

تولید اسفنج پلی اتیلن شبکه‌ای نشده با استفاده از عوامل پفزای شیمیایی

Uncrosslinked Polyethylene Foam Production with Chemical Blowing Agents

فرامرز افشار طارمی*، علی حسین لو

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

دریافت: ۸۴/۹/۲۷، پذیرش: ۸۵/۸/۱۶

چکیده

اسفنج‌های پلیمری با استفاده از عوامل پفزای فیزیکی یا شیمیایی و به کمک فرایندهای مختلفی تولید می‌شوند. در این کار پژوهشی، برای تولید اسفنج پلی اتیلن از روش قالبگیری فشاری و عوامل پفزای شیمیایی استفاده شده است. در ابتدا با استفاده از نمودار DSC دو نوع پلی اتیلن مناسب برای تولید اسفنج انتخاب شد، سپس درصد بحرانی عوامل پفزا در تولید اسفنج بررسی شده است. به طور معمول فرض می‌شود که با افزایش درصد عامل پفزا، چگالی اسفنج کاهش می‌یابد، اما با اندازه‌گیری چگالی اسفنج‌های حاصل از این کار مشخص شد در درصدی بحرانی از عوامل پفزا، چگالی اسفنج با افزایش درصد عامل پفزا افزایش می‌یابد. مقدار این درصد بحرانی به مقدار گاز آزاد شده از عامل پفزا وابسته است. از آنجا که خواص اسفنج وابستگی زیادی به چگالی آن دارد. در این پژوهش، با استفاده از سه نوع عامل پفزای شیمیایی و داشتن رابطه بین درصد عامل پفزا و چگالی اسفنج و همچنین درصد بحرانی عامل پفزا، فرمولبندی مناسب برای تولید اسفنجی مطلوب برای کاربردی خاص طراحی شده است.

واژه‌های کلیدی

اسفنج پلی اتیلن،
قالبگیری فشاری، عامل پفزا،
درصد بحرانی، نمودار DSC

مقدمه

پلاستیکی مهمترین اسفنج‌های جامد هستند. اسفنج‌های پلی اتیلن خواص منحصر به فردی در بین سایر اسفنج‌های پلاستیکی دارند. این اسفنج‌ها، چقرمه، منعطف، مقاوم در برابر مواد شیمیایی و خورنده و عایق خوب گرمایی و الکتریکی هستند. خواص مکانیکی این

نیاز همیشگی بشر به استفاده از مواد جدید با خواص برتر سبب شد تا به دنبال یافتن خواص ویژه از پلاستیک‌ها باشد. نیاز به سبک کردن پلاستیک‌ها برای برخی کاربردها و برخی خواص عایق گرمایی و صوتی سبب شد اسفنج‌هایی از جنس پلاستیک تهیه شود. امروزه اسفنج‌های

* مؤلف مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: afshar@aut.ac.ir

Key Words

polyethylene foam,
compression molding, blowing agent,
critical percent, DSC diagram

جدول ۱ عوامل پفزای مورد استفاده در این پژوهش.

نام ماده	شرکت تولید کننده	مقدار گاز آزاد شده (g/mL)	دمای تجزیه (°C)
آزو دی کربن آمید (ADCA)	Merk	۲۲۰	۲۰۵-۲۱۵
۴،۴-اکسی بیس (بنزن سولفوهیدرازین) (OBSh)	EIWA Chemical	۱۲۵	۱۵۰-۱۶۰
دی نیتروژو پنتامتیلن (DNPT)	EIWA Chemical	۱۹۰	۱۹۰

دستگاهها

در این پژوهش، مخلوطکن داخلی برابندر ۶۰mL، دستگاه DSC مدل ۲۰۱۰DSC V4.4E و دستگاه قالبگیری فشاری آزمایشگاهی ساخت Toyoseiki ژاپن به کار گرفته شده است.

روشها

برای تولید قطعات قالبگیری شده اسفنجی، ابتدا با توجه به مقدار اسفنج‌شدگی مورد نظر، مقدار معینی از پلی اتیلن (که در اینجا از پلی اتیلن نوع LDPE LF۰۲۰۰ استفاده شد) و عامل پفزا (برای تولید قطعات اسفنجی از سه نوع عامل پفزا استفاده شد) توزین و با هم مخلوط شدند. نکته قابل توجه این است که فقط تا ۸۰ درصد حجم مخلوطکن داخلی باید از مواد پر شود و بقیه آن باید خالی بماند. از آنجا که چگالی مذاب پلی اتیلن حدود 0.78 g/cm^3 است، حدود ۳۷ g ماده جامد به داخل مخلوطکن منتقل شد. سپس، اختلاط این مواد به وسیله مخلوطکن داخلی با سرعت ۶۰ rpm و در دمای حدود 135°C در حالت مذاب تا به دست آمدن مخلوطی همگن ادامه یافت. دمای انتخاب شده باید به حدی باشد که پلی اتیلن ذوب شود، اما عامل پفزا تجزیه نشود. باید دقت شود که دما به دلیل گرمای ناشی از اصطکاک مواد با اجزای مخلوطکن، چند درجه از مقدار تعیین شده، بیشتر خواهد شد.

اسفنجها بین خواص اسفنجهای سخت و بسیار منعطف، محدوده چگالی آنها از 32 kg/m^3 تا چگالی پلیمر جامد و ساختار سلولی آنها معمولاً به شکل بسته است [۱،۲].

اسفنجهای پلی اتیلنی با درجه انبساط زیاد، ارزاترین نوع اسفنجهای پلاستیکی هستند، اما به دلیل نیاز به تجهیزات فرایندی پیچیده‌تر، قیمت کل واحد حجم اسفنجهای پلی استیرنی و پلی یورتانی ارزاتر از نوع پلی اتیلنی است. اسفنجهای پلی اتیلنی را با استفاده از روشهای متفاوتی می توان تولید کرد که مهمترین این روشها عبارتند از اکستروژن، قالبگیری تزریقی و قالبگیری فشاری. انتخاب روش شکل دهی اسفنج به محصول مورد نظر وابسته است. یکی از عوامل مهم در خواص اسفنج نهایی انتخاب نوع مناسب پلیمر برای تولید اسفنج است. نوع پلیمر انتخاب شده روی ساختار سلولی اسفنج حاصل اثر دارد که این عامل نیز نقش کلیدی در تعیین خواص نهایی اسفنج می‌گذارد. به همین دلیل در این پژوهش، ابتدا انتخاب نوع مناسب پلی اتیلن برای تولید اسفنج، مدنظر قرار گرفت. اسفنجی شدن پلیمرها موجب کاهش چگالی آنها می‌شود. اما، کاهش چگالی پلیمر با افزایش عامل پفزا تا درصد خاصی از عامل پفزا صادق است، پس از آن با افزایش درصد عامل پفزا رفتار متفاوتی مشاهده می‌شود. دلیل این امر محدود بودن مقدار انحلال پذیری گاز آزاد شده از عامل پفزای شیمیایی در مذاب پلیمری مورد استفاده است [۳]. در این کار، درصد بحرانی سه نوع عامل پفزای شیمیایی برای اسفنجی شدن پلی اتیلن بررسی شده است. از آنجا که در این کار، هدف بررسی درصد بحرانی عامل پفزا در اسفنجی شدن بوده و نحوه تولید نمونه (در واقع بستر تجزیه شدن عوامل پفزا و انبساط پلی اتیلن) اهمیت چندانی نداشت، از روش قالبگیری فشاری که قابلیت کنترل زیادی دارد، برای تولید اسفنج استفاده شده است.

تجربی

مواد

در این پژوهش، از دو نوع پلی اتیلن سبک (LDPE) ساخت پتروشیمی بندر امام خمینی با نامهای تجاری LDPE LF۰۲۰۰ و LDPE LH۰۰۷۵ استفاده شده است. برای انتخاب نوع مناسب پلی اتیلن برای تولید اسفنج، نمودار DSC این پلیمرها به دست آمد. برای اسفنجی شدن پلی اتیلن سه نوع عامل پفزا به کار گرفته شد که اطلاعات مربوط به این مواد در جدول ۱ آورده شده است.

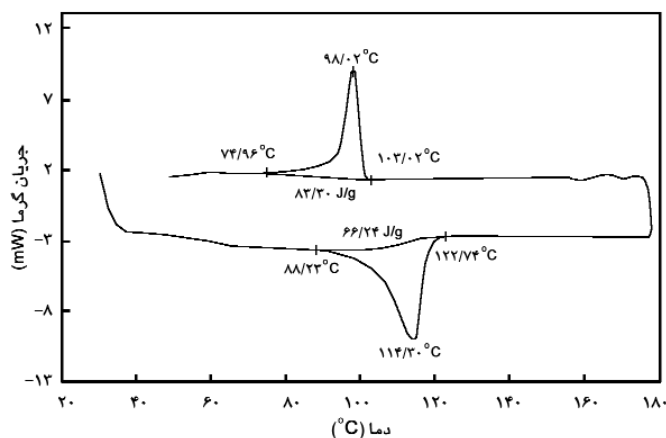
جدول ۲ مشخصات و شرایط فرایندی نمونه‌های اسفنجی تولید شده به وسیله پرس.

نمونه	نوع و درصد عامل پف‌زا	دمای قالب (°C)	زمان اقامت در قالب (min)	ضخامت قالب (cm)	چگالی اسفنج (g/cm ³)
AZ ₄	ADCA , ۴	۲۲۵	۱۲	۰/۵	۰/۲۱
AZ ₃	ADCA , ۳	۲۲۵	۱۲	۲	۰/۱۳
AZ ₂	ADCA , ۲	۲۲۵	۱۲	۱	۰/۴۱
DN ₄	DNPT , ۴	۱۹۵	۱۲	۰/۵	۰/۳۲
DN ₃	DNPT , ۳	۱۹۵	۱۲	۰/۵	۰/۳۱
DN ₂	DNPT , ۲	۱۹۵	۱۲	۰/۵	۰/۵۶
OB ₄	OBSH , ۴	۱۶۵	۱۲	۰/۵	۰/۳۵
OB ₃	OBSH , ۳	۱۶۵	۱۲	۰/۵	۰/۴۱
OB ₂	OBSH , ۲	۱۶۵	۱۲	۰/۵	۰/۵۳

نتایج و بحث

با توجه به نمودارهای DSC دو نوع LDPE مورد استفاده (شکل‌های ۱ و ۲) و همچنین MFI آنها، LDPE LF۰۲۰۰ به عنوان پلی‌اتیلن مناسب انتخاب شد.

مطابق نمودارهای DSC دمای پیک بلورینگی LDPE LF۰۲۰۰ برابر ۹۶/۳۶°C است، در حالی که این دما برای LDPE LH۰۰۷۵ برابر ۹۸/۰۲°C است. این امر بیانگر اندازه بزرگتر ذرات بلوری LDPE LF۰۲۰۰



شکل ۱ نمودار DSC مربوط به LDPE LH۰۰۷۵.

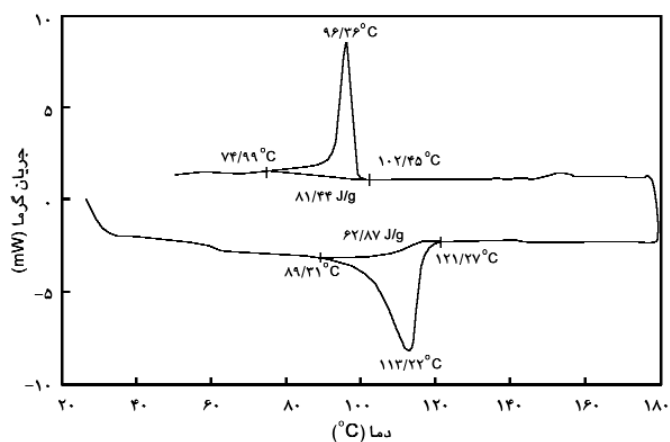
معیار مناسب بودن اختلاط انجام شده درون مخلوط‌کن داخلی، مقدار گشتاور اعمال شده بر مخلوط است. با ثابت ماندن مقدار گشتاور، اختلاط قطع و نمونه از دستگاه خارج می‌شود. زمان اختلاط متوسط برای این نمونه‌ها حدود ۳ min است. بعد از خارج کردن نمونه‌ها از مخلوط‌کن، پیش از سرد شدن آنها، با استفاده از قطعه‌ای فلزی، نمونه‌ها به شکل صفحه در آمده تا استفاده از آنها در زمان قالبگیری به سادگی انجام شود.

بعد از اختلاط، برای اسفنجی شدن مواد از دستگاه قالبگیری فشاری استفاده شد. برای این پژوهش ۹ نمونه اسفنجی طبق شرایط گفته شده در جدول ۲ تولید شد. گرمایش دستگاه به وسیله گرم‌کن الکتریکی و سرمایش آن با جریان آب سرد انجام شد. فشار دستگاه برای همه نمونه‌ها ۱۵ MP انتخاب شد. روش کار بدین ترتیب است که ابتدا قالب تا دمای از پیش تعیین شده گرم شده و سپس نمونه‌ها داخل قالب قرار می‌گیرند. بعد از سپری شدن زمانی معین گرم‌کن خاموش شده و شیر آب سرد برای خنک کردن قالب باز می‌شود. وقتی دمای قالب به دمای حدود ۱۰۵°C رسید، فشار پرس کاهش می‌یابد تا اسفنج بتواند قبل از جامد شدن منبسط شود. این دما چند درجه از دمای بیشینه تبلور LDPE (دمایی که استحکام مذاب بیشترین مقدار است و به کمک نمودار DSC معین می‌شود) بیشتر است [۴]. بعد از تولید نمونه‌ها، چگالی آنها طبق استاندارد ۹۳-۱۶۲۲ ASTM اندازه‌گیری می‌شود.

درصد عامل پفزا دارد، بیشتر از اسفنجی است که ۳ درصد عامل پفزا دارد. چون تا پیش از کاهش فشار خارجی اعمال شده بر نمونه اسفنجی، تمام ذرات گاز حاصل از تجزیه عامل پفزا درون فاز پلیمری و محلول در آن هستند (یعنی هنوز فاز گاز جداگانه‌ای تشکیل نداده‌اند). به همین دلیل این مولکولهای کوچک (که پس از کاهش فشار خارجی با ایجاد سلولهای اسفنج تشکیل فاز گاز را می‌دهند) در بستر پلیمری، مشابه نرم‌کننده عمل کرده، گرانیوی مذاب پلیمری را کاهش می‌دهند. این امر موجب تسهیل نفوذ مولکولهای گاز و خروج آنها از سامانه مذاب، درست هنگام کاهش فشار خارجی شده و بنابراین چگالی اسفنج افزایش می‌یابد. برای یکنواخت کردن ساختار سلولی و کاهش اندازه سلولهای اسفنج از عوامل هسته‌زا استفاده می‌شود [۷]، ولی در این حالت مواد باقیمانده از تجزیه عامل پفزا به عنوان عامل هسته‌زا عمل می‌کنند.

با مشاهده محصول قالبهای مختلف این نتیجه حاصل می‌شود که یکنواختی ساختار اسفنج در قالبهای نازکتر (که محصولی با ضخامت کمتر درون آنها ایجاد می‌شود) بیشتر است. دلیل این امر ضریب رسانندگی گرمایی بسیار کوچک پلیمرهاست. در قالبهای ضخیم (که محصول ضخیم‌تری درون آنها ایجاد می‌شود)، در حالی که پوسته مواد سرد و رشد سلولهای آن متوقف می‌شود، ولی رشد سلولها در هسته ادامه دارد. بنابراین، اندازه سلولهای این بخش بزرگتر می‌شود. افزون بر این، احتمال به هم پیوستن سلولهای این بخش نیز بیشتر است.

برای به دست آوردن رابطه بین درصد عامل پفزا و چگالی پلیمر، نمودار درصد عامل پفزا- چگالی اسفنج رسم می‌شود. در شکل ۳ نمودار تغییر چگالی نسبی اسفنج (چگالی پلی اتیلن - چگالی اسفنج، چگالی پلی اتیلن LDPE LF ۰۲۰۰ برابر 0.92 g/cm^3 است) حاصل از عامل پفزای آزودی کربن آمید بر حسب درصد عامل پفزا نشان داده شده است. طبق این شکل با افزایش مقدار عامل پفزا تا ۳ درصد،

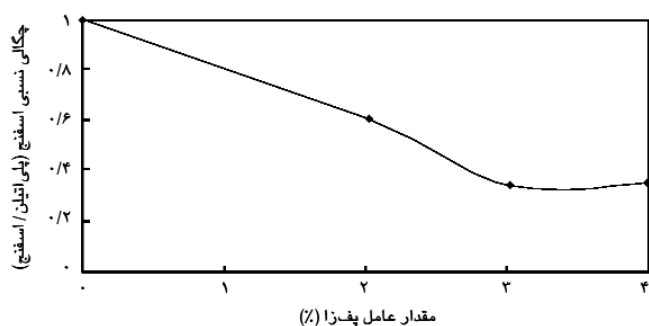


شکل ۲ نمودار DSC مربوط به LDPE LF ۰۲۰۰.

نسبت به LDPE LH ۰۰۷۵ است. بنابراین، احتمال تشکیل شدن حبابهای گاز در LDPE نوع LF ۰۲۰۰ کمتر است، چون توزیع فاز بلوری غیریکنواخت‌تر است و در بخش بیشتری از فاز پلیمری امکان تشکیل حباب گازی وجود ندارد [۵].

مقدار گرمای آزاد شده بر اثر تبلور LDPE LF ۰۲۰۰ و LDPE LH ۰۰۷۵ به ترتیب برابر $83/30 \text{ J/g}$ و $81/44 \text{ J/g}$ است. در نتیجه مقدار بلورینگی LDPE نوع LF ۰۲۰۰ کمتر و بنابراین برای تولید اسفنج مناسبتر است [۶].

افزون بر این موارد، MFI پلی اتیلن نوع LF ۰۲۰۰ از نوع LH ۰۰۷۵ بیشتر است (یعنی گرانیوی آن کمتر است) و مقدار آن به مقدار MFI توصیه شده برای تولید اسفنج در مقالات (تقریباً بین ۲-۴) نزدیکتر است. بنابراین از نظر گرانیوی هم، LDPE نوع LF ۰۲۰۰ مناسبتر است. به همین دلیل از LDPE نوع LF ۰۲۰۰ برای تولید نمونه‌های اسفنجی طبق روش گفته شده استفاده شد. با مقایسه ساختار سلولی اسفنجهای ایجاد شده، این نتیجه حاصل می‌شود که بهترین اسفنجها مربوط به عامل پفزای OBSH است. چون مقدار گاز آزاد شده و دمای تجزیه این عامل از دو عامل دیگر کمتر است، در نتیجه هنگام تجزیه عامل پفزا، گرانیوی بیشتر مذاب پلیمر (به دلیل دمای تجزیه کمتر عامل پفزا) موجب می‌شود که هسته گذاری بیشتری رخ داده و از به هم پیوستن سلولها جلوگیری شود، در نتیجه ساختار اسفنج حاصل نسبت به دو عامل دیگر بسیار مناسبتر است. در عامل پفزای ADCA همه این عوامل عکس است، به همین دلیل اسفنج حاصل سلولهای بسیار بزرگ (به ویژه در غلظتهای زیاد عامل پفزا) دارد. با توجه به اسفنجهای حاصل از عامل پفزای ADCA، مشخص می‌شود که چگالی اسفنجی که ۴



شکل ۳ نمودار تغییرات چگالی نسبی اسفنجهای شبکه‌ای نشده و قالبگیری شده بر حسب درصد ADCA.

امر نیز به بیشتر بودن مقدار گاز آزاد شده برای آزودی‌کربن‌آمید نسبت به DNPT مربوط است.

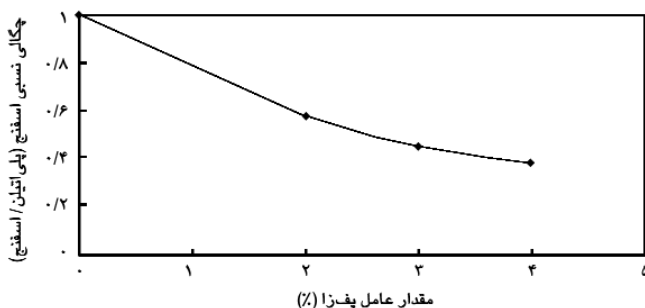
در شکل ۵ نمودار تغییر چگالی نسبی اسفنج برای اسفنج‌های حاصل از عامل پفزای OBSH نسبت به درصد عامل پفزا نشان داده شده است. طبق این نمودار چگالی اسفنج‌های حاصل از عامل پفزای OBSH تا ۴ درصد، نسبت به درصد عامل پفزا، روند نزولی دارد. دلیل متفاوت بودن رفتار این اسفنج نسبت به اسفنج حاصل از دو عامل دیگر، تفاوت زیاد مقدار گاز آزاد شده و دمای تجزیه عامل پفزا است.

کم بودن مقدار گاز آزاد شده عامل پفزا موجب افزایش درصد بحرانی عامل پفزا (درصدی که در آن نحوه تغییر چگالی اسفنج نسبت به درصد عامل پفزا تغییر می‌کند) می‌شود. با توجه به مقدار گاز آزاد شده (OBSH (۱۲۵ mL/g) و ADCA (۲۲۰ mL/g)، مشخص می‌شود که مقدار گاز آزاد شده ADCA تقریباً دو برابر OBSH است، ولی مقدار کاهش چگالی اسفنج به این نسبت نیست. دلیل این امر دمای تجزیه زیاد ADCA است. زیرا، هنگام آزاد شدن گاز، گرانیوی مذاب خیلی کم بوده و در نتیجه گاز آزاد شده به راحتی از میان مذاب نفوذ می‌کند و از سامانه خارج می‌شود.

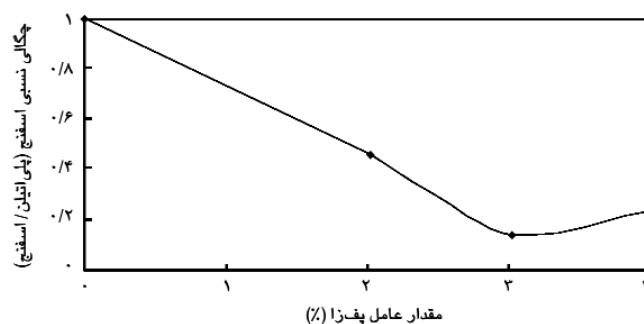
با استفاده از این نمودار معادله (۳) برای بیان رابطه بین چگالی نسبی اسفنج و درصد عامل پفزا به دست می‌آید:

$$(۳) \quad +۰/۹۵۹ \text{ درصد OBSH} \times -۰/۱۵۹۳ = \text{چگالی نسبی اسفنج}$$

با مقایسه معادله‌های (۱) تا (۳) مشخص می‌شود که مقدار شیب در این معادله، به دلیل کمتر بودن مقدار گاز آزاد شده برای OBSH کمترین مقدار است. ولی مقدار این تفاوت، دقیقاً به نسبت اختلاف مقدار گاز آزاد شده نیست. علت این امر مقدار اتلاف کمتر گاز در اسفنج حاصل از



شکل ۵ نمودار تغییرات چگالی نسبی اسفنج‌های شبکه‌ای نشده و قالبگیری شده بر حسب درصد OBSH.



شکل ۴ نمودار تغییرات چگالی نسبی اسفنج‌های شبکه‌ای نشده و قالبگیری شده بر حسب درصد DNPT.

چگالی نسبی عامل پفزا کاهش یافته و بعد از آن چگالی نسبی اسفنج به دلیل کاهش بیش از اندازه گرانیوی اسفنج افزایش می‌یابد. با استفاده از سه نقطه اول این نمودار، رابطه مربوط به چگالی نسبی اسفنج نسبت به درصد عامل پفزا تا درصدی که چگالی شروع به افزایش می‌کند، به کمک معادله (۱) به دست می‌آید:

$$(۱) \quad ۱/۰۰۳۹ \text{ درصد ADCA} \times -۰/۲۸۴۹ = \text{چگالی نسبی اسفنج}$$

در شکل ۴ نمودار چگالی نسبی اسفنج برای نمونه‌هایی که با عامل پفزای DNPT تولید شده‌اند، آمده است. طبق این شکل با افزایش مقدار عامل پفزا تا ۳ درصد، چگالی نسبی اسفنج، کاهش می‌یابد. بعد از این درصد، با افزایش مقدار عامل پفزا تا ۴ درصد چگالی نسبی اسفنج، نسبتاً ثابت می‌ماند. این امر نشان می‌دهد، درصدی که در آن نحوه تغییر چگالی با درصد عامل پفزا تغییر می‌کند، بین ۳ و ۴ و نزدیک ۴ است، در حالی که این درصد برای آزودی‌کربن‌آمید، نزدیک ۳ است. این مقدار اختلاف به دلیل تفاوت در مقدار گاز آزاد شده در دو نوع عامل پفزا است، که برای آزودی‌کربن‌آمید بیشتر از DNPT است. بنابراین، درصد بحرانی عامل پفزای آزودی‌کربن‌آمید کمتر از DNPT است. با استفاده از سه نقطه اول نمودار (یعنی تا حدی که چگالی اسفنج با افزایش درصد عامل پفزا روند نزولی دارد) معادله (۲) به دست آمد:

$$(۲) \quad ۱/۰۱۰۹ \text{ درصد DNPT} \times -۰/۲۱۷۴ = \text{چگالی نسبی اسفنج}$$

با مقایسه معادله‌های (۱) و (۲) مشخص می‌شود که شیب کاهش چگالی برای اسفنج‌های حاصل از آزودی‌کربن‌آمید بیشتر از DNPT است. این

بهتری دارد. مقدار گرانیوی پلیمر برای تولید اسفنج باید در محدوده‌ای متوسط باشد. چون گرانیوی زیاد مانع رشد سلولها شده و در گرانیوی کم نیز سلولهای تشکیل شده از بین می‌روند.

در تولید اسفنجهای قالبگیری شده، کم بودن ضخامت قالب موجب یکنواختی بیشتر ساختار سلولی محصول می‌شود که دلیل آن یکنواختی گرمایی بیشتر محصول در زمانهای مختلف است. در تولید اسفنجها، درصد عامل پف‌زا نباید از درصد بحرانی بیشتر باشد. چون در این حالت چگالی اسفنج به جای کاهش، افزایش می‌یابد. مقدار درصد بحرانی عامل پف‌زا به مقدار گاز آزاد شده آن وابسته است. با افزایش مقدار گاز آزاد شده درصد بحرانی کاهش می‌یابد.

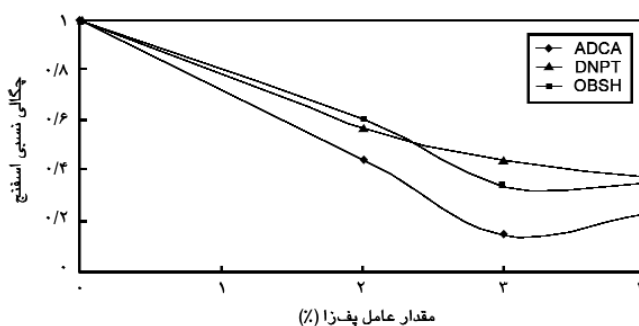
به همین دلیل در بین عوامل مورد استفاده در این پژوهش، ADCA کمترین و OBSH بیشترین درصد بحرانی را دارند. عامل پف‌زای OBSH برای تولید نمونه‌های اسفنجی قالبگیری شده پلی اتیلن بهتر از دو عامل دیگر است، چون اسفنج حاصل ساختار سلولی یکنواخت‌تری دارد. همچنین، OBSH مانند DNPT بوی نامطبوع تولید نمی‌کند. افزون بر این موارد، به دلیل کم بودن دمای تجزیه OBSH نسبت به دو عامل دیگر انرژی لازم برای گرمایش و سرمایش قالب و زمان تولید محصول کمتر است.

قدردانی

مؤلفان از تمامی افرادی که در انجام این پروژه یاری کرده‌اند، به ویژه شورای گسترش و نوسازی صنایع ایران تشکر می‌کنند.

مراجع

- Hurley R.F., Kozma M.L. and Feichtinger K.A., Cross-linked Foam Structures of Polyolefins and Process for Manufacturing, *US Pat. 5,883,145*, 1997.
- Frisch K.C. and Saunders J.H., *Plastic Foams*, Part I, Marcel Dekker, New York, 450, 1972-73.
- Lee S.T., *Foam Extrusion (Principles and Practice)*, Technomic, USA, 35-77, 2000.
- Naguib H.E. and Park C.B., Challenge to the Production of Low-density Propylene Foams in Extrusion, *Foams 2000 Proceeding*, New Jersey, 149-161, 2000.



شکل ۶ نمودار تغییرات چگالی نسبی اسفنجهای حاصل از عوامل پف‌زای مختلف بر حسب مقدار عوامل پف‌زا.

OBSH به دلیل بیشتر بودن گرانیوی مذاب نسبت به سایر اسفنجها است. برای مقایسه نحوه تغییر چگالی اسفنج با درصد عوامل پف‌زای مختلف، در شکل ۶ نمودار مربوط به تغییر چگالی نسبی اسفنجهای حاصل از عوامل پف‌زای مختلف نسبت به درصد عوامل پف‌زا رسم شده است. با توجه به این شکل مقدار اختلاف در شیب کاهش چگالی و تفاوت در درصد عامل پف‌زای بحرانی به خوبی مشخص می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اسفنج پلی اتیلن به روش قالبگیری فشاری و با استفاده از سه نوع عامل پف‌زای شیمیایی ADCA، OBSH و DNPT تولید شده است. نتایج بررسیها نشان می‌دهد که هر چه مقدار بلورینگی پلیمر مورد استفاده برای تولید اسفنج کمتر باشد، اسفنج تولیدی از آن خواص

- Ruinaard H., How to Choose a Polyolefin Grade for Physical Foaming, *Blowing Agents and Foaming Processes*, 2005.
- Ramesh N.S. and George L., Method for Making Oriented Polyethylene Foam and Foam Produced thereby, *US Pat. 6,245,266*, 2001.
- Chaudhary B.I. Eschenlauer G. and Marks B.S., Closed Cell, Low Density Ethylenic Polymer Foam Produced with Inorganic Halogen-free Blowing Agents, *US Pat. 5,554,661*, 1996.