



بررسی اثر عوامل فومزای فیزیکی دی‌اکسیدکربن و نیتروژن بر روی خواص ساختاری فوم‌های پلیمری پلی‌اتیلن تولید شده به روش اکستروژن نیما فیض‌لو^۱، طاهر ازدست^{۲*}، رزگار حسن‌زاده^۳، میلاد رستمی^۴

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۴- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: t.azdast@urmia.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۶ مرداد ۱۴۰۳

پذیرش: ۳۰ شهریور ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

فوم اکستروژن

عامل فومزای فیزیکی

فوم‌های پلیمری

خواص ساختاری

فوم‌های پلیمری یکی از راهکارهای دستیابی به بهبود خواص پلیمرها می‌باشند. محققان نشان داده‌اند که معمولاً با افزایش چگالی سلولی و کاهش چگالی فوم و اندازه سلولی می‌توان به خواص بهتری دست یافت. شرایط فرایندی بر روی تغییر خواص مؤثر هستند که یکی از آن‌ها عامل فومزای فیزیکی می‌باشد. بنابراین در تحقیق حاضر با حفظ شرایط موادی و فرایندی، از گرانول پلی‌اتیلن سنگین با چگالی بالا گرید ۵۴۴۰۴ به عنوان ماده فاز زمینه استفاده شده، به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها، تولید نمونه‌ها در دو مرحله انجام می‌گیرد، در مرحله اول با عامل فومزای دی‌اکسیدکربن و در مرحله دوم با عامل فومزای نیتروژن، نمونه‌های مرحله اول و دوم تولید می‌گردد، تأثیر نوع عامل فومزای فیزیکی، شامل گاز دی‌اکسیدکربن و نیتروژن بر ساختار فوم‌های پلیمری تولید شده به روش اکستروژن بررسی می‌شود. بررسی نتایج چگالی و تصاویر ساختاری نمونه‌ها نشان داد که در تولید نمونه با عامل فومزای فیزیکی گاز دی‌اکسیدکربن، چگالی فوم 0.420 g/cm^3 و نسبت انبساط 2.17 برابر و چگالی سلولی $2.78 \times 10^4 \text{ cells/cm}^3$ به دست آمد. در ادامه، بررسی نمونه تولید شده با عامل فومزای فیزیکی گاز نیتروژن نشان داد که چگالی فوم 0.628 g/cm^3 و نسبت انبساط 1.45 برابر و همچنین چگالی سلولی $4.32 \times 10^4 \text{ cells/cm}^3$ حاصل شده است. در تولید نمونه با گاز دی‌اکسیدکربن به دلیل خاصیت حلالیت بالاتر گاز دی‌اکسیدکربن نسبت نیتروژن در ماتریس پلیمری، باعث تولید فوم با چگالی فوم پایین و نسبت انبساط بیشتر گردیده، همچنین در تولید نمونه با گاز نیتروژن به دلیل خاصیت هسته‌زایی بالای نیتروژن نسبت به دی‌اکسیدکربن، منجر به تولید نمونه‌ای با چگالی سلولی بیشتر شده است.

Investigating the effect of carbon dioxide and nitrogen physical foaming agents on the structural properties of extruded polyethylene polymeric foams

Nima Feizlou¹, Taher Azdast^{2*}, Rezgar Hasanzadeh³, Milad Rostami⁴

1- MSc Graduate, Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

4- PhD Student, Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

* Corresponding Author's Email: t.azdast@urmia.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 6 August 2024

Accepted: 20 September 2024

Keywords:

Extrusion Foam

Physical Foaming Agent

Polymeric Foams

Structural Properties

Abstract

Polymeric foams are one of the solutions to improve the properties of polymers. Researchers have shown that by increasing cell density and decreasing foam density and cell size, better properties can be achieved. Process conditions are effective in changing the properties, one of which is the foaming agent. Therefore, in the present research, while maintaining the material and process conditions, high-density polyethylene granule grade 54404 was used as the background phase material. The production of the samples is done in two stages; with the carbon dioxide foaming agent and nitrogen foaming agent. The effect of the type of physical foaming agent on the structure of extruded polymeric foams is investigated. Results showed that in the production of the sample with the physical foaming agent of carbon dioxide gas, the foam density was 0.420 g/cm^3 and the expansion ratio was 2.17 times and the cell density was $2.78 \times 10^4 \text{ cells/cm}^3$. Furthermore, the results of physical foaming agent of nitrogen gas showed that the foam density was 0.628 g/cm^3 the expansion ratio was 1.45 times, as well as the cell density was $4.32 \times 10^4 \text{ cells/cm}^3$. In the sample production with carbon dioxide gas, the higher solubility property of carbon dioxide gas compared to nitrogen in the polymer matrix caused the production of foam with low foam density and higher expansion ratio. Also, in the sample production with nitrogen gas, due to the high nucleation property of nitrogen compared to carbon dioxide, it led to the production of samples with increased cell density.

Please cite this article using:

Feizlou N, Azdast T, Hasanzadeh R, Rostami M. Investigating the effect of carbon dioxide and nitrogen physical foaming agents on the structural properties of extruded polyethylene polymeric foams. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Dec 21;11(10):24-31. doi: 10.22034/ijme.2024.472068.1994 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

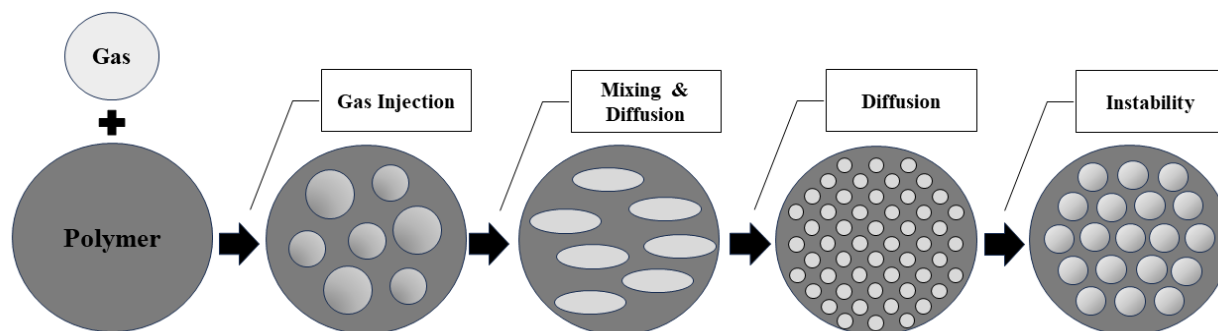
ارتباط پلیمرهای طبیعی با انسان از ابتدای زندگی بوده است، با گذشت زمان در قرن نوزدهم میلادی با اصلاح ساختار شیمیایی مواد، منجر به تولید تعدادی محصول انجامید، در ادامه همزمان با پیشرفت‌های صنعت، پلیمرهای مصنوعی از اوایل قرن بیستم شروع گردید، در طول جنگ جهانی دوم، صنعت پلیمر به رشد فزاینده‌ای خود ادامه داده و از آن زمان به یکی از صنایع مهم تبدیل شده است، مواد پلیمری در مقایسه با مواد متداول مانند فلزات دارای برتری‌های بسیاری از جمله فرایند ساخت و تولید آسان، هزینه پایین مواد اولیه و فرایند تولید، سرعت بالای تولید و چند منظوره بودن، هستند [۱].

کامپوزیت‌ها در بسیاری از صنایع از جمله صنایع مکانیکی، الکترونیکی و شیمیایی کاربرد دارند [۲]. مواد پلیمری پایه‌ی نفتی جای خود را به مواد بازیافتی و مواد سبز داده‌اند. از مهمترین دلایل این جایگزینی، زیست‌سازگاری و زیست‌تخریب‌پذیری مواد طبیعی و همچنین کاهش مصرف انرژی است که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از قبیل کربن‌دی‌اکسید را به همراه دارد [۳]. سریع‌ترین صنایع در حال رشد در جهان طبق آمار برای سال ۲۰۰۰، نزدیک به ۲۰۰ میلیون تن مواد پلیمری مصنوعی یا پلاستیک‌ها در سرتاسر جهان تولید گشته بود [۴].

پلیمرها در مقایسه با سایر مواد، دارای مزایای فراوانی مانند وزن سبک، مقاومت در برابر خوردگی و عایق‌های حرارتی، صوتی، امواج را دارا می‌باشد و به دلیل سهولت ساخت، پلیمر یک ماده بسیار فراگیر و رایج در ساخت و تولید قطعات می‌باشد [۵]؛ یکی از خواص مهم پلیمرها، انعطاف‌پذیری آن‌ها می‌باشد. پلیمر می‌تواند به راحتی و به‌ارزانی تغییر شکل یابد. صرفه‌جویی در هزینه‌های ماده مصرفی و حمل‌ونقل، موضوع مهمی می‌باشد. فرایند فوم پلیمری یکی از روش‌های کارآمد برای کاهش مواد مصرفی است. یکی از مسائل مهم در این روش غلبه بر تضعیف برخی ویژگی‌ها مانند خواص مکانیکی است، که این مشکل با معرفی فوم‌های پلیمری ریزسولولی و میکروسولولی و حل شده است. روش تولید فوم که یکی از روش‌های کاهش مواد مصرفی است، به شرطی که بر عملکرد قطعه تأثیر منفی نگذارد فرایندی کاربردی می‌باشد، فرایند فوم علاوه بر کاهش وزن و در نتیجه کاهش هزینه قطعات پلیمری، خواصی مانند عایق حرارتی و صوتی فوم‌ها را نیز بهبود می‌بخشد [۶]. تحقیقات متعددی روی فوم‌های پلیمری صورت گرفته که بیانگر ارائه خواص منحصر به فردی توسط این مواد است.

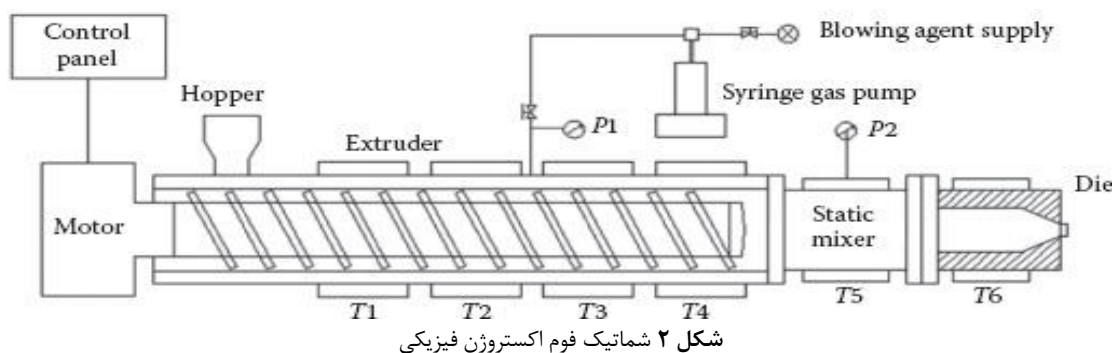
وانگ و همکاران [۷] با استفاده از هم‌افزایی عوامل فوم‌زا برای تولید فوم پلی‌استایرن، به بررسی هسته‌زایی نمونه‌های تولیدی پرداختند که اثر مثبت ترکیب با درصد‌های وزنی مختلف عوامل فوم‌زا در هسته‌زایی فوم‌ها را گزارش نمودند؛ همچنین فیض‌لو و همکاران [۸] اثر قطر قالب را در ماتریس پلی‌پروپیلن بر روی خواص ساختاری فوم‌های تولیدی به روش اکستروژن مورد بررسی قرار دادند.

در تعریف فرایند فوم پلیمر، می‌توان این‌چنین بیان کرد که، اساس تولید در تمامی روش‌ها، همچون فرایند قالب‌گیری تزریقی، قالب‌گیری چرخشی، اکستروژن، چاپگرهای سه‌بعدی، که تعدادی از فرایندها برای تولید فوم می‌باشد. اساس روش فوم کردن مشابه است؛ به صورتی که ابتدا اختلاط مناسبی از فاز پلیمری پایه و گاز ایجاد می‌گردد. سپس با اعمال یک ناپایداری ترمودینامیکی که اغلب با کاهش فشار انجام می‌گیرد، هسته‌زایی سلول‌های گازی صورت گرفته و در ادامه سلول‌ها رشد می‌کنند و نمونه فوم می‌شود. شکل ۱ شماتیکی از فرایند فوم پلیمر را نشان می‌دهد [۹].



شکل ۱ شماتیکی از فرایند فوم پلیمر

یکی از پرکاربردترین فرایندها در تهیه فوم‌های پلیمری، فرایند اکستروژن می‌باشد. فرایند فوم کردن پلیمر به روش اکستروژن می‌تواند به صورت شیمیایی با عامل فوم‌زا شیمیایی (CBA) و یا با استفاده از عامل فوم‌زا فیزیکی (PBA) ایجاد شود [۷]. فوم اکستروژن فیزیکی هزینه راه‌اندازی اولیه بیشتری دارد ولی در بلند مدت و در حجم تولید بالا بسیار به صرفه است و در کاربردهای صنعتی استفاده می‌شود. در فوم اکستروژن شیمیایی، گرانول‌های پلیمر و عامل فوم‌زای شیمیایی در داخل ماردون اختلاط می‌شوند و گرمای ماردون، عامل فوم‌زای شیمیایی را تجزیه می‌کند که گاز منتشر شده، باعث انبساط پلیمر به محض خروج آن از قالب می‌شود. دمای مذاب، پارامتری کلیدی در تجزیه عامل فوم‌زا است، این نوع فرایند فوم اغلب هزینه اولیه راه‌اندازی بالایی داشته و در حجم تولید بالا نیز مقرون به صرفه نمی‌باشد [۱۰]. در فرایند فوم کردن اکستروژن فیزیکی، سیستم اکستروژن مجهز به سیستم تامین گاز، گرانول‌ها تحت فشار زیاد عامل فوم‌زا به پلیمر تزریق می‌شود، در این مرحله به دلیل فشار زیاد نیتروژن یا دی‌اکسید کربن ذوب می‌شوند. گاز (معمولا داخل سیلندر، هسته‌زایی سلول آغاز نمی‌شود. هنگامی که پلیمر از قالب خارج می‌شود، سلول‌ها به دلیل افت فشار ناگهانی (مرحله هسته‌زایی) تشکیل می‌شوند. سپس سلول‌ها رشد می‌کنند و در مرحله نهایی با خنک کردن فوم در حمام آب، پایداری سلولی حاصل می‌شود. شکل ۲ شماتیک فوم اکستروژن فیزیکی را نشان می‌دهد [۱۱].



شکل ۲ شماتیک فوم اکستروژن فیزیکی

حالت دیگر تولید فوم با روش اکستروژن، فوم اکستروژن شیمیایی می‌باشد، به این صورت که گرانول‌های پلیمری و عامل فوم‌زا شیمیایی در بشکه مخلوط می‌شوند. عامل فوم‌زا شیمیایی در اثر حرارت تجزیه می‌شود و مقدار مشخصی گاز آزاد می‌کند، گاز آزاد شده در مذاب پلیمری حل و باعث می‌شود پلیمر در هنگام خروج از قالب منبسط شود. دما مذاب یکی از پارامترهای مهم در تجزیه عامل فوم‌زا است. همچنین فشار باید به حدی باشد که گاز را قبل از خروج از قالب به صورت محلول در مذاب پلیمری نگه دارد. اگر دما و فشار به درستی تنظیم نشود، عامل فوم‌زا تجزیه نمی‌شود و ممکن است باعث تجمع ماده فوم‌زا شود که می‌تواند منجر به ساختار سلولی ضعیف یا محصولات با کیفیت پایین شود [۱۲]. همچنین بر خواص ساختاری و کیفیت فوم‌های تولید شده مانند چگالی فوم، نسبت انبساط، چگالی سلولی، پارامترهایی همچون دمای قالب خروجی، سرعت ماردون، قطر قالب خروجی، نرخ افت فشار و عوامل هسته‌زا فیزیکی و شیمیایی مؤثر می‌باشند [۱۲].

با گذشت زمان نیاز صنعت و زندگی روزمره به قطعات پلیمری با خواص بهبود یافته بیشتر می‌شود، همواره قطعات پلاستیکی در اجزای محصولات تولیدی صنعت بوده است، محصولات پلیمری با توجه به کمبود منابع اولیه، همواره یافتن راهی برای کاهش مواد مصرفی مورد تحقیق پژوهشگران بوده است، یکی از این روش‌ها، فرایند فوم کردن محصولات پلیمری بوده که یکی از راهکارهای کاربردی برای کاهش مقدار ماده مصرفی ضمن حفظ خواص مکانیکی این مواد است [۵]. در حالت کلی هدف از فرایند فوم کردن پلیمرها سبکی وزن قطعه، ایجاد خواص عایقی، استفاده از مواد پلاستیک کمتر و در نتیجه باعث کاهش آلودگی ناشی از تجمع پلاستیک‌ها در محیط زیست می‌باشد؛ همچنین یکی از هدف‌های دیگر در فرایند فوم کردن، بهبود خواص فوم‌های پلیمری تولید شده می‌باشد، یکی از این عوامل، اثر عامل فوم‌زا در تولید فوم‌های پلیمری می‌باشد که در پژوهش حاضر تأثیر عوامل فوم‌زا فیزیکی برای دستیابی به فوم‌هایی با خواص ساختاری و مکانیکی متفاوت و همچنین مقایسه بهترین فوم‌های تولید شده و بهبود خواص ساختاری و مکانیکی از اهداف این پژوهش می‌باشد. برای دستیابی به هدف موجود در پژوهش، آزمایش‌های تجربی، جهت تعیین شرایط مطلوب برای تولید فوم‌های پلیمری به وسیله دستگاه اکستروژن با عوامل فوم‌زا متفاوت انجام گرفته است.

۲- روش تحقیق

در تحقیق حاضر از گرانول پلی‌اتیلن سنگین با چگالی بالا گرید 54404 محصول شرکت پتروشیمی لرستان با چگالی 0.945 g/cm^3 و شاخص جریان مذاب 4 g/10min ($190 \text{ }^\circ\text{C}$ / 2.16 kg) به عنوان ماده فاز زمینه استفاده شده، همچنین به منظور بهبود شرایط هسته‌زایی از پودر تالک ساخت شرکت Merck آلمان با چگالی متوسط 2.7 g/cm^3 و اندازه ذرات ۵ میکرومتر استفاده شده است و در این تحقیق با بررسی پژوهش‌های پیشین، اقدام به تولید فوم فیزیکی در دستگاه اکستروژن شده است؛ همچنین برای تولید نمونه‌ها از دستگاه اکستروژن تک ماردون ساخت شرکت ایران تکنیک موجود در کارگاه تکنوفوم پلاست دانشگاه ارومیه با نسبت طول به قطر ۲۵ با حداکثر دور ماردون ۵۰ دور در دقیقه استفاده شده است. این دستگاه شامل قسمت‌های اصلی بدنه، موتور، سیلندر و ماردون، قیف تغذیه، المنت‌های حرارتی، سیستم کنترلی دستگاه و مجموعه قالب خروجی دستگاه می‌باشد. با توجه به تحقیقات قبلی استفاده از قالب خروجی با اندازه قطر ۲ میلی‌متر به عنوان قالب خروجی بهینه در تولید نمونه‌های این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است [۸].

چگالی فوم و اندازه سلولی جزء مهمترین خواص فوم‌های پلیمری می‌باشد که برای بهبود خواص ذکر شده می‌توان با اعمال تغییراتی همچون استفاده از عوامل فوم‌زا متفاوت و ایجاد شرایطی همچون افزایش نرخ افت فشار در قالب خروجی، ایجاد شرایط دمایی فرایندی مناسب و همچنین استفاده از عامل هسته‌زا خواص را بهبود داد. در ادامه برخی روابط تجربی برای محاسبه نتایج آمده است [۱۳]:

$$RD = \frac{\rho_{foam}}{\rho_{unfoamed}} \quad (1)$$

که RD، چگالی نسبی، ρ_{foam} چگالی نمونه نانوکامپوزیتی فوم‌شده و $\rho_{unfoamed}$ چگالی نمونه‌ی نانوکامپوزیتی فوم نشده می‌باشد.

نسبت انبساط به صورت نسبت حجم کل نمونه فوم شده به حجم کل نمونه پلیمری فوم نشده تعریف می‌شود که به صورت رابطه ۲ بیان می‌گردد. بدیهی است که هر چه نسبت انبساط بیشتر باشد، حجم نمونه فوم شده نسبت به نمونه پلیمری فوم نشده بیشتر بوده، یعنی درصد بیشتری از حجم کل نمونه فوم شده را گاز تشکیل داده و نمونه فوم تولیدی مطلوب‌تر خواهد بود:

$$\varphi = \frac{V_T}{V_p} = \frac{V_p + V_g}{V_p} \quad (2)$$

که V_T حجم کل نمونه فوم‌شده بوده و شامل حجم پلیمر (V_p) و حجم گاز (V_g) می‌باشد. برای محاسبه چگالی ماده پایه که با توجه به مشخصات پلیمر مورد استفاده و با توجه به مشخصات پلیمر از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد:

$$\frac{1}{\rho} = \alpha \frac{1}{\rho_1} + \beta \frac{1}{\rho_2} \quad (3)$$

چگالی فوم نیز با اندازه‌گیری جرم و حجم اندازه گرفته شده و از رابطه ۴ محاسبه می‌گردد:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4)$$

برای محاسبه چگالی سلولی از رابطه‌ای که در آن n تعداد سلول‌های شمارش شده در قسمت مشخصی از مقطع نمونه و A مساحت قسمت مشخصی از مقطع نمونه بر حسب مکعب سانتی‌متر و \emptyset نیز چگالی نسبی نمونه می‌باشد که از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$N = \emptyset \times \left(\frac{n}{A}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

با بیان روابط و چگونگی تأثیر عوامل فوم‌زا فیزیکی جهت بهبود و بررسی خواص ساختاری فوم‌های پلیمری تولید شده است می‌توان رسید. برای محاسبه چگالی نمونه که اندازه‌گیری آن‌ها نیز به سهولت امکانپذیر است، محاسبه چگالی فوم از طریق آزمایشگاهی و طبق روش ارشمیدس به صورتی که یک ظرف حاوی آب به چگالی ρ_w روی ترازوی دقیقی قرار گرفته است. حال اگر جسمی به جرم M_B را در آب غوطه‌ور کنیم (به کمک سوزن؛ اگر چگالی جسم از آب کمتر باشد) به طوری که تمام سطح آن را آب فراگرفته باشد، در این صورت ترازو تغییر وزن ΔM را نشان می‌دهد که برابر است با جرم آب هم‌حجم جسم غوطه‌ور شده، با صرف نظر از حجم قسمتی از سوزن که در آب فرو رفته است می‌توان ΔM را محاسبه کرد و همچنین بررسی ساختار و اندازه‌گیری اندازه سلولی بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام می‌گیرد [۸]. بر همین اساس، در تحقیق حاضر یک مدل تئوری برحسب اندازه

سلولی و چگالی فوم ارائه می‌شود و کارایی آن در قیاس با نتایج تجربی تحقیقات دیگر محققین بررسی شده است. تعداد سلول نمونه‌ها به‌وسیله تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و با استفاده از نرم‌افزار بل‌ویو^۱ اندازه‌گیری و محاسبه گردید.

به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها، تولید نمونه‌ها در دو مرحله انجام می‌گیرد، در مرحله اول با عامل فومزای دی‌اکسیدکربن نمونه مرحله اول تولید می‌گردد که به این صورت می‌توان توضیح داد، ابتدا بایستی قبل از شروع کار، سیستم حرارتی دستگاه روشن و دمای مورد نظر برای هر ناحیه توسط ترموستات‌ها تنظیم شود، برای توزیع کامل حرارت در تمامی نواحی بایستی مدتی زمانی صبر کرد تا دمای تمام نواحی به پایداری در دمای مورد نظر برسد؛ سپس پلیمر مورد نظر که با درصد وزنی عامل هسته‌زا ترکیب شده و آماده گردیده، در درون قیف قسمت تغذیه دستگاه اکستروژن ریخته می‌شود. باید به این نکته توجه داشت که چون فرایند تولیدی در این سیستم از نوع فرایندهای پیوسته می‌باشد بایستی مواد همیشه در ناحیه تغذیه وجود داشته باشد تا به‌صورت پیوسته به ناحیه ماردون دستگاه مواد پلیمری تغذیه شود، در غیر این صورت با قطع شدن مواد اولیه و خالی شدن قیف تغذیه نمی‌توان به نمونه فوم دست یافت. بعد از این مراحل، موتور دستگاه اکستروژن روشن می‌شود و با انجام دورهای متفاوت ماردون، دور مورد نظر و مناسب برای انجام فرایند تولید نمونه‌ها در دور تنظیمی مورد نظر قرار می‌گیرد، با حرکت چرخشی ماردون، گرانول‌های پلیمر به سمت جلو حرکت کرده و با عبور از هر ناحیه و تحت تأثیر قرار گرفتن دمای نواحی مختلف و همچنین توسط تنش‌های برشی ایجاد شده بین لبه ماردون و دیواره سیلندر، دمای مواد رفته رفته بیشتر شده و به حالت مذاب در می‌آید. در این قسمت باید توجه داشت که تا زمانی که موادی از ناحیه خروجی قالب خارج نشده نباید گاز را به داخل پلیمر تزریق کرد. به‌محض مشاهده خارج شدن پلیمر یکنواخت و یک‌رنگ، شیر کپسول گاز دی‌اکسیدکربن باز شده و با تنظیم فشار ورودی، گاز وارد سیلندر می‌شود. در مرحله بعد پلیمر و گاز با ورود به ناحیه‌ی هم‌زن استاتیک و عبور از فضاهای خالی ماردون با همدیگر مخلوط شده و ترکیب تک فاز پلیمر-گاز ایجاد می‌شود.

به منظور دستیابی به شرایط فرایندی و موادی ایده‌آل اقدام به تولید نمونه با اطلاعات موجود از تحقیقات قبل شد [۸]. در این مرحله پلی‌اتیلن سنگین با یک درصد وزنی تالک ترکیب شد. چندین مرحله نمونه‌گیری به منظور دستیابی به شرایط فرایندی خصوصاً دور ماردون و دمای قالب خروجی انجام شد. محدوده دمایی مناسب دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. تمام نمونه‌های تولیدی با انتخاب بهترین شرایط موادی و فرایندی مطابق جدول ۱ گردید؛ همچنین در مرحله دوم برای رسیدن به تأثیر عامل فومزای فیزیکی بر خواص ساختاری فوم‌های پلیمری تولید شده به روش اکستروژن از عامل فومزای فیزیکی گاز نیتروژن طبق شرایط موادی و فرایندی نمونه‌های تولید شده در مرحله اول، تولید گردید. جدول ۱ شرایط موادی و فرایندی تولید نمونه‌ها و شکل ۳ نمونه‌های تولید شده و برش‌داده شده جهت بررسی، (الف) نمونه شماره ۱ و (ب) نمونه شماره ۲ را نشان می‌دهد.

جدول ۱ شرایط موادی و فرایندی نمونه‌های تولیدی در این پژوهش

شماره نمونه	ماده زمینه	دمای قالب (°C)	قطر قالب (mm)	عامل فومزا
نمونه شماره ۱ (A)	HDPE	135	2	دی‌اکسیدکربن
نمونه شماره ۲ (B)	HDPE	135	2	نیتروژن

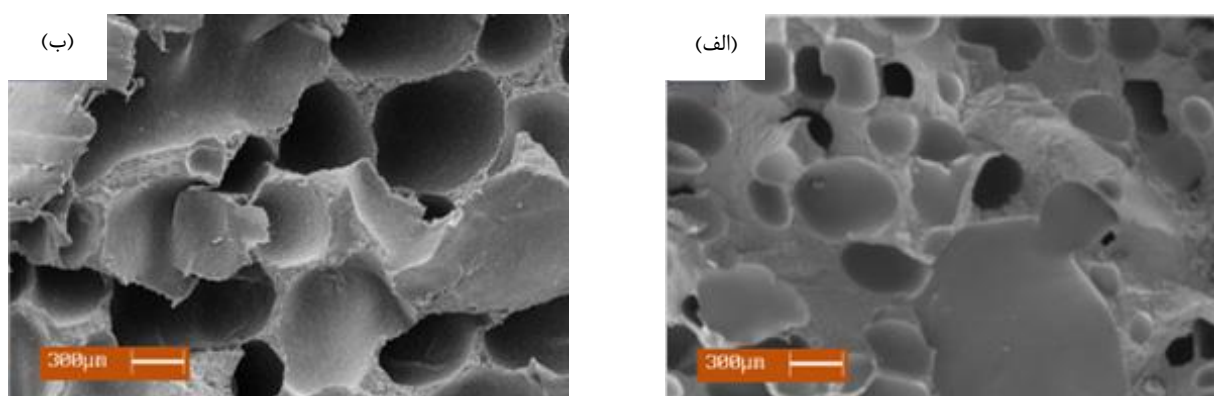


شکل ۳ نمونه‌های تولید شده و برش‌داده شده جهت بررسی، (الف) نمونه شماره ۱ و (ب) نمونه شماره ۲

^۱ BelView

۳- نتایج و بحث

بررسی نتایج نمونه‌های تولید شده به وسیله دستگاه اکستروژن مجهز شده به سیستم تزریق گاز در دو نوع متفاوت عامل فوم‌زا فیزیکی انجام گردید. ابتدا در مرحله اول آزمایش، نمونه A با عامل فوم‌زا فیزیکی گاز دی‌اکسید کربن با شرایط موادی یکسان با آزمایش مرحله دوم، حاوی پلی‌اتیلن سنگین به همراه ۲ درصد وزنی پودر تالک و با دور ماردون ۱۰ دور در دقیقه و در دمای خروجی قالب ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد تولید شده‌اند و سپس آزمایش مرحله دوم نمونه B نیز مطابق مرحله اول با شرایط فرایندی و موادی یکسان با عامل فوم‌زا متفاوت از مرحله اول، با عامل فوم‌زا فیزیکی گاز نیتروژن در دمای قالب خروجی ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد با دور ماردون ۱۰ دور در دقیقه با قالب با قطر خروجی ۲ میلی‌متر جهت بررسی تأثیر عوامل فوم‌زا فیزیکی تولید و بررسی انجام گرفت. در شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های (الف) نمونه شماره ۱ و (ب) نمونه شماره ۲ نشان داده شده است.



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های (الف) نمونه شماره ۱ و (ب) نمونه شماره ۲

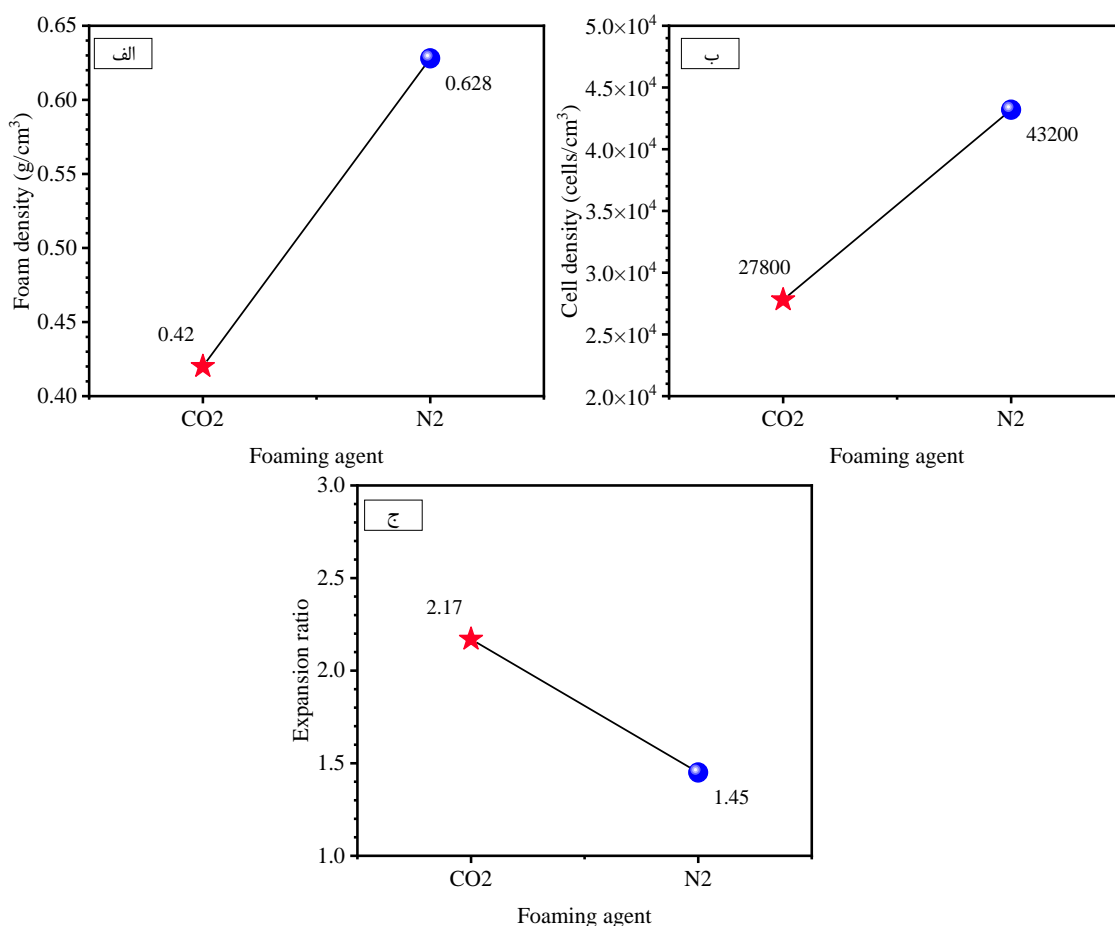
جدول ۲ نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپی و نتایج ساختاری نمونه‌های تولید شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲ نتایج حاصل نمونه‌های آزمایش شده

شماره نمونه	چگالی فوم (g/cm ³)	نسبت انبساط	چگالی سلولی (cells/cm ³)
نمونه شماره 1 (A)	0.420	2.17	2.78×10 ⁴
نمونه شماره 2 (B)	0.628	1.45	4.32×10 ⁴

با بررسی تصاویر میکروسکوپی از ساختار نمونه‌ها و نتایج به دست آمده می‌توان اینچنین بیان کرد، عامل فوم‌زا فیزیکی نقش بسیار قابل توجهی در خواص ساختاری فوم‌های تولید شده به روش اکستروژن را دارد، به طوری که سایر عوامل همچون قطر قالب خروجی، عوامل هسته‌زا، دمای قالب خروجی، دور ماردون و ماده زمینه همگی پارامتر مؤثر و مهمی در تولید فوم‌ها می‌باشد، اما معمولاً بدون حضور عامل فوم‌زا دستیابی به فوم پلیمری به روش اکستروژن مسیر نمی‌گردد، و همچنین عامل فوم‌زا نقش قابل توجهی در ایجاد سلول‌ها و تشکیل فوم پلیمری را ایفا می‌کند، تفاوت در عوامل فوم‌زا فیزیکی نیز تأثیر متفاوتی بر روی ساختار نمونه‌های پلیمری تولید شده را داشته به طوری که در نمونه مرحله اول (A) و نمونه مرحله دوم (B)، با حفظ شرایط موادی و فرایندی در تولید نمونه‌ها و تنها تفاوت در استفاده از عوامل فوم‌زا فیزیکی مختلف، نمونه‌های پلیمری به روش اکستروژن تولید گردیده است. در تولید نمونه مرحله اول (A) از گاز دی‌اکسید کربن و در تولید نمونه مرحله دوم (B) از گاز نیتروژن استفاده شده، طبق نتایج به دست آمده و بیان شده در جدول ۲ به این صورت می‌باشد که، به دلیل خاصیت حلالیت بالای گاز دی‌اکسید کربن نسبت به گاز نیتروژن در ماتریس پلیمری طی فرایند تولید، به خوبی گاز و ماتریس مخلوط گردیده، و باعث ایجاد چگالی فوم بهتر و پایین‌تر نسبت به نمونه تولیدی مرحله دوم (B) شده است. در بحث حلالیت گاز در ماتریس پلیمر، دما پارامتر بسیار مهمی می‌باشد که طی آزمایش‌های مکرر، دمای بهینه ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد در تولید نمونه‌های هر دو مرحله مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه در بررسی نسبت انبساط نمونه‌های تولید شده با توجه به این که نسبت انبساط به چگالی فوم و چگالی ماده پایه بستگی دارد و ماده زمینه مورد استفاده در هر دو مرحله یکسان بوده و

در نتیجه چگالی ماده پایه یکسانی نیز دارند و تأثیر چگالی فوم در نسبت انبساط‌های به‌دست آمده مشاهده می‌شود که در نمونه (A) تولید شده با گاز دی‌اکسیدکربن نسبت به نمونه (B) تولید شده با گاز نیتروژن، نسبت انبساط بالاتری رقم خورده است. در ادامه ارائه نتایج می‌توان چنین بیان کرد که در مقایسه چگالی سلولی در نمونه‌های تولید شده، چگالی سلولی بالاتر در نمونه تولید شده مرحله دوم (B) نسبت به نمونه تولید شده مرحله اول (A) به دلیل خاصیت هسته‌زایی بالاتر گاز نیتروژن، به‌دست آمده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، شکل ۵ نمودار چگالی فوم، نسبت انبساط و چگالی سلولی نمونه‌های (A) نمونه شماره ۱ و (B) نمونه شماره ۲ تولید شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۵ نمودار نسبت انبساط، چگالی فوم و چگالی سلولی نمونه‌های A و B در این پژوهش

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، بررسی و تأثیر عوامل فوم‌زا فیزیکی دی‌اکسیدکربن و نیتروژن بر خواص ساختاری فوم‌های پلیمری تولید شده به روش اکستروژن در دستور کار قرار گرفت، نتایج حاصل از آزمایشات به شرح زیر می‌باشد:

- نمونه مرحله اول (A) و نمونه مرحله دوم (B)، با حفظ شرایط موادی و فرایندی در تولید نمونه‌ها و تنها تفاوت در استفاده از عوامل فوم‌زا فیزیکی مختلف، به روش اکستروژن تولید گردیده است. در تولید نمونه A از گاز دی‌اکسیدکربن و در تولید نمونه B از گاز نیتروژن استفاده شده است.
- طبق نتایج، مشاهده شد نمونه پلیمری مرحله اول به دلیل خاصیت حلالیت بالای گاز دی‌اکسیدکربن نسبت به گاز نیتروژن در ماتریس پلیمری طی فرایند تولید، به خوبی گاز و ماتریس مخلوط گردیده و باعث ایجاد چگالی فوم بهتر و پایین‌تر نسبت به نمونه B شده است که مطابق نتایج جدول ۲ چگالی نمونه A، 0.420 (g/cm³) و چگالی نمونه B، 0.628 (g/cm³) بدست آمده است که می‌توان نتیجه گرفت نمونه A چگالی فوم بهتری دارد.

- در بحث حلالیت گاز در ماتریس پلیمر، دما پارامتر بسیار مهمی می‌باشد که طی آزمایش‌های مکرر، دمای بهینه ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد در تولید نمونه‌های هر دو مرحله مورد استفاده قرار گرفته است.
- در بررسی نسبت انبساط نمونه‌های تولید شده با توجه به اینکه نسبت انبساط به چگالی فوم و چگالی ماده پایه بستگی دارد و ماده زمینه مورد استفاده در هر دو مرحله یکسان بوده و در نتیجه چگالی ماده پایه یکسانی نیز دارند. تأثیر چگالی فوم در نسبت انبساط‌های به‌دست آمده نشان می‌دهد که در نمونه A تولید شده با گاز دی‌اکسیدکربن نسبت به نمونه B تولید شده با گاز نیتروژن، نسبت انبساط بالاتری رقم خورده است.
- در مقایسه چگالی سلولی در نمونه‌های تولید شده، چگالی سلولی بالاتر در نمونه B نسبت به نمونه A به‌دلیل خاصیت هسته‌زایی بالاتر گاز نیتروژن، به‌دست آمده است.

References

- [1] Sarkhosh R, Arabqomi H, Farrokhabadi A. Experimental investigation of mechanical and electrical properties of semi-biodegradable polypropylene/hemp woven thermoplastic composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Jun 22;10(4):62-77. doi: 10.22034/ijme.2023.412380.1820 [In Persian]
- [2] Sohi MJ, Ali M. Fabrication and numerical analysis of glass fiber reinforced composite air manifold under vibration loading. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Feb 19;7(12):64-75. [In Persian]
- [3] Karevan M, Zeinali M, Abbasi Dareh Bidi H. High energy absorbent Polyester/Natural Kenaf based polymer micro-composites. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 May 22;10(3):54-61. doi: 10.22034/ijme.2023.420948.1860 [In Persian]
- [4] Ali Askari K, Etemadi Haghighi S, Maghsoudpour A. Simulation and optimization of molding process parameters of polyetherimide parts by Taguchi-grey relational analysis combined method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Jul 23;10(5):19-43. doi: 10.22034/ijme.2023.399399.1801 [In Persian]
- [5] Azdast T, Hasanzadeh R. Increasing cell density/decreasing cell size to produce microcellular and nanocellular thermoplastic foams: A review. *Journal of Cellular Plastics*. 2021 Sep;57(5):769-97. doi: 10.1177/0021955X20959301
- [6] Zal V, Talebi-Ghadikolaee H, Mirzamohammadi S. Investigating the effect of polyurethane foam filling on the energy absorption of hybrid tubes with different thickness of composite layer. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Apr 20;11(2):58-68. doi: 10.22034/ijme.2024.433178.1893 [In Persian]
- [7] Wong A, Mark LH, Hasan MM, Park CB. The synergy of supercritical CO₂ and supercritical N₂ in foaming of polystyrene for cell nucleation. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2014 Jun 1;90:35-43. doi: 10.1016/j.supflu.2014.03.001
- [8] Feizlou N, Azdast T, Hasanzadeh R, Rostami M, Ashrafi N. Investigation of the effect of die diameter on the structural properties of extruded polyethylene foams. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Sep 23;10(7):10-6. doi: 10.22034/ijme.2024.433989.1907 [In Persian]
- [9] Chen Y, Das R. A review on manufacture of polymeric foam cores for sandwich structures of complex shape in automotive applications. *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 2022 Jan;24(1):789-819. doi: 10.1177/10996362211030564
- [10] Nofar M, Park CB. Poly (lactic acid) foaming. *Progress in Polymer Science*. 2014 Oct 1;39(10):1721-41. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2014.04.001
- [11] Rostami M, Azdast T, Hasanzadeh R, Moradian M. A study on fabrication of nanocomposite polyethylene foam through extrusion foaming procedure. *Cellular Polymers*. 2021 Nov;40(6):231-43. doi: 10.1177/02624893211040949
- [12] Hasanzadeh R, Azdast T, Doniavi A, Lee RE. Multi-objective optimization of heat transfer mechanisms of microcellular polymeric foams from thermal-insulation point of view. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2019 Mar 1;9:21-9. doi: 10.1016/j.tsep.2018.11.002
- [13] Ameli A, Jahani D, Nofar M, Jung PU, Park CB. Development of high void fraction polylactide composite foams using injection molding: Mechanical and thermal insulation properties. *Composites Science and Technology*. 2014 Jan 10;90:88-95. doi: 10.1016/j.compscitech.2013.10.019