

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی نساجی

پایان نامه کارشناسی ارشد- گرایش شیمی و علوم الیاف

مقاوم سازی الیاف پلی پروپیلن در برابر شعله ور شدن با استفاده از

نانو کلی ها

نگارش:

احمد طالبیان

استاد راهنما:

دکتر میرهادی سیداصفهانى

دکتر پرویز نورپناه

استاد مشاور:

دکتر هما عاصم پور

اسفند ۱۳۸۵



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
دانشکده مهندسی نساجی

پایان نامه کارشناسی ارشد در گرایش شیمی نساجی و علوم الیاف توسط آقای احمد طالبیان  
تحت عنوان

### مقاوم سازی الیاف پلی پروپیلن در برابر شعله وور شدن با استفاده از نانوکلی ها

در تاریخ ۸۵/۱۲/۹ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهائی قرار گرفت.

امضاء

دکتر میرهادی سید اصفهانی	استاد راهنمای پایان نامه	۱
دکتر پرویز نورپناه	استاد راهنمای پایان نامه	۲
دکتر هما عاصم پور	استاد مشاور پایان نامه	۳
دکتر حسین نازکدست	استاد داور (اختیاری)	۴
دکتر ناهید همتی نژاد	استاد داور (اختیاری)	۵
دکتر حسین امیرشاهی	سرپرست تحصیلات تکمیلی	۶

بسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

فرم اطلاعات پایان نامه  
کارشناسی ارشد و دکترا



معاونت پژوهشی  
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی

دانشگاه صنعتی امیر کبیر  
(پلی تکنیک تهران)

مشخصات دانشجو

نام و نام خانوادگی : احمد طالبیان دانشجوی آزاد  بورسیه  معادل   
شماره دانشجویی : ۸۳۱۲۸۱۳۶ دانشکده : مهندسی نساجی رشته تحصیلی: شیمی نساجی

نام و نام خانوادگی استاد راهنما : دکتر میرهادی سید اصفهانی، دکتر پرویز نورپناه

عنوان به فارسی : مقاومسازی الیاف پلی پروپیلن در برابر شعله‌ور شدن با استفاده از نانوکلی‌ها  
عنوان به انگلیسی : Improvement in flammability resistance of PP fibers by using nanoclays

نوع پروژه :  کاربردی  بنیادی  توسعه‌ای  نظری

تاریخ شروع : ۸۴/۷/۱ تاریخ خاتمه : ۸۵/۱۱/۳۱  
تعداد واحد : ۶ واحد سازمان تامین کننده اعتبار :

واژگان کلیدی به فارسی : پلی پروپیلن، نانوکلی، نانوکامپوزیت.  
واژگان کلیدی به انگلیسی : polypropylene, Nanoclay, nanocomposite, flame retardant

نظرها و پیشنهادهای به منظور بهبود فعالیت پژوهشی دانشگاه :  
استاد راهنما:  
دانشجو:

امضاء استاد راهنما : تاریخ :

نسخه ۱ : معاونت پژوهشی  
نسخه ۲ : کتابخانه و به انضمام دو جلد پایان نامه به منظور تسویه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این  
پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی  
امیرکبیر است

## تقدیر و تشکر:

یگانه پروردگار هستی را سپاس می‌گوییم که به لطف و بخشایش خداوندیش توفیق عطا فرمود تا این مجموعه را تقدیم دارم. لازم می‌دانم بدین وسیله از همکاری اساتید، متخصصین و دوستانی که در انجام و تحقق این پژوهش مرا یاری کردند، کمال تشکر و قدردانی را ابراز دارم، بزرگوارانی چون اساتید محترم جناب آقای دکتر سیداصفهان‌ی و سرکار خانم دکتر عاصم‌پور و دوستان عزیزم آقایان مهندس رضا فودازی، مهندس نیما مستوفی، مهندس محمدحسین احمدی و مهندس امیرجلال جلالی که در تکمیل این پروژه رهنمون من بودند.

تقدیم به:

مادر مهربانم که الفبای چگونه زیستن را به من آموخت و پدر بزرگوالم که  
یادش همواره گرمابخش روح من است و معلّم بزرگوالم سرکار خانم دکتر  
عاصم پور که نقشی تعیین کننده در زندگی تحصیلی من داشته اند.

## چکیده:

در این پروژه خواص حرارتی و شعله‌پذیری الیاف PP حاوی نانوفیلر خاک رس مورد بررسی قرار گرفته‌است. مخلوط PP و نانوذرات خاک رس با اختلاط پلیمر با غلظت‌های مختلف از خاک رس اصلاح‌شده (Cloisite 20A) و PP مالته‌شده (MF: 6.2) تهیه شدند. مخلوط تهیه‌شده به کمک یک اکسترودر تک‌پیچ ریسندگی شد.

خواص مکانیکی و ویژگی‌های حرارتی الیاف تهیه‌شده با استفاده از تکنیک‌های ترمال گراویمتری (TGA)، کالریمتری تفاضلی روبشی (DSC) و شاخص محدودکننده اکسیژن مورد بررسی قرار گرفتند.

به طور کلی معلوم گردید که حضور نانوذرات خاک رس اصلاح‌شده استحکام الیاف PP و دمای تخریب حرارتی-اکسایشی آن را کمی افزایش می‌دهد، اما موجب افزایش مدول لیف می‌شود. منحنی‌های TGA و DTGA الیاف نشان دادند که سرعت خروج مواد فرار در محدوده  $250^{\circ}\text{C}$  -  $25^{\circ}\text{C}$ ، به طور قابل توجهی با افزایش مقدار نانوفیلر در لیف کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج حاصل‌شده از تست LOI، تفاوت ناچیزی در رفتار شعله‌پذیری الیاف حاوی مقادیر متفاوت از نانوفیلر نسبت به لیف PP فاقد نانوفیلر مشاهده گردید.



## فهرست:

۱	مقدمه:
۳	فصل اول: تعاریف و لزوم کندسوز کردن الیاف پلی پروپیلن
۴	۱-۱- تعاریف
۵	۱-۱-۱- آفرزش
۵	۱-۱-۲- شعله
۵	۱-۱-۳- قابلیت اشتعال
۶	۱-۱-۴- نقطه اشتعال و نقطه آتش گرفتن
۶	۱-۱-۵- دمای خود اشتعالی
۶	۱-۱-۶- تخریب حرارتی (پیرولیز)
۷	۱-۱-۷- احتراق
۷	۱-۱-۸- گسترش شعله
۸	۲-۱- مراحل سوختن و احتراق پلیمرها
۸	۲-۱-۱- بالا رفتن دمای پلیمر
۸	۲-۱-۲- تخریب حرارتی
۹	۲-۱-۳- اشتعال (شعله ور شدن)
۱۰	۲-۱-۴- سوختن و احتراق
۱۰	۳-۱- مروری بر خواص الیاف پلی پروپیلن
۱۳	۴-۱- خواص حرارتی پلی پروپیلن
۱۶	۵-۱- کندسوز کننده‌های مورد استفاده برای پلی پروپیلن و الیاف آن
۱۹	۵-۱-۱- مکانیسم‌های عملکرد مواد کندسوز کننده
۲۱	۵-۱-۲- انواع ترکیبات کندسوز کننده مورد استفاده بر روی PP
۲۸	فصل دوم: مبانی نانو کامپوزیت‌های پلیمری
۳۰	۱-۲- نانو کامپوزیت‌های پلیمری
۳۲	۲-۲- سیلیکات‌های لایه‌ای

۳۴	۳-۲- اصلاح سطحی خاک رس
۳۵	۴-۲- روش‌های ساخت نانوکامپوزیت‌های پلیمر و خاک رس
۳۶	۲-۴-۱- روش محلولی
۳۶	۲-۴-۲- روش پلیمریزاسیون درجا
۳۸	۲-۴-۳- روش اینترکلیشن در حالت مذاب
۳۸	۲-۴-۴- روش سل - ژل
۳۹	۲-۴-۵- سنتز با استفاده از تمپلت‌ها
۴۰	۲-۵-۵- آرایش‌های مختلف لایه‌های رسی در نانوکامپوزیت‌ها
	۲-۵-۱- نفوذ و تداخل زنجیره‌های پلیمری بین صفحات سیلیکاتی و تشکیل ساختار
۴۰	اینترکلیشن
	۲-۵-۲- تغییر آرایش صفحات سیلیکاتی و پخش شدن آن در زمینه پلیمری و تشکیل
۴۰	ساختار اکسفلیت یا ورقه‌ای شده
۴۱	۲-۶- اهداف تهیه نانوکامپوزیت‌های پلیمری
۴۲	۲-۷- نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن - خاک رس
۴۵	۲-۸- مقاومت در برابر شعله‌وری نانوکامپوزیت‌ها
۴۹	فصل سوم: مراحل تجربی
۵۰	۳-۱- مواد مورد استفاده
۵۰	۳-۱-۱- پلی‌پروپیلن
۵۱	۳-۱-۲- سازگارکننده
۵۱	۳-۱-۳- نانوذرات خاک رس
۵۲	۳-۲- تهیه نمونه‌ها
۵۲	۳-۲-۱- تهیه مستریج حاوی سازگارکننده و خاک رس
۵۳	۳-۲-۲- تهیه آمیزه برای ریسندگی
۵۳	۳-۲-۳- ریسندگی نمونه‌ها

۵۴	۳-۲-۴- کشش نمونه‌ها
۵۴	۳-۲-۵- تهیه ورق از نمونه‌ها
۵۵	۳-۳- تعیین مشخصات نمونه‌ها
۵۵	۳-۳-۱- آزمون تفرق اشعه ایکس
۵۷	۳-۳-۲- بررسی مقاومت حرارتی نمونه‌ها
۵۷	۳-۳-۳- آنالیز حرارتی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کالریمتری روبشی تفاضلی (DSC)
۵۸	۳-۳-۴- شاخص محدودکننده اکسیژن (LOI)
۵۸	۳-۳-۴- بررسی خواص مکانیکی الیاف تهیه‌شده
۶۰	فصل چهارم: بحث و تفسیر نتایج
۶۱	۴-۱- انتخاب مواد اولیه و شرایط تولید الیاف
۶۳	۴-۲- نتایج آزمون اشعه ایکس و مورفولوژی
۶۷	۴-۳- نتایج حاصل از آزمون کالریمتر تفاضلی روبشی
۶۸	۴-۳- نتایج آزمون ترمال گراویمتری (وزن سنجی گرمایی)
۷۱	۴-۴- نتایج آزمون شاخص محدودکننده اکسیژن
۷۵	۴-۵- نتایج آزمون خواص مکانیکی
۷۸	نتیجه‌گیری کلی
۷۹	پیشنهادات
۸۰	منابع:

## فهرست جداول

صفحه	عنوان جدول
۱۱	جدول ۱-۱- خواص عمومی پلی پروپیلن
۱۵	جدول ۲-۱- خواص ترمودینامیکی پلی پروپیلن در $230^{\circ}\text{C}$
۵۰	جدول ۱-۳- ویژگی‌های PP گرید V30S
۵۱	جدول ۲-۳- ویژگی‌های پلی پروپیلن مالئیکه شده گرید QF 300E
۵۲	جدول ۳-۳- ویژگی‌های خاک رس اصلاح شده مورد استفاده
۵۴	جدول ۴-۳- ترکیب درصد نمونه‌های تهیه شده
۶۴	جدول ۱-۴- اطلاعات حاصله از آزمون تفرق اشعه ایکس نمونه‌ها
۷۲	جدول ۲-۴- مقادیر شاخص محدودکننده اکسیژن نمونه‌ها
۷۵	جدول ۳-۴- خواص مکانیکی الیاف تهیه شده
۷۷	جدول ۴-۴- مقادیر استحکام واقعی محاسبه شده برای الیاف

## فهرست اشکال

صفحه	عنوان شکل
۱۲	شکل ۱-۱- واحد ساختمانی پلی پروپیلن
۱۳	شکل ۱-۲- ذوب ریزی متداول پلی پروپیلن
۳۳	شکل ۱-۲- ساختار مونت موریلونیت
۴۱	شکل ۲-۲- آرایش های مرسوم نانوکامپوزیت ها در مقایسه با کامپوزیت معمولی
۴۴	شکل ۳-۲- ساختار شیمیایی پلی پروپیلن گرافت شده با مالئیک انیدرید
۵۱	شکل ۱-۳- ساختار شیمیایی اصلاح کننده به کار رفته در Cloisite 20A
۵۳	شکل ۲-۳- نمودار گشتاور بر حسب زمان تولید مستریچ سازگار کننده و خاک رس
۵۵	شکل ۳-۳- شمای دستگاه کشش برای کشش نمونه ها
۵۶	شکل ۴-۳- انعکاس پرتوهای اشعه ایکس از صفحات لایه ای
۵۹	شکل ۵-۳- شمای دستگاه آزمون شاخص محدود کننده اکسیژن
۶۳	شکل ۱-۴- منحنی تفرق اشعه ایکس نمونه های نانوکامپوزیتی و خاک رس Cloisite 20A
۶۷	شکل ۲-۴- مقایسه منحنی DSC الیاف PP، PP حاوی ۱٪ فیبر و PP حاوی ۴٪ فیبر
۶۸	شکل ۳-۴- تخریب حرارتی پلی پروپیلن
۶۹	شکل ۴-۴- مقایسه منحنی TGA الیاف PP، PP حاوی ۱٪ فیبر و PP حاوی ۴٪ فیبر
۷۰	شکل ۵-۴- مقایسه منحنی DTGA الیاف PP، PP حاوی ۱٪ فیبر و PP حاوی ۴٪ فیبر
۷۳	شکل ۶-۴- تغییرات LOI بر حسب غلظت خاک رس در نمونه های نانوکامپوزیتی تهیه شده

## مقدمه:

با وجود حصول پیشرفت‌های بزرگ علمی و تکنولوژیکی، بشر همچنان از بابت آتش‌سوزی و عواقب جانی و مالی آن رنج می‌برد. آمارهای رسمی ارائه شده حاکی از این موضوع است که سالیانه حدود ۵۰۰۰ نفر در اروپا و بیش از ۴۰۰۰ نفر در آمریکا بر اثر آتش‌سوزی کشته می‌شوند [۱]. این تلفات اغلب در محل‌هایی اتفاق می‌افتد که در وسایل به‌کار رفته در آنها غیر از چوب، از پلاستیک‌ها استفاده شده است که خود پلاستیک‌ها منابع سوختی خوبی می‌باشند. قابل ذکر است که گسترش مصرف تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی در خانه‌ها و ادارات نیز بر احتمال وقوع آتش‌سوزی در این اماکن دامن می‌زند. کاربرد وسیع پلیمرهای سنتزی در زندگی روزمره نیز به نوبه خود خطر وقوع چنین حوادثی را افزایش می‌دهد. به دلیل اهمیت موضوع، امروزه توجه بسیاری از محققین به بهبود مقاومت مواد در برابر شعله‌ور شدن، به ویژه در مورد الیاف پلیمری معطوف گردیده است. در این راستا پلی‌پروپیلن (PP) به دلیل وسعت مصرف، بیش از سایر مواد پلیمری در کانون توجه محققان و پژوهشگران قرار گرفته است.

پلی‌پروپیلن نخستین پلیمر سنتزی با ساختار فضایی منظم است که برای مقاصد صنعتی به‌کار گرفته شده است و در حال حاضر الیاف PP برای اهدافی که نیازمند استحکام کششی بالا و قیمت پایین هستند، بیشترین مصرف را دارد. رشد متوسط مصرف جهانی PP در دهه اخیر در حدی بوده است که پس از پلی‌استر آن را در ردیف دومین لیف مصنوعی پرمصرف جهان قرار داده است. الیاف پلی‌پروپیلن در صنایع تولید پوشاک، رومبلی، کفپوش منازل و اماکن دیگر، منسوجات مصرفی در خودروها، پوشش‌های دیواری، مصارف پزشکی، منسوجات قابل مصرف در زمین یا ژئوبافته‌ها (Jeotextile) و غیره بکار می‌رود. استحکام بالا همراه با دانسیته پائین، مقاومت خوب در برابر اکثر مواد شیمیایی و قیمت مناسب الیاف PP را می‌توان دلیل اصلی رشد و تنوع مصرف آن دانست [۲]. با این وجود مقاومت پایین الیاف PP در برابر حرارت و استعداد آن به شعله‌پذیری، در کاربرد آن به عنوان کف‌پوش ساختمان‌ها و نیز پوشش اتومبیل‌ها و هواپیماها محدودیت ایمنی ایجاد می‌کند. تلاش‌های انجام گرفته برای کاهش این نقاط ضعف منجر به آن شده است که از افزودنی‌هایی تحت عنوان کندسوزکننده‌ها در الیاف PP استفاده شود. متأسفانه برای رسیدن به یک نتیجه مطلوب، به

غلظت‌های بالایی از مواد کندسوزکننده نیاز است که این امر سبب افزایش قیمت تمام‌شده لیف PP و در مواردی کاهش برخی از خواص مفید آن می‌شود.

بین سالهای ۱۹۸۰-۱۹۵۰، ترکیبات شیمیایی زیادی به عنوان کندسوزکننده برای پلیمرها معرفی شدند، اما در ۲۵ سال گذشته به دلیل افزایش نگرانی بابت سمیت و پیامدهای زیست محیطی این مواد، استفاده و توسعه آنها با محدودیت‌هایی روبه‌رو شده است. تنها استثناء واقعی در این زمینه افزودن ذرات خاک رس در ابعاد نانو به پلیمرها می‌باشد [۳]. طبق بررسی‌های به عمل آمده معلوم گردیده است که افزودن مقادیر اندک از خاک رس به پلاستیک‌ها، قابلیت اشتعال آنها را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد و به موازات آن سایر خواص پلیمر را نیز بهبود می‌بخشد و این در حالی است که اثرات منفی کندسوزکننده‌های شیمیایی را حذف می‌نماید.

با وجود آنکه تاکنون تحقیقات علمی زیادی پیرامون اثرات نانوفیلر خاک رس بر پلی‌پروپیلن انجام گرفته است و اثر مثبت این فیلر در کندسوز کردن این پلیمر به اثبات رسیده، اما هنوز تلاش قابل توجهی در جهت کاربرد این نانوذرات در الیاف پلی‌پروپیلن صورت نگرفته است. با توجه به این امر، در پروژه حاضر سعی شده است که الیافی از نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن و نانوذرات خاک رس اصلاح شده تهیه گردد و تأثیر این نانوفیلر در غلظت‌های متفاوت بر مقاومت الیاف مزبور در برابر شعله‌ور شدن مورد بررسی قرار گیرد.

## فصل اول

تعاریف و لزوم کندسوز کردن الیاف پلی پروپیلن



آتش همواره بشر را مجذوب و در عین حال هراسناک می‌کند، زیرا آتش در عین مفید بودن می‌تواند مرگ‌آور نیز باشد. بشر بدون آتش قطعاً تمدنی متفاوت می‌داشت و حتی شاید متمدن نمی‌شد. اما آتش همواره بایستی تحت کنترل باشد، در غیر اینصورت با ایجاد آتش‌سوزی می‌تواند خسارت‌های مالی و جانی غیر قابل‌جبرانی را به بشر تحمیل کند. از این رو بشر همواره برای محافظت خود در برابر حوادث آتش‌سوزی سعی دارد تا حداقلی از محافظت و ایمنی را به‌کار گیرد. رسیدن به این سطح از ایمنی مستلزم شناخت آتش و پدیده‌های مرتبط با آن است. به دلیل ارتباط این موضوع با هدف پروژه، در ابتدای این فصل تعاریفی در رابطه با آتش و آتش‌سوزی ارائه می‌شود [۴]، [۵]، [۶].

## ۱-۱- تعاریف

آتش پدیده‌ای شیمیایی است که با ایجاد نور و گرما عیان می‌شود. دو نقطه ابتدایی و انتهایی هر آتش، اشتعال و خاموشی است و فرایند بین این دو نقطه، فرایند سوختن است. هیچ نوع اشتعال یا سوختنی در غیاب مواد سوختنی (سوخت)، گرما (انرژی) و هوا (اکسیژن) رخ نمی‌دهد. همچنین مواد هیچ‌گاه در حالت جامدشان نمی‌سوزند، بلکه باید ابتدا گرم شده، به نقطه‌ای برسند که تجربه (تخریب حرارتی)<sup>۱</sup> شوند و تولید بخار نمایند و در نهایت بخارهای حاصل از تخریب حرارتی ماده است که شعله‌ور می‌شوند.

---

<sup>۱</sup> - Pyrolysis



#### ۱-۱-۴- نقطه اشتعال و نقطه آتش گرفتن<sup>۱</sup>

دمایی که یک سوخت باید به آن برسد تا گازهای حاصل از آن در مجاورت یک منبع آفرورش مشتعل شوند، نقطه اشتعال و دمایی که سوخت باید به آن برسد تا بخارات حاصل از آن به طور پایدار به سوختن ادامه دهند، نقطه آتش گرفتن نامیده می شود.

#### ۱-۱-۵- دمای خود اشتعالی<sup>۲</sup>

دمای خود اشتعالی دمایی است که ماده بدون حضور منبع خارجی حرارت شعله ور می شود. به عبارت دیگر، خود اشتعالی میزان انرژی مورد نیاز جهت اشتعال ماده به تنهایی و بدون حضور شعله یا جرقه است.

#### ۱-۱-۶- تخریب حرارتی (پیرولیز)

ریشه کلمه پیرولیز، دو کلمه یونانی پیرو<sup>۳</sup> به معنای آتش و لیز<sup>۴</sup> به معنای شکستن است. پیرولیز را می توان به بیان ساده تر، شکست مولکول به وسیله گرما تعریف کرد. گازهای حاصل از پیرولیز مواد آلی به دلیل خاصیت نفوذکنندگی بالای خود، به سرعت با اکسیژن مخلوط می شوند و فرایند سوختنشان خیلی سریع است. سوخته های مایع و جامد نیز ابتدا باید به حالت بخار در آیند تا بتوانند بسوزند.

بنابراین چوب، زغال، رنگ، پلیمرهای آلی و ترکیبات آلی جامد دیگر وقتی در معرض حرارت قرار می گیرند، قبل از هرگونه مشتعل شدن دچار تغییرات شیمیایی می شوند و به عبارت دیگر تحت فرایند برگشتناپذیری به مولکول های کوچکتری با فرآریت و قابلیت اشتعال بیشتر تخریب

---

<sup>۱</sup> - Flash point and Fire point

<sup>۲</sup> - Auto ignition temperature

<sup>۳</sup> - Pyro

<sup>۴</sup> - Lysis

حرارتی (پیرولیز) می‌شوند و متعاقباً مشتعل می‌گردند. بسته به میزان انرژی گرمایی اعمال شده، فرایند اشتعال مواد ممکن است فرایندی سریع و یا کند باشد.

### ۱-۱-۷- احتراق<sup>۱</sup>

احتراق یک سری از واکنش‌های بسیار سریع بین ماده‌ای به نام سوخت و اکسیژن می‌باشد که با آزاد شدن گرما و نور همراه است. حضور سه عامل اکسیژن، گرما و یک ماده سوختنی برای ایجاد احتراق الزامی است و حذف هر یک از اینها به معنای متوقف شدن واکنش‌های احتراقی است. مجموعه این سه عامل اساسی، مثلث آتش نامیده می‌شود. حذف هر یک از این سه جزء (گرما، سوخت و اکسیژن) واکنش را متوقف ساخته و باعث خاموش شدن آتش می‌شود. معمولاً اکسیژن مورد نیاز برای رویداد یک احتراق را هوا تامین می‌کند، اما اکسیدکننده‌های دیگری غیر از اکسیژن هوا نیز می‌توانند موجب احتراق مواد شوند. این اکسیدکننده‌ها اکثراً در معرض حرارت، فشار یا هر دوی آنها اکسیژن آزاد می‌کنند.

### ۱-۱-۸- گسترش شعله<sup>۲</sup>

گسترش شعله، فرایند انتقال حریق از یک نقطه به نقطه دیگر یک ماده است که سرعت آن با میزان حرارت تولید شده بر اثر سوختن ماده ارتباط مستقیم دارد. به عبارت دیگر، هر چه میزان حرارت تولید شده ضمن سوختن یک ماده بیشتر باشد، شعله در زمان کوتاهتری در آن انتقال می‌یابد و به بیان دیگر سرعت گسترش شعله بیشتر می‌شود.

قابل ذکر است که حرارت ایجاد شده بر اثر حریق و یا تجزیه حرارتی باعث تبخیر افزودنی‌های موجود در ماده و خارج شدن آنها از فاز متراکم می‌شود.

---

<sup>۱</sup> - Combustion

<sup>۲</sup> - Flame spread