

## تحضير متراكبات بوليمرية مقاومة للاحتراق

نورة محمد فتاح

عباس خليل ابراهيم

حميد كاظم عباس

وزارة العلوم والتكنولوجيا / دائرة بحوث المواد

بغداد - العراق

## الخلاصة

استخدمت بعض المضافات اللاعضوية لتعمل بصورة منفردة او بالتأزر لتحسين مقاومة الاحتراق لمزيج من البولي اثيلين واطى الكثافة (LDPE) والبولي بروبيلين (PP) ذوات الاستخدامات المتعدده ونسبة (1:1) استخدم هيدروكسيد المغنيسيوم  $Mg(OH)_2$  لوحده واستخدم مع ثاني اوكسيد السيليكون ( $SiO_2$ ) لتكوين متراكبة بوليمرية واستخدمت هذه المضافات كبدائل عن المركبات الهالوجينية المضادة للاحتراق والتي يرافق احتراقها وتفككها تولد غازات مضره بالصحة والبيئة مثل الكلوريدات والبروميدات ، بينما المركبات المستخدمة في هذا البحث لا تولد اي مواد او غازات مضره بالصحة والبيئة. ولقد تم اختبار نجاح هذين المركبين عن طريق الطرق القياسية لبيان مدى كفاءة المضافات في إعاقه اللهبية والمعتمدة من قبل الجمعية الأمريكية للفحص والمواد (ASTM) حيث تم قياس معامل الأوكسجين المحدد (LOI) و قياس سرعة الاحتراق او زمن الاحتراق و قياس ارتفاع اللهب وقد استخدم  $Mg(OH)_2$  بالنسب (0.0,20,30,40,50%) وكانت افضل نسبة خلط (50%) واستخدم  $Mg(OH)_2$  مع ( $SiO_2$ ) لتعمل بصورة تأزرية وقد كانت افضل نسبة  $Mg(OH)_2$  45% مع 5%  $SiO_2$  كفعل تأزري بين هذين المضافين .

**الكلمات المفتاحية:** مركبات هالوجينية، مضادات احتراق، فعل تأزري و معامل الأوكسجين المحدد.

## Preparation of Flame Retardant Composite Polymers

Hameed Kadhim Abbas Abbas khaleel Abraheem Noora Mohammed Fatah

Ministry of Science and Technology /Directorate of Materials Researches

Baghdad– Iraq

E-mail:hameed\_kaf@yahoo.com

## Abstract

Some inorganic additives used to work as alone or with synergistic effect to improve flame retardant of low density Polyethylene with poly propylene as a blend with (1:1) both of them have multipurpose uses .Magnesium Hydroxide ( $Mg(OH)_2$ ) used alone and with Silicon Dioxide ( $SiO_2$ ) to make a polymer composite and used as substitute materials instead of halogenic materials as flame retardant additives because halogenic materials generate poison gases when it burns and make a hazard to health and environment like chlorides and bromides gases while  $Mg(OH)_2$  and ( $SiO_2$ ) don't generate these gases. the success of these two compounds by reliable methods to see how successful are these compounds to decrease the flammability and these methods are (ASTM) , limiting oxygen index ,time of burning and vertical flame.  $Mg(OH)_2$  used with deferent percentages (0.0,20,30,40 and 50%), the best percentage was 50% while the best percentage was 45%  $Mg(OH)_2$  and 5%  $SiO_2$  as a synergistic effect between the two additives.

**Key Words:** Halogenic Component, Flame Retardant, Synergistic Effect and Limiting Oxygen Index

على (LOI) Limiting Oxygen Index والتأثير على معامل ارتفاع اللهب UI-94 مما يؤدي الى تقليل النسبة المضافة من هيدروكسيد المغنيسيوم مع زيادة في مقاومة الاشتعال وتستخدم السيليكا الرغوية كعامل تحسين (Enhancing Agent) في البوليمرات البلاستيكية لزيادة المواصفات الميكانيكية مثل (Tensile Strength) والميكانيكية (Toughness) (Kashiwagit, et al., 2000).

ان آلية منع حصول الاحتراق تتضمن امتصاص الحرارة عند اطلاق بخار الماء او ثاني اوكسيد الكربون من خلال منع وصول زيادة من الاوكسجين الى المواد المحترقة (Camino and Delobel, 2000) و (Rothon, 2003) ويعتبر استهلاك الاوكسجين مقياس يستخدم في تقييم خصائص الاشتعال للمواد (Levehik and Weil, 2001).

إن الغازات غير القابلة للاشتعال (Non Flammable Gases) تخفف من المواد المتطايرة القابلة للاشتعال (Volatile Materials) وتوفر جواً خاملاً يشكل (Inert Atmosphere) غطاءً غازياً بين الأوكسجين والمنطقة المحترقة، إما الفحم Char المتكون من خلال عملية التحول الحراري فإنه يشكل عازلاً مستقر حرارياً يحمي البوليمر من الحرارة. (Faris and Hameed, 2012).

يهدف البحث الى تحضير مواد بوليمرية باستخدام هيدروكسيد المغنيسيوم و السليكا الرغوية (Fumed Silica) كمادة دقيقة وبحجم حبيبي 250 nm بعد اجراء الفحص في مختبر النانو تكنولوجي في دائرة بحوث المواد

Particle size :250 nm

Specific gravity 2.2,

Specific surface 15,000 to

300,000m<sup>2</sup>/kg

Moisture 3%

لتعمل بصورة تآزرية مع هيدروكسيد المغنيسيوم كمضافات مانعة للاحتراق ودراسة تأثيرها على المادة البوليمرية (Ou, 2001) والمواد البلاستيكية المحضرة عند احتراقها لا تسبب مشاكل صحية او مشاكل للبيئة بالنتيجة يمكن ان تنتج هذه المواد بمواصفات ميكانيكية وحرارية حسب مجال الاستخدام.

هناك أنواع عديدة من المركبات التي تستعمل كمانع للاحتراق منها المعادن اللاعضوية والفوسفات العضوي والمركبات الهالوجينية وكل هذه المركبات لها القابلية على تقليل اللهب وخدم الدخان المتحرر من البلاستيك والمركبات الأخرى. (Wang, et al., 2001)

في السنوات القليلة الماضية تم تطوير مانعات اللهب غير الهالوجينية (HFFR) - Halogen free Flame Retardant في المواد البوليمرية مع خفض نسبة اطلاق الغازات السامة الناتجة من الاحتراق والكثير من البحوث العلمية الحديثة اثبتت ان هيدروكسيد المغنيسيوم Mg(OH)<sub>2</sub> هو غير سام ولا يحرر دخان وهو من مانعات اللهب غير الهالوجينية (HFFR) ويمتاز بدرجة انحلال وتجزئة تحتاج الى درجة حرارة عالية لكي يتم تحلله حرارياً، وتضاف Mg(OH)<sub>2</sub> الى المادة المراد تثبيط ومنع حدوث الاشتعال فيها لكي يتم الحصول على افضل مقاومة للاشتعال وحسب نوع المادة الاساس (Cross et al., 2003) كذلك يتم استخدام مواد مع ال Mg (OH)<sub>2</sub> لتعمل بصورة تآزرية (Grexa and Liibke, 2001) لتحسين مقاومة الاشتعال ولتقليل نسبة تحميل Mg (OH)<sub>2</sub>.

هيدروكسيد المغنيسيوم (Mg(OH)<sub>2</sub>) يمتلك مواصفات مهمة منها ادائه العالي، الكلفة المناسبة، السمية المنخفضة وكذلك يحسن من المواصفات الميكانيكية للبوليمر. ان المبدأ الاساسي في عمل هيدروكسيد المغنيسيوم هو انه يحرر بخار الماء عند وصوله الى درجة حرارة التفكك مما يؤدي الى حدوث عمليات الاطفاء.

ان المواد النانوية المضافة يمكن ان تحسن من مواصفات البوليمر المستخدم ضد الاشتعال واللهب وتحسين المواصفات الميكانيكية والريولوجية (انسيابية البوليمر) وتقلل من نسبة اطلاق اللهب وتقلل من قابلية البوليمر للاشتعال. (Rothon, 2003).

أن السيليكا الرغوية (SiO<sub>2</sub>) تؤثر بصورة جيدة كمادة مضادة للاحتراق تعمل بصورة تآزرية (Synergistic Effect) مع هيدروكسيد المغنيسيوم حيث ان استخدام كمية مناسبة من السيليكا الرغوية يمكنها زيادة قيمة معامل الاوكسجين المحدد

وكان الوزن الإجمالي للخليط (60 غرام) وهذه القدرة الاستيعابية لخزان عجانة الحبيبات البوليمرية باستخدام ميزان ذو مرتبتين عشريتين بعد الفارزة

**جدول (1) النسب المئوية لهيدروكسيد المغنيسيوم المستخدمة في تحضير النماذج**

Sample NO.	LDPE W%	PP W%	Mg(OH) <sub>2</sub> W%
1	50	50	0
2	32.5	32.5	20
3	30	30	30
4	25	25	40
5	22.5	22.5	50

عجن الخليط المكون من البولي بروبيلين والبولي اثيلين ونسبة 1:1 و هيدروكسيد المغنيسيوم بالجهاز بدرجة حرارة 190 درجة مئوية ولمدة 15 دقيقة ،بالنسبة للنماذج (20,0.0 و 30%) فكانت درجة الحرارة 190 درجة مئوية ولمدة 15 دقيقة وذلك لان المادة المألنة تعمل على رفع درجة انصهار البوليمر عادةً وذلك للتأكد من تجانس الخليط وتداخله مع بعضه البعض .  
أما بالنسبة للنموذجين ( 40 و 50 %) فكانت نسبة الهيدروكسيد عالية مما أدى الى صعوبة في خلط المزيج لذلك تم زيادة وقت العجن إلى 20 دقيقة .

أخذت النماذج وهي ساخنة لكونها تمتاز بقابلية الكبس ، ووضع كل النموذج في القالب و عرض لدرجة حرارة 190 درجة مئوية وضغط 15 بار ولمدة 5 دقيقة داخل المكبس الحراري وبعد ذلك رفع الضغط عن القالب المغلف بورق الألمنيوم .

المواد وطرائق العمل

المواد الاولية والمواد المساعدة

بولي اثيلين واطى الكثافة :منشأ شركة سابك

البولي بروبيلين :منشأ شركة سابك

هيدروكسيد المغنيسيوم ( تجاري )

السليكا الرغوية :منشأ الماني ، شركة (Merk) وبحجم حبيبي 250 nm

الاجهزة المستخدمة

جهاز عجن الحبيبات البوليمرية

وهو الجهاز الرئيسي الذي استخدم في عجن الخليط وهو من موديل (Brabender) ومنشأ (Germany) وكان من المفترض أن يحتوي على (Extruder) ولكن هذا الجزء منه كان عاطل عن العمل بسبب قدم الجهاز.

المكبس الحراري

وهو الجهاز الذي تم الكبس به بعد العجن بسبب عطل (Extruder) الخاص بجهاز عجن الحبيبات البوليمرية لذلك تم الاستعانة بهذا المكبس وهو من موديل (Moore) ومنشأ (England).  
وكذلك قوالب الكبس والتي تم تصنيعها محلياً من قبل الباحث في ورش الحدادة المحلية وهي بقياس (3 ملم سمك وبشكل مربع بطول 15سم للضلع )..

منظومة قياس ارتفاع اللهب

منظومة قياس سرعة الاحتراق

منظومة قياس معامل الاوكسجين المحدد LOI

استخدم ورق الألمنيوم كطبقة عازلة بين البلاستيك والمكبس لمنع التصاق البوليمر بالمكبس وهو متوفر في الأسواق المحلية.

تحضير نماذج البولي بروبيلين والبولي اثيلين

حضرت النماذج للتجربة الأولى باستخدام المضاف الأول (Mg(OH)<sub>2</sub>) وعددها 5 نماذج لكل بوليمر حيث كانت النسب بالتدريج (0.0,20,30,40 و 50%) وكما في الجدول (1)

طريقة قياس معامل الأوكسجين المحدد باستخدام  
طريقة الفحص (LOI) ASTM:D-2863-74

جدول (2) النسب المئوية لهيدروكسيد المغنيسيوم  
والسيلكا

NO.	LDPE W%	PP W %	Mg(OH) <sub>2</sub> W%	SiO <sub>2</sub> W%
1	50	50	0	0
2	25	25	50	0
3	25	25	48	2
4	25	25	45	5
5	25	25	42	8
6	25	25	38	12

تعد هذه الطريقة من الطرق القياسية المختبرية  
الواسعة الاستخدام في العالم في تحديد قابلية لهوية  
المواد البوليمرية المختلفة وهذا يحصل من خلال  
قياس اقل كمية من غاز الأوكسجين (معبّر عنها  
بالنسبة المئوية الحجمية لغاز الأوكسجين) واللازمة  
لاستمرار اشتعال المادة البوليمرية، المتدفق من  
خلال مزيج مكون من غازي الأوكسجين  
والنيتروجين إلى أنبوبة الاختبار، تستخدم هذه  
الطريقة لكافة المواد البوليمرية التي تكون بهيئة  
رقائق.

يقاس معامل الأوكسجين المحدد (LOI)  
(Limiting Oxygen Index) عند حصول حالة  
توازن أو استقرار بين كمية الحرارة المتولدة من  
عملية الاحتراق مع كمية الحرارة المفقودة إلى  
المحيط. ولتحقيق ذلك يتم تحديد الفترة الزمنية  
اللازمة للاحتراق أو تحديد ارتفاع الجزء المحترق  
خلال فترة زمنية معينة.. وعند اخذ العوامل أعلاه  
بنظر الاعتبار، فإن كمية غاز الأوكسجين اللازمة  
لحدوث الاحتراق خلال تلك الفترة الزمنية أو خلال  
مسافة معينة تدعى بمعامل الأوكسجين (OI)  
Oxygen Index.

ترك كل النموذج حتى يبرد للحصول على قالب من  
البوليمر صقيل ومتساوي وكذلك لسهولة إزالة ورق  
الألمنيوم عن البوليمر وكما في شكل (1) الذي  
يوضح شكل النموذج النهائي:

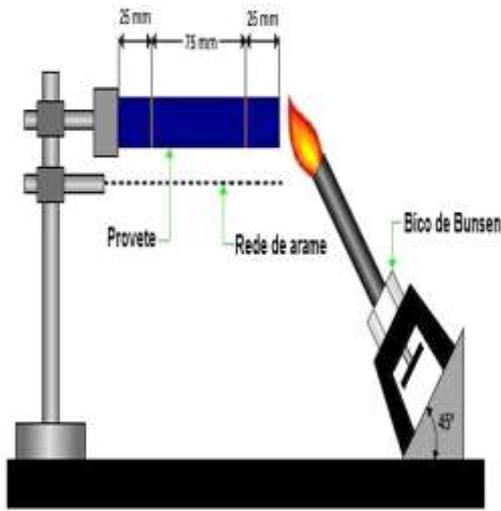


شكل (1) صورة النموذج النهائي بعد الكبس

أما بالنسبة للسيليكا الرغوية، فبعد الحصول  
على النموذج الذي يمتاز بأعلى مقاومة للاحتراق  
،وبعد الفحوصات المتبعة تبين انه النموذج 5  
وبنسبة 50% من هيدروكسيد المغنيسيوم ، حيث  
تم إضافة السيليكا النانوية إلى خليط البولي  
بروبيلين وهيدروكسيد المغنيسيوم وبالنسب  
0.0, 2.0, 5.0 و 12% حيث كل نسبة من السيليكا  
النانوية تتناسب عكسياً مع نسبة هيدروكسيد  
المغنيسيوم أي كل وزن من السيليكا يتم إنقاصه  
من الهيدروكسيد مع ثبات وزن البولي بروبيلين  
للحفاظ على نسبة البوليمر والمضافات ثابتة دون  
تغيير (60 غرام)، وبعد ذلك اجريت نفس  
الخطوات السابقة وبنفس درجة الحرارة 190  
درجة مئوية و بوقت 20 دقيقة بالنسبة للعجن  
وكذلك بالنسبة للمكبس درجة الحرارة 190  
درجة مئوية والضغط 15 بار والمدة 5 دقائق  
ولنفس القالب الذي هو 3 ملم.

#### طرق الفحص المستخدمة لقياس اعاقه اللهبية

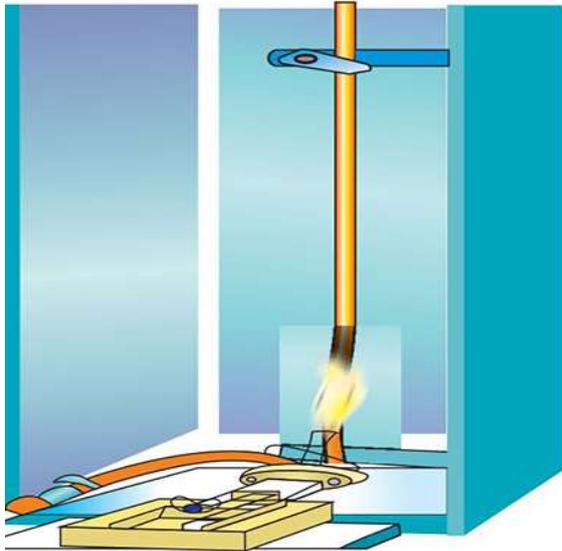
اختيرت ثلاث طرق قياسية لفحص وقياس  
كفاءة المواد المستخدمة كمضافات ( Additives )  
( لغرض إعاقه لهوية ( Flame Retardant )  
البولي بروبيلين وهذه الطرق  
معتمدة من قبل الجمعية الأمريكية للفحص  
(ASTM) وهي :



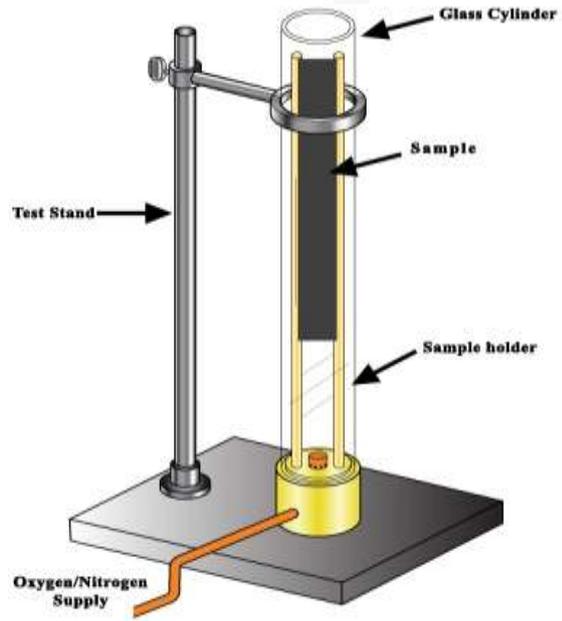
شكل (3) منظومة قياس سرعة الاحتراق للبوليمر

طريقة قياس ارتفاع اللهب باستخدام طريقة  
الفحص (ASTM:D-3014)

تعد هذه الطريقة من الطرق المخبرية والتي  
تستخدم لقياس أقصى ارتفاع يصل إليه اللهب  
للبوليمر المشتعل، ومقدار الفقدان في وزن المادة  
البوليمرية نتيجة الاحتراق



شكل (4) منظومة قياس ارتفاع اللهب



شكل (2) منظومة معامل الاكسجين المحدد LOI

طريقة قياس معاملات سرعة الاحتراق

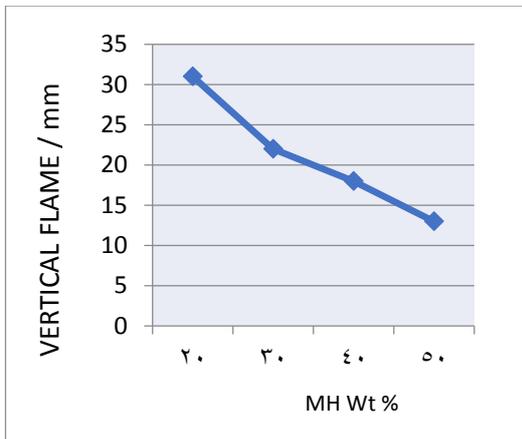
(ASTM:D-635 )

تعد هذه الطريقة من الطرق المخبرية المعتمدة  
عالمياً والتي تستخدم لقياس سرعة انتشار اللهب في  
المواد البوليمرية المختلفة وحساب الفترة الزمنية  
التي تستغرقها عملية الاحتراق وكذلك حساب معدل  
المسافة المحترقة من النموذج خلال تلك الفترة  
الزمنية. وتستخدم بشكل واسع في المواد البوليمرية  
التي يمكن تحويلها إلى ألواح أو صفائح أو قضبان،  
ومن خلال هذه الطريقة يمكن معرفة احتمالية حدوث  
إطفاء ذاتي بعد فترة زمنية أو احتراق جميع النموذج.  
وتصنف المواد البوليمرية التي يمكن اختبارها في  
هذه الطريقة إلى مواد قابلة للاحتراق، مواد غير قابلة  
للاحتراق ومواد يحدث بها إطفاء ذاتي بعد فترة  
زمنية من الاحتراق.

عند إجراء فحص ارتفاع اللهب على النماذج والتي عددها 8 نماذج والمحضرة بحسب طريقة العمل انفة الذكر وبحسب المواصفات الأمريكية (ASTM D-3014) اتضح إن نسبة 50% من هيدروكسيد المغنيسيوم هي الأحسن حيث كانت النتائج كما في جدول (3) وشكل (7) بعد إجراء الفحص :

جدول (3) العلاقة بين ارتفاع اللهب والنسبة المئوية لهيدروكسيد المغنيسيوم

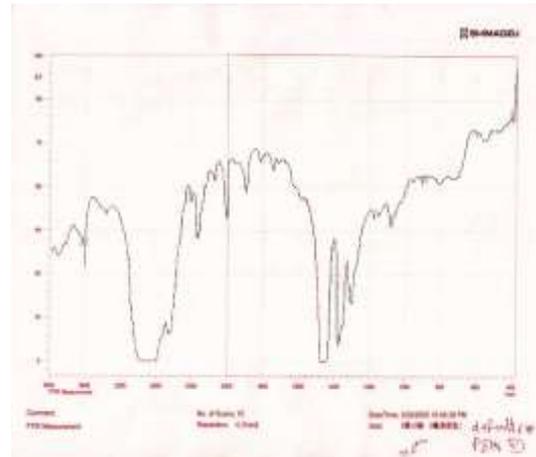
N	Mg(OH) <sub>2</sub> %	VERTICAL FLAME (mm)
1	0	50
2	20	31
3	30	22
4	40	18
5	50	13



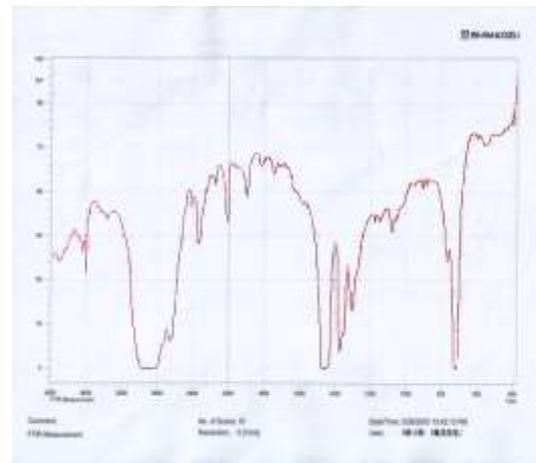
شكل (7) العلاقة بين ارتفاع اللهب والنسبة المئوية لهيدروكسيد المغنيسيوم

ويجب مراعاة عدة أمور عند إجراء الفحص لكي نحصل على أفضل نتائج وهي إجراء الفحص داخل غرفة الغاز وذلك لكي لا يؤثر الهواء

تم إجراء هذا الفحص قبل وبعد الاضافة لمعرفة الاختلاف في المجاميع الفعالة بين النموذجين والخاصة بالمواد المضافة مثل (Si) و (mg) من خلال القمم المضافة في الرسم البياني في النموذج الثاني بعد الاضافة وللمقارنة بين الرسمين البيانيين الموضحة في الشكلين (5 و 6) .



شكل (5) فحص (FT-IR) للبوليمر بدون اضافات

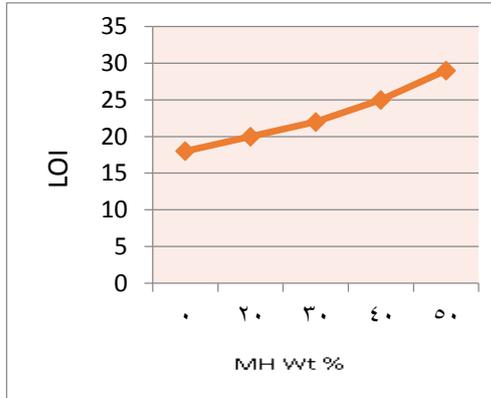


شكل (6) فحص (FT-IR) للبوليمر مع المضافات

إجري فحص معامل الأوكسجين المحدد (LOI) باستخدام النسب الميينة في جدول (5) من (MH) وتبين من نتائج الفحوصات أن أفضل نسبة من (MH) تعطي أعلى قيمة لـ (LOI) هي للنموذج رقم 5 وهذا يبرز تحسن واضح في مواصفات النماذج المحضرة.

جدول (5) العلاقة بين معامل الاوكسجين المحدد والنسبة المئوية لهيدروكسيد المغنيسيوم

Sam ple no.	PP+LD PE 1:1 W%	Mg(OH) <sub>2</sub> W%	LOI
1	100	0	18
2	80	20	20
3	70	30	22
4	60	40	25
5	50	50	29



شكل (9) علاقة نسبة (MH) مع (LOI)

المرحلة الثانية من البحث وبعد التأكد من أن النموذج 5 هو الذي أعطى أحسن نتائج فقد تم اعتماده لعمل فعل تآزري مع السيليكا الرغوية وبالنسب المحددة في الجدول (6)

وقد تبين بعد إجراء الفحوصات المعتمدة تبين إن أحسن نسبة من السيليكا الرغوية من حيث الفعل التآزري والجدوى الاقتصادية هي في النموذج 5

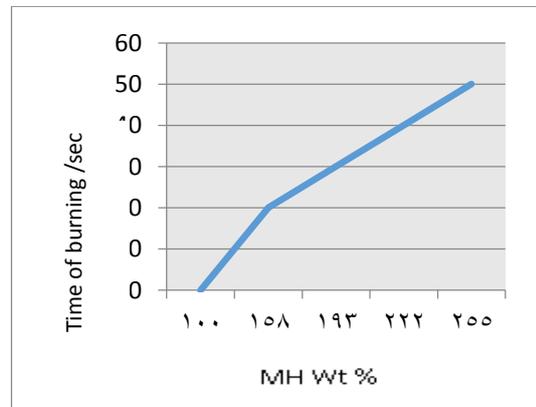
الخارجي على الفحص ويجب التأكد من نظافة النماذج وخلوها من أي زيوت أو شوائب قد تؤثر على الفحص.

عند إجراء فحص سرعة الاحتراق ( زمن الاحتراق) (ASTM : D- 635) وجد ايضاً إن نسبة (50 %) هي الأكفأ من حيث مقاومة الاحتراق وكما هو موضح في الجدول (4)

جدول(4) العلاقة بين زمن الاحتراق والنسبة المئوية لهيدروكسيد المغنيسيوم

NO.	Mg(OH) <sub>2</sub> %	Time of Burning (sec)
1	0	100
2	20	158
3	30	193
4	40	222
5	50	255

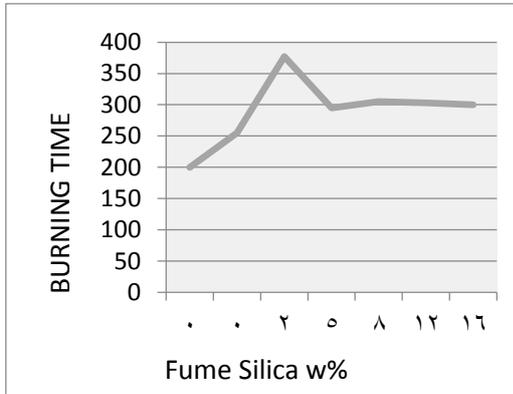
تم إجراء الفحص داخل غرفة سحب الغازات لكي لا يتأثر بالهواء الخارجي والتأكد من نظافة النموذج و الشكل (8) يوضح العلاقة بين سرعة احتراق النموذج والنسبة المئوية لهيدروكسيد المغنيسيوم:



شكل (8) العلاقة بين زمن الاحتراق ونسبة الهيدروكسيد في البوليمر

جدول (7) تأثير الفعل التآزري بين السيليكا الرغوية وهيدروكسيد المغنيسيوم على ارتفاع اللهب

NO.	PP W%	MH W%	SiO <sub>2</sub> W%	Vertical Flame	
1	100	0	0	50	
2	50	50	0	12	
3	50	48	2	10.5	
4	50	45	5	8	
5	50	42	8	9	
6		50	38	12	9



شكل (10) العلاقة بين النسبة المئوية للسيليكا الرغوية من حيث الفعل التآزري مع هيدروكسيد المغنيسيوم وسرعة الاحتراق للبوليمر

حيث وجد ان النموذجين 5 و6 قد استهلكا اكثر وقت للاحتراق ولكن النموذج 5 هو الانسب اقتصادياً لان نسبة السيليكا اقل من النموذج 6.

جدول (6) العلاقة بين نسب المضافات وسرعة الاحتراق للبوليمر

No.	MH %	SF%	Burning Time (Sec)
1	0	0	200
2	50	0	255
3	48	2	377
4	45	5	295
5	42	8	305
6	38	12	303
7	34	16	300

أما بالنسبة لفحص ارتفاع اللهب فقد أعطى نفس النتائج من ناحية اقل ارتفاع اللهب النموذج 5 .

يجب التأكد من عدم تكون فقاعات في النموذج المكبوس لأنها قد تؤثر على نتائج الفحوصات وان من أسباب تكون الفقاعات هي زيادة درجة حرارة الكبس فوق المطلوب مما يؤدي إلى تكون فجوات هوائية داخل النموذج وبالتالي فشله .

ان النجاح الحقيقي للحصول على بوليمرات ذات مقاومة جيدة للاحتراق تتطلب ان تكون درجة الانتشار والتوزيع للمواد النانوية المضافة عالية بين جزيئات المادة البوليمرية مع الحرص على عدم حصول تكتلات فيها وهذا يتطلب انسجامية عالية بين المادة البوليمرية والمادة النانوية المضافة التي تعمل كمادة مانعة للاحتراق. ويمكن ان تعمل مواد النانو بصورة تآزرية مع المواد المانعة للاحتراق التقليدية (Levehik and weil,2006).

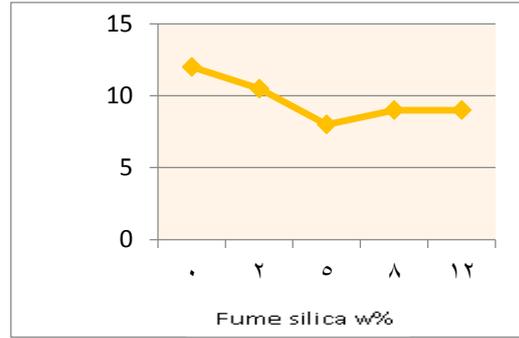
#### التوصيات :

- 1- استخدام نفس المضافات مع مواد بوليمرية أخرى لتحسين مقاومتها للاحتراق.
- 2- الاعتماد على البوليمرات الحيوية الصديقة للبيئة في الصناعات البلاستيكية والبوليمرية بمختلف انواعها .
- 3- تقليل الاثر البيئي للصناعات البلاستيكية باستخدام مضافات صديقة للبيئة .

#### References

Camino, G. and Delobel, R.,( 2000). "Fire retardancy of Polymeric Materials", A.F. Grand and C.A. Wilkie (eds.), Marcel Dekker Inc., New York, 217–243.

CROSS, M.S.; CUSACK, P.A. and Hornsby, P.R. (2003) "Effects of Tin Additives on the Flammability and Smoke Emission Characteristics of Halogen-free Ethylenevinyl Acetate Copolymer". Polymer Degradation and Stability, 79, 309–318.

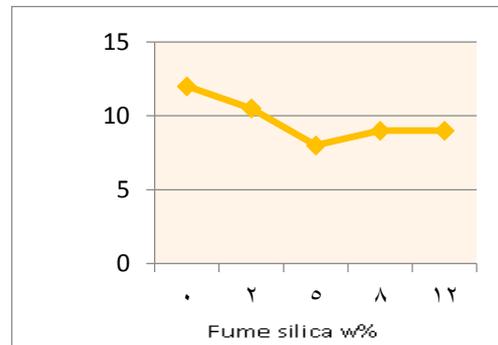


شكل (11) العلاقة بين الفعل التآزري للمضاف مع ارتفاع اللهب

جدول (8) تأثير الفعل التآزري بين السيليكا الرغوية وهيدروكسيد المغنيسيوم على معامل الأوكسجين المحدد

NO.	PP W%	MH W%	SiO <sub>2</sub> W%	LOI
1	100	0	0	18
2	50	50	0	34
3	50	48	2	36
4	50	45	5	38
5	50	42	8	37
6	50	38	12	35

تم فحص معامل الأوكسجين المحدد ووجد إن النموذج 5 هو الأفضل قياساً بالنماذج الأخرى وكما في النتائج المبينة في الجدول (8) .



شكل (12) العلاقة بين الفعل التآزري للمضافان ومعامل الأوكسجين المحدد

**Faris, A.H.** and Hameed, K.A (2012)  
"Flame Resistance of Epoxy Resin"  
Journal of Madinat Al Ilm, (4), Essue.  
(2),23-29 .

**Grexa, O,** and Liibke, H.(2001)  
polymer Degrad. Stab 2001; 74,427-32.

**Grexa, O.** and Liibke, H. (2001),"  
"Silicon-based Flame Retardants",  
Polymer Degradation. Stability; 89,  
2072–2078.

**Kashiwagi, T.;** Gilman, J.W.; Butler,  
K.M. and Harriss, R.H.(2000)" Flame  
Retardant Mechanism of Silica  
Gel/Silica"Fire and Materials, . 24, (6)  
, 277-289

**Levehik, S.V.** and E.D. Weil .  
(2006)."A Review of Recent Progress in  
Phosphorus-based Flame Retardants",  
Journal of Fire Science 24(5), 345-364 .

**Mouzheng, F.U** and Baojun, Q.U.  
(2004). Mechanical Properties and  
Structural Characteristics of PP/PP-g-  
SBR Nanocomposites Prepared by  
Dynamical Photografting", Journal of  
Polymer Advanced Technology 15(8),  
467–471

**Ou, Y.** (2001)." Flame –retardant  
Polymeric Materials .Beijing: National  
Defense Industry Press;

**Rothon, R.** (2003)." Particulate Filled  
Polymer Composites". Shrewsbury,  
UK: Rapra Technology. 53–100.

**Wang, Z.Z.;** Qu, B.j.; fan, W.C. and  
Huang, P.J.(2004). "Polymer  
Degradation Synergistic Flame and  
Stability ".Appl Polym Sci; 85,633-639