

بررسی اثر نانو ذرات خاک رس بر خواص الکتریکی و مکانیکی پلی اتیلن شبکه‌ای شده

نوشین حقیقت جهرمی

پژوهشکده فرآیند

پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

تهران، ایران

Nooshin.haghighat@yahoo.com

شروین احمدی

پژوهشکده فرآیند

پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

تهران، ایران

Sh.ahmadi@ippi.ac.ir

محمد برمر

پژوهشکده علوم

پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

تهران، ایران

m.barmar@ippi.ac.ir

واژه‌های کلیدی — پلی اتیلن ، نانو ذرات خاک رس، نانو دی-
الکتریک، استحکام شکست ، ثابت دی‌الکتریک، فاکتور اتلاف

۱. مقدمه

امروزه با پیشرفت علم و فناوری در زمینه‌ی صنایع برق و الکترونیک، نیازمند گستره‌ای از خواص در ساخت هادی، نیمه هادی و عایق‌ها، در این صنایع هستیم. این نیاز بالقوه موجب گشته تا تحقیقات زیادی برای دستیابی به موادی با خواص الکتریکی مطلوب صورت بگیرد.

کاربرد عایق‌ها در ساخت مولدهای برق، موتورها، ترانسفورماتورها، برق‌گیرها، خازن‌ها، کابل‌ها، کلیدهای فشارقوی، و سایر تجهیزات فشارقوی بسیار گسترده است. با توجه به نوع کاربرد و شرایط محیطی که عایق در آن قرار می‌گیرد، علاوه بر خاصیت الکتریکی، سایر خواص فیزیکی و شیمیایی آن نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. رفتار مکانیکی، رفتار گرمایی، پارامترهای شیمیایی، خصوصیت‌های الکتریکی و عوامل اقتصادی از جمله

چکیده — در این پژوهش اثر نانو ذرات خاک رس اصلاح شده با نام تجاری closite 30B بر خواص الکتریکی و مکانیکی پلی اتیلن شبکه‌ای شده بررسی شده است. در واقع هدف از انجام این کار علاوه بر بررسی خواص ذکر شده بررسی اثر نانو ذرات بر فرآیند شبکه‌ای شدن پلی اتیلن نیز می‌باشد. برای این منظور مقادیر مشخصی از نانو خاک رس به همراه پراکسید، آنتی اکسیدانت و مقدار کافی استون به وسیله‌ی همزن مغناطیسی و حمام اولتراسونیک مخلوط شده و پس از خشک شدن کامل مخلوط، از آن برای تهیه‌ی کامپوزیت‌های ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی نانو ذره استفاده شد. آزمون تفرق اشعه ایکس نشان داد که در درصد‌های پایین نانو ذره مورفولوژی ورقه‌ای شده برای نانو کامپوزیت وجود دارد که تحقق این امر موجب بهبود خواص مکانیکی و الکتریکی نیز شده است. همچنین طبق بررسی‌های صورت گرفته، بیشترین بهبود خواص، در نمونه پر شده با ۳ درصد وزنی از نانو ذرات خاک رس حاصل شده و افزایش غلظت پرکننده نانو بیش از این مقدار موجب افت خواص ذکر شده، گردیده است

در سال‌های اخیر استفاده از نانو کامپوزیت‌ها در صنعت بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این دسته از کامپوزیت‌ها دارای خواص برتری نسبت به پلیمر خالص و کامپوزیت‌های حاوی پرکننده‌های معمولی هستند که این خواص شامل دمای واپیچش حرارتی بالا، نفوذ ناپذیری در برابر گازها، پایداری حرارتی و خواص مکانیکی بالا می‌باشد [۱].

بررسی‌های مختلف نشان داده است که با اضافه کردن نانو ذرات (که عمدتاً معدنی می‌باشند) به پلیمرها و تهیه نانو کامپوزیت، می‌توان عایق‌های الکتریکی مناسبی را تولید کرد [۲،۳].

از میان نانوکامپوزیت‌های تولید شده، نانو کامپوزیت‌های بر پایه سیلیکات‌های لایه‌ای، به خصوص مونت موریلونیت، به علت خواص ویژه‌ای که دارند، از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار هستند. ویژگی‌هایی مانند در دسترس بودن، نسبت منظر بسیار زیاد و قیمت مناسب آن‌ها باعث شده است تا این مواد به عنوان گزینه‌ی مناسبی برای تولید نانوکامپوزیت‌های پلیمری مورد توجه قرار گیرند [۴،۵]. درصد وزنی کمی از سیلیکات‌های ورقه‌ای که در ماتریس پلیمری پخش می‌شوند، می‌توانند مساحت سطحی بیشتری را برای برهم کنش فیلر و پلیمر در مقایسه با کامپوزیت‌های متداول فراهم آورند. در این پژوهش قصد بر آن است که اثر نانو ذرات خاک رس و اتصالات عرضی ایجاد شده در ماتریس توسط پراکسید به طور توأم بر خواص الکتریکی و مکانیکی این نانو کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار بگیرد.

۲. تجربی

۲.۱. مواد اولیه و آماده سازی نمونه‌ها

پلی اتیلن مورد استفاده در این پژوهش LDPE 0200 تولیدی پتروشیمی بندر امام است که مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات LDPE استفاده شده.

مقدار	واحد	روش اندازه‌گیری	خاصیت
۲	gr/۱۰ min	ASTM D 1238	M.F.I (۱۹۰°C / ۲/۱۶ kg)
۰/۹۲۰	gr/ml	TSTM 209B	دانسیته
۹۴	°C	ASTM D 1525	نقطه نرم شدگی

پراکسید استفاده شده در این پژوهش Trigonox 101 تولید شرکت Akzo Nobel است که به صورت مایعی شفاف با وزن مولکولی g/mol

موردی هستند که برای کاربرد یک ماده به عنوان عایق باید مورد توجه قرار بگیرند. در بکارگیری بسیاری از عایق‌ها به موادی نیاز است که در دماهای بالا منبسط نشوند. معمولاً ویژگی‌های فیزیکی مواد با افزایش دما، تغییر می‌کنند. نیروی کششی در عایق‌ها نباید به نقطه‌ای برسد که باعث تغییر شکل و فرسودگی بیش از اندازه‌ی آن‌ها شود. همچنین نباید دمای عملکرد یک ماده عایقی از نوع ترموپلاستیک (حتی برای یک زمان کوتاه)، به دمای نقطه ذوب آن برسد. وقتی مواد عایقی برای مدت طولانی‌تری در معرض حرارت قرار می‌گیرند، ترکیب شیمیایی آن‌ها تغییر می‌کند. این تغییر شیمیایی نه تنها باعث تغییر ویژگی‌های فیزیکی از حالت مجاز به حالت غیرمجاز می‌شود، بلکه کهنه‌گی و فرسودگی ماده را نیز به همراه خواهد داشت. بنابراین می‌توان گفت که مدت زمان عملکرد عایق با دمای مطلق آن عایق، نسبت عکس دارد. همچنین محیط بر روی رفتار شیمیایی ماده عایق اثرگذار است. معمولاً این محیط همان هوای حامل رطوبت است. اکسیژن موجود در هوا قادر است عایق را به گونه‌ای اکسید کند که به شکل زیان‌آوری، ویژگی‌های فیزیکی آن از بین برود. همچنین می‌تواند باعث تخریب بعضی از عایق‌ها شود. به علاوه اثرات تخریبی روی سطح عایق باعث می‌شود که مقاومت عایقی پایین بیاید. بنابراین برای طراحی یک سیستم عایقی در نظر داشتن موارد ذکر شده به علاوه‌ی قیمت مناسب عایق تولیدی دارای اهمیت است.

پلی اتیلن پلیمری نیمه بلورین است که دارای ویژگی‌های الکتریکی خوب مانند ضریب دی الکتریک پایین، اتلافات دی الکتریکی پایین و استحکام عایقی بالا به همراه خصوصیات دیگری چون انعطاف پذیری، مقاومت در برابر مواد شیمیایی، فرآیند پذیری خوب، و قیمت ارزان است. این خصوصیات آن را انتخابی دلخواه برای عایق سازی کابل‌های قدرت می‌کند و این در حالی است که عیب عمده‌ی آن دمای ذوب پایین آن است. این عیب دمای عملیاتی را به 75°C محدود می‌کند. برای بهبود این خصوصیت، پلی اتیلن شبکه‌ای می‌شود. شبکه‌ای کردن، دمای بیشینه‌ی عملیاتی را تا 90°C و دمای اضطراری را تا 130°C و بیشینه‌ی دمای اتصال کوتاه را تا 250°C بالا می‌برد. شبکه‌ای کردن همچنین استحکام ضربه‌ای، پایداری اندازه، استحکام کششی، خصوصیات حرارتی و مقاومت شیمیایی را بالا می‌برد و خصوصیات الکتریکی، پیری و مقاومت در برابر حل شدن پلی اتیلن را بهتر می‌کند. پلی اتیلن شبکه‌ای شده به علت داشتن خواص الکتریکی مناسب، استحکام الکتریکی خوب و دمای عملکرد بالا، یکی از موادی است که به طور گسترده در زمینه‌ی تولید عایق در کابل‌های با ولتاژ متوسط تا ولتاژ بالا استفاده می‌شود.

جدول ۳ کد گذاری نمونه‌ها.

کد نمونه	درصد وزنی نانوذرات
S3	۳
S6	۶
S9	۹
S0	۰

برای تهیه نمونه‌های بدون نانو ذره هم گرانول‌هایی از LDPE با ۳ درصد وزنی پراکسید و ۳ درصد وزنی آنتی اکسیدانت توسط همان اکسترودر تهیه شد.

سپس به منظور تهیه صفحاتی به ضخامت ۱mm از دستگاه پرس مدل mini test press ساخت ژاپن استفاده شد. این دستگاه حداکثر تا فشار ۳۵MPa و دمای C ۴۰۰ را تأمین می‌کند. دمای استفاده شده در تهیه نمونه‌ها C ۲۲۰ بود. نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه تحت این دما قرار گرفتند. کد گذاری نمونه‌های تهیه شده در جدول ۳، آورده شده است.

۲.۲. آزمایشات

برای تعیین میزان ژل نمونه‌ها، آزمایش تعیین درصد ژل بر اساس استاندارد D2765 انجام شد. برای این منظور نمونه‌ها به قطعات خیلی ریز خرد شدند و محتوای ژل نمونه‌ها توسط استخراج با حلال زایلن جوشان تعیین شد. در این روش وزن مشخصی از نمونه داخل توری با مش ۱۲۰ و به مدت ۸ ساعت درون زایلن جوشان قرار گرفت. برای جلوگیری از بالا رفتن درصد شبکه‌ای شدن، ۳٪ آنتی اکسیدانت پیش از شروع آزمایش به زایلن افزوده شد. و در نهایت محتوای ژل نمونه‌ها با اندازه‌گیری وزن نمونه قبل و بعد از استخراج بر اساس معادله ۱، به دست آمد.

$$\text{درصد ژل} = \frac{\text{وزن نمونه بعد از آزمایش} - \text{وزن نمونه قبل از آزمایش}}{\text{وزن نمونه قبل از آزمایش}} \times 100 \quad (1)$$

در ادامه آزمون XRD برای تعیین فاصله صفحات خاک رس و آزمون TEM برای مشخص شدن چگونگی پخش صفحات خاک رس در ماتریس انجام گرفت. به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها، از آزمون کشش استفاده شد. جهت تعیین خواص عایقی نانو کامپوزیت‌های تهیه شده،

۲۹۰/۴ می‌باشد. به منظور ایجاد پایداری اکسایشی لازم از Irganox 1010 با نام شیمیایی Pentaerythritoltetrakis(3-(3,5-di-tert-butyl-4-(hydroxyphenyl) propionate تولید شرکت CIBA استفاده شده است.

نانو ذره استفاده شده، خاک رس آلی، سدیم مونت موریلونیت طبیعی اصلاح شده با اصلاح‌کننده‌ی آلی (bis(2-hydroxyethyl methyl tallow)، با نام تجاری Closite 30B تولید شرکت Southern Clay می‌باشد. چگالی این نوع خاک رس آلی ۳۹۸/۱ gr/cm^۳، ظرفیت تبادل یونی آن ۹۱ meqiv/100gr و فضای بین لایه‌ای آن A ۱۸/۵ است.

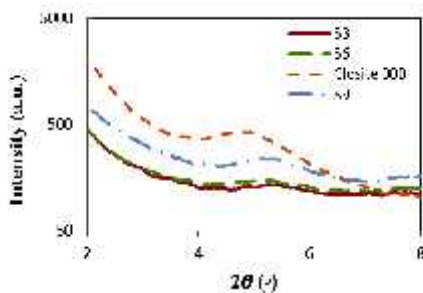
برای تهیه نمونه‌ها مقادیر لازم از پراکسید، آنتی اکسیدانت و نانو ذرات خاک رس، بر اساس نسبت های وزنی آورده شده در جدول ۲، به همراه استون، در دمای اتاق به مدت هشت ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی مخلوط شدند. پس از اتمام هشت ساعت، مخلوط به مدت دو ساعت در دمای اتاق در حمام اولتراسونیک قرار گرفت و بعد از آن به مدت دو ساعت دیگر توسط همزن مغناطیسی به هم زده شد. پس از اتمام این مراحل مخلوط به دست آمده به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای C ۷۰ قرار داده شد تا کاملاً خشک و استون آن خارج شود. در آخر مقدار لازم از مخلوط خشک شده به منظور تهیه نانو کامپوزیت، با LDPE مخلوط و برای تهیه سه سری گرانول وارد اکسترودر ZSK شد. دمای زون‌های مختلف اکسترودر حداکثر C ۱۲۰ بود.

جدول ۲ درصد وزنی اجزای تشکیل دهنده ی نانو کامپوزیت‌ها.

شماره سری	درصد وزنی LDPE	درصد وزنی پراکسید	درصد وزنی آنتی اکسیدانت	درصد وزنی خاک رس
۱	۹۱	۳	۳	۳
۲	۸۸	۳	۳	۶
۳	۸۵	۳	۳	۹

جدول ۴ نتایج آزمون تعیین درصد ژل برای نانو کامپوزیت‌ها و ماتریس

XLPE	
میزان ژل (%)	کد نمونه
۴۶	S3
۴۳	S6
۴۰	S9
۵۷	S0



شکل ۱ نتایج آزمون SAXS برای نانو کامپوزیت‌ها و Cloisite 30B

۲.۳.۲. آزمون میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)

آنالیز میکروسکوپ الکترونی عبوری همواره روش تکمیلی برای سایر آنالیزهای بررسی مورفولوژی سیستم‌های حاوی نانو ذرات مانند XRD است. برای پی بردن به مورفولوژی دقیق نانو رس‌ها و مشاهده‌ی عینی محل حضور آن‌ها در ماتریس پلیمری از میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده شده است. شکل ۲، مورفولوژی نانو کامپوزیت‌های حاوی ۳٪، ۶٪ و ۹٪ خاک رس را نشان می‌دهد. در این تصاویر نواحی روشن مربوط به ماتریس پلیمری و خطوط تیره مربوط به صفحات خاک رس است. همان گونه که دیده می‌شود در نمونه S9 به هم چسبیدگی صفحات خاک رس وجود دارد. درحالی‌که در نمونه‌ی S6 و S3 وجود تک لایه دلیلی بر ساختار ورقه‌ای صفحات خاک رس در این نمونه است. نتایج دیده‌شده در تصاویر TEM، آزمون SAXS را تأیید می‌کند.



3 μm



آزمون‌های ثابت دی الکتریک و فاکتور اتلاف با استفاده از دستگاه CEAST مدل ۶۱۳۶ و بر اساس استاندارد ASTM D150 انجام شدند. آزمون‌ها در دمای محیط، فرکانس ۶۰ Hz و ولتاژ ۲۲۰ V صورت گرفتند. اندازه‌گیری استحکام شکست به وسیله‌ی دستگاه CEAST مدل ۶۱۳۵ ساخت ایتالیا و مطابق با استاندارد ASTM D14 انجام شد. در این آزمون نمونه به شکل یک صفحه بین دو الکترود و در محیطی که با یک روغن عایق پر شده است قرار می‌گیرد. ولتاژ اعمالی بین دو الکترود به تدریج افزایش می‌یابد تا اینکه شکست دی الکتریک رخ دهد. استحکام دی الکتریک گرادیان ولتاژی است که در آن شکست دی الکتریک رخ می‌دهد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. آزمون تعیین درصد ژل

آزمون تعیین درصد ژل برای مشخص کردن میزان شبکه‌ای شدن نمونه‌ها در اثر عمل کردن پراکسید، انجام شد که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. از داده‌های این جدول مشاهده می‌شود که میزان ژل برای نمونه‌ها با افزایش درصد خاک رس کاهش یافته است. از آنجا که لایه‌های خاک رس مانند عایق گرمایی عمل می‌کنند، مانع از رسیدن گرما به ذرات پراکسید شده و بازده شبکه‌ای شدن را کاهش داده‌اند [۶].

۳.۲. آزمون‌های ریخت شناسی

۱.۳.۲. آزمون تفرق اشعه‌ی ایکس در زاویه پایین (SAXS)

جهت بررسی ساختار صفحات نانو رس در بستر پلیمری از آزمون تفرق اشعه‌ی ایکس در زاویه‌ی پایین استفاده شد که نمودار آن در شکل ۱، نشان داده شده است. نانو رس خالص پیکی در زاویه‌ی ۴/۸ درجه نشان می‌دهد و برای نانو کامپوزیت‌های حاوی ۳٪ و ۶٪ خاک رس پیکی دیده نمی‌شود که نشان دهنده‌ی ورقه‌ای شدن صفحات خاک رس در ماتریس پلیمری است. با افزایش مقدار نانو رس به ۹٪ مشاهده می‌شود که در این نمونه‌ها پیک نمودار اندکی به زاویه‌های بالاتر انتقال پیدا کرده است. این امر به علت خروج ماده‌ی اصلاح کننده از میان صفحات خاک رس حین فرآیند اختلاط مذاب صورت می‌گیرد که نشان می‌دهد با خروج اصلاح کننده، فاصله‌ی بین صفحات خاک رس نسبت به Cloisite 30B کاهش یافته است [۷،۸].

۳.۳. آزمون کشش

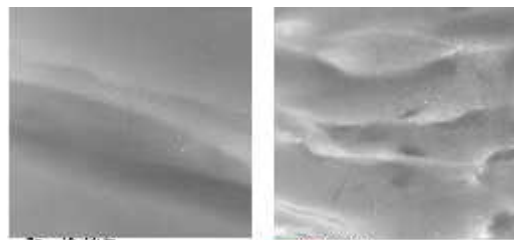
نتایج آزمون کشش شامل استحکام و تغییر شکل در نقطه‌ی شکست در جدول ۵ آورده شده است.

به طور کلی بهبود خواص کششی در درصد‌های پایین خاک رس بیشتر دیده می‌شود که نشان از باز شدن بهتر صفحات خاک رس است که باعث تقویت‌کنندگی بیشتر می‌شود [۷]. در واقع علاوه بر سختی بالای ذرات خاک رس که می‌تواند موجب افزایش استحکام نانو کامپوزیت شود، چگونگی توزیع این ذرات در ماتریس پلیمری نیز بر خواص کششی تأثیرگذار است. از داده‌های به دست آمده مشاهده می‌شود که استحکام کششی برای نمونه‌ها با افزایش درصد وزنی نانو ذرات کاهش یافته است. این کاهش به علت افزایش تمایل خاک رس به کلوخه شدن در درصد‌های بالاست که از پراکنش مطلوب ذرات جلوگیری می‌کند. ضمن اینکه همین اجتماع ذرات و کلوخه‌ای شدن آن‌ها می‌تواند به عنوان مرکز تنش در ماتریس عمل کرده و منجر به تضعیف کامپوزیت در برابر تنش کششی شود. علاوه بر این حضور نانو حفرات که به دلیل کلوخه‌ای شدن در ماتریس ایجاد می‌گردند از یک پارچگی ماتریس کاسته و منجر به تضعیف استحکام نانو کامپوزیت می‌شوند [۹-۱۱].

۳.۴. آزمون الکتریکی

برای بررسی خواص الکتریکی نمونه‌های تهیه شده سه فاکتور ثابت دی الکتریک، فاکتور اتلاف و استحکام شکست اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده از این آزمون‌ها در جدول ۶ آورده شده است. برای تمام کاربردهای الکتریکی مقادیر کم فاکتور اتلاف مناسب است. مقادیر کوچک فاکتور اتلاف بیان‌کننده‌ی کم بودن میزان انرژی الکتریکی تبدیل شده به گرماست. بنابراین فاکتور اتلاف معیاری از کارایی موادی است که به عنوان عایق الکتریکی به کار می‌روند.

نتایج جمع‌آوری شده در جدول ۶ نشان می‌دهد که فاکتور اتلاف نمونه‌های تهیه شده بین 10^{-3} تا 10^{-1} و 10^{-3} تا 10^{-6} قرار دارد. همان طور که دیده می‌شود با افزایش درصد خاک رس مقدار فاکتور اتلاف افزایش یافته است. علت این افزایش را شاید بتوان به حضور ماده‌ی اصلاح‌کننده‌ی خاک رس نسبت داد که با افزایش درصد نانو ذرات در نمونه‌ها افزایش یافته است [۱۲، ۲].



شکل ۲ تصاویر TEM مربوط به نمونه حاوی: الف) ۳ درصد خاک رس، ب) ۶ درصد خاک رس و ج) ۹ درصد خاک رس

• افزایش ناحیه‌ی برهم‌کنش در ذرات زیر 100nm باعث افزایش چشمگیر نسبت سطح به حجم می‌شود. این سطح زیاد باعث می‌شود که کسر حجمی بالایی از پلیمر در اطراف ذرات قرار بگیرد. به این ناحیه، ناحیه‌ی برهم‌کنش می‌گویند که دارای خواصی متفاوت از ماتریس است. با افزایش درصد خاک رس این ناحیه افزایش یافته و موجب بهبود استحکام دی الکتریک شده است [۱۳، ۱۴].

• تغییر در توزیع بار فضایی: نانو ذرات از طریق ایجاد یک مسیر رسانش محلی از میان لایه‌های فصل مشترک فیلر و پلیمر، باعث اتلاف بار شده، تجمع بار توده‌ای را کاهش می‌دهند و در نتیجه موجب افزایش استحکام دی الکتریک می‌شوند [۱۳-۱۵].

• مکانیزم پخش: هنگامی که پلیمر با نانو ذرات پر می‌شود، این ذرات به عنوان نقاط پخش عمل می‌کنند. الکترونی‌هایی که توسط الکترودهای با ولتاژ بالا یا مکانیزم‌های دیگر به عایق جامد تزریق می‌شوند، توسط میدان اعمال شده شتاب می‌گیرند. به علت حضور ذرات پخش شده الکترون‌ها انرژی خود را به نانو ذرات انتقال داده و ممتوم خود را از دست می‌دهند. از آن جایی که نانو ذرات به صورت کنار هم قرار گرفته‌اند، الکترون‌ها نمی‌توانند ممتوم لازم برای شرکت در فرآیند شکست را به دست آورند. به همین دلیل برای وقوع پدیده‌ی شکست به ولتاژ بالاتری نیاز است [۱۴، ۱۶، ۱۷].

همان‌گونه که دیده می‌شود اگرچه افزودن خاک رس باعث افزایش استحکام دی الکتریک نسبت به ماتریس شده است (بجز نمونه‌ی S9 که دارای بیش‌ترین درصد نانو ذره و بدترین توزیع است) اما با افزایش درصد خاک رس، کاهش استحکام دی الکتریک دیده می‌شود. افزایش درصد نانو ذرات؛ احتمال تشکیل کلوخه‌ها را بیشتر می‌کند و این ساختارها می‌توانند به عنوان سایت‌هایی برای شروع ترک عمل کرده و موجب کاهش استحکام دی الکتریک شوند [۱۰].

۴. نتیجه گیری

چگونگی توزیع ذرات خاک رس در کامپوزیت به شدت بر خواص مکانیکی و الکتریکی تأثیر می‌گذارد به طوری که هر چه توزیع و پراکنش ذرات بهتر صورت گرفته باشد، برهم‌کنش ذرات با زنجیرهای پلیمری بیشتر شده و بهبود خواص مشاهده می‌شود. افزایش درصد ذرات خاک رس، بر کیفیت توزیع این ذرات اثرگذار است به گونه‌ای که در نمونه‌ی حاوی ۹

جدول ۵ نتایج آزمون کشش برای نانو کامپوزیت‌ها و ماتریس XLPE

کد نمونه	تنش در نقطه‌ی شکست (MPa)	کرنش در شکست (%)
S3	$11/1 \pm 0/50$	$312/2 \pm 11/2$
S6	$10/2 \pm 0/17$	$320/5 \pm 6/6$
S9	$9/3 \pm 0/23$	$203/0 \pm 7/5$
S0	$8/1 \pm 0/29$	$467/8 \pm 9/8$

جدول ۶ نتایج حاصل از آزمون الکتریکی

کد نمونه	ثابت دی الکتریک	فاکتور اتلاف	استحکام دی الکتریک (KV/mm)
S3	۱/۸۵۰۹	۰/۰۰۰۲	۵۶
S6	۲/۰۶۴۶	۰/۰۰۰۳۵	۵۴/۵
S9	۲/۲۸۲۱	۰/۰۰۰۴	۵۳/۵
S0	۱/۸۸۶۷	۰/۰۰۰۱	۵۲/۶

ثابت دی الکتریک معیاری از توانایی یک ماده برای ذخیره‌ی انرژی الکتریکی است. بنابراین مطلوب‌تر است که یک عایق خوب کمترین مقدار ثابت دی الکتریک را داشته باشد. بررسی داده‌های جدول ۶ نشان می‌دهد که مقدار ثابت دی الکتریک با افزایش درصد خاک رس افزایش یافته است. این افزایش به علت قطبی بودن ماهیت خاک رس است که با ایجاد دو قطبی‌های بزرگ هنگام قرارگیری در میدان الکتریکی، باعث افزایش ثابت دی الکتریک شده است.

استحکام دی الکتریک تعیین‌کننده‌ی پایداری الکتریکی یک ماده به عنوان عایق است. این فاکتور برای انتخاب یک عایق الکتریکی مناسب به منظور جلوگیری از اتصال کوتاه به خصوص در دماهای بالا اهمیت زیادی دارد. هرچه استحکام شکست دی الکتریک پلیمری بیشتر باشد، کیفیت آن به عنوان یک عایق بالاتر است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که افزایش خاک رس باعث افزایش استحکام دی الکتریک نسبت به ماتریس شده است. از علت‌های افزایش استحکام دی الکتریک می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- effects in LDPE/o-montmorillonites nanocomposites” , *European Polymer Journal*, 43, 2, 328–335, 2007.
- [9] Durmus A., Kasgöz A., Macosko C., “Mechanical Properties of Linear Low-density Polyethylene (LLDPE)/clay Nanocomposites: Estimation of Aspect Ratio and Interfacial Strength by Composite Models” , *Journal of Macromolecular Science*, 47, 3, 608–619, 2008.
- [10] Supri A.G, H. Salmah and K. H., “Low Density Polyethylene-Nanoclay Composites: The Effect of Poly(acrylic acid) on Mechanical Properties, XRD, Morphology Properties and Water Absorption” , *Malaysian Polymer Journal (MPJ)*, 3, 2, 39–53, 2008.
- [11] Wang Y., Gao J., Ma Y., Agarwal U. S., “Study on mechanical properties , thermal stability and crystallization behavior of PET / MMT nanocomposites” , *Composites: Part B*, 37, 399–407, 2006.
- [12] Wang Y., Li Z., Yin Y., Huang X., “Dielectric Characteristics of SiO₂ / LDPE Micro- and Nanocomposites” , *International Symposium on Electrical Insulating*, 2008.
- [13] Roy M., Nelson J. K., Maccrone R. K., Schadler L. S., Reed C. W., Keefe R. et al., “Polymer Nanocomposite Dielectrics – The Role of the Interface” , *IEEE*, 12, 4, 2005.
- [14] Sarathi R., Sahu R. K., Rajeshkumar P., “Understanding the thermal , mechanical and electrical properties of epoxy nanocomposites” , *Materials Science and Engineering A*, 446, 567–578, 2007.
- [15] Roy M., Nelson A. J. K., Schadler L. S., “Candidate mechanisms controlling the electrical characteristics of silica / XLPE nanodielectrics” , *J Mater Sci*, 42, 3789–3799, 2007.
- [16] Calebrese C., Hui L., Schadler L., Nelson J., “A review on the importance of nanocomposite processing to enhance electrical insulation” , *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 18, 4, 938–945, 2011.
- [17] Smith R. C., Liang C., Landry M., Nelson J. K., Schadler L. S., “The mechanisms leading to the useful electrical properties of polymer nanodielectrics” , *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, IEEE*, 15, 1, 187–196, 2008.
- درصد نانو ذره، چسبندگی صفحات خاک رس و عدم باز شدن این صفحات دیده می‌شود. درحالی‌که برای نمونه دارای ۳ و ۶ درصد نانو ذره ساختار ورقه‌ای مشاهده می‌شود. بالاترین استحکام کششی در نمونه‌ی S3 دیده شده است. در چنین نمونه‌ای، خواص الکتریکی شامل ثابت دی الکتریک، فاکتور اتلاف و استحکام دی الکتریک نیز بهترین مقدار را نشان داده است. همچنین با افزایش درصد وزنی خاک رس خواص الکتریکی تنزل یافته است.

منابع

- [1] Alexandre M., Dubois P., “Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials” , *Materials Science and Engineering: R: Reports, Elsevier*, 28, 1, 1–63, 2000.
- [2] Green C. D., Vaughan A. S., Mitchell G. R., Rg R., “Structure Property Relationships in Polyethylene / Montmorillonite Nanodielectrics” , *IEEE*, 134–143, 2008.
- [3] Farhadinejad Z., Ehsani M. M., Moemenbellah S. S., Alavi S. M. B., Saei-Shirazi M. M., Borsi H., “An Investigation of Thermal, Physical, and Electrical Properties and Morphological Behavior on Nanoepoxy Composite Insulation” , *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 11, 5, 957–963, 2012.
- [4] Sengwa R. J., Choudhary S., Sankhla S., “Dielectric properties of montmorillonite clay filled poly (vinyl alcohol)/ poly (ethylene oxide) blend nanocomposites” , *Composites Science and Technology, Elsevier Ltd*, 70, 11, 1621–1627, 2010.
- [5] Leszczy A., Njuguna J., Pielichowski K., Banerjee J. R., “Polymer / montmorillonite nanocomposites with improved thermal Part II: Thermal stability of montmorillonite nanocomposites based on different polymeric matrixes” , 454, 1, 1–22, 2007.
- [6] Mittal V., “Optimization of Polymer Nanocomposite Properties” , *WILEY*, 2010.
- [7] Lee J.-H., Jung D., Hong C.-E., Rhee K. Y., Advani S. G., “Properties of polyethylene-layered silicate nanocomposites prepared by melt intercalation with a PP-g-MA compatibilizer” , *Composites Science and Technology*, 65, 13, 1996–2002, 2005.
- [8] Malucelli G., Ronchetti S., Lak N., Priola A., Dintcheva N. T., La Mantia F. P. et al., “Intercalation

عنوان مقاله

دومین کنفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی - ۱۳۹۳ تهران، ایران