



# بررسی اثر سرعت برش بر انحلال گاز و تعداد حباب در فرایند تولید پیوسته اسفنج

محمد حسین نوید فامیلی\*، محمد آکو

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه پلیمر، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۵

دریافت: ۸۸/۲/۳۰، پذیرش: ۸۸/۵/۱۸

## چکیده

در این پژوهش، اثر سرعت برش بر انحلال گاز کربن دیوکسید در زمینه خمیر ویسکوالاستیک (آرد گندم) و چگالی حباب در فرایند پیوسته تولید اسفنج در اکسترودر دوپیچی با سیلندر شیشه‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد، افزایش برش با کاهش شرایط ترمودینامیکی مورد نیاز باعث انحلال بهتر عامل دمش و افزایش تعداد حباب می‌شود. تنش برشی با شکستن حباب‌های بزرگ به حباب‌های کوچک‌تر به توزیع یکنواخت‌تر عامل دمش در سطح زمینه کمک کرده و موجب افزایش تعداد حباب می‌شود. کاهش سرعت سرمایش اسفنج، موجب کاهش چگالی حباب می‌شود. هم‌چنین، با افزایش دمای تثبیت برای دست‌یابی به چگالی حباب معین، سرعت پیچ بیشتری نیاز است.

## واژه‌های کلیدی

اکسترودر دوپیچی با سیلندر شیشه‌ای، انحلال گاز، هسته‌گذاری، کربن دیوکسید، آرد گندم

\*مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

[nfamili@modares.ac.ir](mailto:nfamili@modares.ac.ir)

## The Effect of Shear Rate on Dissolution of Gas and Cell Density in Continuous Foaming Process

M.H.N. Famili\* and M. Ako

Polymer Engineering Group, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, P.O. Box: 14115-143, Tehran, Iran

Received 20 May 2009, accepted 9 August 2009

### Abstract

The effect of shear rate on dissolution of carbon dioxide in viscoelastic wheat flour matrix and cell density in a glass barrel twin screw extruder is investigated. It is found that by increasing the shear rate there will be a decrease in the required thermodynamic conditions and hence, it improves blowing agent dissolution and increases the cell density. Shear rate breaks up big bubbles and helps to better distribute the blowing agent in the matrix and hence it increases the cell density. Cell density decreases by dropping foam cooling rate. For a given cell density, a higher screw speed is needed, if the cooling rate is decreased.

### Key Words

glass barrel twin screw extruder, gas solution, nucleation, carbondioxide, wheat flour

(\* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [nfamili@modares.ac.ir](mailto:nfamili@modares.ac.ir)

## مقدمه

اسفنج‌های پلیمری موادی هستند که از ترکیب پلیمر با مایعات، گازها یا سیالات ابربحرانی تشکیل شده‌اند. وجود گاز یا سیال در ترکیب اسفنج موجب کاهش وزن پلیمر و بهینه‌سازی خواص نسبت به وزن آن می‌شود. از این رو، اسفنج‌های پلیمری در صنایعی نظیر ساخت وسایل ورزشی، عایق‌سازی و بسته‌بندی کاربرد دارند. پلی‌استیرن [۴-۱]، پلی‌اتیلن [۵]، پلی‌پروپیلن [۸-۹]، نشاسته [۱۱-۹] و آکریلونیتریل بوتادی‌ان استیرن [۱۳، ۱۲] از جمله مواد پلیمری هستند که برای تولید اسفنج آزمایش شده‌اند. اما تا کنون اسفنج‌های تولید شده از پلی‌استیرن و پلی‌اتیلن بیشترین مصرف را در صنعت داشته‌اند [۱۴]. استفاده از نشاسته از دیدگاه زیست محیطی در دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۱۳]. انحلال، اولین مرحله در تولید اسفنج است. اختلاط نقش بسیار مهمی را در تشکیل محلول برای فرایند تولید اسفنج‌های پلیمری دارد. اختلاط می‌تواند به دو حالت انجام شود [۱۵]. حالت اول، اختلاط ساده است که در شرایط مناسب مولکول‌های گاز به داخل زمینه پلیمر نفوذ کرده و اختلاط در ابعاد مولکولی رخ می‌دهد. حالت دوم زمانی است که گاز به درون پلیمر مذاب تزریق شده و با شکسته شدن حباب‌های بزرگ به حباب‌های کوچک و اعمال تنش بر آنها سعی می‌شود، اختلاط تا حد رسیدن به حالت محلول به طور نسبی تک فاز انجام شود [۱۶].

Suh و Park اختلاط توزیعی و نفوذ گاز را برای سامانه اختلاط پیوسته پلیمر - گاز بررسی کردند [۱۵]. در این حالت اجزای تشکیل دهنده دارای انرژی سطح محدود  $\gamma$  در یک سطح A هستند که با تزریق حباب‌های گاز در مذاب پلیمر به وجود می‌آیند. یک مثال معمول در فرایند اختلاط توزیعی کار محور  $(W_s)$  است [۱۵]. در فرایند اکستروژن کار محور بر اثر چرخش پیچ ایجاد می‌شود. در شرایط فشار و دمایی ثابت، اختلاط باعث ایجاد انرژی آزاد گیبس اختلاط  $(G_m)$  کمتر یا برابر مجموع انرژی بین سطحی  $(y_{bp})$  و کار محور می‌شود و معادله (۱) شکل می‌گیرد:

$$dG_m \leq d(y_{bp}A) - \delta W_s \quad (1)$$

با توجه به معادله (۱)، با انجام کار مکانیکی، اختلاط بهتری برای غلبه بر انرژی بین سطحی انجام می‌شود.

فیزیک ساز و کارهای هسته‌زایی متفاوت، وابسته به سطح انرژی سامانه هاست. به عبارت دیگر، تولد حباب‌ها در جامد یا مایع به افزایش انرژی آزاد سامانه نیاز دارد. این افزایش انرژی آزاد برای ایجاد سطوح جدید از به هم پیوستن حباب‌های کوچک ایجاد می‌شود تا شعاع

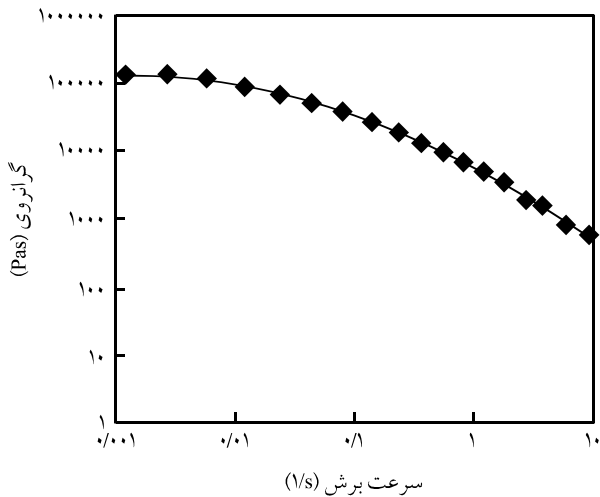
بحرانی حباب، عمود بر مسیر مقاومت ساخته شود [۲]. اغلب، هسته‌زایی حباب‌ها در میدان برشی اتفاق می‌افتد. در اکستروژن اسفنج‌سازی، مذاب پیش از این که از حلیده خارج شود، برش می‌خورد و سرعت برش نقش مهمی ایفا می‌کند.

Lee اثر سرعت برش بر هسته‌زایی اسفنج برای سامانه پلی‌اتیلن سبک - کلروفلوئوروکربن ۱۲ را مطالعه کرد [۱۷]. نتیجه کلیدی آزمایش‌های وی، افزایش سرعت هسته‌زایی با افزایش سرعت برش بود. توجه ممکن برای افزایش هسته‌زایی می‌تواند شکست دسته‌های جمع شده یا رهایی سریع‌تر هسته پایدار از حفره‌ها باشد. مدل، نیروی برشی را به عنوان روشی برای کاهش سد انرژی فعال‌سازی توصیف می‌کند که حباب‌ها می‌توانند از راه یک مسیر حرکتی کوتاه‌تر طی فرایند هسته‌زایی، آسان‌تر شکل گیرند [۱۷].

Chen و همکاران نکته اصلی در هسته‌زایی تنش برشی را انتقال انرژی برشی مکانیکی به انرژی سطحی اعلام و با دادن مدل کشش سلولی به هسته‌زایی در این شرایط مطالعه کرده‌اند [۱۶]. به عبارت دیگر، فرایند تشکیل سلول، انتقال انرژی پتانسیل گاز پر فشار در هسته به انرژی سطحی است [۱۶]. اگر انرژی پتانسیل گاز پر فشار برای رشد سلول کافی نباشد، نیروی سطحی، سلول را مجبور به فروپاشی می‌کند [۱۸]. در جریان برشی، یک مرکز هسته‌گذاری کشیده می‌شود. مقدار کشش به قطر هسته، سرعت برش، کشش سطحی و گرانیوزی مذاب پلیمری بستگی دارد. هسته کشیده شده پس از برداشتن فشار بسیار راحت‌تر منبسط می‌شود. زیرا، سطح بزرگ‌تر و شکل غیرکروی دارد. طبق این نظریه بعضی هسته‌ها با شعاع اولیه زیر مقدار بحرانی  $R_c$ ، ممکن است زیر تنش برشی هسته‌های فعالی شوند و تعداد هسته‌های مستعد رشد افزایش می‌یابد [۱۶].

تنش برشی و سرعت کاهش فشار هر دو اثر محسوس روی چگالی هسته‌گذاری حباب دارند. البته اثر تنش برشی غالب‌تر است [۱۴]. اثر تنش برشی و سرعت کاهش فشار در فشار سیرشده کم، بحرانی می‌شود. ساختار سلولی اسفنج‌ها به چگونگی کاهش فشار یا حذف تنش برشی در جریان عبوری از حلیده وابسته است [۱۴]. هر چه سرعت کاهش فشار افزایش یابد، در فشار سیرشده کمتری می‌توان به چگالی حباب مطلوب دست یافت. با وجود تنش برشی فشار سیرشده مورد نیاز به کمترین حد می‌رسد [۱۴]. بنابراین، وجود تنش برشی باعث کاهش شرایط ترمودینامیکی مورد نیاز برای ایجاد حباب می‌شود. مادامی که بتوان سرعت برشی بزرگ‌تر و پایدارتر ایجاد کرد، چگالی حباب بیشتر می‌شود.

Chen و همکاران هسته‌گذاری پلی‌استیرن پرشده و خالص را با ایجاد



شکل ۱ - تغییرات گرانروی خمیر بر حسب سرعت برش.

### دستگاه‌ها

دستگاه اکسترودر دوپیچی با سیلندر شیشه‌ای، هم سوگرد و خود تمیز شونده با قابلیت مشاهده فرایند اکستروژن پلیمر در تمام طول مسیر اکسترودر، ساخته شده در گروه مهندسی پلیمر دانشگاه تربیت مدرس برای اختلاط زمینه و عامل دمش به کار گرفته شد. این اکسترودر شامل پنج ناحیه مجزا و نسبت طول به قطر ۴۰ بود. سامانه فیلم برداری شامل دستگاه دوربین ۱۳/۶ Mpixel ساخت شرکت Sony و یک سه پایه بود. این سامانه از فریند داخل اکسترودر فیلم برداری کرده و تا ۴ Gb قابلیت ذخیره سازی فیلم و عکس دارد. از میکروسکوپ الکترون پویشی مدل XL30 ساخت شرکت Philips کشور هلند، استفاده شد.

### روش‌ها

ابتدا دمای تمام نواحی اکسترودر دمای محیط انتخاب شد. خوراک آرد از قیف خوراک دهی اول و آب از قیف خوراک دهی دوم با نسبت ۴۰ درصد وزنی و گاز کربن دیوکسید در ابتدای ناحیه پنجم با فشار ثابت ۳ bar وارد سامانه شد. در این حالت با قراردادن دوربین فیلم برداری در مسیر نواحی مختلف اکسترودر، نحوه انحلال گاز کربن دیوکسید و اختلاط آرد با آب ثبت می شد. این عملیات در سرعت های چرخش پیچ ۶/۵، ۱۰ و ۱۳/۵ rpm انجام و نتایج ثبت شد. پس از انحلال عامل دمش، اجازه داده شد، فشار در حدیده صفحه ای به فشار ۱ atm کاهش یابد. با عبور محلول از حدیده و ایجاد ناپایداری ترمودینامیکی، هسته گذاری آغاز شد. با کوچک گرفتن طول حدیده (۱ cm)، اثر تنش برشی ناشی از حدیده بر ساختار و کشیدگی حباب‌ها به حداقل کاهش داده شد. بنابراین با تغییر سرعت پیچ، فقط اثر تنش برشی درون اکسترودر بر

تنش برشی در شبیه ساز بررسی کرده اند. در این پژوهش مشخص شد، حداقل فشار سیر شده مورد نیاز برای اسفنج شدن پلی استیرین خالص و پیر شده بدون وجود تنش برشی به ترتیب ۸/۵ و ۳/۴۵ MPa در دما و سرعت کاهش فشار یکسان است [۱۶]. پرکننده به عنوان عامل هسته زا عمل می کند و فشار سیر شده مورد نیاز برای هسته زایی را کاهش می دهد [۱۹].

کیانگ خو و همکاران اثر مقدار عامل هسته زای تالک را بر چگالی اسفنج پلی اتیلن سنگین بررسی کرده اند. با افزودن تالک چگالی حباب افزایش یافت و توزیع حباب‌ها از پراکنش یکنواخت و بهتری برخوردار شد [۲۰]. در این حالت تالک به عنوان عامل هسته زا با کاهش مقدار انرژی فعال سازی مورد نیاز برای هسته گذاری حباب‌ها موجب افزایش چگالی حباب شد [۲۱].

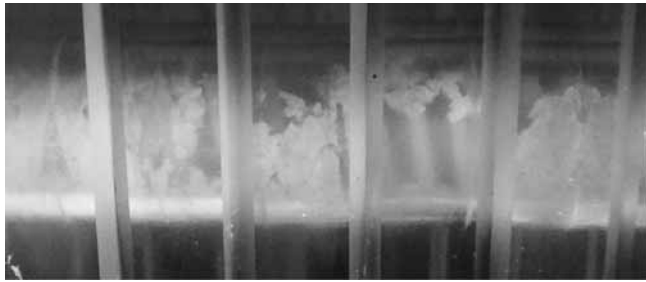
فشار عملیاتی از دیگر عواملی است که بر هسته گذاری اثر می گذارد. با افزایش فشار عملیاتی گاز بیشتری در زمینه پلیمری حل می شود. افزایش انحلال پذیری گاز در پلیمر می تواند ناپایداری ترمودینامیکی بزرگ تری را ایجاد کند و چگالی حباب بیشتری در اثر کاهش انحلال پذیری تولید شود [۲۲].

در این پژوهش، هدف بررسی تولید اسفنج از خمیر آرد گندم و مطالعه اثر سرعت چرخش پیچ و دمای تثبیت به طور هم زمان بر نحوه انحلال و تعداد حباب ایجاد شده است. با انتخاب سه سرعت مختلف برای پیچ‌ها و تثبیت اسفنج اکسترودر شده در سه دمای مختلف می توان اثر سرعت پیچ و دمای تثبیت بر ساختار اسفنج نهایی را به طور هم زمان بررسی کرد.

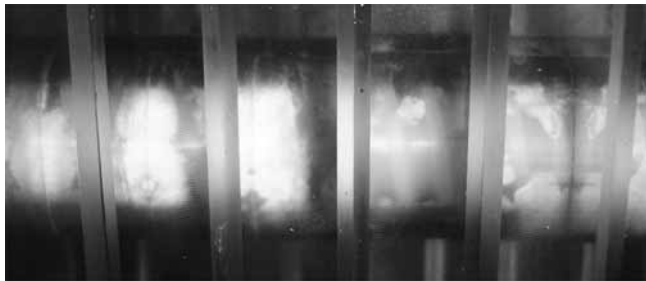
### تجربی

#### مواد

در این آزمایش خمیر آرد گندم با رفتار رئولوژیکی آمده در شکل ۱ به عنوان زمینه پلیمری و گاز کربن دیوکسید در کپسول های ۴۰ kg تهیه شده از شرکت سهند گاز به عنوان عامل دمش استفاده شد. مطابق شکل ۱، گرانروی صفر خمیر در حدود ۵۱۰ Pas است. هم چنین، خمیر رفتار شبه پلاستیک دارد و با افزایش سرعت برش از ۰/۰۰۱ به ۱۰ s<sup>-1</sup>، گرانروی خمیر به مقدار هزار برابر کاهش می یابد. لازم به ذکر است، رفتار ویسکوالاستیک در زمان رشد محسوس است و در انحلال گاز و هسته گذاری اثر اندکی دارد. نظر به این که اندازه حباب در تحلیل لحاظ نشده و فقط تعداد حباب‌ها مورد نظر است، در این بررسی مشخصات ویسکوالاستیک اثری ندارد.



(الف)



(ب)

شکل ۲ - تصاویر دوربین فیلم برداری از انحلال عامل دمش در سرعت های مختلف پیچ: (الف) متوسط و (ب) زیاد.

انتهای این ناحیه به حالت توده تبدیل شد. پس از عبور توده آرد انباشته شده از ناحیه اول، در ابتدای ناحیه دوم، آب نیز به آن افزوده شد. در مسیر این ناحیه و ناحیه بعدی آب با آرد کاملاً مخلوط شد و به شکل خمیر ویسکوالاستیک وارد ناحیه چهارم شد. گاز کربن دیوکسید در ابتدای ناحیه پنجم وارد دستگاه شد. پس از افزوده شدن گاز به خمیر در ناحیه پنجم عملیات اختلاط این دو ماده انجام شد.

از تصاویر ثبت شده به وسیله دستگاه دوربین فیلم برداری پیش و پس از افزودن گاز، مشاهده می شود که پس از افزودن گاز به سامانه، حرکت مواد به سمت حدیده سریع تر می شود. این موضوع به دلیل فشار گاز ورودی و کاهش گرانشی خمیر در مجاورت گاز است. هم چنین، افزودن گاز به سامانه موجب حرکت های دورانی متعدد خمیر در مسیر حرکت آن به سمت حدیده شده است. این مطلب بدین معناست که فشار تزریق گاز کم است. از آن جا که دستگاه در ناحیه پمپ به حالت کاملاً پر کار کرده است، بنابراین نوسانات نهایی در خروجی اکسترودر ایجاد نشده است.

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترون پویشی از نمونه های اسفنج تولید شده در سرعت های برش متوسط و زیاد را نشان می دهد که در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  تثبیت شده است. به علت وجود تنش برشی عامل دمش در تمام سطوح خمیر توزیع شده و به هسته گذاری یکنواخت کمک کرده

فرایند انحلال و هسته گذاری بررسی شد. پس از خروج نمونه از حدیده سه قطعه از آن تهیه شد. هر کدام از نمونه ها به مدت ۲۴ h در سه دمای  $0^{\circ}\text{C}$  و  $25^{\circ}\text{C}$  قرار گرفتند تا در این دما تثبیت شوند. سپس، نمونه های موجود در دماهای  $0^{\circ}\text{C}$  و  $50^{\circ}\text{C}$ ، در دمای محیط به مدت ۲۴ h قرار گرفتند تا به طور کامل تثبیت شوند.

در این پژوهش، نحوه انحلال از دو راه مشاهده مستقیم درون اکسترودر به وسیله فیلم برداری از ناحیه انحلال پس از تزریق گاز به درون اکسترودر و بررسی تصاویر SEM محصول اسفنج شده مطالعه شد. هم چنین، تعداد سلول ها به کمک تصاویر SEM محصول اسفنج بررسی شد.

### روش تعیین چگالی اسفنج

چگالی نمونه ها با توزین نمونه و اندازه گیری حجم آن به وسیله استوانه مدرج به دقت محاسبه شد. ترازوی مورد استفاده در این آزمایش Metler 1120 با دقت  $0.1\text{ mg}$  بود.

### روش محاسبه چگالی سلولی

در این پژوهش از روش ارائه شده توسط کومار و ولر برای محاسبه چگالی استفاده شد [۲۳]:

$$N_0 = [nM^2 / A]^{3/2} [1/(1 - V_f)] \quad (2)$$

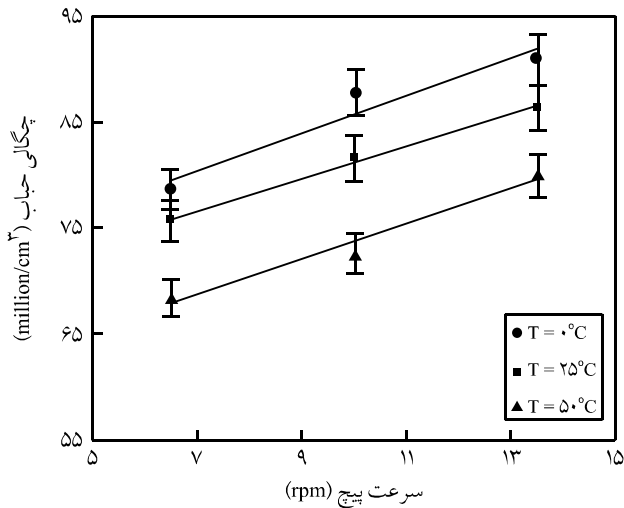
در این معادله  $N_0$  تعداد حباب ها بر واحد حجم،  $n$  تعداد حباب در تصویر میکروسکوپ الکترون پویشی،  $M$  بزرگ نمایی تصویر،  $A$  مساحت نمونه و  $V_f$  کسر حفره است. کسر حفره طبق معادله (۳) تعریف می شود:

$$V_f = 1 - \rho_f / \rho \quad (3)$$

که  $\rho$  و  $\rho_f$  به ترتیب چگالی نمونه های اسفنجی نشده و شده است.

### نتایج و بحث

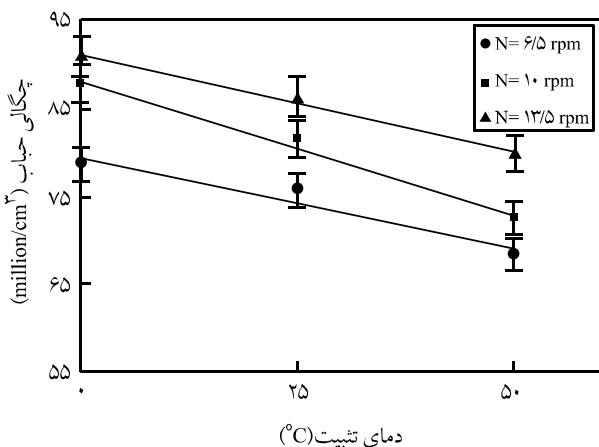
شکل ۲ مشاهدات حاصل از ناحیه اختلاط عامل دمش با زمینه خمیر داخل اکسترودر را نشان می دهد. پس از دریافت خوراک آرد به وسیله پیچ، خوراک به جلو برده شده و در مسیر حرکت به جلو انباشته شد و در



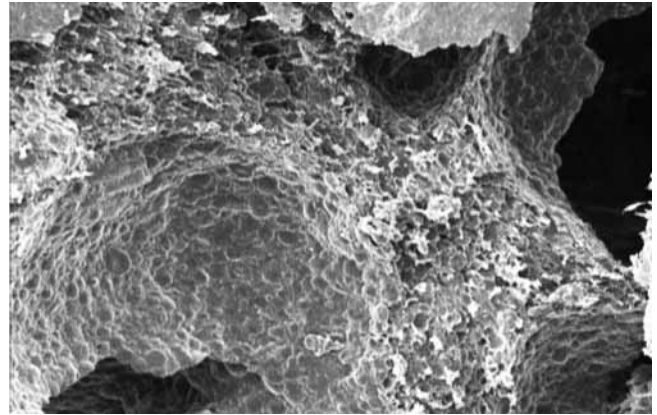
شکل ۴ - تغییرات چگالی حباب بر حسب سرعت پیچ.

برای رشد هسته و عبور هسته از شعاع بحرانی و تبدیل تعداد بیشتری هسته به هسته پایدار می شود. از سوی دیگر، افزایش سرعت برش باعث شکست حباب های بزرگ تر به حباب های کوچک تر و در نهایت افزایش تعداد هسته ها می شود. هم چنین، افزایش سرعت برش باعث کشیدگی سلول و کاهش شعاع بحرانی آن می شود. بنابراین، تعداد هسته بیشتری به هسته پایدار تبدیل می شود. در نتیجه تعداد حباب بیشتری تولید می شود.

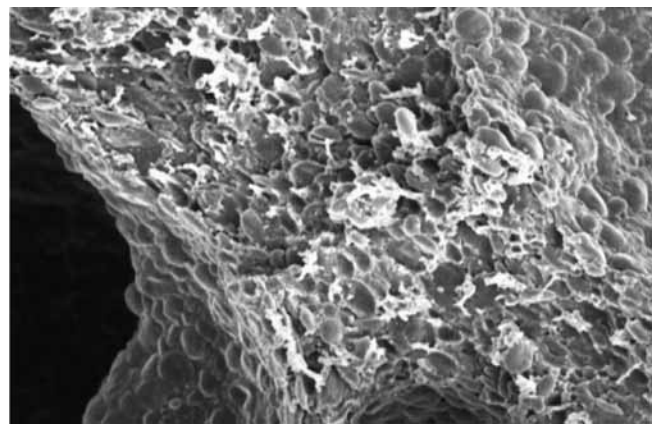
شکل ۵ چگالی حباب برای نمونه های اسفنج تولید شده در دماهای تثبیت مختلف را نشان می دهد. در سرعت پیچ کم، با افزایش دمای تثبیت، تعداد حباب ها از ۷۹ میلیون به ۶۸ میلیون حباب بر واحد حجم کاهش می یابد. با افزایش دمای تثبیت حباب ها فرصت بیشتری برای رشد دارند. به عبارت دیگر، با افزایش دمای تثبیت نیروی محرکه لازم



شکل ۵ - تغییرات چگالی حباب بر حسب دمای تثبیت.



(الف)



(ب)

شکل ۳ - تصاویر میکروسکوپ الکترون پویشی از نمونه اسفنج با بزرگ نمایی ۵۰۰ برابر، تولید شده در سرعت های مختلف پیچ: (الف) زیاد و (ب) متوسط.

است. از سویی با افزایش سرعت برش، حباب های تولیدی دارای ابعاد ریزتر و یکسان تری هستند. این مطلب بدین معناست که عامل دمش به خوبی در میان خمیر توزیع شده است. اسفنج تولیدی دارای ساختار سلول بسته است. مقدار اتلاف گاز به دلایل زیر ناچیز و قابل اغماض است:

- گاز پیش از ناحیه پمپ تزریق شده است.
  - تعداد حباب های بسته خیلی بیشتر از حباب های باز است.
  - در پوسته بیرونی، ناحیه اسفنج نشده کم است.
- شکل ۴ تعداد حباب بر واحد حجم برای نمونه های اسفنج تولید شده در سرعت های برش مختلف را نشان می دهد. با افزایش سرعت برش، تعداد حباب ها بر واحد حجم از ۷۶ به ۸۶ میلیون افزایش می یابد. با افزایش سرعت برش از سویی انحلال عامل دمش یکنواخت تر می شود و موجب توزیع گاز در تمام مناطق و افزایش مقدار گاز قابل دسترس

جدول ۱ - درصد افزایش چگالی حباب با تغییرات سرعت پیچ.

افزایش سرعت پیچ (rpm)	دمای تثبیت (°C)		
	۵۰	۲۵	۰
از ۶/۵ به ۱۰	۵/۷۰±۰/۰۲	۱۰/۱۸±۰/۰۲	۱۰/۳۷±۰/۰۲
از ۱۰ به ۱۳/۵	۹/۲۴±۰/۰۲	۵/۵۳±۰/۰۲	۳/۴۳±۰/۰۲
از ۶/۵ به ۱۳/۵	۱۴/۴۱±۰/۰۲	۱۲/۳۱±۰/۰۲	۱۳/۴۵±۰/۰۲

۱۰ rpm مقدار افزایش چگالی حباب بیشتر از این مقدار در سرعت های پیچ بیشتر از ۱۰ rpm است.

مقدار افزایش چگالی حباب در دمای تثبیت ۵۰°C با افزایش سرعت پیچ از ۶/۵ به ۱۰ rpm کمتر از سایر دمای تثبیت و برابر با ۵/۷ درصد است. این مقدار با افزایش سرعت پیچ از ۱۰ به ۱۳/۵ rpm به ۹/۲۴ درصد افزایش می یابد. توجیه ممکن برای حالت مزبور این است که با افزایش دمای تثبیت یا کاهش سرعت سرمایش در سرعت پیچ زیادتر، بیشترین مقدار تغییرات چگالی حباب ایجاد می شود. به عبارت دیگر، برای افزایش معین چگالی حباب در دمای تثبیت بالا، مقدار برش بیشتری نسبت به دمای تثبیت پایین نیاز است.

جدول ۲ درصد کاهش چگالی حباب با تغییرات دمای تثبیت را نشان می دهد. در تمام سرعت های پیچ، بیشترین مقدار کاهش چگالی حباب، با افزایش دمای تثبیت از ۲۵ به ۵۰°C حاصل می شود و در بیشترین سرعت پیچ کمترین مقدار کاهش را می توان مشاهده کرد. با افزایش سرعت پیچ ابتدا مقدار کاهش چگالی حباب افزایش و سپس کاهش می یابد.

از روند تغییرات چگالی حباب با تغییرات دما و سرعت پیچ در جدول های ۱ و ۲ می توان نتیجه گرفت که با افزایش سرعت پیچ، چگالی حباب افزایش می یابد. اما از یک مقدار، دیگر افزایش سرعت پیچ بر چگالی حباب اثری ندارد و با افزایش دمای تثبیت این روند به سرعت های پیچ بیشتر منتقل می شود و بیشترین سرعت پیچ مؤثر بر چگالی حباب در مقادیر زیادتر حاصل می شود.

## نتیجه گیری

با افزایش تنش برشی، توزیع عامل دمش در سطح زمینه پلیمری افزایش می یابد. از سویی در این حالت با شکسته شدن حباب های بزرگ به حباب های کوچک تر و اعمال تنش مکانیکی بر سامانه، اختلاط بهتری انجام می شود. در فشار سیر شده معین، با افزایش تنش برشی چگالی حباب افزایش می یابد. در این حالت با افزایش انرژی سطحی به کمک تنش برشی، پتانسیل شیمیایی لازم برای هسته گذاری افزایش می یابد و تعداد حباب بیشتری تولید می شود. از سوی دیگر، با افزایش تنش برشی و تغییر شکل هسته از حالت کروی، شعاع بحرانی کاهش یافته و تعداد هسته بیشتری فرصت بقا پیدا می کنند. با افزایش دمای تثبیت و کاهش سرعت سرمایش، چگالی حباب کاهش می یابد. در این حالت افزایش سرعت پیچ باعث افزایش چگالی حباب می شود. افزایش سرعت از مقداری به بعد دیگر اثری بر چگالی حباب ندارد.

برای رشد بیشتر حباب ها فراهم می شود. بنابراین، با رشد حباب ها مقدار گاز بیشتری برای آنها نیاز است. این امر باعث کاهش شانس حباب های کوچک تر و ناپایدار می شود و با از بین رفتن این هسته ها گاز اضافی، در اختیار رشد بیشتر حباب های دیگر قرار می گیرد. از سوی دیگر، با افزایش دمای تثبیت فرصت رشد بیشتر حباب ها فراهم می شود. رشد حباب ها منجر به تماس حباب ها و در نهایت درهم رفتگی و ادغام حباب ها می شود. بنابراین، تعداد حباب ها کاهش می یابد. در دمای تثبیت ۵۰°C چگالی حباب از کمترین مقدار حباب یعنی ۶۸ میلیون حباب بر سانتی متر مکعب در سرعت برش کم به ۸۰ میلیون حباب بر سانتی متر مکعب در سرعت برش زیاد افزایش می یابد. جدول ۱ تغییرات چگالی حباب با افزایش سرعت پیچ را نشان می دهد. با افزایش سرعت پیچ از ۶/۵ به ۱۰ rpm در دمای تثبیت صفر درجه سانتی گراد، بیشترین افزایش چگالی حباب حاصل می شود. در این حالت، چگالی حباب ۱۰/۳۷ درصد افزایش یافته است. هنگامی که سرعت پیچ از ۱۰ به ۱۳/۵ rpm افزایش می یابد، مقدار افزایش چگالی حباب به ۳/۴۳ درصد کاهش می یابد. این روند در دمای تثبیت ۲۵°C نیز دنبال می شود. با تغییر دمای تثبیت از صفر به ۲۵°C، هنگامی که سرعت پیچ از ۱۰ به ۱۳/۵ rpm افزایش می یابد، مقدار تغییرات چگالی حباب بیشتر می شود. اما با افزایش سرعت پیچ از ۶/۵ به ۱۰ rpm تغییر محسوسی در چگالی حباب حاصل نمی شود. این مطلب نشان دهنده غالب بودن اثر سرعت پیچ بر اثر سرعت سرمایش در حالت اول است. از سوی دیگر، در این دو دمای تثبیت، در سرعت های پیچ کمتر از

جدول ۲ - درصد کاهش چگالی حباب با تغییرات دمای تثبیت.

افزایش سرعت پیچ (rpm)	دمای تثبیت (°C)		
	از ۰ به ۵۰	از ۲۵ به ۵۰	از ۰ به ۲۵
۶/۵	۱۴/۹۸±۰/۰۲	۱۰/۷۱±۰/۰۲	۳/۸۷±۰/۰۲
۱۰	۲۰/۹۶±۰/۰۲	۱۲/۴۶±۰/۰۲	۷/۵۷±۰/۰۲
۱۳/۵	۱۳/۶۹±۰/۰۲	۸/۰۴±۰/۰۲	۵/۲۳±۰/۰۲

## مراجع

1. Meysami M. and Famili M.H.N., *Producing Microcellular Foams by Using Supercritical Fluids*, MSc Thesis, Tarbiat Modares University, March 2005.
2. Mohebbi A., Famili M.H.N., and M. Kokabi, *Production of Nanocomposite Microcellular Foam and Presenting a Model to Predict their Nucleation*, MSc Thesis, Tarbiat Modares University, March 2007.
3. Han X., Zeng C., Lee L.J., Koelling K.W., and D.L. Tomasko, Extrusion of Polystyrene Nanocomposite Foams with Supercritical CO<sub>2</sub>, *Polym. Eng. Sci.*, **43**, 1261-1275, 2003.
4. Park C.B., Behravesh A.H. and Venter R.D., Low Density Microcellular Foam Processing in Extrusion Using CO<sub>2</sub>, *Polym. Eng. Sci.*, **38**, 1812-1822, 1998.
5. Lee S.T., Nucleation in Foam Extrusion, *J. Cell. Plast.*, **37**, 221-230, 2001.
6. Jahani Y. and Barikani M., Effect of Side Chain Branched PP, EPDM and HDPE as a Third Component on Melt Extensional Behaviour of Ternary Blends, *Iran. Polym. J.*, **14**, 693-704, 2005.
7. Jahani Y. and Barikani M., Rheological and Mechanical Study of Polypropylene Ternary Blends for Foam Application, *Iran. Polym. J.*, **14**, 361-370, 2005.
8. Jahani Y. and Barikani M., Effect of Blend Composition on Extrusion Foaming Behaviour of Linear and Branched Polypropylene Ternary Blends, *Iran. Polym. J.*, **16**, 627-636, 2007.
9. Boliver A.I., Venditti R.A., Pawlak J.J., and El-Tahlawy K., Development and Characterization of Novel Starch and Alkyl Ketene Dimmer Microcellular Foam Particles, *Carbohydr. Polym.*, **69**, 262-271, 2007.
10. Willett J.L. and Shogren R.L., Processing and Properties of Extruded Starch/Polymer Foams, *Polymer*, **43**, 5935-5947, 2002.
11. Mihai M., Huneault M.A., Favis B.D., and Li H., Extrusion Foaming of Semi-crystalline PLA and PLA/Thermoplastic Starch Blends, *Macromol. Biosci.*, **7**, 907-920, 2007.
12. Beydokhti K.K., Behravesh A.H. and Azdast T., An Experimental Study on Mechanical and Microstructural Properties of Microcellular Foams of ABS Composites, *Iran. Polym. J.*, **15**, 555-567, 2006.
13. Mahmoodi M. and Behravesh A.H., The Effect of Pressure Drop Rate on the Microstructures of Unfilled and Glass-filled ABS Microcellular Foams, *Iran. Polym. J.*, **16**, 839-849, 2007.
14. Park C.B. and Cheung L.K., A Study of Cell Nucleation in the Extrusion of Polypropylene Foams, *Polym. Eng. Sci.*, **37**, 1-10, 1997.
15. Park C.B. and Suh N.P., *The Role of Polymer/Gas Solution in Continuous Processing of Microcellular Polymers*, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, May 1993.
16. Chen L., Wang X., Straff R., and Blizard K., Shear Stress Nucleation Microcellular Foaming Process, *Polym. Eng. Sci.*, **42**, 1151-1158, 2002.
17. Lee S.T., *Foam Extrusion*, Thecnomic, Lancaster, Pennsylvania, 108-115, 2000.
18. El-Tahlawy K., Venditti R.A., and Pawlak J.J., Aspects of the Preparation of Starch Microcellular Foam Particles Crosslinked with Glutaraldehyde Using a Solvent Exchange Technique, *Carbohydr. Polym.*, **67**, 319-331, 2007.
19. Zhu W., Zhou N., and Wu H., Multiplex Shear Stress-Induced Nucleation in Dynamic Microcellular Foaming Process, *Polym. Eng. Sci.*, **46**, 1728-1738, 2006.
20. Xu X., Park C.B., Lee J.W.S., and Zhu X., Advanced Structural Foam Molding Using a Continuous Polymer/Gas Melt Flow Stream, *J. Appl. Polym. Sci.*, **109**, 2855-2861, 2008.
21. Lee J.W.S. and Park C.B., Use of Nitrogen as a Blowing Agent for the Production of Fine-celled High-density Polyethylene Foams, *Macromol. Mater. Eng.*, **291**, 1233-1244, 2006.
22. Park C.B. and Suh N.P., Filamentary Extrusion of Microcellular Polymers Using a Rapid Decompressive Element, *Polym. Eng. Sci.*, **36**, 34-48, 1996.
23. Sun H. and Mark J.E., Preparation, Characterization and Mechanical Properties of some Microcellular Polysulfone Foams, *J. Appl. Polym. Sci.*, **86**, 1692-1701, 2002.