

اثر خاک‌های رس متفاوت و پلی‌استیرین اصلاح شده با مالئیک انیدرید بر نانوکامپوزیت‌های پلی‌استیرین - خاک رس

محمود محراب زاده*^۱، موسی کمال^۲

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

۲- کانادا، مونترال، دانشگاه مک گیل، دانشکده مهندسی شیمی

دریافت: ۸۸۲/۲۳، پذیرش: ۸۸۴/۷



مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،

سال بیست و دوم، شماره ۲،

صفحه ۱۵۷-۱۵۱، ۱۳۸۸

ISSN : 1016-3255

واژه‌های کلیدی

نانوکامپوزیت، پلی‌استیرین، پلی‌استیرین اصلاح شده، خاک رس، ورقه‌ای شدن

*مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

m.mehrabzadeh@ippi.ac.ir

Effects of Different Types of Clays and Maleic Anhydride Modified Polystyrene on Polystyrene/Clay Nanocomposites

M. Mehrabzadeh*¹ and M.R. Kamal²

1. Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box:14965-115, Tehran, Iran

2. Department of Chemical Engineering, McGill University, Montreal, Quebec, Canada

Received 13 May 2009, accepted 28 June 2009

Abstract

Polymer/clay nanocomposites are considered as a new subject of research in Iran and the world. Addition of a minimum amount of clay (2-5wt%) can improve the mechanical properties, enhance barrier properties and reduce flammability dramatically. Polystyrene (PS) exhibits high strength, high modulus and excellent dimensional stability, but it has poor ductility, elongation, and flexural modulus. By incorporating clay into polystyrene these properties can be improved. In this study preparation of polystyrene/clay nanocomposite, effects of different types of clays (Cloisite 10A and Nanomer I.30TC) and maleic anhydride modified polystyrene on mechanical properties of the prepared polystyrene/clay nanocomposites were evaluated. Samples were prepared by a twin screw extruder. Transmission electron microscopy (TEM) and X-ray diffraction (XRD) techniques were employed to evaluate the extent of intercalation and exfoliation of silicate layers in the nanocomposites. Mechanical tests show that by addition of clay and maleic anhydride modified polystyrene the flexural modulus (~30%) and elongation-at-break (~40%) of prepared nanocomposites have been improved. XRD and TEM results show that nanocomposite have an intercalated structure with ability to change to further exfoliation structure.

Key Words

nanocomposite, polystyrene, modified polystyrene, clay, exfoliation

(*) To whom correspondence should be addressed.

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

مقدمه

نانوکامپوزیت‌ها به ویژه نانوکامپوزیت‌های پلیمری با خاک رس سیلیکاتی لایه‌ای، مانند خاک رس مونت موریلونیت جای‌گزین خوبی برای کامپوزیت‌های معمولی‌اند. با افزودن حداقل خاک رس (۲ تا ۵ درصد) به پلیمر، در نانوکامپوزیت حاصل خواص مکانیکی و دوام گرمایی بهبود یافته [۱-۳] و خواص نفوذناپذیری بهتر [۴] و اشتعال‌پذیری کمتری [۵] ایجاد می‌شود. نانوکامپوزیت‌های پلیمری بر مبنای خاک رس بر خلاف کامپوزیت‌های معمولی قابل بازیافت نیز هستند.

به طور کلی، بهبود در خواص نانوکامپوزیت‌ها به دلیل سه عامل زیر است:

- مساحت سطح بسیار زیاد و نسبت طول به قطر زیاد،
- پراکندگی خاک رس در پلیمر در سطح میکروسکوپی و
- پیوندهای یونی بین پلیمر و خاک رس.

به منظور سهولت وارد شدن زنجیرهای پلیمری به داخل لایه‌های خاک رس سیلیکاتی، خاک رس به کمک نمک‌های آلکیل آمونیوم با واکنش تبادل کاتیونی اصلاح می‌شود و آلکیل آمونیوم سطح خاک رس آب‌دوست را آلی دوست می‌سازد. اگرچه خاک رس اصلاح شده با پلیمرهای قطبی مانند نایلون [۶] و رزین اپوکسی [۷] امتزاج پذیراست، اما به خوبی در پلیمرهای ناقطبی مانند پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن پراکنده نمی‌شود [۸].

محراب‌زاده و همکاران [۹، ۱۰] گزارش کرده‌اند، افزایش پلی‌اتیلن اصلاح شده با مالئیک انیدرید باعث بهبود خواص نانوکامپوزیت‌های پلی‌اتیلن - خاک رس، پلی‌اتیلن - پلی‌آمید ۶ - خاک رس و پلی‌اتیلن - پلی‌آمید ۶۶ - خاک رس می‌شود.

پلی‌استیرن (PS) یکی از پرمصرف‌ترین پلاستیک‌هاست. پلی‌استیرن معمولاً پلیمری شیشه‌ای (بی‌شکل) است که استحکام و مدول زیادی دارد و از پایداری ابعادی عالی نیز برخوردار است. اما، قابلیت مفتول شدن (ductility)، ازدیاد طول و مدول خمشی ضعیفی دارد که با افزودن خاک رس می‌توان این خواص را بهبود بخشید.

Cho و همکاران [۱۱] سنتز پلی‌استیرن با خاک رس را به روش پلیمرشدن تهیه و گزارش کرده‌اند که نانوکامپوزیت حاصل پایداری گرمایی بیشتری نسبت به پلی‌استیرن خالص نشان می‌دهد. Zeng و همکاران [۱۲] هم نانوکامپوزیت پلی‌استیرن - خاک رس را به روش پلیمرشدن در جا تهیه کرده‌اند و گزارش کرده‌اند که پایداری ابعادی پلی‌استیرن بهبود یافته است.

Akat و همکاران نیز [۱۳] نانوکامپوزیت پلی‌استیرن و پلی‌متیل متاکریلات را از راه پلیمر شدن رادیکال آزاد تهیه کرده‌اند. آنها برای

اصلاح خاک رس از دی‌اتیل اکتیل آمونیوم اتیل مرکاپتان برومید استفاده کرده‌اند. این ترکیب به عنوان اصلاح‌کننده خاک رس و نیز به عنوان عامل انتقال زنجیر استفاده شده است. آنها قابلیت بین‌لایه‌ای شدن و ورقه‌ای شدن را به همراه خواص گرمایی و شکل‌شناسی نانوکامپوزیت‌ها مطالعه کرده‌اند.

Samakande و همکاران [۱۴] ۲،۲ آزوبیس (۲-۱-۲) هیدروکسی اتیل (۲- آمیدازولین-۲ ایل (پروپان) دی‌هیدوکلرید مونوهیدرات را برای اصلاح سطح خاک رس سدیم مونت موریلونیت به کار برده‌اند. نانوکامپوزیت حاصل از این خاک رس اصلاح شده با پلی‌استیرن به روش پلیمرشدن در جا خواص پایداری گرمایی بسیار خوبی نشان داده است. آنها هم چنین مواد برپایه آکرلیک را نیز برای اصلاح خاک رس به کار گرفته‌اند [۱۵].

Sorrentino و همکاران [۱۶] خاک رس اصلاح شده به همراه پلی‌استیرن هم‌نظم را به طور مستقیم در دستگاه تزریق برای ساخت قطعات تزریقی به کار گرفته‌اند. آنها گزارش کرده‌اند، افزودن درصد بسیار کم خاک رس اصلاح شده (۱ درصد) به پلی‌استیرن هم‌نظم به طور اساسی پنجره فراورش مواد را توسعه داده و آن را بهبود می‌بخشد.

Xiaoxia و همکاران [۱۷] از خاک رس به شکل اولیگومری اصلاح شده به همراه مالئیک انیدرید در تهیه نانوکامپوزیت پلی‌استیرن - خاک رس استفاده کرده و نشان داده‌اند که مالئیک انیدرید سازگاری خاک رس و پلی‌استیرن را بهبود می‌دهد.

در مطالعه حاضر، نانوکامپوزیت پلی‌استیرن با خاک رس اصلاح شده به روش فرایند مذاب در اکسترودر دوماریچی تهیه شده است. در این پژوهش از خاک‌های رس اصلاح شده متفاوت استفاده شده تا نمونه خاک رس مناسب انتخاب شود. در ضمن، از پلی‌استیرن اصلاح شده با مالئیک انیدرید نیز برای سازگاری بیشتر استفاده شده است. اثر خاک رس روی دمای انتقال شیشه‌ای پلی‌استیرن و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت بررسی و به کمک آزمون‌های XRD و TEM ساختار نمونه‌ها ارزیابی شده است.

نوآوری کار حاضر در دست‌یابی به خاک رس اصلاح شده مناسب برای پلی‌استیرن و علت آن و استفاده از پلی‌استیرن اصلاح شده با مالئیک انیدرید به منظور ارزیابی اثر آن روی نانوکامپوزیت حاصل به روش اختلاط در حالت مذاب در اکسترودر دوماریچی است. نتایج نشان می‌دهد، این انتخاب در بهبود خواص نانوکامپوزیت نقش مؤثری دارد. اثر خاک رس اصلاح شده روی دمای انتقال شیشه‌ای پلی‌استیرن نیز بررسی شده است.

تجربی

مواد

در این پژوهش، از پلی‌استیرن Styron 685D با وزن مولکولی ۳۰۰,۰۰۰ g/mol و وزن مخصوص ۱.۰۴ g/cm³ محصول شرکت Dow Chemical استفاده شد. سازگارکننده به کار برده شده، پلی‌استیرن اصلاح شده با مالئیک آنیدرید (Dylark 332) حاوی ۴/۴ درصد وزنی مالئیک آنیدرید پیوند شده روی پلی‌استیرن محصول شرکت Nova Chemical بود که تا ۲/۸۸ درصد وزنی با پلی‌استیرن رقیق و به مقدار ۱۰ درصد وزنی به عنوان اصلاح‌کننده در نانوکامپوزیت‌های تهیه شده استفاده شد.

مشخصات دو نوع خاک رس اصلاح شده به قرار زیر بود:

- کلویزیت 10A (Cloisite 10A)، مونت موریلونیت طبیعی اصلاح شده با نمک آمونیم چهارتایی ساخت شرکت Southern. ترکیب اصلاح‌کننده خاک رس نمک آمونیم چهارتایی دی متیل، بنزیل، Tallow هیدروژن دار شده (2MBHT) است (شکل ۱).

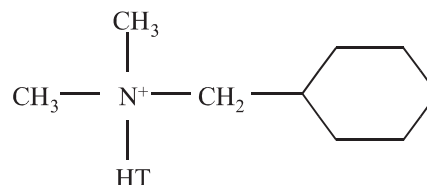
- نانومر I.30TC (Nanomer I.30TC)، مونت موریلونیت اصلاح شده با (۱۵ تا ۳۰ درصد) اکتادسیل آمونیم ساخت شرکت Nanocor (شکل ۲).

دستگاه‌ها

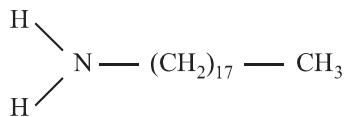
در این پژوهش، گرماسنج تفاضلی پویسی مدل Perkin Elmer DSC7، دستگاه Instron مدل ۴۵۰۰ سری IX برای انجام آزمون خمش و کشش، میکروسکوپ الکترون عبوری (TEM) مدل Jeol JEM 2000 FX و اکسترودر دوماریچی مدل Berstorff به کار گرفته شد.

روش‌ها

برای تهیه نانوکامپوزیت‌ها از اکسترودر دوماریچی با سرعت ۲۰۰ rpm و حدیده شیاردار (slit die) استفاده شد. برنامه دمایی به کار رفته در جدول ۱ آمده است. مقدار خاک رس مصرف شده برای تمام نمونه‌های



شکل ۱- ساختار اصلاح‌کننده خاک رس کلویزیت 10A که در آن HT، Tallow هیدروژن دار شده (۶۵ درصد C₁₈، ۳۰ درصد C₁₆ و ۵ درصد C₁₄) است.



شکل ۲- ساختار اصلاح‌کننده خاک رس نانومر I.30TC

نانوکامپوزیت تهیه شده ۵ درصد وزنی و مقدار پلی‌استیرن اصلاح شده به مقدار ۱۰ درصد وزنی از نمونه رقیق شده بود. خاک رس به وسیله تغذیه‌کننده دوم به دستگاه اکسترودر اضافه می‌شد و در اثر برش مکانیکی و گرما داخل زمینه پلی‌استیرن در اکسترودر دوماریچی پراکنده می‌شد.

آزمون‌ها

آزمون DSC

برنامه گرمایی زیر برای انجام آزمون گرماسنجی تفاضلی پویسی به کار گرفته شد:

- قرار دادن در دمای ۵۰°C به مدت ۱ min،

- افزایش دما از ۵۰°C تا ۲۰۰°C با سرعت ۴۰°C/min،

- قرار دادن در دمای ۲۰۰°C به مدت ۵ min،

- کاهش دما از ۲۰۰°C تا ۲۰°C با سرعت ۴۰°C/min،

- قرار دادن در دمای ۲۰°C به مدت ۵ min و

- کاهش دما تا ۲۰°C با سرعت ۱۰°C/min.

افزایش و کاهش دما در جو نیتروژن انجام شد.

آزمون خمش

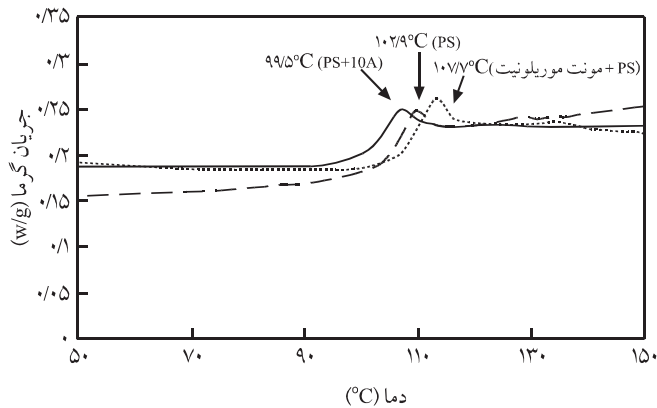
آزمون خمش طبق استاندارد ASTM D790 انجام شد. آزمون روی نمونه‌ها به ابعاد ۵×۷×۲۵ cm بر اساس خمش سه نقطه‌ای با سرعت ۲/۵ cm/min انجام شد. نتایج میانگین حداقل ۵ آزمون گزارش شده است.

آزمون کشش

برای انجام آزمون کشش از همان دستگاه آزمون خمش طبق استاندارد ASTM D638 استفاده شده است.

جدول ۱- برنامه دمایی اکسترودر.

| حدیته | بدنه اکسترودر | | | | | | نواحی گرمایی |
|-------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------|
| | H6 | B5 | B4 | B3 | B2 | B1 | |
| ۲۱۰ | ۲۰۰ | ۲۰۰ | ۱۸۵ | ۱۸۵ | ۱۸۰ | ۱۷۰ | دما (°C) |
| | | | | | | | |

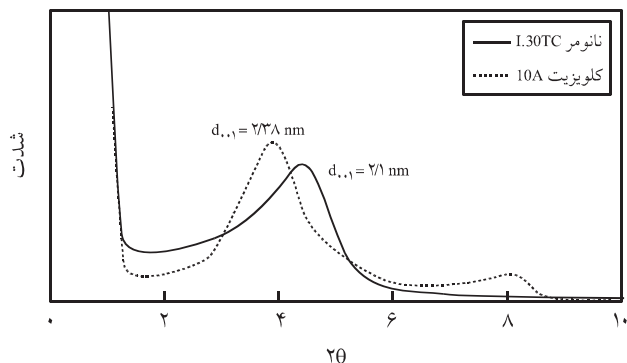


شکل ۳ - نمودار گرماسنجی تفاضلی پوششی پلی‌استیرین خالص و پلی‌استیرین به همراه خاک رس اصلاح شده و نشده.

در شکل ۴، نمودار XRD کلویزیت 10A و نانومر I.30TC آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فاصله لایه‌ها در نانومر I.30TC (۲/۳۸ nm) بیشتر از فاصله لایه‌ها در کلویزیت 10A (۲/۱ nm) است که این امر به ساختار مولکولی اکتادسیل آمین مربوط است.

شکل ۵ نمودار XRD پلی‌استیرین با خاک رس I.30TC را نشان می‌دهد. در این شکل بین لایه‌ای شدن نانوکامپوزیت حاصل قابل مشاهده است. فاصله لایه‌ها از ۲/۳ به ۳/۳ nm افزایش یافته است. در ضمن، پیک دوم d_{002} مربوط به پراش از لایه دوم سیلیکات است که معمولاً مقدار آن دو برابر مقدار پیک اولی است [۱۰].

شکل ۶ نمودار XRD پلی‌استیرین و خاک رس به همراه پلی‌استیرین اصلاح شده و نانومر I.30TC است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پلی‌استیرین اصلاح شده باعث افزایش بیشتر فاصله لایه‌های خاک رس شده و مقدار آن از ۳/۳ nm (شکل ۵) به ۳/۵ nm (شکل ۶) افزایش یافته است. این امر به دلیل اصلاح پلی‌استیرین با مالئیک انیدرید است که سازگاری نانوکامپوزیت را با خاک رس بیشتر کرده است.



شکل ۴ - نمودار XRD کلویزیت 10A و نانومر I.30TC

آزمون پراش پرتو X (XRD)

از دستگاه پراش پرتو X با زاویه باز در دمای محیط و دامنه زاویه ۱۰-۲۰ برای ارزیابی توسعه ساختار بین لایه‌ای شدن یا ورقه‌ای شدن لایه‌های سیلیکاتی در نانوکامپوزیت تهیه شده استفاده شد. پرتو X به کار برده شده $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0.1541 \text{ nm}$) است و پرتو دهی در ۴۵ kV و ۱۳۰ mA انجام شد.

میکروسکوپ الکترونی عبوری

برای بررسی مقدار پراکنش خاک رس اصلاح شده در پلی‌استیرین و ارزیابی مقدار ورقه‌ای شدن یا بین لایه‌ای شدن نانوکامپوزیت‌های تهیه شده از میکروسکوپ الکترون عبوری (TEM) استفاده شد. نمونه‌ها برای آزمون TEM به ضخامت حدود ۵۰-۷۰ nm با دستگاه فرنازک بر (ultra microtomy) و با کارد الماسی تهیه شدند.

نتایج و بحث

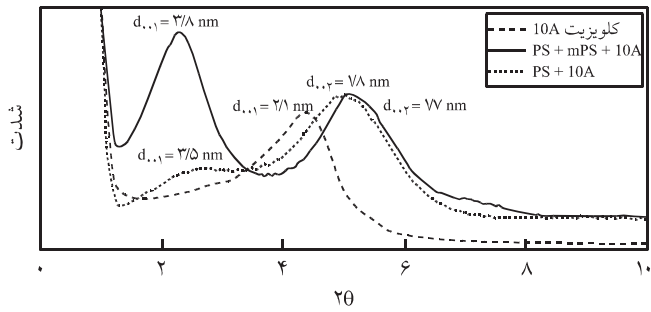
اثر خاک رس اصلاح شده روی دمای انتقال شیشه‌ای پلی‌استیرین

به نظر می‌رسد، افزایش خاک رس باید دمای شیشه‌ای پلی‌استیرین را افزایش دهد که به دلیل محدودیتی است که در حرکت زنجیرهای پلیمر به وجود می‌آورد. اما، خاک رس اصلاح شده سبب کاهش دمای انتقال شیشه‌ای پلی‌استیرین شده است. دلیل این امر می‌تواند وجود حدود ۲۵ درصد اصلاح کننده در خاک رس باشد که به عنوان نرم کننده عمل می‌کند. اصلاح کننده نمک آمونیوم چهارتایی دی‌متیل - Tallow هیدروژن دار شده است که Tallow هیدروژن دار شامل ۶۵ درصد C_{18} ، ۳۰ درصد C_{16} و ۵ درصد C_{14} است. واضح است که این ترکیب می‌تواند به عنوان نرم کننده عمل کند. مطابق شکل ۳، پلی‌استیرین حاوی خاک رس اصلاح نشده دمای انتقال شیشه‌ای بالاتر و پلی‌استیرین حاوی خاک رس اصلاح شده دمای انتقال شیشه‌ای پایین‌تری نسبت به پلی‌استیرین خالص دارد.

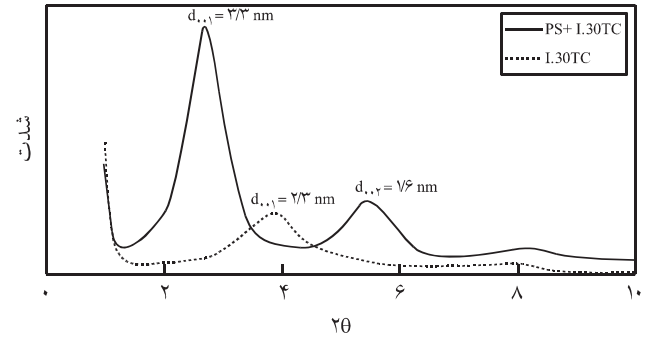
اثر خاک رس اصلاح شده و پلی‌استیرین اصلاح شده روی ساختار

بین لایه‌ای شدن یا ورقه‌ای شدن نانوکامپوزیت‌های پلی‌استیرین

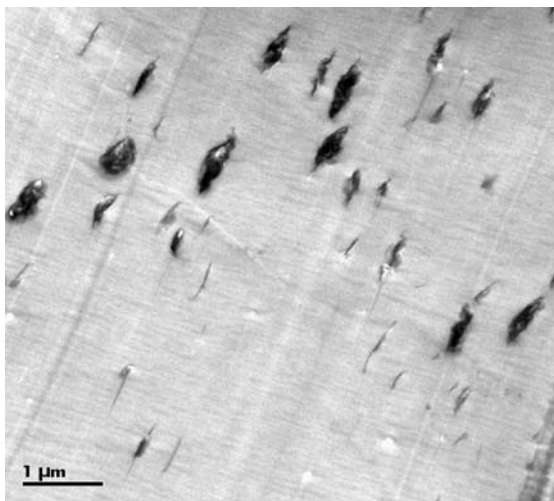
به منظور ارزیابی مشارکت خاک رس در زمینه پلیمری از دستگاه پراش پرتو X و میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده شده است. به کمک پراش پرتو X می‌توان فاصله بین لایه‌های خاک رس را اندازه‌گیری کرد و مقدار بین لایه‌ای شدن و ورقه‌ای شدن را در نمونه‌های نانوکامپوزیت‌های تهیه شده بررسی کرد.



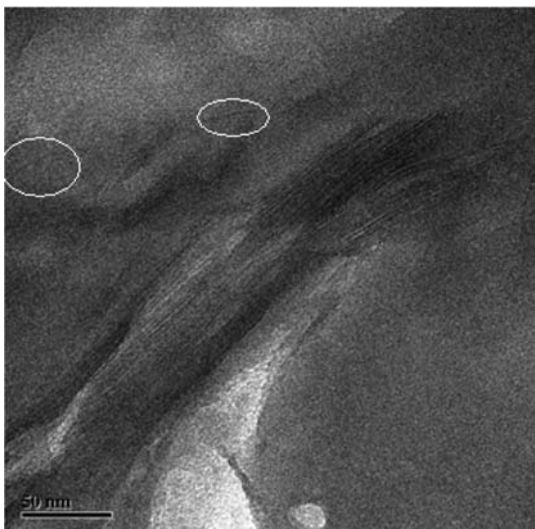
شکل ۷ - نمودار XRD مربوط به کلویزیت 10A و پلی‌استیرن با خاک رس و پلی‌استیرن اصلاح‌شده.



شکل ۵ - نمودار XRD نانومر I.30TC و پلی‌استیرن اصلاح‌شده با آن.



(الف)



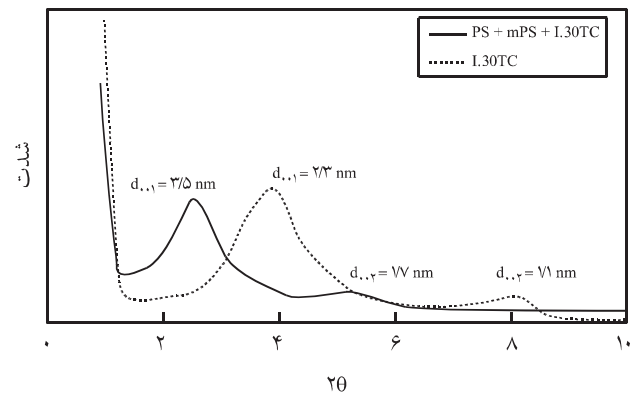
(ب)

شکل ۸ - تصاویر TEM: (الف) توزیع یکنواخت خاک رس در پلی‌استیرن و (ب) ساختار بین لایه‌ای شدن نانوکامپوزیت‌های پلی‌استیرن و خاک رس.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، کلویزیت 10A ساختار لایه‌ای شده نانوکامپوزیت‌های پلی‌استیرن را بهبود بخشیده است. فاصله لایه در پلی‌استیرن با کلویزیت 10A به 37.5 nm در مقایسه با نانومر I.30TC که 37.3 nm (شکل ۵) است، افزایش یافته و در پلی‌استیرن با کلویزیت 10A و پلی‌استیرن اصلاح‌شده نیز فاصله لایه‌ها به 37.8 nm (شکل ۷) در مقایسه با فرمول‌بندی مشابه و با نانومر I.30TC (37.5 nm) (شکل ۶) بهبود مشاهده شده است. علت این بهبود به دلیل سازگاری بیشتر خاک رس اصلاح‌شده کلویزیت 10A به دلیل وجود حلقه بنزنی موجود در ساختار عامل اصلاح‌کننده کلویزیت 10A و پلی‌استیرن است. بنابراین، نوعی از خاک رس اصلاح‌شده را باید انتخاب کرد که عامل اصلاح‌کننده آن سازگاری بهتری با زمینه پلیمری داشته باشد.

آزمون میکروسکوپی الکترون عبوری (TEM)

شکل ۸ تصاویر میکروسکوپی الکترون عبوری نانوکامپوزیت پلی‌استیرن به همراه پلی‌استیرن اصلاح‌شده و کلویزیت 10A را نشان می‌دهد. شکل ۸ - الف نشان می‌دهد که کلویزیت 10A پراکنش نسبتاً



شکل ۶ - نمودار XRD نانومر I.30TC و پلی‌استیرن با خاک رس و پلی‌استیرن اصلاح‌شده.

زیرا، اصلاح‌کننده استفاده شده (مالئیک انیدرید) برای اصلاح پلی‌استیرن چسبندگی بین سطحی بین پلیمر و خاک رس را افزایش می‌دهد. کلویزیت 10A بهبود بیشتری نسبت به نانومر I.30TC در مدول خمشی ایجاد می‌کند. این امر به دلیل سازگاری بیشتر و ساختار بین لایه‌ای شدن بهتر نانوکامپوزیت‌های حاصل با کلویزیت 10A است که در بخش آزمون XRD به آن اشاره شد.

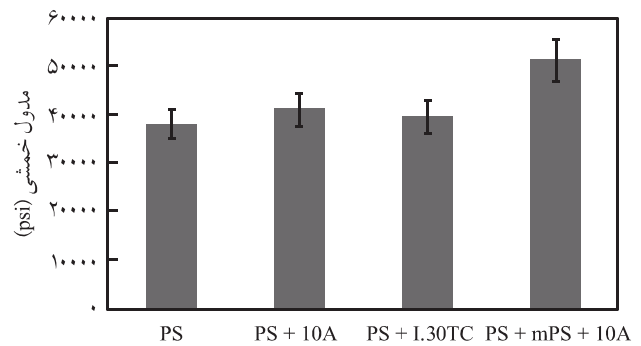
آزمون ازدیاد طول تا پارگی

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که هر دو خاک رس کلویزیت 10A و نانومر I.30TC دارای اثر کمی روی بهبود ازدیاد طول تا پارگی پلی‌استیرن خالص هستند. این اثر همانند آزمون خمش در باره خاک رس کلویزیت 10A کمی بیشتر است. افزایش پلی‌استیرن اصلاح شده باعث بهبود بیشتر افزایش طول تا پارگی نانوکامپوزیت‌های حاصل می‌شود که دلایل این افزایش همانند دلایلی است که در بخش آزمون خمش به آن اشاره شد.

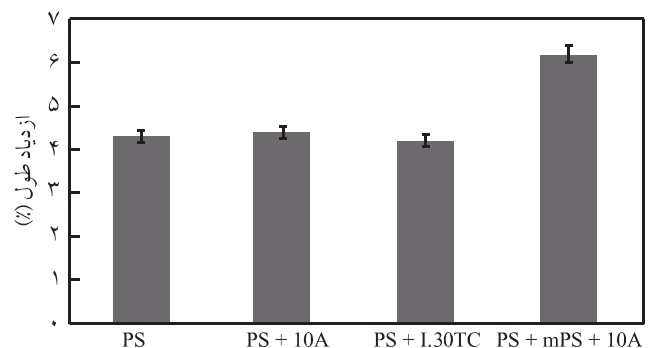
نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، انتخاب نوع خاک رس (کلویزیت 10A) که سازگاری بیشتر با زمینه پلیمری دارد و استفاده از پلی‌استیرن اصلاح شده با مالئیک انیدرید که باعث سازگاری بیشتر می‌شود، خواص نانوکامپوزیت را بیشتر بهبود می‌دهد. نتایج پراش پرتو X و میکروسکوپی الکترونی عبوری نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت حاصل از پلی‌استیرن و خاک رس اصلاح شده ساختار بین لایه‌ای شده دارد و خاک رس اصلاح شده کلویزیت 10A نسبت به خاک رس اصلاح شده نانومر I.30TC سازگاری بهتری با پلی‌استیرن دارد. پلی‌استیرن اصلاح شده نیز باعث افزایش فاصله لایه‌های خاک رس می‌شود و در نانوکامپوزیت حاصل تک لایه‌ای خاک رس نیز دیده شده است.

افزایش خاک رس به مقدار ۵ درصد باعث بهبود استحکام خمشی و ازدیاد طول تا پارگی می‌شود. هم‌چنین، افزودن ۱۰ درصد پلی‌استیرن اصلاح شده با مالئیک انیدرید نیز باعث بهبود بیشتر استحکام خمشی (به مقدار حدود ۳۰ درصد) و ازدیاد طول تا پارگی (به مقدار ۴۰ درصد) نانوکامپوزیت‌های تهیه شده می‌شود. در ضمن خاک رس اصلاح شده سبب کاهش دمای انتقال شیشه‌ای پلی‌استیرن نیز می‌شود.



شکل ۹ - تغییرات مدول خمشی برای نمونه‌های پلی‌استیرن خالص و پلی‌استیرن با خاک‌های رس مختلف و پلی‌استیرن اصلاح شده.



شکل ۱۰ - تغییرات ازدیاد طول تا پارگی برای نمونه‌های پلی‌استیرن خالص و پلی‌استیرن با خاک‌های رس مختلف و پلی‌استیرن اصلاح شده.

خوبی در پلی‌استیرن به همراه پلی‌استیرن اصلاح شده دارد. از طرف دیگر، شکل ۸ - ب در بزرگ‌نمایی زیاد ساختار بین لایه‌ای شدن با پتانسیل مقدار ورقه‌ای شدن نانوکامپوزیت حاصل را نشان می‌دهد. این امر نتایج XRD را تأیید می‌کند. شایان ذکر است، در این شکل تعدادی لایه‌های خاک رس ورقه‌ای شده دیده می‌شود که داخل دایره در شکل ۸-ب نشان داده شده‌اند.

آزمون خمش

مدول خمشی نشان‌دهنده نیروی لازم برای خم کردن نمونه است. بنابراین، اجسام دارای سفتی بیشتر مدول خمشی زیادتر دارند. افزایش خاک رس به پلی‌استیرن باعث بهبود مدول خمشی آن می‌شود. از طرف دیگر، پلی‌استیرن اصلاح شده با مالئیک انیدرید باعث افزایش قابل ملاحظه مدول خمشی نانوکامپوزیت‌های حاصل می‌شود (شکل ۹).

مراجع

1. Pinnavaia J.J. and Beall G.W., *Polymer Clay Nanocomposites*, John Wiley, New York, 1989.
2. Alexandre M. and Dubois Ph., Polymer-layer Silicate Nanocomposite Preparation and Uses of a New Class of Materials, *Mater. Sci. Eng.*, **28**, 1-63, 2000.
3. Liao B., Song M., Liang H., and Pang Y., Polymer-layered Silicate as Fillers for Reinforcement of PE, *Polymer*, **42**, 10007-10011, 2001.
4. Choudalakis G. and Gotsis A.D., Permeability of Polymer/Clay Nanocomposites: A Review, *Eur. Polym. J.*, **45**, 967-984, 2009.
5. Morgan A.B., Flame Retarded Polymer Layered Silicate Nanocomposites: A Review of Commercial and Open Literature Systems, *Polym. Adv. Technol.*, **17**, 206-217, 2006.
6. Cho J.W. and Paul D.R., Nylon 6 Nanocomposites by Melt Compounding, *Polymer*, **42**, 1083-1094, 2001.
7. Kornmann X., Lindberg H., and Berglund L.A., Synthesis of Epoxy-Clay Nanocomposites. Influence of the Nature of the Curing Agent on Structure, *Polymer*, **42**, 4493-4499, 2001.
8. Manias E., Touny A., Wu L., Strawhecker K., Lu B., and Chung T.C., Polypropylene/Montmorillonite Nanocomposites: A Review of Synthetic Routes and Materials Properties, *Chem. Mater.*, **13**, 3516-3523, 2001.
9. Mehrabzadeh M. and Kamal M.R., Polymer-Clay Nanocomposites based on Blends of Polyamide and Polyethylene, *Canad. J. Chem. Eng.*, **80**, 1083-1092, 2002.
10. Mehrabzadeh M. and Kamal M.R., Melt Processing of PA-66/Clay, HDPE/Clay and HDPE/PA-66/Clay Nanocomposites, *Polym. Eng. Sci.*, **44**, 6, 1152-1161, 2004.
11. Doh J.G. and Cho I., Synthesis and Properties of Polystyrene-Organ ammonium Montmorillonite Hybrid, *Polym. Bull.*, **41**, 511-518, 1998.
12. Zeng C. and Lee L.J., Poly(methyl methacrylate) and Polystyrene/Clay Nanocomposites Prepared by in-situ Polymerization, *Macromolecules*, **34**, 4098-4103, 2001.
13. Akat H. Tasdelen M.A., Prez F., and Yagci Y., Synthesis and Characterization of Polymer/Clay Nanocomposites by Intercalated Chain Transfer Agent, *Eur. Polym. J.*, **44**, 1949-1954, 2008.
14. Samakande A., Sanderson R.D., and Hartmann P.C., RAFT-mediated Polystyrene-Clay Nanocomposites Prepared by Making Use of Initiator-bound MMT Clay, *Eur. Polym. J.*, **45**, 649-657, 2009.
15. Samakande A., Sanderson R.D., Hartmann, P.C., Cloete V., and Sanderson R., Use of Acrylic Based Surfmers for the Preparation of Exfoliated Polystyrene-Clay Nanocomposites, *Polymer*, **48**, 1490-1499, 2007.
16. Sorrentino A., Pantani R., and Brucato V., Injection Molding of Syndiotactic Polystyrene/Clay Nanocomposites, *Polym. Eng. Sci.*, **46**, 1768-1777, 2006.
17. Xiaoxia Z., Jiang D.D., and Wilkie C.A., Polystyrene Nanocomposites based on an Oligomerically-modified Clay Containing Maleic Anhydride, *Polym. Degrad. Stab.*, **91**, 108-113, 2006.