

مطالعه اثر حضور نانوذرات اکسید آلومینیوم و تغییرات دما در فرآیند فوم شدن نانوکامپوزیت پلی استایرن - اکسید آلومینیوم

نورالدین گودرزبان* و ابوالفضل محبی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد داراب، گروه مهندسی پلیمر

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۸/۰۲/۱۲، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۸/۰۴/۲۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۸/۰۶/۰۲

چکیده

در این تحقیق، فوم پلی استایرن به صورت ناپیوسته و با اشباع نمودن آن از یک گاز خنثی و ایجاد یک ناپایداری ترمودینامیکی بسیار سریع تولید گردید. همچنین، فرآیند ساخت فوم نانوکامپوزیت پلی استایرن- اکسید آلومینیوم (عامل هسته‌زا) به کمک گاز نیتروژن در حالت فوق بحرانی (به عنوان عامل حفره‌زا)، نحوه هسته‌گذاری، رشد و اندازه متوسط حباب‌ها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی و با نمونه پلی استایرن خالص مقایسه گردید. نتایج نشان دادند که با حضور نانوذرات، اندازه نهایی و نیز سرعت رشد حباب‌ها کاهش می‌یابد. همچنین اندازه و توزیع حباب‌ها در فوم‌های نانوکامپوزیتی بسیار یکنواخت‌تر از فوم پلی استایرن خالص بود.

واژه‌های کلیدی: نانوکامپوزیت، پلی استایرن، اکسید آلومینیوم، فوم‌سازی.

۱- مقدمه

مکعب باشد [۱]. به علت اندازه بسیار ریز حباب‌ها، فوم‌های میکروسلولی نسبت به پلیمر فوم نشده دارای خواص برتری هستند [۲]. این دسته از فوم‌ها به علت سبکی و یکنواختی، دارای نسبت بالای خواص مکانیکی به وزن در مقابل فوم‌های ساختاری معمولی هستند. این فوم‌های پلیمری استحکام کششی و چقرمگی بالا [۳]، عمر پارگی بالا [۴] و خواص عایق حرارتی و الکتریکی بالایی [۵] نشان می‌دهند. فوم‌های پلیمری دارای کاربردهای فراوانی در صنایعی مانند: صنایع خودرو، صنایع

تکنولوژی تولید فوم میکروسلولی برای اولین بار توسط مؤسسه فن‌آوری ماساچوست (MIT) در اوایل سال ۱۹۸۰ میلادی به منظور کاهش مصرف مواد اولیه و افزایش خواص مکانیکی مواد ابداع گردید. بر این اساس فوم میکروسلولی به آن دسته از فوم‌هایی گفته می‌شود که اندازه سلول آنها بین ۰/۱ تا ۱۰ میکرون بوده و چگالی سلولی آنها در حدود 10^9 تا 10^{15} سلول به سانتی‌متر

* عهده‌دار مکاتبات: نورالدین گودرزبان

نشانی: شیراز، داراب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد داراب، گروه مهندسی پلیمر

تلفن: ۰۷۳۲-۶۲۳۳۹۹۱-۴، دورنگار: ۰۷۳۲-۶۲۳۳۹۰۰، پست‌الکترونیکی: ngudarzian@yahoo.com

اساس این تئوری و با تصحیح‌هایی که بر روی متغیرهای حجم آزاد و انرژی بین سطحی آن صورت گرفته است، تولید حباب‌های گاز در پلیمر از فرآیند ترمودینامیکی برگشت‌پذیر، انرژی آزاد گیبس از رابطه ۱ بدست می‌آید:

$$\Delta G = -V_b \Delta P + A_{bp} \gamma_{bp} \quad (1)$$

که در این رابطه V_b حجم حباب‌ها، ΔP فشار گاز درون حباب‌ها، A_{ap} سطح حباب و γ_{bp} انرژی کشش سطحی پلیمر-حباب می‌باشد. با ایزوتروپ فرض کردن γ_{bp} ، شکل هندسی حباب‌ها کره‌ای به شعاع r می‌باشد. در این صورت معادله ۱ به شکل زیر خواهد بود:

$$\Delta G = - (4/3) \pi r^3 \Delta P + 4 \pi r^2 \gamma_{bp} \quad (2)$$

حباب‌هایی وارد مرحله رشد می‌شوند که انرژی آزاد آنها آنقدر زیاد شود که شعاع آنها از شعاع بحرانی r^* ، بزرگ‌تر شود. در نتیجه شعاع بحرانی r^* در ارتباط با انرژی آزاد ماکزیمم می‌باشد. با توجه به این که در r^* $\frac{dG}{dr} = 0$ و $\frac{d^2G}{dr^2} < 0$ است، هسته‌ها در حالت نامتعادلی هستند. به این صورت که چنانچه $r < r^*$ سیستم ناپایدار بوده و هسته از بین می‌رود و چنانچه $r > r^*$ رشد حباب منجر به کاهش انرژی آزاد سیستم می‌شود. با مشتق‌گیری از معادله ۲، و مساوی صفر قرار دادن آن، r^* که نقطه ماکزیمم این منحنی است به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$r^* = \frac{2\gamma_{bp}}{\Delta P} \quad (3)$$

در این صورت با جایگذاری مقدار شعاع بحرانی، انرژی آزاد هسته گذاری بحرانی عبارت است از:

$$\Delta G^* = \frac{16\pi}{3\Delta P^2} \gamma_{bp}^3 \quad (4)$$

بنابراین چنانچه بتوان در مرحله هسته‌گذاری تولید هسته‌های پایدار را کنترل نمود، خواص نهایی پلیمر مانند اندازه نهایی و دانسیته حباب‌ها قابل پیش‌بینی خواهد بود.

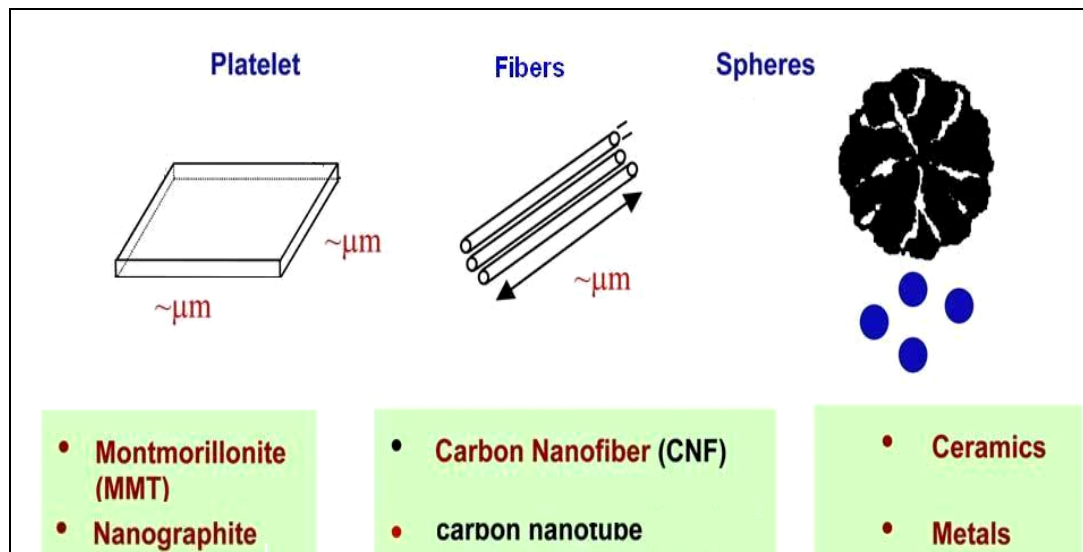
هوا فضا، صنایع بسته‌بندی و صنایع عایق‌سازی هستند. فرآیند فوم‌سازی شامل دو مرحله می‌باشد:

- (۱) هسته‌گذاری حباب‌های گاز در سیستم پلیمر - گاز
- (۲) رشد حباب‌های پایدار گاز

هسته‌گذاری مهمترین مرحله تولید فوم می‌باشد. با کنترل این مرحله، فومی با ساختار سلولی ریزتر، یکنواخت‌تر و در نتیجه خواص بهتر، تولید خواهد شد. فوم‌های میکروسلولی از اشباع کردن پلیمر توسط گاز فوق بحرانی و اعمال یک تغییر آبی ترمودینامیکی حاصل می‌شوند. در اثر این تغییر آبی، تعداد بسیار زیادی هسته ایجاد می‌شود. آن دسته از هسته‌هایی که شعاع آنها به شعاع بحرانی برسد، وارد مرحله رشد می‌شوند. با نفوذ مولکول‌های گاز حل شده در ماتریس پلیمری، سلول‌ها رشد می‌کنند و ساختار سلولی تشکیل می‌شود. در مرحله رشد، می‌بایست محلول پلیمر-گاز تا نزدیکی نقطه انتقال شیشه‌ای گرم شود تا امکان نفوذ گاز به سلول‌های در حال رشد میسر گردد. زمان اشباع‌سازی پلیمر از گاز، فشار گاز، دما و زمان فوم‌سازی، مهمترین عوامل مؤثر بر اندازه و دانسیته فوم نهایی می‌باشند. در این تحقیق از گاز فوق بحرانی نیتروژن به عنوان عامل فوم‌کننده استفاده شد.

گاز نیتروژن در حالت فوق بحرانی خود ($P = 3/4 \text{ MPa}$ و $T = 126 \text{ K}$) از نفوذپذیری بسیار بالایی نسبت به حالت معمول آن برخوردار بوده و به مقدار زیادی در زمینه پلیمری حل می‌شود. از طرفی گاز N_2 ارزان، اشتعال‌ناپذیر، سازگار با محیط زیست می‌باشد. با توجه به دمای بحرانی آرایه شده، گاز N_2 در دمای اتاق، بالای دمای بحرانی خود قرار دارد. بنابراین به منظور ایجاد گاز فوق بحرانی نیتروژن در محیط، کافی است فشار آن به بالای فشار بحرانی افزایش داده شود.

فرآیند فوم شدن نانوکامپوزیت پلیمری به عنوان یک سیستم ناهمگن، مشابه فوم شدن پلیمر خالص می‌باشد، با این تفاوت که در سیستم نانوکامپوزیتی محل‌های شروع هسته‌گذاری به صورت کنترل شده تعریف شده است. هسته‌گذاری در سیستم‌های پلیمر - گاز مهمترین مرحله فرآیند فوم‌سازی می‌باشد [۶]. ساده‌ترین تئوری به منظور بررسی هسته‌گذاری، که در ابتدا برای سیستم همگن پیشنهاد گردید، تئوری هسته‌گذاری کلاسیک می‌باشد. بر



شکل ۱: انواع نانوذرات [۱۰].

می‌باشند؛ نانوذرات سیلیکا، نانو اکسید آلومینیوم و نانو اکسید روی مثال‌هایی از این گروه هستند. نانوذره مورد استفاده در این تحقیق، نانو اکسید آلومینیوم می‌باشد که گروه سوم قرار می‌گیرد. با توجه به این که این نانو ذره در همه ابعاد نانومتری است، بنابراین رشد سلولی از همه جهات‌ها به صورت یکسان پیش می‌رود و منجر به تولید حباب‌های گروهی می‌شود. نانوکامپوزیت‌ها در حالت کلی به سه روش محلولی، مذاب و پلیمریزاسیون آبی تهیه می‌شوند. در این تحقیق از روش محلولی برای تهیه نانوکامپوزیت استفاده شده است. به این صورت که پلیمر در حلال حل و سپس نانو ذرات توسط همزن درون محلول پلیمری مخلوط می‌شوند. پس از انجام فرایند اختلاط، نمونه‌ها تحت فرایندهای تبخیر حلال بر اساس طراحی آزمایش قرار می‌گیرند. فرایند تولید به طور کامل در بخش تهیه نمونه‌های نانوکامپوزیتی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد

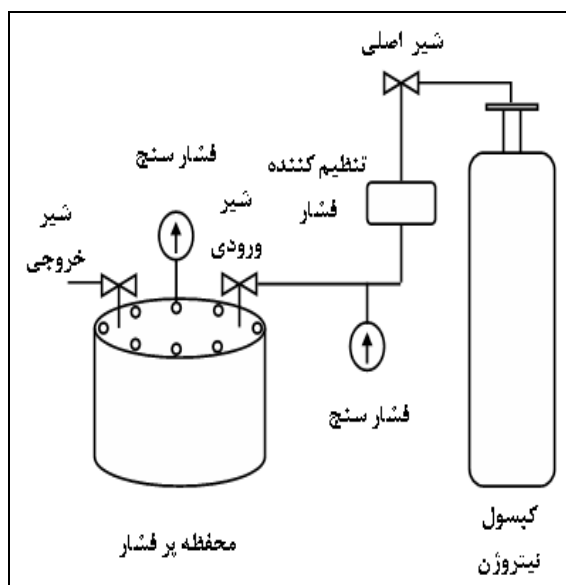
برای تهیه نانوکامپوزیت، پلی‌استایرن عمومی GPPS-1160 پتروشیمی تبریز که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است، مورد استفاده قرار گرفت. نانو ذره اکسید آلومینیوم نانوکامپوزیت به روش محلولی توسط حلال تولوئن

به این منظور دوره جدید مطالعات که امروزه مورد توجه قرار گرفته است، افزودن ذرات آلی، معدنی و یا ذرات فلزی به ماتریس پلیمری می‌باشد. در واقع نوعی هسته‌گذاری مصنوعی در ماتریس پلیمری صورت می‌گیرد و این ذرات، نقش عامل‌های هسته‌ساز را خواهند داشت. تکنولوژی جدیدتر که به تازگی مورد توجه قرار گرفته است، هسته‌گذاری توسط ذرات نانو در ماتریس پلیمری است. از جمله مطالعاتی که در این زمینه صورت گرفته است می‌توان به بررسی فرآیند فوم‌سازی نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن- خاک رس [۷]، مطالعه فرآیند فوم‌سازی نانوکامپوزیت پلی‌کربنات- خاک رس [۸] و بررسی فرآیند فوم‌سازی پلی‌اتیلن سنگین- خاک رس [۹] اشاره نمود. نانوکامپوزیت، به کامپوزیت‌هایی گفته می‌شود که دارای یک فاز (فاز پرکننده) با ابعاد نانومتری باشد. به طور کلی می‌توان نانوذرات را به سه دسته تقسیم نمود که در شکل ۱ نمایش داده شده است. دسته اول نانو ذرات فقط دارای یک بعد نانومتری هستند. این نانوکامپوزیت‌ها دارای ساختار صفحه‌ای شکل هستند که ابعاد صفحه می‌تواند در محدوده چند صد نانومتر تا میکرون باشد در حالی که ضخامت آن کمتر از چند نانومتر است؛ خاک رس مثال بسیار خوبی از این دسته می‌باشد. چنانچه نانوذره دارای دو بعد نانومتری و یک بعد بزرگ‌تر باشد، در دسته دوم قرار می‌گیرد؛ نانولوله‌ها و نانویلیاف‌ها از مثال‌های این گروه هستند. در دسته سوم، نانوذرات دارای سه بعد نانومتری

پس از تهیه این ترکیب، بر اساس طراحی، قطره‌ای به حجم 0.03 سانتی‌متر مکعب بر روی لام قرار داده شد که پس از قرار گرفتن تحت عملیات حرارتی ویژه و جداسازی حلال، بر اساس طراحی نمونه‌ای به قطر 500 میکرومتر و ضخامت 200 میکرومتر حاصل گردید. به منظور بررسی و مقایسه علاوه بر نمونه خالص، سه نانوکامپوزیت با درصد‌های وزنی 0.1 ، 0.2 و 0.5 تهیه شدند و به ترتیب PS-nc 0.1، PS-nc 0.2 و PS-nc 0.5 نام‌گذاری گردیدند.

۳-۲- فرآیند فوم شدن

سیستم مورد استفاده برای مشاهده و مطالعه رفتار هسته‌گذاری و رشد به صورت دینامیکی در شکل ۳ نمایش داده شده است. این سیستم شامل کپسول نیتروژن، محفظه فشار بالا، فشارسنج، تنظیم‌کننده فشار می‌باشد.



شکل ۳: سیستم اشباع‌سازی نمونه‌ها توسط نیتروژن فوق بحرانی.

نمونه‌ها به مدت 48 ساعت در محفظه فشار بالا تحت 50 اتمسفر فشار N_2 قرار داده می‌شود تا از گاز اشباع شود. سپس نمونه‌ها به سرعت از محفظه خارج شده و درون محفظه گرم نصب شده بر روی میکروسکوپ، که در دمای معینی تنظیم شده است، قرار داده می‌شود و در واقع یک

$(C_6H_5-CH_3)$ تهیه گردید که مشخصات این حلال در جدول ۲ گزارش شده است.

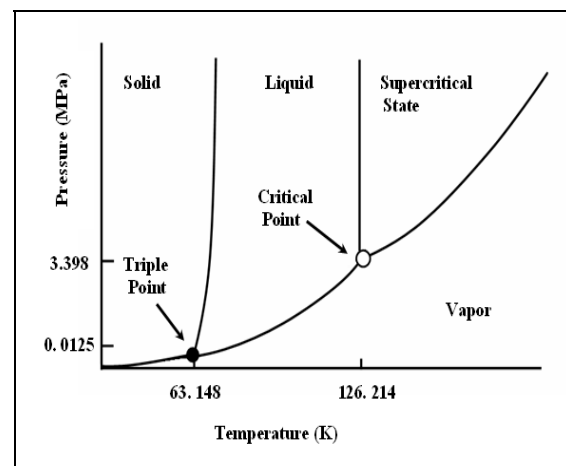
گاز مورد استفاده در این مطالعه که نقش عامل فوم‌کننده فیزیکی را دارد، نیتروژن دارای خلوص 99.99% می‌باشد. نمودار فازی گاز نیتروژن در شکل ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۱: مشخصات پلی‌استایرن GPPS-1160.

مقدار	خواص
$1.03 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$	دانسیته (ρ)
$3/3 \times 10^{-2} \text{ Nm}^{-1}$	کشش سطحی (γ)
$3/90.23 \times 10^6 \text{ Nsm}^{-3}$	ویسکوزیته اولیه (η_0)
$2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	ضریب نفوذ (D)
$1/96 \times 10^8 \text{ Nm}^{-2}$	ثابت هنری (k)

جدول ۲: مشخصات تولوئن 4230.

مقدار	خواص
$0.87 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$	دانسیته (ρ)
$9.214 \times 10^{-2} \text{ kgcm}^{-3}$	وزن مولکولی (M)
> 99	(%) خلوص

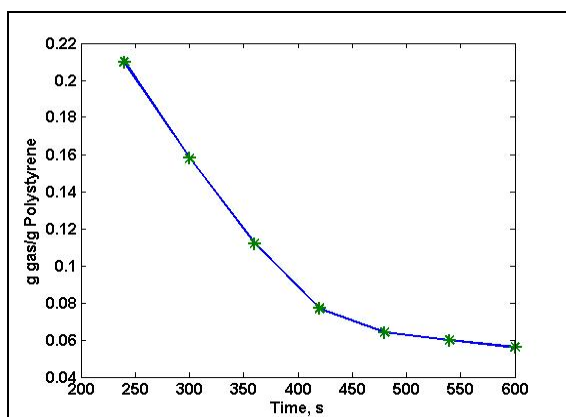


شکل ۲: نمودار فازی نیتروژن فوق بحرانی.

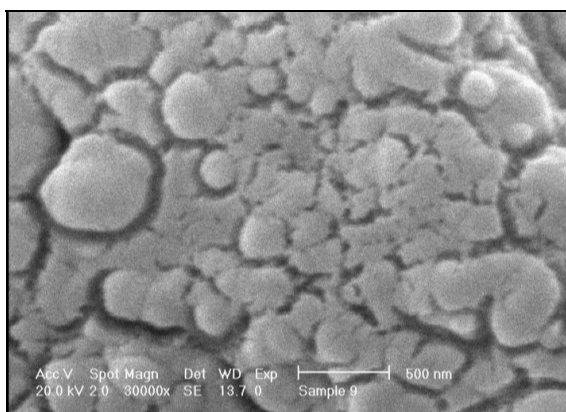
۲-۲- ساخت نانوکامپوزیت

در این تحقیق نانوکامپوزیت به روش محلولی تهیه گردید. به این صورت که در ابتدا محلول 20% وزنی پلی‌استایرن در تولوئن تهیه گردید. سپس ذرات نانو اکسید آلومینیوم توسط همزن پروانه‌ای به طور کامل در آن توزیع گردید.

به پلیمر اندازه حباب‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. همچنین نتایج حاصل نشان می‌دهند که با افزایش درصد ذرات نانو، اندازه نهایی کاهش می‌یابد. حضور ذرات نانو، غلظت گاز در ماتریس پلیمری را به علت افزایش میزان هسته‌گذاری کاهش می‌دهد. همچنین، سبب کاهش نفوذپذیری گاز در ماتریس پلیمری می‌شود. این دو فاکتور سبب کاهش نرخ رشد در درصدهای بیشتر نانوذره نیز می‌شود.



شکل ۴: اندازه‌گیری نرخ دفع گاز نیتروژن در پلی‌استایرن در فشار ۵۰ اتمسفر.



شکل ۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی فوم پلی‌استایرن.

اندازه متوسط حباب‌ها در پلی‌استایرن خالص و نانوکامپوزیت ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد به ترتیب برابر ۳۱۰، ۹۲، ۷۰ و ۳۸ نانومتر می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن ذرات نانو و توزیع یکدست آنها در ماتریس پلیمری، می‌توان اندازه نهایی حباب‌ها را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش داد و فوم میکروسلولی را به فوم نانوسلولی تبدیل نمود.

تغییر آنی ترمودینامیکی در آن صورت می‌گیرد، هسته‌ها تشکیل شده و با نفوذ گاز به درون آنها رشد می‌کنند.

۳- نتایج و بحث

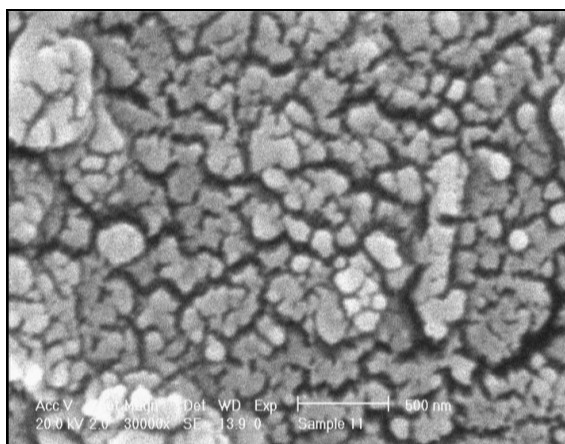
۳-۱- اندازه‌گیری نرخ دفع گاز و تعیین فشار مطلوب

منحنی تغییرات وزن نمونه پلی‌استایرن اشباع شده از گاز نیتروژن در زمانهای متوالی و به ازای هر ۶۰ ثانیه، در شکل ۴ ارائه شده است. منحنی عمودی نسبت وزن گاز حل شده در نمونه به وزن نمونه و منحنی افقی زمان دفع را نشان می‌دهد. اولین زمان قابل اندازه‌گیری زمان پس از خروج از مخزن فشار بالا و قرارگیری درون ترازوی دیجیتال می‌باشد که حدود ۲۴۰ ثانیه است و اندازه‌گیری تا زمان بدون تغییر وزن ادامه می‌یابد. با توجه به شکل ارائه شده، ماکزیمم میزان حلالیت گاز نیتروژن ۰/۲۲ گرم در هر گرم پلی‌استایرن می‌باشد. همچنین مهمترین نکته کاربردی این نمودار، زمان دفع گاز از ماتریس پلیمری است. با توجه به شکل، پس از ۱۰ دقیقه (۶۰۰ ثانیه)، در ضخامت نمونه‌های مورد آزمایش و فشار اشباع ۵۰ اتمسفر، گاز نیتروژن به صورت کامل از پلیمر خارج می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده فرصت بسیار کوتاه برای انجام فرآیند ابرسازی و حساسیت بالای این مطالعه است. در بحث انتخاب فشار ۵۰ اتمسفر، با توجه به شکل ۲، نمودار فازی نیتروژن، باید در نظر داشت که به منظور داشتن گاز نیتروژن فوق بحرانی، می‌بایست بالاتر از فشار ۳/۴ مگاپاسکال و یا حدود ۴۰ اتمسفر کار کنیم. همچنین بررسی‌ها نشان داد که در فشارهای بالاتر از ۵۰ اتمسفر نیز میزان گاز حل شده چندان بیشتر از این فشار نیست و فشار ۵۰ اتمسفر یک فشار بهینه می‌باشد.

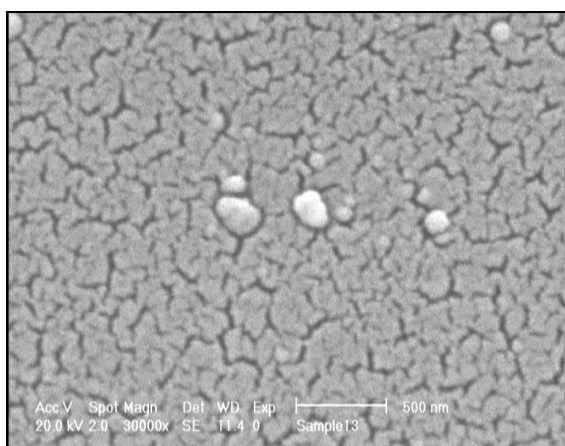
۳-۲- نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی

تصویرهای میکروسکوپ الکترونی (SEM) فوم پلی‌استایرن خالص و نانوکامپوزیت‌های مختلف ۰/۱٪، ۰/۲٪ و ۰/۵٪ در شکل‌های ۵ تا ۸ نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، کلیه عکس‌ها در مقیاس ۵۰۰ نانومتر می‌باشند. مشاهده می‌شود که با افزودن ذرات نانو

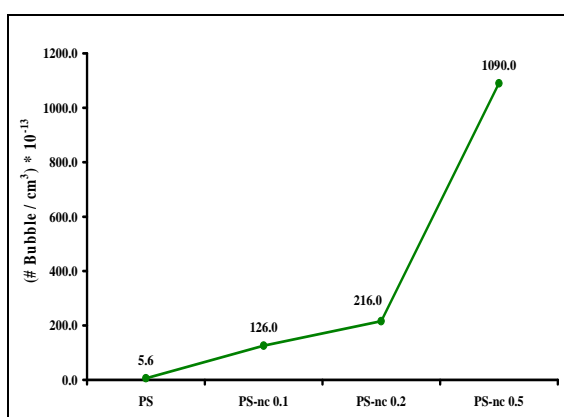
بر اساس کشش سطحی نانوکامپوزیت در شکل ۱۲ ترسیم شده است.



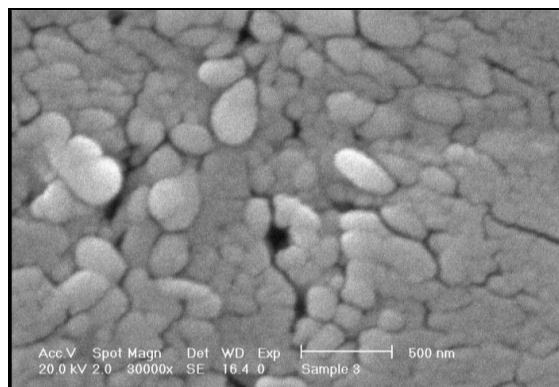
شکل ۷: تصویر میکروسکوپ الکترونی فوم نانوکامپوزیت ۰/۲٪.



شکل ۸: تصویر میکروسکوپ الکترونی فوم نانوکامپوزیت ۰/۵٪.



شکل ۹: منحنی تغییرات دانسیته حباب‌ها در نمونه‌های مختلف فوم در دمای ۱۴۰ °C.



شکل ۶: تصویر میکروسکوپ الکترونی فوم نانوکامپوزیت ۰/۱٪.

همچنین با توجه به شکل‌های ۵ تا ۸، مشاهده می‌شود که اندازه حباب‌ها در فوم‌های نانوکامپوزیتی بسیار یکنواخت‌تر از فوم خالص می‌باشد و توزیع و یکنواختی آنها را نسبت به پلی‌استایرن خالص به روشنی می‌توان دید.

۳-۳ اثر تغییر درصد ذرات نانو و تغییرات دما

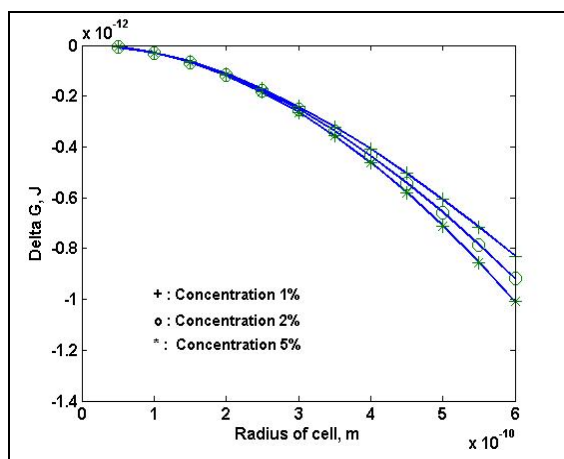
منحنی تغییرات تعداد حباب‌ها به ازای واحد حجم، دانسیته، نمونه‌های مختلف فوم، به تفکیک دمای فوم‌سازی، در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نمایش داده شده است. با توجه به نمودارهای دانسیته دماهای ۱۸۰-۱۴۰ °C می‌توان گفت: با افزودن نانوذرات به پلی‌استایرن، دانسیته حباب‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. به طوری که بیشترین دانسیته پلی‌استایرن حدود $5/6 \times 10^{14}$ حباب بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد که این میزان به $5/66 \times 10^{17}$ حباب بر سانتی‌متر مکعب در نمونه نانوکامپوزیت ۰/۵ درصد افزایش می‌یابد. به این ترتیب، دانسیته حباب‌ها حدود ۱۰۰۰ مرتبه در نمونه نانوکامپوزیت زیاد شده است. به علاوه، با افزایش درصد ذرات نانو از ۰/۱ به ۰/۵ درصد، دانسیته حباب‌ها افزایش یافته که با افزایش دما از ۱۴۰ °C به ۱۸۰ °C، نمونه‌های نانوکامپوزیتی بیشتر شده است.

۳-۴ نتایج محاسبات رایانه‌ای

منحنی تغییرات شعاع بحرانی هسته‌گذاری پیش‌بینی شده توسط تئوری کلاسیک (رابطه ۳) در فشارهای مختلف و

در شکل ۱۳ تغییرات انرژی آزاد گیبس نسبت به تغییرات شعاع در غلظت‌های مختلف گاز اشباع با استفاده از رابطه مدلسازی شده به کمک برنامه رایانه‌ای MATLAB در غلظت‌های مختلف گاز اشباع رسم شده است.

با توجه به شکل، مقدار تغییرات انرژی آزاد گیبس منفی است که با توجه به رابطه‌های ترمودینامیکی انحلال، دلیل بر خودبخودی بودن واکنش است.



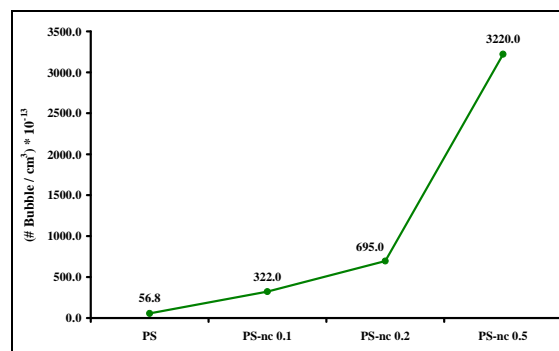
شکل ۱۳: اندازه‌گیری تغییرات انرژی آزاد نانوکامپوزیت با تغییرات شعاع.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج زیر در این پژوهش حاصل گردید:

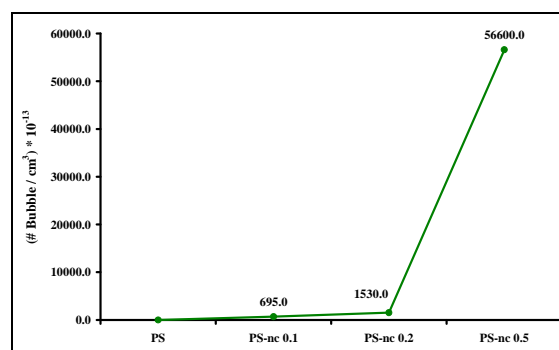
الف- با افزودن نانوذرات به ماتریس پلی‌استایرن، هسته‌گذاری به صورت مصنوعی صورت می‌گیرد و ذرات نانو به عنوان نقاط پر انرژی عمل می‌کنند. در این صورت با توزیع یکنواخت ذرات نانو، هسته‌گذاری از تمام سطح نمونه و به صورت یکنواخت شروع می‌شود و نمونه نانوکامپوزیتی به صورت کامل فوم می‌شود. در نتیجه نمونه فوم شده حاصل از پلی‌استایرن خالص، دارای ساختار یکنواخت‌تری است. با افزایش درصد نانوکامپوزیت اندازه حباب‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد.

ب- نمودارهای آنالیز تصویری میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که پراکندگی اندازه حباب‌ها در نمونه‌های نانو کامپوزیتی، بسیار کمتر از پراکندگی در نمونه خالص است.

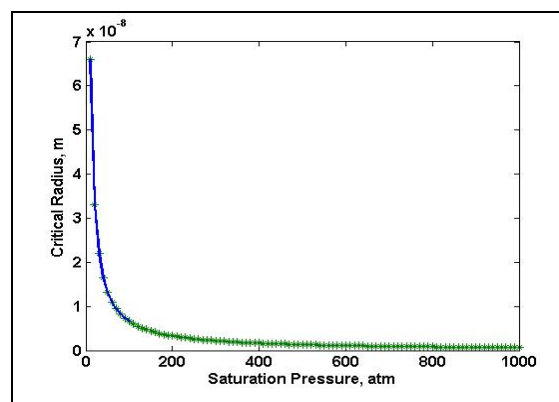


شکل ۱۰: منحنی تغییرات دانسیته حباب‌ها در نمونه‌های مختلف فوم در دمای ۱۶۰ °C.

مشاهده می‌شود که شعاع بحرانی هسته‌گذاری، با افزایش فشار اشباع، کاهش می‌یابد. یعنی در واقع حباب‌ها برای رسیدن به پایداری مسیر کوتاه‌تری را طی می‌کنند و حد پایداری با افزایش فشار کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه ۳ برای کاهش حد بحرانی، یا می‌بایست کشش سطحی ترکیب کاهش یابد و یا فشار اشباع افزایش یابد.



شکل ۱۱: منحنی تغییرات دانسیته حباب‌ها در نمونه‌های مختلف فوم در دمای ۱۸۰ °C.



شکل ۱۲: اندازه‌گیری تغییرات شعاع بحرانی با تغییرات فشار اشباع.

و کارشناسان محترم آزمایشگاههای پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، دانشگاه تربیت مدرس و تمام افرادی که ما را در انجام این پروژه یاری نمودند تشکر و قدردانی نمائیم.

مراجع

- [1] J.E. Martini-Vvedensky, N.P. Suh, F.A. Waldman, U.S. Patent 4,473,665 (1984).
- [2] J. Martini, F.A. Waldman, N.P. Suh, *Special ANTEC Technical Papers*, **28**, 1982, 647.
- [3] D.I. Collias, D.G. Baird, *Polymer Engineering and Science*, **35**, 1995, 1179.
- [4] K.A. Seeler, V. Kumar, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **12**, 1993, 359.
- [5] J.S. Colton, N.P. Suh, *Polymer Engineering and Science*, **27**, 1987, 493.
- [6] A.N. Gent, D.A. Tomkins, *Journal of Applied Physics*, **40**, 1969, 2520.
- [7] P.H. Nam, P. Maiti, M. Okamoto, T. Kotaka, T. Nayama, M. Takada, M. Ohshima, A. Usuki, N. Hasega, H. Okamoto, *Polymer Engineering and Science*, **42**, 2002, 1907.
- [8] M. Mitsunaga, Y. Ito, S.S. Ray, M. Okamoto, K. Ronaka, *Macromolecule Material Engineering*, **288**, 2003, 548.
- [9] K.H. Wang, Y.H. Lee, C.B. Park, ANTEC Technical Papers, **41**, 2004, 2510.
- [10] L. J. Lee, C. Zeng, X. Cao, X. Han, J. Shen, G. Xu, *Composite Science and Technology*, **65**, 2005, 2345.

و این امر خود دلیل بر یکنواختی ساختار در نمونه‌های نانوکامپوزیتی است.

پ- ذرات نانو Al_2O_3 ، موجب کاهش اندازه حباب‌ها گردیدند. همچنین نرخ رشد حباب‌ها با افزایش درصد این نانوذرات کاهش یافت. در واقع حضور این ذرات غلظت گاز در زمینه پلیمری را از طریق افزایش هسته‌گذاری، کاهش می‌دهند. همچنین، نانوذرات Al_2O_3 ، نفوذپذیری گاز در زمینه پلیمر را کاهش می‌دهند. این دو مشخصه موجب کاهش نرخ رشد در زمینه پلیمری می‌شود.

ت- اندازه حباب‌ها در فوم‌های نانوکامپوزیتی بسیار یکنواخت‌تر از فوم خالص می‌باشد. همچنین توزیع و یکنواختی نسبت به پلی‌استایرن خالص بسیار بیشتر است.

سپاسگزاری

وظیفه خود می‌دانیم از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد داراب جهت تامین اعتبار این طرح پژوهشی به کد مشخصه ۵۱۶۸۴۸۷۰۷۲۷۰۰۱، مسئولین