

بررسی رسانندگی الکتریکی لاستیک کلروپرن تقویت شده با دوده و الیاف کوتاه کربن

Electrical Conductivity of Short Carbon Fibers and Carbon Black-Reinforced Chloroprene Rubber

علیرضا خوش نیت^{۱*}، محمد میرعلی^۱، محمود همتی^۱، فرامرز افشار طارمی^۲، علی اصغر کتاب^۲

۱- تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده علوم و تکنولوژی پلیمر، صندوق پستی ۱۸۷۴۵/۴۱۶۳

۲- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۵۸۷۵/۴۴۱۳

دریافت: ۸۰/۱۲/۱۶، پذیرش: ۸۱/۳/۲۶

چکیده

الاستومرها و پلاستیکها ذاتاً عایق اند، اما می توان آنها را با اضافه کردن اجزای رسانا مانند دوده های رسانا و الیاف کربن و ذرات فلز رسانا کرد. رسانا شدن این نوع کامپوزیتها ناشی از تشکیل شبکه ذرات برکنده رسانا در بستر پلیمر است.

در این پژوهش، رسانندگی لاستیک کلروپرن که با دوده و الیاف کربن پر شده است به عنوان تابعی از غلظت دوده و الیاف کربن و تغییرات دما و فشار بررسی شده است. رسانندگی الکتریکی کلروپرن در مجاورت دوده و شرایط عملیاتی اختلاط مناسب به حد نیمه رساناها و در مجاورت الیاف کربن به حد شبه رساناها رسیده است. در ضمن، حساسیت تشکیل شبکه رسانا در این آمیزه در اثر گرما و فشار بیشتر می شود، در نتیجه این مواد کاربردهای متنوعی در ساخت حسگرهای گرمایی و فشاری حساس خواهند داشت.

واژه های کلیدی: رسانندگی الکتریکی، لاستیک کلروپرن، الاستومر، دوده، الیاف کربن

Key words: electrical conductivity, chloroprene rubber, elastomer, carbon black, carbon fibers

مقدمه

نقش پلیمرها در صنعت معمولاً به عنوان عایقهای الکتریکی مطرح است. اما، امروزه در بسیاری از کاربردهای صنعتی استفاده از مواد پلیمری رسانای الکتریسته ضرورت پیدا می کند. یکی از روشهای مورد استفاده در افزایش رسانندگی الکتریکی پلیمرها، پر کردن آنها با حجمی از پودرهای فلزی، دوده، الیاف فلزی به عنوان اجزای رساناست. بدیهی است، در صورتی که ذرات رسانا تا حد کافی به یکدیگر نزدیک شوند، با تشکیل شبکه ای مرتبط می توانند جریان

الکتریکی را در آمیزه برقرار کنند [۲،۱].

خصوصیات ویژه اجزای رسانا از حیث فیزیکی و شیمیایی و همچنین چگونگی فراورث و عوامل موثر بر آن تا رسیدن به پراکندگی و توزیع مناسب نقش بسزایی در ایجاد و افزایش رسانندگی الکتریکی آمیزه ها خواهد داشت [۳]. در این زمینه مطالعات بیشمار نقش دوده و خصوصیات ویژه آن را در رسانایی الکتریکی آمیزه های بکار رفته با دوده نشان داده است [۳،۲]. استفاده از دوده برای نیل به این هدف به عواملی چون قابلیت پلیمر به پذیرش

مستون مکاتبات، پیام نگار: khoshniat@ripi.ir

۱۱۰ Baypren با گرانیروی مونی ۴۵-۴۰ (°C) ۱۰۰ و (ML) (۱+۴) و درصد بلورینگی کم، دوده N ۱۱۰ از نوع کوره ای دارای مشخصات DBP برابر $113 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ و مساحت سطح با عبور گاز N_2 برابر $143 \text{ m}^2/\text{g}$ و جذب سطحی 145 g/kg و اندازه ذره 23 nm ، الیاف کربن با طول 10 mm و قطر $5 \mu\text{m}$ و رسانندگی الکتریکی $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ مورد استفاده قرار گرفته است.

دستگاهها

دستگاههای مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از: مخلوط کن برابندر مدل PL ۲۰۰۰ با محفظه نوع Cam N ۵۰ و حجم 75 cm^3 ساخت آلمان مجهز به سیستم کنترل و ثبت کامپیوتری، میکروسکوپ الکترون پویشی (SEM) کمبریج ساخت انگلستان مدل S ۳۶۰ Teraohm meter جهت سنجش مقاومت الکتریکی براساس استاندارد ASTM D2۵۷ با نام Ceast ساخت ایتالیا و اهم متر حساس و منبع تغذیه و سیستم الکترودهای چهار تیغه ای قابل قرار گیری در آن برای سنجش مقاومت الکتریکی به روش دو تیغه ای و چهار تیغه ای براساس استاندارد ASTM F۴۳ برای مقاومتهای کم.

روشها

آماده سازی و تهیه آمیزه ها

اختلاط آمیزه ها در مخلوط کن برابندر در دمای 80°C درجه سانتی گراد و با سرعت ۳۰ دور بر دقیقه و زمان اقامت ۹ دقیقه انجام شده و سپس از مخلوط بدست آمده صفحاتی به ضخامت ۲ میلی متر به روش قالبگیری فشاری در دمای 165°C درجه سانتی گراد بین لایه های فیلم پلی اتیلن ترفتالات و تحت فشار ۱۷۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع برای مدت ۲۰ دقیقه تهیه شده است.

اندازه گیری رسانندگی الکتریکی

اندازه گیری رسانندگی الکتریکی آمیزه ها با دو روش انجام شده است. برای آمیزه های با مقاومت زیاد ($\rho > 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$) مطابق با استاندارد ASTM D2۵۷ صفحاتی دایره ای تهیه شده و با قراردادن در بین الکترودهای دیسکی و برقراری مدار الکتریکی با ولتاژ ۱۰ تا ۵۰۰ ولت و عبور جریان از آن، مقاومت نمونه ها اندازه گیری شده است.

برای آمیزه های با مقاومت کم ($\rho < 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$) از روش چهار تیغه ای استفاده و با اعمال منبع تغذیه ای تا ۳۰ ولت و تعیین جریان عبوری از دو الکتروود کناری، اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود میانی

دوده، جزء حجمی بحرانی که موجب پدیده نفوذ (Percolation) و رسانندگی الکتریکی می شود، فرایند پذیرگی کامپوزیت نهایی و به تعادل رسیدن خواص مکانیکی و سطح رسانندگی کامپوزیت بستگی دارد. از سوی دیگر، خواص ذاتی دوده از جمله میزان تخلخل بیشتر، میزان سطوح بیشتر و گروه های شیمیایی موجود در سطوح دوده نیز نقش موثری در ایجاد تماس های بین خوشه ای دوده و تشکیل ساختار شبکه ای آنها دارد و ارتباط منطقه ای بین ذرات دوده در تمامی بستر پلیمر را حفظ می کند. به همین جهت در بین انواع دوده ها، نوع دوده کتجن (Ketjen black) و دوده استیلن (Acetylene black) به عنوان دوده هایی با بهترین ساختار شیمیایی و فیزیکی در ایجاد خاصیت رسانایی الکتریکی در پلیمرها مطرح اند.

خواص رئولوژیکی مجزا و ترکیبی پلیمر و دوده نیز عامل موثری در تشکیل شبکه دوده ای است، از این رو در خلال ترکیب و اختلاط پلیمر با دوده دو فرایند ممکن است اتفاق بیفتد:

(الف) افزایش گرایش خوشه های دوده به باقی ماندن در شبکه پلیمری و همچنین جدا شدن از خوشه های دیگر و (ب) افزایش گرایش خوشه های دوده و تجمع آنها که این فرایند بستگی به اندازه خوشه ها و جاذبه بین آنها، کشش سطحی پلیمر، ایجاد پیوند میان پلیمر و دوده و همچنین تمایل پلیمر به بلورینگی و در نتیجه ممانعت ورود دوده در این فاز دارد.

معمولاً پلیمرها در ناحیه عایقی، مقاومتی در حدود $10^{15} - 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ دارند که به محض تشکیل شبکه دوده های رسانا در بستر پلیمر به مقاومتی در حدود $10^0 \Omega \cdot \text{cm}$ می رسند و در طبقه پلیمرهای نیمه رسانا جای می گیرند. میزان کاهش مقاومت در این شرایط به عوامل یاد شده مربوط است. همچنین رسانندگی الکتریکی گرمانرمهای پر شده با الیاف کربن و فراورش آن با اکستروژن و قالبگیری تزریقی نیز بررسی شده است [۴] و مطالعاتی نیز در بررسی رسانندگی الکتریکی آمیزه های الاستومری از جمله NBR و CR پر شده با الیاف کربن انجام شده است [۵، ۶، ۷]. در این مقاله، رسانندگی الکتریکی آمیزه های رسانا بر پایه الاستومر کلروپرن که با دوده و الیاف کربن پر شده اند و نقش عوامل مختلف از جمله غلظت اجزای رسانا و نسبت طول به قطر و توزیع الیاف و همچنین تغییرات دما و فشار بر رسانندگی الکتریکی آمیزه ها بررسی شده است.

تجربی

مواد

در این پژوهش، الاستومر کلروپرن محصول شرکت بایر و از نوع

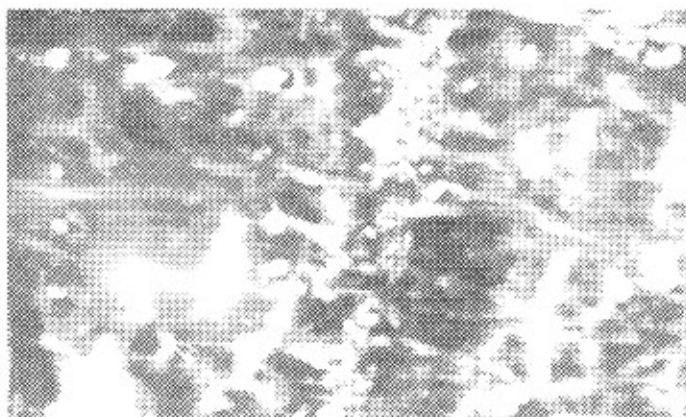


شکل ۲- تصویر سطح مقطع شکست آمیزه کلروپرن با ۲۰ phr دوده (بزرگنمایی هزار برابر).

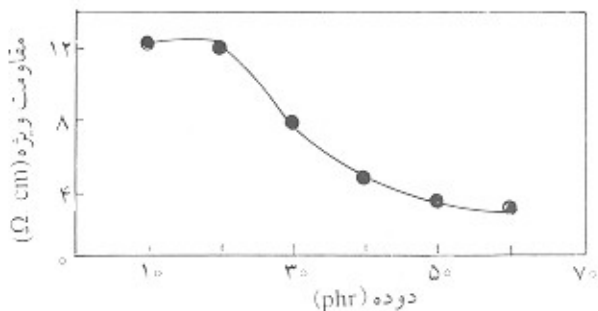
(ϕ_c) عواملی چون شکل شناسی ذرات دوده، حداکثر تراکم جزئی دوده و چگونگی انجام فرایند و اختلاط در نحوه تشکیل شبکه دوده موثر است [۸].

منحنی بدست آمده از تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب غلظت دوده نشان می دهد که غلظت بحرانی $\phi_c \approx 0.2$ است و انتهای ناحیه نفوذ در $\phi = 0.4$ ظاهر می شود.

براساس پژوهشهای به عمل آمده ثابت شده است [۳،۲] که نیروهای بین سطحی فاز رسانا نقش اساسی در تشکیل شبکه رسانا در غلظت بحرانی و افزایش ناگهانی رسانندگی به عهده دارد. اصولاً در کمتر از غلظت بحرانی دوده (ϕ_c) فاز رسانا به صورت کاملاً پراکنده بوده و در اطراف ذرات رسانا تک لایه نسبتاً ضخیمی از ماتریس



شکل ۳- تصویر سطح مقطع شکست آمیزه کلروپرن با ۴۰ phr دوده (بزرگنمایی هزار برابر).



شکل ۱- منحنی تغییرات مقاومت الکتریکی کلروپرن بر حسب غلظت دوده ۱۱۰ N.

به وسیله میکرو ولت متر بدست آمده و پس از محاسبه با استفاده از معادله زیر مقاومت ویژه (مقاومت حجمی) آمیزه حاصل شده است:

$$\rho = \frac{V}{I} 2\pi s \quad (1)$$

در این معادله، ρ مقاومت ویژه، V افت ولتاژ بین دو الکتروود، I جریان عبوری از دو الکتروود کناری و s فاصله بین الکتروودهاست.

نتایج و بحث

اثر غلظت جزء رسانا بر مقاومت الکتریکی

نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی کلروپرن پر شده با دوده در شکل ۱ نشان دهنده آن است که چگونه یک لاستیک با خواص عایقی در غلظت مناسب از دوده به لاستیک رسانا مبدل می شود. در واقع، تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب غلظت دوده دلالت بر سه رفتار دارد:

(الف) ناحیه عایق که افزایش جزء حجمی دوده تاثیر محسوسی بر مقاومت الکتریکی آمیزه ندارد و علت آن عدم تشکیل شبکه خوشه‌های دوده و زیادی فاصله بین ذرات دوده است.

(ب) ناحیه نفوذ که در غلظت بحرانی دوده (ϕ_c) شروع می شود و افزایش غلظت دوده تغییرات شدیدی را در مقاومت الکتریکی آمیزه موجب می شود. در این ناحیه شبکه دوده تشکیل شده و پرش الکتروونها از فواصل بسیار کم بین ذرات دوده مطابق با مکانیسم تونل زنی (Tunneling) و تبعیت از مکانیک کوانتومی انجام می شود.

(ج) ناحیه رسانا که در این ناحیه مقاومت الکتریکی به حد قابل قبولی کاهش می یابد و افزایش بیشتر دوده تغییر چندانی در مقاومت الکتریکی پدید نمی آورد، جز اینکه باعث افت خواص مکانیکی می شود. بدیهی است در رسیدن به حداقل غلظت بحرانی دوده

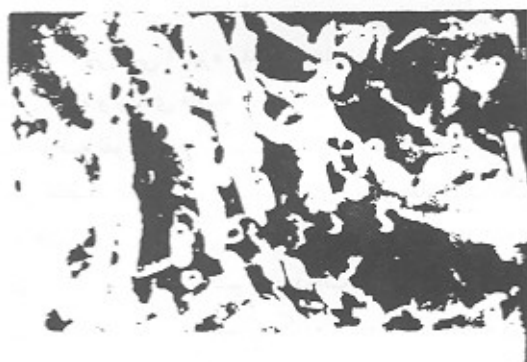


شکل ۵- تصویر سطح مقطع شکست آمیزه کلروپرن با ۱۰ phr الیاف کربن.

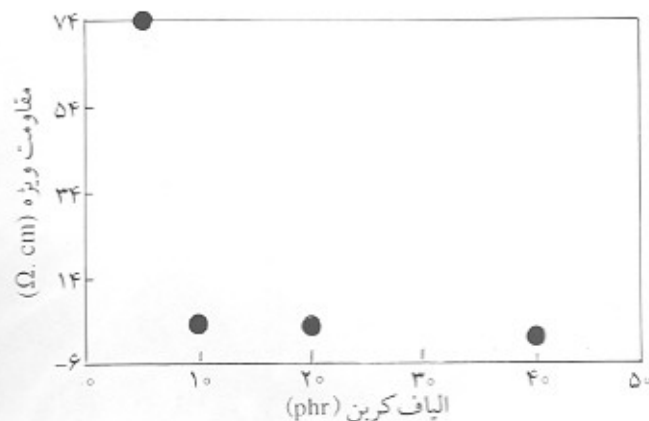
مقاومت الکتریکی آمیزه با غلظت کمتر الیاف نسبت به آمیزه با غلظت بیشتر می تواند ناشی از اندازه بزرگتر و توزیع اتفاقی تر الیاف در غلظت کمتر باشد که این مسئله ممکن است نتیجه برش مکانیکی بیشتر در آمیزه با غلظت بیشتر باشد. شکل‌های ۷ و ۸ نتایج توزیع اندازه الیاف را در آمیزه‌ها نشان می دهد.

اثر دما بر مقاومت الکتریکی

ارتباط دما با مقاومت الکتریکی آمیزه‌های کلروپرن در ۴۰ و ۶۰ phr دوده در شکل ۹ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، در محدوده دمایی ۲۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد رفتار متفاوتی در مقاومت الکتریکی پدید آمده است. افزایش مقاومت



شکل ۶- تصویر سطح مقطع شکست آمیزه کلروپرن با ۲۰ phr الیاف کربن.

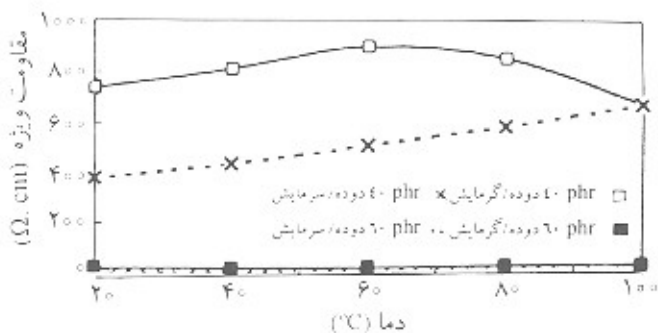


شکل ۴- منحنی تغییرات مقاومت الکتریکی کلروپرن بر حسب غلظت الیاف کربن.

جذب می شود. در غلظت بحرانی، ذرات رسانا با پوسته ماتریس به یکدیگر نزدیک شده و تشکیل شبکه زنجیری کشیده شده را می دهد که انتقال الکترون از این شبکه براحتی انجام خواهد شد. تصاویر میکروسکوپ الکترون پویشی (SEM) از سطوح شکسته آمیزه‌ها، مراحل شروع به هم پیوستن ذرات در محدوده غلظت بحرانی و تشکیل نهایی شبکه زنجیری فاز رسانا را در شکل‌های ۲ و ۳ بخوبی نشان می دهد.

نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی بر حسب غلظت الیاف نیز در شکل ۴ آمده است. رسانندگی الکتریکی آمیزه بر پایه الیاف به تعداد تماس‌های بین لیفی در شبکه رسانای آمیزه مربوط می شود. در غلظت بحرانی الیاف ابتدا شبکه رسانای سه بعدی در آمیزه به پایداری می رسد و رسانندگی سریع و آنی را به دنبال دارد و در مرحله بعدی با افزایش غلظت الیاف رسانندگی الکتریکی آمیزه به آرامی افزایش می یابد. از آنجا که مقاومت الکتریکی الیاف بسیار کم است ($\rho \sim 10^{-3} \Omega.cm$)، از این رو در غلظت کمی از الیاف به محدوده بحرانی می رسد. اما، تفاوت قابل ملاحظه در مقاومت الکتریکی ذاتی الیاف و مقاومت الکتریکی آمیزه‌های پر شده با الیاف ناشی از احتمال عدم تماس بین لیفی یا عدم فعالیت الکتریکی در انتهای لیفها و توزیع نامناسب الیاف در ایجاد شبکه رسانا پیش بینی می شود. نکته قابل توجه در این نتایج کاهش مقاومت الکتریکی آمیزه با ۱۰ phr نسبت به آمیزه با ۲۰ phr است. تصاویر میکروسکوپ الکترون پویشی از سطوح شکسته آمیزه‌ها در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

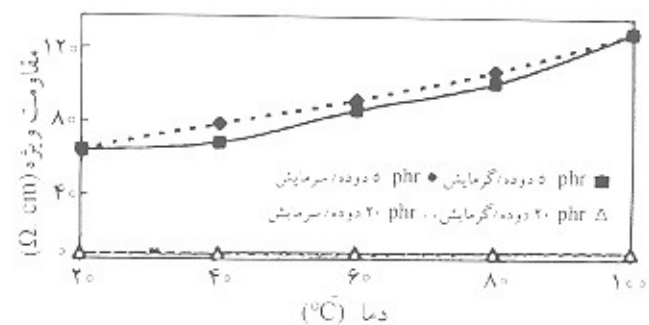
بنظر می رسد که ابعاد الیاف و توزیع آنها در آمیزه نقش مهمی در رفتار الکتریکی خواهد داشت. از این رو، اگر چه شرایط فراروش و قالبگیری در همه این آمیزه‌ها یکسان بوده است، ولی کاهش



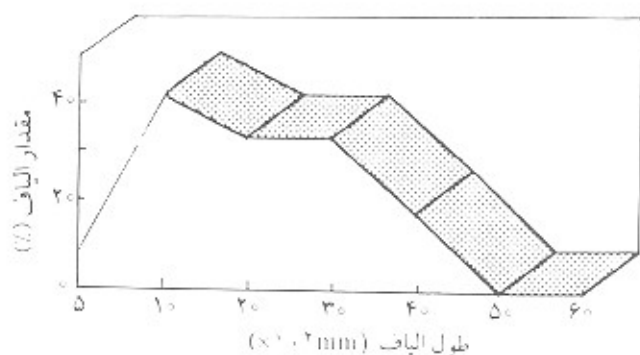
شکل ۹- منحنی تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب دما برای آمیزه کربوپرن - دوده.

$\exp(T_0/T)^{1/4}$ موثر خواهد بود [۱۳] و ثالثاً، دمای بالا موجب آرایش بیشتر ممانهای دو قطبی در ماتریس شده و ضمن ایجاد میدان الکتریکی و بر حسب قابلیت قطبیت ممانها در ماتریس، جریان الکتریسته از این ناحیه آسانتر صورت می پذیرد.

شکل ۹ نشان می دهد که مقاومت الکتریکی آمیزه‌ها در مرحله سرمایش شدت کاهش می یابد. این امر نتیجه تشکیل و به تعادل رسیدن شبکه رسانا و همچنین انقباض گرمایی ماتریس و کم شدن فاصله بین ذرات خواهد بود که در نهایت موجب کاهش مقاومت الکتریکی یا افزایش رسانندگی الکتریکی می شود. همچنین، اثر دما روی مقاومت الکتریکی آمیزه‌های پر شده با الیاف در شکل ۱۰ آمده است. ملاحظه می شود که با افزایش دما منحصراً رفتار PTC در مقاومت الکتریکی ظاهر می شود. بویژه آنکه این رفتار حتی در مرحله سرمایش هم مشاهده شده و مقاومت الکتریکی آمیزه باز هم زیاد می شود. از آنجا که توزیع اتفاقی الیاف مهمترین عامل در رسیدن به غلظت بحرانی و افزایش رسانندگی الکتریکی بشمار می رود، از این رو نوسانات گرمایی ایجاد شده در مرحله گرمایش و سرمایش را می توان عامل ممانعت کننده در توزیع اتفاقی الیاف دانست که منجر

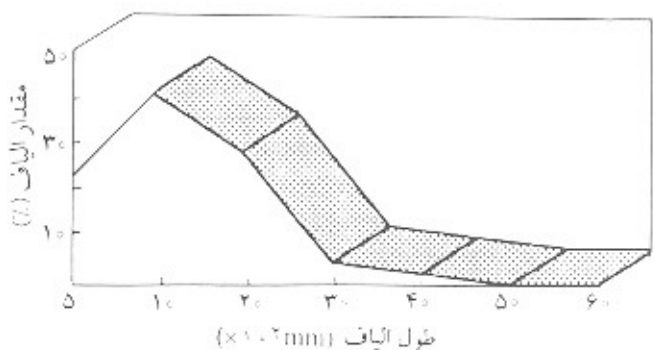


شکل ۱۰- منحنی تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب دما برای آمیزه کربوپرن - الیاف کربن.

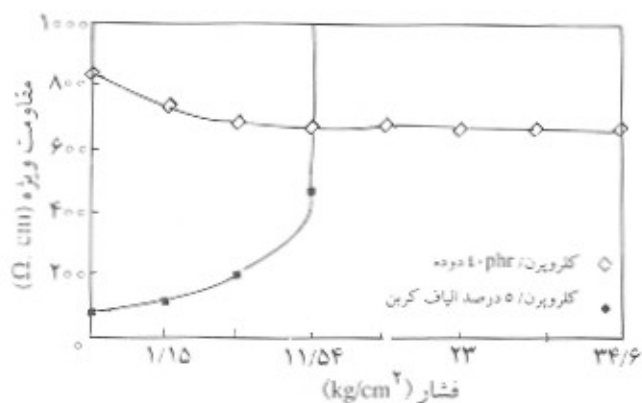


شکل ۷- اندازه و توزیع الیاف در آمیزه کربوپرن با ۲۰ phr الیاف کربن.

الکتریکی تا دمای ۶۰ درجه سانتی گراد دلالت بر ضریب گرمایی مثبت (Positive Temperature Coefficient, PTC) دارد، در حالی که افزایش بیشتر دما تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد حاکی از ضریب گرمایی منفی (Negative Temperature Coefficient, NTC) است. رفتار PTC ناشی از کاهش جریان الکتریکی در مسیر شبکه رسانا به دلیل افزایش فاصله بین ذرات دوده یا تخریب مسیر شبکه است [۹، ۱۰، ۱۱]. ایجاد فاصله بیشتر ذرات را می توان با پدیده انقباض گرمایی ماتریس توجیه کرد. با افزایش دما ضمن افزایش فاصله بین ذرات، جزء حجمی ذرات دوده نیز کاهش می یابد تا به حد جزء حجمی در غلظت بحرانی برسد. این امر جهش الکترون از ذره‌ای به ذره دیگر را کاهش می دهد و در نتیجه مقاومت الکتریکی آمیزه افزایش می یابد [۱۰، ۱۲]. اما ظهور رفتار NTC در دماهای بالاتر با سه مکانیسم قابل توجیه است: اولاً، پس از شکست خوشه‌های دوده و تخریب محلی شبکه رسانا به دلیل جنبش بیشتر ذرات احتمال تشکیل مجدد شبکه و اصلاح آرایش و رسیدن به تعادل وجود دارد [۱۳]. ثانیاً، اثر دما در افزایش انرژی فعالسازی الکترونها و عبور بهتر از سد پتانسیل بین ذرات با مکانیسم جهش و طبق رابطه



شکل ۸- اندازه و توزیع الیاف در آمیزه کربوپرن با ۱۰ phr الیاف کربن.



شکل ۱۲- منحنی تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب فشار برای آمیزه کلروپرن-الیاف کربن.

را اجزای رسانا از نوع دوده و الیاف کربن تشکیل می‌دهند که به طریق مناسب در توده ماتریس آرایش می‌یابند و شبکه منسجم و متصل را بوجود می‌آورند.

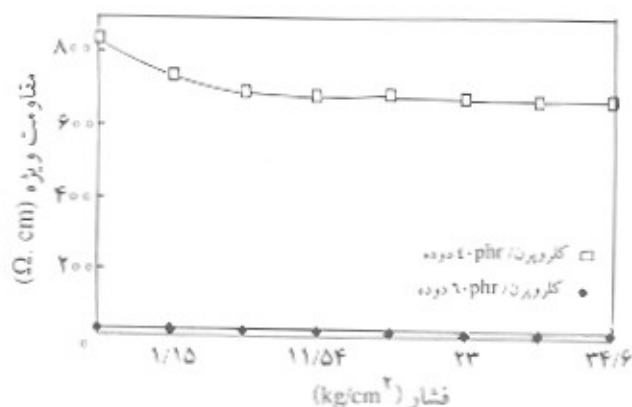
در این پژوهش، مقاومت الکتریکی کلروپرن پر شده با دوده از ناحیه عایقی $10^{12} \Omega.cm$ به $833 \Omega.cm$ با خواص مکانیکی مطلوب رسیده است. از طرف دیگر، وجود الیاف کربن با مقاومت الکتریکی بسیار کم $10^{-2} \Omega.cm$ در لاستیک کلروپرن موجب شده است تا در جزء حجمی بسیار کم مقاومت سیستم به $0.2 \Omega.cm$ برسد و از این رو، کامپوزیت یاد شده در رده شبه رساناها جای گیرد که نتیجه‌ای فوق العاده است.

گرمایش آمیزه‌های پر شده با دوده در مرحله اندازه‌گیری تا 60 درجه سانتی‌گراد موجب افزایش مقاومت الکتریکی (اثر PTC) و در پی آن، تا دمای 100 درجه سانتی‌گراد باعث کاهش شدید مقاومت الکتریکی (اثر NTC) خواهد شد.

در مرحله سرمایش تا رسیدن به دمای محیط، تداوم کاهش در مقاومت الکتریکی اتفاق می‌افتد و پس از به تعادل رسیدن دوباره مقاومت الکتریکی اولیه مشاهده می‌شود. گرمایش و سرمایش آمیزه‌های شامل الیاف کربن در هر صورت موجب افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود، ولی پس از رسیدن به دمای محیط مقاومت اولیه به مقدار قبل از عملیات گرمایی بازمی‌گردد. از سوی دیگر، افزایش فشار در آمیزه‌های شامل دوده باعث کاهش مقاومت الکتریکی به دلیل کاهش حجم کل و افزایش جزء حجمی دوده خواهد شد. اما، مقاومت الکتریکی و تغییرات آن در اثر فشار در آمیزه‌های شامل الیاف بمراتب بیشتر است.

مراجع

1. Harry S. K., and Milewski J. V., *Hand Book of Fillers*



شکل ۱۱- منحنی تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب فشار برای آمیزه کلروپرن-دوده.

به کاهش این توزیع و افزایش مقاومت الکتریکی آمیزه می‌شود. سطح حلقه ایجاد شده در منحنی‌ها ناشی از اتلاف گرمایی در سیستم بوده که با افزایش غلظت الیاف، کاهش در اتلاف پدید می‌آید.

اثر فشار بر مقاومت الکتریکی

اثر افزایش فشار بر آمیزه پر شده با دوده موجب کاهش مقاومت الکتریکی آمیزه می‌شود. این امر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. وجود چنین پدیده‌ای به افزایش جزء حجمی دوده و افزایش تعداد تماس‌های بین شبکه‌ای نسبت داده می‌شود. از طرف دیگر، رفتار کاهش مقاومت بخصوص در نزدیکی جزء حجمی بحرانی غیرخطی خواهد بود. نکته قابل توجه دیگر آن است که هر قدر غلظت دوده در آمیزه بیشتر شود حساسیت مقاومت به فشار کاهش می‌یابد زیرا در آن صورت تغییرات فاصله بین ذرات محسوس نخواهد بود. اما، اثر تغییرات فشار بر آمیزه پر شده با الیاف رفتار متفاوتی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۲ افزایش فشار بر آمیزه موجب افزایش مقاومت الکتریکی یا کاهش رسانندگی الکتریکی می‌شود. همان گونه که قبلاً هم اشاره شد، از آنجا که نقش اصلی در ایجاد رسانندگی الکتریکی این گونه آمیزه‌ها را آرایش اتفاقی الیاف به عهده دارد، بنابراین هرگونه تغییر در فشار چه افزایش و چه کاهش موجب تغییر در توزیع الیاف شده و در نهایت مقاومت الکتریکی را افزایش می‌دهد. به همین ترتیب، برداشت فشار از آمیزه نیز موجب افزایش مقاومت الکتریکی خواهد شد.

نتیجه‌گیری

عامل اساسی در انتقال جریان الکتریکی در بیشتر پلیمرهای ذرات عایق

- for Plastics, Van Nostrand Reinhold, NewYork, 1987.
2. Sichel E. K., *Carbon Black Polymer Composites*, Marcel Dekker, NewYork, 1982.
 3. Probst N. and Smet H., "A New Family of Conductive Carbon Blacks", *Int. Polym. Sci. Tech.*, **24**, 1, 1997.
 4. Martinsson J. and White J.L., "Characteristics of Thermoplastics Containing Electrically Conducting Asymmetric Particles: Anisotropic Electrical Conductivity of Injection Moulding Parts Extrusion Behaviour", *Polym. Compos.*, **7**, 5, 302-314, 1986.
 5. Pramanik P.K., Khastgir D., De S.K., and Saha T.N., "Pressure-Sensitive Electrically Conductive Nitrile Rubber Composites Filled with Particulate Carbon Black and Short Carbon Fiber", *J. Mater. Sci.*, **25**, 3848, 1990.
 6. Purnendu B. Jana S. Chaudhuri A.K. De S.K., "Electrical Conductivity of Short Carbon Fiber Reinforced Polychloroprene Rubber and Mechanism of Coduction", *Polym. Eng. Sci.*, **32**, 6, 1992.
 7. Pramanik P.K., Khastgir D., and Saha T.N., "Effect of Filler Blend Composition and Temperature on the Properties of Electrically Conductive Rubber Composites", *Plast. Rubber. Compos: Process. Appl.*, **15**, 3, 1991.
 8. Linlee B., "Electrical Conductive Polymer Composties and Blends", *Polym. Eng. Sci.*, **32**, 1, 1992.
 9. Meyer J., "Stability of Polymer Composties as Positive-Temperature Coefficient Resistors", *Polym. Eng. Sci.*, **14**, 10, 1997.
 10. Tang H., Liu Z.Y., Piao J., Chen X.F., Lou Y.X. and Li S.H., "Electrical Behavior of Carbon Black-Filled Polymer Composties : Effect of Interaction Between Filler and Matrix", *J. Appl. Polym. Sci.*; **51**, 1159, 1994.
 11. reidy R.F., Simkovich G., "Anomalous Electrical Behaviour of Polymer-Carbon Composties as a Function of Temperature", *J. Mater. Sci.*, **28**, 799, 1993.
 12. Bengtsson P., Klason C., Kubat J., and Mcqueen D.H., "Positive Temperature Coefficient Effects in the Electrical Resistivity of Carbon Black-Filled Chloroprene Rubber", *Plast. Rubber. Compos: Process. Appl.*, **15**, 4, 1991.
 13. Harsanyi G., *Polymer Films in Sensor Applications*, Technomic Publishing , company Inc, 1995.