب دهنده و هاردنر به مخلوط اضافه گردیده و در سرعت قبلی عملیات اختلاط به مدت ۱۵ دقیقه ادامه داده شد. عملیات پخت مواد در درون قالب در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد و به مدت سه ساعت انجام شد. عملیات پخت تکمیلی نیز در دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد و در داخل آون مجهز به خلأ و به مدت ۸ ساعت انجام شد.

بحث و بررسی نتایج

شکل ۱ تأثیر نوع دوده را بر روی میزان مقاومت الکتریکی در درصدهای حجمی مختلف نشان می دهد. رزین مورد استفاده در این آزمون E828 می باشد.

با افزایش سطح تماس و ساختار دوده، مقاومت الکتریکی کامپوزیت کاهش می یابد. در اثر حرکت براونی ذرات دوده و به هم چسبیدن ذرات دوده و متعاقب آن تشکیل خوشه مسیری برای هدایت الکتریکی تشکیل می شود. با افزایش ساختار دوده تشکیل این خوشه ها آسانتر شده و در نتیجه آن آستانه هدایت (نقطه ای که در آن هدایت الکتریکی به میزان قابل ملاحظه ای افزایش می یابد) به درصدهای حجمی پایینتر منتقل می شود. شکل ۲ تأثیر نوع رزین و درصد حجمی دوده را بر روی میزان مقاومت الکتریکی کامپوزیت نشان می دهد. همانطور که از شکل مذکور مشاهده می شود با افزایش WPE آستانه هدایت به درصدهای حجمی بالاتر منتقل می شود که دلیل آن می تواند ناشی از افزایش قطبیت رزین باشد. با افزایش WPE قطبیت رزین افزایش یافته و متعاقب آن یک تنش اضافی در فصل مشترک رزین و دوده ایجاد می شود. به عبارت دیگر تنش سطحی بالای پلیمر یک انرژی اضافی در سطح مشترک ایجاد می کند. به عبارت دیگر با افزایش چسبندگی رزین و دوده، حرکت ذرات دوده در درون ماتریس پلیمری به سختی انجام شده و لذا آستانه هدایت به درصدهای حجمی بالاتر منتقل می شود. همچنین از آنجا که ویسکوزیته رزین E825 در مقایسه با رزین E828 کمتر می باشد، لذا حرکت ذرات دوده در درون ماتریس پلیمری آسانتر بوده و لذا تشکیل خوشه آسانتر بوده و متعاقب آن آستانه هدایت به درصدهای حجمی پایینتر منتقل می شود.

شکل ۳ تأثیر اعمال برش را بر روی میزان مقاومت الکتریکی نمونه های مختلف نشان می دهد. در نمونه شماره یک پس از اختلاط دوده و رزین هیچ گونه برش اضافی به نمونه اعمال نشده است، حال آنکه در نمونه شماره ۲ پس از افزودن هاردنر و شتاب دهنده به آمیزه دوده و رزین، مجدداً عملیات اختلاط در همزن با سرعت ۴۵ دور در دقیقه و به مدت ۵ دقیقه ادامه شد. شکل ۴ میکروگرافهای تهیه شده با استفاده از تکنیک میکروسکوپی نوری برای این دو نوع نمونه را نشان می دهد.

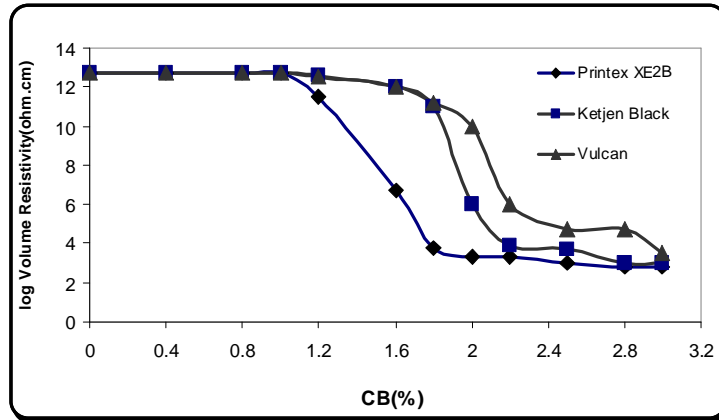
به هنگام توزیع ذرات در درون ماتریس پلیمری دو نیروی عمده در رقابت با یکدیگر می باشند. نیروی واندروالسی سبب به هم پیوستن ذرات گردیده حال آنکه نیروهای کولنی ناشی از القای بارهای الکتریکی بر

روی سطوح ذرات باعث دور شدن ذرات از یکدیگر می شود. وقتی مواد قبل از عملیات پخت به هم زده می شوند، بارهای ایجاد شده بر روی سطح ذرات خنثی شده و در نتیجه تاثیر نیروهای دافعه کولنی بسیار کاهش می یابد. در نتیجه تشکیل خوشه آسانتر شده و آستانه هدایت به درصدهای حجمی پایینتر منتقل می شود.

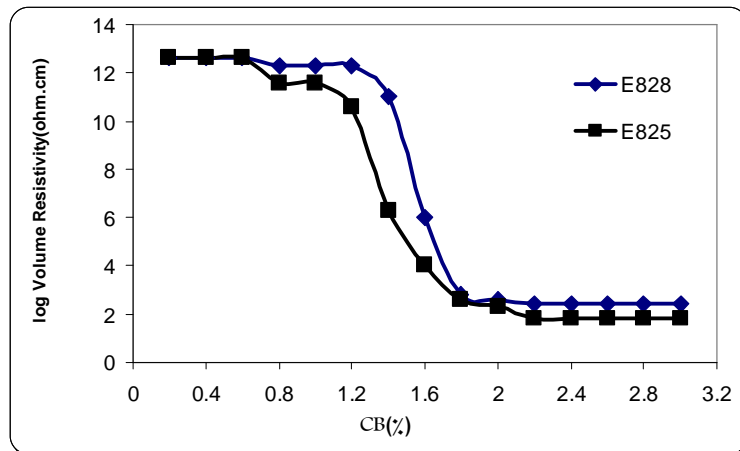
شکل ۵ تأثیر نمک CuCl_2 را بر روی میزان مقاومت الکتریکی نشان می دهد. در این کار تحقیقاتی پس از اختلاط رزین E828 و دوده PRINTEX XE2B محلول CuCl_2 با غلظت 3×10^{-6} مول بر گرم نمک به رزین اضافه گردیده و سپس فرایند پخت در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت انجام شد. مشاهده گردید افزودن نمک CuCl_2 مشابه همزدن آرام پیش از انجام فرایند پخت باعث کاهش آستانه هدایت می گردد که دلیل این امر نیز مشابه دلیل همزدن آرام پیش از پخت می باشد.

در تشکیل شبکه هادی که ناشی از به هم پیوستن ذرات دوده و تشکیل خوشه می باشد، دو نیروی واندوالسی و الکتروستاتیکی در رقابت با هم می باشند که برای غلبه بر نیروی دافعه، می توان از دو روش استفاده نمود. یکی از اینها نیروی برش ملایم و دیگری افزودن یون می باشد. افزودن یون سبب خنثی شدن نیروهای مقاوم گردیده و تشکیل خوشه را تسهیل می نماید، ضمن اینکه باعث کاهش آستانه هدایت می گردد. شکل ۶ میکروگرافهای تهیه شده با استفاده از تکنیک میکروسکوپی نوری برای این دو نوع نمونه را نشان می دهد.

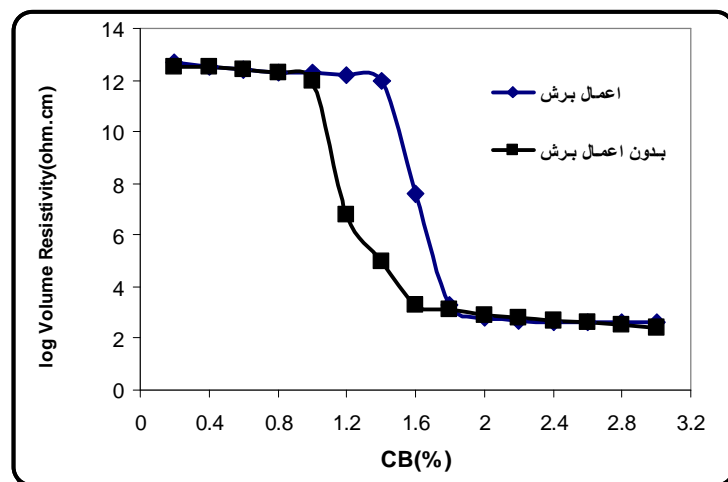
شکل ۷ تأثیر دمای آزمون را بر روی میزان مقاومت الکتریکی کامپوزیت با رزین E828 که با دو درصد حجمی دوده گرید PRINTEX XE2B مخلوط گردیده است را نشان می دهد. با افزایش دما تا حدود ۱۳۵ درجه سانتیگراد مقاومت حجمی نمونه افزایش یافته و پس از آن کاهش می یابد. به دلیل انبساط حرارتی رزین با دما، مسیرهای هدایت الکتریسیته شکسته شده و فاصله بین ذرات دوده افزایش یافته که در نتیجه آن مقاومت حجمی نمونه افزایش می یابد. در محدوده دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد به دلیل نزدیک شدن به دمای شیشه ای کامپوزیت، حرکت ذرات دوده در ماتریس پلیمری افزایش یافته و در نتیجه ذرات دوده مجدداً به یکدیگر چسبیده و مقاومت حجمی کامپوزیت کاهش می یابد. همچنین با کاهش WPE انتظار می رود که وابستگی مقاومت حجمی به دما کاهش یابد زیرا در این صورت مسیر هدایت تابع دما نخواهد بود. شکل ۸ تأثیر دمای پخت را بر روی میزان مقاومت الکتریکی کامپوزیت در درصدهای حجمی مختلف دوده نشان می دهد. با افزایش دمای پخت به دلیل کاهش ویسکوزیته رزین حرکت ذرات دوده در درون ماتریس پلیمری ساده تر بوده که در نتیجه آن مسیرهای بهتری برای هدایت الکتریکی تشکیل می شود که این امر منجر به بهبود خواص الکتریکی می شود. همچنین با افزایش دمای پخت حرکت ذرات دوده بیشتر شده که در نتیجه آن نیروهای دافعه کولنی (الکتروستاتیکی) کاهش یافته و متعاقب آن هدایت الکتریکی افزایش می یابد.



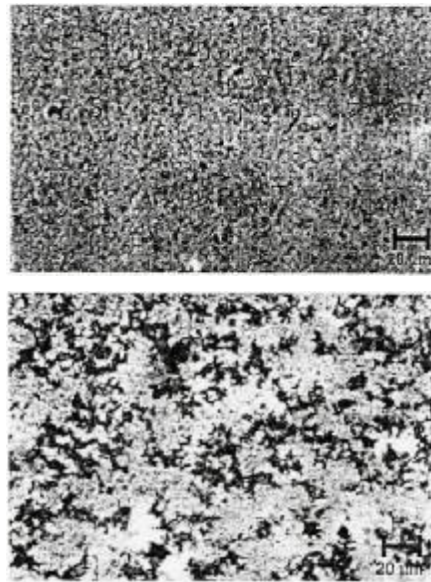
شکل ۱- تأثیر نوع دوده بر روی میزان مقاومت الکتریکی



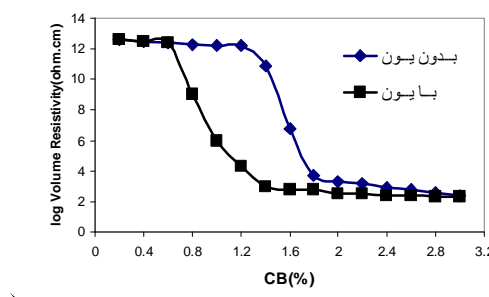
شکل ۲- تأثیر نوع رزین و درصد حجمی آن بر روی مقاومت الکتریکی



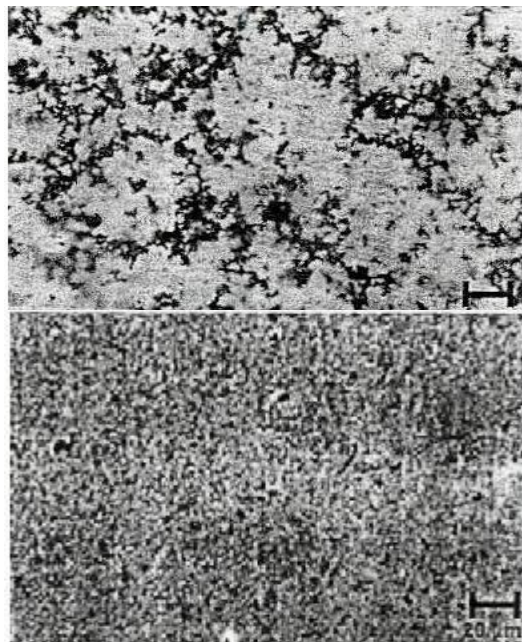
شکل ۳- تأثیر اعمال برش بر روی میزان مقاومت الکتریکی



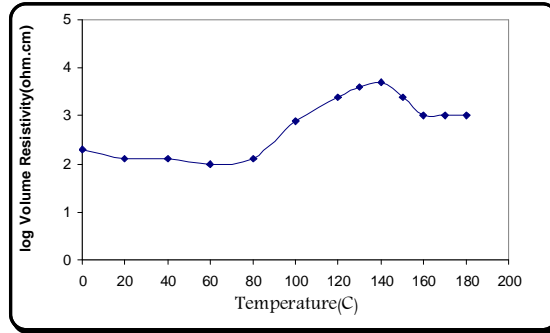
شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ نوری الف: اعمال نیروی برشی آرام ب: با اعمال نیروی برشی آرام



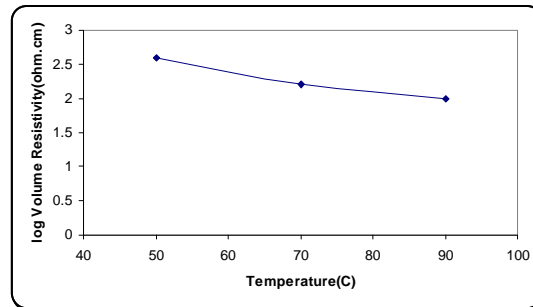
شکل ۵- تأثیر افزودن یون بر روی میزان مقاومت الکتریکی



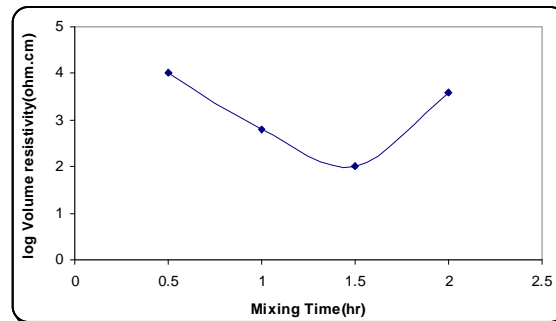
شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ نوری الف: با افزودن یون ب: بدون افزودن یون



شکل ۷- تأثیر دمای آزمون بر روی میزان مقاومت الکتریکی



شکل ۸- تأثیر دمای پخت بر روی میزان مقاومت الکتریکی



شکل ۹- تأثیر زمان اختلاط بر روی میزان مقاومت الکتریکی

نتیجه گیری

- (۱) با افزایش ساختار دوده آستانه هدایت به درصدهای پایینتری منتقل می شود.
- (۲) با کاهش ویسکوزیته رزین، آستانه هدایت به درصدهای پایینتری منتقل می شود.
- (۳) اعمال برش ملایم سبب می شود که آستانه هدایت به درصدهای پایینتری منتقل شود.
- (۴) افزودن یون و به تبع آن خنثی سازی بارهای الکتروستاتیکی حاصل در حین فرآیند اختلاط سبب می شود که آستانه هدایت به درصدهای پایینتری منتقل شود.
- (۵) افزایش دمای پخت که به دلیل کاهش ویسکوزیته و تشکیل آسانتر شبکه های هادی رخ می دهد سبب می شود که آستانه هدایت به درصدهای پایینتری منتقل شود.
- (۶) با افزایش دمای محیط آزمایش تا نزدیکی دمای شیشه ای شدن، هدایت الکتریکی کاهش می یابد. در حوالی دمای شیشه ای شدن هدایت الکتریکی افزایش می یابد.
- (۷) افزودن مقادیر اندک از دوده هادی تاثیر چندانی بر خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت اپوکسی ندارد.

منابع و مراجع

1. Conductive Polymers and Plastics in Industrial Applications, L. Rupprecht Editor, ISBN 1-884207-77-4, (1999).
2. M. A. Karasz and G. E. Wnek. "Electrically Conducting Polymers: Newer Applications " in Macromolecular Design of Polymeric Materials, K. Hatada, T. Kitayama and O. Vogl, eds., Marcel Dekker, New York, Ch. 32, p. 561 (1997).
3. Structure and Properties of Conducting Polymer Composites (New Concepts in Polymer Science), by V.E.Gul.
4. Carbon fibre filled conductive composites based on EVA EPDM and their blends by N. C. Das, T. K. Chaki, D. Khastgir, Journal of Polymer Engineering, 22, 115-1362 (2002).
5. Effect of processing parameter, applied pressure and temperature on the electrical resistivity of rubber based conductive by N. C. Das, T. K. Chaki, D. Khastgir, Carbon, 807-816, 40 (2002).
6. A.J.Epstein, Electrical Conductivity in Conjugated Polymers in "Conductive Polymers and Plastics in Industrial Applications, L. Rupprecht Editor, Ch. 1, p. 1 (1999).
7. T.Vikki, O.Ikkala, L.O.Pietila, Processability of Electrically Conductive Polyaniline Due to Molecular Recognition in "Conductive Polymers and Plastics in Industrial Applications, L. Rupprecht Editor, Ch. 3, p.19 (1999).
8. G.Genskens, E. De Kezel, S. Blacher and F.Brouers, Eur.Polym.J.,27,1261(1991).
9. F.Gubbels, R.Jermore, Ph. Tessie, E. Vanlathem, R.Deltour, A. Calderone, V.Parente, and J. L Breads, Macromolecules, 27,1972(1994).
10. M. Narkis, R.Tchoudakov, and O. Breuer, ANTEC95, P1343-1346.
11. R. Tchoudakov, and O. Breuer, M. Narkis and A. Siegman, Polym. Eng. Sci.,36, 1336(1996).
12. M.Sumita, K. Sakata, S. Asai, K. Miyasaka, and H. Nakagawa, Polym. Bull., 25,265(1991).
13. M.Sumita, K. Sakata, H. Nakagawa, S. Asai, K. Miyasaka and M. Tanemura, Colloid Polym Sci., 270, 134(1992).
14. J.Feng, C.M.Chan, Carbon Black Filled Immiscible Blend of Poly(Vinylidene Flouride) and High Density Polyethylene: Electrical Properties and Morphology in "Conductive Polymers and Plastics in Industrial Applications, L. Rupprecht Editor, Ch. 7, p.43 (1999).
15. A.C.Nixon, Rheological Characterization of an Electrically Conductive Composite in "Conductive Polymers and Plastics in Industrial Applications, L. Rupprecht Editor, Ch. 8, P. 57(1999).
16. M.Weber, M.R.Kamal, Estimation of the Volume Resistivity of Conductive Fiber Composites by Two New Models in "Conductive Polymers and Plastics in Industrial Applications, L. Rupprecht Editor, Ch. 9, P. 61(1999).
17. J.Y.Lee, D.Y.Kim, C.Y.Kim, K.T.Song and S.Y.Kim, Effect of Thermal Treatment on Electrical Conductivity of Polypyrrole Film Cast from Solution in "Conductive

- Polymers and Plastics in Industrial Applications, L. Rupprecht Editor, Ch. 10, P. 69(1999).
18. R.I.Danescu and D.A.Zumbrunnen, Creation of Electrically Conducting Plastics by Chaotic Mixing in "Conductive Polymers and Plastics in Industrial Applications, L. Rupprecht Editor, Ch. 11, P. 77(1999).
 19. R.I.Danescu and D.A.Zumbrunnen, Production of Electrically Conducting Plastics at Reduced Carbon Black Concentrations by Three Dimensional Chaotic Mixing in "Conductive Polymers and Plastics in Industrial Applications, L. Rupprecht Editor, Ch. 12, P. 85(1999).
 20. V.Haddadi-asl, T.Mohammadi, Iranian Journal of Polymer, Vol. 5, No. 3, 1996
 21. V.Haddadi-asl Iranian Journal of Polymer, Vol. 5, No. 2, (1996).
 22. Thongruang, W., Spontak, R.J., and Balik, C.M., "Correlated Conductivity and Mechanical Property Analysis of High-Density Polyethylene filled with Graphite and Carbon Fiber," Polymer, 43, 2279 (2002).
 23. Electrical and mechanical properties of conductive carbon black filled EVA, EPDM and their blends by N. C. Das, T. K. Chaki, D. Khastgir, Kautschuk Gummi unststoffe, 55, 300-306, 6 (2002).
 24. Effect of axial stretching on electrical resistivity of short carbon fibre and carbon black filled conductive rubber comp by N. C. Das, T. K. Chaki, D. Khastgir, Polymer International, 156-163, 51 (2002).
 25. Fakirov S.; Evstatiev M.; Friedrich K.; Polymer Blends, Vol. II, Chap. 33, (2002).
 26. Grmela M.; Bousmina M.; Palierne J.F.; Rheologica Acta 40, pp560-569; (2001).
 27. Bousmina M.; Aounia M.; Chauhry B.; Rheologica Acta 40, pp538-551; (2001).
 28. Conducting Polymers, Fundamentals and Applications: A practical Approach, P. Chandrasekhar Editor, Kluwer, ISBN 0-7923-8564-0, (1999).
 29. Handbook of Conducting Polymers, 2nd edition, T. Skotheim, R.L. Elsenbaumer and J. R. Reynolds Editors, Marcel Dekker, ISBN 0-8247-0050-3, New York, (1998).
 30. Intrinsically Conducting Polymers: An Emerging Technology, M. Aldissi Editor, ISBN 0-7923-2456-0, (1993).
 31. Masahiro Funabashi, Polymer International ,45, 303 – 307, (1998).