

## KESAN PEMBAKARAN PADA KEADAAN NISBAH KESETARAAN $\phi=0.8333$ MENGGUNAKAN DWI PEMUSAR ALIRAN JEJARIAN

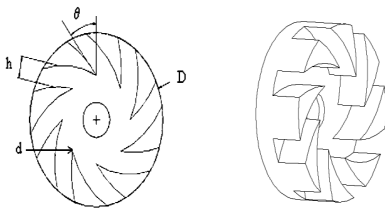
Muhammad Roslan Rahim<sup>a</sup>, Mohammad Nazri Mohd Jaafar<sup>a,b\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Aeronautical, Automotive & Ocean Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Johor Bahru, Johor, Malaysia  
<sup>b</sup>Institute for Vehicle Systems and Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Johor Bahru, Johor, Malaysia

**Article history**  
Received  
27 October 2016  
Received in revised form  
18 December 2016  
Accepted  
10 January 2017

\*Corresponding author  
nazri@fkm.utm.my

### Graphical abstract



### Abstract

Formation of nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>), carbon monoxide (CO) and other emissions is increasing dramatically in the atmosphere. Due to this pressing issue, a study on combustion performance was conducted using a double radial swirler. In this study, a weak swirler with an angle of 30° is set as a primary swirler and strong swirlers each with an angle of 40°, 50° and 60° are set as secondary swirler. Combinations of these swirlers have increased internal recirculation of hot air and help to complete the mixing of fuel and air during combustion. Results show that the combination of 30°/60° swirler produced the best, more stable and shorter flame than the other combinations. Formation of NO<sub>x</sub> from the 30°/60° swirlers at equivalence ratio of 0.8333 is 27.3% lower than that from the combined 30°/40° swirlers. Other emissions such as CO, CO<sub>2</sub> and UHC (Unburned Hydrocarbons) also show a reduction of 12.71%, 10.6% and 5.3%, respectively in the 30°/60° swirlers compared to those from the 30°/40° swirlers.

**Keywords:** Emissions, Double Radial swirler, Combustion, Flame length

### Abstrak

Pembentukan emisi oksida nitrogen (NO<sub>x</sub>), karbon monoksida (CO) dan emisi-emisi lain didapati meningkat secara mendadak di ruang atmosfera sejak akhir-akhir ini. Menyadari isu ini kajian mengenai kaedah pembakaran dengan penggunaan dwi pemusar udara aliran jejarian dijalankan. Dalam kajian ini pemusar udara lemah, bersudut 30° digunakan sebagai pemusar utama dan pemusar udara kuat bersudut 40°, 50° dan 60° masing-masing sebagai pemusar sekunder. Gabungan pemusar ini telah meningkatkan lagi edaran semula dalaman udara panas dan membantu melengkapkan percampuran bahan api dan udara ketika pembakaran. Keputusan menunjukkan gabungan pemusar 30°/60° menghasilkan nyalaan yang paling baik, lebih stabil dan pendek berbanding dengan gabungan lain. Pembentukan emisi NO<sub>x</sub> untuk gabungan pemusar 30°/60° adalah 27.3% lebih rendah berbanding gabungan pemusar 30°/40°. Emisi lain seperti CO, CO<sub>2</sub> dan UHC (Hidrokarbon tak terbakar) turut berkurangan dengan menggunakan gabungan pemusar 30°/60° dengan masing-masing 12.71%, 10.6% dan 5.3% dibandingkan dengan emisi dari pemusar 30°/40°.

**Kata kunci:** Emisi, Pemusar Dwi Ganda, Pembakaran, Panjang nyalaan

© 2017 Penerbit UTM Press. All rights reserved

## 1.0 PENGENALAN

Emisi  $\text{NO}_x$  sebagai bahan pencemar memerlukan perhatian yang khusus kerana ia boleh mendatangkan pelbagai kesan negatif terhadap kesihatan manusia dan alam sekitar. Kesan yang paling ketara daripada pembentukan emisi ini adalah pemanasan global, hujan asid, penipisan lapisan ozon dan asbut fotokimia [1]

Bagi mengatasi masalah ini pengenalan kepada pembangunan pelbagai teknik seperti pra pembakaran, pengubahsuaian pembakaran dan pasca pembakaran diperkenalkan bagi membantu mengurangkan pembentukan emisi pencemar ini. Salah satu kaedah yang sering digunakan ialah kaedah aliran berpusar, kaedah ini digunakan secara meluas dalam aplikasi industri seperti relau dan pembakar turbin gas [2]. Peranan utama aliran berpusar ini adalah untuk mengurangkan jarak nyalaan semasa pembakaran berlaku dengan menghasilkan kadar percampuran bahan api dan udara yang pantas berhampiran bahagian keluar muncung, selain itu ia turut membantu bagi meningkatkan kestabilan nyalaan disebabkan berlaku pembentukan kawasan edaran semula pilin (*torroidal*) di dalam zon pusaran yang kuat [3]. Kawasan edaran semula pilin adalah kawasan di mana haba dan spesies kimia aktif diedarkan semula kepada sumber boleh bakar yang seterusnya serta berupaya mengurangkan halaju yang diperlukan untuk menstabilkan nyalaan [4].

Kebiasaannya aliran berpusar boleh dijana menggunakan pemusar udara tunggal atau dwi pemusar udara. Pemusar udara digunakan untuk membentuk satu aliran tangen dalam proses pembakaran. Berdasarkan kajian oleh Ramadan [5], mendapati percampuran bahan api dan udara yang lebih pantas dapat dihasilkan apabila menggunakan dwi pemusar udara. Selain itu pembakar yang menggunakan dwi pemusar udara juga didapati dapat menghasilkan pembentukan emisi  $\text{NO}_x$  yang lebih rendah. Terasaki dan Hayashi [6] menyatakan, berdasarkan kajian yang dijalankan ke atas pembakar yang menggunakan dwi pemusar udara dan pembakar konvensional, mendapati bahawa kepekatan pembentukan emisi  $\text{NO}_x$  adalah lebih rendah apabila menggunakan pembakar yang menggunakan dwi pemusar udara. Selain itu, hasil daripada nisbah percampuran bahan api dan udara yang seragam juga dapat menghasilkan jarak nyalaan yang lebih singkat berbanding dengan pembakar konvensional. Percampuran udara dan bahan api yang pantas oleh pembakar yang menggunakan dwi pemusar udara turut menghasilkan tempoh masa mastautin yang singkat dan pada masa yang sama pembentukan emisi  $\text{NO}_x$  yang lebih rendah diperolehi.

Bagi penyelidikan ini, tumpuan diberikan kepada teknik pengubahsuaian pembakaran, iaitu dengan membangunkan pembakar rendah  $\text{NO}_x$ . Ini kerana teknik pengubahsuaian pembakaran menggunakan

pembakar rendah  $\text{NO}_x$  adalah sesuai digunakan bagi semua jenis pembakar pegun.

## 2.0 METODOLOGI

### 2.1 Reka Bentuk Pemusar

Kajian sebelum ini menyatakan bahawa keamatan pembakaran, saiz nyalaan, bentuk dan kestabilan nyalaan dipengaruhi oleh tahap pusaran yang dikenakan ke atas aliran udara. Penggunaan aliran berpusar dalam proses pembakaran adalah untuk mempercepatkan percampuran dua aliran yang mempunyai ketumpatan yang berbeza sekali gus meningkatkan kadar tindak balas dalam proses pembakaran. Pada masa yang sama aliran berpusar juga bertindak mengawal dan menstabilkan proses pembakaran bagi meningkatkan pencampuran udara dan bahan api [7]. Hal ini turut dinyatakan dalam kajian oleh Al-Kabie [8], di mana aliran berpusar digunakan untuk menstabilkan serta mengawal nyalaan bagi mencapai keamatan yang tinggi sewaktu proses pembakaran.

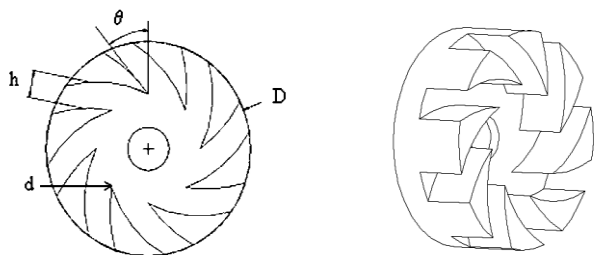
Berdasarkan kajian oleh Sheen dan rakan [9] aliran berpusar diperolehi dengan menggunakan penjana pusaran bagi meningkatkan kestabilan nyalaan di dalam kebuk pembakaran dengan membentuk zon edaran semula pilin. Kajian beliau dan rakan-rakan juga turut menyatakan kesan penggunaan aliran berpusar terhadap nyalaan, di mana ia dapat mengurangkan pembentukan panjang nyalaan.

Menurut kajian beliau dan rakan-rakan juga, kaedah yang digunakan bagi menjana pusaran adalah dengan menggunakan bilah bersudut dalam aliran udara. Aliran pusar adalah aliran udara pada arah tangen sebagai tambahan kepada aliran arah paksi dan jejarian. Komponen halaju bagi aliran pusar dijana melalui tiga kaedah; kaedah pertama ialah aliran kemasukan melalui dua paksi berbeza iaitu aliran paksi dan aliran tangen, kaedah kedua adalah menggunakan bilah pandu yang akan memesongkan aliran dari arah paksi kepada arah jejarian dan kaedah ketiga aliran diputarakan menggunakan peranti mekanikal.

Lefebvre [10], berdasarkan kajiannya menyatakan penggunaan bilah bersudut merupakan kaedah umum dalam menjana aliran berpusar. Aliran berpusar bergantung kepada sudut bilah pemusar udara. Pemusar udara diperlukan untuk memesongkan perjalanan halaju paksi, oleh itu halaju jejarian akan dihasilkan dan ini membentuk satu aliran berpusar dalam zon utama. Pada dasarnya terdapat dua jenis reka bentuk pemusar iaitu; pemusar aliran paksi dan pemusar aliran jejarian. Kebanyakan pembakar lazim menggunakan pemusar dari jenis aliran paksi. Bilah pemusar biasanya rata, tetapi bilah lengkung dapat menghasilkan ciri-ciri aerodinamik yang lebih baik. Menurut Khezzar [11], penggunaan pemusar di dalam pembakar adalah untuk memberikan

pusaran kepada aliran udara dalaman. Manakala dalam kajian yang dijalankan oleh Jaafar dan rakan [12], menyatakan bahawa pemusar digunakan sebagai pemegang nyalaan dengan memusarkan aliran daripada aliran paksi kepada pusaran bergelung sebelum udara masuk ke dalam kebuk pembakar. Kekuatan pusaran udara sewaktu pembakaran adalah sangat penting untuk memegang nyalaan di dalam pembakar [13]. Hasilnya dengan menggunakan pemusar udara, aliran berpusar yang dihasilkan dapat memastikan kestabilan pada nyalaan dan memperbaiki percampuran antara bahan api dan udara, sekali gus meningkatkan kecekapan pembakaran. Pusaran juga memainkan peranan yang penting dalam mencegah hentaman langsung nyalaan terhadap dinding pembakar, oleh hal yang demikian potensi kerosakan pada dinding pembakar dapat dikurangkan [14].

Dari kajian-kajian terdahulu, untuk menghasilkan sebuah pemusar udara terdapat beberapa faktor yang perlu diambil kira dalam mereka bentuk pemusar udara, antaranya ialah seperti bentuk aliran udara yang diperlukan, penentuan tekanan dan kadar kehilangan tekanan daripada penggunaan pemusar udara. Ciri-ciri lain yang perlu diberi perhatian sewaktu mereka bentuk pemusar udara adalah seperti jejari dalaman sebelum memasuki lubang dan ketebalan bilah bergantung kepada reka bentuk dan sudut bilah. Dalam kajian ini, pemusar udara aliran jejarian direka dengan menggunakan keluli lembut (Rajah 1). Ciri-ciri pemusar udara aliran jejarian dalam kajian ini adalah sama sekali menyamai dengan pemusar udara aliran jejarian yang direka bentuk oleh Jaafar dan Ishak [15]. Namun begitu reka bentuk pemusar udara aliran jejarian dalam kajian ini adalah dwi ganda. Semua maklumat mengenai pemusar boleh dirujuk dari Jadual 1.



Rajah 1 Gambar rajah skema pemusar udara aliran jejarian

Jadual 1 memaparkan 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  $L$ . Perhatian perlu diberikan terhadap parameter pemusar dalam mereka bentuk sesebuah pemusar udara aliran jejarian. Ini kerana setiap pengubahsuaian terhadap

parameter pemusar akan memberikan nilai nombor pemusar yang berlainan.

Jadual 1 Maklumat reka bentuk pemusar aliran jejarian

Sudut Pemusar ( $\theta$ )	30°	40°	50°	60°
<b>Parameter</b>				
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

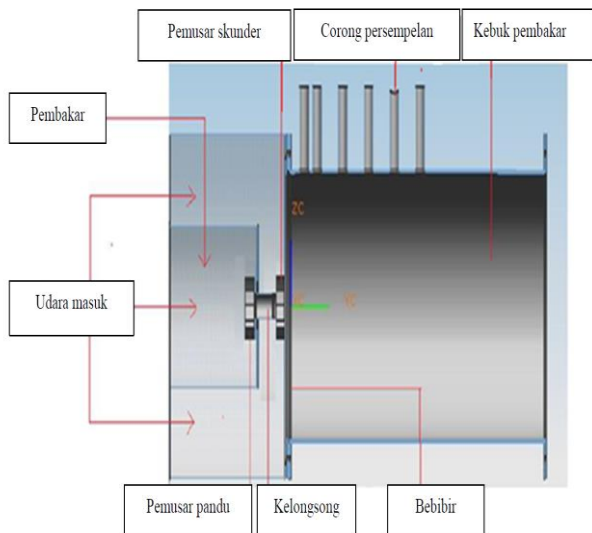
Dalam kajian yang dijalankan ini, kebuk pembakar berskala makmal telah dibangunkan. Panjang kebuk serta diameter luar kebuk ialah 500mm dan 325mm, manakala ketebalan kebuk pembakar ialah 5mm. Reka bentuk kebuk ini adalah bersesuaian dengan muncung bahan api yang digunakan iaitu 1.25 gelen bahan api per jam (GPH) [16]. Kebuk pembakar ini dibina menggunakan keluli tahan karat TYPE 304 dan ia diletakkan secara mendatar di atas troli mudah alih bagi memudahkan kerja pemindahan. Di sepanjang permukaan kebuk pembakar terdapat enam corong pengambilan sampel emisi. Bagi pengambilan suhu nyalaan pula sebatang kuar pengganding haba digunakan bagi mengambil suhu nyalaan di tengah-tengah kebuk pembakaran berdasarkan jarak daripada kerongkong pemusar ke hilir kebuk pembakar. 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 [17]. Dimensi pemasangan corong pengambilan sampel emisi adalah seperti dalam Jadual 2 di bawah.

Jadual 2 Lokasi pemasangan corong pengambilan sampel emisi pada kebuk pembakar

Lokasi	Jarak	*z/D
1	28mm	0.1
2	56mm	0.2
3	112mm	0.4
4	168mm	0.6
5	224mm	0.8
6	280mm	1.0

\*Nisbah panjang kebuk pembakar terhadap diameter kebuk

Rajah 2 menunjukkan gambar rajah skema reka bentuk kebuk pembakar bagi ujikaji susuk suhu dan pembentukan emisi sewaktu pembakaran. Berdasarkan rajah berkenaan dapat dilihat bahawa susunan pemasangan dwi pemusar yang terdiri daripada pemusar pandu atau primer dan pemusar sekunder dipasang pada bebibir yang telah ditebuk lubang berdiameter 50mm sama dengan diameter kerongkong pemusar. Rajah tersebut juga menunjukkan pemusar pandu dengan pemusar sekunder dipisahkan oleh sebuah selongsong bagi menghasilkan dua aliran udara yang dapat memasuki setiap pemusar.



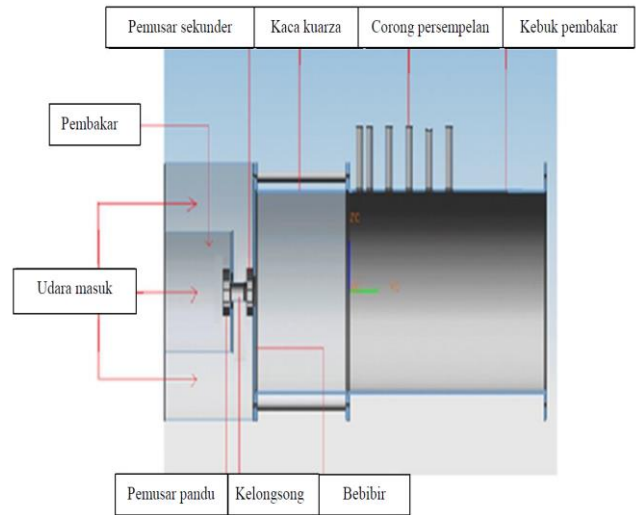
Rajah 2 Gambar rajah skema kebuk pembakar

Sementara itu, Rajah 3 pula menunjukkan gambar rajah skema bagi sebuah kebuk pembakar yang dipasangkan bersama kebuk pembakar kaca kuarza 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.

### 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-tengah kebuk bagi mendapatkan suhu nyalaan sewaktu pembakaran berlaku. Manakala bagi mendapatkan bacaan emisi

kuar persampelan emisi digunakan. Keseluruhan ujikaji diulang menggunakan dwi pemusar 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° pada nisbah kesetaraan,  $\phi = 0.8333$ .



Rajah 3 Gambar rajah skema kebuk pembakar dengan kaca kuarza

## 3.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

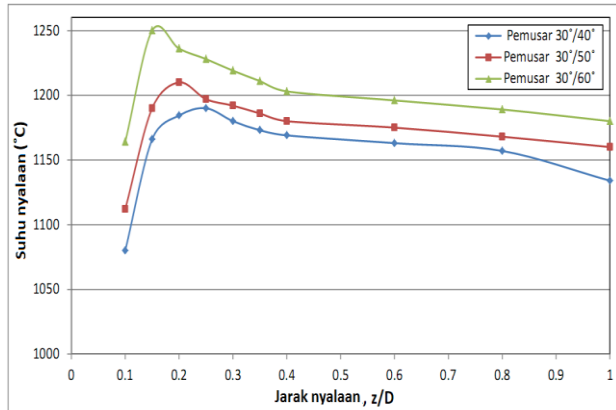
Keputusan ujikaji bagi ujian pembakaran ini tertumpu kepada susuk taburan suhu, jarak serta saiz sudut nyalaan dan pembentukan emisi yang dihasilkan menggunakan variasi pemusar dwi ganda aliran jejarian bersudut 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° pada nisbah kesetaraan  $\phi = 0.8333$

### 3.1 Susuk Taburan Suhu

Rajah 4 menunjukkan pelbagai sudut dwi pemusar aliran jejarian bersudut 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° masing-masing pada nisbah kesetaraan  $\phi=0.8333$ . Berdasarkan rajah tersebut didapati pembentukan susuk taburan suhu nyalaan yang terhasil di sepanjang kebuk pembakaran dengan menggunakan dwi pemusar aliran jejarian bersudut 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° masing-masing. Kuar pengganding haba digunakan untuk mendapatkan nilai bacaan suhu pembakaran berdasarkan spesifikasi yang ditetapkan oleh BS 1041: Bahagian 4: 1992 [17], suhu nyalaan diambil di pusat kebuk pembakaran kerana ianya mewakili struktur api dalaman ketika proses pembakaran.

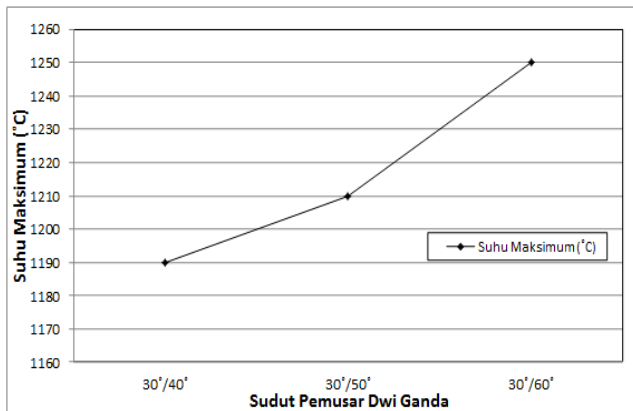
Berdasarkan pemerhatian ke atas Rajah 4, didapati terdapat tiga puncak suhu yang berbeza. Setiap anjakan puncak suhu yang berlaku adalah dipengaruhi oleh variasi sudut dwi pemusar aliran jejarian yang digunakan. Rajah 4 juga menunjukkan penurunan susuk suhu secara beransur-ansur hingga ke hujung kebuk pembakaran selepas suhu puncak berlaku pada setiap variasi dwi pemusar yang digunakan. Dari rajah ini juga didapati 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-ketiga gabungan dwi pemusar adalah hampir menyamai antara satu sama lain.



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

Rajah 5 menunjukkan suhu tertinggi, didapati pada gabungan dwi pemusar bersudut  $30^\circ/60^\circ$  di mana susuk suhu nyalaan didapati 13% lebih tinggi berbanding dwi pemusar bersudut  $30^\circ/40^\circ$ .



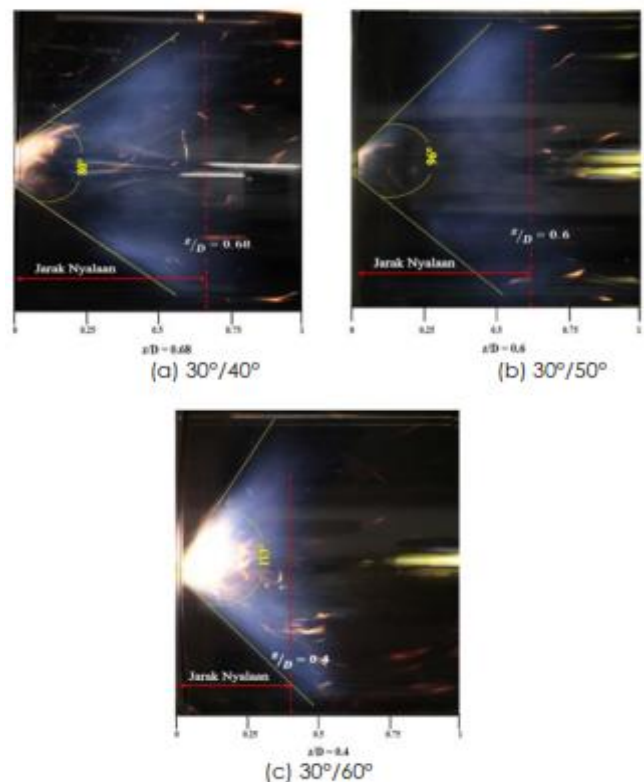
Rajah 5 Susuk suhu maksimum melawan sudut dwi pemusar pada nisbah kesetaraan,  $\phi = 0.8333$

Ini berlaku kerana pemusar sekunder yang bersudut  $60^\circ$  memberikan daya ricih aliran yang tinggi berbanding pemusar lain. Daya ricih ini amat membantu dalam percampuran udara dengan bahan api. Selain itu juga kekuatan daya ricih yang tinggi hasil daripada pusaran pemusar bersudut  $60^\circ$  menarik udara daripada pusaran pemusar bersudut  $30^\circ$  (pemusar pandu/primer) ke dalam zon pusaran sekunder. Bekalan udara ini membantu/menambah bekalan udara ke dalam zon pembakaran dan seterusnya menghasilkan nyalaan yang lebih stabil dan pantas.

Pada nisbah kesetaraan,  $\phi = 0.8333$ , iaitu pada keadaan cair bahan api udara bekalan yang tinggi ditambah dengan percampuran dengan bahan api yang baik, maka nyalaan akan menjadi semakin berkeamatan tinggi dan lebih stabil, keadaan ini selari dengan dapatan Al-Kabie [8] menyatakan bahawa suhu yang tinggi berlaku pada nisbah kesetaraan cair bahan api yang berhampiran dengan teras nyalaan. Manakala menurut Fricker dan Leukel [18] pula, peningkatan suhu yang seragam dan pada masa yang sama tidak berlaku pemataman pada nyalaan sepanjang variasi nisbah kesetaraan menunjukkan nyalaan adalah stabil di dalam kebuk pembakaran.

### 3.2 Jarak Serta Saiz Sudut Nyalaan

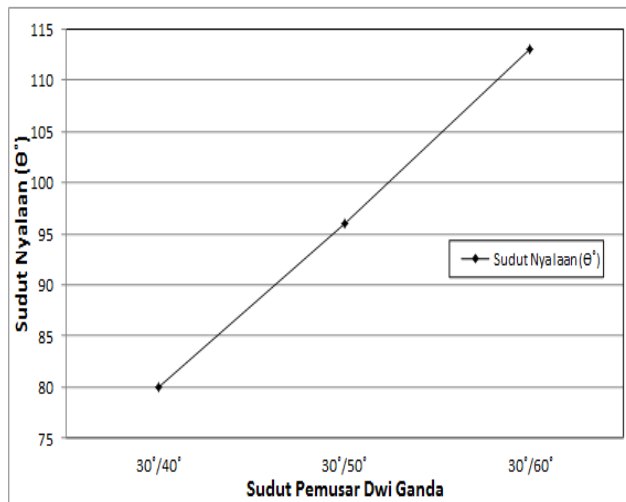
Merujuk kepada ketiga-tiga Rajah 6(a), 6(b) dan 6(c), jarak panjang nyalaan yang berbeza berlaku apabila terdapat peningkatan pada sudut dwi pemusar jejarian, hal ini mendorong kepada berlakunya jarak nyalaan yang lebih pendek dan lebih lebar tersebar. Daripada ujikaji, didapati dwi pemusar aliran jejarian bersudut  $30^\circ/60^\circ$  menghasilkan nyalaan yang paling pendek. Manakala dwi pemusar aliran jejarian bersudut  $30^\circ/40^\circ$  pula menghasilkan jarak nyalaan yang panjang pada nisbah kesetaraan ini. Hal ini berlaku disebabkan oleh hasil pencampuran yang baik di antara bahan api dan udara oleh sudut pemusar dwi ganda aliran jejarian yang lebih tinggi.



Rajah 6 Jarak nyalaan bagi keadaan cair bahan api,  $\phi = 0.8333$

Dari dapatan ini, didapati semakin tinggi kekuatan pusaran, daya ricih yang dihasilkan akan lebih membantu percampuran nyalaan, berdasarkan ujikaji yang dijalankan nyalaan didapati pada sudut bukaan yang besar pada pemusar sekunder bersudut  $60^\circ$  berbanding pemusar bersudut  $50^\circ$  dan  $40^\circ$ . Pembakaran turut didapati berlaku dengan lebih pantas kerana nyalaan lebih pendek dan berdiameter besar. Ini selari dengan perkaitan mengenai pusaran kuat dan lemah yang diperolehi dari kajian Escott [19]. Menurut beliau, pusaran yang kuat menghasilkan percampuran yang pantas di hadapan muncung serta pada sempadan kawasan edaran semula dan pada masa yang sama menyebabkan jarak panjang api pembakaran berkurangan.

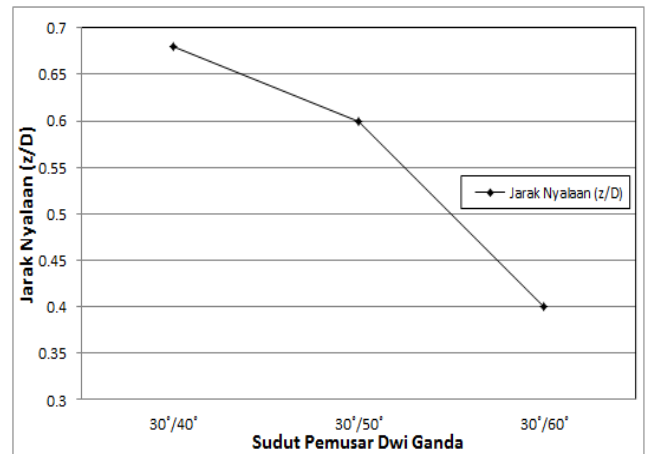
Rajah 7 dan Rajah 8 menunjukkan bukaan sudut nyalaan serta pemanjangan jarak nyalaan yang berlaku pada ketiga-tiga dwi pemusar aliran jejarian pada nisbah kesetaraan,  $\phi = 0.8333$ . Berdasarkan kedua-dua rajah tersebut didapati sudut bukaan nyalaan semakin melebar serta jarak nyalaan didapati semakin pendek apabila menggunakan dwi pemusar bersudut  $30^\circ/60^\circ$ .



**Rajah 7** Sudut nyalaan melawan sudut dwi pemusar pada nisbah kesetaraan,  $\phi = 0.8333$

Pengurangan panjang nyalaan ini berguna untuk melengkapkan proses pembakaran dan pada masa yang sama menjana zon edaran semula yang lebih besar, yang melebarkan diameter nyalaan [20]. Berdasarkan kajian yang dijalankan oleh Jaafar dan rakan-rakan [12] menunjukkan bahawa sudut pemusar yang tinggi menghasilkan aliran berpusar yang lebih besar dan zon edaran semula yang lebih besar. Rahim dan Jaafar [21] dalam kajian mereka turut menyatakan peningkatan sudut bilah pemusar, menghasilkan pusaran yang kuat serta pada masa yang sama melebarkan diameter sudut nyalaan dan memendekkan jarak nyalaan. Seperti yang dinyatakan, semakin meningkat sudut pemusar

jejarian, ia membantu mengurangkan sudut saiz zon edaran sebagai tangen kepada paksi peningkatan nisbah momentum [22].

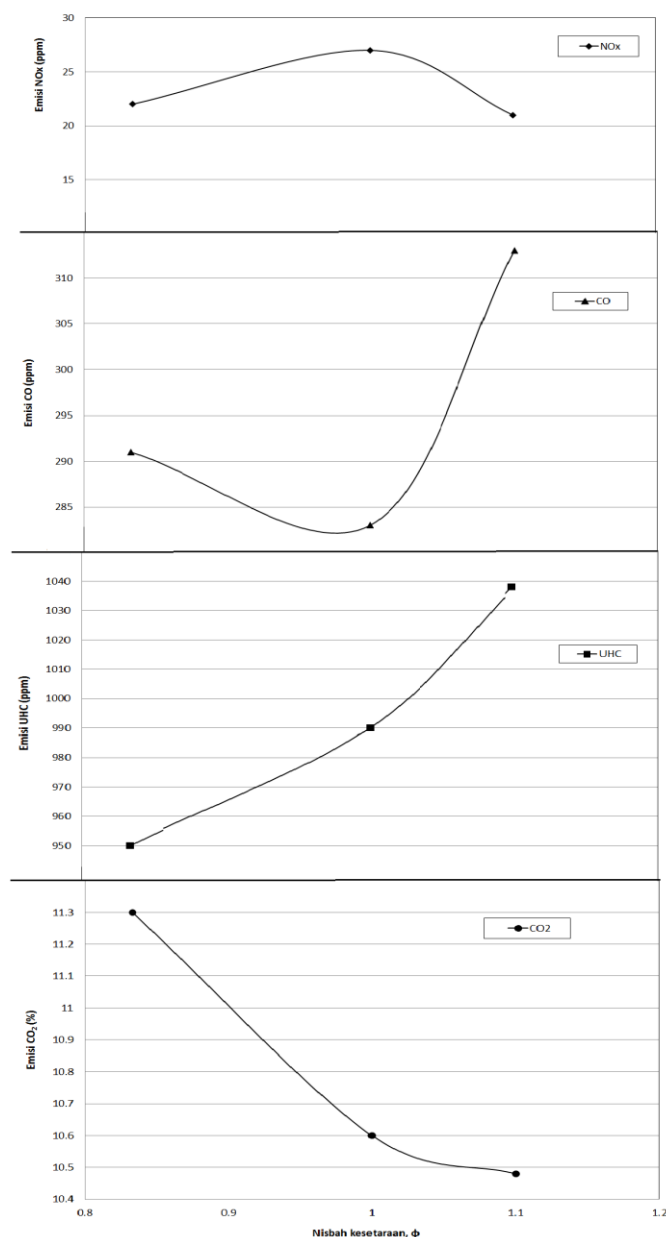


**Rajah 8** Jarak nyalaan melawan sudut dwi pemusar pada nisbah kesetaraan,  $\phi = 0.8333$

### 3.3 Susuk Emisi Melawan Sudut Dwi Pemusar

Rajah 9, menunjukkan dwi pemusar, tiga sudut berbeza dilakarkan dalam satu graf emisi melawan  $\text{NO}_x$ , CO, UHC dan  $\text{CO}_2$  bagi melihat pembentukan emisi pada nisbah kesetaraan,  $\phi = 0.8333$ . Plot ini dibuat pada jarak  $z/D = 0.8$  dari kerongkong pemusar ke hilir kebuk pembakar. Dari graf ini didapati secara keseluruhannya emisi yang terhasil menurun dengan pertambahan sudut bilah pemusar dwi ganda daripada  $30^\circ/40^\circ$  kepada  $30^\circ/60^\circ$ . Dari graf emisi ini didapati emisi  $\text{NO}_x$  mengalami penurunan sebanyak 27.3% apabila sudut dwi pemusar ditingkatkan dari  $30^\circ/40^\circ$  ke  $30^\circ/60^\circ$ . Keadaan ini menunjukkan gabungan sudut pemusar  $30^\circ/60^\circ$  menghasilkan penurunan yang terbaik untuk emisi  $\text{NO}_x$ . Emisi CO juga memperlihatkan penurunan, di mana dengan penggunaan dwi pemusar bersudut  $30^\circ/60^\circ$ , emisi CO menurun sebanyak 12.71% apabila sudut dwi pemusar ditingkatkan dari  $30^\circ/40^\circ$  ke  $30^\circ/60^\circ$ .

Emisi UHC menurun dengan peningkatan sudut bilah dwi pemusar. Pada sudut bilah dwi pemusar  $30^\circ/60^\circ$ , emisi UHC menurun sebanyak 5.3% apabila sudut bilah dwi pemusar ditingkatkan dari  $30^\circ/40^\circ$  ke  $30^\circ/60^\circ$ . Keadaan ini menunjukkan semakin tinggi sudut bilah pusaran maka percampuran bahan api-udara bertambah baik dan pembakaran menjadi semakin lengkap. Manakala bagi pembentukan emisi  $\text{CO}_2$  pula, turut menunjukkan penurunan sebanyak 10.6% apabila menggunakan dwi pemusar bersudut  $30^\circ/60^\circ$  berbanding  $30^\circ/40^\circ$ .



Rajah 9 Susuk emisi melawan sudut dwi pemusar pada keadaan nisbah kesetaraan,  $\phi = 0.8333$  pada jarak  $z/D = 0.8$

Dari keputusan ini didapati emisi NO<sub>x</sub> bergantung kepada kekuatan pusaran. Semakin tinggi nilai kekuatan nombor pusaran, daya ricih aliran semakin besar dan meningkatkan lagi keupayaan pencampuran bahan api dengan udara. Maka pencampuran yang baik akan meningkatkan kecekapan pembakaran, nyalaan berlaku dalam tempoh masa yang singkat dan merendahkan pembentukan emisi NO<sub>x</sub>.

#### 4.0 KESIMPULAN

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.

Selain meningkatkan kestabilan kepada nyalaan di dalam rantau pusaran yang kuat disebabkan oleh pembentukan zon edaran semula pilin (*toroidal*), zon edaran semula menghasilkan nyalaan yang jelas dalam mencegah daripada berlakunya kesan radiasi ke atas dinding kebuk pembakar disebabkan oleh peredaran haba [10, 7]

Berdasarkan ujian ini pada keadaan nisbah kesetaraan  $\phi = 0.8333$ , didapati terdapat lebih udara dibekalkan sewaktu proses pembakaran berlaku. Dari ujian ini juga didapati dengan menggunakan pemusar dwi ganda aliran jejarian bersudut 30°/60°, menunjukkan berlakunya pelebaran sudut nyalaan yang lebar dan luas serta pada masa yang sama memendekkan jarak nyalaan.

Hasil daripada pencampuran bahan api yang baik, tempoh masa mastautin yang singkat dan suhu nyalaan yang baik dengan menggunakan pemusar dwi ganda aliran jejarian bersudut 30°/60°, didapati pembentukan emisi pencemar yang dihasilkan sewaktu pembakaran dapat dikurangkan.

#### Penghargaan

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia dan Pusat Pengurusan & Penyelidikan Universiti Teknologi Malaysia (projek nombor: 01G60) kerana menganugerahkan geran penyelidikan bagi menjalankan projek ini. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia kerana menyediakan kemudahan penyelidikan dan ruang untuk menjalankan kajian ini

#### Rujukan

- [1] Beér, J. M. 2000. Combustion Technology Developments In Power Generation In Response To Environmental Challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*. 26(4): 301-327.
- [2] Rahim, M. R., Jaafar, M. N. M. 2015. Kesan Sudut Pusaran Terhadap Pembakaran Menggunakan Pemusar Dwi Aliran. *Jurnal Teknologi*. 77(8): 37-45.
- [3] Mohammad Nazri, M. J., & Rahim, M. R. 2014. Effect Of Flame On Various Swirler Angle In Combustion Performance. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*. 8(7): 57-61.
- [4] Syred, N., & Beer, J. M. 1974. Combustion In Swirling Flows: A Review. *Combustion And Flame*. 23(2): 143-201.

- [5] Ramadan, O. B. A. 2008. Design and Evaluation of a Low NO<sub>x</sub> Natural Gas-Fired Conical Wire-Mesh Duct Burner for a Micro-Cogeneration Unit. Doctoral dissertation. Carleton University.
- [6] Terasaki, T., & Hayashi, S. 1996, December. The Effects Of Fuel-Air Mixing On NO<sub>x</sub> Formation In Non-Premixed Swirl Burners. *Symposium (International) on Combustion*. Elsevier. 26(2): 2733-2739.
- [7] Beér, J. M., & Chigier, N. A. 1972. *Combustion Aerodynamics*. New York.
- [8] Al-Kabie, H. S. 1989, Radial Swirlers For Low Emissions Gas Turbine Combustion. University Of Leeds, Dept. of Fuel & Energy, PhD.
- [9] Sheen, H. J., W. J. Chen, S. Y. Jeng, T. L. Huang. 1996. Correlation of Swirl Number for Radial-Type Swirl Generator. Institute of Applied Mechanics, National Taiwan University. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Elsevier Science Inc. 12: 444-451.
- [10] Lefebvre, A. H. 1983. *Gas Turbine Combustion*. Hemisphere Publishing Corporation.
- [11] Khezzar, L. 1998. Velocity Measurement in the Near Field of a Radial Swirler. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Elsevier Science Inc. 16: 230-236.
- [12] Jaafar, M., Nazri, M., Jusoff, K., Osman, M. S., & Ishak, M. S. A. 2011. Combustor Aerodynamic Using Radial Swirler. *International Journal of Physical Sciences*. 6(13): 3091-3098.
- [13] Tomohiko Furuhata, Shunsuke Amano, Kousaku Yotoriyama, Masataka Arai. 2007. Development of Can-Type Low NO<sub>x</sub> Combustor for Micro Gas Turbine (Fundamental Characteristics in a Primary Combustion Zone with Upward Swirl). *ScienceDirect, Fuel*. Elsevier Ltd. 86(2007): 2463-2474.
- [14] Khanafer, K., & Aithal, S. M. 2011. Fluid-dynamic and NO<sub>x</sub> Computation In Swirl Burners. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 54(23): 5030-5038.
- [15] Jaafar, M. N. M., & Ishak, M. S. A. 2012. *Teknik Pembakaran Hijau: Pembakar Berbahan Api Cecair*. Penerbit UTM Press.
- [16] Delavan. 2000. *A Total Look at Oil Burner Nozzles*. Delavan Spray Technologies: Fuel Metering Production Operation, South Carolina.
- [17] British Standards Institution, BS 1041:1992. Temperature Measurement. Part 4. Guide to the Selection and Used of Thermocouples.
- [18] Fricker, N., & 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.
- [19] Escott, N. H. 1993. Ultra Low NO<sub>x</sub> Gas Turbine Combustion Chamber Design. University of Leeds, Department of Fuel and Energy, PhD.
- [20] Morcos, V. H., & 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.
- [21] Rahim, M. R., & Jaafar, M. N. M. 2015. Effect of Flame Angle Using Various Swirler Angle in Combustion Performance. *Jurnal Teknologi*. 72(4): 71-75.
- [22] Eldrainy, Y. A., bin Ahmad, M. F., & Jaafar, M. N. M. 2009. Investigation Of Radial Swirler Effect On Flow Pattern Inside A Gas Turbine Combustor. *Modern Applied Science*. 3(5): 21.