

Polyolefin Elastomer and Nanoclay Synergistic Effect on the Properties of LDPE as a Base Material for Foam Applications

Alireza Enayati Kafshgari and Sayed Morteza Mozaffari*

Department of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, 47416-13534, Iran

Received: 12 April 2026, accepted: 10 August 2026

ABSTRACT

Keywords:

low-density polyethylene,
nanoclay,
polyolefin elastomer,
foam,
design of experiments
software

Hypothesis: Polyolefin elastomer (POE) improves flexibility by increasing free volume and chain mobility; however, it simultaneously reduces melt viscosity and strength, which can impair cell stability during the foaming process. Conversely, nanoclay is hypothesized to create numerous nucleation sites through a nucleating mechanism and increase interfacial melt viscosity by acting as a physical barrier and restricting chain mobility. The present study focuses on developing an optimized base formulation of LDPE suitable for foam applications rather than the direct fabrication of foam structures.

Methods: To investigate the synergistic effects of nanoclay and polyolefin elastomer, low-density polyethylene was mixed with varying concentrations of both components. In this regard, "Design of Experiments" software was employed by considering the adjustable ranges of polyolefin elastomer and nanoclay based on the literature. Samples with different material compositions were compounded using a twin-screw extruder and then injection-molded into dumbbell-shaped specimens. Melt flow index, differential scanning calorimetry, and tensile tests were subsequently carried out. The interaction effects of polyolefin elastomer and nanoclay concentrations on the melt flow index, melting temperature, modulus, and tensile strength of low-density polyethylene were further analyzed using three-dimensional plots generated by the employed software.

Findings: The results indicate that within the investigated concentration range, the effect of polyolefin elastomer concentration on the melt flow index of low-density polyethylene was independent of the presence of nanoclay. In other words, increasing the polyolefin elastomer amount led to higher melt flow index at both low and high nanoclay loadings. Also, the maximum melting temperature (117°C), modulus (19.3 MPa), and tensile force-at-break (151 N) of low-density polyethylene were achieved at the highest nanoclay (0.2 phr) and polyolefin elastomer (5 phr) concentrations.

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: m.mozaffari@umz.ac.ir

Please cite this article using:

Enayati Kafshgari A. and Mozaffari S.M., Polyolefin Elastomer and Nanoclay Synergistic Effect on the Properties of LDPE as a Base Material for Foam Applications, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **38**, 477-486, 2026.

اثر هم افزایی پلی اولفین الاستومر و نانورس بر خواص پلی اتیلن کم چگالی به عنوان ماده پایه در کاربردهای اسفنج

علیرضا عنایتی کفشگری، سید مرتضی مظفری*

مازندران، بابلرس، دانشگاه مازندران، دانشکده مهندسی و فناوری، گروه مهندسی شیمی، صندوق پستی ۴۷۴۱۶-۱۳۵۳۴

دریافت: ۱۴۰۵/۱/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۱۹

چکیده

فرضیه: پلی اولفین الاستومر با افزایش حجم آزاد و تحرک زنجیرهای پلیمری، اگرچه باعث بهبود انعطاف پذیری می شود، اما هم زمان به کاهش گرانروی و استحکام مذاب منجر می شود که می تواند پایداری سلول ها را در فرایند اسفنجی شدن مختل کند. در مقابل، فرض می شود، نانورس می تواند با سازوکار هسته زایی مراکز متعددی برای تشکیل سلول ها ایجاد کرده و با ایجاد سد فیزیکی و محدود کردن تحرک زنجیرها، گرانروی مذاب را در نواحی بین سطحی افزایش دهد. این پژوهش با هدف توسعه و بهینه سازی فرمول بندی پایه پلی اتیلن کم چگالی به عنوان ماده اولیه مناسب برای کاربردهای اسفنجی انجام شده است و تمرکز آن بر طراحی آمیخته مناسب پیش از فرایند تولید اسفنج است.

روش ها: برای بررسی اثر هم زمان نانورس و پلی اولفین الاستومر، ابتدا پلی اتیلن کم چگالی با مقادیر مختلف نانورس و پلی اولفین الاستومر مخلوط شد. در این راستا، با توجه به بازه قابل تغییر برای پلی اولفین الاستومر و نانورس براساس مقالات، از نرم افزار طراحی آزمون بهره گیری شد. نمونه ها با نسبت های مختلف مواد با استفاده از اکسترودر دو ماریچ با هم مخلوط و در ادامه با استفاده از دستگاه تزریق به شکل دمبل، شکل دهی شدند. آزمون های شاخص جریان مذاب، گرماسنجی پویایی تفاضلی و کشش روی آن ها انجام شد. سپس با رسم منحنی های سه بعدی با نرم افزار طراحی آزمون، اثر متقابل غلظت پلی اولفین الاستومر و نانورس بر شاخص جریان مذاب، دمای ذوب، مدول و نیروی استحکامی پلی اتیلن کم چگالی بررسی شد.

یافته ها: نتایج حاکی از آن است که در دامنه غلظتی بررسی شده، اثر غلظت پلی اولفین الاستومر بر شاخص جریان مذاب پلی اتیلن کم چگالی، مستقل از وجود نانورس بوده است. به طوری که افزایش پلی اولفین الاستومر در غلظت کم و زیاد نانورس باعث افزایش شاخص جریان مذاب می شود. همچنین، پلی اتیلن کم چگالی دارای ۰/۲ phr نانورس و ۵ phr پلی اولفین الاستومر بیشترین دمای ذوب (۱۱۷ °C)، مدول (۱۹/۳ MPa) و نیروی استحکام کششی (۱۵۱ N) را نشان می دهد.

واژه های کلیدی

پلی اتیلن کم چگالی،

نانورس،

پلی اولفین الاستومر،

اسفنج،

نرم افزار طراحی آزمون

* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

m.mozafari@umz.ac.ir

مقدمه

اسفنج های پلیمری به دلیل قیمت کم، سبکی، رسانایی گرمایی کم، جذب انرژی زیاد و نسبت استحکام به وزن عالی در زمینه های مختلفی از جمله حمل و نقل، کف پوش، ابزار ورزشی، عایق بندی (صوتی و گرمایی)، ساخت و ساز، بسته بندی، مخابرات، زیست پزشکی و صنعت خودرو استفاده می شوند [۱-۳]. اسفنج ها به دو دسته گرمانرم و گرماسخت تقسیم بندی می شوند. اسفنج های گرماسخت انعطاف پذیر، به دلیل خاصیت کشسانی بسیار زیاد در بسیاری از کاربردها استفاده می شوند با وجود این، اسفنج های گرماسخت را نمی توان بازیافت کرد و چالش جدی زیست محیطی ایجاد می کنند. به همین دلیل از اسفنج های گرمانرم استفاده می شود [۴]. اسفنج گرمانرم پلی اتیلنی، طی فرایند اسفنج اکستروژنی تولید می شود. با توجه به عوامل متعددی که بر فرایند تولید اسفنج اثر می گذارند، می توان اسفنج هایی با خواص متفاوت تولید کرد. برای دستیابی به ساختارهای اسفنجی با خواص مطلوب، اسفنج های سلولی مصنوعی توسعه یافتند. با توجه به نوع پلیمر، نوع پیوند در ساختار اسفنج و نوع ساختار سلول، اسفنج های سلولی مختلفی می توان تهیه کرد [۵].

اسفنج های مصنوعی معمولاً از حداقل دو فاز تشکیل می شوند: یک فاز جامد شامل ماتریس پلیمری و یک فاز گازی که به صورت سلول ها یا حباب ها در ساختار ماده وجود دارد [۲]. به طور کلی، محصولات پلیمری سلولی در مقایسه با نمونه های جامد خود ویژگی های منحصر به فردی دارند که شامل استحکام کششی ویژه، چقرمگی و خواص عایق گرمایی و صوتی بهتر است. با وجود این، نکته مهم تر آن است که اسفنج های پلیمری در مقایسه با نمونه های جامد دیگر، وزن بسیار کمتری داشته و از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه تر هستند. این ویژگی های منحصر به فرد اسفنج های گرمانرم موجب شده است تا پژوهشگران در راستای توسعه ساختارهای سلولی پلیمری و شناسایی کاربردهای نوین آن ها گام بردارند [۶]. اسفنج اکستروژنی به دلیل بهره وری بیشتر، نسبت به سایر فرایندها تولید اسفنج ترجیح داده می شود [۷]. ساختار اسفنج های پلاستیکی شامل فضای خالی یا سلول هایی درون پلیمری هستند. این ساختار سلولی با وجود عامل اسفنج کننده شکل می گیرد که می تواند مایع فرار، ترکیب شیمیایی یا گاز بی اثر باشد. عامل اسفنج کننده طی فرایند، گاز تولید می کند و در ادامه رشد سلول با کاهش فشار و افزایش دما رخ می دهد. با رسیدن به فشار و دمای محیط و با تثبیت سلولی ساختار اسفنجی ایجاد می شود [۵]. به طور کلی اسفنج های گرمانرم را می توان براساس اندازه سلول، چگالی اسفنج و ساختار سلولی دسته بندی کرد. بسته به اندازه سلول ها و

تراکم تعداد سلول ها، اسفنج های گرمانرم را می توان به اسفنج های صنعتی، اسفنج های ریزسلولی، اسفنج های میکروسلولی و نسل جدیدی با نام اسفنج های نانوسلولی طبقه بندی کرد [۸]. اثر ساختار نانومواد در اسفنج اکستروژنی افزون بر کاهش اندازه سلول ها و یکنواختی ابعادی سلول ها، آثار درخور توجهی بر خواص اسفنج می گذارد. به عنوان مثال، اسفنج هایی که سلول های یکنواختی دارند، در مقایسه با اسفنج هایی که سلول های نایکنواختی دارند یا به عبارتی اندازه سلول های آن متفاوت است، معمولاً عایق گرمایی بهتری هستند. از این رو مهم ترین کاربرد اسفنج های نانوکامپوزیتی در عایق کاری است [۹].

پژوهش های زیادی درباره اسفنج های نانوکامپوزیتی انجام شد. زندی و همکاران [۱۰] اثر نانورس بر رسانایی گرمایی، بازدارندگی شعله و خواص مکانیکی اسفنج پلی اتیلن کم چگالی را بررسی کردند. نتایج نشان داد، اسفنج نانوکامپوزیتی پلی اتیلن کم چگالی، مقاومت فشاری، مدول و بازدارندگی شعله بیشتر و از طرفی رسانایی گرمایی کمتری نسبت به اسفنج پلی اتیلن کم چگالی خالص دارند. بقایی و همکاران [۱۱] شکل شناسی، رفتار رئولوژیکی و خواص مکانیکی-دینامیکی آلیاژ پلی اتیلن کم چگالی/پلی اولفین الاستومر (POE) دارای نانورس را بررسی کردند. در این پژوهش، تمرکز اصلی بر شناسایی و تحلیل ویژگی های شکل شناسی و ساختاری نانوکامپوزیت و نیز نقش سازگارکننده PE-g-MA را در بهبود پراکنش نانورس با استفاده از آزمون XRD بررسی بود. نتایج نشان داد، افزودن ۵٪ وزنی نانورس به آمیخته پلی اتیلن کم چگالی/POE موجب کاهش اندازه ذرات فاز الاستومری و افزایش گرانروی و مدول ذخیره سامانه می شود. بنابراین، مطالعه حاضر به طور عمده رویکردی توصیفی و مشخصه یابانه داشته و بر سازوکارهای پراکنش و ویژگی های ساختاری سامانه تمرکز دارد. Park و همکاران [۱۲] اثر نانورس بر رفتار کف زایی اسفنج پلی پروپیلن را بررسی کردند. نتایج نشان داد، افزودن ۵/۰٪ وزنی نانورس به دلیل افزایش هسته زایی و جلوگیری از ادغام سلولی، نسبت انبساط اسفنج پلی پروپیلن را افزایش داد. کثیری و همکاران [۱۳] و نیز Chang و همکاران [۱۴] اثر مالئیک انیدرید پیوندخورده با پلی اتیلن را بر شکل شناسی، خواص مکانیکی، رسانایی گرمایی و بازدارندگی شعله اسفنج نانوکامپوزیتی پلی اتیلن کم چگالی/نانورس را بررسی کردند. نتایج نشان داد، وجود سازگارکننده مالئیک انیدرید پیوندخورده روی پلی اتیلن در سامانه نانوکامپوزیتی اسفنج پلی اتیلن کم چگالی/نانورس باعث کاهش اندازه سلولی و در نتیجه افزایش چگالی سلولی و یکنواختی ابعاد سلولی شد. همچنین نتایج نشان داد، سازگارکننده استحکام کششی اسفنج نانوکامپوزیتی را

مدل DSC400 ساخت شرکت صنایع الکترونیک در محدوده دمایی °C تا ۱۴۰ °C در جو گاز نیتروژن انجام شد. آزمون کشش با دستگاه کشش مدل STM5 ساخت شرکت سنتام در سرعت کشش ۵۰ mm/min انجام شد.

روش‌ها

تهیه نانوکامپوزیت پلی اتیلن کم چگالی/پلی اولفین الاستومر/ نانورس

یکی از عوامل‌های اثرگذار در ساخت اسفنج پلی اتیلن عامل هسته‌زا است که در این پژوهش از نانورس استفاده شد. استفاده از نانورس به تنهایی و خالص در اکسترودر، باعث عدم پراکندگی یکنواخت نانوذرات و کلوخگی (agglomerate) می‌شود. به همین دلیل، ابتدا با استفاده از اکسترودر دومارپیچ، آمیخته ۱۰ phr نانورس/پلی اتیلن کم چگالی/۱ phr پلی اتیلن پیوندخورده با مالئیک انیدرید (PE-g-MA) تهیه شد [۱۴]. به طوری که ۱۰ kg پلی اتیلن نوع ۲۱۰۲ و ۱ kg نانورس و ۱۰۰ g پلی اتیلن پیوندخورده با مالئیک انیدرید با هم مخلوط و در مخزن تغذیه اکسترودر ریخته شد. سپس، دمای اکسترودر روی ۱۵۰ °C تنظیم و مخلوط از دهانه دای به صورت رشته خارج شد و سپس با عبور از مخزن آب، درون خردکن به صورت دانه خرد شد. در ادامه از نرم افزار Design Expert 13.0.5.0 برای طراحی آزمون استفاده شد. این نرم افزار با استفاده از روش سطح پاسخ، ارزیابی اثر متغیرهای مستقل بر پاسخ را امکان پذیر می‌کند. یکی از پرکاربردترین مدلی که در روش سطح پاسخ می‌توان استفاده کرد، مدل طرح مرکب مرکزی است. این مدل طرح آزمایشی متقارن پنج سطحی است و بیشتر برای توسعه روش‌های تحلیلی استفاده می‌شود [۱۶]. در این مدل تکرار نقاط مرکزی مطابق ساختار استاندارد این طرح است و برای برآورد خطای خالص مدل در نظر گرفته می‌شود [۱۷]. در کار پژوهشی حاضر، برای بررسی اثر دو متغیر مستقل غلظت نانورس و غلظت پلی اولفین الاستومر بر خواص فیزیکی و مکانیکی پلی اتیلن کم چگالی، روش سطح پاسخ، مدل طرح مرکب مرکزی به کار گرفته شد. جدول ۱ براساس این مدل، متغیرهای مستقل و

افزایش و رسانایی گرمایی و سرعت سوختن اسفنج نانوکامپوزیتی را کاهش می‌دهد.

در مطالعه حاضر اثر وجود هم زمان پلی اولفین الاستومر و نانورس در ماتریس پلی اتیلن کم چگالی بررسی شد تا اثر متقابل این دو جزء بر ویژگی‌های سامانه پلیمری ارزیابی شود. در این راستا تلاش شده است، با ایجاد تعادل میان انعطاف پذیری ناشی از فاز الاستومری و استحکام ساختاری حاصل از نانوذرات، فرمول بندی مناسبی برای کاربردهای اسفنجی ارائه شود. در این راستا، ابتدا با نرم افزار طراحی آزمون و با توجه به بازه قابل تغییر غلظت پلی اولفین الاستومر و نانورس براساس مقالات [۱۰، ۱۳، ۱۵] پلی اتیلن کم چگالی با غلظت‌های مختلف از پلی اولفین الاستومر و نانورس پیشنهاد شد. پس از تهیه آمیخته‌ها با اکسترودر دوپیچ و ساخت نمونه دمبلی با دستگاه تزیق و انجام آزمایش‌های مربوط، نتایج آزمون‌ها وارد این نرم افزار شدند. در نهایت منحنی‌های مربوطه با این نرم افزار رسم شدند و اثر هم زمان غلظت پلی اولفین الاستومر و نانورس بر خواص فیزیکی و مکانیکی پلی اتیلن کم چگالی بررسی و تحلیل شد.

تجربی

مواد

مواد استفاده شده در این پژوهش شامل پلی اتیلن کم چگالی L2102TX00 از پتروشیمی لاله تبریز، پلی اولفین الاستومر LC670 از شرکت LG chem کره، نانورس اصلاح شده Block tone 22A از نانو پارمیس خاوران و پلی اتیلن پیوندخورده با مالئیک انیدرید نوع Aria Couple 1125 از آریا پلیمر تهیه شد.

دستگاه‌ها

آزمون MFI به کمک دستگاه مدل SMF300 ساخت شرکت سنتام در دمای ۱۹۰ °C با وزنه ۲۱۶۰ g انجام شد. آزمون DSC با گرماسنج

جدول ۱- متغیرهای مستقل و سطوح آن‌ها برای بررسی اثر هم زمان غلظت نانورس و POE بر خواص پلی اتیلن کم چگالی.

Table 1. Independent variables and their levels for investigating the combined effect of nanoclay and POE concentrations on the properties of LDPE.

Independent variables	Limits and variables level				
	-α	-1	.	+1	+α
POE (phr)	0.17	1	3	5	5.82
Nanoclay (phr)	0.018	0.05	0.125	0.2	0.23

جدول ۳- جرم پلی‌اولفین الاستومر و آمیخته پلی‌اتیلن کم‌چگالی / نانورس PE-g-MA/ استفاده شده در فرایند قالب‌گیری تزریقی (بر مبنای ۵۰۰ g پلی‌اتیلن کم‌چگالی) براساس ترکیب درصدهای ارائه شده در جدول ۲.

Table 3. Mass of polyolefin elastomer and LDPE/nanoclay/PE-g-MA blend used in the injection molding process (based on 500 g of LDPE) according to the compositions listed in Table 2.

sample	POE (g)	LDPE/Nanoclay/PE-g-MA (g)
1	5	10
2	25	10
3	15	11.5
4	15	6.25
5	29.1	6.25
6	0.85	6.25
7	15	6.25
8	15	6.25
9	25	2.5
10	15	6.25
11	15	0.9
12	15	6.25
13	5	2.5

طراحی آزمون را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۴ نتایج آزمون‌های شاخص جریان مذاب، گرماسنجی پویشی تفاضلی و کشش در ترکیب درصدهای پیشنهادی به نرم‌افزار طراحی آزمون داده شد. سپس، با رسم منحنی‌های سه‌بعدی با نرم‌افزار طراحی آزمون اثر متقابل غلظت پلی‌اولفین الاستومر و نانورس بر خواص فیزیکی و مکانیکی پلی‌اتیلن کم‌چگالی بررسی شد.

اثر هم‌زمان نانورس و پلی‌اولفین الاستومر بر شاخص جریان مذاب پلی‌اتیلن کم‌چگالی

شکل ۳ نمودار سه‌بعدی اثر متقابل غلظت پلی‌اولفین الاستومر و نانورس بر شاخص جریان مذاب پلی‌اتیلن کم‌چگالی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش غلظت پلی‌اولفین الاستومر MFI پلی‌اتیلن کم‌چگالی در غلظت‌های مختلف نانورس افزایش می‌یابد. این می‌تواند به دلیل ماهیت لاستیکی پلی‌اولفین الاستومرها باشد. به‌طوری که براساس متون علمی، افزودن POE به ماتریس پلی‌اولفینی به کاهش گرانروی مذاب منجر می‌شود؛ پدیده‌ای که به انعطاف‌پذیری زیاد زنجیرها و مدول کم فاز الاستومری نسبت داده می‌شود [۱۸]. این شکل همچنین نشان می‌دهد، POE اثر بیشتری نسبت به نانورس

جدول ۲- غلظت‌های پیشنهادی پلی‌اولفین الاستومر و نانورس نسبت به پلی‌اتیلن کم‌چگالی، تعیین شده با نرم‌افزار طراحی آزمون.

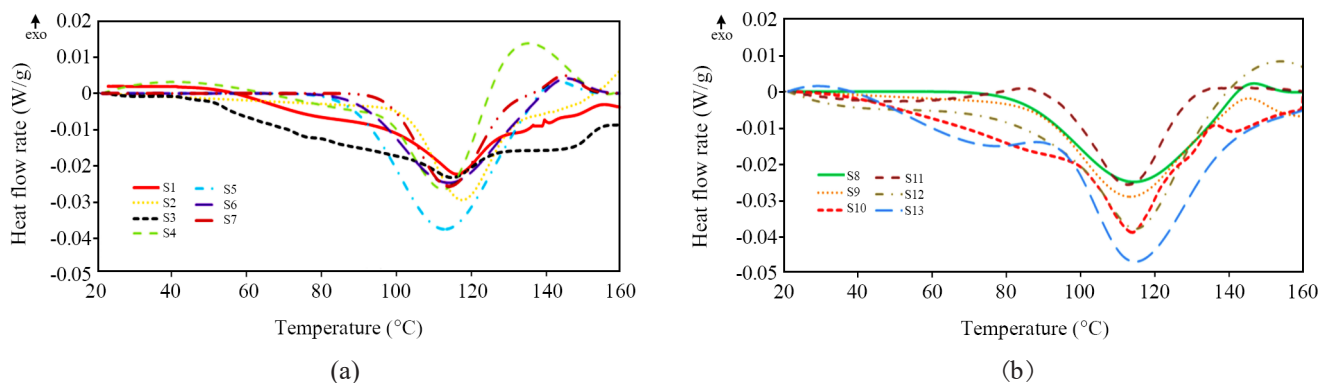
Table 2. Suggested concentrations of polyolefin elastomer and nanoclay in LDPE, determined by design of experiment (DOE) software.

Sample	Nanoclay (phr)	POE (phr)
1	0.2	1
2	0.2	5
3	0.23	3
4	0.125	3
5	0.125	5.82
6	0.125	0.17
7	0.125	3
8	0.125	3
9	0.05	5
10	0.125	3
11	0.018	3
12	0.125	3
13	0.05	1

سطوح درنظر گرفته شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. با توجه به این متغیرها و سطوح آن‌ها، غلظت‌های پیشنهادی پلی‌اولفین الاستومر و نانورس با نرم‌افزار طراحی آزمایش تعیین شد که در جدول ۲ ارائه شده‌اند. برای دستیابی به این ترکیب درصدها در فرایند قالب‌گیری تزریقی، مطابق جدول ۳، جرم پلی‌اولفین الاستومر و آمیخته شامل نانورس، پلی‌اتیلن کم‌چگالی، پلی‌اتیلن پیوندخورده با مالئیک انیدرید بر مبنای ۵۰۰ g پلی‌اتیلن کم‌چگالی محاسبه شد. سپس، برای هر ترکیب درصد، سه نمونه دمبلی شکل قالب‌گیری شدند. آزمایش‌ها با دستگاه‌های DSC، MFI و کشش روی نمونه انجام شد. نتایج آزمون‌ها با نرم‌افزار طراحی آزمون ارائه شد و با رسم منحنی‌ها مختلف به کمک نرم‌افزار طراحی آزمون اثر هم‌زمان غلظت نانورس و پلی‌اولفین الاستومر بر شاخص جریان مذاب، دمای ذوب، مدول و نیروی کششی پلی‌اتیلن بررسی شد.

نتایج و بحث

شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب منحنی‌های حاصل از آزمون گرماسنجی پویشی تفاضلی و کشش نمونه‌های پلی‌اتیلن کم‌چگالی دارای پلی‌اولفین الاستومر / نانورس در ترکیب درصدهای پیشنهادی نرم‌افزار

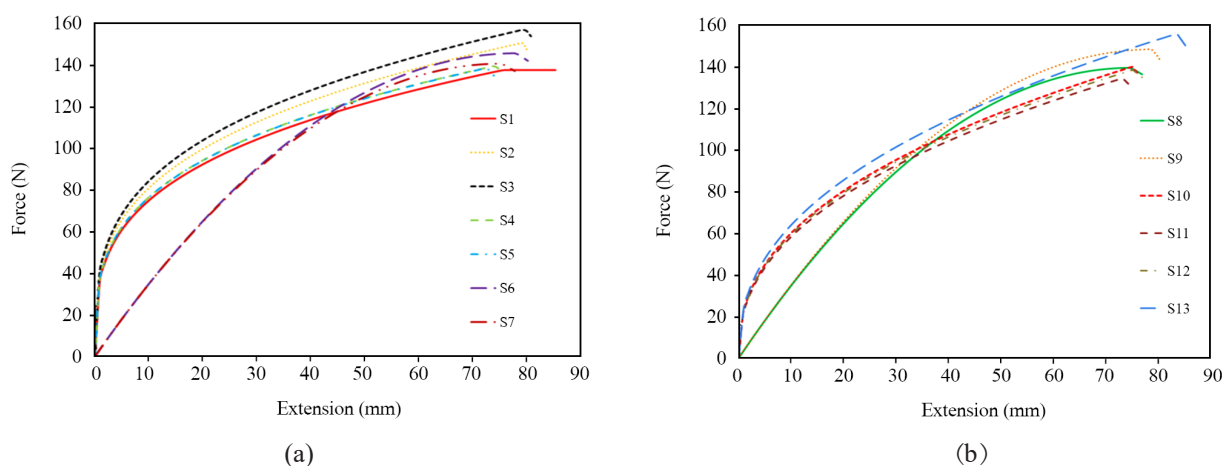


شکل ۱- منحنی‌های DSC مربوط به نمونه‌های پلی‌اتیلن کم چگالی (LDPE) دارای پلی‌اولفین الاستومر (POE) و نانورس، تهیه شده براساس ترکیب درصدهای پیشنهاد شده با نرم افزار طراحی آزمون (DOE): (a) نمونه‌های ۱ تا ۷ (b) نمونه‌های ۸ تا ۱۳.

Fig. 1. DSC curves of low-density polyethylene (LDPE) samples containing polyolefin elastomer (POE) and nanoclay, prepared according to the compositions proposed by the Design of Experiments (DOE) software: (a) samples 1 to 7; (b) samples 8 to 13.

می‌یابد (افزایش گرانروی) که ناشی از برهم‌کنش‌های قوی فازی و محدودیت حرکتی اعمال شده به وسیله نانوذرات است. اما با افزایش بیشتر نانورس، بهبود توزیع و نقش سازگارکنندگی نانورس در کاهش اندازه فاز الاستومری پخش شده (POE) در ماتریس پلی‌اتیلن [۱۱] به آسانی جریان‌پذیری (افزایش MFI) منجر می‌شود. همچنین افزایش نسبتاً محدود مدول (حدود ۲-۳ MPa) در این منحنی دیده می‌شود که آن را می‌توان با در نظر گرفتن ماهیت سامانه توضیح داد. نانوکامپوزیت‌های پایه پلی‌اتیلن به دلیل ماهیت غیرقطبی ماتریس، برهم‌کنش بین‌سطحی نسبتاً ضعیفی با نانوذرات معدنی دارند و در

بر MFI پلی‌اتیلن می‌گذارد. با وجود این، اثر نانورس بر MFI به غلظت POE بستگی شدیدی دارد؛ به طوری که در غلظت کم POE (معادل ۱ phr)، با افزودن نانورس تا ۰/۱۲۵ phr، ابتدا MFI افزایش می‌یابد (کاهش گرانروی) که نشان‌دهنده نقش روان‌کنندگی نانورس در مقادیر کم است. اما، با افزایش بیشتر غلظت نانورس، MFI کاهش می‌یابد (افزایش گرانروی)، زیرا تجمع نانوذرات فضا را محدود کرده و مانع حرکت زنجیرهای پلیمری می‌شود. در مقابل، در غلظت زیاد POE (معادل ۵ phr)، روند معکوسی مشاهده می‌شود؛ ابتدا با افزودن نانورس تا ۰/۱۲۵ phr، مقدار MFI کاهش



شکل ۲- منحنی‌های آزمون کشش برای نانوکامپوزیت‌های LDPE/POE/Nanoclay در درصدهای مختلف وزنی پیشنهاد شده با نرم افزار طراحی آزمون: (a) نمونه‌های ۱ تا ۷ (b) نمونه‌های ۸ تا ۱۳.

Fig. 2. Tensile test curves for LDPE/POE/Nanoclay nanocomposites at various weight percentages proposed by the Design of Experiments (DOE) software: (a) samples 1 to 7, (b) samples 8 to 13.

جدول ۴- نتایج آزمون‌های شاخص جریان مذاب، گرماسنجی پویشی تفاضلی و کشش نمونه‌های پلی اتیلن کم چگالی دارای پلی اولفین الاستومر/ نانورس استفاده شده به عنوان داده‌های ورودی در نرم افزار طراحی آزمون.

Table 4. Results of melt flow index, differential scanning calorimetry, and tensile tests for LDPE containing polyolefin elastomer/ nanoclay, as input to the design of experiments software

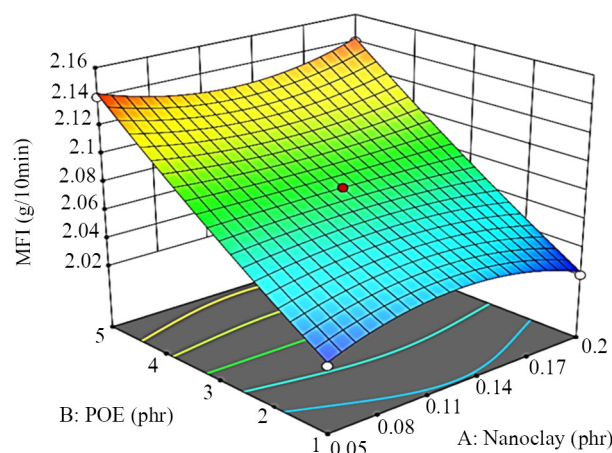
Sample	Factor 1 A:Nanoclay (phr)	Factor 2 B:POE (phr)	Response 1 MFI (g/10min)	Response 2 T_m (°C)	Response 3 Module (MPa)	Response 4 Force (N)
1	0.2	1	2.02	116.0	16.75	137.90
2	0.2	5	2.14	117.6	19.35	151.05
3	0.23	3	2.08	115.4	18.50	157.60
4	0.125	3	2.08	114.5	17.00	140.00
5	0.125	5.82	2.15	113.0	15.00	139.00
6	0.125	0.17	2.03	114.1	20.00	146.00
7	0.125	3	2.08	114.2	17.70	141.00
8	0.125	3	2.06	114.5	17.00	140.00
9	0.05	5	2.14	113.2	16.68	148.90
10	0.125	3	2.04	114.1	17.50	140.50
11	0.0189	3	2.08	113.9	16.50	135.00
12	0.125	3	2.07	114.8	17.60	139.00
13	0.05	1	2.02	113.8	18.21	156.5

فرمول بندی می تواند به دلیل مدول کم و تحرک زیاد زنجیرها اثر نرم کنندگی در ماتریس ایجاد کند. در چنین شرایطی، این فاز نرم تا حدی اثر تقویت کنندگی نانوذرات را تعدیل کرده و از افزایش شایان توجه مدول جلوگیری می کند [۱۹].

اثر نانورس و پلی اولفین الاستومر بر دمای ذوب پلی اتیلن کم چگالی

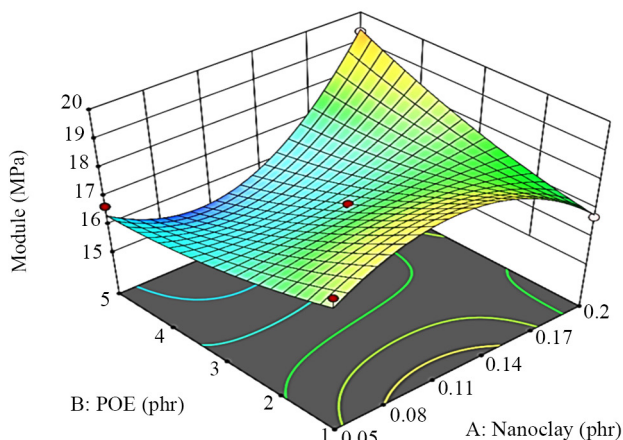
شکل ۴ نمودار سه بعدی اثر متقابل غلظت پلی اولفین الاستومر و نانورس بر دمای ذوب پلی اتیلن را نشان می دهد. با توجه به شکل با افزایش غلظت نانورس، دمای ذوب (T_m) پلی اتیلن کم چگالی افزایش می یابد که دلیل آن محدود شدن حرکت زنجیرها در فاز بلوری و نیز نقش هسته زایی نانورس در فرایند بلورنش است. همچنین با توجه به شکل در غلظت کم نانورس (۰/۰۵ phr) با افزایش غلظت POE تا ۳ phr ابتدا موجب افزایش و سپس کاهش دمای ذوب می شود. اما در غلظت زیاد نانورس (۰/۲ phr)، با افزایش غلظت POE و در نتیجه کاهش جزء حجمی پلی اتیلن، به احتمال زیاد غلظت نسبی نانورس در فاز پلی اتیلن افزایش یافته که با افزایش چگالی هسته زایی در مجاورت نانورس می تواند فرایند بلورنش پلی اتیلن را آسان کرده و در برخی موارد به افزایش درجه بلورنش و دمای ذوب منجر شود. با وجود این، دمای ذوب فقط به درصد بلورنش وابسته نیست و به شکل شناسی بلورها، ضخامت لایه ها و مقدار نظم ساختار بلوری

نتیجه کارایی تقویت کنندگی پرکننده ها در این سامانه ها معمولاً محدود گزارش شده است [۱۹،۲۰]. افزون بر این، وجود فاز الاستومری در



شکل ۳- نمودار سه بعدی اثر متقابل غلظت نانورس و پلی اولفین الاستومر بر شاخص جریان مذاب پلی اتیلن کم چگالی (g/10 min) رسم شده با نرم افزار طراحی آزمون.

Fig. 1. Three-dimensional plot of the interactive effect of nanoclay and polyolefin elastomer concentrations on the melt flow index of LDPE (g/10 min), generated using design of experiments software.



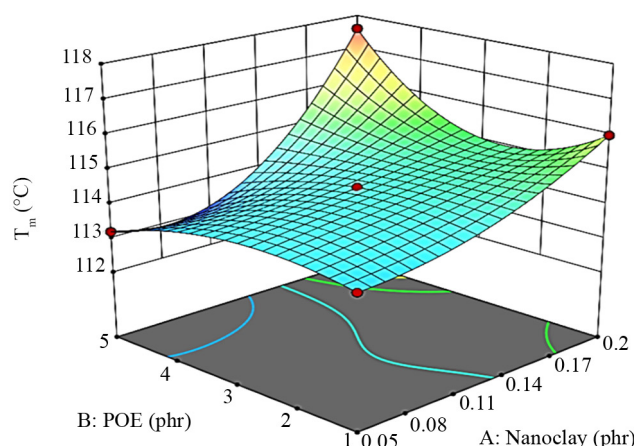
شکل ۵- نمودار سه بعدی اثر برهم کنش غلظت نانورس و پلی اولفین الاستومر بر مدول کشسانی پلی اتیلن سیک رسم شده با نرم افزار طراحی آزمون.

Fig 3. Three-dimensional plot of the interaction effect of nanoclay and polyolefin elastomer concentration on the elastic modulus of low-density polyethylene, generated using design of experiments software.

پلی اتیلن کم چگالی، به دلیل حرکت راحت تر زنجیر لاستیکی POE، کاهش می یابد.

اثر غلظت نانورس و پلی اولفین الاستومر بر نیروی استحکام پلی اتیلن کم چگالی

شکل ۶ نمودار سه بعدی اثر متقابل غلظت نانورس و پلی اولفین الاستومر بر نیروی استحکام پلی اتیلن را نشان می دهد. با توجه به شکل بیشترین نیروی استحکام در غلظت زیاد نانورس و پلی اولفین الاستومر مشاهده شده است. منحنی های دمای ذوب و مدول نیز این موضوع را تأیید می کنند. همان طور که در شکل مشاهده می شود در غلظت کم POE با افزایش نانورس استحکام کاهش می یابد. به عبارتی با افزایش غلظت نانورس در غلظت کم POE مقاومت در برابر تغییر شکل و حداکثر تنش که نمونه می تواند تحمل کند کاهش می یابد. این بدان معنی می تواند باشد که در غلظت کم POE نانورس نمی تواند نقش سازگارکننده را به خوبی ایفا کند و در نتیجه حرکت زنجیرها راحت تر می شود. در حالی که در غلظت زیاد POE در شرایطی که نانورس کم یا زیاد باشد، بیشترین استحکام مشاهده می شود. به طوری که در غلظت های کم نانورس، صفحه های سیلیکاتی به احتمال زیاد (با توجه به اینکه نانوکامپوزیت اولیه از آمیخته سازی



شکل ۴- نمودار سه بعدی اثر متقابل غلظت نانورس و پلی اولفین الاستومر بر دمای ذوب پلی اتیلن کم چگالی رسم شده با نرم افزار طراحی آزمون.

Fig 2. Three-dimensional plot of the interaction effect of nanoclay and polyolefin elastomer concentration on the melting temperature of polyethylene generated using design of experiments software.

نیز بستگی دارد [۲۱]. در نهایت با توجه به شکل در غلظت زیاد نانورس و POE بیشترین دمای ذوب مشاهده می شود. به طور کلی افزایش دمای ذوب نشان دهنده افزایش نظم بلوری و اثر هسته زایی نانورس است که می تواند با افزایش پایداری دیواره سلول ها و تسریع تثبیت ساختار سلولی، به تولید اسفنجی با اندازه سلول کوچک تر و یکنواخت تر کمک کند [۲۲].

اثر نانورس و پلی اولفین الاستومر بر مدول پلی اتیلن کم چگالی

شکل ۵ نمودار سه بعدی اثر متقابل غلظت نانورس و پلی اولفین الاستومر بر مدول کششی پلی اتیلن کم چگالی را نشان می دهد. با توجه به شکل بیشترین مدول در غلظت زیاد نانورس و پلی اولفین الاستومر مشاهده شده است. این مورد تأییدی بر نتیجه آزمون گرماسنجی پویشی تفاضلی است که بیشترین دمای ذوب در این غلظت از نانورس و پلی اولفین الاستومر مشاهده شده است. به طوری که با افزایش مقدار نانورس، مدول کششی به دلیل افزایش سختی سامانه و محدود شدن حرکت زنجیرهای پلی اتیلن افزایش می یابد، زیرا صفحه های نانورس با ایجاد مانع فیزیکی، تحرک زنجیرهای پلیمری را کاهش می دهند [۲۳]. با توجه به این شکل در غلظت کم نانورس، با افزایش غلظت پلی اولفین الاستومر مدول کشسانی (مدول یانگ)

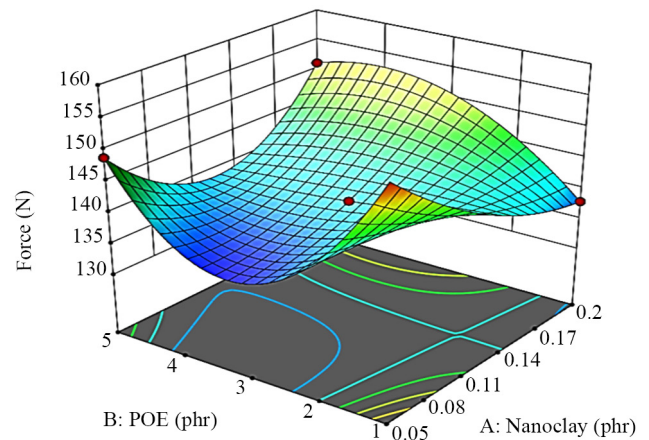
ساختار بلوری متراکم تر و در نهایت بهبود استحکام مکانیکی نمونه منجر شود. از سوی دیگر در غلظت زیاد نانورس، از آنجا که نانورس در فصل مشترک POE و پلی اتیلن قرار می گیرند و سازگاری دو فاز بیشتر [۱۱] و استحکام سامانه نانوکامپوزیتی افزایش می یابد.

نتیجه گیری

هدف از این پژوهش بررسی اثر هم زمان غلظت نانورس و پلی اولفین الاستومر به منظور دستیابی به فرمول بندی مناسب پلی اتیلن برای کاربردهای اسفنجی و بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی آن بود. در این راستا، طراحی و ارزیابی آمیخته های مناسب پیش از فرایند تولید اسفنج مورد توجه قرار گرفت. در این پژوهش برای دستیابی به خواص ارتجاعی (برگشت پذیری اسفنج) از پلی اولفین الاستومر استفاده شد. نتایج نشان داد، افزودن پلی اولفین الاستومر (POE) به دلیل شاخص جریان مذاب (MFI) بیشتر نسبت به پلی اتیلن، موجب کاهش گرانروی و مقاومت مذاب آمیخته در غلظت های مختلف نانورس می شود. این کاهش مقاومت مذاب می تواند در فرایند اسفنج سازی به رشد بیش از حد و ناهمگنی سلول های اسفنج منجر شده و در نهایت باعث کاهش خواص فیزیکی و مکانیکی اسفنج پلی اتیلنی شود. به منظور جبران این اثر، از نانورس به عنوان عامل هسته استفاده شد. نانورس به دلیل سطح ویژه زیاد و برهم کنش مناسب با زنجیرهای پلیمری، می تواند با ایجاد مراکز هسته زایی و تقویت برهم کنش های بین مولکولی، به بهبود استحکام و پایداری ساختار آمیخته کمک کند. به طوری که در غلظت زیاد نانورس (۰/۲ phr) و پلی اولفین الاستومر (۵ phr) بیشترین دمای ذوب (۱۱۷ °C) بیشترین مدول (۱۹/۳ MPa) و بیشترین نیروی استحکام (۱۵۱ N) مشاهده می شود.

مراجع

- Hasanzadeh R. and Azdast T., Innovative Applications of Polymeric Foams, *Materials (Basel)*, **15**, 8155, 2022.
- Azdast T., Karimzadeh S., Hasanzadeh R., Moradian M., Doniavi A., and Akrami H., Experimental Comparison of the Effect of Microtalc and Nanoclay on the Structural Properties of Polyethylene Foams Fabricated by Rotational Molding, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **35**, 81-90, 2022
- Godarzi D., Hosseini S.M., Pourhossaini M.R., Razavizade M., Khabiri M., and Saadat Tagharoodi M., Dependence of Dielectric Constant and Mechanical Properties of Expanded Polystyrene Foam on Cell Wall Thickness, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **36**, 509-519, 2023.
- Ghosh A., Orasugh J.T., Chattopadhyay D., and Ray S.S., Polymers for Foams and Their Emerging Applications, In *Specialty Polymers*, CRC, 295-309, 2023.
- Wu G., Xie P., Yang H., Dang K., Xu Y., Sain M., Turng L.S.,



شکل ۶- نمودار سه بعدی اثر برهم کنش غلظت نانورس و پلی اولفین الاستومر بر نیروی استحکام پلی اتیلن کم چگالی رسم شده با نرم افزار طراحی آزمون.

Fig 3. Three-dimensional plot of the interaction effect of nanoclay and polyolefin elastomer concentration on the tensile strength of low-density polyethylene, generated using design of experiments software.

LDPE، نانورس و عامل سازگارکننده PE-g-MA تهیه شده و سپس فاز الاستومری به سامانه افزوده شده) به طور عمده در فاز پلی اتیلن کم چگالی توزیع می شوند. از آنجا که نانورس می تواند به عنوان عامل هسته زای برای بلورش عمل کند، وجود آن موجب افزایش تعداد هسته های بلوری در سامانه می شود. در نتیجه فرایند تشکیل بلورها در دمای بیشتری آغاز شده و سرعت بلورش پلی اتیلن افزایش می یابد. افزون بر این، برهم کنش میان سطح نانورس و زنجیرهای پلیمر باعث محدود شدن تحرک زنجیرها در ناحیه بین سطحی می شود [۲۴]. این محدودیت حرکتی در کنار افزایش هسته زایی می تواند به تشکیل

- and Yang W., A Review of Thermoplastic Polymer Foams for Functional Applications, *J. Mater. Sci.*, **56**, 11579-11604, 2021.
6. Okolieocha C., Raps D., Subramaniam K., and Altstädt V., Microcellular to Nanocellular Polymer Foams: Progress (2004–2015) and Future Directions-A Review, *Eur. Polym. J.*, **73**, 500-519, 2015.
 7. de Souza F.M., Desai Y. and Gupta R.K., Introduction to Polymeric Foams, In *Polymeric Foams: Fundamentals and Types of Foams*, ACS, **1**, 1-23, 2023.
 8. Thiele W.C. and Martin C., Extrusion Equipment for Foam Processing, In *Foam Extrusion: Principles and Practice*, Park C.B. (Ed.), 2nd ed., Taylor and Francis, Boca Raton, 293-318, 2014.
 9. Azdast T. and Hasanzadeh R., Increasing Cell Density/Decreasing Cell Size to Produce Microcellular and Nanocellular Thermoplastic Foams: A Review, *J. Cellular Plast.*, **57**, 769-797, 2021.
 10. Zandi F., Rezaei M., and Kasiri A., Effect of Nanoclay on the Physical-Mechanical and Thermal Properties and Microstructure of Extruded Noncross-Linked LDPE Nanocomposite Foams, *Key Eng. Mater.*, **471**, 751-756, 2011.
 11. Baghaei B., Jafari S.H., Khonakdar H.A., Rezaeian I., As' Habi L., and Ahmadian S., Interfacially Compatibilized LDPE/POE Blends Reinforced with Nanoclay: Investigation of Morphology, Rheology and Dynamic Mechanical Properties, *Polym. Bull.*, **62**, 255-270, 2009.
 12. Zhai W. and Park C.B., Effect of Nanoclay Addition on the Foaming Behavior of Linear Polypropylene-Based Soft Thermoplastic Polyolefin Foam Blown in Continuous Extrusion, *Polym. Eng. Sci.*, **51**, 2387-2397, 2011.
 13. Kasiri A., Rezaei M., and Zandi F., The Effect of Polyethylene Graft Maleic Anhydride Compatibilizer on the Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Extruded Noncross-Linked Low-Density Polyethylene Nanocomposite Foams, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **28**, 1537–1549, 2015.
 14. Chang M.-K., Mechanical Properties and Thermal Stability of Low-Density Polyethylene Grafted Maleic Anhydride/Montmorillonite Nanocomposites, *J. Indust. Eng. Chem.*, **27**, 96-101, 2015.
 15. Mehta S., Mirabella F.M., and Rufener K., Thermoplastic Olefin/Clay Nanocomposites: Morphology and Mechanical Properties, *J. Appl. Polym. Sci.*, **92**, 928-936, 2004.
 16. Hasanzade P., Gharbani P., Fard F.D., and Maher B.M., Modeling and Optimization of Cefixime Removal from Aqueous Solutions by Poly(vinylidene fluoride)/Graphitic Carbon Nitride/Chitosan Membrane Using Response Surface Methodology, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **35**, 139-149, 2022.
 17. Montgomery D.C., *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 9th ed., 2017
 18. Long R., Long S., Zou L., Huang Z., Huang Y., Hu C., Li D., and Li X., Rheology, Crystallization, and Enhanced Mechanical Properties of Uniaxially Oriented Ethylene–Octene Copolymer/Polyolefin Elastomer Blends, *Polymer*, **243**, 124655, 2022.
 19. Ray S.S. and Okamoto M., Polymer/Layered Silicate Nanocomposites: A Review from Preparation to Processing, *Prog. Polym. Sci.*, **28**, 1539-1641, 2003.
 20. Alexandre M. and Dubois P., Polymer-Layered Silicate Nanocomposites: Preparation, Properties and Uses of a New Class of Materials, *Mater. Sci. Eng. R: Rep.*, **28**, 1-63, 2000.
 21. Zhang M.C., Guo B.-H., and Xu J., A Review on Polymer Crystallization Theories, *Crystals*, **7**, 4, 2016.
 22. Jin F.-L., Zhao M., Park M., and Park S.-J., Recent Trends of Foaming in Polymer Processing: A Review, *Polymers (Basel)*, **11**, 953, 2019.
 23. Bumbudsanpharoke N., Lee W., Choi J.C., Park S.-J., Kim M., and Ko S., Influence of Montmorillonite Nanoclay Content on the Optical, Thermal, Mechanical, and Barrier Properties of Low-Density Polyethylene, *Clay. Clay Miner.*, **65**, 387-397, 2017.
 24. He F.-A. and Zhang L.-M., Study on Thermal Stability and Non-Isothermal Crystallization Behaviour of Polyethylene/Clay Nanocomposites, *Polym. Polym. Compos.*, **23**, 545-554, 2015.