استخدام تقنية الليزر في قياس سرعة جبهة اللهب
و سرعة انتشار اللهب الطباقية لخليط الميثان - الهواء مسبق الخلط

حيدر صباح الأعرجي
المركز العالي للمهن الشاملة/
بني وليد

حميد جويد الغزي
كلية العلوم -جامعة الاقسام
بني وليد

ملخص البحث :

في هذا البحث تم استخدام تقنية ليزر الهليوم-نيون (He-Ne Laser) ذو الطول الموجي($0.6328\mu m$) لقياس سرعة جبهة اللهب الطباقية (Laminar Flame Speed) لخليط الميثان- الهواء مسبق الخلط وذلك بتحديد موقع جبهة اللهب في اسطوانة الاحتراق من خلال قطع جبهة اللهب شعاع الليزر بصورة عمودية عند مسافات محددة و حساب الزمن الذي استغرقته جبهة اللهب لقطع تلك المسافات المحددة.

تمت القياسات عند الظروف (P=1atm, T=298K) ولمدى واسع من النسبة المكافئة(Equivalence Ratio)، جميع تلك القياسات أجريت خلال فترة ثبوت الضغط وذلك لاستخدام طريقة نسبة الكثافة(Density Ratio Method) في حساب سرعة انتشار اللهب الطباقية(Laminar Burning Velocity) والتي تمثل ثابت فيزيوكيميائي للخليط .

مقارنة نتائج البحث الحالي مع النتائج المنشورة لسرعة انتشار اللهب الطباقـية دلت على توافق كبير بينهما مما يؤكد فعالية التقنية المستخدمة في هذا البحث.

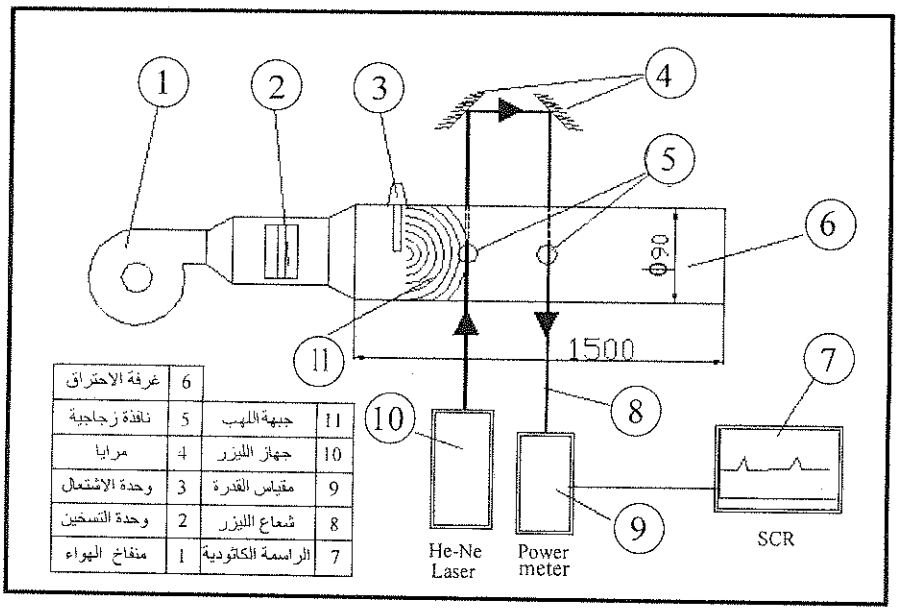
1- المقدمة :

إن قياس كل من سرعة جبهة اللهب الطباقية وسرعة انتشار اللهب الطباقية لمختلف أخلاط الوقود ـــ الهواء له أهمية كبيرة في دراسة أداء منظومات الاحتراق ومنها محركات الاحتراق الداخلي وكذلك فان معظم النماذج الرياضية للاحتراق الاضطرابي يعتمد في الأساس على قيم دقيقة لسرعة انتشار اللهب الطباقية وعلى أساس هذه الأهمية فقط قام عدد كبير من الباحثين والمؤسسات البحثية بتطوير أنظمة وتقنيات لقياس كل من سرعة جبهة اللهب وسرعة انتشار اللهب .هذه التقنيات في مجملها تعتمد على تحسس إحدى الظواهر المرافقة لجبهة اللهب بحيث يتم تحديد موقع جبهة اللهب .وبالتالي قياس سـرعة جبهة اللهب ومن خلالها استنتاج سرعة انتشار اللهب من ابرز هذه التقنيات : استخدام المزدوج الحراري ، و مسبار التأين ، و قياس الضغط المرافق لانتشـار اللهب .و هذا بالإضافة إلى التقنيات البصرية بمختلف أنواعها والتقنية الضوئية .ومن خلال استعراض هذه التقنيات يمكن استنتاج إن التقنيات البسـيطة والرخيصة غير دقيقـة في حـين إن التقنيات الدقيقة تكون عالية الكلفة وتحتاج إلى إمكانية تقنية متقدمة للاسـتخدام وهذا يجعل من الضروري التفكير بتقنيات بسيطة وذات دقة عالية .

في هذا البحث لم يعتمد على تحسس إحدى الظواهر المرافقة لجبهة اللهب حـيث لم يتم قياس درجة الحرارة او الضغط إثناء الاحتراق وإنما تم الاستفادة من ظاهرة تغير قدرة الليزر عند اعتراضه ،هنا تم اعتراض الليزر عند مرور جبهة اللهب خلاله،حيث تم تحديد سرعة هذه الجبهة داخل غرفة الاحتراق من خلال اعتراض جبهة اللهب شـعاع الليزر بصورة عمودية وعلى مسافات محددة و تحديد الفترة الزمنية الحاصلة بين تغيرين لقـدرة الليزر(**الفاصلة الزمنية بين مراحل قطع جبهة اللهب لشعاع الليزر**) .

2- الجهاز المستخدم :

يتكون الجهاز المستخدم بصورة أساسية من جزئين،الجزء الأول غرفة الاحتراق الاسطوانية الشكل بالإضافة الى عدد من الأجهزة و الملحقات الضرورية لتحضير الخليط وعملية الإشعال أما الجزء الثاني فهو منظومة القياس باستخدام جهاز الليزر ومرايا ومقياس قدرة الليزر وجهاز الراسمة الكاثودية ويبين شكل (1) مخطط للجهاز المستخدم.



غرفة الاحتراق	6		
نافذة زجاجية	5	جبهة اللهب	11
مرايا	4	جهاز الليزر	10
وحدة الاشتعال	3	مقياس القدرة	9
وحدة التسخين	2	شعاع الليزر	8
منفاخ الهواء	1	الراسمة الكاثودية	7

شكل(1) مخطط للجهاز المستخدم

3 - تحضير خليط الوقود :

إن من أهم العوامل المؤثرة على سرعة جبهة اللهب هي نسبة الخلط بين الوقود والهواء والتي يعبر عنها بواسطة النسبة المكافئة (Equivalence Ratio φ) والتي تحسب من معادلة(1)

$$\phi = \frac{\left(F/A\right)_a}{\left(F/A\right)_s} \qquad (1)$$

حيث $\left(F/A\right)$ هي نسبة الوقود إلى الهواء الحقيقية إما $\left(\frac{F}{A}\right)_s$ فهي نسبة الوقـود إلى الهواء المثالية وللخليط الكيميائي الصحـيح تكون($\varphi = 1$) وللخليط الغني($\phi > 1$) إما للخليط الضعيف($\phi < 1$) لذلك يجب الاهتمام بـإعداد الخليط ليعطي النسبـة المكافئة المطلوبة . تم إعداد الخليط عن طريق قياس الضغط الجزئي لكل من الوقود والهواء بواسطة مقياس الضغط التخلخلي حيث يتم تفريغ الأنبوب من الهواء ونواتج الاحتراق بواسطة المضخة المفرغة ثم غسل الأنبـوب بـالهواء لثلاث مرات إلى إن يتم التأكد من خلو الأنبوب من نواتج الاحـتراق ثم يتم إدخال الهواء المجفف من بخار الماء (**لضمان أن تكون مكونات الهواء N_2, O_2**) وعن طريق نسبة الضغوط الجزئية يتم تحديد النسبـة المكافئة .

الميثان المستخدم في هذا البحث كان بنقاوة مقدارها 99.21% وللتأكد من كفاءة نظام إعداد الخليط فقـد تم إجراء تحليل كيميائي لعينات من الخليط عند نسـب خليط مختلفة وأثبتت النتائج دقة نظام إعداد الخليط .

يتم تسخين الهواء الداخل والأنبوب والسيطرة على درجة الحرارة الابتدائية للخليط بواسطة وحدة تسخين الهواء الداخل والشريط المسخن المثبـت حـول الأنبـوب من الخارج، حيث تعتبر درجة الحرارة الابتدائية من أهم العوامل المؤثرة على سرعة انتشـار اللهب و بوجود مروحة محورية داخل الأنبـوب تعمل على تجانس الخليط من حـيث المكونات ودرجة الحرارة .

بعد إن يتم تحضير الخليط والسيطرة على درجة حرارته وضمان تجانسه يتم إيقـاف عمل المروحة والانتظار لمدة بحدود خمس دقائق وذلك لضمان زوال تأثير المروحـة على انتشار اللهب طباقيا، بعد ذلك يتم إشعال الخليط عن طريق وحدة الإشعال حيث بـعد إعطاء شرارة الإشعال تتكون جبهة لهب و تنتقل خلال خليط الهواء والوقود غير المحترق بسرعة تمثل سرعة جبهة اللهب.

4-تقنية القياس المستخدمة :

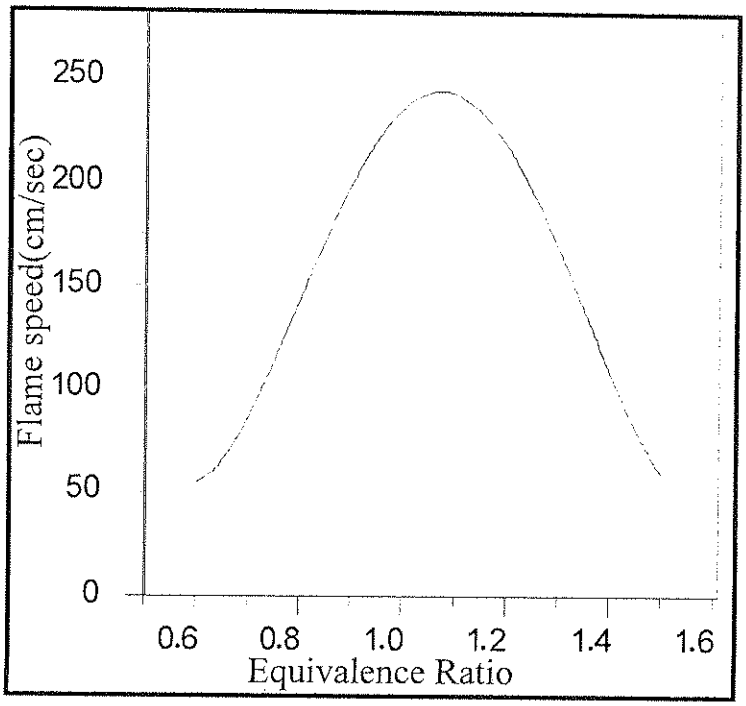
في هذا البحث تم استخدام ليزر (He – Ne) ذو اللون الاحمر ($\lambda=0.6328\mu m$)لقياس سرعة جبهة اللهب الطباقية من خلال امرار الليزر في غرفة الاحتراق الاسطوانية الشكل بصورة مستعرضة عبر اربعة نوافذ زجاجية دائرية الشكل ذات قطر (5mm) موزعة على جانبي الاسطوانة على مسافة (250mm) و بصورة متقابلة ،تبتعد اول النافذتين المتقابلتين عن مصدر اشعال الخليط (**شمعة القدح**) بمسافة(200mm) لضمان حصول نمو متكامل لجبهة اللهب.

وتتلخص طريقة القياس بالشكل التالي يتم امرار شعاع الليزر المتولد بواسطة جهاز الليزر ذو القدرة (10mW) في اول النافذتين المتقابلتين ويتم عكسه بواسطة مرآتين عاكستين كليا للطول الموجي($\lambda=0.6328\mu m$) من أجل إمراره في النافذتين المتقابلتين الاخرتين ليتم استقباله بواسطة مقياس القدرةذو حساسية(4.28mA/W)عند الطول الموجي(0.6328μm) والمربوط بجهاز الراسمة الكاثودية(SCR) والتي عليها يمكن عرض منحني قدرة الليزر مع الزمن .

عندما يعترض شعاع الليزر النافذ من النافذتين الأوليتين عبر غرفة الاحتراق بواسطة جبهة اللهب يحصل تشوية لقدرة الليزر يؤشر على الراسمة الكاثودية وعند وصول جبهة اللهب الى النافذتين التاليتين سوف يعترض شعاع الليزر مرة أخرى ويحصل تشوية ثاني لقدرة الليزر يؤشر على العارض.

يستفاد من الفترة الزمنية الحاصلة بين التشويه الأول لليزر و التشويه الثاني لتحديد الزمن الذي استغرقته جبهة اللهب لقطع المسافة المعلومة بين النافذتين ، وبقسمة المسافة بين النافذتين (250mm) على الزمن الذي استغرقته جبهة الهب لقطع المسافة المعلومة بين النافذتين أمكن قياس سرعة جبهة اللهب الطباقية ولمدى واسع من النسب المكافئة ، الشكل (2) يوضح معدل تغير سرعة جبهة اللهب الطباقية لخليط الميثان ـــ الهواء مع

النسبة المكافئة لعشر تجارب لكل نسبـــة مكافئة .جميع القياســـات أجريت عند درجة حرارة ابتدائية مقدارها (K298) وضغط (atm1) .



شكل(2) تغير سرعة جبهة اللهب الطباقية مع تغير النسبة المكافئة

3- المناقشة والاستنتاجات :

إن احد ابرز أهداف البحث هو إثبات إمكانية استخدام نظام القياس الجديد في قياس ابرز معالم عملية انتشار اللهب وخاصة سرعة انتشار اللهب ولهذا السبب تم اســـتخدام غاز الميثان لإجراء القياســـات عليه وذلك بســـبب كون النتائج العملية لخليط الميثان – الهواء متوفرة بشـــكل اكبر من النتائج العملية للأخلاط الأخرى مما يوفر إمكانية جيدة لأجراء المقارنة .

النتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث سيتم مناقشتها على النحو التالي :ـ

1-3 سرعة جبهة اللهب :-

إن جبهة اللهب تتحرك بسرعة ناتجة عن سرعة انتشار اللهب وسرعة الغاز غير المحترق الذي يتحرك إمامها، سرعة انتشار اللهب تعتمد بشكل أساسي على معدل التفاعل الكيميائي والذي يعتمد بدوره على درجة حرارة اللهب إذ يزداد معدل التفاعل الكيميائي بازدياد درجة حرارة اللهب ، أما سرعة الغاز غير المحترق فهي أساسا ناتجة عن التمدد الحراري لذلك الغاز وهذا التمدد ناتج عن انتقال الحرارة بالتوصيل والحمل والإشعاع من جبهة اللهب والغاز غير المحترق لذلك فإن سرعة الغاز غير المحترق تعتمد على درجة حرارة اللهب إذ تزداد بزيادتها ، ومن هذا نستنتج بان سرعة جبهة اللهب تزداد بزيادة درجة حرارة اللهب وتقل بنقصانها ، الشكل (2) يوضح تغير سرعة جبهة اللهب مع النسبة المكافئة ويلاحظ من الشكل زيادة سرعة جبهة اللهب في الجانب الغني للخليط، إن هذا السلوك لسرعة جبهة اللهب ناتج عن ارتباط سرعة الجبهة بدرجة حرارة اللهب حيث انه بزيادة النسبة المكافئة في الجانب الضعيف للخليط تزداد كمية الوقود ومع توفر كمية الأوكسجين الكافية لحرق الوقود احتراقا تاما فان كمية الحرارة المتحررة عن الاحتراق سوف تزداد مما يعني زيادة درجة حرارة اللهب وبالتالي زيادة سرعة جبهة اللهب الناتجة عن ازدياد كل من سرعة انتشار اللهب وسرعة الغاز غير المحترق إما في الجانب الغني للخليط فان زيادة النسبة المكافئة تعني زيادة كمية الوقود في الخليط بحيث تصبح كمية الأوكسجين المتوفرة في الخليط غير كافية لحرق الوقود حرقا تاما مما يسبب احتراقا غير تام للوقود وينتج عنه تكون غاز أول أوكسيد الكربون (CO) وهو الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض كمية الحرارة المتحررة عن الاحتراق وبالتالي انخفاض درجة حرارة اللهب وكذلك سرعة جبهة اللهب .

إن الغرض من قياس سرعة جبهة اللهب هو حساب سرعة انتشار اللهب والتي تمثل ثابت فيزيوكيميائي للخليط ، ولحساب سرعة انتشار اللهب تم اعتماد طريقة نسبة

الكثافة التي أوردها الباحث (8) والتي توضح العلاقة بين سرع I انتشار اللهب وسرعة جبهة اللهب بالمعادلة التالية :

$$S_u = \frac{\rho_b}{\rho_u} S_f \qquad (2)$$

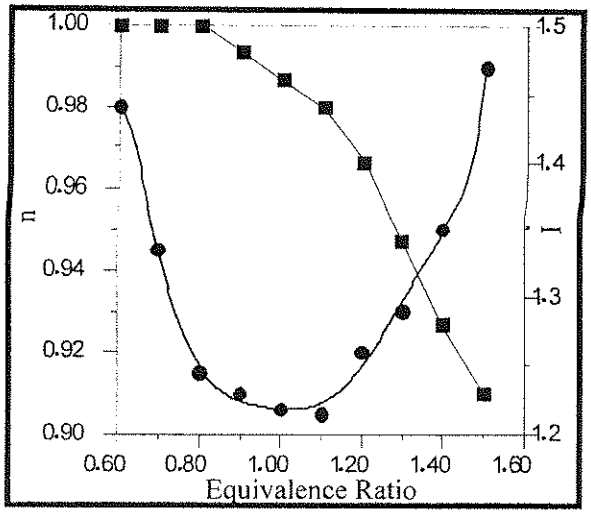
حيث إن (ρ_u) كثافة الخليط قبل الاحتراق و (ρ_b) هي كثافة الخليط الناتج عن الاحتراق ، والحقيقة إن الصعوبة الأساسية تكمن في حساب كثافة الغازات الناتجة عن الاحتراق والصعوبة تأتي بسبب تأثير سمك جبهة اللهب الذي يسبب اختلاف درجة حرارة اللهب الحقيقية عن درجة الحرارة الاديباتية بسبب انتقال الحرارة ، وهذه المشكلة تكون واضحة عند العمل في الضغوط الواطئة حيث يكون سمك جبهة اللهب كبيرا ، وللتغلب على هذه المشكلة يمكن اعتماد الأسلوب الذي استعمله الباحث (8) حيث إن :

$$\frac{\rho_b}{\rho_u} = \frac{T_u}{T_{ad}} \frac{I}{n} \qquad (3)$$

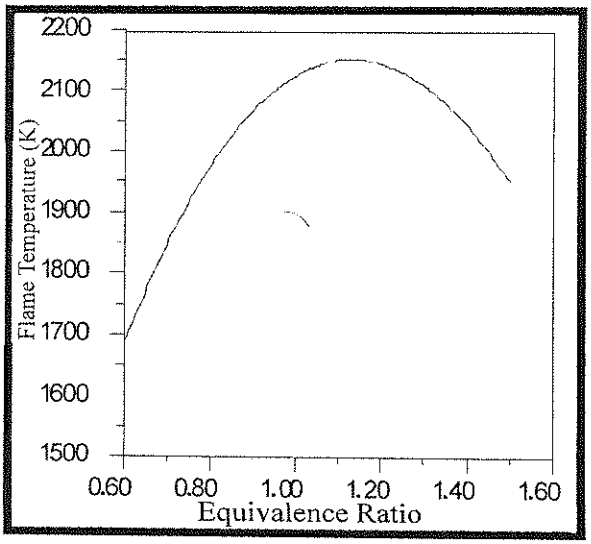
حيث T_u درجة حرارة الغاز غير المحترق و T_{ad} درجة حرارة اللهب الاديباتية و I معامل تصحيح و n نسبة عدد مولات نواتج الاحتراق الى عدد مولات المتفاعلات.

تم اعتماد تغير I و n مع النسبة المكافئة الموضحة في الشكل (3). وللتقليل من نسبة الخطأ في حساب سرعة انتشار اللهب باستخدام هذه الطريقة يجب أن تكون درجة حرارة اللهب الاديباتية (T_{ad}) قريبة من درجة حرارة اللهب الحقيقية ، ودرجة حرارة اللهب تحسب نظريا على أساس أن التفاعل الكيميائي أثناء الاحتراق هو إجراء أديباتي وهو تفاعل تام مما يؤدي إلى كون القيم المحسوبة نظريا اكبر من قيم درجة حرارة اللهب الحقيقية ومن ثم تكون قيم سرعة انتشار اللهب اقل من القيم الحقيقية ، والسبب في ذلك يعود إلى أمرين أولهما هو أن الاحتراق ليس عملية اديباتية والثاني هو حصول ظاهرة التفكك(Dissociation) عند درجات الحرارة العالية مما يعمل على تقليل درجة حرارة اللهب . في هذا البحث تم حساب درجة حرارة اللهب الاديباتية مع إدخال ظاهرة التفكك على اعتبار أن نواتج الاحتراق مكونة من (19) مركباً في حالة عدم

وجود التفكك فإنها تتكون من (HO,CO,N) والشـــكل (4) يوضح تغير درجة حرارة اللهب الاديباتية مع النسبة المكافئة[14] .

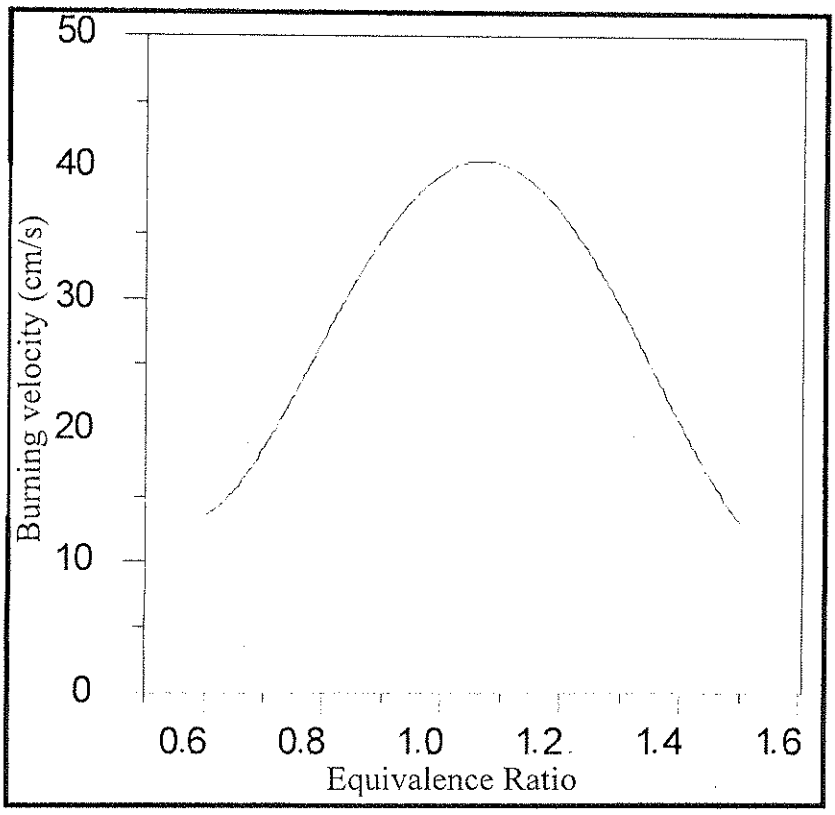


شكل(3)تغير قيم I,n مع تغير النسبة المكافئة



شكل(4)تغير درجة حرارة اللهب مع تغير النسبة المكافئة

درجة حرارة الغاز غير المحترق T_u تم قياسها بواسطة المزدوج الحراري المثبت في نهاية الأنبوب ، ومن خلال المعادلة (2) تم حساب سرعة انتشار اللهب والشكل (5) يوضح تغير سرعة انتشار اللهب المحسوبة مع النسبة المكافئة .



شكل(5) تغير سرعة انتشار اللهب الطباقية مع تغير النسبة المكافئة

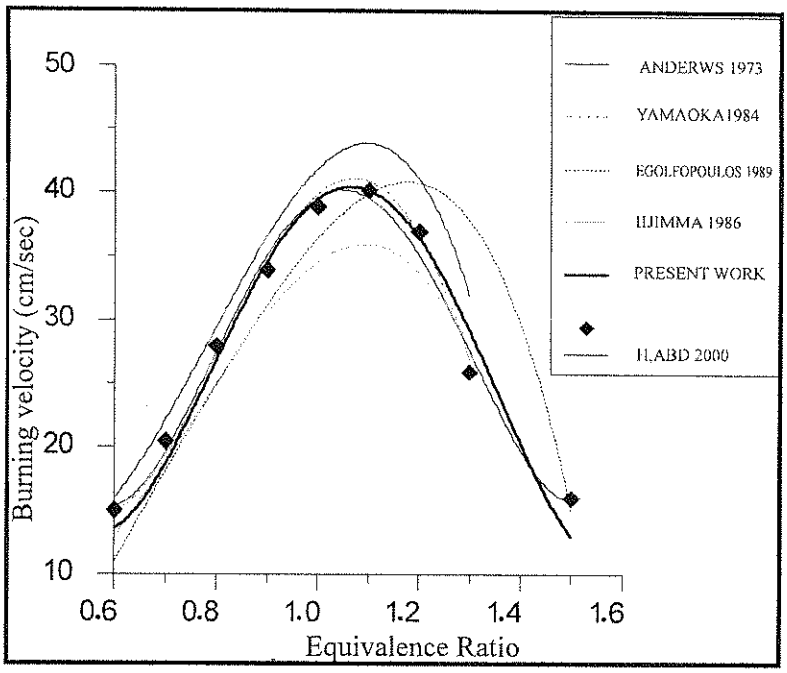
نلاحظ من شكل (5) إن سرعة انتشار اللهب تزداد مع اقتراب نسبة الخلط من نسبة الخلط الصحيحة ،ثم تبدأ تقل مع وصول نسبة الخلط الى نسبة الخلط الغنية والسبب في ذلك هو إن الخليط الغني يمتاز بارتفاع قيم الخواص الحرارية وخاصة الموصلية الحرارية مما يؤدي إلى زيادة كمية الحرارة المفقودة من الخليط إلى جدار الأنبوب وهذا هو الأمر الذي يحد من ارتفاع درجة حرارة اللهب وبالتالي يقلل من سرعة جبهة اللهب .

نظريا كان من المفترض أن تحصل القيم العظمى لسرعة جبهة اللهب عند نسبة الخلط الكيميائي الصحيح ($\phi = 1$) ولكن النتائج العملية أثبتت إن هذه القيم تحصل عند خليط غني بنسبة قليلة وهذه الحالة ناتجة عن تأثير ظاهرة التفكك التي تحصل عند درجات الحرارة العالية بحيث تجعل القيمة العظمى لدرجة حرارة اللهب لا تحصل عند نسبة الخلط الكيميائي الصحيح وإنما عند خليط غني قليلا وبسبب ارتباط سرعة جبهة اللهب بدرجة حرارتها فان سرعة جبهة اللهب العظمى تحصل عند نسبة الخليط التي تعطى درجة حرارة عظمى أي عند ($\phi = 1.1$) .

2-3 سرعة انتشار اللهب :-

إن حساب سرعة انتشار اللهب يعتبر الهدف الأساسي لهذا البحث إذ أنها تمثل ثابت فيزوكيميائي ، ويمكن من خلال مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث مع نتائج البحوث المنشورة التأكد من سلامة استخدام نظام القياس .

يلاحظ من الشكل (5) والذي يمثل تغير سرعة انتشار اللهب مع النسبة المكافئة بان قيم سرعة انتشار اللهب الطباقية تزداد بازدياد النسبة المكافئة في الجانب الضعيف للخليط إلى إن تصل إلى قيمة عظمى ($\phi = 1.1$) وبعدها تبدأ بالانخفاض مع زيادة النسبة المكافئة وهي بذلك تشابه سلوك سرعة جبهة اللهب ، إن هذا السلوك ناتج عن تناسب سرعة انتشار اللهب الطباقية مع معدل التفاعل الكيميائي والذي بدوره يتناسب طرديا مع درجة حرارة اللهب. الشكل (6) يمثل مقارنة نتائج سرعة انتشار اللهب التي تم الحصول عليها في هذا البحث مع عدد من النتائج العملية والتي يتم الحصول عليها باستخدام طرق مختلفة مبينة في الشكل ،حيث نلاحظ من الشكل التفاوت بين هذه القيم سرعة انتشار اللهب مع اختلاف التقنيات المستخدمة في قياسها و حسابها ، كما إن النتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث تعتبر جيدة مقارنة مع النتائج المنشورة سابقا.



شكل (6)مقارنة تغير سرعة انتشار اللهب الطباقية المستحصلة في هذا البحث مع عدة بحوث سابقة

المصادر

1- Phylaktou , H. and Andrews , G. E " the combustion Institute , section Francaise - British section " 18 - 21 April , Rouen - France - p179 (1987).

2- Culder .O, "Combustion and Flame " vol . 56,p- 261,(1984).

3- Iijima T and Takeno . T ."Combustion and Flame "vol .65,p_ 35,(1986).

4- Andrews, G.F and Bradley , D . " Combustion and Flame " vol . 20 , p _ 77, (1973) .

5- Koroll , G .W , Kumar ,k and Bowles , E_w "Combustion and Flame "vol . 94 ,p _330 , (1993) .

6- Egolfopoulos .F .N and low . C . K " Combustion and Flame "vol .80 , p _7 , (1990).

7- AL _ Khishali , K . J "Turbulent Flame Propagation and

Quenching " Ph . D .Thesis , Department of Mechanical Engineering University of Leeds (1984).
8- Culder .0 , "combustion science and Technology "vol . 33 , p _179 (1983).
9- Gunther , R ,and Janisch , G ."Combustion and Flame " vol . 19 , p _ 49 , (1972).
10- Sharna , R .p , Agarwar , D.D ., and Cupta C. P "Eighteenth Symposium (International) on Combustion ", Reinhold , New York, P493 (1981).
11- Babkin , V .S ., Vyun , A .V ., and Kozachenko , L .S ., " Combustion , Explosion and Shock Waves " vol .2,p _46 ,(1966).
12- Tsatsaronis , G ., "Combustion and Flame" vol . 33 ,p _ 217 ,(1978).
13- Yanaoka , I ., and Tsuji , H ., " Twentieth Symposium (International) on Combustion ", The Combustion Institute Michigan ,P89 (1984).
14- حيدر عبد و اخرون، "استخدام التقنية البصرية في قياس سرعة جبهة اللهب"،مجلة البحوث الصناعية،العدد التاسع عشر،9- 2000.