

Etude numérique de l'influence des conditions d'injection sur le comportement d'une flamme de diffusion d'Hydrogène

Mohamed BOUKHELEF a, Mounir ALLICHE a,*, Abdallah BENAROUS b

a. laboratoire LMP2M, Université de MEDEA, ALGERIE

b. laboratoire LCEMSM, Université de CHLEF, ALGERIE

Résumé :

Actuellement, le développement de production d'énergie issue de la combustion d'hydrogène s'impose. La raison, c'est de répondre à la hausse de la demande en énergie sans nuire à l'atmosphère par des émissions polluantes. Cet article présente une étude numérique des conditions d'injection du carburant (H₂) et du comburant sur la structure de la flamme de diffusion H₂-Air. Le but étant de reproduire un cas pratique d'une combustion non polluante et donnant lieu à des températures très élevées (de l'ordre de 2000 K). La configuration étudiée est composée de deux jets coaxiaux axisymétriques, tel qu'on peut rencontrer dans les brûleurs de diffusion. Une approche par fonction de densité de probabilité (PDF) présumée est utilisée pour décrire l'interaction chimie-turbulence. Un modèle de turbulence à deux équations de type K-Epsilon est utilisé dont les deux gaz sont considérés comme gaz parfait.

Mots Clés : Flamme de diffusion, H₂-Air, Pdf présumée, équilibre chimique, modèle k-Epsilon, CFD

Nomenclature

V'_{air} : Vitesse fluctuante de l'air [m/s]

\bar{V}_{H_2} : Vitesse moyenne de H₂ [m/s]

\bar{V}_{air} : Vitesse moyenne de l'air [m/s]

T_{air} : Température de l'air [K]

Re : Nombre de Reynolds

T_{H_2} : Température de H₂ [K]

ρ_{H_2} : masse volumique de H₂

1 Introduction

Le développement des systèmes énergétiques nécessite un accompagnement conséquent en matière de ressources fossiles. Les activités inhérentes aux besoins domestiques et industriels requièrent la fourniture de combustibles dont la majorité, sont des hydrocarbures. En plus des problèmes liés à la disponibilité et aux coûts, les produits dérivés du pétrole et du gaz naturel fournissent de grandes énergies, mais libèrent de grandes quantités de polluants [1]. En conséquence, la communauté internationale se tourne vers des combustibles alternatifs, offrant de bonnes performances écologiques moyennant des coûts de production intéressants. Dans ce contexte, l'hydrogène paraît répondre de manière assez satisfaisante à ces critères. En effet, ce dernier offre un faible niveau d'énergie à l'allumage et dispose d'une large gamme d'inflammabilité, mais présente quand même l'inconvénient d'avoir une faible masse volumique et d'être très diffusif, ce qui induit respectivement des problèmes technologiques liés à l'étanchéité et au stockage [2,3,4].

Bien que les flammes de prémélange sont moins polluantes et plus utilisées dans les installations énergétiques que les flammes de diffusion, l'hydrogène prémélangé à l'air présente de grands

risques de transition à la détonation et de retour de flammes (flashback) [5,6,7]. Comme combustible, l'hydrogène se retrouve impliqué dans une vaste applicabilité technologique, allant des moteurs à combustion interne où il est mélangé au gaz naturel, passant par les turbines à gaz (mélangé au méthane) jusqu'aux brûleurs à bas NOx (H2-Air) et moteurs fusée (H2-O2).

Le présent travail porte essentiellement sur la simulation numérique du phénomène de la combustion turbulente, dans une flamme non-prémélangée de type H2-Air, par utilisation du code Ansys-Fluent. Le but étant de reproduire un cas pratique d'une combustion non polluante et donnant lieu à des températures très élevées (de l'ordre de 2000 K). La configuration étudiée est composée de deux jets axisymétriques coaxiaux, tel qu'on peut rencontrer dans les brûleurs de diffusion. Au cours de cette simulation, on a utilisé le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ avec un mécanisme chimique réduit. On examine l'effet des conditions d'injection sur la structure de la flamme de diffusion, plus spécifiquement, la vitesse, la température et la pression statique. On s'intéresse particulièrement aux phénomènes d'accrochage ou de soufflage de la flamme.

2 Géométrie et conditions de fonctionnement

La configuration étudiée est un ensemble de deux jets turbulents dans un brûleur axisymétrique, composé d'un injecteur coaxial (r_1 , r_2) de longueur l , débouchant sur une conduite cylindrique de longueur L et de rayon R (figure (1)). Un courant d'air de composition standard ($O_2\%=21,008\%$, $N_2\%=78,992\%$), est envoyé via l'injecteur axial à une température $T_{air} = 300K$, avec une intensité de turbulence de l'ordre de 15% ce qui correspond à une vitesse fluctuante donnée par :

$$V'_{air} = \frac{15}{100} \cdot \bar{V}_{air} \quad (1)$$

Le courant combustible ($H_2\%=100\%$) est soufflé périphériquement par l'injecteur annulaire avec une vitesse moyenne $\bar{V}_{H_2}=200m/s$ et une température $T_{H_2}=300K$. Le soufflage est caractérisé par une intensité de turbulence $I_{H_2}=15\%$.

Le nombre de Reynolds à l'injection rapporté à l'écoulement du combustible est donné par :

$$Re = \frac{\rho_{H_2} \bar{V}_{H_2}}{\mu_{H_2}} r_1 = 8934 \quad (2)$$

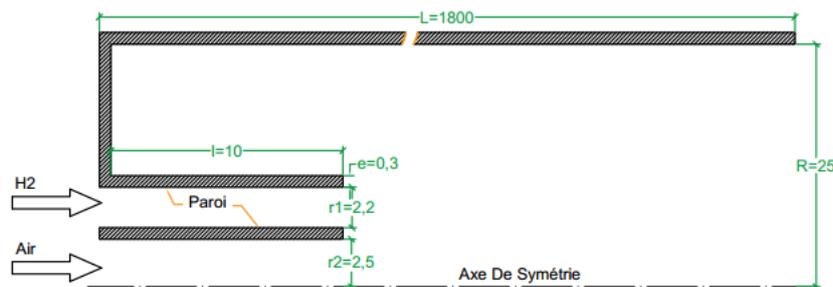


Figure (1) : Modèle géométrique (dimensions en mm)

Les équations de Navier-Stokes sont moyennées au sens de Favre et résolues dans une formulation de type volumes finis, par utilisation du solveur commercial Ansys-Fluent [8]. Le problème est traité d'une façon axisymétrique. Les conditions aux limites à l'injection sont de type vitesses imposées, des parois adiabatiques avec écoulement établi en sortie du brûleur. Des essais numériques effectués sur plusieurs maillages, ont permis de converger vers un maillage final structuré contenant 30990 cellules.

Une analyse supplémentaire est conduite quant au comportement de la flamme de diffusion vis à vis de la composition du courant oxydant, que nous supposons composé d'oxygène pur (100% O₂, 0%N₂). L'analyse consiste à faire varier à l'injection, la vitesse du courant

hydrogène et la température de l'oxygène.

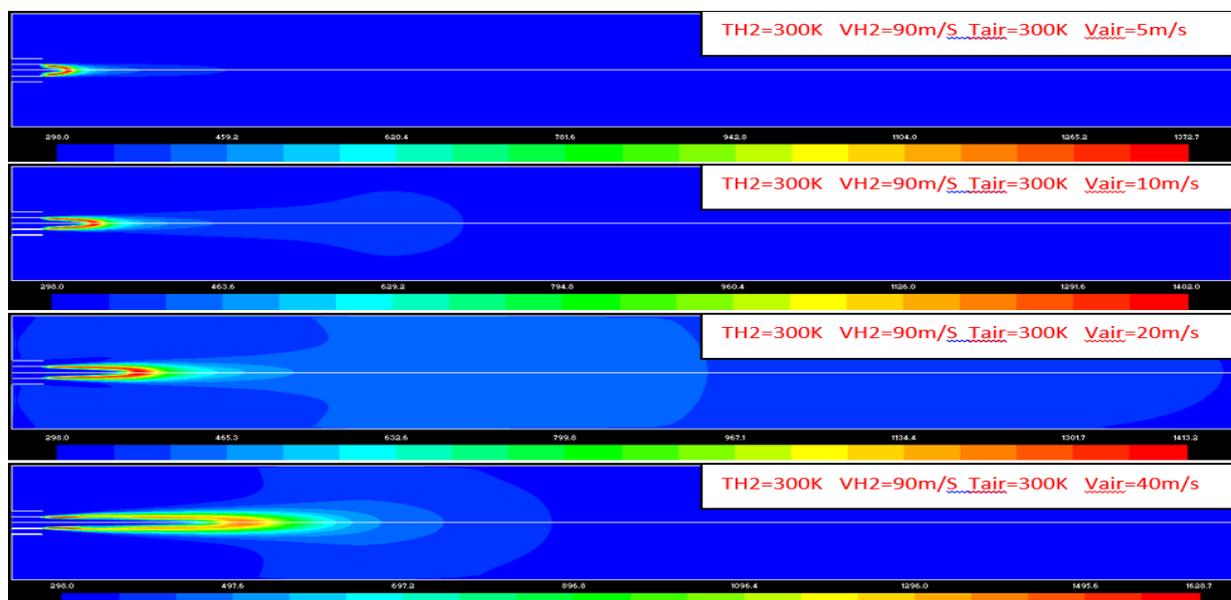
3 Modélisation de la turbulence et de la chimie

La résolution des équations de Navier-Stokes, de l'énergie et du transport d'espèces chimiques, permet de prédire les variables aérothermochimiques de l'écoulement fluide. La turbulence est décrite par le modèle RNG (K- ϵ), l'introduction d'un nouveau terme C_3 dans l'équation de ϵ dite de Pope [9,10]. Ceci est utile afin de corriger une surestimation due à un épanouissement radial du jet rond issu de l'injecteur annulaire. L'état thermo-chimique instantané est décrit au moyen de la fraction de mélange qui représente un scalaire passif unique lorsque les coefficients de diffusion sont égaux pour toutes les espèces chimiques. La fraction de mélange f est définie comme [11] :

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,f} - Z_{i,ox}} \quad (3)$$

4 Résultats et discussion

4.1 Influence de la vitesse de soufflage de l'air



Figure(2) : Comportement de la flamme en fonction de vitesse de soufflage de l'air (5, 10, 20 et 40 m/s) pour les conditions d'injection de H2 300K et 90m/s.

L'analyse de distribution de la température, montre que plus que la vitesse de soufflage de l'air augmente, plus que le front de flamme s'échappe au plan d'injection mais, la flamme ne décolle plus de l'injecteur central (Figure(2)). Cette figure montre le comportement de la flamme pour des différentes vitesses d'injection de l'air. On constate que la température maximale est proportionnelle à la vitesse de soufflage de l'air. Dans ce contexte, une température maximale de 1370K est enregistrée pour $V_{air}=5m/s$, par contre une valeur max de 1630K pour $V_{air}=40m/s$; ce qui veut dire que la consommation de l'hydrogène augmente mais, la température maximale se décale vers l'arrière, contrairement au front de flamme qui s'échappe vers l'avant en constituant une sorte d'enveloppe de flamme en enfermant le jet de l'air. Ceci, peut accroître considérablement la surface de contact air-hydrogène qui favorise une meilleure combustion.

4.2 Etude de la flamme H2-O2

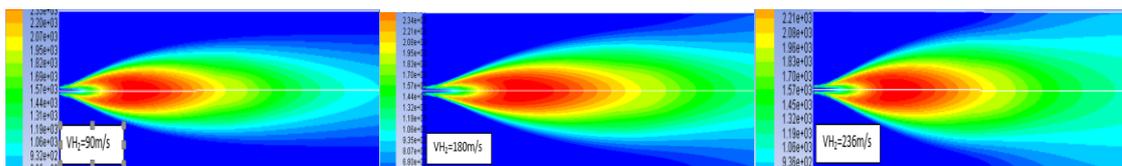
On traitera ici l'effet de deux paramètres, à savoir :

- La vitesse d'injection de l'hydrogène

- La température d'entrée de l'oxygène

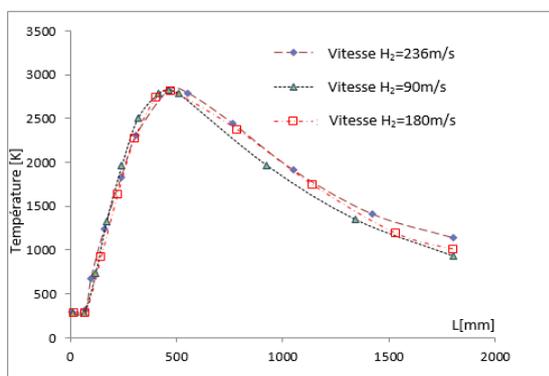
4.2.1 Effet de la vitesse d'injection de l'hydrogène

Dans ce cas, la vitesse d'introduction de l'oxygène est de 1m/s et une température de 85K. Pour l'hydrogène, la température d'entrée est de 287K, injecté aux vitesses respectives suivantes ; 90, 180 et 236m/s. La Figure (3) montre que la température maximale augmente sensiblement en fonction de la vitesse d'injection du H₂. Pour une station axiale située à x=480 mm, les valeurs maximales enregistrées sont de 2848K lorsque VH₂=236m/s et de 2839K pour VH₂=90m/s ; ce qui représente une différence de vitesses ΔVH₂=146m/s ; ce qui peut indiquer que la vitesse d'injection de l'hydrogène n'a pas un grand effet sur la valeur de la température maximale atteinte, par contre on voit bien son influence sur la forme de la flamme.

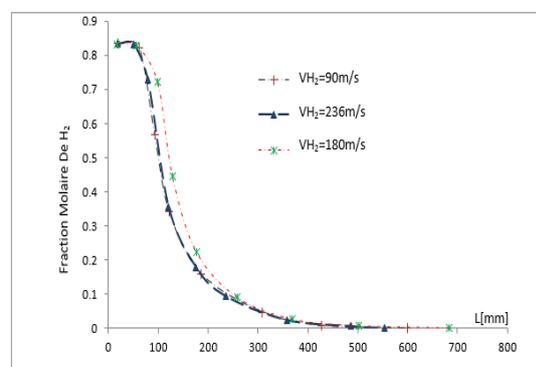


Figure(3) : Champs de la température statique (K)

La figure (4) illustre les variations de la température selon la direction de l'axe central de la chambre de combustion. La courbe pour VH₂=236m/s est située au-dessus de celle de VH₂=90m/s, ceci explique pourquoi l'ampleur de flamme pour VH₂=236m/s est légèrement grande par rapport à celle de VH₂=90m/s. Le cœur de la flamme garde la même forme et illustre une flamme accrochée au bec de l'injecteur. Les deux graphes se rapprochent l'un de autre jusqu'à x=250mm qui représente un point d'intersection.



Figure(4) : Variation de la température sur l'axe de la chambre.

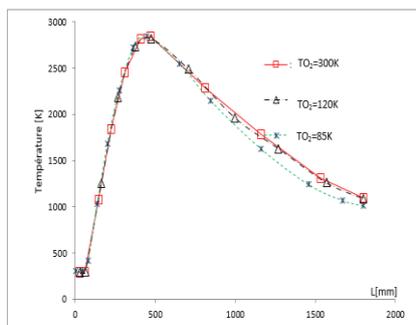


Figure(5) : Distribution de la fraction du H₂ sur l'axe de la chambre de combustion.

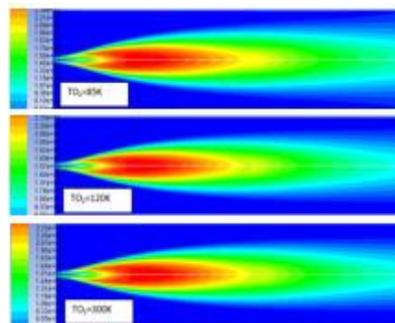
D'autre part, la figure (5), montre que les pentes des fractions massiques sont importantes, ce qui révèle une rapide disparition de l'hydrogène. En effet, ce dernier est devenu quasiment inexistant au-delà de x=600mm. On note aussi que le graphe de VH₂=90m/s est relativement aigu par rapport aux autres, ceci s'explique par le fait que la flamme s'accroche en un endroit plus proche des injecteurs, que dans le cas VH₂=236m/s où on peut noter un soufflage de la flamme qui commence à avoir lieu.

4.2.2 Effet de la température d'entrée de l'oxygène

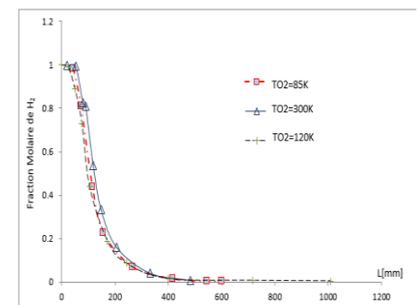
Dans ce cas, les paramètres relatifs au courant H₂ sont maintenus (VH₂=236m/s et TH₂=287K). On procède à un changement des températures d'entrée de l'oxygène comme TO₂=85K, TO₂=120K et TO₂=300K. La figure (6) montre que l'effet de la température d'entrée de l'oxygène ne semble pas être très conséquent sur la distribution axiale de la température statique. La visualisation des champs de température de combustion (figure (7)) montre que les formes des températures sont les mêmes. Mais à la sortie du brûleur, la température de sortie pour TO₂=85K est plus importante que celle de TO₂=300K.



Figure(6) : Distribution de la température statique sur l'axe central.

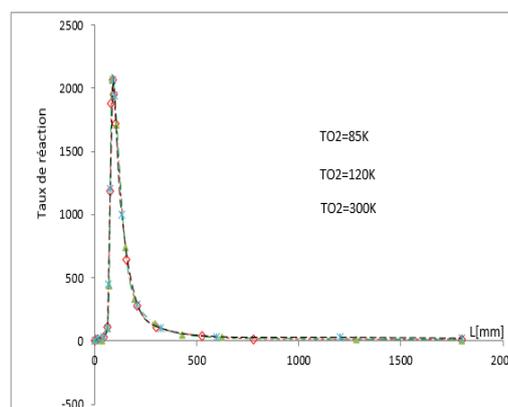


Figure(7) : Champs de température statique pour différentes températures d'injection de l'O₂.



Figure(8) : Fraction molaire du H₂ pour différentes températures d'entrée de l'O₂.

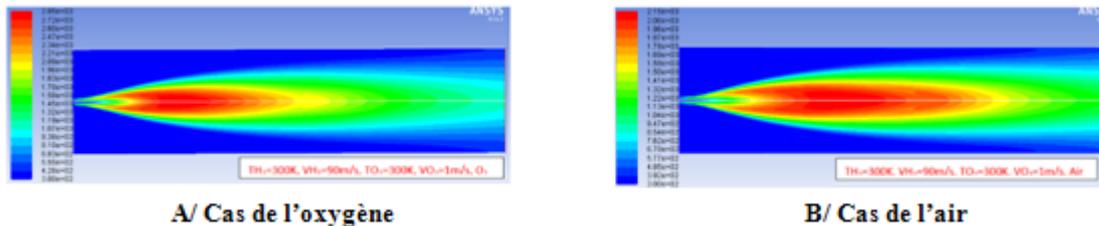
Par ailleurs, la figure (8) montre que la pente de consommation d'hydrogène dans le cas de la combustion avec l'oxygène est plus importante que celle du cas avec de l'air, les réactions d'oxydation sont donc plus rapides, bien que la température d'injection de l'oxygène n'influe que très légèrement la consommation du H₂. Ceci se justifie par la variation du taux de réaction tracé en fonction de la température d'entrée de l'oxygène (Figure (9)).



Figure(9) : Taux de réaction du H₂ pour différentes températures d'entrée de l'O₂.

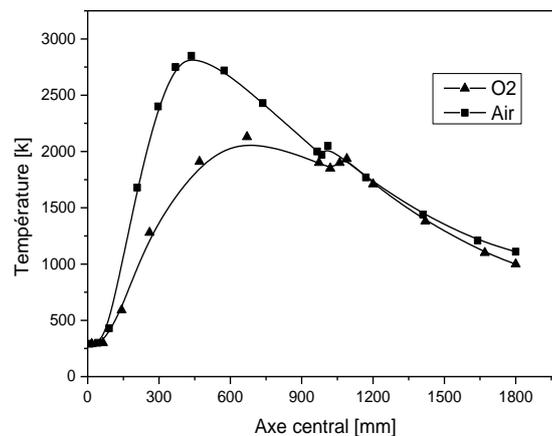
4.3 Comparaison entre les flammes d'hydrogène pour le cas d'oxygène et le cas de l'air

La figure (10) montre que l'énergie thermique libérée lors de la combustion est plus importante pour le cas de l'oxygène comme oxydant, que pour celui de l'air. En effet, la variation de la température sur l'axe montre que la température maximale pour l'oxygène (2850 K) est de plus importante que celle pour l'air (2130K) comme le montre la Figure (11) avec une élévation relative de 33,80%.



Figure(10) : Champs de température

D'autre part, la pente du tracé de l'hydrogène est plus importante que celle de l'air ; ce qui veut dire que les réactions pour le cas de l'oxygène, sont plus rapides. C'est la raison pour laquelle la position du pic du cas A se trouve en amont de celle du cas B (Figure 11) car ce dernier nécessite plus de temps pour atteindre sa valeur maximale, bien que la température maximale du cas B est très inférieure par rapport au cas A.



Figure(11) : Variation de la température

5. Conclusion

On a examiné l'effet des conditions d'injection sur la structure de la flamme de diffusion, plus spécifiquement, la vitesse et la température. On s'intéresse particulièrement aux phénomènes d'accrochage ou de soufflage de la flamme.

Tout d'abord, on a pu voir que la combustion du mélange Hydrogène-Air ne génère que des traces insignifiantes d'oxydes d'azote (NOX). D'autre part, on a remarqué que l'augmentation de la vitesse d'injection de l'hydrogène provoque un soufflage de la flamme loin des lèvres d'injection. Les zones à fort gradient de température sont poussées vers la sortie de la chambre de combustion loin de l'injecteur ce qui favorise un refroidissement de la région du bec. Les grandes vitesses d'injection du combustible diminuent la température maximale à la zone centrale du tube tandis qu'elles favorisent une augmentation des températures près des parois de la chambre. La température maximale diminue avec l'augmentation de la vitesse du combustible.

On a remarqué aussi que plus la température d'entrée est grande plus la flamme s'accroche au bec d'injection ; ce qui peut représenter un danger par la fusion du bec si le temps résiduel dépasse une certaine limite et donne lieu à une possibilité du retour de flamme si le diamètre d'injection dépasse la distance de coincement de la flamme en question. La longueur de la flamme diminue avec l'augmentation de la température d'entrée. On a constaté aussi que plus la vitesse d'entrée de l'air est élevée plus la flamme s'accroche au bec d'injection. La température augmente continuellement au cours de l'avancement vers la fin du tube pour une faible vitesse d'entré d'air. Par contre, pour des grandes vitesses de l'air, la température augmente et la longueur de la flamme diminue.

D'autre part, la comparaison entre la combustion d'hydrogène avec de l'oxygène et celle de l'hydrogène avec de l'air a montré que l'énergie dégagée par la combustion avec l'oxygène est plus importante pour celle de la combustion avec l'air. En effet, en variant la vitesse d'injection de l'air, on a constaté que le front de flamme s'éloigne de la sortie de l'injecteur axial sans qu'elle le quitte. On a remarqué que l'augmentation de la vitesse d'injection de l'hydrogène pousse le front de flamme loin du bec d'injection. Les zones à fort gradient de température sont poussées vers la sortie du tube loin de l'injecteur, ce qui favorise un refroidissement de la région du bec. Les grandes vitesses d'injection du combustible diminuent la température maximale à la zone centrale du tube tandis qu'elles favorisent une augmentation de la vitesse de combustible.

On a aussi remarqué que plus la vitesse d'entrée de l'air est élevée plus la flamme s'accroche au bec d'injection. La température augmente continuellement au cours de l'avancement vers la fin de tube pour une faible vitesse d'entrée d'air. Par contre pour des grandes vitesses de l'air, la température augmente avec l'augmentation de la vitesse tandis que la longueur de la flamme diminue. En outre, dans les deux cas traités ci-dessus pour la combustion avec de l'oxygène, l'hydrogène paraît être complètement consommé en amont de la station $x=600\text{mm}$.

Références

- [1] BOUSSEMAT Jean Michel, Approvisionnement énergétique de la planète à horizon 2035, Document de travail n°31, Coe-Rexocode, Paris, France, (Juin 2012).
- [2] Gupta Ram B., Hydrogen fuel: production, transport, and storage, CRC Press Taylor & Francis Group, (2009).
- [3] Eichlseder H., Wallner T., Freyman R., Ringler J., The potential of hydrogen internal combustion engines in a future mobility scenario. SAE paper; 2003-01-2267, (2003).
- [4] Lemmon EW, Thermophysical properties of fluids. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 90th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Section 6: Fluid Properties, 6.21-6.31, (2009).
- [5] Law CK, Combustion Physics, New York, Cambridge University Press, (2006).
- [6] ALLICHE M., HALDENWANG P., CHIKH S., Extinction Conditions of a Premixed Flame in a Channel, COMBUSTION AND FLAME (ScienceDirect), 157, 1060–1070,(2010).
- [7] Syred N. , Giles A. , Lewis J. , Abdulsada M. , Valera A. Medina, Marsh R. , Bowen P.J. , Griffiths A.J. , Effect of inlet and outlet configurations on blow-off and flashback with premixed combustion for methane and a high hydrogen content fuel in a generic swirl burner, Applied Energy, Volume 116, 1, Pages 288–296, (March 2014).
- [8] ANSYS-Fluent "User's guide", Vol.2, Fluent Inc, Canterra Resource Park, Lebanon NH3766, (2001).
- [9] Pope, PDF methods for turbulent reactive flows, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 11, Issue 2, , Pages 119–192, (1985).
- [10] OBIEGLO A., GASS J., POULIKAKOS D., Comparative Study of Modeling a Hydrogen Nonpremixed Turbulent Flame, COMBUSTION AND FLAME 122:176–194 (2000).
- [11] Turns Stephen R., An Introduction to Combustion: concepts and applications, 3rd edition, Mc Graw Hill, New York, (2012).