

استفاده از روشهای تجزیه گرمایی در مطالعه تخریب گرمایی پلی اتیلن و آثار منیزیم هیدروکسید بر آن به عنوان بازدارنده اشتعال*

Application of Thermal Analysis Methods on the Study of PE Thermal Degradation and the Influence of $Mg(OH)_2$ as Fire Retardant

عبدالصمد زرین قلم مقدم^{1*}، نوشین قلی پور²

۱- تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، صندوق پستی ۴۸۳۸/۴۱۵۵/۲۰-تهران، مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، صندوق پستی ۳۱۵۸۵/۱۶۳

دریافت: ۸۰/۱۱/۲۰، پذیرش: ۸۱/۴/۲۰

چکیده

برای مطالعه اثر بازدارندگی اشتعال $Mg(OH)_2$ روی تخریب گرمایی نمونه‌های پلی اتیلن ابتدا منیزیم هیدروکسید و ترکیبات آن تهیه و با استفاده از روش تجزیه گرمایی میزان اشتعال پذیری نمونه‌های پر شده با این ترکیبات بررسی شد. در این روش دستگاه تجزیه گرمایی همزمان (STA) که در آن تجزیه گرما وزنی و گرماسنجی بوشی تفاضلی بطور همزمان انجام می‌شود بکار گرفته شد. در گرماسنجی‌های حاصل کاهش سطح پیکهای مربوط به واکنشهای گرماده، افزایش دمای شروع اولین پیک گرماده در DSC، افزایش دمای آغاز تفکات نمونه‌ها و کاهش سرعت تغییر جرم همگی کاهش اشتعال پذیری نمونه‌های پر شده را نشان می‌دهد. از دستگاه گرماسنج مخروطی برای ارزیابی یافته‌های حاصل از تجزیه گرمایی استفاده شد. آزمایشهای گرماسنجی مخروطی نتایج تجزیه گرمایی پلی اتیلن کندسوز شده (دارای بازدارنده اشتعال) را تایید کرد و نتیجه گیری شد که $Mg(OH)_2$ در همه درصدها برای PE به عنوان بازدارنده اشتعال مناسب عمل می‌کند و استفاده از دستگاه تجزیه گرمایی روشی سریع و مناسب برای این نوع پژوهشهاست.

واژه‌های کلیدی: تخریب پذیری، بازدارنده اشتعال، تجزیه گرمایی، سرعت تخریب، گرماسنج مخروطی

Key Words: polymer degradation, fire retardant, thermal analysis, rate of degradation, cone calorimeter

مقدمه

موجود در حین احتراق (سوختن) به صورت رادیکال آزاد شده و با رادیکالهای لازم برای احتراق واکنش می‌دهد و باعث شکست زنجیره واکنشهای احتراق می‌شود [۲،۳]. گروه دوم بازدارنده‌های اشتعال افزودنی‌اند که در مرحله اختلاط به پلیمر اضافه شده و بطور فیزیکی با آن مخلوط می‌شود. نمونه‌هایی از این نوع بازدارنده اشتعال آلومینیم هیدروکسید، منیزیم هیدروکسید و آنتیموان اکسیدند. این نوع بازدارنده‌های اشتعال خود نمی‌سوزند و پایداری

کاربرد بازدارنده اشتعال سابقه نسبتاً طولانی در صنعت پلیمر دارد و اساساً یکی از دو گروه بازدارنده اشتعال بکار گرفته می‌شود. گروه اول بازدارنده‌های اشتعال واکنش پذیرند که بطور مستقیم به عنوان یک مونومر، در مرحله پلیمر شدن به ساختار شیمیایی پلیمر اضافه می‌شوند [۱]. انواع ترکیبات هالوژن‌دار از این گروه‌اند. این ترکیبات بدین دلیل واکنش پذیر نامیده می‌شوند که هالوژن

* بخشی از این مقاله به صورت سخنرانی در ششمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، اردیبهشت ۸۰، دانشگاه صنعتی اصفهان ارائه شده است.

** مسئول مکاتبات، پیام نگار: Zarrin@modares.ac.ir

جدول ۱- ترکیب درصد نمونه‌های تهیه شده.

مواد	نمونه	E _۱	E _۲	E _۳	E _۴	E
مینیزیم هیدروکسید (%)	۶۰	۴۰	۲۰	۱۰	—	—
پلی اتیلن (%)	۴۰	۶۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	—

افت جرم که جزء پارامترهای تعریف شده در مهندسی ایمنی آتش جهت تعیین خصوصیت احتراق مواد است معین شد. مقایسه اطلاعات حاصل از تجزیه گرمایی با روش استاندارد آزمون حریق مواد یک ارزیابی مفید از کارایی روش تجزیه گرمایی برای بررسی بازدارندگی اشتعال مواد پلیمری و دستیابی سریع به فرمولبندی بهینه ارائه می‌دهد و در مواردی که به سیستمهای آزمون رفتار حریق مواد دسترسی وجود ندارد می‌توان از روش تجزیه گرمایی به جای آنها استفاده کرد.

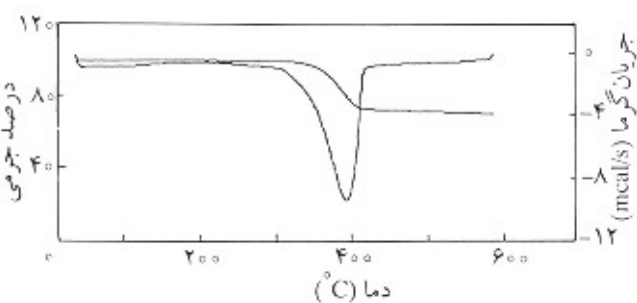
تجربی

مواد

مشخصات مواد بکار رفته در این نمونه‌ها به قرار زیر است: پلی اتیلن LDPE، ۰۷۵ LF و مینیزیم هیدروکسید صنعتی محصول شرکت مرک، به صورت پودر با دانه‌بندی کمتر از ۶۰ μm.

دستگاهها

از دستگاههای STA۱۵۰۰ و STA۶۲۵ برای مطالعه نمونه‌های PE خالص و مخلوط آن با $Mg(OH)_2$ استفاده گردید. دستگاه STA۶۲۵ مجهز به سیستمهای تجزیه گرما وزنی (TGA) و گرماسنج پوشی تفاضلی (DSC) است. دستگاه STA۱۵۰۰ مجهز به سیستم تجزیه گرما وزنی (TGA) و تجزیه گرمایی تفاضلی (DTA) است. نمونه‌ها با وزن حدود ۱۰ تا ۱۵ mg در اتمسفر هوای ساکن و سرعت گرمادهی $10^\circ C/min$ در محدوده دمایی ۲۵ تا $600^\circ C$ آزمایش شده‌اند. تغییرات جرم و تغییرات انرژی بطور همزمان برای هر یک از نمونه‌ها ثبت شده است. حساسیت زیاد دستگاه این امکان را می‌دهد که تغییرات جزئی جرم شناسایی و نیز ماکسیمم سرعت کاهش جرم معین شود.



شکل ۱- نمودار TGA و DSC مینیزیم هیدروکسید.

پلیمر را در مقابل گرما بالا می‌برند [۴،۵]. از بین این دو گروه، بازدارنده‌های اشتعال هالوژن دار دقت عمل و کارایی بیشتری دارند. اما به دلیل تولید گازهای سمی در حین احتراق و همچنین خاصیت خوردندگی این گازها، اخیراً تمایل زیادی در جایگزینی آنها با بازدارنده‌های اشتعال افزودنی بوجود آمده است [۶،۷]. در بین بازدارنده‌های اشتعال افزودنی مینیزیم هیدروکسید به دلیل پایدار بودن در دمای فراورش پلیمرها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. مینیزیم هیدروکسید در دمای بالاتر از $300^\circ C$ بطور گرماگیر طبق معادله (۱) تجزیه می‌شود و آب آزاد می‌کند [۸].

کاربرد اصلی مینیزیم هیدروکسید به عنوان بازدارنده اشتعال در پلیمرهای PE، PP و پلی آمیدهاست که به عنوان پوشش کابلهای برق از آنها استفاده می‌شود. مقدار مصرف جهانی $Mg(OH)_2$ به عنوان بازدارنده اشتعال بدون در نظر گرفتن مصرف کشور ژاپن ۱۰۴ تن در سال است [۹]. کاربرد این ماده به دلیل کم هزینه بودن، سمی نبودن و بازده بالا در کاهش اشتعال پذیری روز به روز در حال افزایش است [۱۰]. در این بررسی نمونه‌های خالص پلی اتیلن و ترکیبات آن با ۱۰ تا ۶۰ درصد مینیزیم هیدروکسید بررسی شده است. عمل تفکافت (پیرولیز) و احتراق نمونه‌ها با استفاده از دو روش کاملاً متفاوت انجام گرفته است. در روش اول از دستگاه تجزیه گرمایی استفاده شد. در این روش تغییر جرم و تغییر انرژی وقتی که نمونه‌ها در معرض رژیم گرمایی معینی قرار می‌گیرند مطالعه می‌شود. کاهش سرعت تغییر جرم و تغییر انرژی در اثر افزودن $Mg(OH)_2$ در واقع یک نشانه از کندسوز شدن نمونه پلی اتیلن محسوب می‌شود. در استفاده از این روش این امتیاز وجود دارد که نمونه‌ها در حد میلی گرم آزمایش شده و در مدت زمان کوتاهی اطلاعات لازم در مورد تغییرات سرعت تفکافت ماده دارای بازدارنده اشتعال حاصل می‌شود. در روش دوم از دستگاه گرماسنج مخروطی مطابق با ASTM E ۱۳۵۴ استفاده شده است [۱۱]. در این روش نمونه‌ها در معرض شار گرمایی 50 kW/m^2 قرار داده شده و رفتار گرمایی آنها بررسی شده است.

با این آزمون زمان اشتعال، سرعت آزاد شدن گرما، سرعت

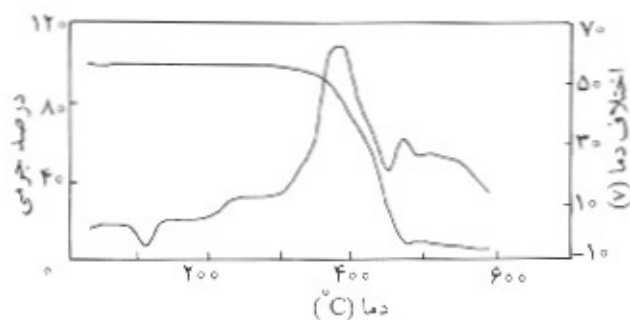
بررسی شد (شکل ۱). همانطور که مشاهده می‌شود، تغییرات جرم و تغییرات انرژی در حدود دمای ۳۰۰°C آغاز شده‌اند. این تغییرات بیانگر آن است که در نمونه یک تغییر شیمیایی روی می‌دهد که باعث تغییر همزمان جرم و انرژی ماده می‌گردد [۷]. در صورتی که اگر تغییرات فقط فیزیکی مثل ذوب یا تغییر ساختار بلوری ماده بود، فقط تغییر انرژی پدیدار می‌گشت. در نتیجه، $Mg(OH)_2$ تا دمای ۳۰۰°C پایدار است و وقتی با PE مخلوط شود در دمای فراورش PE که حدود ۲۰۰°C است پایدار باقی می‌ماند. تغییر جرم و انرژی در دمای ۴۰۰°C به ماکسیمم رسیده و در حدود ۴۳۰°C به پایان می‌رسد. برای تشخیص واکنش انجام شده ابتدا واکنش تفکیک $Mg(OH)_2$ طبق معادله زیر مورد بررسی قرار گرفت:



منیزیم هیدروکسید در صورتی بطور کامل برطبق معادله بالا تجزیه می‌شود که حدود ۲۹ درصد از جرم آن به صورت آب آزاد گردد. تحلیل منحنی TGA نیز نشان می‌دهد که افت جرمی نمونه‌ها در پایان آزمون ۲۹ درصد است. تغییر انرژی مشاهده شده در منحنی DSC نیز حدود ۱۴۹۰ J/g است که با در نظر گرفتن معادله (۱) برای محاسبه انرژی جذب یا آزاد شده و با احتساب آنتالپی تشکیل منیزیم هیدروکسید و محصولات واکنش، همان کمیت ۱۴۹۰ J/g حاصل می‌شود. در نتیجه منحنیهای DSC و TGA بدست آمده نشان‌دهنده تجزیه گرمایی و آزاد شدن آب است. آزاد شدن آب و گرماگیر بودن واکنش جزء پارامترهای مؤثر در بازدارندگی اشتعال مواد پلیمری است [۱۲].

تجزیه گرمایی پلی‌اتیلن خالص

مطالعات انجام شده به وسیله قایر [۱] نشان می‌دهد که PE خالص در دمای حدود ۳۴۸°C مشتعل شده و با دود آبی و شعله زرد رنگ می‌سوزد. دمای ذوب آن بسته به وزن مولکولی بین ۱۰۶ تا ۱۴۰°C است و در نتیجه در حین اشتعال ذوب و جاری می‌گردد. محصولات نهایی سوختن پلی‌اتیلن شامل کربن، کربن مونوکسید، کربن دی‌اکسید و آب است. فرآورده‌های تفکافت PE، شامل هیدروکربنهای بلند زنجیر و آلدهیدهای کوتاه زنجیر است. تجزیه PE در دمای اشتعال منجر به واپلیم شدن آن نمی‌شود، به عبارتی درگازهای سوختن مونومر اتیلن وجود ندارد [۱]. در شکل ۲ منحنی تغییرات جرم و انرژی مربوط به پلی‌اتیلن خالص تحت آزمایش و شرایط مشابه با آزمون $Mg(OH)_2$ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تخریب گرمایی پلی‌اتیلن در دمای



شکل ۲- نمودار تجزیه گرما وزنی و تجزیه گرمایی تفاضلی پلی‌اتیلن خالص.

از دستگاه گرماسنج مخروطی (cone calorimeter) و از آزمون استاندارد ASTM E1354 و ISO 5660 برای بررسی احتراق مواد استفاده شد. نمونه‌ها برای آزمون تحت تابش گرمایی با قدرت 50 kW/m^2 به مدت متوسط ۱۰ دقیقه قرار گرفتند. این شدت تابش نمایانگر یک آتش معتدل تا قوی است. نمونه‌ها به شکل مربع و با ابعاد $10 \times 10 \text{ cm}^2$ و ضخامت 0.7 cm انتخاب شدند و به صورت افقی فقط سطح آنها در معرض تابش قرار گرفت. این روش آزمایش، گرماسنجی براساس تغییر مقدار اکسیژن است. مهمترین اطلاعات حاصل از این آزمون سرعت آزاد شدن انرژی گرمایی است که به صورت پیوسته در طول زمان آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. علاوه بر آن، کاهش جرم نمونه و غلظت دود حاصل نیز کنترل می‌گردد.

روشها

مخلوطهای PE و منیزیم هیدروکسید با استفاده از دستگاه هکه مدل ۹۰ تهیه شدند. این مواد در دمای ۱۵۰°C و سرعت ۶۰ rpm به مدت ۵ دقیقه در دستگاه هکه مخلوط شده و سپس در قالبی به ابعاد $6 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ در دمای ۱۵۰°C پرس شدند. زمان پرس ۵ دقیقه و فشار آن 150 kg/cm^2 بوده است. مشخصات نمونه‌های تهیه شده در جدول ۱ ارائه شده است.

نتایج و بحث

تجزیه گرمایی منیزیم هیدروکسید

ابتدا، نمونه خالص منیزیم هیدروکسید در دستگاه STA آزمایش شده و تغییرات جرم و تغییرات انرژی بطور همزمان روی هر یک از نمونه‌ها در سرعت گرمادهی $10^\circ\text{C}/\text{min}$ و زیر اتمسفر هوای ساکن

جدول ۲- نتایج آزمونهای DTA و TG در دستگاه STA۱۵۰۰

دمای اولیه پیک مربوط به واکنشهای گرماده (DTA) (°C)	سرعت کاهش جرم (mg/min)	دمای پیش بینی شده برای آغاز واکنش* (°C)	پرکننده (%)	نمونه
۳۹۱/۵۹	۰/۷	۴۰۰	۰	E
۳۹۷/۸۵	۰/۶۹۰۵	۴۱۵	۱۰	E _{۱۰}
۴۱۰	۰/۶۷	۴۱۱	۲۰	E _{۲۰}
۴۳۱/۴۴	۰/۶۴۴۱	۴۰۸	۴۰	E _{۴۰}
۴۵۷/۸۳	۰/۴۲۴۶	۴۳۷	۶۰	E _{۶۰}

* Extrapolated Onset

هیدروکسید در کمتهای ۱۰ تا ۶۰ درصد اضافه شده بود انجام شد. نتایج حاصل روی نمونه‌های کندسوز شده PE در جدول ۲ ارائه شده است. در تحلیل منحنیهای تجزیه گرمایی چند پارامتر زیر به عنوان شاخصهای کندسوز شدن ماده PE در نظر گرفته شده است:

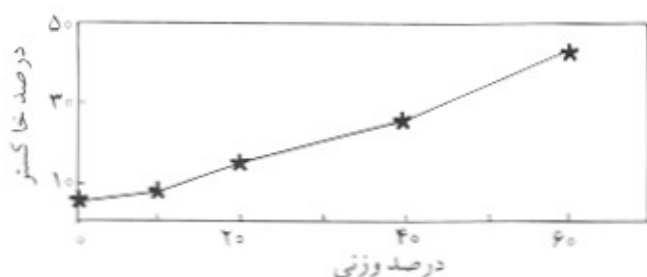
- یکی از این پارامترها دمای وقوع پیک واکنشهای تخریب در تجزیه گرمایی است. بدین ترتیب که در اثر افزودن بازدارنده اشتعال، پلیمر پایدارتر شده و تجزیه آن در دمای بالاتری اتفاق می‌افتد. به همین ترتیب منحنیهای تخریب نیز به دمای بالاتری انتقال می‌یابد و دمای اولین پیک تخریب گرماده از ۳۹۱/۵۹ به ۴۵۷/۸۳ افزایش می‌یابد.

- سرعت تخریب و سرعت افت جرم کاهش می‌یابد.

- زمان شروع تخریب پلیمر به تعویق می‌افتد.

این پارامترها برای نمونه‌های مختلف بدست آمده در جدول ۲

ارائه شده است.

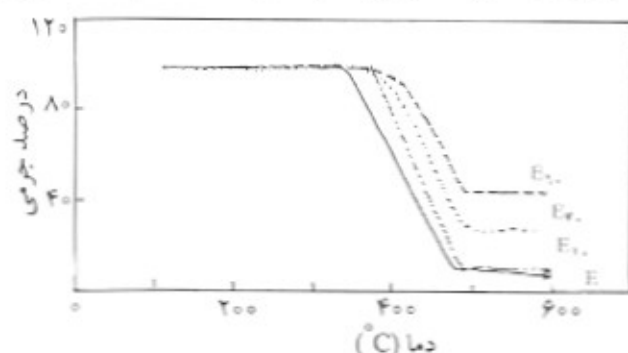


شکل ۴- نمودار تغییرات درصد خاکستر باقیمانده در دمای ۶۰۰°C بر حسب درصد پرکننده متیزیم هیدروکسید.

حدود ۳۰۰°C آغاز می‌شود که این عمل پیک فرایند گرماده است و با پیک پیک اصلی گرماده مشخص می‌شود. این منحنی در دمای حدود ۲۹۰°C شروع و در ۳۹۵°C به پیک ماکسیمم می‌رسد و در نهایت در ۵۰۰°C پایان می‌یابد [۵]. منحنی کاهش جرم در ارتباط با تخریب همین نمونه نیز در همین محدوده دمایی انجام می‌گیرد و نتایج تا حدود ۹۵ درصد تخریب را نشان می‌دهد. در نتیجه، پلی‌اتیلن خالص در محدوده دمایی ۳۰۰-۵۰۰°C بطور گرماده تخریب شده و ۹۵ درصد آن به صورت محصولات گازی آزاد می‌گردد. با مقایسه منحنیهای ۱ و ۲ می‌توان پیش‌بینی کرد که هرگاه این دو ماده به صورت مخلوط در کنار هم قرار گیرند، Mg(OH) عامل بازدارنده در مقابل تخریب و اشتعال PE است.

تجزیه گرمایی نمونه‌های PE پر شده با متیزیم هیدروکسید

آزمایشهای تجزیه گرمایی نمونه‌های PE که به آن متیزیم



شکل ۳- نمودار مقایسه‌ای آزمون تجزیه گرمایی نمونه‌های پلی‌اتیلن خالص و پر شده.

نمونه	پرکننده (%)	زمان اشتعال (TTI) (s)	حداکثر سرعت آزاد شدن گرما (PKHRR) (kW/m^2)	TTI/PKHRR (s/kW/m^2)	کربن مونوکسید* (kg)
E	۰	۵۲	۱۱۵۲/۹	۴۵/۱	۰/۰۲۰
E _{۱۰}	۱۰	۷۲	۱۰۰۴/۴	۷۱/۶	۰/۰۱۵
E _{۲۰}	۲۰	۸۳	۷۳۴/۴	۱۱۳	۰/۰۱۳
E _{۴۰}	۴۰	۹۶	۳۸۱/۴	۲۵۱/۶	۰/۰۱۱
E _{۶۰}	۶۰	۱۱۹	۱۴۵/۶	۸۱۷/۳	۰/۰۰۹

* متوسط جرم CO تولید شده تا سه دقیقه بعد از اشتعال به ازای واحد جرم نمونه (kg/kg).

احتراق و در نتیجه باعث افزایش سرعت گسترش آتش آزادسازی دود و گازهای سمی می‌گردد [۱۳، ۱۴].

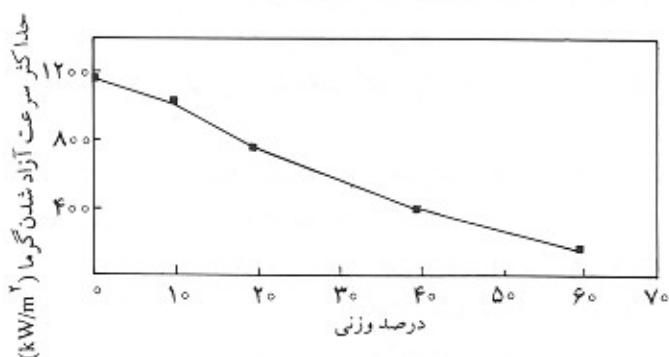
کاهش سرعت تخریب به وسیله بازدارنده اشتعال، یک شاخص مهم در مؤثر بودن منیزیم هیدروکسید در بهینه شدن رفتار گرمایی پلی اتیلن است. با مقایسه کمی سرعتهای تخریب PE خالص و ترکیب آن با Mg(OH)_2 در جدول ۲ کاهش در حدود ۳۹ درصد حاصل می‌شود.

در شکل ۵ اثر افزودن ۱۰ درصد منیزیم هیدروکسید بر کاهش جرم PE نشان داده شده است. در این شکل علاوه بر منحنی تجربی نمونه E_{۱۰}، منحنی تغییرات جرم که با در نظر گرفتن تاثیر وجود ۱۰ درصد Mg(OH)_2 ترسیم شده نیز ارائه شده است. مقایسه این دو منحنی اثر برهم کنش دو ماده را نشان می‌دهد می‌توان دید که در منحنی تجربی، مخلوط در دمای بالاتری تفکیک می‌گردد. مقایسه کمی تغییر جرم نهایی برای نمودار واقعی و فرضی، با احتساب اینکه حدود ۲/۵ درصد از کل کاهش جرم مربوط به آب حاصل از تجزیه منیزیم هیدروکسید است، نشان می‌دهد که افت جرم در

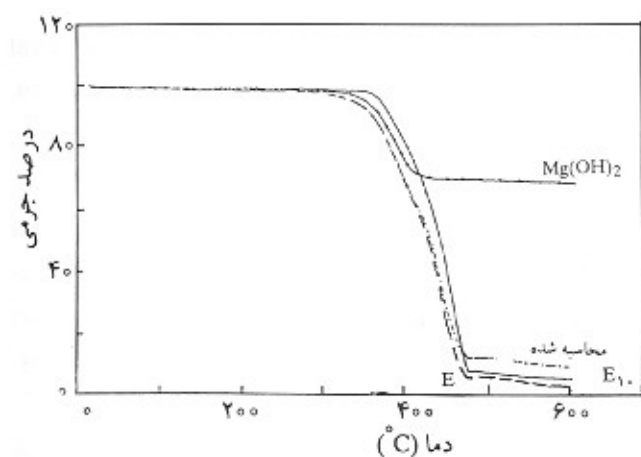
در شکل ۳ منحنیهای آزمون TG روی پلی اتیلن خالص و کندسوز شده ارائه شده است. مقایسه پارامترهای بالا برای PE خالص و کندسوز شده نشان می‌دهد که دمای شروع تخریب پلیمر از 400°C برای PE خالص بتدریج با افزایش درصد بازدارنده اشتعال بالا می‌رود و در نهایت به 437°C برای نمونه دارای ۶۰ درصد Mg(OH)_2 رسیده است.

از نقطه نظر مهندسی ایمنی آتش در داخل ساختمانها مهمترین پارامتر در ارزیابی مواد قابل اشتعال سرعت تخریب گرمایی است [۱۱، ۱۲]، به این دلیل که تخریب گرمایی سوخته‌های جامد مثل پلیمرها، گازهای قابل اشتعال آزاد می‌کند که در واقع شعله‌های آتش را تغذیه می‌کنند. به همین دلیل، سرعت تخریب متناسب با سرعت آزادسازی گرما و مناسب با سرعت گسترش آتش است.

سرعت انباشت دود و گازهای سمی نیز وابسته به سرعت آزاد شدن گرماست. گرمای آزاد شده باعث افزایش سرعت واکنشهای



شکل ۶- نمودار تغییرات حداکثر سرعت آزاد شدن گرما با تغییر درصد پرکننده منیزیم هیدروکسید.



شکل ۵- مقایسه منحنی تجزیه گرما وزنی تجربی و محاسبه شده برای نمونه E_{۱۰}.

مواد را پیش‌بینی می‌کند، در این بررسی نیز هماهنگی نتایج گرماسنجی مخروطی و STA نشان می‌دهد که تجزیه گرمایی روش مناسبی برای بررسی رفتار احتراق PE است.

۴- $Mg(OH)_2$ در کلیه درصدها به عنوان یک بازدارنده اشتعال مناسب عمل می‌کند.

حالت محاسبه شده کمتر است و این مسئله اثر مولکولی منیزیم هیدروکسید و پلی‌اتیلن را بر یکدیگر نشان می‌دهد. محاسبات و آزمایشها با درصدهای دیگر افزودنی نتایج مشابهی را می‌دهد.

در شکل ۴ درصد خاکستر باقیمانده در $600^\circ C$ پس از تخریب کامل بر حسب درصد منیزیم هیدروکسید نشان داده شده است.

آزمون پارامترهای سوختن نمونه‌ها به روش گرماسنجی مخروطی

مراجع

1. Fire. F. L.; *Combustability of Plastics*; Van Nostrad Reinhold, 1991.
2. Schnipper A., Hansen L.S. and Thomson E.S., "Reduced Combustion Efficiency of Chlorinated Compounds, Resulting in Higher Yields of Carbon Monoxide" *J. Fire and Mater.*; **19**, 61-4, 1995.
3. Zilberman J. T. R., Hull D.P., Milnes G.J and Keen F., "Flame Retardancy of Some Ethylene - Vinyl Acetate Copolymer - Based Formulations" *Fire and Mater.*; **24**, 159 - 64, 2000.
4. Yeh J. T., Yang H. M. and Huang S. S., "Combustion of Polyethylene Filled with Metallic Hydroxides and Crosslinkable Polyethylene" *Polym. Degradation and Stab.*; **50**, 229-34, 1995.
5. Atkinson P.A., Haines P.J. and Skinner G.A., "Inorganic Tin Compounds as Flame Retardants and Smoke Suppressant for Polyester Thermosets" *Thermochimica Acta.*; **360**, 29-40, 2000.
6. Green J., "An Overview of Fire Retardant Chemical Industry, Past-Present-Future" *J. Fire and Mater.*; **19**, 197-204, 1995.
7. Hornsby P.R., Wang J., Rothern R., Jackson G., Wilkinson G. and Cossick K., "Thermal Decomposition Behaviour of Polyamide Fire-Retardant Compositions Containing Magnesium Hydroxide Filler" *Polym. Degradation and Stab.*; **51**, 235 - 49, 1996.
8. Hornsby P.R. and Mthupha A., "Rheological Characterization of Polypropylene Filled with Magnesium Hydroxide" *J. Mater. Sci.*; **29**, 5293-301,

کلیه نمونه‌ها در گرماسنج مخروطی تحت شار گرمایی 50 kW/m^2 قرار گرفته‌اند، که نتایج آنها در جدول ۳ ارائه شده است. یکی از پارامترهای اصلی اندازه‌گیری شده در گرماسنج مخروطی، حداکثر سرعت آزاد شدن گرما (peak heat rate release, PKHRR) است که نحوه تغییر آن با درصدهای مختلف پرکننده در شکل ۶ نشان داده شده است. جدول ۳ نشان می‌دهد که با افزودن $Mg(OH)_2$ افزایش درصد آن، زمان اشتعال (time to ignition, TTI) افزایش یافته، سرعت آزاد شدن گرما کاهش می‌یابد. نسبت این دو پارامتر (TTI/PKHRR) نیز افزایش می‌یابد، ضمن اینکه افزودن منیزیم هیدروکسید منجر به کاهش غلظت کربن مونوکسید تشکیل شده و کاهش سرعت کاهش جرم می‌گردد که این نتایج بهبود رفتار احتراق PE را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

- ۱- نتایج آزمون STA نشان می‌دهد که افزودن منیزیم هیدروکسید به پلی‌اتیلن و افزایش درصد آن عملاً منجر به کاهش اشتعال‌پذیری پلی‌اتیلن می‌گردد، زیرا:
 - دو پدیده گرماده و گرماگیر مخالف هم، که در نتایج STA مشاهده می‌شود، افت انرژی گرمایی تخریب PE را نشان می‌دهد.
 - افزایش دمای بیکهای مربوط به واکنشهای گرماده در نمودار DSC نسبت به پلیمر خالص مشاهده می‌شود.
 - تخریب گرمایی نمونه‌های کندسوز شده به دمای بالاتری انتقال می‌یابد.
 - شیب نمودارهای تغییر جرم کاهش می‌یابد، که کند شدن تجزیه گرمایی ماده را نشان می‌دهد.
- ۲- نتایج گرماسنج مخروطی بهبود رفتار اشتعال‌پذیری PE را تایید می‌کند. افزایش زمان اشتعال و نسبت زمان اشتعال به حداکثر سرعت آزاد شدن گرما، کاهش PKHRR و کم شدن سرعت کاهش جرم با افزودن پرکننده منیزیم هیدروکسید مشاهده می‌شود.
- ۳- تجزیه گرمایی در برخی شرایط بطور موفقیت‌آمیز رفتار احتراق

1994.

9. Pritchard G.; *Plastic Additives (An A-Z Reference)*; Chapman & Hall, 1998.
10. Stollard P. and Abrahams J.; *Fire From First Principles*; spoon, London, 1995.
11. Redfern J.P., "The Use of Rate of Heat Release in Understanding Fire" *Int. J. Materials and Product Technol.*; **5**, 4, 4, 1990.
12. Rothon R. N. and Hornsby P.R., "Flame Retardant

Effects of Magnesium Hydroxide" *Polym. Degradation and Stab.*; **54**, 383-85, 1996.

13. Staggs J.E. and Whitelcy R.H., "Modelling the Combustion of Solid-phase Fuels in Cone Calorimeter Experiments" *Fire and Mater.*; **23**, 63-9, 1999.
14. Rhodes B.T. and Quintiere J.G. "Burning Rate and Flame Heat Flux for PMMA in a Cone Calorimeter" *Fire Safety J.*; **26**, 221, 1996.