



مقدمه‌ای بر فوم‌های پلیمری

خواص و روش‌های تولید

تدوین و گردآوری

عبدالحسین فریدون

(دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان)

علی محی‌الدین

(کارشناس ارشد مکانیک)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه سمنان

مقدمه‌ای بر فوم‌های پلیمری

خواص و روش‌های تولید

تدوین و گردآوری: دکتر عبدالحسین فریدون
(دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان)

مهندس علی محی‌الدین

(کارشناس ارشد مکانیک)

کتابفروشی مسردانش
سفارش ۶۶۴۹۳۷۰۱ ارسال

آنچه با شنیدن واژه پلاستیک در ذهن اکثر افراد نقش می‌بندد جسمی کم‌ارزش و ارزان قیمت است، در حالیکه اگر نگاهی گذرا به اطراف خود بیندازیم متوجه وابستگی روزافزون زندگی امروز به مواد پلاستیکی خواهیم شد. نقطه ذوب پایین در مقایسه با فلزات و تنوع فوق‌العاده در خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی، پلاستیک را در کانون توجه بسیاری از صنایع و مراکز تحقیقاتی در دهه‌های اخیر قرار داده است. اگرچه عنوان کلی پلاستیک برای هر ماده آلی با منشأ مصنوعی یا نیمه‌مصنوعی که قابلیت شکل‌پذیری تحت فشار و یا حرارت را داشته باشد قابل استفاده است ساختار زنجیره‌ای تکرارپذیر پلاستیک‌ها آنها را در زمره خانواده بزرگتری از مواد به نام بسپار یا پلیمر قرار می‌دهد. امروزه می‌توان حضور مواد پلیمری را در تولید چسب‌ها، رنگ‌ها، ظروف عایق، مواد و تجهیزات پزشکی، قطعات وسایل نقلیه، قایق‌ها، آلات موسیقی، وسایل منزل، اسباب بازی، یراق‌آلات ساختمانی و غیره مشاهده نمود. در این میان، فوم‌های پلیمری یا پلیمرهای متخلخل به دلیل دارا بودن خواص فیزیکی و مکانیکی منحصر بفرد نظیر سبکی، چقرمگی و انعطاف‌پذیری بالا از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند. اولین نمونه فوم پلیمری بر پایه پلی‌استایرن در سال ۱۹۳۱ تولید شد. پس از آن اتو بایر و همکارانش در ۱۹۳۷ به دانش تولید فوم پلی‌اورتان دست یافتند. پس از پشت سر گذاشتن مشکلات پیش روی صنایع گوناگون از جمله صنعت نوپای فوم‌سازی در اثنای جنگ جهانی دوم، با ابداع فوم پلی‌اورتان نرم، تولید تجاری فوم‌های پلیمری وارد مرحله جدیدی شد، بطوریکه در سال ۱۹۵۴ برای نخستین بار از این فوم در خودروسازی و تولید مبلمان استفاده شد. با وجود آنکه ابداع روش‌های نوین تولید همچون قالبگیری تزریقی و اکستروژن نقش بسزایی در توسعه صنعت فوم‌سازی در دو دهه بعد داشت انتخاب عامل حباب‌زای سازگار با محیط زیست همواره یکی از مشکلات پیش روی این صنعت بوده است. سالهای دهه ۸۰ میلادی تا کنون را می‌توان دوره

گسترش کاربردهای فوم و نفوذ آن در بازارهای مختلف بویژه تولید قطعات وسایل نقلیه، ساختمان‌سازی، حمل‌ونقل، تجهیزات نظامی، لوازم پزشکی، ورزشی و خانگی دانست. تنوع در روشهای تولید فوم‌های پلیمری موجب شده تا بتوان تقریباً هر پلیمری را به فوم با چگالی و خواص موردنظر تبدیل نمود، این در حالی است که فوم‌های فلزی بدلیل نقطه ذوب بالا محدود به آلومینیوم و فلزات معدودی چون آهن، نیکل و سرب می‌باشند. مزایایی همچون وزن بسیار کم، هزینه تولید پایین، گستره وسیع چگالی، مقاومت شیمیایی بالا، تنوع در رنگ و طرح و انتقال صدا و حرارت ناچیز باعث رشد فزاینده بازار فوم‌های پلیمری در مقایسه با فوم‌های فلزی شده است.

علیرغم گستردگی خواص و کاربردهای بالقوه فوم‌های پلیمری در صنایع مختلف که ناشی از تنوع در خواص پلیمرها و روشهای تولید است دامنه فعالیت‌های تحقیقاتی و صنعتی انجام گرفته در این زمینه هنوز فاصله زیادی با کشورهای توسعه یافته دارد که نبود منبع فارسی در این حوزه را می‌توان از مصادیق آن دانست. لذا کتاب حاضر برای استفاده دانشجویان و علاقه‌مندان به مبحث فوم‌های پلیمری و با هدف آشنایی مقدماتی آنها با انواع فوم‌های پلیمری، خواص و روش‌های معمول تولید آنها تألیف شده است. امید است این کتاب بتواند ضمن تأمین بخشی از اطلاعات مورد نیاز مخاطبین، موجبات رشد سرمایه‌گذاری و نوآوری در بازار تولید و مصرف فوم‌های پلیمری در کشور را فراهم نماید.

فهرست عناوین

فصل ۱- عوامل حباب‌زا

- ۱.....مقدمه
- ۳..... ۱- عوامل حباب‌زای فیزیکی (PBA)
- ۳..... ۱-۱- معیارهای انتخاب عامل حباب‌زا
- ۳..... ۲-۱- هیدروکربن‌های هالوژن‌دار
- ۴..... ۱-۲-۱- کلروفلوئوروکربن
- ۵..... ۱-۲-۲- هیدروکلروفلوئوروکربن‌ها (HCFC)
- ۶..... ۱-۲-۳- هیدروفلوئوروکربن‌ها (HFC)
- ۷..... ۳-۱- هیدروکربن‌ها
- ۸..... ۴-۱- گازهای بی‌اثر
- ۱۱..... ۵-۱- سایر عوامل حباب‌زای فیزیکی
- ۱۱..... ۶-۱- مخلوط عوامل حباب‌زای فیزیکی
- ۱۲..... ۲- عوامل حباب‌زای شیمیایی (CBA)
- ۱۲..... ۱-۲- معیارهای انتخاب عامل حباب‌زای شیمیایی
- ۱۳..... ۲-۲- عوامل حباب‌زای گرمازا
- ۱۳..... ۲-۳- عوامل حباب‌زای گرماگیر
- ۱۵..... منابع

فصل ۲- فوم‌های گرمانرم

- ۱۷.....مقدمه
- ۱۸..... ۱- فوم‌های صلب (سازه‌ای)
- ۱۹..... ۱-۱- فوم پی‌وی‌سی (PVC) صلب
- ۲۰..... ۱-۱-۱- روش تولید
- ۲۵..... ۱-۱-۲- ترکیبات فوم PVC
- ۳۲..... ۱-۱-۳- خواص
- ۳۴..... ۲-۱- فوم پلی‌کربنات (PC)
- ۳۵..... ۳-۱- فوم ABS

۳۶	۲- فوم‌های نیمه صلب.....
۳۶	۱-۲- فوم‌های پلی‌اولفینی.....
۳۷	۲-۱-۱- فوم پلی‌اتیلن با چگالی پایین (LDPE).....
۳۸	۲-۱-۲- فوم پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE).....
۳۸	۲-۱-۳- فوم پلی‌پروپیلن (PP).....
۳۸	۲-۲- فوم پلی‌استایرن انبساطی (EPS).....
۳۸	۲-۲-۱- روش تولید EPS.....
۴۰	۲-۲-۲- خواص EPS.....
۴۲	۲-۲-۳- کاربردهای EPS.....
۴۳	۲-۳- فوم پلی‌استایرن اکسترود شده (XPS).....
۴۳	۲-۴- فوم PVC نرم.....
۴۴	۲-۴-۱- انواع فوم PVC نرم.....
۴۸	۲-۴-۲- کاربردها.....
۵۰	منابع.....

فصل ۳- فوم‌های گرماسخت

۵۵	مقدمه.....
۵۶	۱- فوم پلی‌اورتان صلب (RPF).....
۵۷	۱-۱- مواد تشکیل دهنده.....
۵۷	۱-۱-۱- پلیول.....
۵۸	۱-۱-۲- ایزوسیانات‌ها.....
۵۹	۱-۲- عوامل حباب‌زا.....
۶۱	۱-۳- روش‌های تولید.....
۶۱	۱-۴- خواص.....
۶۳	۱-۵- کاربردها.....
۶۳	۲- فوم پلی‌اورتان نرم (FPF).....
۶۴	۱-۲- مواد تشکیل دهنده.....
۶۴	۱-۲-۱- ایزوسیانات.....
۶۵	۱-۲-۲- پلیول.....

۶۵	۲-۱-۳- آب
۶۶	۲-۱-۴- اصلاح کننده سطحی
۶۶	۲-۱-۵- فعال کننده
۶۷	۲-۱-۶- ضد اکسنده
۶۷	۲-۱-۷- پایدار کننده
۶۷	۲-۱-۸- ضد حریق
۶۷	۲-۲- روش های تولید
۶۸	۲-۲-۱- آماده کردن شرایط و مواد اولیه
۶۸	۲-۲-۲- اختلاط
۶۹	۲-۲-۳- انبساط
۶۹	۲-۲-۴- باز شدن حفره ها
۶۹	۲-۳- خواص
۷۰	۲-۳-۱- سختی
۷۰	۲-۳-۲- فنریت
۷۱	۲-۳-۳- تخلخل
۷۱	۲-۳-۴- پایداری خواص
۷۲	۲-۳-۵- خستگی
۷۲	۲-۳-۶- فشردگی
۷۲	۲-۳-۷- اشتعال پذیری
۷۲	۲-۴- کاربردها
۷۳	منابع

فصل ۴- فوم های ترکیبی

۷۷	مقدمه
۷۸	۱- روش تولید میکروکره ها
۷۹	۲- روش تولید فوم ترکیبی
۸۰	۳- خواص
۸۲	۴- کاربردها
۸۲	۵- محاسبه میزان تخلخل فوم های ترکیبی

منابع..... ۸۳

فصل ۵- فوم‌های ریزسلولی

مقدمه..... ۸۵

۱- مزایا و کاربردها..... ۸۶

۲- خواص مکانیکی..... ۸۷

۳- روش‌های تولید فوم‌های ریزسلولی..... ۸۹

۳-۱- روش توده‌ای حالت جامد..... ۸۹

۳-۲- روش نیمه پیوسته..... ۹۳

۳-۳- تزریق گاز در مذاب پلیمر..... ۹۴

۳-۴- اکستروژن پلیمر اشباع شده..... ۹۵

۳-۵- سایر روش‌ها..... ۹۶

۴- کنترل ساختار فوم ریزسلولی..... ۹۷

۴-۱- فشار مخزن..... ۹۷

۴-۲- مدت زمان انحلال گاز..... ۹۸

۴-۳- دمای تولید فوم..... ۱۰۰

۴-۴- مدت زمان تولید فوم..... ۱۰۲

۵- توزیع چگالی در فوم ریزسلولی..... ۱۰۲

منابع..... ۱۰۵

فصل ۶- فوم‌های نانوکامپوزیتی

مقدمه..... ۱۰۹

۱- روش‌های تولید فوم نانوکامپوزیتی..... ۱۱۱

۱-۱- تولید نانوکامپوزیت..... ۱۱۱

۱-۱-۱- انحلال..... ۱۱۳

۱-۱-۲- اختلاط مذاب..... ۱۱۴

۱-۱-۳- پلیمرسازی درجا..... ۱۱۵

۲- نمونه‌هایی از فوم نانوکامپوزیت..... ۱۱۶

۲-۱- فوم نانوکامپوزیت PP..... ۱۱۶

۲-۲- فوم نانوکامپوزیت PC..... ۱۲۱

۳- خواص مکانیکی فوم‌های نانوکامپوزیتی..... ۱۲۴

منابع..... ۱۲۵

فصل ۷- آزمون‌های مکانیکی

مقدمه..... ۱۲۷

۱- سختی و مقاومت سازه‌ای..... ۱۲۸

۲- پاسخ تنش - کرنش..... ۱۳۱

۱-۲- الاستیک خطی و ایزوتروپیک..... ۱۳۱

۲-۲- الاستیک غیرخطی و ایزوتروپیک..... ۱۳۲

۳-۲- الاستیک و غیرایزوتروپیک..... ۱۳۲

۴-۲- الاستیک - پلاستیک..... ۱۳۲

۵-۲- الاستیک ترد..... ۱۳۲

۶-۲- ویسکوالاستیک..... ۱۳۲

۷-۲- خواص وابسته به دما..... ۱۳۳

۳- انواع آزمون‌ها..... ۱۳۵

۱-۳- آزمون فشاری تک محوره..... ۱۳۶

۳-۱-۱- شکل و ابعاد نمونه..... ۱۳۶

۳-۱-۲- تأثیر سرعت بارگذاری..... ۱۳۸

۳-۲- آزمون برش ساده..... ۱۳۸

۳-۲-۱- تحلیل تقریبی با فرض میدان تنش برشی یکنواخت..... ۱۳۸

۳-۲-۲- توزیع تنش در کرنش برشی بالا..... ۱۳۹

۳-۲-۳- آزمون برش تیرهای ساندویچی..... ۱۳۹

۳-۳- آزمون خمش..... ۱۳۹

۳-۴- آزمون فوم‌های با چگالی گرادیانی..... ۱۴۱

۳-۴-۱- آزمون کشش..... ۱۴۱

۳-۴-۲- آزمون فشار..... ۱۴۱

۳-۴-۳- آزمون خمش..... ۱۴۱

۴- تجهیزات آزمون‌ها..... ۱۴۲

۴-۱- ضربه فشاری..... ۱۴۲

۱۴۳	۲-۴- ضربه برشی
۱۴۴	۳-۴- خزش
۱۴۵	۴-۴- نشست فشاری
۱۴۶	۵-۴- نسبت پواسون
۱۴۸	منابع

فصل ۸- استانداردها

۱۴۹	مقدمه
۱۴۹	۱- فرسایش
۱۵۰	۲- مقاومت در برابر جریان هوا
۱۵۰	۱-۲- استاندارد ASTM C522
۱۵۱	۲-۲- استاندارد ASTM C384
۱۵۱	۳-۲- استاندارد ASTM D3574-Test G
۱۵۱	۳- ابعاد حفره‌ها
۱۵۲	۴- خواص احتراقی
۱۵۲	۱-۴- استاندارد ASTM D2843
۱۵۴	۲-۴- استاندارد ASTM D2863
۱۵۵	۳-۴- استاندارد ASTM D3014
۱۵۵	۴-۴- استاندارد ASTM D3675
۱۵۶	۵-۴- استاندارد ASTM E84
۱۵۶	۶-۴- استاندارد ASTM E162
۱۵۷	۷-۴- استاندارد ASTM E906
۱۵۷	۵- خواص فشاری
۱۵۷	۱-۵- استاندارد ASTM D3574- Test C
۱۵۷	۲-۵- استاندارد ASTM D3574- Test D
۱۵۸	۳-۵- استاندارد ASTM D3574- Test B1
۱۵۸	۴-۵- استاندارد ASTM D3574- Test B2
۱۵۹	۶- خستگی
۱۶۰	۷- خواص خمشی

- ۱۶۰..... ۸- مقاومت به ضربه (مخصوص فوم‌های صلب)
- ۱۶۰..... ۹- درصد حفره‌های باز
- ۱۶۰..... ۱۰- قابلیت ارتجاع
- ۱۶۱..... ۱۱- مقاومت به پارگی
- ۱۶۱..... ۱۲- آزمون کشش
- ۱۶۱..... ۱-۱۲- استاندارد ASTM D3574 - Test E
- ۱۶۲..... ۲-۱۲- استاندارد ASTM D1623
- ۱۶۳..... ۱۳- جذب رطوبت
- ۱۶۳..... ۱۴- عبور بخار آب
- ۱۶۳..... ۱۵- چگالی
- ۱۶۴..... منابع

فصل ۹- تئوری و مدل‌سازی

- ۱۶۷..... مقدمه
- ۱۶۹..... ۱- فوم حفره‌باز
- ۱۷۱..... ۲- فوم حفره‌بسته
- ۱۷۵..... ۳- مدل‌های نامنظم
- ۱۷۷..... ۴- بررسی تأثیر گاز درون حفره
- ۱۷۷..... منابع
- ۱۸۰..... فهرست علائم اختصاری

فصل ۱

عوامل حباب‌زا

مقدمه

هر ماده‌ای که در پلیمر ایجاد تخلخل کند به عنوان عامل حباب‌زا شناخته می‌شود. عوامل حباب‌زا بطور کلی به دو دسته فیزیکی و شیمیایی طبقه‌بندی می‌شوند. عامل حباب‌زای فیزیکی عموماً یک مایع یا گاز (در دما و فشار استاندارد) است که با تغییر شرایط دمایی و فشاری، تغییر حالت فیزیکی می‌یابد. عامل حباب‌زای شیمیایی عموماً یک ماده جامد (در دما و فشار استاندارد) است که در اثر حرارت یا واکنش شیمیایی، گاز آزاد می‌کند. یکی از موارد استثنا در این طبقه‌بندی، آب است که در نتیجه واکنش شیمیایی با ایزوسیانات، دی‌اکسیدکربن آزاد می‌کند. عامل حباب‌زا نقش بسیار مهمی در زمینه تولید و نحوه عملکرد فوم ایفا می‌کند، زیرا علاوه بر اینکه عامل اصلی در کنترل چگالی فوم می‌باشد بر ساختار تخلخل و هندسه حفره‌ها نیز تأثیر می‌گذارد. از نظر ساختار تخلخل، فوم‌های پلیمری به دو دسته حفره‌باز و حفره‌بسته قابل طبقه‌بندی هستند. فوم‌های حفره‌باز شامل شبکه‌ای از حفره‌های مرتبط به هم هستند که هوا می‌تواند از میان آنها عبور کند، در

حالی که فوم‌های حفره‌بسته از حفره‌های بسته‌مملو از گاز تشکیل شده‌اند. فوم‌های حفره‌بسته چگالی بالاتر، پایداری ابعادی بیشتر، رطوبت‌گیری کمتر و مقاومت بیشتری نسبت به فوم‌های حفره‌باز دارند. معمولاً از فوم‌های حفره‌باز جهت عایق‌بندی صوتی و از فوم‌های حفره‌بسته جهت عایق‌بندی حرارتی استفاده می‌شود. در فوم‌های حفره‌بسته، ماندگاری عامل حباب‌زا تعیین‌کننده‌ی عمر مفید فوم است، چراکه باید تا زمان پخش شدن به محیط یا فاسد شدن در داخل حفره‌ها باقی بماند. در بعضی کاربردها مانند بسته‌بندی و ضربه‌گیری که از فوم با ساختار سلولی باز استفاده می‌شود لازم است که عامل حباب‌زا پس از تشکیل فوم به سرعت از آن خارج شود. مسلماً عامل حباب‌زا در کاربردهای دیگر همچون شناورسازی، ضربه‌گیری و باربرداری بی‌تأثیر نیست.

کلروفلوئوروکربن به دلیل انحلال‌پذیری بالا از پرکاربردترین عوامل حباب‌زای فیزیکی محسوب می‌شد که استفاده از آن به دلیل آسیب رساندن به لایه‌ی اوزون از سال ۲۰۱۰ ممنوع شده است. گازهای بی‌اثر مانند دی‌اکسیدکربن (CO_2) و نیتروژن (N_2) امروزه جایگزین کلروفلوئوروکربن‌ها شده‌اند. ولی حلالیت پایین و ضریب نفوذ بالای این گازها در پلیمر موجب دشواری در کنترل ساختار فوم شده است. دی‌اکسیدکربن که از واکنش آب و ایزوسیانات بدست می‌آید عامل حباب‌زای معمول در تولید فوم پلی‌اورتان (PU) است. مایعات با نقطه‌ی جوش پایین مانند کلرید متیل و بوتیلن را می‌توان جزء اولین عوامل حباب‌زای مورد استفاده در تولید فوم‌های ترموپلاستیک مانند پلی‌استایرن (PS) برشمرد [۱-۳]. همزمان با رشد بازار فوم‌های پلیمری از نظر تعداد و تنوع، فناوری تولید عوامل حباب‌زا نیز به پیشرفت‌های چشمگیری دست یافت. با وجود رشد تعداد و تنوع عوامل حباب‌زا همزمان با رشد بازار فوم‌های پلیمری، تمام عوامل حباب‌زا را می‌توان بسته به نحوه‌ی عملکرد، در یکی از دو دسته‌ی فیزیکی و شیمیایی جای داد. در این فصل ضمن معرفی عوامل حباب‌زای مربوط به هر دسته، خواص و معیارهای انتخاب هر کدام نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱- عوامل حباب‌زای فیزیکی (PBA)^۱

عوامل حباب‌زای فیزیکی با تغییر حالت فیزیکی، گاز لازم برای انبساط پلیمر را تولید می‌کنند. این تغییر می‌تواند تبخیر یا جوشش یک مایع و یا آزاد شدن گاز فشردهٔ محلول در پلیمر در نتیجهٔ افزایش دما یا کاهش فشار باشد. از عوامل حباب‌زای مایع می‌توان به هیدروکربن‌های آلیفاتیک^۲ (چربی‌دار) با زنجیرهٔ کوتاه (C₅ تا C₇) یا هالوژن‌دار (C₁ تا C₄) اشاره نمود. عوامل حباب‌زای گازی معمول نیز شامل دی‌اکسیدکربن، نیتروژن، هیدروکربن‌های آلیفاتیک با زنجیرهٔ کوتاه (C₂ تا C₄) و هیدروکربن‌های هالوژن‌دار (C₁ تا C₄) می‌باشد [۱]. عوامل حباب‌زای فیزیکی در تولید انواع فوم‌های ترموپلاستیک و ترموست با چگالی نسبی دلخواه قابل استفاده هستند.

۱-۱- معیارهای انتخاب عامل حباب‌زا

عوامل متعددی باید در زمان انتخاب عامل حباب‌زا مد نظر قرار گیرند. برخی از این عوامل همچون سازگاری با محیط زیست (از جمله میزان تأثیر بر لایه اوزون، گرم شدن کرهٔ زمین، میزان هالوژن، قابلیت اسیدی کردن و مواد ناشی از تجزیه در دراز مدت)، میزان سمی بودن، اشتعال‌پذیری، سازگاری با دیگر مواد تشکیل دهندهٔ فوم و صرفهٔ اقتصادی برای تمام پلیمرها مشترک هستند، در حالیکه برخی دیگر همچون وزن مولکولی، نقطهٔ جوش، فشار بخار در دمای مورد استفاده، گرمای تبخیر و میزان انحلال‌پذیری در پلیمر زمینه و محصول نهایی به جنس پلیمر، محل و نوع کاربرد فوم بستگی دارند.

۱-۲- هیدروکربن‌های هالوژن‌دار

بسیاری از هیدروکربن‌های آلیفاتیک کلردار و یا فلوئوردار (C₁ تا C₄) به دلیل داشتن خواص منحصر بفرد از دیرباز به عنوان عامل حباب‌زا برای تمام انواع پلیمر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هیدروکربن‌های هالوژن‌دار را می‌توان به عنوان اولین عوامل حباب‌زا برای

¹ Physical Blowing Agents

² Aliphatic

تولید فوم برشمرده. اگرچه کلرید متیل در تولید فوم PS در دهه ۱۹۳۰ بکار گرفته شد تولید انبوه فومهای پلیمری با کشف کلروفلوئوروکربن (CFC) در دهه ۵۰ صورت پذیرفت.

۱-۲-۱- کلروفلوئوروکربن

استفاده از CFC بخصوص تری کلروفلوئورومتان (CFC-11) در تولید فوم PU صلب و کلروفلوئوروکربن ۱۲ (CFC-12) در تولید فوم XPS و اوا دی کلرو ۱ و ۲ و ۲ و ۲ تترا فلوئورو اتان^۱ (CFC-14) در تولید فوم فنولیک (P) و پلی اتیلن چگالی پایین منجر به تولید فومهای حفره بسته صلب با چگالی پایین و خواص مکانیکی و حرارتی بسیار خوب شد. با توجه به مشخصات ارائه شده در جدول ۱ از جمله وزن مولکولی پایین، نقطه جوش نزدیک به دمای اتاق، میزان سمیت کم، عدم قابلیت اشتعال، قابلیت انتقال حرارت پایین، پایداری شیمیایی و حرارتی بالا و هزینه پایین می توان CFC را یک عامل حبابزای تقریباً ایده آل دانست. در سال ۱۹۷۴ رولند^۲ و مولینا^۳ [۵] با ارائه فرضیه تخریب لایه اوزون نشان دادند که CFC به دلیل پایداری شیمیایی بالا به طبقات فوقانی جو نفوذ کرده و با آزاد کردن گاز کلرین^۴ باعث تخریب لایه اوزون می شود. نتایج این تحقیق که جایزه نوبل سال ۱۹۹۵ را برای این دو محقق به ارمغان آورد منجر به عقد قرارداد منترال^۵ شد که بر اساس آن، تولید و استفاده از مواد مخرب لایه اوزون باید طبق یک برنامه زمانی متوقف می شد. قرارداد منترال به نحو قابل توجهی بر جهت و میزان پیشرفت صنایع تولید فوم تأثیر گذاشت.

¹ 1,1-dichloro,1,2,2,2-tetrafluoroethane

² Rowland

³ Molina

⁴ Chlorine

⁵ Montreal Protocol

جدول ۱. خواص عوامل حبابزای کلروفلوئوروکربنی در مقایسه با دیگر هیدروکربن‌های هالوژن‌دار [۴]

	CFC-11	CFC-12	CFC-114	متیل کلراید	متیلن کلراید
فرمول شیمیایی	CCl_3F	CCl_2F_2	$\text{CClF}_2\text{CClF}_2$	CH_3Cl	CH_2Cl_2
وزن مولکولی	۱۳۷/۴	۱۲۰/۹	۱۷۰/۹	۵۰/۵	۸۵
نقطه جوش (°C)	۲۳/۸	-۲۹/۸	۳/۸	-۲۴/۲	۴۰
دمای بحرانی (°C)	۱۹۸	۱۱۲	۱۴۵/۷	۱۴۳	۲۳۵
فشار بحرانی (MPa)	۴/۴۱	۴/۱۱	۳/۳۹	۶/۷۱	۶/۳۵
چگالی ویژه مایع در دمای ۲۵°C	۱/۴۷۷	۱/۳۱	۱/۴۵۶	۱/۱۰	۱/۳۳
حرارت تبخیر در نقطه جوش (kJ/mole)	۲۴/۸	۲۰/۰	۲۳/۲	۲۱/۵	۲۸/۰
ضریب انتقال حرارت در دمای ۲۵°C (mW/m°K)	۷/۹	۹/۹	۱۰/۴	۱۰/۶	۸/۴
فشار بخار در دمای ۲۵°C (kPa)	۱۰۶	۶۴۴	۲۱۳	۵۶۷	۵۷
مدت ماندگاری (سال)	۴۵	۱۰۰	۳۰۰	۱/۳	۰/۵

۱-۲-۲- هیدروکلروفلوئوروکربن‌ها (HCFC)

HCFC ها به دلیل پایداری پایین در مقایسه با CFC تأثیر مخرب بسیار کمتری بر لایه اوزون دارند. با این حال به دلیل داشتن کلر که قابلیت بالقوه برای تخریب لایه اوزون دارد استفاده از HCFC در آمریکا محدود به کاربردهایی مانند عایق حرارتی بوده و تا سال

۲۰۴۰ به طور کامل در تمام کشورها ممنوع خواهد شد. جدول ۲ خواص هیدروکلروفلوئوروکربن‌هایی که به عنوان عامل حباب‌زا استفاده می‌شوند را نشان می‌دهد.

جدول ۲. خواص عوامل حباب‌زای هیدروکلروفلوئوروکربنی [۴]

	HCFC-141b	HCFC-22	HCFC-142b	HCFC-124
فرمول شیمیایی	$\text{CH}_2\text{CCL}_2\text{F}$	CHClF_2	CH_2CClF_2	CHFClCF_3
وزن مولکولی	۱۱۶/۹	۸۶/۵	۱۰۰/۵	۱۳۶/۵
نقطه جوش (°C)	۳۲/۹	-۴۰/۸	-۹/۸	-۱۲/۰
دمای بحرانی (°C)	۲۱۰/۳	۹۶	۱۳۷/۱	۱۲۲/۲
فشار بحرانی (MPa)	۴/۶۴	۴/۹۷	۴/۱۲	۲/۵۷
چگالی ویژه مایع در دمای ۲۵°C	۱/۲۳۳	۱/۱۹	۱/۱۲	۱/۳۶
حرارت تبخیر در نقطه جوش (kJ/mole)	۲۵/۸	۲۰/۲	۲۲/۴	۲۲/۹
ضریب انتقال حرارت در دمای ۲۵°C (mW/m°K)	۱۰	۱۰/۷	۹/۵	۱۲/۹
فشار بخار در دمای ۲۵°C (kPa)	۷۹	۹۳۴	۳۳۷	۳۸۵
مدت ماندگاری (سال)	۹/۲	۱۱/۸	۱۸/۵	۶/۱

۱-۲-۳- هیدروفلوئوروکربن‌ها (HFC)

این دسته از هیدروکربن‌های هالوژن‌دار به دلیل نداشتن کلر، هیچ خطری برای لایه اوزون ندارند. با این حال به دلیل قیمت بالا، قابلیت پایین برای عایق‌بندی حرارتی و قابلیت بالا در گرم کردن کره زمین، به اندازه CFC (در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰) و HCFC (در دهه‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰) کاربرد نیافته‌اند. HFC‌هایی که امروزه بیشترین کاربرد را به عنوان عامل حباب‌زا دارند عبارتند از HFC-245fa و HFC-365mfc (به حالت مایع) و HFC-

134a و HFC-152a (به حالت گاز) که خواص آنها در جدول ۳ ارائه شده است [۴]. در حال حاضر، HFC-245fa جایگزین HCFC برای تولید فوم PU مورد استفاده در لوازم خانگی شده و HFC-134a ، HFC-152a و یا مخلوط آنها در تولید فوم XPS جهت عایق بندی حرارتی مورد استفاده قرار می گیرند.

۱-۳- هیدروکربن ها

بسیاری از هیدروکربن های آلیفاتیک با نقطه جوش پایین، خواص یک عامل حبابزای مطلوب همچون قیمت پایین، سازگاری با اکثر پلیمرها و سازگاری با محیط زیست را دارند. خواص تعدادی از هیدروکربن ها در جدول ۴ آورده شده اند. پنتان ها^۱ به دلیل قابلیت اشتعال پذیری بالا، در سال های اولیه تولید فوم، کنار گذاشته شدند. ولی امروزه با وضع دستورالعمل های ایمنی در مورد نحوه انبارسازی، حمل و نقل و تولید فوم، امکان استفاده گسترده از آنها فراهم شده است. در حال حاضر، هیدروکربن ها در تولید انواع فوم های پلیمری (بخصوص ترموپلاستیک ها به دلیل انحلال پذیری بالا) با گستره وسیع چگالی و کاربردهای متعدد استفاده می شوند که از این میان می توان به فوم های PU، PS و پلی الفین ها^۲ برای عایق کاری، فوم های جاذب انرژی و صوت، و فوم های پلی الفینی جهت بسته بندی مواد غذایی اشاره کرد. امروزه پنتان از پرکاربردترین عوامل حبابزا در تولید عایق فوم PU و پلی استایرن انبساطی (EPS) می باشد. همچنین بوتان^۳ و پروپان^۴ در تولید فوم های پلی الفینی جهت بسته بندی و استفاده در نشیمن صندلی، بیشترین کاربرد را دارند.

¹ Pentanes

² Polyolefins

³ Butanes

⁴ propane

۱-۴- گازهای بی‌اثر

گازهای بی‌اثر مانند دی‌اکسیدکربن و نیتروژن امروزه جزء پرکاربردترین عامل حباب‌زا هستند. نیتروژن، ارزان، فراوان و سازگار با محیط زیست است. اگر چه CO_2 نیز خواص مطلوب فوق را داراست ولی جزء گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود. دلیل دیگر استفاده گسترده از CO_2 و N_2 مقادیر مناسب دما و فشار بحرانی، بخصوص برای CO_2 است. طبق تعریف، دما و فشاری که در آن، ماده وارد فاز سیال فوق بحرانی^۱ می‌شود دما و فشار بحرانی نام دارد. در فاز فوق بحرانی، ماده اگرچه از نظر چگالی همچون مایع می‌باشد ولی گرانشی و تنش سطحی آن مانند گازها ناچیز است. لذا حلالیت آن در پلیمر به نحو قابل توجهی افزایش می‌یابد که در مورد اغلب پلیمرها باعث کاهش دمای گذار شیشه‌ای^۲ می‌شود. با کاهش سریع فشار گاز فوق اشباع محلول در پلیمر مذاب، حباب‌های گاز کوچک با تراکم حبابی (تعداد حباب در واحد حجم) بسیار بالا ایجاد شده و تا زمانی که پلیمر به حالت شیشه‌ای برسد رشد می‌کنند. به این ترتیب می‌توان فوم‌هایی با ابعاد سلولی میکرونی (فوم‌های ریزسلولی) تولید کرد [۶]. CO_2 - در تمام حالت‌های فیزیکی اعم از گاز، مایع یا فوق اشباع- بزرگترین عامل حباب‌زا در تولید انواع فوم‌های پلیمری بخصوص ترموپلاستیک‌ها و PU (در نتیجه واکنش آب و ایزوسیانات) محسوب می‌شود. قابلیت انحلال N_2 در اغلب پلیمرها کمتر از CO_2 بوده و لذا فشار بالاتری مورد نیاز است تا تأثیر مشابه CO_2 را داشته باشد [۷]. عموماً از N_2 برای فوم‌سازی پلیمرهای با گرانشی مذاب بالا و نیز فوم‌سازی به‌روش قالبگیری تزریقی استفاده می‌شود.

^۱ supercritical fluid state

^۲ Glass transition temperature (T_g)

جدول ۳. خواص عوامل حباب‌زای هیدروفلوئوروکربنی [۴]

	HFC-134a	HFC-245fa	HFC-365mfc	HFC-152a
فرمول شیمیایی	CH_2FCF_3	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CHF}_2$	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CF}_2\text{CH}_3$	CHF_2CH_3
وزن مولکولی	۱۰۲	۱۳۴	۱۴۸	۶۶
نقطه جوش (°C)	-۲۶/۵	۱۵/۳	۴۰/۲	-۲۴/۷
دمای بحرانی (°C)	۱۰۰/۶	۱۵۷/۵	۱۸۹/۷	۱۱۳/۵
فشار بحرانی (MPa)	۴/۰۶	۳/۶۲	۲/۷۵	۴/۴۸
چگالی ویژه مایع در دمای ۲۵°C	۱/۲۰	۱/۳۲	۱/۲۵	۰/۹
حرارت تبخیر در نقطه جوش (kJ/mole)	۲۲/۱	۲۸	۲۶/۲	۲۱/۷
ضریب انتقال حرارت در دمای ۲۵°C (mW/m°K)	۱۲/۴	۱۲/۵	۱۰/۶	-
فشار بخار در دمای ۲۵°C (kPa)	۴۲۵	۸۵	۲۶	۲۷۲
مدت ماندگاری (سال)	۱۴	۷/۴	۱۰/۸	۱/۷

برخی از خواص گازهای دی‌اکسیدکربن، نیتروژن و اکسیژن (O_2) در جدول ۵ ارائه شده است. اگرچه اکسیژن به عنوان عامل حباب‌زا به کار نمی‌رود ولی از آنجا که می‌تواند به داخل حفرات فوم سلول بسته نفوذ کند خواص آن دارای اهمیت است. گازهای بی‌اثر دیگری مانند آرگون و هلیوم نیز در برخی منابع به عنوان عامل حباب‌زا عنوان شده‌اند ولی تقریباً کاربرد تجاری ندارند [۸ و ۹].

جدول ۴. خواص عوامل حباب‌زای هیدروکربنی [۴]

	سیکلوپنتان ۶	n-پنتان ^۵	ایزوپنتان ^۴	n-بوتان ^۳	ایزوبوتان ^۲	پروپان ^۱
فرمول شیمیایی	(CH ₂) ₅	C ₅ H ₁₂	C ₅ H ₁₂	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₁₀	C ₃ H ₈
وزن مولکولی	۷۰/۱	۷۲/۰	۷۲/۰	۵۸/۱	۵۸/۱	۴۴/۱
نقطه جوش (°C)	۴۹/۳	۳۶/۲	۲۷/۸	-۰/۵	-۱۲	-۴۲/۱
دمای بحرانی (°C)	۲۳۸/۶	۱۹۶/۷	۱۸۸	۱۴۹/۹	۱۳۴/۶	۹۶/۸
فشار بحرانی (MPa)	۴/۵۱	۳/۳۶	۳/۳۸	۳/۸	۳/۶۵	۴/۲۵
چگالی ویژه مایع در دمای ۲۵°C	۰/۷۵	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۵۷	۰/۵۵	-
حرارت تبخیر در نقطه جوش (kJ/mole)	۲۷/۳	۲۵/۷	۲۴/۶	۲۲/۴	۲۱/۳	۱۸/۸
ضریب انتقال حرارت در دمای ۲۵°C (mW/m ² K)	۱۲/۸	۱۵/۰	۱۴/۳	۱۶/۱	۱۶/۲	۱۷/۹
فشار بخار در دمای ۲۵°C (kPa)	۴۳	۶۹	۹۱	۲۴۳	۳۵۰	۹۵۱
مدت ماندگاری	چند روز	چند روز	چند روز	چند روز	چند روز	چند روز

جدول ۵. خواص برخی از گازهای بی‌اثر [۴]

	دی‌اکسید کربن	نیتروژن	اکسیژن
فرمول شیمیایی	CO ₂	N ₂	O ₂
وزن مولکولی	۴۴	۲۸	۳۲
نقطه جوش (°C)	-۷۸/۳	-۱۹۵/۸	-۱۸۳/۰
دمای بحرانی (°C)	۳۱	-۱۴۶/۹	-۱۱۸/۳
فشار بحرانی (MPa)	۷/۳۸	۳/۴	۵/۰
حرارت تبخیر در نقطه جوش (kJ/mole)	۶/۸	-	-
ضریب انتقال حرارت در دمای ۲۵°C (mW/m ² K)	۱۶/۴	۲۵/۸	۲۶/۶
فشار بخار در دمای ۲۵°C (kPa)	۴۵۰۲	بسیار زیاد	بسیار زیاد
مدت ماندگاری (سال)	۱۲۰	-	-

- 1 Propane
- 2 Isobutane
- 3 n-butane
- 4 Isopentane
- 5 n-pentane
- 6 Cyclopentane

۱-۵- سایر عوامل حبابزای فیزیکی

همانطور که در قسمت قبل، اشاره شد آب از مواد مورد استفاده در صنایع تولید PU است. متیل کلروفرم^۱، استون^۲ و الکل از دیگر عوامل حبابزای فیزیکی هستند که برای تولید فوم‌های غیر عایق بکار می‌روند. اترهای فلئوئوردار نظیر HFE-245، HFE-356 و HFE-254mf نیز برای تولید PU صلب در آزمایشگاه استفاده شده‌اند، ولی به دلیل سمیت و قیمت بالا، کاربرد جاری نیافته‌اند [۱۰].

۱-۶- مخلوط عوامل حبابزای فیزیکی

ترکیب دو یا چند عامل حبابزا معمولاً به منظور بهره‌برداری از خواص مطلوب هر یک از آنها انجام می‌گیرد. به عنوان مثال در فوم PU مخلوطی از عوامل حبابزای مایع و گازی برای برقراری تعادل بین سلالیت، پایداری ابعادی و مقاومت حرارتی جهت عایقکاری ساختمان استفاده می‌شوند.

همچنین تولید فوم PET با استفاده از عوامل حبابزایی همچون CO₂، HCFC-22 یا بوتان بدلیل فرار سریع گاز، پیش از رسیدن دما به دمای گذار شیشه‌ای PET، تخریب دیواره‌های حفرات را برای چگالی نسبی کمتر از ۶۰٪ در پی خواهد داشت. در حالیکه با ترکیب یک عامل حبابزا مانند n-اکتان با نقطه جوش بالا با یک عامل حبابزا مانند n-پنتان که نقطه جوش پایین‌تری دارد می‌توان بدون تخریب دیواره‌های حفرات به چگالی نسبی کمتر از ۸۰٪ دست پیدا کرد [۱۱]. زیرا n-اکتان انعطاف‌پذیری مورد نیاز پلیمر برای انبساط را فراهم کرده و n-پنتان فشار بخار لازم برای جلوگیری از شکستن دیواره‌های حفرات در حین سرد شدن فوم را تأمین می‌کند.

¹ Methyl chloroform

² Acetone

۲- عوامل حباب‌زای شیمیایی (CBA)^۱

عامل حباب‌زای شیمیایی، ترکیبی است که تحت شرایط فرایند تولید فوم در اثر تجزیه حرارتی یا واکنش شیمیایی، گاز آزاد می‌کند. نام عوامل حباب‌زای شیمیایی معمول به همراه دمای تجزیه، حجم و جنس گازهای آزاد شده در جدول ۶ ارائه شده‌اند. عوامل حباب‌زای شیمیایی غالباً در تولید فومهای پلاستیکی و لاستیکی با چگالی متوسط و بالا (چگالی ۴۰۰ تا ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب یا چگالی نسبی ۵۵ تا ۸۰ درصد) استفاده می‌شوند. قیمت بالا از مهمترین معایب CBA است، به طوریکه هزینه گاز CO₂ یا N₂ آزاد شده از CBA تقریباً ۱۰ برابر هزینه گاز خریداری شده بصورت کپسول است [۷].

دلیل اصلی استفاده از CBA برای تولید فوم آن است که برخلاف PBA نیازی به تغییر اساسی در خط تولید پلیمر نیست و لذا CBA را می‌توان در تمام روش‌های تولید ترموپلاستیک‌ها از جمله اکستروژن، قالبگیری تزریقی و چرخشی، ورق‌سازی و ریخته‌گری بکار برد. از دیگر مزایای CBA می‌توان به ابعاد کوچک حفرات فوم در مقایسه با PBA اشاره نمود. همچنین اغلب CBA ها به حالت جامد بوده و به تجهیزات خاصی برای انبار و حمل و نقل نیاز ندارند. باقیماندن ذرات جامد ناشی از تجزیه CBA را می‌توان از جمله معایب آنها برشمرد.

۲-۱- معیارهای انتخاب عامل حباب‌زای شیمیایی

مهمترین عامل در انتخاب CBA مطابقت دمای تجزیه CBA و دمایی است که فرایند تولید پلیمر انجام می‌گیرد. در صورت بالاتر بودن دمای تجزیه CBA از دمای فرایند تولید پلیمر، عمل فوم شدن به طور ناقص انجام می‌گیرد، همچنین کمتر بودن دمای تجزیه CBA از دمای فرایند تولید پلیمر، موجب تخریب و تضعیف ساختار حبابی خواهد شد. نرخ آزادسازی گاز و حجم آن با توجه به چگالی مورد نیاز، از دیگر موارد مؤثر بر انتخاب CBA است. نکته دیگری که باید در هنگام انتخاب CBA مد نظر قرار گیرد آن است که ذرات

¹ Chemical Blowing Agents

جامد ناشی از تجزیه باید با دیگر مواد تشکیل دهنده فوم سازگار بوده و تأثیر منفی بر خواص و ظاهر نهایی فوم نداشته باشند. به طور مثال، برخی از CBAها آب تولید می‌کنند که می‌تواند برای پلیمرهای حساس به رطوبت همچون PC و PA مشکل ساز شده و باعث افت خواص آنها شود. این مسأله می‌تواند در مورد CBAهایی که تولید آمونیاک یا گازهای اسیدی می‌کنند نیز رخ دهد. عوامل حباب‌زای شیمیایی را می‌توان به دو دسته کلی گرمازا و گرماگیر تقسیم کرد که در ادامه به طور مختصر، معرفی می‌شوند.

۲-۲- عوامل حباب‌زای گرمازا

عوامل حباب‌زای گرمازا در حین تجزیه شیمیایی، تولید حرارت می‌کنند. این امر نه تنها موجب افزایش قابل توجه دمای مذاب پلیمر می‌شود بلکه متوقف کردن واکنش، پیش از تجزیه کامل عامل حباب‌زا را مشکل می‌کند. لذا عوامل حباب‌زای گرمازا در محدوده دمایی کوچکی قابل استفاده هستند. عوامل حباب‌زایی که تولید گاز N_2 می‌کنند جزء عوامل گرمازا طبقه‌بندی می‌شوند. مقدار مورد نیاز عوامل حباب‌زای گرمازا $0/3$ تا $0/5$ درصد وزنی ماده زمینه است [۱۲].

۲-۳- عوامل حباب‌زای گرماگیر

عوامل حباب‌زای گرماگیر در حین تجزیه شیمیایی، حرارت را جذب می‌کنند و لذا قابلیت استفاده در محدوده دمایی وسیع‌تری را دارند. اکثر عوامل حباب‌زای گرماگیر تولید گاز CO_2 می‌کنند. رنگ آنها و مواد ناشی از تجزیه آنها سفید است. معمولاً مقدار عوامل حباب‌زای گرماگیر لازم برای تولید فوم، دو برابر عوامل حباب‌زای گرمازا است [۱۲].

جدول ۶. خواص تعدادی از عوامل حبابزای شیمیایی معمول [۴]

عامل حبابزا	نوع عامل حبابزا	دمای تجزیه (°C)	حجم ویژه گازهای آزاد شده در شرایط استاندارد (10 ⁻³ m ³ /kg)	گازهای آزاد شده
ازودی کریب آمید (ADC) ^۱	گرمازا	۲۰۰-۲۳۰	۲۲۰-۲۴۵	N ₂ , CO, NH ₃ , O ₂
۴و۴-اکسی بیس بنزن سولفونیل هیدرازید ^۲	گرمازا	۱۵۰-۱۶۰	۱۲۰-۱۲۵	N ₂ , H ₂ O
p-تولوئن سولفونیل هیدرازید (TSH) ^۳	گرمازا	۱۱۰-۱۲۰	۱۱۰-۱۱۵	N ₂ , H ₂ O
p-تولوئن سولفونیل سمی کاربازید (TSS) ^۴	گرمازا	۲۱۵-۲۳۵	۱۲۰-۱۴۰	N ₂ , CO ₂
دی نیتروسو پنتا متیلن تترا آمین ^۵	گرمازا	۱۹۵	۱۹۰-۲۰۰	N ₂ , NH ₃ , HCHO
پلی فنیلن سولفوکسید (PPSO) ^۶	گرمازا	۳۰۰-۳۴۰	۸۰-۱۰۰	SO ₂ , CO, CO ₂
بی کربنات سدیم (SBC)	گرماگیر	۱۲۰-۱۵۰	۱۳۰-۱۷۰	CO ₂ , H ₂ O
کربنات روی	گرماگیر	-	-	CO ₂
مشتقات اسید سیتریک	گرماگیر	۲۰۰-۲۲۰	۱۱۰-۱۵۰	CO ₂ , H ₂ O
۵-فنیل تترازول ^۷	گرماگیر	۲۴۰-۲۵۰	۱۹۰-۲۱۰	N ₂

¹ Azodicarbonamide

² 4,4-Oxybis(benzenesulfonyl-hydrazide)

³ p-Toluenesulfonylhydrazide

⁴ p-Toluenesulfonylsemicarbazide

⁵ Dinitrosopentamethylenetetramine

⁶ Polyphenylene sulfoxide

⁷ 5-Phenyltetrazole

- [١] K.W. Suh, C.P. Park, M.J. Maurer, M.H. Tusim, R. de Genova, R. Broos and D.P. Sophiea, *Adv. Mater.* 2000; 12(23): 1779.
- [٢] S.N. Singh, *Blowing Agents for Polyurethane Foams*, Rapra Review Report 142, Vol. 12, No.10, Rapra Technology, Shawbury, UK, 2002.
- [٣] T. Pontiff in *Foam Extrusion: Principles and Practices*, Ed., S-T. Lee, Technomic Publishing, Lancaster, PA, USA, 2000: 251.
- [٤] D. Eaves, *Handbook of Polymer Foams*, Rapra Technology Ltd., Shrewsbury UK, 2004.
- [٥] F. Rowland, M. Molina, *Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atom-Catalysed Destruction of Ozone*, *Nature* 1974; 249: 810-812.
- [٦] C.B. Park, N.M. Suh and D.F. Baldwin, inventors; MIT, assignee; US 6,051,174 (1998).
- [٧] M. Gale, *Proceedings of Rapra Blowing Agent Systems: Formulations and Processes Conference*, Shawbury, UK, 1998; Paper No.6.
- [٨] S.C. Tan, inventor; no assignee; US 6,232,354 (2001).
- [٩] D.W. Kreiser, A.L. Dinkel and J.P. Weibel, inventors; Armacell, assignee; US 6,245,267 (2001).
- [١٠] N. Takada, R. Tamia, Y. Amamoto, A. Sekiya, N. Tsukida, H. Takeyasu, *Proceedings of the Polyurethane Expo 1998 Conference*, Dallas, USA, 1998: 663.
- [١١] M.E. Reedy and W. Harfmann, *Proceedings of the 2nd International Conference on Thermoplastic Foam: Foams 2000*, Parsippany, USA, 2000: 12.
- [١٢] R.L. Heck, *Proceedings of Retec on Polymer Additives: What's New and Review*, Ft. Mitchell, USA, 1997: 277.

فصل ۲

فوم‌های گرمانرم

مقدمه

فوم‌های گرمانرم به فوم‌هایی اطلاق می‌شود که حاصل فوم‌سازی پلیمرهای گرمانرم^۱ هستند. عنوان گرمانرم به پلیمرهایی اطلاق می‌شود که در اثر حرارت، ذوب شده ولی ترکیب شیمیایی خود را حفظ می‌کنند. بنابراین می‌توان آنها را به دفعات نامحدود، ذوب و منجمد کرده و بازیافت نمود. میزان بلورینگی، مهم‌ترین معیار طبقه‌بندی پلیمرهای گرمانرم است. بر این اساس، پلیمرهای گرمانرم به دو دسته بی‌شکل^۲ و نیمه‌بلوری^۳ تقسیم می‌شوند. گرمانرم‌های بی‌شکل شفاف بوده و در دمای کمتر از دمای گذار شیشه‌ای قابل استفاده هستند. از مهم‌ترین پلیمرهای بی‌شکل می‌توان به PS، پلی‌کربنات (PC)، اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) و پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) اشاره کرد.

¹ Thermoplastic

² Amorphous

³ Semi-crystalline