

KESAN SUDUT PUSARAN TERHADAP PEMBAKARAN MENGGUNAKAN PEMUSAR JEJARIAN DWI ALIRAN

Muhammad Roslan Rahim^{a,*}, Mohammad Nazri Mohd Ja'afar^{a,b}

^aDepartment of Aeronautical, Automotive & Ocean Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Johor Bahru, Johor, Malaysia
^bInstitute for Vehicle Systems and Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Johor Bahru, Johor, Malaysia

Article history

Received

22 July 2015

Received in revised form

11 August 2015

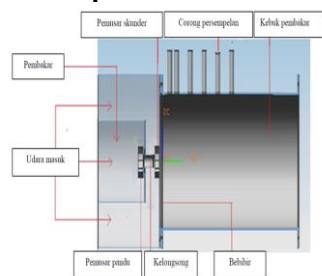
Accepted

10 October 2015

*Corresponding author

roslan_zultech82@yahoo.com

Graphical abstract



Abstract

Development of combustion systems which involves retrofitting or design of new burners, is made to reduce the formation of pollutant emissions. The reduction of this pollutant emission results from the complete mixing of fuel and air during the combustion process. Meanwhile, non-complete mixing of fuel and air during combustion process can cause ignition problem and create problems in terms of flame stability and combustion efficiency. This article describes a study on the effects of swirling flow generated by a double radial swirler on flame characteristics that is related to the emission of NO. The double radial swirlers used in this study have the angles of 30°/40°, 30°/50° and 30°/60°. Diesel is used as a fuel in this study. The results show that all double radial swirlers used have different effects on the flame characteristics and temperature profile. From all these double radial swirlers, the one with an angle of 30°/60° produces flame with high temperature, short flame length with blue colour and wide spread.

Keywords: Pollutants, swirling flow, double radial swirler, combustion

Abstrak

Pembangunan sistem pembakaran melibatkan pengubahsuaian atau reka bentuk pembakar baru, ditingkatkan bagi mengurangkan pembentukan emisi pencemar. Pengurangan pembentukan emisi ini dapat dihasilkan daripada pencampuran bahan api dan udara yang sempurna sewaktu proses pembakaran berlaku. Percampuran bahan api dan udara yang tidak sempurna dilihat dapat memberi kesan ketika pencucuhan awal selain mendatangkan masalah dari segi kestabilan nyalaan serta kecekapan pembakaran. Artikel ini membincangkan kajian mengenai kesan aliran berpusar yang dijana menggunakan pemusar dwi ganda aliran jejarian ke atas ciri-ciri nyalaan yang berkaitan dengan pembentukan emisi NO. Pemusar dwi ganda aliran jejarian yang digunakan dalam kajian ini terdiri dari sudut 30°/40°, 30°/ 50° dan 30°/60°. Diesel digunakan sebagai bahan api dalam kajian ini. Hasil kajian menunjukkan bahawa semua pemusar dwi ganda aliran jejarian yang digunakan mempunyai kesan yang berbeza terhadap ciri-ciri nyalaan dan taburan suhu. Dari semua jenis pemusar dwi ganda aliran jejarian yang dikaji, didapati pemusar dwi ganda bersudut 30°/60° menghasilkan nyalaan dengan suhu yang tinggi, jarak nyalaan yang pendek dengan berwarna biru dan melebar.

Kata kunci: Bahan cemar, aliran berpusar, pemusar dwi aliran, pembakaran

© 2015 Penerbit UTM Press. All rights reserved

1.0 PENGENALAN

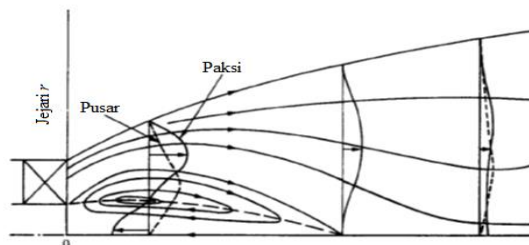
Pada masa kini, kaedah pembakaran semburan bahan api cecair digunakan dalam pembakar yang memacu relau. Oleh kerana semburan dari pembakar yang kurang baik maka kaedah pembakaran ini didapati menyumbang kepada pembentukan emisi pencemar. Faktor utama pembentukan emisi-emisi ini adalah kerana masa percampuran bahan api yang kurang, menyebabkan bahan api cecair tidak dapat dioksidakan dengan lengkap. Walau bagaimanapun penambahan tempoh nyalaan akan meningkatkan pembentukan NO_x . Oleh itu keseimbangan antara kedua-dua keadaan ini perlu diperolehi untuk mendapatkan hasil pembakaran yang terbaik.

Salah satu kaedah yang boleh digunakan untuk memperbaiki percampuran bahan api dan udara ialah dengan menggunakan aliran berpusar. Aliran berpusar digunakan secara meluas dalam aplikasi industri seperti relau dan pembakaran turbin gas [1], nyalaan mestilah pendek dan berkeamatan tinggi bagi mencapai pembebasan haba yang maksimum. Haba panas yang dihasilkan akan dialir semula ke kawasan percampuran serta bertindak sebagai pemegang api nyalaan dan kemudiannya bercampur dengan campuran bahan api udara bagi meningkatkan kestabilan nyalaan sewaktu proses pembakaran. Menurut Rahim dan Jaafar [2], dari ujian pembakaran yang dijalankan, menunjukkan bahawa aliran pusaran memainkan peranan penting dalam percampuran udara dan bahan api, percampuran bahan api dan udara yang sempurna menghasilkan nyalaan yang bersuhu tinggi serta berwarna biru, sekaligus memendekkan panjang nyalaan. Berdasarkan kajian yang dijalankan oleh para penyelidik, faktor yang perlu diambil kira sewaktu proses pembakaran ialah gabungan antara pembentukan jarak panjang nyalaan, masa mastautin yang singkat semasa proses pembakaran dan suhu nyalaan yang tinggi boleh mengurangkan pembentukan emisi [3].

Menurut Escott [4], aliran berpusar adalah hasil daripada komponen halaju tangen atau pusaran menggunakan penjana pusaran. Peranan utama aliran berpusar ini adalah untuk mengurangkan jarak nyalaan semasa pembakaran berlaku dengan menghasilkan kadar percampuran bahan api dan udara yang pantas berhampiran muncung keluar nozel dan di sempadan edaran semula, selain itu ia turut membantu bagi meningkatkan kestabilan nyalaan disebabkan berlaku pembentukan kawasan edaran semula pilin (*torroidal*) di dalam zon pusaran yang kuat. Rajah 1 menunjukkan susuk biasa komponen halaju paksi dan pusar dalam medan aliran pusaran yang kuat.

Kawasan edaran semula pilin adalah kawasan di mana haba dan spesies kimia aktif diedarkan kepada sumber pencucuhan yang seterusnya mengurangkan halaju yang diperlukan untuk menstabilkan nyalaan [5]. Kebiasaannya pemusar udara digunakan untuk membentuk satu aliran tangen dan aliran berpusar dalam proses pembakaran. Berdasarkan kajian yang

telah dijalankan, aliran berpusar memberi kesan terhadap panjang nyalaan, bentuk, ketumpatan dan kestabilan nyalaan.



Rajah 1 Susuk biasa komponen halaju paksi dan pusar dalam medan aliran pusaran yang kuat [20]

Dari kajian yang dijalankan oleh Andrews dan rakan-rakan [6], mendapati beberapa masalah dihadapi dalam mencapai kecekapan pembakaran dan kestabilan nyalaan menggunakan pemusar paksi dengan suntikan bahan api pusat. Pada aliran udara yang tinggi, pemusar paksi mempunyai kelemahan dari segi udara yang digunakan untuk bercampur dengan bahan api, menyebabkan kebuk pembakar yang lebih panjang dan berdiameter lebih besar diperlukan. Walau bagaimanapun menurut Al-Kabie dan rakan-rakan [7], masalah ini dapat diatasi dengan menggunakan pemusar udara aliran jejarian.

Mastre [8], menyatakan, sekiranya jarak nyalaan terlalu panjang serta nyalaan berwarna kuning, ini menunjukkan bahawa nisbah pencampuran bahan api dan udara adalah tidak sempurna. Keadaan ini menyebabkan berlaku peningkatan pelepasan emisi. Selain itu, nyalaan berwarna kuning juga membentuk kawasan-kawasan dengan suhu yang tidak seragam di seluruh nyalaan.

Bagi penyelidikan ini, tumpuan diberikan kepada teknik pengubahsuaian pembakaran, iaitu dengan menggunakan pembakar rendah NO_x . Pembakar atau pengubahsuaian kaedah pembakaran bagi tujuan pengawalan emisi NO_x adalah sesuai digunakan bagi semua kategori peralatan pembakaran pegun.

2.0 METODOLOGI

2.1 Reka Bentuk Pemusar

Aliran berpusar merupakan aliran di mana arah bendalir bergerak dalam lintasan membulat. Ia mempunyai komponen halaju tangen. Komponen halaju tangen terdiri daripada vorteks bebas dan vorteks paksa atau dirujuk sebagai vorteks Rankine [9].

Aliran berpusar digunakan dalam peranti pembakaran praktikal, bertujuan untuk mengawal kestabilan, keamatan pembakaran, saiz dan bentuk nyalaan. Komponen aliran tangen dijana dalam elemen aerodinamik dipanggil sebagai pemusar (penjana pusaran atau pemegang nyalaan), yang direka dalam bentuk bilah paksi [10]. Eldrainy dan

rakan-rakan [11], menyatakan kaedah yang biasa digunakan untuk menstabilkan nyalaan dalam pembakar turbin gas adalah menggunakan kaedah aliran berpusar, di mana halaju pusaran pada udara masukkan dihasilkan menggunakan bilah pemusar. Pemusar udara digunakan secara meluas pada pembakar berbentuk tiub dan anulus. Pemusar dari jenis ini sering dipasang sebagai pemusar tunggal atau sebagai pemusar dwi aliran. Bagi pemusar dwi aliran ianya dipasang sepusat dan tersusun untuk membekalkan aliran udara sama ada berpusar pada sama arah atau berlawanan arah [12].

Menurut Ramadan [13], percampuran bahan api dan udara yang lebih pantas dapat dihasilkan menggunakan pemusar udara dwi ganda serta pada masa yang sama dapat meningkatkan kehomogenan campuran. Selain itu, bagi susuk nyalaan hasil daripada nisbah percampuran bahan api dan udara yang seragam juga dapat diperolehi dalam jarak yang lebih singkat berbanding dengan pembakar konvensional. Manakala kepekatan bahan api pula menunjukkan bahawa rantau yang kaya bahan api adalah lebih kecil dengan menggunakan pembakar pemusar udara dwi aliran. Percampuran udara dan bahan api yang pantas oleh pembakar yang menggunakan pemusar udara dwi aliran turut menghasilkan tempoh masa mastautin yang singkat dan pada masa yang sama dapat meningkatkan suhu pembakaran.

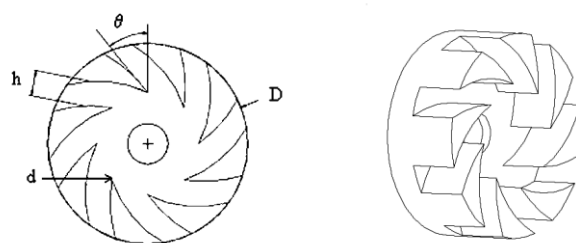
Sementara itu Khanafer dan Aithal [14] dalam kajian mereka terhadap pembakaran bukan pracampuran (*non-premixed combustion*) menyatakan, aliran berpusar menghasilkan nyalaan yang pendek, memberi kelebihan terhadap kecekapan pembakaran yang lebih baik (pembakaran bahan api yang lebih lengkap) dalam pembakar. Selain itu, aliran berpusar juga didapati dapat menghalang hentaman secara langsung nyalaan pada dinding pembakar, sekaligus mengurangkan potensi untuk kerosakan kepada dinding pembakar. Bagi Huang dan Yang [15] pula, yang mengkaji kesan pusaran ke atas dinamik pembakaran dalam system pracampur menggunakan pemusar untuk menstabilkan pembakar. Mereka mendapati bahawa nombor pusaran yang tinggi cenderung untuk meningkatkan keamatan pergolakan, kepantasan nyalaan dan seterusnya memendekkan panjang nyalaan. Manakala menurut Chen dan Driscoll [16] menyatakan bahawa aliran berpusar memberi kesan terhadap bentuk nyalaan, saiz nyalaan, kestabilan dan keamatan pembakaran.

Dalam kajian ini, pemusar udara aliran jejarian dibuat menggunakan keluli lembut (Rajah 2), dengan ciri-ciri pemusar udara aliran jejarian dalam kajian ini adalah menyamai dengan pemusar udara aliran jejarian yang direka bentuk oleh Jaafar dan Ishak [17]. Namun begitu reka bentuk pemusar udara aliran jejarian dalam kajian ini adalah dwi aliran. Jadual 1 menunjukkan reka bentuk pemusar udara aliran jejarian yang dibangunkan oleh para penyelidik terdahulu. Semua maklumat mengenai pemusar terkini boleh dirujuk dalam Jadual 2.

Jadual 2 menunjukkan maklumat mengenai reka bentuk pemusar udara aliran jejarian dalam kajian ini adalah seperti berikut, lebar saluran h , diameter luar pemusar D , diameter dalam pemusar d dan kedalaman bilah pemusar L .

Jadual 1 Perbandingan reka bentuk pemusar penyelidik terdahulu

Reka bentuk pemusar jejarian	Al-Kabie (1989)	Escott (1993)	Jaafar and Ishak (2012)
D(mm)	127	76	98
d(mm)	76	40	50
L(mm)	30.5-11.5	32-8	25
d/D	0.598	0.526	0.51



Rajah 2 Gambar rajah skema pemusar udara aliran jejarian

Jadual 2 Maklumat reka bentuk pemusar aliran jejarian

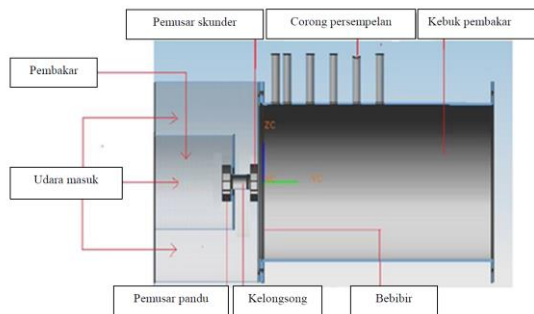
Sudut Pemusar (θ)	30°	40°	50°	60°
Parameter				
Lebar saluran, h (mm)	13.6	12.3	11.2	9.6
Diameter luar, D (mm)			98	
Diameter dalam, d (mm)			50	
Kedalaman bilah, L (mm)			25	

2.2 Kaedah Ujikaji

Kaedah ujikaji untuk ujian pembakaran, ditunjukkan dalam Rajah 3. Rajah ini menunjukkan sebuah pembakar rendah NO_x dilengkapi pemusar udara dwi aliran jejarian, di mana proses percampuran udara dan bahan api berlaku sewaktu proses pembakaran. Dalam kajian yang dijalankan ini, kebuk pembakar berskala makmal telah dibangunkan. Panjang kebuk serta diameter luar kebuk ialah 500mm dan 325mm, manakala ketebalan kebuk pembakar ialah 5mm. Reka bentuk kebuk ini adalah bersesuaian dengan nozel bahan api yang digunakan iaitu 1.25 gelen bahan api per jam (GPH) [18]. Kebuk pembakar ini dibina menggunakan keluli tahan karat TYPE 304. Kuar

pengganding haba yang digunakan bagi ujikaji ini adalah daripada jenis S, yang mampu memberi bacaan maksimum sehingga 1650°C. Pemasangan kuar pengganding haba ini adalah mengikut spesifikasi yang ditetapkan oleh BS 1041: Bahagian 4: 1992 [19].

Susuk suhu nyalaan diambil menggunakan kuar pengganding haba di pusat kebuk pembakaran berdasarkan jarak yang telah ditetapkan. Peralatan lain yang digunakan dalam ujikaji ini ialah pembaca pengganding haba, penganalisis gas, sebuah tangki, kamera Canon DSLR, penghembus udara dan silinder kaca kuarza. Silinder kaca kuarza digunakan sebagai kebuk pembakar primer bagi melihat serta mengukur sudut susuk nyalaan serta panjang nyalaan sewaktu pembakaran berlaku. Panjang kebuk dan diameter luar kebuk pembakar kaca kuarza ialah 254mm dan 335mm dengan ketebalan 10mm. Kebuk pembakar kaca kuarza ini mampu menahan suhu panas sehingga 1500°C. Pemasangan kebuk pembakar kaca kuarza ini adalah di hadapan kerongkong pemusar. Dalam ujian pembakaran ini, bahan api diesel digunakan dan disimpan di dalam tangki. Bahan api kemudian dialirkan kedalam pembakar dan bercampur bersama udara yang dibekalkan oleh penghembus udara. Ujian pembakaran dilakukan pada keadaan nisbah kesetaraan, $\phi=0.8333$, 1.0 dan 1.1. Nisbah kesetaraan stoikiometri, $\phi=1.0$ menunjukkan percampuran udara dan bahan api adalah dalam keadaan sempurna.



Rajah 3 Gambar rajah skema kebuk pembakar dengan kaca kuarza

2.3 Langkah Kerja

Sebuah kamera digital digunakan dan diletakkan di atas tripod bagi memudahkan pengambilan gambar nyalaan sewaktu pembakaran dilakukan. Pembakar berbahan api cecair dihidupkan. Kebuk pembakar kaca kuarza diletakkan di hadapan pembakar dan bertindak sebagai kebuk pembakar primer. Bagi pengambilan susuk suhu nyalaan sebuah kuar pengganding haba digunakan dan ditempatkan di tengah kebuk bagi mendapatkan suhu nyalaan sewaktu pembakaran berlaku. Keseluruhan ujikaji diulang menggunakan pemusar dwi ganda 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° serta nisbah kesetaraan, $\phi=0.8333$, 1.0 dan 1.1.

3.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Keputusan ujikaji bagi ujian pembakaran ini tertumpu kepada susuk taburan suhu, bentuk, saiz dan sudut nyalaan menggunakan pemusar dan nisbah kesetaraan yang berbeza.

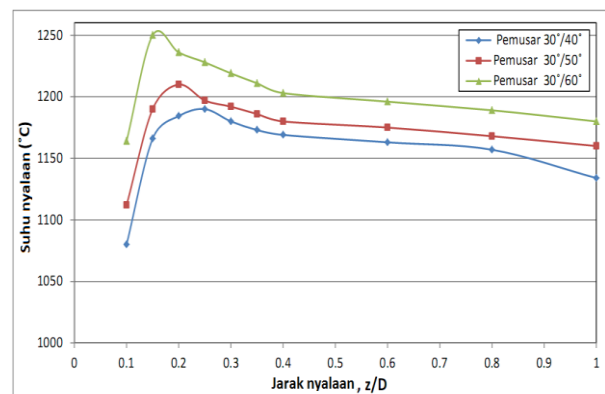
3.1 Susuk Taburan Suhu

Rajah 4 hingga Rajah 6 menunjukkan taburan suhu nyalaan yang terhasil di sepanjang kebuk pembakaran menggunakan pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° masing-masing pada nisbah kesetaraan, $\phi=0.8333$, 1.0 dan 1.1 di mana variasi ini merangkumi keadaan cair bahan api, keadaan stoikiometri dan keadaan kaya bahan api. Sewaktu ujikaji dijalankan, suhu nyalaan diambil di pusat kebuk pembakaran menggunakan kuar pengganding haba mengikut spesifikasi yang ditetapkan oleh BS 1041: Bahagian 4: 1992 [19], ini kerana suhu di pusat mewakili struktur api dalaman semasa proses pembakaran.

1.3.1 Nisbah Kesetaraan, $\phi=0.8333$

Rajah 4 menunjukkan puncak suhu yang terhasil pada nisbah kesetaraan $\phi=0.8333$ menggunakan tiga pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° masing-masing. Berdasarkan rajah ini, didapati terdapat tiga puncak suhu yang berbeza pada jarak yang berbeza, ini menunjukkan berlakunya anjakan puncak suhu pada setiap pemusar dwi aliran yang berbeza. Walau bagaimanapun kadar penghasilan suhu sewaktu pembakaran berbeza mengikut pemusar dwi aliran masing-masing. Selepas suhu puncak, penurunan suhu secara beransur-ansur hingga ke hujung kebuk pembakar dapat dilihat pada setiap pemusar dwi aliran.

Dari Rajah 4 puncak suhu tertinggi dihasilkan menggunakan pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/60° dengan catatan suhu tertinggi ialah 1250°C pada jarak $z/D=0.15$, iaitu jarak paling pendek dari kerongkong pemusar. Puncak kedua tertinggi pula menggunakan pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/50° dengan catatan sedikit penurunan suhu

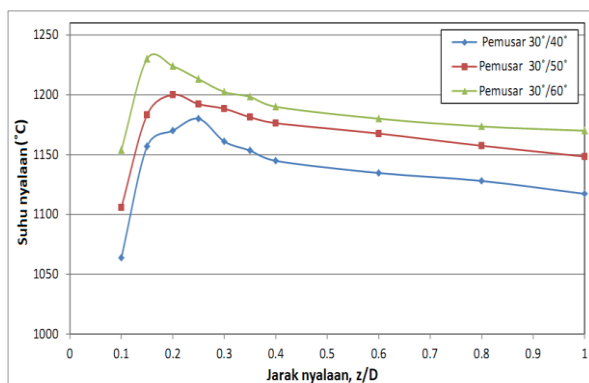


Rajah 4 Susuk suhu nyalaan pada nisbah kesetaraan $\phi=0.8333$

puncak iaitu 1210°C pada jarak $z/D=0.2$ dari kerongkong pemusar. Manakala puncak suhu yang paling rendah dihasilkan menggunakan pemusar dwi aliran bersudut 30°/40° dengan catatan suhu puncak 1190°C pada jarak $z/D=0.25$ ke hilir kerongkong pemusar. Sementara itu peratus peningkatan suhu pada nisbah kesetaraan ini adalah sebanyak 5.04% dan 1.68% dihasilkan oleh pemusar dwi aliran bersudut 30°/60° dan 30°/50°, jika dibandingkan dengan pemusar berganda bersudut 30°/40°.

1.3.2 Nisbah Kesetaraan, $\phi=1.0$

Rajah 5 menunjukkan susuk taburan suhu pada keadaan stoikiometri, $\phi=1.0$ di sepanjang kebuk pembakaran menggunakan tiga pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° masing-masing. Berdasarkan rajah ini, didapati terdapat tiga puncak suhu yang berbeza pada jarak yang berbeza, ini menunjukkan berlakunya anjakan puncak suhu pada setiap pemusar dwi aliran yang berbeza. Walau bagaimanapun kadar penghasilan suhu sewaktu pembakaran berbeza mengikut pemusar dwi aliran masing-masing. Selepas suhu puncak, penurunan suhu secara beransur-ansur hingga ke hujung kebuk pembakar dapat dilihat pada setiap pemusar dwi aliran. Dari rajah ini suhu puncak yang paling tinggi dihasilkan ialah 1230°C menggunakan pemusar dwi aliran bersudut 30°/60° pada jarak $z/D=0.15$. Suhu puncak kedua pula dihasilkan oleh pemusar dwi ganda bersudut 30°/50° dengan catatan suhu puncak ialah 1200°C pada jarak $z/D=0.2$ dari kerongkong pemusar. Sementara itu bagi pemusar dwi aliran bersudut 30°/40°, suhu puncak yang dihasilkan ialah 1180°C pada jarak $z/D=0.25$. Peratusan peningkatan suhu sebanyak 4.24% dan 1.70% dihasilkan dengan menggunakan pemusar dwi aliran bersudut 30°/60° dan 30°/50° berbanding dengan pemusar dwi aliran bersudut 30°/40°.



Rajah 5 Susuk suhu nyalaan pada nisbah kesetaraan $\phi=1.0$

1.3.3 Nisbah Kesetaraan, $\phi=1.1$

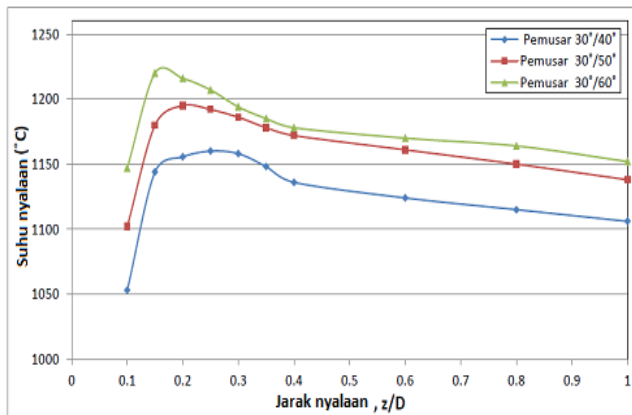
Bagi suhu puncak yang dihasilkan pada keadaan kaya bahan api, $\phi=1.1$ seperti pada Rajah 6 menggunakan

tiga pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° masing-masing. Berdasarkan rajah ini, didapati terdapat tiga puncak suhu yang berbeza pada jarak yang berbeza, ini menunjukkan berlakunya anjakan puncak suhu pada setiap pemusar dwi aliran yang berbeza. Walau bagaimanapun kadar penghasilan suhu sewaktu pembakaran berbeza mengikut pemusar dwi aliran masing-masing. Selepas suhu puncak, penurunan suhu secara beransur-ansur hingga ke hujung kebuk pembakar dapat dilihat pada setiap pemusar dwi aliran. Dari rajah 6 suhu puncak tertinggi ialah 1220°C dihasilkan oleh pemusar dwi aliran bersudut 30°/60° pada jarak $z/D=0.15$. Sementara itu pada jarak $z/D=0.2$, suhu puncak yang dihasilkan oleh pemusar dwi aliran bersudut 30°/50° ialah 1195°C. Manakala pada jarak $z/D=0.25$ iaitu jarak yang paling panjang dihasilkan oleh pemusar dwi aliran bersudut 30°/40°, catatan suhu puncak yang terhasil ialah 1160°C. Bagi peratusan peningkatan suhu pembakaran pada keadaan nisbah kesetaraan ini ialah sebanyak 5.17% dan 3.02%, dihasilkan oleh pemusar dwi aliran bersudut 30°/60° dan 30°/50°, berbanding pemusar dwi aliran bersudut 30°/40°.

Dari pemerhatian ke atas ketiga-tiga rajah didapati terdapat tiga puncak suhu yang berbeza. Ini menunjukkan berlakunya anjakan puncak suhu pada setiap pemusar dwi ganda yang digunakan. Namun kadar penghasilan suhu sewaktu pembakaran berbeza mengikut pemusar dwi aliran masing-masing. Walau bagaimanapun ketiga-tiga rajah menunjukkan selepas suhu puncak, penurunan suhu secara beransur-ansur hingga ke hujung kebuk pembakar dapat dilihat pada setiap pemusar dwi aliran. Ketiga-tiga rajah ini juga menunjukkan zon utama pembakaran berlaku pada jarak $z/D=0.15$, 0.2 dan 0.25 dari kerongkong pemusar dan selepas daripada itu adalah zon pencairan. Corak susuk suhu yang terhasil menggunakan ketiga-tiga jenis pemusar dwi aliran pada ketiga-tiga rajah adalah hampir sama antara satu sama lain dan peningkatan suhu berlaku apabila berlakunya penambahan sudut pada pemusar dwi aliran.

Ketiga-tiga rajah menunjukkan pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/60° memiliki pusaran paling kuat yang dapat memendekkan panjang nyalaan. Manakala pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/40° menghasilkan jarak nyalaan yang paling panjang jika dibandingkan dengan pemusar dwi aliran yang lain. Ini kerana pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/40°, menghasilkan pusaran yang lemah berbanding dengan pemusar dwi aliran yang lain. Perbandingan panjang nyalaan terhadap ketiga-tiga pemusar dwi aliran ini ditunjukkan dalam Rajah 7 hingga 9. Ujikaji menunjukkan nyalaan yang lebih pendek terhasil daripada pusaran yang kuat jika dibandingkan dengan pusaran yang lemah. Berdasarkan ujikaji ini juga pusaran kuat menghasilkan percampuran bahan api dan udara dengan lebih sempurna. Hal ini dapat ditunjukkan melalui perkaitan yang sama mengenai pusaran kuat dan lemah oleh Escott [4]. Menurut beliau, pusaran yang kuat menghasilkan percampuran yang pantas di hadapan nozel serta pada sempadan

kawasan edaran semula dan pada masa yang sama menyebabkan jarak panjang api pembakaran berkurangan.



Rajah 6 Susuk suhu nyalaan pada nisbah kesetaraan $\phi=1.1$

3.2 Susuk Nyalaan

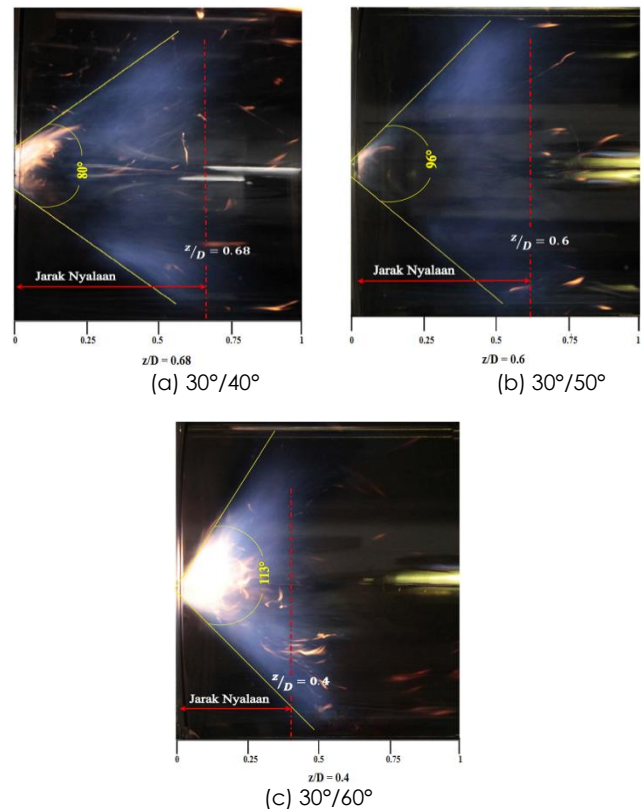
Rajah 7 hingga Rajah 9 menunjukkan susuk nyalaan yang terhasil sewaktu proses pembakaran menggunakan pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° masing-masing pada nisbah kesetaraan, $\phi=0.8333$, 1.0 dan 1.1 di mana variasi ini merangkumi pada keadaan cair bahan api, keadaan stoikiometri dan keadaan kaya bahan api. Kebuk kaca kuarza digunakan bagi melihat pembentukan sudut kon nyalaan sewaktu proses pembakaran berlaku.

2.3.1 Nisbah Kesetaraan, $\phi = 0.8333$

Rajah 7 menunjukkan nyalaan yang dihasilkan dari ujian pembakaran menggunakan pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° masing-masing pada nisbah kesetaraan, $\phi=0.8333$. Berdasarkan pemerhatian ke atas Rajah 7(a) penggunaan pemusar dwi ganda aliran jejarian bersudut 30°/40° menghasilkan sudut kon nyalaan bersudut 80°. Manakala jarak pemanjangan nyalaan yang dihasilkan daripada kerongkong pemusar ke hilir kebuk pembakar ialah $z/D=0.68$. Sementara itu, Rajah 7(b) pula menunjukkan berlakunya peningkatan pada sudut nyalaan, apabila pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/50° digunakan. Sudut nyalaan yang terhasil daripada pemusar dwi aliran jejarian ini ialah 96°. Manakala jarak nyalaan didapati memendek sedikit kepada $z/D=0.6$. Kesan perubahan juga dapat dilihat apabila sudut pemusar dwi aliran jejarian ditingkatkan daripada 30°/50° kepada 30°/60° seperti dalam Rajah 7(c), peningkatan sudut pada pemusar menghasilkan kesan pusanan yang kuat dan pada masa yang sama turut menghasilkan aliran gelera yang lebih baik. Hal ini mendorong kepada penghasilan sudut kon nyalaan yang mengembang lebih besar iaitu sebanyak 113°, manakala jarak nyalaan yang terhasil

daripada kerongkong pemusar ke kebuk pembakaran adalah lebih pendek iaitu $z/D=0.4$. Kesan daripada nyalaan yang pendek menghasilkan suhu pembakaran yang tinggi pada masa mastautin yang singkat [20].

Penghasilan campuran bahan api dan udara yang baik dihasilkan oleh zon edaran semula semasa proses pembakaran berlaku. Di dalam zon ini nyalaan yang stabil terhasil disebabkan ianya dilindungi oleh garisan edaran semula. Penghasilan nyalaan yang stabil amat penting dalam menghasilkan pembakaran yang lengkap. Kewujudan zon edaran semula memberi kesan kepada prestasi pembakaran di mana ianya menghasilkan nyalaan yang pendek bagi mencapai kadar kehilangan haba yang pantas di dalam proses pembakaran yang berterusan.

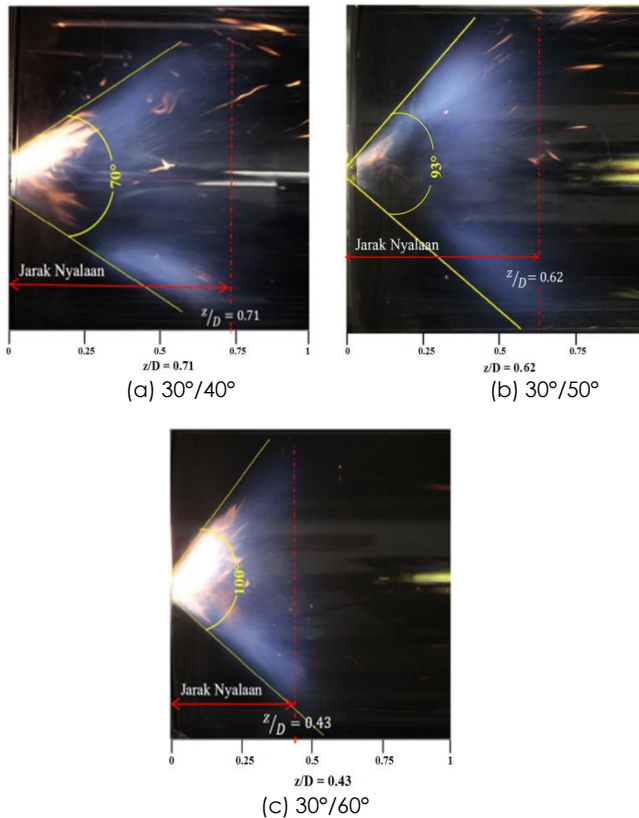


Rajah 7 Jarak nyalaan bagi keadaan cair bahan api, $\phi=0.8333$

2.3.2 Nisbah Kesetaraan, $\phi = 1.0$

Rajah 8 menunjukkan nyalaan yang dihasilkan daripada ujian pembakaran pada nisbah kesetaraan $\phi=1.0$, menggunakan pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° masing-masing. Merujuk kepada Rajah 8 (a), menggunakan pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/40°, didapati sudut kon nyalaan yang kecil dihasilkan dengan sudut 70° manakala jarak pemanjangan nyalaan dari kerongkong pemusar ke hilir kebuk pembakar ialah $z/D=0.71$.

Sementara itu, untuk pemusar dwi aliran jejarian bersudut $30^\circ/50^\circ$, sudut kon nyalaan adalah 93° dan jarak nyalaan ialah $z/D=0.62$ seperti dalam Rajah 8 (b). Manakala sudut kon nyalaan yang paling luas tersebar dan berdiameter lebih besar pada nisbah kesetaraan ini ialah 100° , dengan jarak nyalaan yang paling pendek daripada kerongkong pemusar iaitu $z/D=0.43$, dihasilkan daripada pemusar dwi aliran jejarian bersudut $30^\circ/60^\circ$ (Rajah 8 (c)). Pelebaran sudut kon nyalaan dengan menggunakan pemusar dwi aliran jejarian bersudut $30^\circ/60^\circ$ menunjukkan bahawa proses pembakaran stabil segera berbanding dengan kedua-dua pemusar dwi ganda aliran jejarian bersudut $30^\circ/40^\circ$ dan $30^\circ/50^\circ$.



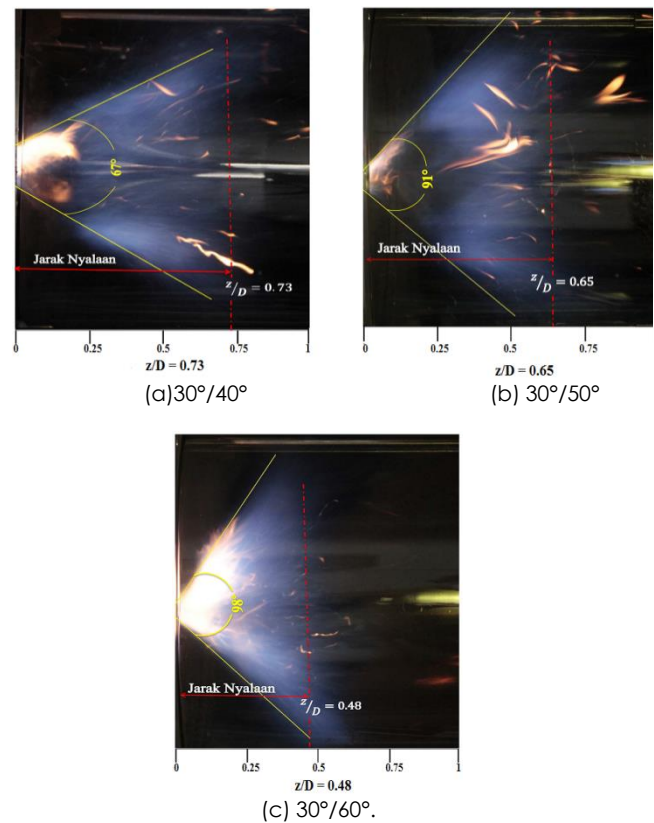
Rajah 8 Jarak nyalaan bagi keadaan stoikiometri, $\phi = 1.0$

2.3.3 Nisbah kesetaraan, $\phi = 1.1$

Rajah 9 pula menunjukkan bentuk nyalaan yang dihasilkan daripada ujian pembakaran pada nisbah kesetaraan, $\phi=1.1$, menggunakan pemusar dwi aliran jejarian bersudut $30^\circ/40^\circ$, $30^\circ/50^\circ$ dan $30^\circ/60^\circ$ masing-masing. Merujuk pada Rajah 9(a), sudut kon nyalaan yang terhasil ialah 67° menggunakan pemusar dwi aliran jejarian bersudut $30^\circ/40^\circ$, manakala jarak pemanjangan nyalaan dari kerongkong pemusar ke hilir kebuk pembakar ialah $z/D=0.73$. Sementara itu Rajah 9(b), menggunakan pemusar dwi aliran jejarian bersudut $30^\circ/50^\circ$, menghasilkan sudut kon nyalaan yang lebih luas daripada pemusar dwi ganda aliran

jejarian bersudut $30^\circ/40^\circ$ dengan sudut kon yang dihasilkan ialah 91° dan jarak nyalaan ialah $z/D=0.6$. Manakala sudut kon nyalaan yang paling luas dihasilkan pada nisbah kesetaraan ini ialah 98° di mana ianya dihasilkan daripada pemusar dwi aliran jejarian bersudut $30^\circ/60^\circ$ (Rajah 9(c)). Jarak nyalaan yang dihasilkan daripada kerongkong pemusar ke hilir kebuk pembakar ialah $z/D=0.48$.

Berdasarkan ketiga-tiga rajah didapati peningkatan terhadap sudut pemusar daripada $30^\circ/40^\circ$ hingga $30^\circ/60^\circ$ yang digunakan menyebabkan pekali pengecutan semakin kecil dan menyebabkan nombor pusingan semakin meningkat. Peningkatan terhadap nombor pusingan ini menghasilkan peningkatan terhadap aliran berpusar sekaligus menyebabkan kawasan edaran semula serta saiz diameternya juga turut bertambah.



Rajah 9 Jarak nyalaan bagi keadaan kaya bahan api, $\phi=1.1$

4.0 KESIMPULAN

Berdasarkan rajah 4, 5 dan 6 tersebut dapatlah disimpulkan bahawa suhu nyalaan di kawasan yang kaya bahan api adalah lebih rendah jika dibandingkan dengan suhu di dalam kawasan cair bahan api. Ini kerana di kawasan tersebut masih terdapat bahan api yang tidak terbakar sepenuhnya, menjadikan suhu di kawasan tersebut lebih rendah kerana percampuran bahan api dan udara adalah dalam keadaan yang

kurang baik. Al-Kabie [7], menyatakan bahawa suhu yang tinggi berlaku pada nisbah kesetaraan cair bahan api yang berhampiran dengan teras nyalaan. Manakala menurut Fricker dan Leukel [21] pula, peningkatan suhu yang seragam dan pada masa yang sama tidak berlaku pepadaman pada nyalaan sepanjang variasi nisbah kesetaraan menunjukkan nyalaan adalah stabil di dalam kebuk pembakaran. Ketiga-tiga rajah menunjukkan pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/60° menghasilkan pembentukan susuk suhu yang paling tinggi pada setiap nisbah kesetaraan.

Manakala bagi perbandingan di antara ketiga-tiga Rajah 7, 8 dan 9, menunjukkan nisbah kesetaraan kaya bahan api pada Rajah 9 menghasilkan sudut kon nyalaan yang lebih kecil daripada nyalaan dalam Rajah 7 dan 8, manakala jarak pemanjangan nyalaan menunjukkan pada nisbah kesetaraan ini jarak nyalaan adalah lebih panjang jika dibandingkan dengan keadaan cair bahan api dan stoikiometri. Ini adalah disebabkan oleh bekalan udara pada keadaan ini kurang jika dibandingkan dengan keadaan cair bahan api di mana terdapat lebih udara dibekalkan sewaktu proses pembakaran.

Merujuk kepada ketiga-tiga rajah, jarak panjang nyalaan yang berbeza berlaku apabila terdapat peningkatan pada sudut pemusar jejarian dwi aliran, hal ini mendorong kepada berlakunya jarak nyalaan yang lebih pendek dan lebih lebar tersebar. Dari ujikaji, didapati pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/60° menghasilkan nyalaan yang paling pendek. Manakala pemusar dwi aliran jejarian bersudut 30°/40° pula menghasilkan jarak nyalaan yang panjang pada setiap nisbah kesetaraan. Ini berlaku disebabkan oleh hasil pencampuran yang baik di antara bahan api dan udara oleh sudut pemusar dwi ganda aliran jejarian yang lebih tinggi.

Pengurangan panjang nyalaan ini diperlukan untuk melengkapkan proses pembakaran dan pada masa yang sama menjana zon edaran semula yang lebih besar, yang melebarkan diameter nyalaan [22]. Berdasarkan kajian yang dijalankan oleh Jaafar dan rakan-rakan [3] menunjukkan bahawa sudut pemusar yang tinggi menghasilkan aliran berpusar yang lebih besar dan zon edaran semula yang lebih besar. Seperti yang dinyatakan, semakin meningkat sudut pemusar jejarian, ianya membantu mengurangkan sudut saiz zon edaran sebagai tangen kepada paksi peningkatan nisbah momentum [23]. Selain itu, peningkatan nisbah kesetaraan, ϕ di mana peningkatan kadar aliran udara pada jumlah kadar aliran bahan api yang tetap, merupakan salah satu faktor mendorong berlakunya pelebaran saiz nyalaan sewaktu pembakaran.

Penghargaan

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia dan Pusat Pengurusan & Penyelidikan kerana menganugerahkan geran penyelidikan bagi menjalankan projek ini (projek

nombor: 01G60). Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia kerana menyediakan kemudahan penyelidikan dan ruang untuk menjalankan kerja-kerja ini.

Rujukan

- [1] Kalt, P. A., Al-Abdell, Y. M., Masri, A. R., dan Barlow, R. S. 2002. Swirling Turbulent Non-Premixed Flames of Methane: Flow Field and Compositional Structure. *Proceedings of the Combustion Institute*. 29(2): 1913-1919.
- [2] Rahim, M. R., dan Jaafar, M. N. M. 2015. Effect of Flame Angle Using Various Swirler Angle in Combustion Performance. *Jurnal Teknologi*. 72(4): 71- 75
- [3] Ahmad, N. T., Jaafar, M., Nazri, M., Jusoff, K., Osman, M. S., dan Ishak, M. S. A. 2011. Combustor Aerodynamic Using Radial Swirler. *International Journal of Physical Sciences*. 6(13): 3091-3098.
- [4] Escott, N. H. 1993. *Ultra Low NOx Gas Turbine Combustion Chamber Design*. Tesis Ph.D, University of Leeds, Department of Fuel and Energy.
- [5] Syred, N., dan Beer, J. M. 1974. Combustion in Swirling Flows: A Review. *Combustion and Flame*. 23(2): 143-201.
- [6] Andrews, G. E., Kowkabi, M., dan Sharif S. F. 1985. Centrifugal Mixing in Gas and Liquid Fuelled Lean Swirled Stabilized Primary Zone. *ASME*. 85-GT-103.
- [7] Alkabie, H. S., Andrews, G. E, dan Ahmad, N. T. 1988. Lean Low NOx Primary Zones Using Radial Swirlers. *ASME paper* 88-GT-245.
- [8] Mestre, A. 1974. *Design of Low NOx Gas Turbine Combustion Chamber*. Tesis Ph.D, University of Leeds, Dept. of Fuel & Energy.
- [9] Bee ´r J. M., dan Chigier, N. A. 1972. *Combustion Aerodynamics*. New York: Halsted Press Division, Wiley.
- [10] Vondal, J., dan Hajek, J. 2012. Swirling Flow Prediction in Model Combustor with Axial Guide Vane Swirler. *Chemical Engineering Transactions*. 29(1): 1069-1074.
- [11] Eldrainy, Y. A., Aly, H. S., Saqr, K. M., Jaafar, M., dan Nazri, M. 2010. A Multiple Inlet Swirler for Gas Turbine Combustors. *International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering*. 2(2): 106-109.
- [12] Lilley, D. G. 2011. Swirling Flows and Lateral Jet Injection for Improved Mixing and Combustion. *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Orlando, Florida. 4-7 January 2011. 1-5.
- [13] Ramadan, O. B. A. 2008. *Design and Evaluation of a Low NOx Natural Gas-Fired Conical Wire-Mesh Duct Burner for a Micro-Cogeneration Unit*. Disertasi Doctoral, Carleton University.
- [14] Khanafer, K., dan Aithal, S. M. 2011. Fluid-Dynamic and NOx Computation in Swirl Burners. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 54(23): 5030-5038.
- [15] Huang, Y., dan Yang, V. 2009. Dynamics and Stability of Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*. 35(4): 293-364.
- [16] Chen, R. H., dan Driscoll, J. F. 1989. The Role of the Recirculation Vortex in Improving Fuel-Air Mixing within Swirling Flames. *In Symposium (International) on Combustion*. 22(1): 531-540.
- [17] Jaafar, M., Nazri, M., dan Ishak, M. S. A. 2012. *Teknik Pembakaran Hijau: Pembakar Berbahan Api Cecair*. Malaysia. UTM Press.
- [18] *A Total Look at Oil Burner Nozzles*. 2000. South Carolina. Delavan Inc.
- [19] British Standards Institution, BS 1041:1992, *Temperature Measurement, Part 4. Guide to the Selection and Used of Thermocouples*.
- [20] Lefebvre, A.H., 1983. *Gas Turbine Combustion*. London. Hemisphere Publishing Corporation.

- [21] Fricker, N., dan Leuckel, W. 1976. Characteristics of Swirl-Stabilized Natural-Gas Flames- 3. Effect of Swirl and Burner Mouth Geometry on Flame Stability. *Journal of the Institute of Fuel*. 49(400): 152-158.
- [22] Morcos, V. H., dan Abdel-Rahim, Y. M. 1999. Parametric Study of Flame Length in Straight and Swirl Light Fuel oil Burners. *Journal of the Institute of Fuel*. 979-985.
- [23] Eldrainy Y. A., Mohd Jaafar M. N., dan Ahmad M. F. 2009. Investigation of Radial Swirler Effect on Flow Pattern Inside Gas Turbine Combustor. *Modern Appl.sci*. 3(5): 21-30.