

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

MEASUREMENT OF LAMINAR FLAME SPEED AND BURNING VELOCITY OF METHANE – AIR MIXTURE USING LASER BEAM TECHNIQUE

حيدر صباح الاعرجي^{**}

جمال حميد وهيب^{*}

المستخلص :

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 وحساب الزمن الذي استغرقت جبهة اللهب لقطع تلك المسافات المحددة.

تمت القياسات عند الظروف $(P_0=1atm, T_0=298K)$ ولمدى واسع من النسبة المكافئة (Equivalence Ratio) حدودها $(0.6-1.5)$ ، 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 .
نتائج البحث قورنت مع نتائج الدراسات السابقة وجاءت النتائج متوافقة مما يؤكد فعالية التقنية المستخدمة في هذا البحث.

Abstract:

In this paper the laser beam (Ne-He type) with wavelength $(0.6328\mu m)$ is used to measure laminar flame speed for Methane-Air pre-mixture by limit the flame position in the combustion chamber. This is achieved by cutting the laser beam the flame perpendicularly at certain distances and calculate the time that take of flame to cross the certain distances.

All measurements were done at pre-pressure period .A density ratio method was employed to obtain the laminar burning velocity. Comparison the results with other published results indicate a reliable technique that is used in the present work.

⁺ تاريخ استلام البحث : ٢٠٠٦/٢/١٦ ، تاريخ قبول النشر : ٢٠٠٨/١/١٧

^{*} مدرس / معهد التكنولوجيا / بغداد – قسم المكان والمعدات

^{**} مدرس مساعد / معهد التكنولوجيا / بغداد – قسم المكان والمعدات

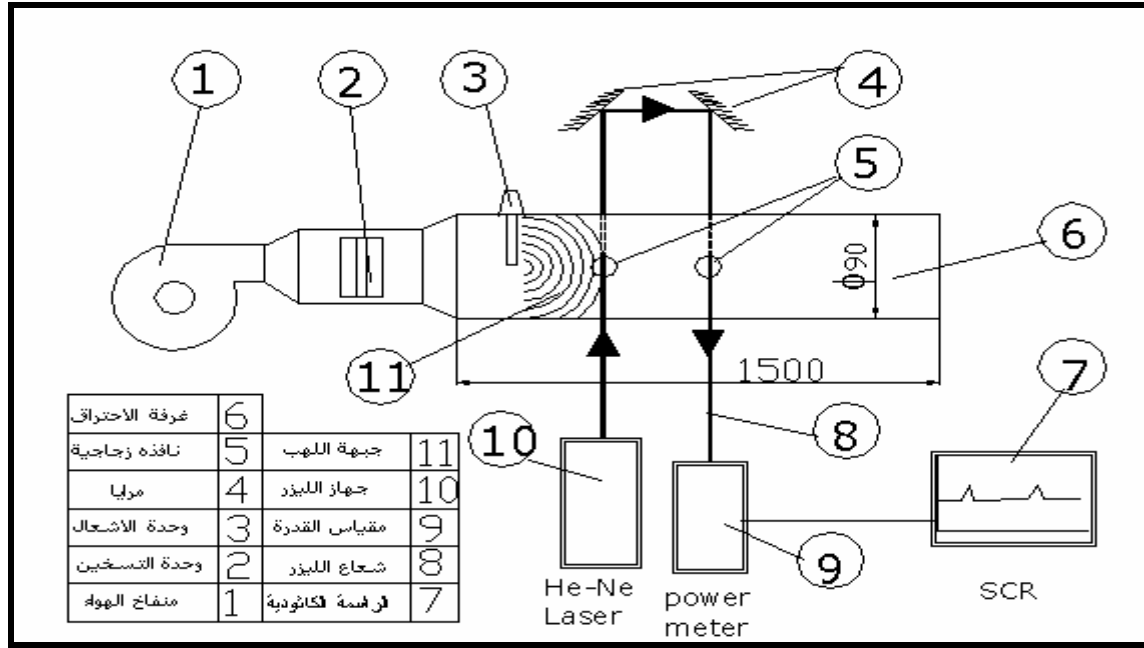
المقدمة:

إن قياس كل من سرعة جبهة اللهب الطباقية وسرعة انتشار اللهب الطباقية لمختلف خلائط الوقود – الهواء له أهمية كبيرة في دراسة أداء منظومات الاحتراق ومنها محركات الاحتراق الداخلي وكذلك فإن 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 سرعة جبهة اللهب ومن خلالها استنتاج سرعة انتشار اللهب من أبرز هذه التقنيات هي استخدام المزدوج الحراري [١]، [٢] مسبار التأين [٣] قياس الضغط المرافق لانتشار اللهب [٤] هذا بالإضافة إلى التقنيات البصرية بمختلف أنواعها [٥]، [٦]، [٧]، [٨] والتقنية الصوتية [٩]، [١٠] ومن خلال استعراض هذه التقنيات يمكن استنتاج إن التقنيات البسيطة والرخيصة تكون غير دقيقة في حين إن التقنيات الدقيقة تكون عالية الكلفة وتحتاج إلى إمكانية تقنية متقدمة للاستخدام وهذا يجعل من الضروري التفكير بتقنيات بسيطة وذات دقة عالية .

في هذا البحث لم يعتمد على تحسس إحدى الظواهر المرفقة لجبهة اللهب حيث لم يتم قياس درجة الحرارة أو الضغط أثناء 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 شعاع الليزر بصورة عمودية وعلى مسافات محددة و تحديد الفترة الزمنية الحاصلة بين تغيرين لقدرة الليزر (الفاصلة الزمنية بين مراحل قطع جبهة اللهب لشعاع الليزر)

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 و مقياس قدرة الليزر وجهاز الراسمة الكاثودية و يبين شكل (١) مخطط للجهاز المستخدم.



شكل (١): مخطط للجهاز المستخدم (صورة الجهاز في ملحق-B)

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 (١)

$$\phi = \frac{\left(\frac{F}{A}\right)_{act.}}{\left(\frac{F}{A}\right)_{sto.}} \quad \dots\dots\dots (١)$$

حيث $\left(\frac{F}{A}\right)_{act.}$ هي نسبة الوقود إلى الهواء الحقيقية إما $\left(\frac{F}{A}\right)_{sto.}$ فهي نسبة خلط الوقود إلى الهواء الكيميائية

الصحيحة (Stoichiometric Mixture) وللخليط الكيميائي الصحيح تكون ($\phi = 1$) وللخليط الغني ($\phi > 1$) إما للخليط الضعيف ($\phi < 1$) لذلك يجب الاهتمام بإعداد الخليط ليعطي النسبة المكافئة المطلوبة. تم إعداد الخليط عن طريق قياس الضغط الجزئي لكل من الوقود والهواء بواسطة مقياس الضغط ألتخلطي حيث يتم تفريغ الأنبوب من الهواء ونواتج الاحتراق بواسطة المضخة المفرغة ثم غسل الأنبوب بالهواء لثلاث مرات إلى إن يتم التأكد من خلو الأنبوب من نواتج الاحتراق ثم يتم إدخال الهواء المجفف من بخار الماء (لضمان إن تكون مكونات الهواء O_2, N_2) وعن طريق نسبة الضغوط الجزئية يتم تحديد النسبة المكافئة .

الميثان المستخدم في هذا البحث كان بنقاوة مقدارها ٩٩,٢١% كما اكدته فحوصات مختبرات مصفى الدورة وللتأكد من كفاءة نظام إعداد الخليط فقد تم إجراء تحليل كيميائي لعينات من الخليط عند نسب خليط مختلفة والنتائج أثبتت دقة نظام إعداد الخليط .

يتم تسخين الهواء الداخل والأنبوب و تتم السيطرة على درجة الحرارة الابتدائية للخليط بواسطة وحدة تسخين الهواء الداخل والشريط المسخن المثبت حول الأنبوب من الخارج، حيث تعتبر درجة الحرارة

الابتدائية من أهم العوامل المؤثرة على سرعة انتشار اللهب و بوجود مروحة محورية داخل الأنبوب تعمل على تجانس الخليط من حيث المكونات ودرجة الحرارة. بعد إن يتم تحضير الخليط والسيطرة على درجة حرارته وضمان تجانسه يتم إيقاف عمل المروحة والانتظار لمدة بحدود خمس دقائق وذلك لضمان زوال تأثير المروحة على انتشار اللهب طباقيا، بعد ذلك يتم إشعال الخليط عن طريق وحدة الإشعال حيث بعد إعطاء شرارة الإشعال تتكون جبهة لهب و تنتقل خلال خليط الهواء والوقود غير المحترق بسرعة تمثل سرعة جبهة اللهب .

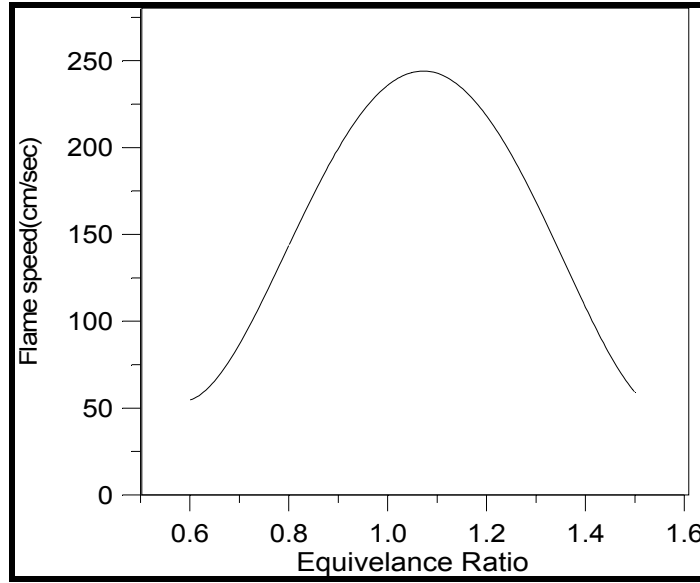
تقنية القياس المستخدمة:

في هذا البحث تم استخدام ليزر (He-Ne) ذو اللون الأحمر ($\lambda=0.6328\mu\text{m}$) 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 النافذتان المتقابلتان 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 نافذتين المتقابلتين ويتم عكسه بواسطة مرآتين عاكستين كلياً للطول الموجي($\lambda=0.6328\mu\text{m}$) من اجل امراره في النافذتين المتقابلتين الاخرتين ليتم استقباله بواسطة مقياس القدرة حساسية(4.28mA/W) عند الطول الموجي(0.6328 μm) والمربوط بجهاز الراسمة الكاثودية(SCR) والتي عليها يمكن عرض منحنى قدرة الليزر مع الزمن .

عندما يعترض شعاع الليزر النافذ من النافذتين الأوليتين عبر غرفة الاحتراق بواسطة جبهة اللهب يحصل تشوية لقدرة الليزر يؤثر على الراسمة الكاثودية وعند وصول جبهة اللهب الى النافذتين التاليتين سوف يعترض شعاع الليزر مرة أخرى ويحصل تشوية ثاني لقدرة الليزر يؤثر 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 اللهب لقطع المسافة المعلومة بين النافذتين أمكن قياس سرعة جبهة اللهب الطباقية ولمدى واسع من النسب المكافئة ، الشكل (٢) يوضح معدل تغير سرعة جبهة اللهب الطباقية لخليط الميثان – الهواء مع النسبة المكافئة لعشرة تجارب لكل نسبة مكافئة ،جميع القياسات أجريت عند درجة حرارة ابتدائية مقدارها ($T_0=293\text{K}$) وضغط ($P_0=1\text{atm}$) .



شكل (٢) : تغير سرعة جبهة اللهب الطباقية مع تغير النسبة المكافئة

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 استخدام غاز الميثان لإجراء القياسات عليه وذلك بسبب كون النتائج العملية لخليط الميثان – الهواء متوفرة بشكل اكبر من النتائج العملية للأخلاق الأخرى مما يوفر إمكانية جيدة لأجراء المقارنة .

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

١- 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 بزيادة درجة حرارة اللهب ، إما 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 فان 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 (٢) 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 أكسيد 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 أوردتها الباحثة [11] والتي توضح العلاقة بين سرعة انتشار اللهب وسرعة جبهة اللهب بالمعادلة التالية

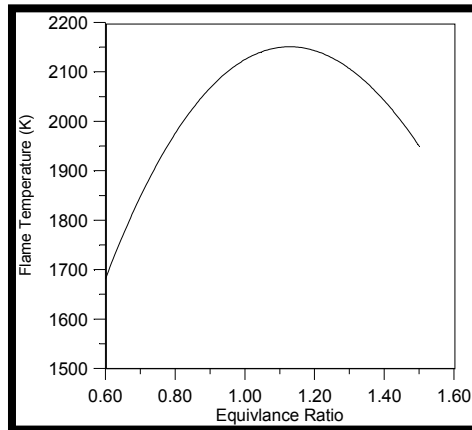
$$S_u = \frac{\rho_b}{\rho_u} S_f \quad \dots(2)$$

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 الادبياتية بسبب انتقال الحرارة ، وهذه المشكلة تكون واضحة عند العمل في الضغوط الواطئة حيث يكون سمك جبهة اللهب كبيراً ، وللتغلب على هذه المشكلة يمكن اعتماد الأسلوب الذي استعمله الباحث [11] حيث إن :

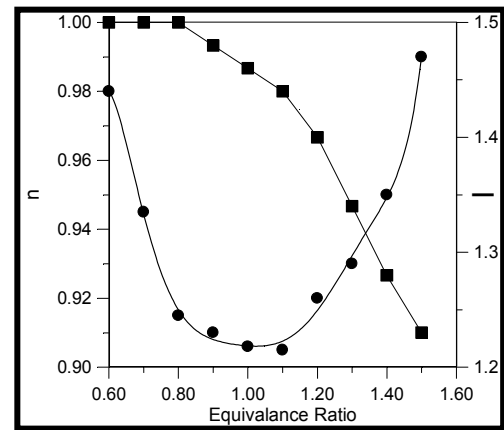
$$\frac{\rho_b}{\rho_u} = \frac{T_u}{T_{ad}} \frac{I}{n} \quad \dots(3)$$

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

تم اعتماد تغير قيم I و n مع النسبة المكافئة لخليط الميثان-الهواء و الموضحة في الشكل (3) كما أوردتها المصدر [11]. تم حساب درجة الحرارة اللهب الادبياتية مع إدخال ظاهرة التفكك على اعتبار إن نواتج الاحتراق مكونة من (19) مركب في حالة عدم وجود التفكك فأنها تتكون من (HO,CO,N) بالمعادلات التي أوردتها المصدر [12] والموضحة في الملحق (A) واستخدمت قيم درجات الحرارة التي أوردتها المصدر [9] والشكل (4) يوضح تغير درجة حرارة اللهب الادبياتية مع النسبة المكافئة.



شكل (4): تغير درجة حرارة اللهب مع



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

تغير النسبة المكافئة

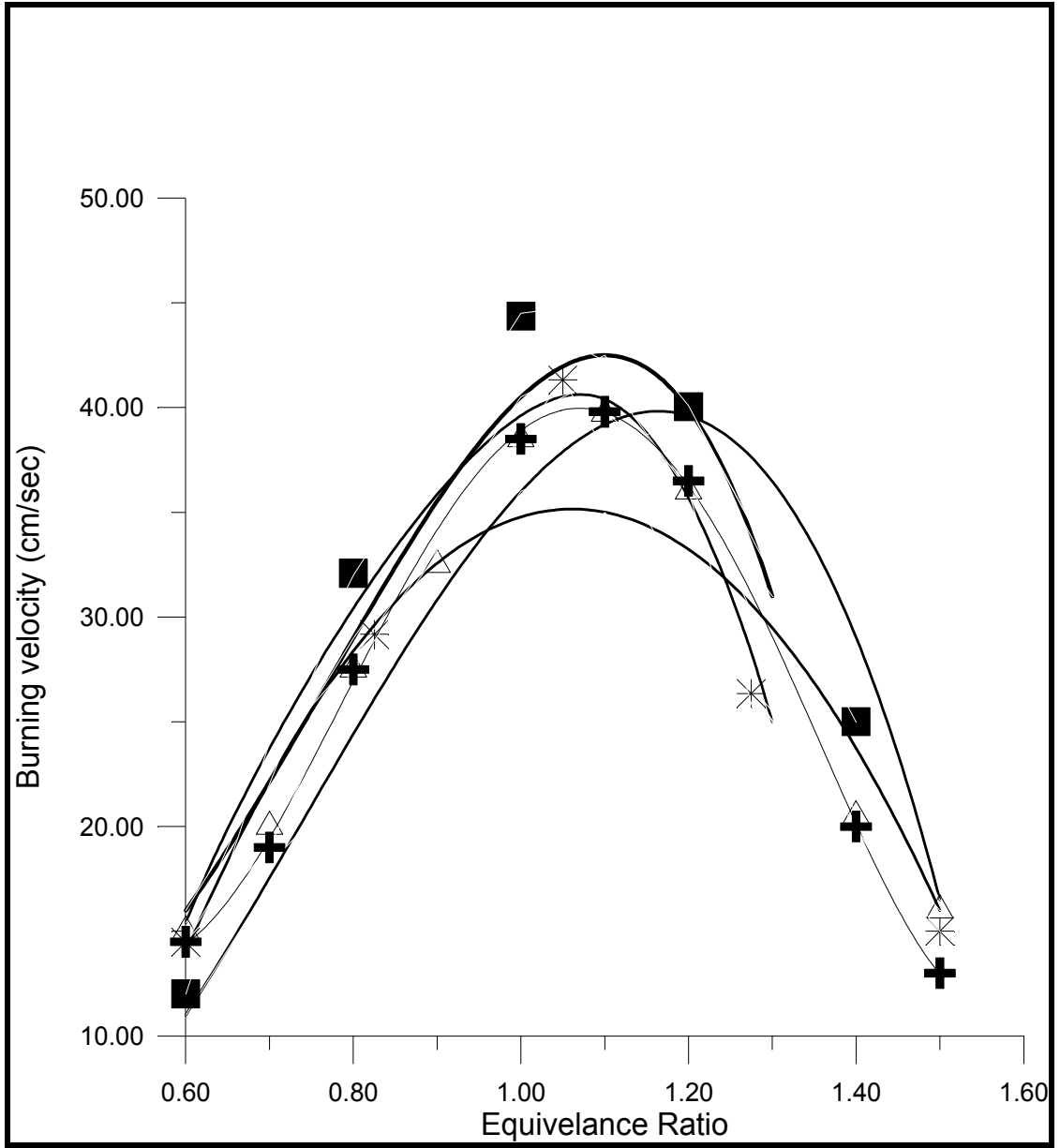
درجة حرارة الغاز غير المحترق T_u تم قياسها بواسطة المزدوج الحراري المثبت في نهاية الأنبوب ، ومن خلال المعادلة (2) تم حساب سرعة انتشار اللهب والشكل (٥) يوضح تغير سرعة انتشار اللهب المحسوبة مع النسبة المكافئة .

نلاحظ من شكل (٥) أن سرعة انتشار اللهب تزداد مع اقتراب نسبة من نسبة الخلط الصحيحة وثم تبدأ تقل مع وصول نسبة الخلط إلى نسبة خلط الغنية والسبب في ذلك هو أن الخليط الغني يمتاز بارتفاع قيم الخواص الحرارية وخاصة الموصلية الحرارية مما يؤدي إلى زيادة كمية الحرارة المفقودة من الخليط إلى جدار الأنبوب وهذا 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 أن 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 فإن سرعة جبهة اللهب العظمى تحصل عند نسبة الخليط التي تعطي درجة حرارة عظمى أي عند ($\phi \cong 1.05$) .

٢- سرعة انتشار اللهب :

إن حساب سرعة انتشار اللهب يعتبر الهدف الأساسي لهذا البحث إذ أنها تمثل ثابت فيزيوكيميائي ، 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 (٥) والذي يمثل تغير سرعة انتشار اللهب مع النسبة المكافئة يلاحظ بأن قيم سرعة انتشار اللهب الطباقية تزداد بازدياد النسبة المكافئة في الجانب الضعيف للخليط إلى أن تصل إلى قيمة عظمى ($\phi \cong 1.05$) 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 (٦) 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 (٦): مقارنة تغير سرعة انتشار اللهب الطباقية المستحصلة في هذا البحث مع عدة بحوث سابقة

- 1- Phylaktou H. and Andrews , G. E , *The Combustion Institute , section Francaise – British section* , 18 – 21 April , Rouen – France – p179 (1987)
- 2- Adel M.Salah, "*Effect of Pressure upon Laminar Burning Velocity of Paraffinis Gaseous Fuel in Closed Vessel*", Ph.D. .Thesis, Department of Machines and Equipments -University of Technology (2006)
- 3- Gulder .O., *Combustion and Flame* , vol . 56,p— 261,(1984).
- 4— Iijima T and Takeno . T . *Combustion and Flame* ,vol .65,p_ 35,(1986).
- 5— Andrews, G.F and Bradley , D. , *Combustion and Flame* , vol . 20 , p _ 77, (1973)
- 6— Koroll , G .W , Kumar ,k. ,*Combustion and Flame* ,vol . 94 ,p _330 , (1993) .
- 7— AL _ Khishali , K , J. "*Turbulent Flame Propagation and Quenching* " PhD.Thesis , Department of Mechanical Engineering University of Leeds (1984)
- 8- T. Hirasawa, C. J. Sung, *2nd Joint Meeting of the U.S. Section of the Combustion Institute Oakland, California, March 25-28, (2001).*
- 9- Hayder Abed ,"*Study of Burning Velocity for Pre-Mixed Fuel Air Mixture Using tube method*", M.S.C .Thesis, Department of Machines and Equipments - University of Technology (1997)
- 10-Esam M. Al-Salman, "*The effect of Tube Diameter on The Laminar Flame Propagation of The Gaseous Hydrocarbons –Air Mixtures*",Ph.D. Thesis, Department of Machines and Equipments -University of Technology (2002).
- 11-Andrews,G.E. and Bradley,D., *Combustion and Flame*,18-133,(1972)
- 12-Al-Ani,K.F, "*Flame Temperature Estimation of Conventional Internal Combustion Engines Fuels*", ,M.S.C .Thesis, Department of Machines and Equipments -University of Technology (1994)
- 13— Egolfopoulos .F .N and low. C. K.; *Combustion and Flame*, vol .80 , p _7 , (1990).
- 14— Yamaoka , I ., and Tsuji , H . *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute Michigan, P89 (1984) .

ملحق (A)

معادلات حساب درجة الحرارة الاديباتية (T_{ad}) كما اوردها المصدر [١٢]

$$T_{ad} = \bar{\alpha} \left(\frac{P}{P_o} \right)^{\bar{\beta}} \left(\frac{T}{T_o} \right)^{\bar{\gamma}} (\Psi) \bar{\delta} \quad \dots(A-1)$$

حيث ($T_o=293K$) ($P_o=1atm$) و (T) و (P) هما درجة الحرارة والضغط الابتدائيين على التوالي

$$\bar{\alpha} = a + b\phi + c\phi^2 \quad \dots(A-2)$$

في حالة حدوث الاحتراق في فترة ثبوت الضغط فان الثوابت اعلاه تكون بالشكل التالي

$$a = -5.39 \quad b = 3840.8 \quad c = -1689 \quad \dots(A-3)$$

$$\bar{\beta} = A_1 - B_1\phi + C_1\phi^2 - D\phi^3 \quad \dots(A-4)$$

$$\bar{\gamma} = A_2 - B_2\phi + C_2\phi^2 \quad \dots(A-5)$$

$$A_1 = 0.006734 + 0.3359 \left(\frac{T}{T_o} \right) - 0.0074 \left(\frac{T}{T_o} \right)^2 \quad \dots(A-6)$$

$$B_1 = 0.03625 + 0.16548 \left(\frac{T}{T_o} \right) - 0.0035 \left(\frac{T}{T_o} \right)^2 \quad \dots(A-7)$$

$$C_1 = 0.609 + 0.2477 \left(\frac{T}{T_o} \right) - 0.0498 \left(\frac{T}{T_o} \right)^2 \quad \dots(A-8)$$

$$D_1 = 0.02797 + 0.10895 \left(\frac{T}{T_o} \right) - 0.0218 \left(\frac{T}{T_o} \right)^2 \quad \dots(A-9)$$

$$A_2 = 0.5085 \left(\frac{P}{P_o} \right)^{-0.0251} \quad \dots(A-10)$$

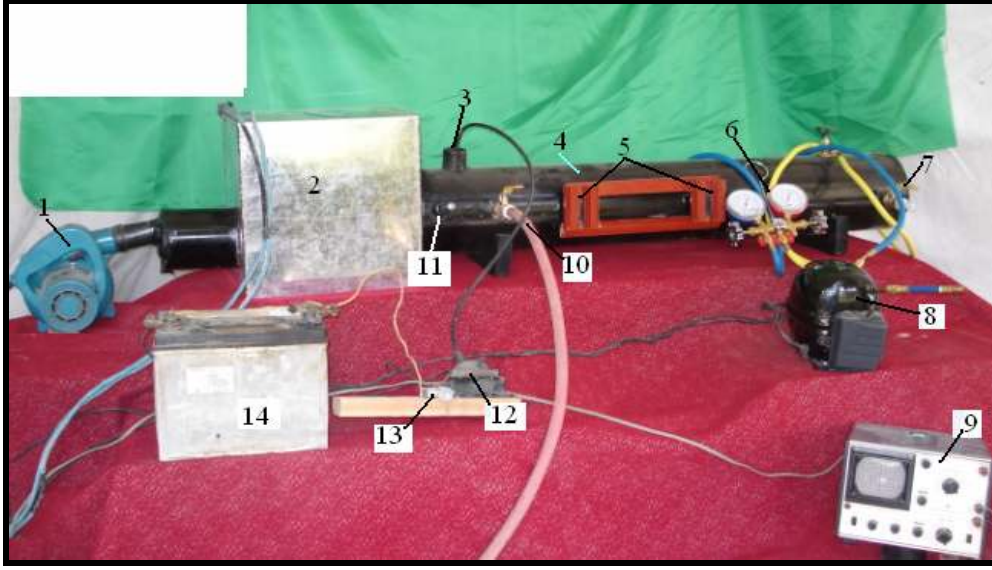
$$B_2 = 0.8476 \left(\frac{P}{P_o} \right)^{-0.03756} \quad \dots(A-11)$$

$$C_2 = 0.3989 \left(\frac{P}{P_o} \right)^{-0.02527} \quad \dots(A-12)$$

$$\bar{\delta} = 0.001966 + 0.00326\phi + 0.00338\phi^2 \quad \dots(A-13)$$

و ثابت Ψ يمثل عدد ذرات الكربون في الوقود

ملحق (B)



صورة فوتوغرافية للجهاز المستخدم في هذا البحث

مكونات الجهاز:

١	منفاخ الهواء
٢	حجرة المسخنات
٣	شمعة الاشعال
٤	اسطوانة الاحتراق
٥	ثقوب الاسطوانة مغطاة بعدة طبقات من الزجاج
٦	مقياس الضغط
٧	صمام تصريف غازات الاحتراق
٨	ضاغط، استخدم كمفرغ للهواء
٩	الراسمة الكاثودية
١٠	صمام دخول الوقود
١١	صمام احكام اسطوانة الاحتراق
١٢	ملف الاشعال
١٣	مفتاح التحكم بالاشعال
١٤	بطارية-12V

ملاحظة منظومة توليد الليزر غير ظاهرة في صورة الجهاز