

دراسة تأثير أنواع حاملات اللهب على استقرارية وتوزيع الحراري لجبهة اللهب الانتشاري

الدكتور محمد جلال الملقى*

الدكتور عبدالحسن عبد كرم الله**

الدكتور جاسم محمد عبدالكريم الجاف***

(تاريخ الإيداع 23 / 1 / 2012. قُبِلَ للنشر في 9 / 4 / 2012)

□ ملخص □

في البحث الحالي درست إمكانات الحصول على أعلى توزيع لدرجة حرارة اللهب الانتشاري في شروط الاستقرارية العالية، ذلك برفع كفاءة الخلط بين الوقود والهواء، وزيادة إثارة تيارات الهواء المرتدة بواسطة تغيير الشكل الهندسي لحامل اللهب. أجريت الدراسة التجريبية والنظرية في شروط الجريان الصفائحي والجريان الاضطرابي، ولهذا الغرض تم تصميم وإعداد الحراق الانتشاري. في التجارب استخدمت ثلاثة أنواع لحاملات اللهب هي: حامل اللهب القرصي ذو البروزات الاسطوانية [D.C.R.B.B. Disc with Cylindrical Rods Bluff-Body]، وحامل اللهب المخروطي المجوف [H.C.B.B. Hollow Cone Bluff-Body]، أما الثالث فهو حامل اللهب المخروطي المجوف مع البروزات الاسطوانية (المركب) (Combined Bluff-Body).

تم قياس توزيع درجة حرارة جبهة اللهب الانتشاري، وحسابها تجريبياً ونظرياً، وتم الحصول على أعلى درجة حرارة لجبهة اللهب عند منطقة الخلط المثالي بين الوقود والهواء، وذلك عن طريق الاقتراب من الاحتراق الكفوء والتوازن الكيميائي والحراري المثالي، أظهرت النتائج بأن أفضل عملية خلط وانتشار بين وقود غاز البترول المسال (LPG) مع الهواء تحدث عند استخدام حامل اللهب المركب، حيث تم رفع درجة حرارة جبهة اللهب الى (4.8%) عند منتصف فوهة الحراق و(28.57%) عند الحافة الخارجية للحراق مقارنة، مع البحوث السابقة المنشورة.

* أستاذ - قسم هندسة الميكانيك العام - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق - سورية.

** أستاذ - قسم هندسة الماكائن والمعدات - الجامعة التكنولوجية - العراق.

*** طالب دراسات عليا (دكتوراه) قسم هندسة الميكانيك العام - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق - سورية.

Study the Effect of Types of Bluff-Bodies on the Stability and Thermal Distribution of Diffusion Flame Front

Dr. Jalal Al-Mulki*
Dr. Abdulhassn A. Karamallah**
Jassim M. Abdul-Karim Aljaaf***

(Received 23 / 1 / 2012. Accepted 9 / 4 / 2012)

□ ABSTRACT □

Abstract

In the present research, the possibilities to obtain the highest temperature distribution of diffusion flame at higher stability conditions through activating the proper mixing of fuel with air and increasing the excitation of the returned air flow by changing the geometrical shape of the bluff-body, were studied. The experimental and theoretical studies were carried out under the conditions of laminar flow and turbulent flow. For this purpose, a diffusion burner was designed and prepared. During the tests, three types of bluff bodies were used: disc with cylindrical rods bluff-body [D.C.R.B.B.], hollow conical bluff-body [H.C.B.B.], and hollow conical with cylindrical rods bluff-body (combined bluff-body).

The temperature distribution of diffusion flame front was measured and calculated empirically and theoretically. As well, the highest temperature of the flame front at the ideal mixing between fuel and air were obtained, by approaching the efficient combustion of thermal and chemical ideal equilibrium. The results showed that the best process of mixing and the diffusion between the liquefied petroleum gas (LPG) with air occurs when you use the combined bluff-body. The temperature flame front was raised to the (4.8%) in the middle of center line burner and (28.57%) at the outer edge of the burner when compared with the published researches.

Keywords: Diffusion Flame Front - Bluff-body - Flame Stability – Temperature

*Professor Mechanical Engineering Department – Faculty of Mech.& Elect. Eng.-Damascus University-Syria

**Professor Mechanical Engineering Department – University of Technology – Iraq

***Postgraduate student-Mechanical Engineering Department – Faculty of Mech.& Elect. Eng.-Damascus University-Syria

مقدمة:

جبهة اللهب (flame front) التي تصاحب الاحتراق تقسم غالباً إلى نوعين: النوع الأول مسبق للخلط إذ تمتزج المتفاعلات بشكل منتظم قبل الاحتراق مما تنتج جبهة لهب منتظمة، أما الثاني فيطلق عليه جبهة اللهب الانتشاري، ويحدث نتيجة انتشار المتفاعلات مع بعضها البعض أثناء التفاعل، من خلال كلا النوعين يتم الحصول على جبهة لهب مستقرة (Stable Flame Front)، أما إذا تحركت جبهة اللهب خلال الخليط الابتدائي الساكن، فيطلق عليها جبهة اللهب غير المستقر (Non-Stable Flame Front) [2,1].

تتكون جبهة اللهب من منطقتين رئيسيتين: الأولى منطقة التسخين المسبق (Preheat Zone)؛ والثانية منطقة التفاعل (Reaction Zone)، حيث هناك عاملان رئيسيان يؤثران على نمو وانتشار اللهب هما: التوصيل الحراري والانتشار من منطقة اللهب إلى الخليط الجديد حسب ما وصف من قبل [3,4]، ولغرض دراسة اللهب الانتشاري المستقر يجب معرفة حدود الاستقرار وتحديد مدى تشغيل الحراق لفترة بقاء جبهة اللهب مستقرة على فوهة الحراق. في اللهب الانتشاري (Diffusion Flame) يدخل الوقود والمؤكسد (Fuel and Oxidizer) بشكل منفصل، وتقل بذلك مخاطر الاحتراق المفاجئ أو الانفجار (Explosion) بشكل كبير، على عكس ما هو عليه الحال في اللهب مسبق الخلط .

يتشكل اللهب الانتشاري نتيجة لحركة الوقود والهواء (المؤكسد) باتجاهين متعاكسين، حيث يحدث الخلط الكتلي والجزئي بينهما، ومن ثم الاشتعال وتشكيل اللهب.

يرتبط معدل احتراق الوقود بكل من إجراء الخلط الجزيئي (Molecular Mixing) والتفاعلات الكيميائية، وتحدث الأخيرة بسرعة كبيرة نسبياً، فيما يؤدي تسريع الخلط إلى زيادة معدلات الاحتراق بشكل عام [5].

أما من ناحية النموذج الفيزيائي، فإن الاحتراق الانتشاري يعد ويشكل حلقة وصل بين الاحتراق مسبق الخلط المتجانس مع الاحتراق متعدد الأطوار (Multiphase)، ولكنه يعتبر أكثر تعقيداً من الاحتراق مسبق الخلط، كونه يتطلب تشكيل خليط غير متجانس، لذا فإن الخلط الجزيئي للوقود والأوكسجين يعدّ متطلباً أساسياً وواضحاً للتفاعلات الكيميائية فيما بينهما، كون كل من الوقود والمؤكسد منفصلين، ومن ثم يعاد تشكيلهما ومزجهما لغرض الاتقاد والاشتعال، بحيث يظهر اللهب في الطبقة المحصورة بين الوقود والهواء نتيجة لانتشارها باتجاه معاكس للآخر، أما نواتج تفاعل منطقة الاحتراق فتتفصل وتذهب للجانب الآخر من تلك المنطقة والحدود وهذا ما يسمى باللهب الانتشاري [6].

تركيب اللهب الانتشاري

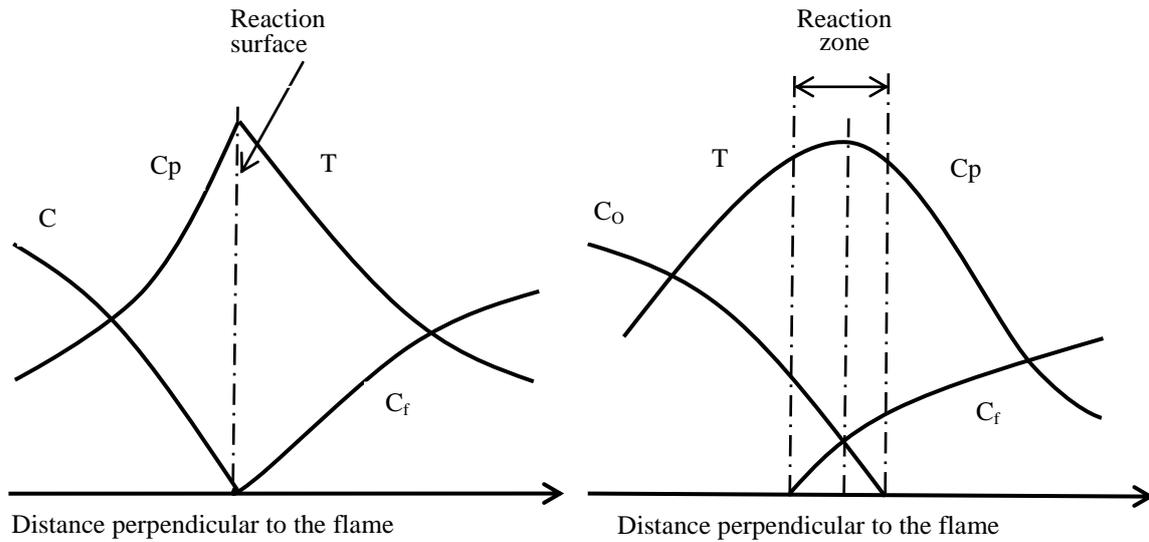
بمتابعة البيانات العملية من الدراسات السابقة، نجد أنّ منطقة التفاعل في اللهب الانتشاري، تكون رقيقة تماماً (Thin) عند الخلط المتجانس، وبذلك يمكن اعتبارها كجبهة لهب (Flame Front).

إن جبهة اللهب توجد عادة عندما تكون نسبة الخلط للمركبات الأصلية في منطقة الاحتراق قريبة من نسب الخلط المحددة بمعادلة التفاعل الكيميائي (Stoichiometric Ratio)، إذ إن هذه الفرضيات هي قاعدة للأسباب التالية:-

على فرض أن واحده من تلك المركبات (Components) تدخل إلى منطقة الاحتراق بتركيز زائد القيمة المحددة بالتفاعل الكيميائي، عندئذ سوف تخترق تلك المنطقة وتذهب إلى منطقة أخرى من منطقة التفاعل، وتسخن إلى درجة حرارة عالية وتمر خلال اللهب، ومن ثم يتم التفاعل إلى حد كبير مما يتسبب في تغيير موقع واتجاه منطقة

الاحتراق. أن هذه الإجراءات والعمليات سوف تتواصل وتستمر إلى أن تأخذ منطقة الاحتراق موقعها النهائي في التفاعلات عند نسبة الخلط المحدد بمعادلة التفاعل الكيميائي [6].

يمكن الافتراض، (في شروط الحصول على أعلى درجات الحرارة في منطقة التفاعل)، بأن الانتشارية الحرارية (Thermal Diffusivities) والكتلية (Mass Diffusivities) لكل من المركبات المتفاعلة والنتيجة متساوية تقريبا. تتشكل جبهة اللهب عادة عندما يحقق جريان المركبات الأصلية في منطقة الاحتراق شرط الخلط الكيميائي المثالي. وتصل درجة حرارة الغازات المحترقة إلى درجة الحرارة الأديباتية للاحتراق الكيميائي المثالي، لاحظ الشكل (1) [6].

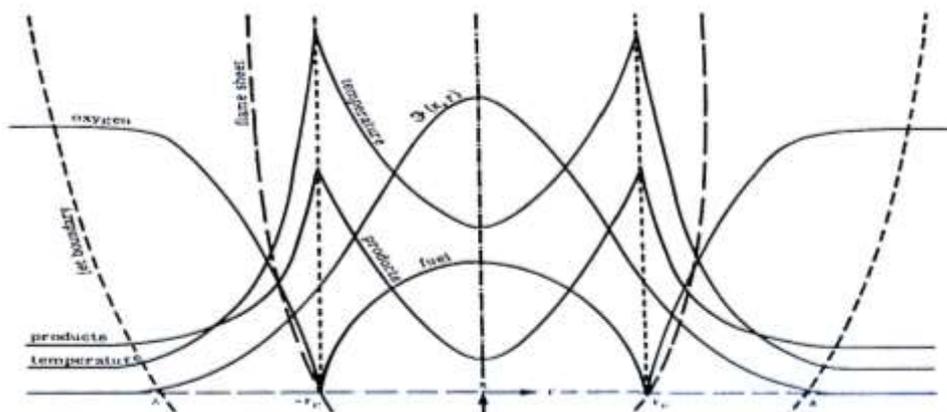


ليس من الصعب ملاحظة حدود وقيمة شدة الاحتراق (Intensity Combustion) لوحدة سطح جبهة اللهب، حيث يعبر عنها بحيث تكون تقريبا مساوية لأقصى شدة احتراق اللهب في النوع مسبق الخلط عند نسبة خلط المحددة بمعادلة التفاعل الكيميائي.

في واقع الأمر يمكن اعتبار كلا حالتي منطقة التفاعل المذكورة مجهزة ومساندة للتفاعل عند نسبة الخلط الكيميائي المذكور، وذلك من خلال اشتعال المواد المتفاعلة بمساعدة الغازات المحترقة، الشكل (2) يوضح بنية اللهب الانتشاري [7]، يلاحظ من خلال الشكل عملية الانتشار بين المتفاعلات (الوقود والأوكسجين) وتغير تراكيزهم بتغير نقطة الإحداثي المحوري الناتج عن تغير كمية التفاعلات الكيميائية الحاصلة بينهما، ويلاحظ أيضا أن درجة حرارة جبهة اللهب تبدأ بالزيادة كلما اقتربنا من خط التقاء الوقود والأوكسجين، وكما هو الحال عليه تحدث أعلى قيمة لشدة التفاعل في تلك المنطقة، وتبدأ بالانخفاض كلما اقتربنا من اتجاه الوقود أو الأوكسجين.

إن للهب المستقر أهمية كبيرة لعلاقته بظروف وكفاءة الاحتراق؛ ويتحقق ذلك بجعل اللهب مستقرا عند فوهة الحراق، وبعيدا عن الحدود الحرجة للاحتراق، وأن استقرارية اللهب الانتشاري تعتمد على قطر فوهة الحراق، ونوع الوقود، وسرعة جريان الخليط، وسرعة انتشار اللهب، والشكل الهندسي لحامل اللهب (Bluff-Body).

في بعض التطبيقات يتطلب أن تكون السرعة المجهزة للخليط المتفاعل أكبر بعدد من المرات من سرعة انتشار اللهب لكن التجارب والبحوث تظهر ان اللهب يحصل له ظاهرة الانفصال (Blow-off) عندما تزداد سرعة الخليط المجهزة عن سرعة انتشار اللهب [8].



الشكل (2) بنية اللهب الانتشاري [7].

تخامد وانفصال اللهب الانساري

درس تخامد وانفصال اللهب من قبل عدد كبير من الباحثين وقدم الباحث [9] أهم الاستنتاجات المؤدية إلى حدوث انفصال اللهب الانتشاري، وبيّن بأنها تحدث بمراحل عديدة تبدأ بالتخامد الموضعي عند سطح اللهب، وبعدها تشكل تشويشا كبيرا لأثر الجريان، وأخيرا تحدث نروة الانفصال، حيث ينطلق اللهب إلى الأعلى ويختلط مع المحيط الخارجي.

ولفهم مضمون تخامد اللهب يجب التركيز على منطقة اقتراب خصائص انفصال اللهب في حالة استخدام جسم حامل اللهب، وتبين بأن هذه الظاهرة تتعلق: بسرعة الجريان و نوع الوقود، ونسبة الخلط الكيميائي المثالي و الضغط و درجات الحرارة و نسبة الانغلاق (Blockage Ratio) وشكل حامل اللهب. وهذه الخصائص المؤثرة على تخامد وانفصال اللهب الانتشاري. تمت دراستهما ضمن علاقات تجريبية ونصف تجريبية تتعلق بنسبة الوقود إلى الهواء عند الانفصال وبدلالة السرعة والضغط ودرجات الحرارة [9].

$$\phi_{Bo} = \xi \left(\frac{U_{Bo}}{P^{0.95} \cdot D_b^{0.85}} \right) \quad (1)$$

حيث إن (ξ) هي دالة تجريبية و (D_b) قطر جسم حامل اللهب. وقدّم الباحث [10] علاقة عامة تتعلق بنسبة خليط الأوكسجين عند الانفصال:

$$\phi_{Bo} = \xi \left[P^{0.324} \cdot T_o^{1.07} (750 - U_{Bo})^{0.252} \right] \quad (2)$$

حيث إن (T_o, P) يُشار إلى الضغط ودرجات الحرارة عند حالة الركود. اتفق عدد كبير من الباحثين بأن ظاهرة الانفصال تتعلق بنوعين من الإجراءات هي: إجراءات ميكانيك الموائع (Fluid Mechanics) وإجراءات الكيمياء الحركية (Chemical Kinetic).

وينوه الباحثون [11-12] بأن كل الدراسات والأساليب ترشد وتدل على شكل العلاقة لرقم دامكوهلر (Damkohler Number)، والتي تمثل النسبة بين مقياس الزمن لميكانيك الموائع إلى مقياس الزمن للكيمياء الحركية وحسب المعادلة التالية:

$$D_n = \frac{\tau_{flow}}{\tau_{chem.}} \quad (3)$$

وزمن مقياس ميكانيك الموائع:

$$\tau_{flow} = \frac{D_{bw}}{U} \quad (4)$$

حيث إن (τ_{flow}) زمن مقياس ميكانيك الموائع و (D_{bw}) هو عرض جسم حامل اللهب و (U) سرعة الجريان.

$$\tau_{chem} = \frac{\rho \cdot Y_{fs}}{r_j \cdot M_f} \quad (5)$$

وتم تعديل رقم دامكوهلر حسب المعادلة التالية:

$$D_n = \frac{D_{bw} \cdot ReD}{U \cdot \tau_{chem}} \quad (6)$$

ويعتبر تركيز التخامد الموضعي بمثابة المرحلة الأولى للانفصال، والدليل على اقتراب الانفصال، كون ذلك يقود اللهب إلى الارتفاع والابتعاد عن فوهة الحراق، وبالتالي يقود إلى المرحلة الثانية لانفصال اللهب بصورة كلية.

أهمية البحث وأهدافه:

من خلال ما تمّ استعراضه في الفقرات السابقة، نلاحظ أن شكل اللهب الانتشاري يمثل ظاهرة معقدة، إذ تتداخل العوامل المؤثرة عليه فيما بينها. ومن هنا جاء التأكيد على دراسة اللهب الانتشاري بشمولية، ليتسنى الحصول على رؤية أدق لما يراد معرفته من استنتاجات جديدة بالاعتبار، ودراسة خصائص اللهب المستقر، والعوامل المؤثرة عليه، والمفاهيم المرتبطة بوجوده مثلاً: التخامد، انفصال اللهب، توزيع درجة حرارة جبهة اللهب.

الهدف الاساس للبحث الحالي هو دراسة تأثير تصميم الجسم الحامل للهب على فعالية الاحتراق واستقرار اللهب الانتشاري، بحيث يحقق مدى واسعاً لاستقرارية اللهب عند الظروف القياسية، وذلك اعتماداً على المبادئ الأساسية في تصميم الحراقات، ووضع التصميم المميز لحامل اللهب بأشكال هندسية، تعطي مجالات واسعة لمناطق تشغيل الحراق، بحيث تشكل منطقة (دوامية) واسعة تساهم في تفعيل انتقال الحرارة والكتلة للمركبات الفعالة في الوقود والهواء، من خلال دراسة التدرج الحراري في جبهة اللهب وتحليل ذلك ليتسنى لنا الحصول على قاعدة كبيرة لاستقرارية اللهب المسيطر عليها عن طريق حافة اللهب، وبالتالي الحصول على أعلى توزيع لدرجة حرارة جبهة اللهب عن طريق رفع كفاءة الخلط للمركبات.

طرائق البحث ومواده

اعتمد هذا البحث على جانبين (التجريبي والنظري) في دراسة نمو وانتشار اللهب الانتشاري في الحراقات الانتشارية المستخدمة في التطبيقات الصناعية، اعتمد الجانب التجريبي على أسس وقوانين بناء منظومة احتراق

انتشاري تعطي استقرارية عالية لجبهة اللهب من خلال التصميم المميز للحراق وحاملات اللهب، أعد بناء هذه المنظومة في العراق (الجامعة التكنولوجية-بغداد)، اما الجانب النظري فاعتمد على معادلات جريان الموائع والاحتراق المبرمجة في برنامج (Gambit&Fluent).

الجانب النظري

تسود غالبا حالات الجريان المضطرب في التطبيقات الهندسية والصناعية، حيث تتحرك جسيمات المائع أي كتل الجزيئات الصغيرة في الجريان المضطرب في مسار غير منتظم مسببة تبادل الزخم من جزء ما من المائع إلى آخر، وفي الحالات التي يمكن أن يكون فيها الجريان إما مضطربا أو غير مضطرب (صفائحي) فإن الاضطراب يولد إجهادات قص أكثر خلال المائع ويسبب فواقد أكثر. وتتغير الفواقد في الجريان المضطرب مع مربع السرعة، بينما تتغير في الجريان الصفائحي مع السرعة. في بحثنا الحالي تم استخدام معادلات الحاكمة للجريان والطاقة والمبرمجة في برنامج (Fluent) واعتمدها في الجانب النظري مع مواصفات والظروف الحدية الخاصة باللهب الانتشاري.

1- الدوامية

لغرض فهم مبدأ الدوامية (Vorticity)، يلاحظ أن الطبقة الحدية تستمر في النمو على طول لوح منبسط في اتجاه المؤخرة، بغض النظر عن طول اللوح، إذا ظل انحدار الضغط مساويا للصفر، أما إذا كان هناك انخفاض في الضغط في اتجاه المؤخرة، كما في حالة الوصلة المخروطية المتناقصة فإن الطبقة الحدية تتطور باتجاه تقليل سمكها. وفي حالة انحدار الضغط العكسي، أي في حالة زيادة الضغط باتجاه المؤخرة، يزداد بسرعة سمك الطبقة الحدية، ويقال الانحدار العكسي، وإذا أثر كلاهما في مسافة كافية فأنهما يكونان السبب في توصيل الطبقة الحدية الى حالة السكون، وتسمى هذه الظاهرة بالانفصال. وفي خلف من هذه بسبب انحدار الضغط العكسي جريانا عكسيا جوار الجدار، وتعرف هذه المنطقة الموجودة خلف خط الانسياب الذي انفصل من الحد بالمنطقة الدوامية. ادناه معادلات الدوامية [13,14,15]:

$$\xi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial r} \quad (7)$$

$$u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (8)$$

$$v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (9)$$

أما معادلة الدوامية بدلالة دالة الانسياب:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = -\xi \cdot r \quad (10)$$

2- الطاقة

إن الهدف الأساسي من معادلة الطاقة هو معرفة توزيع درجة الحرارة خلال جبهة اللهب ويتحقق هذا الهدف عامة من حل مناسب لمعادلة الطاقة أدناه [5,14,16,17]:

$$\rho c p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{Q} \quad (11)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{Pr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{Q} \quad (12)$$

وبما أنَّ ظروف الجريان والتفاعل تتغير من نقطة غالي أخرى على امتداد سطح جبهة اللهب فإنَّ قيمة درجة الحرارة (T) تتغير على امتداد ذلك السطح.

حيث إن:

$$Pr = \text{عدد برنتل.}$$

$$\dot{Q} = \text{معدل إطلاق الحرارة الناتجة من الاحتراق.}$$

3- منطقة إعادة التدوير

يعتبر شكل حامل اللهب من أهم الخصائص المؤثرة على استقرارية اللهب الانتشاري، وعلى منطقة إعادة التدوير (Recirculation Region). تقوم الأخيرة بدورها بتحديد سرعة انفصال اللهب، حيث يؤدي وضع حامل اللهب أمام جريان المائع لتوليد اختلاف في توزيع الضغط، مما يمنع زيادة سرعة جريان المائع، ومن ثم توليد دوامات فوق حامل اللهب في منطقة إعادة التدوير، وبالنتيجة يحدث اتصال اللهب الانتشاري مع جسم حامل اللهب. وصف الباحث [18] معادلة منطقة التدوير والدوامية للهب الانتشاري ذي نفث الوقود مع سرعة هواء متغيرة، وحسب الشكل الآتي:

$$\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_f + \dot{m}_a} = 0.665 \frac{\left(\frac{\rho_m}{\rho_f}\right)^{1/2} \theta_r^*}{\theta_r^{*2} + C_\infty} - 1 \quad (13)$$

$$\theta_r^* = \frac{1}{C_\infty} \frac{r_f}{L_c} \left[1 + \frac{\rho_a}{\rho_f} m^2 (r_a^2 - 1) \right]^{-1/2} \quad (14)$$

$$C_\infty = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_f + \dot{m}_a} \quad (15)$$

$$m = \frac{U_a}{U_f} \quad (16)$$

$$K^* = \frac{K}{\tan \phi} \quad (17)$$

$$\tan \phi = \frac{L_c}{X_{00}} \quad (18)$$

حيث إن:

C_∞ = نسبة تركيز مولات الوقود عند النفث إلى مولات خليط الاحتراق.

\dot{m}_r = الكمية الكلية لجريان مائع النفث لكل ثانية خلال المسافة $(X_{00} - X_0)$.

m = نسبة سرعة الهواء إلى سرعة الوقود الغازي عند مقطع النفث.

r_f = نصف قطر أنبوب النفث.

r_a = نصف قطر نفث الهواء.

θ_r^* = محدد يستخدم مع نفث الوقود داخل هواء.

X_{00} = المسافة من نقطة نفث الوقود حتى منطقة التقاطع.

X_0 = المسافة من نقطة نفث الوقود حتى منطقة بدء الدوامات.

\dot{m}_f = معدل تدفق الوقود الكتلي.

\dot{m}_a = معدل تدفق الهواء الكتلي.

K = ثابت يعتمد على قيمة تركيز مولات الوقود إلى مولات خليط الاحتراق.

L_c = الطول المميز لنظام (ما يعادل قطر انبوب الهواء الخارجي للحراق) أو نصف قطر الهيدروليكي للحراق.

ρ_m = كثافة الخليط (الهواء والوقود).

$$\rho_f = \text{كثافة الوقود.}$$

$$\rho_a = \text{كثافة الهواء.}$$

4- الظروف الحدية

تحدد الظروف الحدية (Boundary Condition) متغيرات خصائص جريان المائع في النموذج الفيزيائي، والظروف الحدية تعطي مواصفات المائع (الهواء والوقود) عند الدخول والخروج أي: درجة حرارة المائع، والضغط، والسرعة، والتركيبة الجزيئية للوقود وكذلك مواصفات الحراق... الخ. لكل مسألة فيزيائية لها ظروف حدية خاصة بها تعتمد على ظروف تلك المسألة، أما الظروف الحدية لمسألتنا:

سرعة جريان المائع: هناك نوعان من جريان المائع داخل الحراق الانتشاري (الهواء والوقود)، تم تحديد قيم كل

منها، للهواء بسرعة ($U_a = 1.65 \rightarrow 2.257 \text{ m/s}$) ضمن مدى جريان الصفائحي

والاضطرابي ($Re_a = 2162 \rightarrow 2955$)، أما سرعة الوقود ($U_f = 1.65 \rightarrow 9.43 \text{ m/s}$).

الضغط: يحدد مقدار ضغط جريان الهواء والوقود خلال فترة التجربة، حيث تمت تحت تأثير الضغط الجوي

(1 bar).

درجة الحرارة: درستنا على اللهب الانتشاري تمت تحت ظروف درجة حرارة المختبر (25°C) أي لم يكن هناك

تسخين مسبق للهواء والوقود قبل عملية الاحتراق والتفاعلات الكيميائية.

الطاقة: تفعيل خاصية الطاقة كون إحدى خصائص المهمة في درستنا هي توزيع درجة الحرارة لجهة اللهب

الانتشاري.

المركبات: تعد هذه الخاصية الكيميائية مهمة جدا كونها تعتبر واحده من المحددات الأساسية المسؤولة عن

التفاعل الكيميائي داخل جبهة اللهب، لذا يجب تحديد نوع الوقود الهيدروكربوني المستخدم، وفي بحثنا تم استخدام غاز

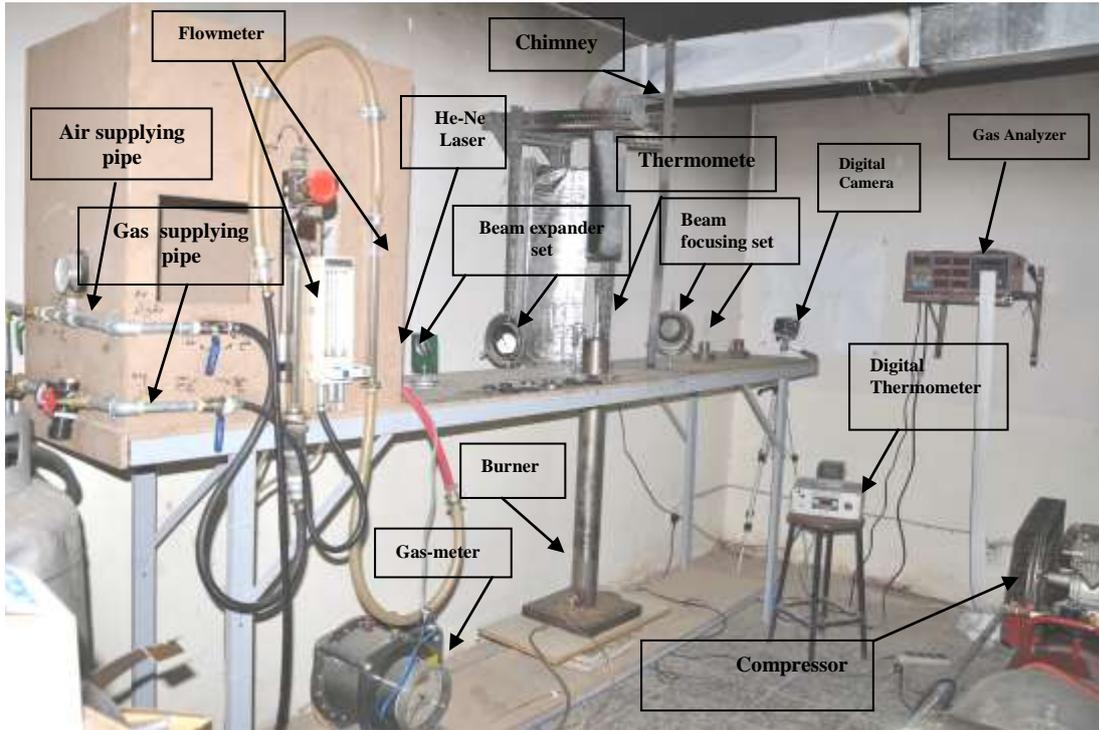
البتترول المسال (LPG).

الجانب العملي

يتألف نظام التجارب العملية، من مجموعة منظومات تساعد على إعداد ظاهرة الاحتراق الانتشاري، وهي نظام

إمداد الوقود والهواء، والحراق الانتشاري (Diffusion Burner)، ووحدة قياس درجة حرارة اللهب، يبين الشكل (3)

صورة فوتوغرافية لمنصة الاختبار.



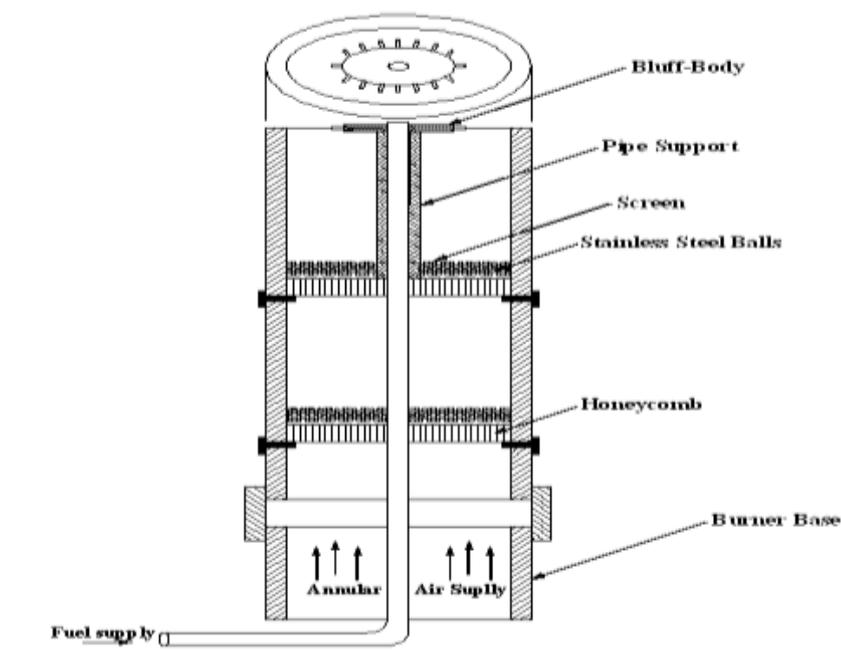
الشكل (3) صورة فوتوغرافية لمنصة الاختبار.

1- نظام إمداد الوقود والهواء

من أجل الحصول على استقراريته تدفق كل من الوقود والهواء المجهز تم استخدام عدد من الصمامات ذات النوع الإبري والكروي ومنظمات الضغط ذات النابض (Spring Loaded Valve). في التجارب جرى إمداد وقود غاز البترول المسال (LPG) من أسطوانة غاز قياسية، وجرى التحكم بتدفق الوقود بواسطة صمام تحكم كروي ومنظم ضغط يوضعان بعد أسطوانة الوقود القياسية. تتكون وحدة إمداد الهواء من ضاغط ترددي ذي سعة (11bar). ولغرض قياس معدل التدفق الحجمي للوقود والهواء يجهز كل منهما بمقاييس التدفق (Flowmeters) ذات سعة $(1004 \text{ cm}^3/\text{s})$ و $(6270 \text{ cm}^3/\text{s})$ للوقود والهواء على الترتيب.

2- تصميم الحراق وحاملات اللهب

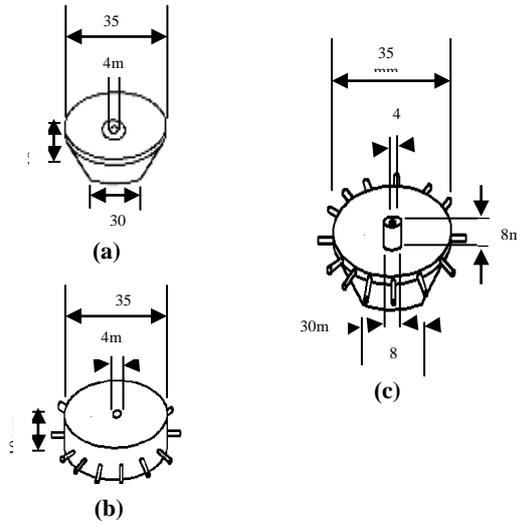
يعد الحراق الانتشاري الجزء الاساسي في منظومة الاحتراق، ومن خلاله يمكن دراسة خصائص انتشار اللهب، وبعداً من أعقد أنواع الحراقات المستخدمة في التطبيقات الصناعية، ويعود ذلك إلى أن مكوني خليط الاحتراق (الوقود والهواء) يدخلان غالي الحراق بشكل منفصل، ويتحدان عند فوهة الحراق عند جسم حامل اللهب، وعن طريق الانتشار والتفاعل تتكون جبهة اللهب الانتشاري. تم تصميم وتصنيع الحراق الانتشاري من معدن الفولاذ بطول (900mm)، ويقطر جريان هواء حلقي المقطع (Annular air diameter) $(D_a=55\text{mm})$ ، وكذلك استخدم أنبوب نحاسي لنفث الوقود بقطر $(D_f=4\text{mm})$ ، يتمحور مع أنبوب الحراق. الشكل (4) يبين مخططاً لشكل الحراق وتفاصيله الداخلية.



الشكل (4) الحراق وتفصيله الداخلية.

من أجل الحصول على منطقة دوامات لغرض التفاعل والانتشار، تم تصميم وإعداد ثلاثة أنواع لحاملات اللهب من معدن الفولاذ ذات اشكال هندسية مختلفة، توضع في قمة الحراق حامل اللهب القرصي ذي البروزات الاسطوانية Disc with Cylindrical Rods Bluff-Body [D.C.R.B.B.]، وحامل اللهب المخروطي المجوف Hollow Cone Bluff-Body [H.C.B.B.]، أما الثالث فهو حامل اللهب المخروطي المجوف مع البروزات الاسطوانية (المركب) (Combined Bluff-Body).

بسمك (10mm) وقطر (35mm)، لغرض الحصول على أفضلها من ناحية عملية خلط الهواء والوقود وأعلى حدود لاستقراره اللهب الانتشاري واقل نواتج احتراق منبعثة ملوثة للبيئة. الشكل (5) يبين نماذج حاملات اللهب، التي تم تصنيعها واستخدامها في البحث الحالي، وهي بنسبة انغلاق (Blockage Ratio) (BR=0.636). يعتمد حراق اللهب الانتشاري على سلوك جريان الهواء وانسيابه، لذلك تم تصميم نظام استقرار جريان الهواء ويتألف من قرص معدني على شكل خلية نحل (Honeycomb) تحوي على عدد كبير من الثقوب بقطر (2mm)، ويركب فوقها حاجز شبكي دائري الشكل (Mesh Screens) مكون من أسلاك دقيقة، توضع فوق هذا الحاجز طبقة من الكرات المعدنية (Stainless Steel) بقطر (3mm)، ومن ثم يوضع فوقها حاجز شبكي آخر.



الشكل (5) التفاصيل الهندسية لحاملات اللهب

a) [H.C.B.B.] (b) [D.C.R.B.B.] (c) [Combined]

3- وحدة قياس درجات حرارة اللهب

تتكون هذه الوحدة من جهاز رقمي لقياس درجات الحرارة (Digital Thermometer) نوع (Temperature Controller – TH 9–DC10) تصل دقته الى ($\pm 0.5\%$) كوري المنشأ ملائم لاستخدام نوعين من المزدوجات الحرارية (S&K). في منظومة التجربة الحالية يستخدم مزدوجاً حرارياً (Thermocouple) نوع (S) Pt/Pt – 10 % (Rh) بقطر ($d=500\mu\text{m}$) أمريكي المنشأ بمدى قياس درجات الحرارة تقريبا ($1710\text{ }^\circ\text{C}$) لقياس درجات حرارة اللهب يثبت المزدوج الحراري على حامل يحوي على مستويات مختلفة لقياس درجات الحرارة في مواقع مختلفة من جبهة اللهب. الشكل (6) يوضح صورة فوتوغرافية لوحدة قياس درجات حرارة جبهة اللهب الانتشاري.



الشكل (6) صورة فوتوغرافية لوحدة قياس درجات حرارة جبهة اللهب الانتشاري.

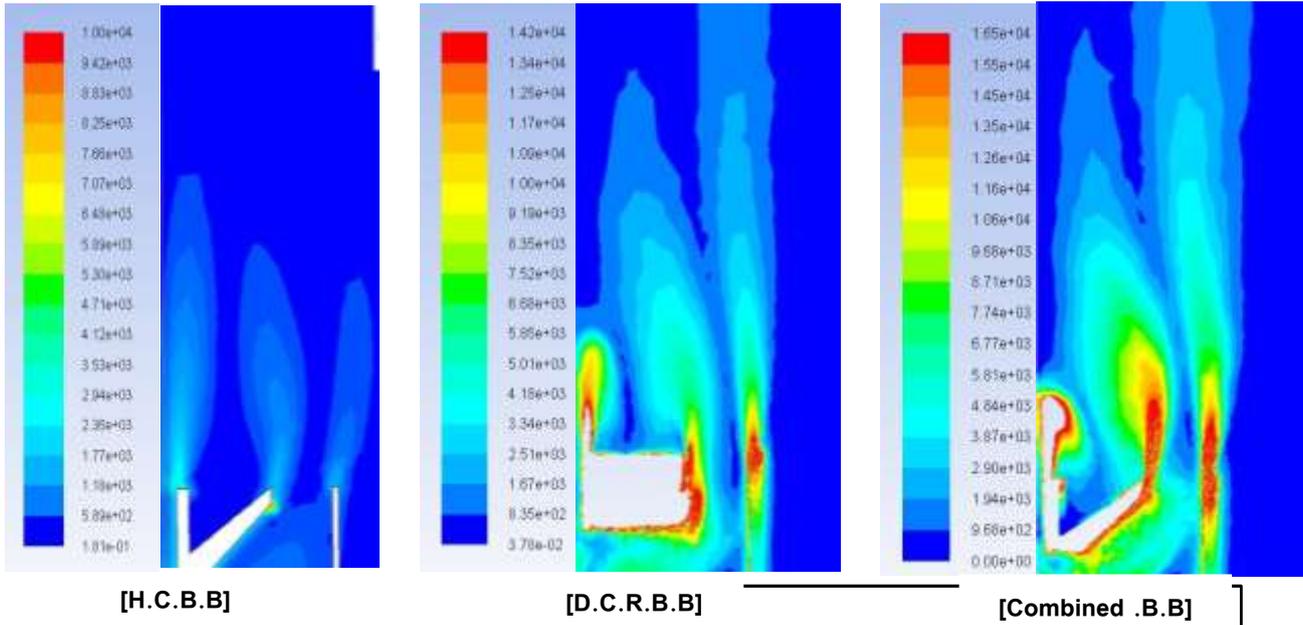
4- إعداد تجارب وحدة قياس درجات حرارة اللهب

تُعدُّ هذه التجربة ذات أهمية كبيرة لمعرفة شكل توزيع درجات الحرارة في كل موقع لجبهة اللهب الانتشاري كما في الخطوات أدناه:-

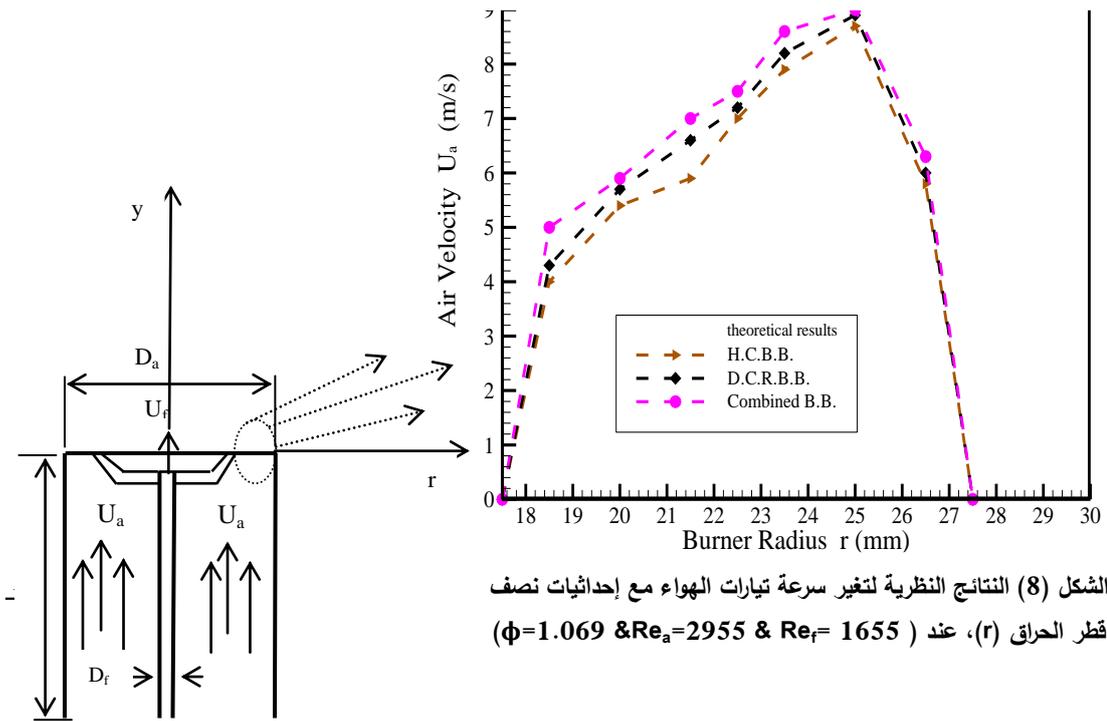
1. تهيئة جبهة اللهب بنسبة خلط ثابتة للوقود والهواء وذلك كي تكون الدراسة والمقارنة صحيحة في كل نموذج من حاملات اللهب.
2. تهيئة المتحسس الحراري (المزدوج الحراري) من نوع (Pt/Pt – 10% Rh) (S-Type).
3. تهيئة جهاز قياس درجات الحرارة (Digital Thermometer) بوضعة على نوع المزدوج الحراري نفسه.
4. يوضع المزدوج الحراري في المواقع المراد فيها القياس وفي كلا الاتجاهين العمودي والافقي لجبهة اللهب، وتسجل القراءات.
5. تعاد جميع الفقرات أعلاه على كل نوع من حاملات اللهب.

النتائج والمناقشة

توضح الأشكال (7,8) النتائج النظرية لمخططات الدوامية، وسرعة جريان الهواء مع محور الإحداثي النصف قطري (r)، والشكل (9) يوضح مخططا للحراق الانتشاري، حيث يمكن التمييز بين الأنواع الفعالة لحاملات اللهب وأفضلها من حيث الأداء ومنطقة إعادة التدوير والدوامات من خلال ملاحظة المنطقة القريبة من حافة حامل اللهب. فعندما تكون سرعة تيارات الهواء عالية يدل ذلك على زيادة سرعة منطقة الدوامات وبالتالي تؤدي الى زيادة الاستقرار والخلط بين الوقود والهواء. أما إذا كان حامل اللهب غير فعال فتكون سرعة تيارات الهواء بطيئة مما تؤدي الى قلة كفاءة الخلط بين الوقود والهواء وبالنتيجة تقل استقرارية اللهب نتيجة لعدم تكافؤ عملية الخلط والاحتراق، إذن تعد هذه المنطقة المعيار الأساسي لمعرفة كمية تيارات الهواء (دوامات) المطلوبة لغرض الامتزاج مع الوقود وتشكل جبهة اللهب الانتشاري.



الشكل (7) النتائج النظرية لتأثير قيم الدوامية عند ($\phi=1.069$ & $Re_a=2955$ & $Re_f=1655$) للحرق (1/sec)



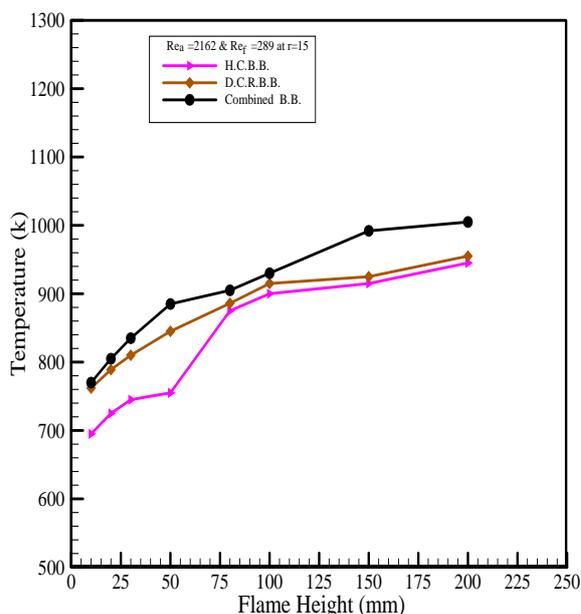
الشكل (8) النتائج النظرية لتغير سرعة تيارات الهواء مع إحداثيات نصف قطر الحراق (r)، عند ($\phi=1.069$ & $Re_a=2955$ & $Re_f=1655$)

الشكل (9) مخطط الحراق.

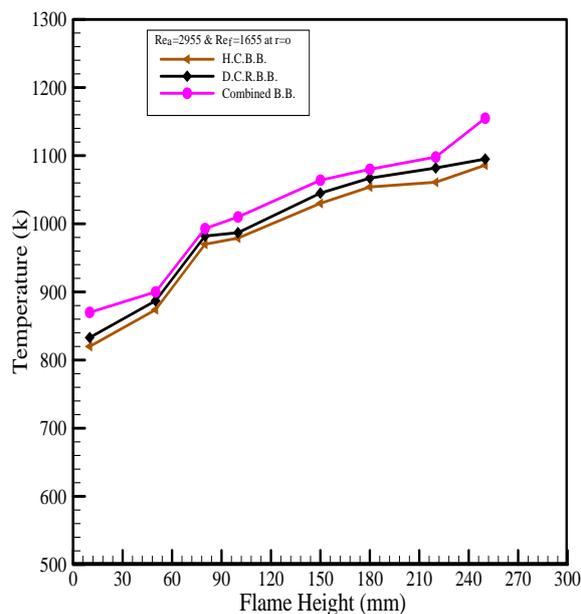
تعتبر جبهة اللهب الانتشاري من أعقد أنواع اللهب من حيث التكوين، لهذا السبب تم تسليط الضوء على الخصائص والمؤثرات الفيزيائية والكيميائية على اللهب الانتشاري، إن توزيع درجة الحرارة لجبهة اللهب الانتشاري تم قياسها وحسابها من الناحية التجريبية والتحليل النظري كما ورد في الأشكال (10-13).

إنَّ تصميم غرف الاحتراق والأفران الصناعية تعتمد على شكل توزيع درجات الحرارة وطول وقطر جبهة اللهب، يلاحظ من الأشكال أعلاه ان أعلى درجة حرارة لجبهة اللهب تحدث عند منطقة الخلط المثالي بين الوقود والهواء وذلك بسبب حدوث الاحتراق الكفوء ذو التوازن الكيميائي والحراري المثالي، وتبدأ درجة الحرارة بالتناقص كلما اقتربنا من جانب الهواء والوقود أي في منطقة الوقود الغني او الفقير.

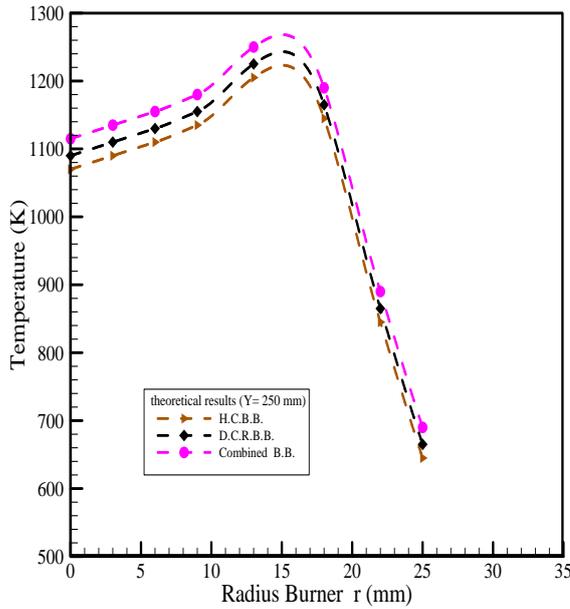
كذلك يلاحظ ارتفاع درجة الحرارة كلما ابتعدنا عن فوهة الحراق، كون جبهة اللهب تكون بشكلها النهائي وبعيدة عن منطقة الدوامات والتشكل الابتدائي لجبهة اللهب، وتم الحصول على أعلى توزيع لدرجة الحرارة في حامل اللهب المركب بسبب زيادة استقرارية وتشكل اللهب الانتشاري والخلط الأمثل للوقود والهواء، ولوحظ اتفاق كبير بين الدراستين التجريبية والنظرية وكذلك تم التوصل الى ارتفاع درجة الحرارة مقارنة مع البحوث والدراسات السابقة كما بيينا في الشكل (14).



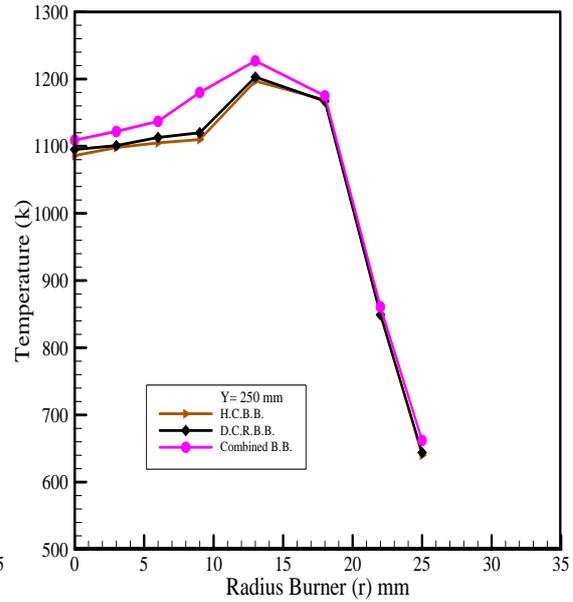
الشكل (11) النتائج التجريبية لتوزيع درجة حرارة جبهة اللهب على طول اللهب عند ($Re_a=2162$ & $Re_f=$)



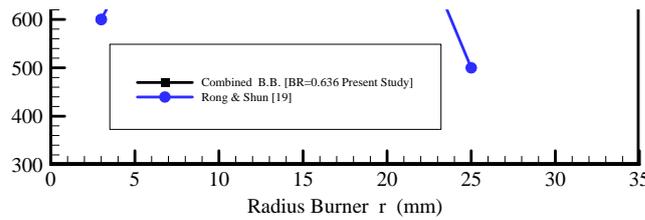
الشكل (10) النتائج التجريبية لتوزيع درجة حرارة جبهة اللهب على طول اللهب عند ($\phi=1.069$ & $Re_a=2955$ & $Re_f=1655$)



الشكل (13) النتائج النظرية لتوزيع درجة حرارة جبهة اللهب عند
($\phi=1.069$ & $Re_a=2955$ & $Re_f=1655$)



الشكل (12) النتائج التجريبية لتوزيع درجة حرارة جبهة اللهب
عند ($\phi=1.069$ & $Re_a=2955$ & $Re_f=1655$)



الشكل (14) مقارنة بين نتائج البحث، والدراسات المرجعية لتوزيع
درجة حرارة جبهة اللهب، على طول البعد النصف قطري

الاستنتاجات والتوصيات

1. يحقق حامل اللهب المركب (Combined B.B.) أداء أفضل بالمقارنة مع النوعين السابقين [حامل اللهب المخروطي المجوف (H.C.B.B.) وحامل اللهب القرصي ذي البروزات الاسطوانية (D.C.R.B.B.)] لغرض الحصول على أعلى قيم دوامات لجبهة اللهب بنموذج واحد لحامل اللهب. وأدى الشكل الهندسي المتباعد لسطح حامل اللهب، وكذلك البروزات المحيطة به إلى توليد دوامات بكل من الاتجاهين العمودي والافقي، وبالنتيجة تم الحصول على أفضل عملية خلط واستقرار للهب.
2. كلما اتسعت منطقة دوامات الهواء (منطقة إعادة التدوير) كلما زادت حدود استقرارية اللهب وقل بالتالي ارتفاع انفصال اللهب، مما يؤدي إلى زيادة الاستقرارية وعملية الخلط بين الهواء والوقود أدت إلى رفع درجة حرارة جبهة اللهب إلى (4.8%) عند منتصف فوهة الحراق و(28.57%) عند الحافة الخارجية للحراق مقارنة مع البحوث السابقة المنشورة، حيث إنَّ الشكل الهندسي لحامل اللهب يلعب دوراً أساسياً مهماً في آلية استقرار اللهب الانتشاري، لأنه المسبب الرئيسي في زيادة كفاءة عملية الخلط بين الهواء والوقود.

3. حامل اللهب المركب يعطي أقل زمن لعمليات الخلط بين المتفاعلات نتيجة لزيادة شدة الدوامات في منطقة المزج وتنشيط عملية المزج، وبالنتيجة يقل زمن انتقال الحرارة والكتلة، ومن ثم تقليل زمن الاحتراق الكلي، وهذا ما تمت ملاحظته من النتائج التي تم التوصل إليها.
4. من خلال التجارب العملية لوحظ أنه بوضع مجموعة ثانية لاستقرار جريان الهواء (قرص معدني على شكل خلية نحل، وحاجز شبكي دقيق، وكرات معدنية) توضع بالقرب من فوهة الحراق تؤدي إلى انسيابية عالية وتقليل اضطراب الهواء الحلقي وبالنتيجة زيادة كفاءة خلط الهواء والوقود، مما تؤدي إلى زيادة استقرارية اللهب الانتشاري.
5. في اللهب الانتشاري تم الحصول على أعلى درجة حرارة لجبهة اللهب عند الاحداثي النصف قطري ($r=$ 13 mm)، والتي عندها يمكن الاستنتاج بان نسبة الخلط الكيميائي المثالي تحدث في هذا الموقع عند خط النقاء (المتفاعلات) الوقود والهواء وتبدأ النسبة المكافئة بالازدياد وتقل كلما ابتعدنا عن هذا الخط.

قائمة الرموز

BR	نسبة الانغلاق	-
CO	أول اوكسيد الكربون	-
C_f	التركيز المولي للوقود	kmol/m^3
C_o	التركيز المولي للأوكسجين	kmol/m^3
C_p	تركيز المولي للمتفاعلات	kmol/m^3
C_∞	نسبة تركيز مولات الوقود عند النفث إلى مولات خليط الاحتراق	-
D_n	رقم دمكوهرلر	-
D_f	قطر انبوب الوقود (نفث الوقود)	mm
D_b	قطر جسم حامل اللهب	mm
D_{bw}	عرض جسم حامل اللهب	mm
D_a	قطر أنبوب الهواء (جريان الهواء)	mm
K	ثابت يعتمد على قيمة تركيز مولات الوقود إلى مولات خليط الاحتراق.	-
LPG	غاز البترول المسال	-
L_c	الطول المميز للنظام أو (نصف قطر الهيدروليكي للحراق)	mm
M_f	الوزن الجزيئي للوقود	g/mol
\dot{m}_f	معدل تدفق الوقود الكتلي	kg/s
\dot{m}_a	معدل تدفق الهواء الكتلي	kg/s
\dot{m}_r	الكمية الكلية لجريان مائع النفث لكل ثانية خلال المسافة $(X_{00}-X_0)$	kg/s
m	نسبة سرعة الهواء إلى سرعة الوقود عند مقطع خروج النفث	-
P	الضغط	N/m^2
Pr	عدد برنتل	-

kJ/s	معدل إطلاق الحرارة	\dot{Q}
mm	نصف قطر أنبوب الوقود (نفث الوقود)	r_j, r_f
mm	نصف قطر أنبوب الهواء	r_a
-	عدد رينولدز الهواء	Re_a
-	عدد رينولدز الوقود	Re_f
K	درجة حرارة الركود	T_o
K	درجة حرارة اللهب	T_F
m/s	سرعة جريان المائع	U
m/s	سرعة جريان الوقود	U_f
m/s	سرعة جريان الهواء	U_a
m/s	سرعة الجريان عند نقطة الانفصال	U_{Bo}
mm	المسافة من نقطة نفث الوقود حتى منطقة بدأ الدوامات	X_o
mm	المسافة من نقطة نفث الوقود حتى منطقة التقاطع	X_{oo}
mm	احداثي طبقة القص	y
mm	قطر منطقة الخليط	y_f
-	تركيز الوقود	Y_f
-	تركيز المؤكسد	Y_o
-	تركيز الوقود عند نسبة الخلط المحدد بمعادلة التفاعل الكيميائي	Y_{fs}

الرموز الإغريقية واللاتينية

kg/m^3	كثافة الوقود	ρ_f
kg/m^3	كثافة الخليط (الهواء والوقود)	ρ_m
-	النسبة المكافئة	ϕ
-	نسبة الوقود الى الهواء عند الانفصال	ϕ_{Bo}
m^2/s	دالة الانسياب	ψ
-	محدد يستخدم مع نفث الوقود داخل لهواء	θ_r^*
s	زمن مقياس ميكانيك الموائع	T_{flow}
s	زمن مقياس التفاعلات الكيميائية	$T_{chem.}$
-	دالة تجريبية معادلة (1)	ξ
1/s	الدوامية	ξ

المراجع

1. HAYES, R. E. ؛ KOLACZKOWSKI, S. T. Introduction to Catalytic Combustion. 2nd ed., Gordon and Breach, Science Publishers Inc. 1997, pp.93-113.
2. STAMBULEANU, A., Flame Combustion Processes in Industry. 1st ed. Science Publisher Inc., New York, 1976, pp. 124-137.
3. BARNARD, J. A. ؛ BRADLEY, J. N., Flame and Combustion, 2nd ed., Chapman and Hill Inc., 1985, pp. 67-79.
4. TURNS, R. S., An Introduction to Combustion. McGraw-Hill Inc., 2000.
5. Notes on Non-premixed Flame (Diffusion Flame) Last updated: Oct 13, 2007. <[http:// www.google](http://www.google)>.
6. JERZY, C., Combustion a Study in Theory Fact and Application. 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1990, pp. 112-135.
7. LEWIS, B. ؛ VON-ELBE, G. Combustion, Flame and Explosion of Gases, 2nd ed., Academic Press, New York 1987, pp. 72-89.
8. KANURY, A. M., Introduction to Combustion Phenomena. 1st ed. Gordon and Breach, Science Publishers Inc., New York. 1975, pp. 48-66.
9. SANTOSH, J. S.؛ SAJJAD, H. et al. lift-off diffusion flame propagation "Progress in Energy and Combustion Science", 35, 2009, pp. 98-120.
10. HOTTEL, H. C.؛ WILLIAMS, G. C. et al. Modeling Studies of Baffle-Type Combustion. "Proceedings of the Combustion Institute" 1962, pp. 923-935.
11. PLEE, S. L. ؛MELLOR, A. M., Characteristic Time Correlation for Lean Blow-off of Bluff-Body Stabilized Flames "Combustion and Flame" 35, 1979, pp. 61-80.
12. LEUNG, T., ؛ WIERZBA, I., The effect of co-flow stream velocity on turbulent non-premixed jet flame stability. "Proceedings of the Combustion Institute" 32, 2009, pp. 1671-1678.
13. STREETER, V. L. Fluid Mechanics. Sixth Edition, New York, 1984.
14. JAGADEESH, P. ؛ MURALI, K. Application of low-Re turbulence models for flow simulations. "Journal of Naval Architecture and Marine Engineering", 2005, PP. 1813-1835
15. DWORKIN, S. B.؛ BENNETT, B. A. et al. temperature flame front distribution "Journal Comput. Phys.", 215, 2006, pp. 430-447.
16. DWORKIN, S. B.؛ SCHAFFER, A. M. et al. Measurements and calculations of formaldehyde concentrations in a methane/N₂/air, non-premixed flame: Implications for heat release rate "Proceeding of the Combustion Institute", 32, 2009. 1311-1318.
17. ARPACI, V. S., ؛ LARSEN, P. S. Convection Heat Transfer. 1st ed. Gordon and Breach, Science Publishers Inc., New York. 1984, pp. 85-94.
18. ADRIAN, S., Flame Combustion Processes in Industry. 1st ed. Abacus Press, Tunbridge Wells Kent, England 1976, pp. 118-134.
19. Rong, F. H., Shun, C. Y. Aerodynamic characteristics and thermal structure of non-premixed reacting swirling wakes at low Reynolds numbers "Combustion and Flame" 155, 2008, PP. 539-556.