

KESAN SUDUT PUSARAN TERHADAP PEMBENTUKAN EMISI MENGGUNAKAN DWI PEMUSAR UDARA ALIRAN JEJARIAN

Article history

Received
27 October 2016
Received in revised form
7 December 2016
Accepted
10 January 2017

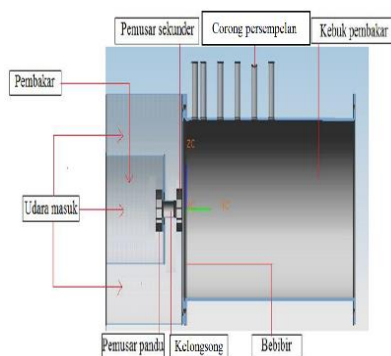
Muhammad Roslan Rahim^a, Mohammad Nazri Mohd Jaafar^{a,b*}

^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

*Corresponding author
nazri@fkm.utm.my

Graphical abstract



Abstract

Combustion of liquid fuel sprays produces NO_x , CO and other emissions that have an adverse impact on the environment and humans. This study is conducted to produce low-emission combustion with the use of double radial swirler. Swirling flow burning will enhance the mixing of fuel and air to produce a flame that is more stable and efficient. In this study, 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 the secondary swirler. Combinations of these swirlers helped the mixing of fuel and air during combustion. The results show, the combination of swirlers $30^\circ/60^\circ$ produced the highest temperature profile, the best flames, more stable and shorter than other combinations. NO_x emissions for the combination of swirlers $30^\circ/60^\circ$ at stoichiometric are 15.6% lower than the combinations of swirlers $30^\circ/40^\circ$. Other emissions such as CO, also shows 8.4% of reduction in the combination of swirlers $30^\circ/60^\circ$. These results indicated that double swirlers helped in reducing emissions during combustion and also producing an environmentally friendly combustion system.

Keywords: Double Radial Swirler, Mixing, Emissions

Abstrak

Pembakaran semburan bahan api cecair menghasilkan NO_x , CO dan emisi lain yang mendatangkan kesan buruk kepada alam sekitar dan manusia. Kajian ini dijalankan untuk menganalisis hasil emisi pembakaran dengan penggunaan pemusar udara aliran jejarian dwi ganda. Pembakaran berpusingan membantu meningkatkan percampuran bahan api dan udara bagi menghasilkan nyalaan yang lebih stabil dan cekap. Dalam kajian ini, pemusar udara lemah, bersudut 30° dijadikan pemusar utama dan pemusar udara kuat bersudut 40° , 50° dan 60° masing-masing dijadikan sebagai pemusar sekunder. Gabungan pemusar ini bertindak membantu percampuran bahan api dan udara untuk pembakaran sempurna. Keputusan menunjukkan gabungan pemusar $30^\circ/60^\circ$ menghasilkan susuk suhu yang tinggi, nyalaan yang paling baik, lebih stabil dan pendek berbanding dengan gabungan lain. Pembentukan emisi NO_x untuk gabungan pemusar $30^\circ/60^\circ$ pada keadaan stoikiometri adalah 15.6% lebih rendah berbanding gabungan pemusar $30^\circ/40^\circ$. Sementara itu emisi CO menunjukkan pengurangan untuk gabungan pemusar $30^\circ/60^\circ$ sebanyak 8.4%. Keputusan ini menunjukkan pemusar dwi ganda membantu mengurangkan pembentukan emisi sewaktu pembakaran dan menghasilkan satu sistem pembakaran yang mesra alam.

Kata kunci: Pemusar Dwi Ganda, Percampuran, Emisi

© 2017 Penerbit UTM Press. All rights reserved

1.0 PENGENALAN

Pembentukan emisi nitrogen oksida (NO_x) dan emisi karbon monoksida (CO) ke ruang atmosfera telah meningkat secara mendadak sejak akhir-akhir ini. Kesannya adalah terhadap masalah alam sekitar yang menyumbang kepada implikasi negatif terutama dari sudut kesihatan manusia dan ekologi hidupan [1]. Faktor utama yang menyumbang kepada peningkatan pelepasan emisi ini ialah dari aktiviti pembakaran bahan api fosil dan bahan bakar biojisim yang terhasil kesan daripada aktiviti-aktiviti perindustrian dan juga daripada peningkatan lalu lintas trafik jalan raya di peringkat global. Menurut kajian yang dijalankan oleh Sperling dan Gordon [2], bilangan kenderaan di jalan raya akan mencapai sekurang-kurangnya dua bilion unit di peringkat global menjelang tahun 2035, dan jumlah ini akan terus meningkat dari semasa ke semasa. Sebagai perbandingan, anggaran bilangan kenderaan jalan raya pada tahun 2010 adalah kira-kira satu bilion unit. Oleh kerana peningkatan bilangan kenderaan agak drastik di peringkat global, maka jumlah pelepasan emisi NO_x dan pelepasan emisi CO pada masa itu secara logiknya akan meningkat dengan ketara.

Selain daripada itu, satu lagi punca utama kepada peningkatan pelepasan emisi NO_x dalam atmosfera ialah berlakunya revolusi perindustrian. Berdasarkan kajian oleh Bowman [3], penjanaan elektrik, pengangkutan, aktiviti perindustrian dan pembakaran adalah sumber utama kepada pembentukan emisi NO_x . Antara semua jenis emisi NO_x , emisi NO amat penting kerana kira-kira 90% daripada emisi NO_x yang dihasilkan dalam proses pembakaran adalah dalam bentuk NO . Selepas itu, emisi NO_2 dihasilkan apabila emisi NO bertindak balas dengan gas oksigen (O_2) di dalam atmosfera. Oleh kerana itu, kebanyakan daripada usaha untuk mengurangkan pelepasan emisi NO_x dalam atmosfera adalah lebih tertumpu kepada pengurangan pelepasan emisi NO daripada proses pembakaran.

Pembangunan dan juga reka bentuk sesebuah pembakar yang cekap dengan prestasi pembakaran yang baik serta menghasilkan pembentukan emisi yang minimum adalah menjadi fokus utama kajian ini.

Kajian ini juga turut memberi penekanan kepada reka bentuk kebulu pembakar yang sesuai dengan keperluan ujikaji. Ini kerana faktor pencampuran bahan api yang baik serta corak aliran di sepanjang kebulu pembakar dapat dicapai dengan peningkatan panjang kebulu pembakar serta pada tekanan yang rendah. Namun tumpuan yang lebih diberikan terhadap reka bentuk pemusar udara aliran jejarian, ini kerana penggunaan pemusar yang sesuai dapat membantu proses pencampuran bahan api dan udara supaya menjadi lebih baik dalam mengatasi masalah pembentukan emisi sewaktu pembakaran, selain dapat meningkatkan prestasi pembakaran.

2.0 METODOLOGI

2.1 Reka Bentuk Pemusar

Secara umumnya penggunaan aliran berpusar secara meluas dalam industri relau dan kebulu pembakar adalah untuk meningkatkan kestabilan api nyalaan, mengawal pembentukan nyalaan serta keamanan pembakaran. Namun kesan utama penggunaan aliran berpusar adalah untuk meningkatkan kestabilan nyalaan yang dihasilkan oleh zon edaran semula pilin (*torroidal*) di dalam kawasan pusaran yang kuat, aliran berpusar juga bertindak sebagai halangan aerodinamik supaya pembentukan nyalaan yang tidak lengkap sewaktu pembakaran dalam kebulu pembakar dapat diatasi dengan penghasilan nyalaan yang sempurna. Ini akan memudahkan kerja-kerja penyelenggaraan dan memanjangkan jangka hayat pembakar, selain itu penghasilan aliran berpusar juga dapat mengurangkan panjang api pembakaran dengan menghasilkan kadar iringan bagi bendalir persekitaran yang tinggi serta pencampuran yang pantas berhampiran bahagian keluar muncung dan sempadan kawasan edaran semula.

Menurut Beér dan Chigier [4] aliran berpusar merupakan aliran di mana zarah 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. Vodal dan Hajek [5], menyatakan bahawa kegunaan aliran berpusar dalam peranti pembakaran adalah bertujuan untuk mengawal kestabilan, keamanan, saiz dan bentuk nyalaan. Hal ini turut dinyatakan oleh Eldrainy dan rakan [6], di mana menurut kajian yang dijalankan menyatakan kaedah aliran berpusar dapat menstabilkan nyalaan dalam pembakar turbin gas.

Berdasarkan kajian oleh Sheen dan rakan, [7] aliran berpusar diperoleh dengan menggunakan penjana pusaran bagi meningkatkan kestabilan nyalaan di dalam kebulu 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 panjang nyalaan.

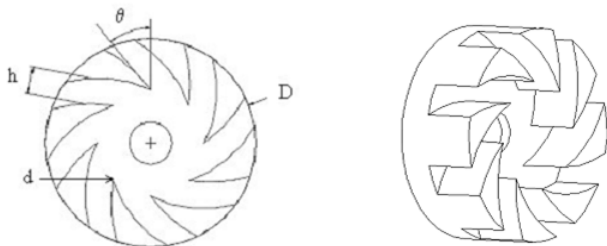
Menurut kajian beliau dan rakan-rakan juga, kaedah yang digunakan bagi menjana pusaran adalah dengan menggunakan bilah bersudut dalam aliran udara. Aliran pusar adalah aliran udara pada arah tangen sebagai tambahan kepada aliran arah paksi dan jejarian. Komponen halaju bagi aliran pusar dijana melalui 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 [8], dari kajiannya menyatakan bahawa 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 konvensional menggunakan pemusar dari jenis aliran paksi. Bilah pemusar biasanya rata, tetapi bilah lengkung dapat menghasilkan ciri-ciri aerodinamik yang lebih baik. Menurut Khezzer [9], penggunaan pemusar di dalam pembakar adalah untuk memberikan pusaran kepada aliran udara dalaman. Manakala dalam kajian yang dijalankan oleh Jaafar dan rakan [10], 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 [11]. 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 [12].

Pemusar udara digunakan secara meluas pada pembakar berbentuk tiub dan anulus. Pemusar dari jenis ini sering dipasang sebagai pemusar tunggal atau sebagai pemusar ganda. Bagi pemusar ganda ianya dipasang sepusat dan tersusun untuk membekalkan aliran udara sama ada berpusar pada sama arah atau melawan arah [13].

Berdasarkan kajian ini, pemusar udara aliran jejarian direka menggunakan keluli lembut (Rajah 1), namun begitu reka bentuk pemusar udara aliran jejarian dalam kajian ini adalah jenis dwi ganda, ciri-ciri pemusar udara aliran jejarian dalam kajian ini adalah menyamai dengan pemusar udara aliran jejarian yang direka bentuk oleh Jaafar dan Ishak [14]. Maklumat mengenai pemusar terkini boleh dirujuk dalam Jadual 1.



Rajah 1 Gambar rajah skema pemusar udara aliran jejarian

Jadual 1 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 Maklumat reka bentuk pemusar aliran jejarian

Sudut Pemusar (θ)	30°	40°	50°	60°
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	

Jadual 2 menunjukkan perbandingan pemusar udara aliran jejarian yang dibangunkan oleh penyelidik terdahulu.

Jadual 2 Perbandingan reka bentuk pemusar penyelidik terdahulu

Rekabentuk pemusar jejarian	Al-Kabie [15]	Escott [16]	Jaafar and Ishak [14]
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

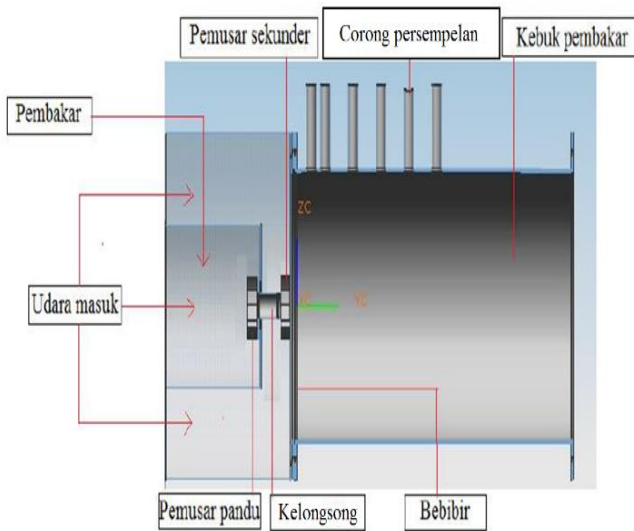
Menurut Ramadan [17] pula, percampuran bahan api dan udara yang lebih pantas dapat dihasilkan menggunakan pemusar udara berganda serta pada masa yang sama dapat meningkatkan kehomogenan campuran. Selain itu, bagi susuk nyalaan hasil daripada nisbah percampuran bahan api dan udara yang seragam juga dapat diperoleh dalam jarak yang lebih singkat berbanding dengan pembakar lazim. Manakala kepekatan bahan api pula menunjukkan bahawa rantau yang kaya bahan api adalah lebih kecil dengan menggunakan pembakar pemusar udara berganda. Percampuran udara dan bahan api yang pantas oleh pembakar yang menggunakan pemusar udara berganda turut menghasilkan tempoh masa mastautin yang singkat dan pada masa yang sama dapat meningkatkan suhu pembakaran.

2.2 Kaedah Ujikaji

Kaedah ujikaji untuk ujian pembakaran ditunjukkan dalam Rajah 2. Rajah skema ini menunjukkan sebuah pembakar rendah NO_x terdiri daripada dwi pemusar udara aliran jejarian dan pembakar di mana proses percampuran udara dan bahan api berlaku ketika proses pembakaran.

Kajian yang dijalankan ini menggunakan kebuk pembakar berskala makmal. Panjang kebuk ialah 500mm manakala diameter luar kebuk ialah 325mm, ketebalan dinding kebuk pembakar pula ialah 5mm. Reka bentuk kebuk ini adalah bersesuaian dengan muncung bahan api yang digunakan iaitu 1.25 gelen bahan api per jam (GPH) [18].

Kuar pengganding haba yang digunakan bagi ujikaji ini adalah dari 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].



Rajah 2 Gambar rajah skema kebuk pembakar

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 dan penghembus udara. Dalam ujian pembakaran ini, bahan api diesel digunakan dan disimpan di dalam tangki. Bahan api kemudian dialirkan ke dalam 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.

2.3 Langkah Kerja

Penganalisis gas dihidupkan 30 minit awal sehingga stabil, selepas itu pembakar berbahan api cecair dihidupkan. 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 kepekatan gas emisi, penganalisis gas dimasukkan ke dalam corong persempelan. Keseluruhan ujikaji diulang menggunakan dwi pemusar $30^\circ/40^\circ, 30^\circ/50^\circ$ dan $30^\circ/60^\circ$ serta nisbah kesetaraan, $\Phi = 0.8333, 1.0$ dan 1.1 .

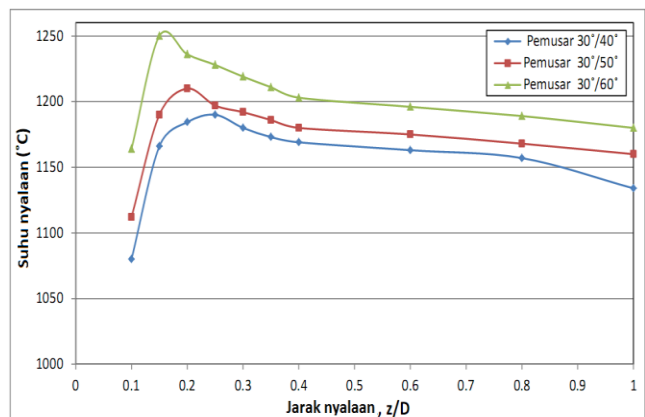
3.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Keputusan ujikaji bagi ujian pembakaran ini tertumpu kepada susuk taburan suhu dan pembentukan emisi CO dan NO_x dengan menggunakan dwi pemusar dan nisbah kesetaraan yang berbeza.

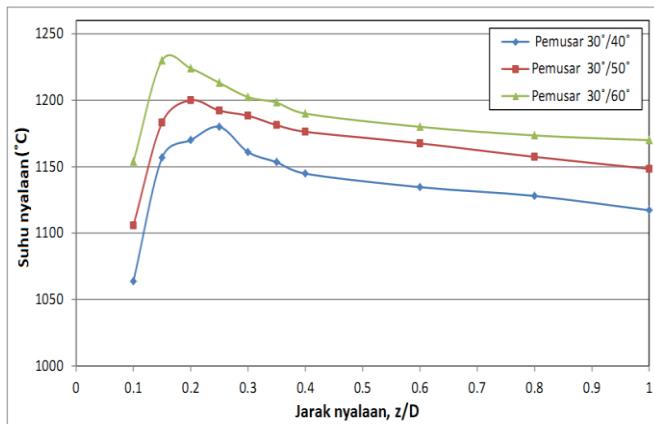
3.1 Susuk Taburan Suhu

Rajah 3 hingga Rajah 5 menunjukkan taburan suhu nyalaan di sepanjang kebuk pembakaran menggunakan dwi pemusar udara aliran jejarian bersudut $30^\circ/40^\circ, 30^\circ/50^\circ$ dan $30^\circ/60^\circ$ masing-masing pada nisbah kesetaraan, $\Phi = 0.8333, 1.0$ dan 1.1 . Variasi ini merangkumi keadaan cair bahan api, keadaan stoikiometri dan keadaan kaya bahan api.

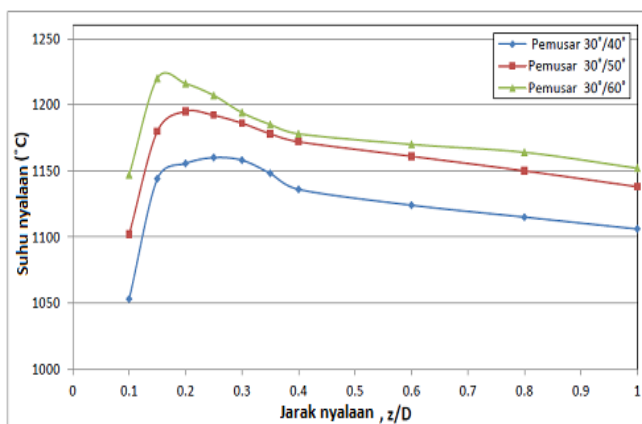
Sewaktu ujikaji dijalankan, suhu nyalaan diambil di pusat kebuk pembakaran menggunakan kuar pengganding haba mengikut spesifikasi yang ditetapkan oleh BS 1041: Bahagian 4: 1992 [19], ini kerana suhu di pusat mewakili struktur api dalam semasa proses pembakaran berlaku.



Rajah 3 Susuk suhu nyalaan pada nisbah kesetaraan $\Phi = 0.8333$



Rajah 4 Susuk suhu nyalaan pada nisbah kesetaraan $\Phi = 1.0$



Rajah 5 Susuk suhu nyalaan pada nisbah kesetaraan $\Phi = 1.1$

Berdasarkan pemerhatian ke atas ketiga-tiga rajah didapati terdapat tiga puncak suhu yang berbeza. Dari pemerhatian, didapati berlakunya anjakan terhadap puncak suhu pada setiap dwi pemusar yang digunakan. Namun terdapat perbezaan pada kadar penghasilan suhu sewaktu pembakaran mengikut gabungan dwi pemusar masing-masing.

Pada keadaan nisbah kesetaraan, $\Phi = 0.8333$, berdasarkan pada Rajah 3, puncak suhu tertinggi terjadi pada dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/60^\circ$ 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 dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/50^\circ$ dengan catatan sedikit penurunan suhu puncak iaitu 1210°C pada jarak $z/D = 0.2$ dari kerongkong pemusar. Manakala puncak suhu yang paling rendah dihasilkan menggunakan dwi pemusar bersudut $30^\circ/40^\circ$ dengan catatan suhu puncak 1190°C pada jarak $z/D = 0.25$ ke hilir kerongkong pemusar. Rajah 3 juga menunjukkan peratus peningkatan suhu puncak pada nisbah kesetaraan ini adalah sebanyak 5.04% dan 1.68% dihasilkan oleh dwi pemusar bersudut $30^\circ/60^\circ$ dan $30^\circ/50^\circ$, jika

dibandingkan dengan gabungan dwi pemusar bersudut $30^\circ/40^\circ$.

Manakala Rajah 4 pula menunjukkan pada nisbah kesetaraan, $\Phi = 1.0$ suhu puncak yang paling tinggi dihasilkan ialah 1230°C menggunakan dwi pemusar bersudut $30^\circ/60^\circ$ pada jarak $z/D = 0.15$. Suhu puncak kedua tertinggi pula dihasilkan oleh dwi pemusar bersudut $30^\circ/50^\circ$ dengan catatan suhu puncak ialah 1200°C pada jarak $z/D = 0.2$ dari kerongkong pemusar. Sementara itu bagi dwi pemusar bersudut $30^\circ/40^\circ$, suhu puncak yang dihasilkan ialah 1180°C pada jarak $z/D = 0.25$. Peratusan peningkatan suhu puncak pada nisbah kesetaraan ini ialah sebanyak 4.24% dan 1.7% dihasilkan dengan menggunakan dwi pemusar bersudut $30^\circ/60^\circ$ dan $30^\circ/50^\circ$ berbanding dengan dwi pemusar bersudut $30^\circ/40^\circ$.

Sementara itu pemerhatian ke atas Rajah 5 pula, iaitu pada nisbah kesetaraan, $\Phi = 1.1$, menunjukkan suhu puncak tertinggi ialah 1220°C dihasilkan oleh dwi pemusar bersudut $30^\circ/60^\circ$ pada jarak $z/D = 0.15$. Pada jarak $z/D = 0.2$ pula suhu puncak dihasilkan oleh dwi pemusar bersudut $30^\circ/50^\circ$ ialah 1195°C . Manakala pada jarak $z/D = 0.25$ iaitu jarak yang paling panjang dihasilkan oleh dwi pemusar bersudut $30^\circ/40^\circ$ dengan suhu puncak 1160°C . Bagi peratusan peningkatan suhu pembakaran puncak pada keadaan nisbah kesetaraan ini ialah sebanyak 5.17% dan 3.02%, dihasilkan oleh dwi pemusar bersudut $30^\circ/60^\circ$ dan $30^\circ/50^\circ$, berbanding dwi pemusar bersudut $30^\circ/40^\circ$.

Dari kajian yang dijalankan ini ketiga-tiga rajah menunjukkan bahawa selepas suhu puncak dicapai, terdapat penurunan suhu secara beransur-ansur sehingga ke hujung kebuk pembakar untuk setiap gabungan dwi pemusar yang dikaji.

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 gabungan dwi pemusar yang dikaji adalah hampir sama antara satu sama lain dan peningkatan suhu berlaku apabila sudut pada dwi pemusar ditingkatkan.

Ketiga-tiga rajah menunjukkan gabungan dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/60^\circ$ menjana pusanan paling kuat yang dapat memendekkan panjang nyalaan. Manakala dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/40^\circ$ menghasilkan jarak nyalaan yang paling panjang berbanding gabungan dwi pemusar yang lain kerana gabungan pemusar ini menghasilkan pusanan yang lemah berbanding dengan gabungan pemusar yang lain.

3.2 Pengaruh Sudut Pemusar Terhadap Emisi Pembakaran

Kajian sebelum ini menumpukan kepada kecekapan pembakaran dari segi peningkatan suhu, saiz nyalaan, bentuk dan kestabilan nyalaan, yang mana dipengaruhi oleh tahap pusanan yang dikenakan ke atas aliran sewaktu proses pembakaran. Namun begitu kepentingan aliran berpusar dalam proses

pembakaran adalah untuk mempercepat pencampuran dua bahan yang mempunyai ketumpatan yang berbeza. Aliran berpusing digunakan bagi menghasilkan pencampuran bahan api dan udara supaya ia menjadi lebih baik, sekali gus dapat mengurangkan pembentukan emisi dari proses pembakaran.

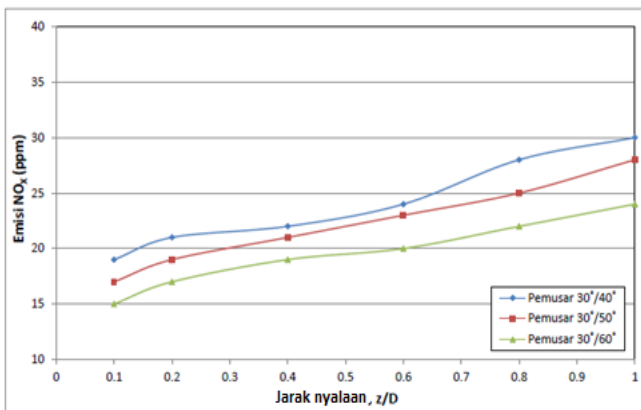
Perbincangan berkenaan emisi dalam kajian ini adalah lebih tertumpu kepada penghasilan oksida nitrogen (NO_x) dan karbon monoksida (CO).

3.2.1 Pengaruh Sudut Pemusar Ke Atas Pembentukan Emisi NO_x

Rajah 6 menunjukkan kepekatan emisi NO_x pada keadaan nisbah kesetaraan cair bahan api $\Phi = 0.8333$, bagi dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/40^\circ$, $30^\circ/50^\circ$ dan $30^\circ/60^\circ$ masing-masing. Dari rajah ini juga dapat dilihat kepekatan emisi NO_x meningkat di sepanjang kebuk pembakar untuk semua gabungan dwi pemusar. Namun kepekatan emisi NO_x berbeza mengikut dwi pemusar yang digunakan. Berdasarkan rajah ini, dwi pemusar aliran jejarian $30^\circ/40^\circ$ menghasilkan kepekatan NO_x paling tinggi berbanding gabungan dwi pemusar yang lain.

Rajah 6 juga menunjukkan terdapat penurunan kepekatan emisi NO_x pada dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/50^\circ$. Manakala gabungan dwi pemusar $30^\circ/60^\circ$ menunjukkan kepekatan emisi NO_x yang paling rendah berbanding gabungan dwi pemusar yang lain.

Kepekatan emisi NO_x semakin berkurangan apabila sudut dwi pemusar ditingkatkan daripada $30^\circ/40^\circ$ kepada $30^\circ/60^\circ$. Peratusan penurunan kepekatan emisi NO_x pada jarak $z/D = 0.8$ dari kerongkong pemusar adalah sebanyak 21.43% dan 10.71% bagi gabungan dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/60^\circ$ dan $30^\circ/50^\circ$ berbanding dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/40^\circ$.



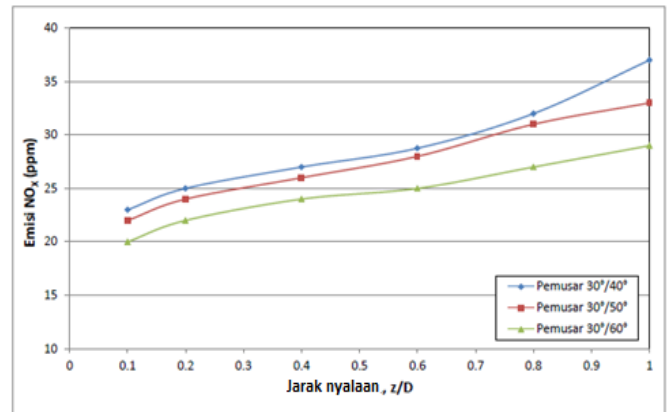
Rajah 6 Emisi NO_x pada keadaan nisbah kesetaraan cair bahan api, $\Phi = 0.8333$

Rajah 7 pula menunjukkan kepekatan emisi NO_x pada nisbah kesetaraan $\Phi = 1.0$, bagi dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/40^\circ$, $30^\circ/50^\circ$ dan $30^\circ/60^\circ$

masing-masing. Dari rajah ini didapati emisi NO_x meningkat di sepanjang jarak kebuk untuk semua gabungan dwi pemusar. Bagaimanapun kadar pembentukan emisi NO_x berbeza mengikut gabungan dwi pemusar masing-masing.

Gabungan dwi pemusar aliran jejarian $30^\circ/40^\circ$ menghasilkan emisi NO_x paling tinggi di sepanjang kebuk pembakar. Dwi pemusar bersudut $30^\circ/50^\circ$ menunjukkan sedikit penurunan kepekatan emisi NO_x di sepanjang kebuk pembakar. Manakala gabungan dwi pemusar bersudut $30^\circ/60^\circ$ pula menghasilkan emisi NO_x paling rendah di sepanjang kebuk pembakar.

Kepekatan emisi NO_x dihasilkan oleh dwi pemusar $30^\circ/60^\circ$ adalah paling rendah daripada dwi pemusar yang lain pada keadaan stoikiometri. Peratusan penurunan emisi NO_x pada jarak $z/D = 0.8$ dari kerongkong pemusar ke hilir kebuk pembakar adalah sebanyak 15.63% dan 3.13% bagi dwi pemusar bersudut $30^\circ/60^\circ$ dan $30^\circ/50^\circ$ berbanding dwi pemusar bersudut $30^\circ/40^\circ$.



Rajah 7 Emisi NO_x pada keadaan stoikiometri, $\Phi = 1.0$

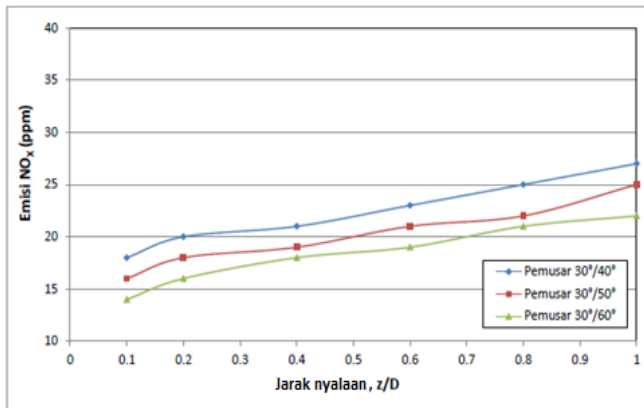
Rajah 8 menunjukkan kepekatan emisi NO_x pada keadaan $\Phi = 1.1$, bagi dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/40^\circ$, $30^\circ/50^\circ$ dan $30^\circ/60^\circ$ masing-masing. Peningkatan kepekatan emisi NO_x dilihat berlaku di sepanjang kebuk pembakar.

Peningkatan kepekatan emisi NO_x berlaku kepada semua gabungan dwi pemusar namun kepekatan emisi adalah berbeza mengikut dwi pemusar yang digunakan. Kepekatan emisi NO_x yang paling tinggi dihasilkan adalah dari gabungan dwi pemusar bersudut $30^\circ/40^\circ$.

Gabungan dwi pemusar bersudut $30^\circ/50^\circ$ menunjukkan sedikit penurunan kepekatan emisi NO_x . Bagaimanapun penurunan yang lebih banyak berlaku dengan menggunakan dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/60^\circ$.

Peratusan penurunan kepekatan emisi NO_x dari jarak kerongkong pemusar sehingga ke hilir kebuk pembakaran $z/D=0.8$ ialah 16% dan 12% bagi dwi pemusar bersudut $30^\circ/50^\circ$ dan $30^\circ/60^\circ$. Ujikaji yang dijalankan ini menunjukkan semakin tinggi sudut gabungan dwi pemusar yang digunakan semakin

rendah kepekatan emisi NO_x yang dihasilkan di dalam kebuk pembakar.



Rajah 8 Emisi NO_x pada keadaan nisbah kesetaraan kaya bahan api, $\Phi = 1.1$

Berdasarkan kepada ketiga-tiga rajah, kepekatan emisi NO_x mengalami peningkatan di sepanjang jarak kebuk. Ini adalah kerana nyalaan ke hilir kebuk pembakar masih belum berakhir sehingga $z/D=1$. Namun ketiga-tiga rajah ini menunjukkan kepekatan emisi NO_x untuk dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/60^\circ$ adalah lebih rendah berbanding dwi pemusar bersudut $30^\circ/40^\circ$.

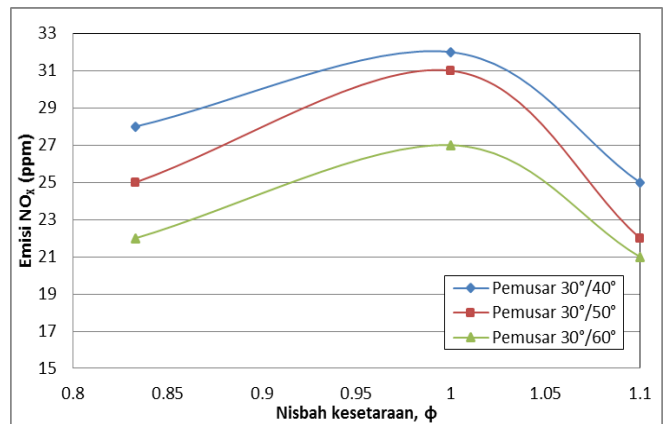
Ketiga-tiga rajah juga menunjukkan kepekatan emisi NO_x semakin berkurangan apabila sudut dwi pemusar meningkat daripada $30^\circ/40^\circ$ kepada $30^\circ/60^\circ$. Sudut dwi pemusar yang lebih tinggi menghasilkan pengurangan kepekatan emisi NO_x yang lebih baik kerana ia menghasilkan kesan pusaran kuat dan aliran gelora yang lebih baik bagi meningkatkan lagi kejatuhan tekanan dalam kebuk pembakar [16].

Dari analisis ini didapati pembakaran pada keadaan stoikiometri menghasilkan emisi NO_x lebih tinggi berbanding keadaan cair bahan api dan kaya bahan api. Keadaan ini berlaku kerana pembakaran stoikiometri membebaskan haba yang paling tinggi ketika tindak balas berlaku.

Rajah 9, menunjukkan kepekatan emisi NO_x melawan nisbah kesetaraan, Φ untuk dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/40^\circ$, $30^\circ/50^\circ$ dan $30^\circ/60^\circ$ masing-masing, pada jarak nyalaan $z/D=0.8$. Berdasarkan rajah ini dapat diperhatikan susuk berbentuk loceng (*bell shape*) diperolehi. Dapatan ini adalah selari dengan dapatan dari hasil kajian Lefebvre [8] dan Escott [16].

Dari rajah ini juga didapati pada keadaan stoikiometri, ketiga-tiga gabungan dwi pemusar menghasilkan pembentukan emisi NO_x yang paling tinggi jika dibandingkan dengan keadaan cair bahan api dan kaya bahan api. Manakala bagi dwi pemusar bersudut $30^\circ/60^\circ$ menghasilkan emisi NO_x paling rendah berbanding gabungan dwi pemusar yang lain.

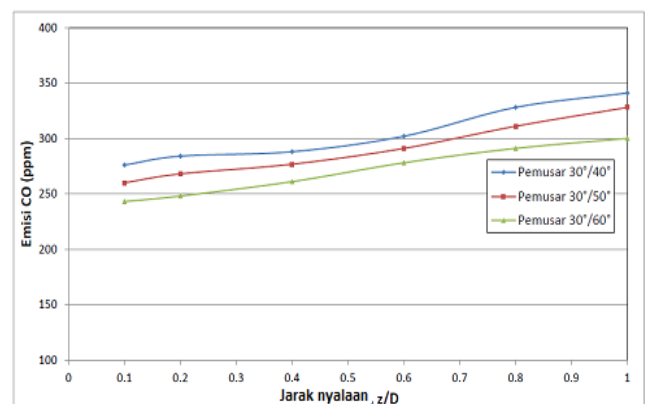
Bagi peratusan penurunan kepekatan emisi NO_x pula, pada keadaan stoikiometri ialah sebanyak 15.63% dan 3.13% bagi dwi pemusar bersudut $30^\circ/60^\circ$ dan $30^\circ/50^\circ$ berbanding gabungan dwi pemusar bersudut $30^\circ/40^\circ$.



Rajah 9 Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah kesetaraan, Φ

3.2.2 Pengaruh Sudut Pemusar Ke Atas Pembentukan Emisi CO

Rajah 10, pada keadaan cair bahan api, $\Phi = 0.8333$, menunjukkan kepekatan emisi CO yang dihasilkan oleh gabungan dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/40^\circ$, $30^\circ/50^\circ$ dan $30^\circ/60^\circ$ masing-masing. Dari rajah ini didapati kepekatan emisi CO mengalami peningkatan di sepanjang jarak kebuk bagi semua jenis dwi pemusar yang digunakan. Namun kepekatan emisi CO didapati berbeza mengikut dwi pemusar masing-masing. Dari rajah ini juga didapati kepekatan emisi CO yang paling tinggi di sepanjang kebuk pembakar dihasilkan oleh gabungan dwi pemusar bersudut $30^\circ/40^\circ$.



Rajah 10 Emisi CO pada keadaan nisbah kesetaraan cair bahan api, $\Phi = 0.8333$

Bagaimanapun terdapat sedikit pengurangan kepekatan emisi CO di sepanjang kepekatan pembakar apabila sudut dwi pemusar ditingkatkan ke 30°/50°. Kepekatan emisi CO mencatat nilai paling rendah di sepanjang kepekatan pembakar apabila gabungan dwi pemusar bersudut 30°/60° digunakan.

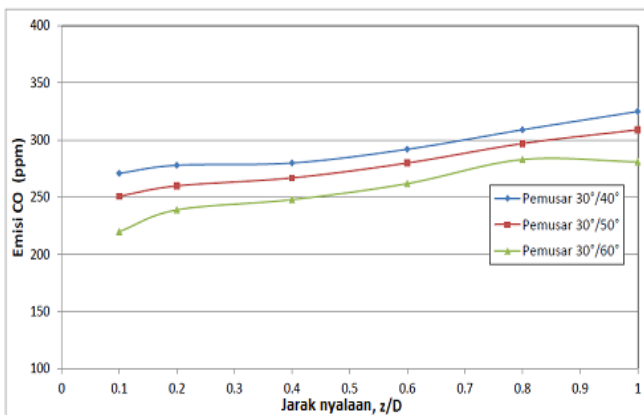
Dari ujikaji yang dijalankan didapati peratus penurunan kepekatan emisi CO pada jarak $z/D=0.8$ dari kerongkong pemusar ke hilir kepekatan pembakar adalah sebanyak 11.28% dan 5.18% bagi gabungan dwi pemusar bersudut 30°/60° dan 30°/50° berbanding dwi pemusar bersudut 30°/40°.

Rajah 11 pula menunjukkan kepekatan emisi CO pada nisbah kesetaraan $\Phi = 1.0$ bagi gabungan dwi pemusar 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° masing-masing. Didapati kepekatan emisi CO meningkat di sepanjang jarak kepekatan pembakar untuk semua gabungan dwi pemusar yang digunakan.

Bagaimanapun kepekatan emisi CO didapati berbeza mengikut gabungan dwi pemusar yang digunakan. Sudut gabungan dwi pemusar 30°/40° menghasilkan kepekatan emisi CO paling tinggi di sepanjang kepekatan pembakar. Manakala gabungan dwi pemusar bersudut 30°/50° menunjukkan sedikit penurunan kepekatan emisi CO di sepanjang kepekatan pembakar.

Gabungan dwi pemusar bersudut 30°/60° pula menjana kepekatan emisi CO paling rendah di sepanjang kepekatan pembakar. Kepekatan emisi CO yang dijana oleh dwi pemusar ini pada keadaan stoikiometri adalah paling rendah berbanding gabungan dwi pemusar yang lain.

Peratusan penurunan kepekatan emisi CO pada jarak $z/D = 0.8$ dari kerongkong pemusar ke hilir kepekatan pembakar bagi gabungan dwi pemusar bersudut 30°/60° adalah sebanyak 8.41% manakala gabungan dwi pemusar bersudut 30°/50° menunjukkan penurunan 3.88% berbanding gabungan dwi pemusar bersudut 30°/40°.



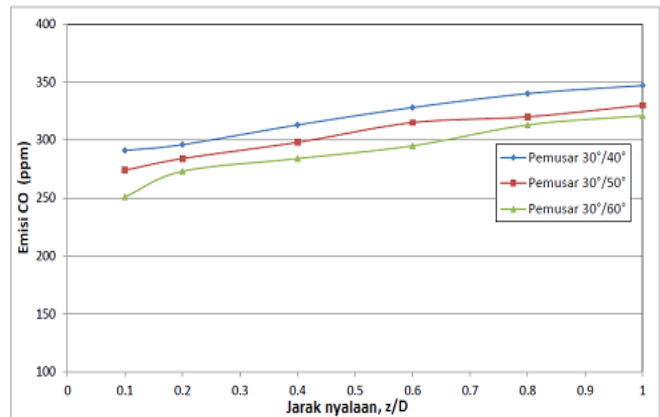
Rajah 11 Emisi CO pada keadaan stoikiometri, $\Phi = 1.0$

Rajah 12 menunjukkan kepekatan emisi CO pada nisbah kesetaraan $\Phi = 1.1$ bagi gabungan dwi pemusar aliran jejarian bersudut 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° masing-masing. Dari rajah ini didapati

kepekatan emisi CO meningkat di sepanjang jarak kepekatan pembakar untuk semua gabungan dwi pemusar yang digunakan. Kepekatan emisi CO didapati berbeza mengikut gabungan dwi pemusar yang digunakan. Dari rajah ini, sudut gabungan dwi pemusar 30°/40° menghasilkan emisi CO paling tinggi di sepanjang kepekatan pembakar.

Kepekatan emisi CO sepanjang kepekatan pembakar didapati menurun sedikit apabila dwi pemusar bersudut 30°/50° digunakan. Gabungan dwi pemusar bersudut 30°/60° menjana emisi CO paling rendah di sepanjang kepekatan pembakar.

Peratusan penurunan kepekatan emisi CO pada jarak $z/D = 0.8$ dari kerongkong pemusar ke hilir kepekatan pembakar bagi dwi pemusar bersudut 30°/60° ialah sebanyak 7.94% untuk dwi pemusar bersudut 30°/50° ialah sebanyak 5.88% berbanding gabungan dwi pemusar bersudut 30°/40°.



Rajah 12 Emisi CO pada keadaan nisbah kesetaraan kaya bahan api, $\Phi = 1.1$

Berdasarkan ketiga-tiga rajah, didapati kepekatan emisi CO meningkat di sepanjang jarak kepekatan pembakar. Kepekatan emisi CO juga didapati berbeza mengikut sudut dwi pemusar yang digunakan. Namun apabila sudut dwi pemusar ditingkatkan dari 30°/40° ke 30°/60° kepekatan emisi CO didapati menurun.

Berdasarkan kajian oleh penyelidik terdahulu, mereka mendapati kesan peningkatan pada sudut bilah pemusar aliran jejarian ada mempengaruhi penurunan kepekatan emisi CO. Ini kerana kesan aliran gelora dan saiz zon edaran semula membantu dalam pengurangan pembentukan emisi [20].

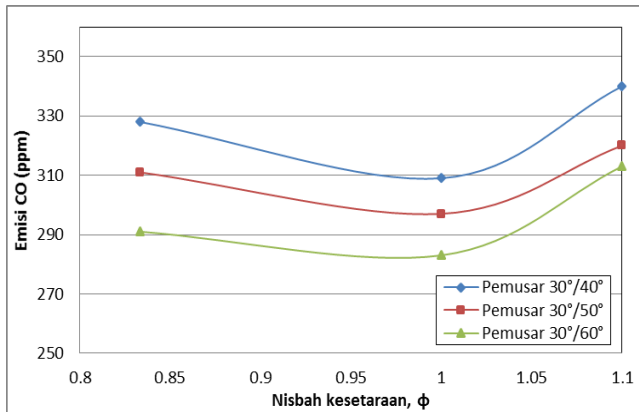
Dari ketiga-tiga rajah juga didapati kepekatan emisi CO adalah lebih rendah pada keadaan stoikiometri, manakala pada keadaan kaya bahan api didapati kadar pembentukan emisi CO adalah paling tinggi.

Rajah 13, menunjukkan pembentukan emisi CO melawan nisbah kesetaraan, Φ bagi dwi pemusar aliran jejarian bersudut 30°/40°, 30°/50° dan 30°/60° masing-masing, pada jarak nyalaan $z/D=0.8$. Berdasarkan rajah ini dapat diperhatikan bahawa susuk berbentuk U diperolehi. Dapatan ini adalah

selari dengan dapatan oleh Lefebvre [8] dan Escott [16]. Dari rajah ini didapati pada keadaan stoikiometri, ketiga-tiga gabungan dwi pemusar menghasilkan pembentukan emisi CO paling rendah jika dibandingkan dengan keadaan cair bahan api dan kaya bahan api.

Gabungan dwi pemusar bersudut $30^\circ/60^\circ$ pula menghasilkan emisi CO yang paling rendah berbanding dengan dwi pemusar yang lain.

Bagi peratusan penurunan kepekatan emisi CO pada keadaan stoikiometri ialah sebanyak 8.41% dan 3.88% bagi dwi pemusar bersudut $30^\circ/60^\circ$ dan $30^\circ/50^\circ$ berbanding dwi pemusar bersudut $30^\circ/40^\circ$.



Rajah 13 Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah kesetaraan, ϕ

Kepekatan emisi CO menunjukkan terdapat perbezaan perkaitan dengan kepekatan emisi NO_x di mana kepekatan emisi CO menurun ketika emisi NO_x tinggi. Dari ujikaji didapati pembakaran dengan suhu yang tinggi mempengaruhi kepekatan emisi CO dan NO_x kerana kedua-dua emisi adalah berkadar songsang pembentukannya terhadap kenaikan suhu. Pada suhu pembakaran yang tinggi didapati berlaku penurunan pada kepekatan emisi CO. Namun berlaku peningkatan pada kepekatan emisi NO_x . Peningkatan emisi CO dan NO_x boleh dikurangkan apabila proses pembakaran menghasilkan suhu yang rendah, masa mastautin yang singkat dan pembentukan jarak api nyalaan yang pendek [14].

Penghasilan emisi CO dipengaruhi oleh dua faktor. Faktor yang pertama ialah bekalan udara yang kurang di mana ia dipengaruhi oleh bekalan oksigen (O_2) sewaktu pembakaran. Manakala faktor kedua pula ialah suhu pembakaran yang rendah. Hal ini dapat dilihat apabila pembentukan emisi CO yang paling tinggi berlaku pada keadaan kaya bahan api, di mana udara yang dibekalkan adalah kurang berbanding bahan api, begitu juga dari segi faktor suhu pembakaran. Suhu pembakaran pada keadaan kaya bahan api adalah paling rendah jika dibandingkan dengan suhu pembakaran pada keadaan cair bahan api dan stoikiometri.

4.0 KESIMPULAN

Berdasarkan kajian yang dijalankan dapat disimpulkan bahawa suhu nyalaan di kawasan yang kaya bahan api dilihat lebih rendah berbanding dalam kawasan cair bahan api. Ini kerana di kawasan tersebut masih terdapat bahan api yang tidak terbakar sepenuhnya. Ini menjadikan suhu di kawasan tersebut lebih rendah kerana percampuran bahan api dan udara adalah dalam keadaan yang kurang baik. Al-Kabie [15], 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 kepekatan pembakaran. Rajah-rajah yang dipersembahkan menunjukkan dwi pemusar aliran jejarian bersudut $30^\circ/60^\circ$ menghasilkan pembentukan susuk suhu yang paling tinggi pada setiap nisbah kesetaraan.

Selain itu, ujikaji terhadap pembentukan emisi dijalankan bagi melihat perubahan-perubahan serta perbandingan menggunakan gabungan dwi pemusar berbeza sudut ke atas pembakar. Dari kajian yang dijalankan terhadap penggunaan pelbagai sudut bilah ke atas dwi pemusar didapati terdapat perubahan pada pembentukan emisi apabila sudut bilah pemusar ditingkatkan. Berdasarkan ketiga-tiga gabungan dwi pemusar yang digunakan, didapati dwi pemusar bersudut $30^\circ/60^\circ$ memberikan prestasi yang terbaik terhadap pembentukan emisi. Ini dapat dilihat pada setiap pembentukan emisi NO_x dan CO di mana dwi pemusar bersudut $30^\circ/60^\circ$ menghasilkan kepekatan emisi terendah berbanding dwi pemusar bersudut $30^\circ/40^\circ$ dan $30^\circ/50^\circ$.

Perubahan kepada pembentukan emisi juga boleh dilihat pada keadaan nisbah kesetaraan, di mana dari ujikaji didapati pembentukan emisi NO_x adalah paling tinggi pada keadaan nisbah kesetaraan stoikiometri manakala pada keadaan nisbah kesetaraan kaya bahan api pembentukan emisi NO_x adalah paling rendah. Ini kerana pada keadaan stoikiometri didapati percampuran udara dan bahan api yang dibekalkan adalah lebih sempurna dan bertindak balas dengan haba untuk menghasilkan NO_x . Walau bagaimanapun terdapat perubahan pada pembentukan emisi CO sewaktu peningkatan emisi NO_x pada keadaan stoikiometri, di mana pembentukan emisi CO mengalami pengurangan. Namun perubahan nisbah kesetaraan kepada keadaan kaya bahan api mendorong peningkatan emisi CO. Ini berlaku disebabkan, pada keadaan kaya bahan api, jumlah udara yang dibekalkan tidak mencukupi. Oleh itu perkaitan antara pembentukan emisi CO dan NO_x dapat dinyatakan bahawa apabila berlaku pengurangan terhadap kepekatan emisi NO_x , ia akan cenderung untuk meningkatkan pembentukan emisi CO.

Penghargaan

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia dan Pusat Pengurusan & Penyelidikan (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 kerja-kerja ini.

Rujukan

- [1] Ishak, A., Shaiful, M., & Jaafar, M., Nazri, M. 2005. The Effect Of Swirl Number On Reducing Emissions From Liquid Fuel Burner System. *Jurnal Mekanikal*. 19: 48-56.
- [2] Sperling, D., & Gordon, D. 2009. *Two Billion Cars: Driving Toward Sustainability*. Oxford University Press.
- [3] Bowman, C. T. 1992. Control Of Combustion Generated Nitrogen Oxide Emissions: Technology Driven By Regulation. *Symposium (International) on Combustion*. Elsevier. 24(1): 859-878.
- [4] Beér, J. M., & Chigier, N. A. 1972. *Combustion Aerodynamics*. New York.
- [5] Vondál, J., & Hájek, J. 2012. Swirling Flow Prediction In Model Combustor With Axial Guide Vane Swirler. *Chemical Engineering*. 29.
- [6] Eldrainy, Y. A., Aly, H. S., Saqr, K. M., & Jaafar, M. N. M. 2009. A Multiple Inlet Swirler For Gas Turbine Combustors. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 53.
- [7] Sheen, H. J., Chen, W. J., Jeng, S. Y., & Huang, T. L. 1996. Correlation Of Swirl Number For A Radial-Type Swirl Generator. *Experimental Thermal And Fluid Science*. 12(4): 444-451.
- [8] Lefebvre, A. H. 1998. *Gas Turbine Combustion*. CRC Press.
- [9] Khezzar, L. 1998. Velocity Measurements In The Near Field Of A Radial Swirler. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 16(3): 230-236.
- [10] 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.
- [11] Furuhashi, T., Amano, S., Yotoriyama, K., & Arai, M. 2007. Development Of Can-Type Low NO_x Combustor For Micro Gas Turbine (Fundamental Characteristics In A Primary Combustion Zone With Upward Swirl). *Fuel*. 86(15): 2463-2474.
- [12] Khanafer, K., & Aithal, S. M. 2011. Fluid-Dynamic And NO_x Computation In Swirl Burners. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 54(23): 5030-5038.
- [13] 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*.
- [14] Jaafar, M. N. M., & Ishak, M. S. A. 2012. *Teknik Pembakaran Hijau: Pembakar Berbahan Api Cecair*. Penerbit UTM Press.
- [15] Alkabbie, H. S., Andrews, G. E., & Ahmad, N. T. 1988. Lean Low NO_x Primary Zones Using Radial Swirlers. *ASME 1988 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition* American Society of Mechanical Engineers. V003T06A027-V003T06A027.
- [16] Escott, N. H. 1993. Ultra Low NO_x Gas Turbine Combustion Chamber Design. University of Leeds, Department of Fuel and Energy, PhD.
- [17] Ramadan, O. B. A. 2008. Design and Evaluation of a Low NO_x Natural Gas-Fired Conical Wire-Mesh Duct Burner for a Micro-Cogeneration Unit. Doctoral dissertation. Carleton University Ottawa.
- [18] Delavan. 2000. *A Total Look at Oil Burner Nozzles*. Delavan Spray Technologies: Fuel Metering Production Operation, South Carolina.
- [19] British Standards Institution. BS 1041:1992. Temperature Measurement. Part 4. Guide to the Selection and Used of Thermocouples.
- [20] Mohd. Radzi, M. Y. 2002. A Study of Swirled Air Method in The Reduction of Emissions from the Combustion of Liquid Fuel. Universiti Teknologi Malaysia, Dept. Aeronautics and Automotive. Masters Tesis.
- [21] 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.