

KAJIAN PERBANDINGAN RAM LENGKUNG DAN RAM RATA BAGI PEMUSAR UDARA ALIRAN JEJARIAN DALAM MENGURANGKAN EMISI

Mohammad Nazri Mohd Jaafar, Ismail Samat dan Muhamed Shukri Abdul Mookmin

Jabatan Aeronautik dan Automotif, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Skudai, Johor.

ABSTRAK

Enjin turbin gas digunakan secara meluas sama ada dalam bidang industri atau penerbangan. Kecekapan enjin merupakan salah satu kriteria dalam pemilihan enjin yang baik. Pembakar adalah antara komponen penting dalam enjin turbin gas yang selalu diberi perhatian dalam kajian oleh penyelidik. Pembakar yang baik dapat menghasilkan pembakaran yang sempurna dengan kadar bahan cemar yang minimum. Ini dapat dicapai dengan menggunakan pemusar udara. Melalui kajian ini, ujikaji dilakukan untuk mengkaji keberkesanan aplikasi pemusar udara ram lengkung ke atas ram rata dalam mengurangkan emisi. Ujian pembakaran yang dilakukan melibatkan pemusar ram lengkung dan ram rata dengan sudut pesongan ram yang berlainan. Tahap penghasilan bahan cemar diukur dan dibandingkan bagi kedua-dua jenis ram, lengkung dan rata. Keputusan yang diperolehi menunjukkan rekabentuk ram lengkung menghasilkan bahan cemar yang lebih rendah berbanding dengan ram rata. Pengurangan sebanyak 36%, 67% dan 67% dalam emisi NO_x , CO dan SO_2 masing-masing telah dicapai dengan menggunakan ram lengkung berbanding dengan ram rata. Kesemua ini dicapai pada sudut pesongan ram 60°

Katakunci : Emisi CO, Emisi NO_x , Nombor Pusing, Pemusar udara, Ram Lengkung, Ram Rata

ABSTRACT

Gas turbine engines are widely used either in the industrial or the aviation sector. The engine efficiency is one of the main criteria in selecting the suitable engine. The combustor or the combustion chamber is one of the key components in gas turbine engines and is given special attention by many researchers in engine development. A good combustor is able to provide complete combustion with very minimal emissions production. This can be achieved by using air swirler. Through this study, an experiment was conducted to investigate the effectiveness of applying curved blade radial air swirler with different blade angles over straight blade. The level of emissions produced were measured and compared for the two types of blade, curved and straight. Experimental results obtained showed that the curved blade design produces lower level of emissions compared to that of straight blade. Emission reduction of 36%, 67%, and 67% for NO_x , CO and SO_2 emissions, respectively were achieved when using curved blades air swirler compared to that of straight blades. These were all achieved at blade angle of 60°

Keywords : Air Swirler, CO Emission, Curved Blade, NO_x Emission., Straight Blade, Swirl Number

1.0 PENGENALAN

Penyelidikan dan pembangunan enjin pada dekad 80an dan 90an lebih bertumpu kepada pembakar, kerana gas ekzos yang terhasil dari proses pembakaran telah mendatangkan kesan buruk kepada seluruh alam. Gas-gas yang terhasil adalah terdiri daripada oksida nitrogen (NO_x), oksida sulfur (SO_x), hidrokarbon tidak terbakar (UHC) dan karbon monoksida CO [1]. Gas-gas ini telah menyebabkan terjadinya pemanasan bumi, jerebu (photochemical smog), penipisan lapisan ozon dan hujan asid [2]. Namun penumpuan lebih diberikan kepada pengurangan NO_x kerana kaedah untuk mengurangkan NO_x adalah melibatkan kos yang tinggi dan kompleks.

Pelbagai parameter pembakar diubahsuai bagi mendapatkan ciri-ciri yang dapat mengurangkan emisi. Kaedah kawalan yang selalu dipraktikkan adalah pembakar bermangkai, pembakar berperingkat [3], pembakar dengan

daya edaran semula [4], pembakar dengan penyejukan air [5], pembakar pra-pengewapan pra-campuran dan pembakar dengan penurunan terpilih tanpa mangkin (SNCR) [6]. Pembakar dengan daya edaran semula adalah pembakar yang menggunakan pemusar bagi menghasilkan daya edaran semula. Penyelitan plat orifis pada laluan masuk ke zon utama adalah bagi meningkatkan halaju udara dan mengurangkan tekanan pada zon tersebut yang mana akan memberikan kesan kepada emisi yang terhasil.

Emisi merupakan bahan cemar yang terhasil dari tindak balas kimia seperti yang dilakukan semasa pembakaran [7]. Terdapat empat emisi utama akibat proses pembakaran iaitu oksida nitrogen (NO_x), karbon monoksida (CO), hidrokarbon tidak terbakar (UHC) dan asap. NO_x juga terbentuk semasa operasi pembakaran pada suhu tinggi dengan pembakaran stoikiometri.

1.1 EMISI OKSIDA NITROGEN (NO_x)

Oksida nitrogen (NO_x) terhasil daripada proses pembakaran bersuhu tinggi di antara nitrogen dan oksigen. Oksida nitrogen juga dihasilkan daripada proses semulajadi seperti tindakan bakteria dalam tanah, kilat dan letupan gunung berapi. Nitrik oksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO₂) merupakan oksida nitrogen utama yang menyebabkan kesan buruk terhadap haiwan dan tumbuhan. NO merupakan gas yang tidak berwarna, berwarna biru gelap dalam keadaan cecair dan putih kebiru-biruan apabila berbentuk pepejal. Sebatian ini adalah paramagnetik dan mempunyai bilangan elektron yang ganjil [1].

NO boleh membahayakan kesihatan tetapi kesannya kurang jika dibandingkan dengan NO₂. Sebatian NO dihasilkan melalui tiga mekanisma yang berlainan iaitu:

- i) *NO haba* dihasilkan melalui pengoksidaan nitrogen atmosfera dalam gas pascanyalaan.
- ii) *NO penggesa* dihasilkan melalui tindakbalas berhalaju tinggi pada bahagian depan nyalaan.
- iii) *NO bahan api* dihasilkan melalui pengoksidaan nitrogen yang terkandung di dalam bahan api.

Kepekatan NO bergantung kepada situasi berikut:

- i) Kepekatan nitrogen dan oksigen dalam zon pembakar – Pengaliran udara oksigen yang tinggi didapati daripada kuaniti NO yang tinggi.
- ii) Masa Mastautin – Pendedahan masa yang panjang diperlukan pada suhu tinggi untuk membentuk nitrogen oksida.
- iii) Suhu – Kepekatan NO yang tinggi didapati apabila nilai suhu adalah tinggi.

NO₂ merupakan sejenis gas berwarna perang kemerahan yang berbau. Anggapan dibuat bahawa NO₂ dihasilkan daripada pengoksidaan lanjutan NO_x. Nisbah kepekatan NO: NO₂ dianggarkan lebih kurang 10:1. Persamaan tindak balas bagi pembentukan NO_x adalah seperti berikut:



Nitrus oksida, N₂O pula merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau dan tidak bertoksik yang terbentuk hasil aktiviti biologi tanah dengan kereaktifan yang rendah. Teknik untuk mengurangkan emisi NO_x adalah:

- i) Mengurangkan pengaliran udara pembakaran.
- ii) Pembakaran berperingkat.
- iii) Kitaran aliran gas.

1.2 EMISI SULFUR DIOKSIDA (SO₂)

Sulfur dioksida (SO₂) merupakan sejenis gas tidak berwarna yang terbentuk akibat pembakaran bahan api fosil di stesen janakuasa. SO₂ bertindak balas terhadap zarah-zarah pepejal yang hancur dalam kandungan air dan dioksidakan di antara titisan air yang berterbangan menghasilkan asid sulfurik, H₂SO₄ yang menyebabkan fenomena hujan asid.

Akibat pembakaran antara sulfur dan bahan api fosil, pengoksidaan yang berlaku menyebabkan kewujudan emisi. Pengurangan pancaran SO₂ dalam atmosfera dapat dilakukan dengan beberapa cara iaitu:

- i) Proses penyahsulfuran (termasuk proses penyahsulfuran bahan api dan sisa gas).

- ii) Mengurangkan kadar penyerapan sulfur di dalam bahan api semasa pembakaran.
- iii) Penggasaan arang/penyahsulfuran gas dalam sistem pembakaran.
- iv) Mencegah penghasilan dan pembebasan sulfur semasa pembakaran.
- v) Memindahkan sulfur selepas pembakaran.

1.3 EMISI KARBON MONOKSIDA (CO)

Karbon monoksida adalah sejenis gas beracun yang tidak mempunyai warna, rasa dan bau yang terhasil daripada pembakaran tidak lengkap bahan api fosil dan pengoksidaan atmosferik metana dan hidrokarbon biogenik yang lain.

1.4 EMISI HIDROKARBON TIDAK TERBAKAR

Hidrokarbon yang dikeluarkan oleh ekzos adalah campuran kompleks bahan api tidak terbakar, proses pengoksigenan dan sebatian bahan teroksida yang terhasil sebagai produk penurunan haba bahan api induk dengan berat molekul yang rendah. Di antara kaedah yang dapat mengurangkan emisi UHC adalah dengan kaedah pembaikan pengabusan bahan api di mana kebanyakannya melalui kesan tekanan dan suhu udara masukan yang lebih tinggi yang akan meningkatkan kadar tindak balas kimia dalam zon pembakaran utama.

2.0 PUSARAN

2.1 ALIRAN BERPUSAR

Aliran berpusing adalah aliran utama yang dihasilkan oleh pemusar udara di dalam pembakar. Corak aliran yang dihasilkan ini adalah gabungan pusaran dan kerosakan vorteks. Kerosakan vorteks adalah fenomena yang terjadi di dalam aliran pusar yang menyebabkan ia mengedar semula dalam kawasan teras apabila jumlah putaran yang diberikan kepadanya adalah tinggi [1].

Aliran berpusing kerap digunakan untuk mengawal nyalaan dalam kebuk pembakaran. Sifat aerodinamik pada aliran pusar gelora ini adalah gabungan daripada ciri-ciri pergerakan berpusing dan fenomena gelora bebas yang bertembung dalam aliran jet dan aliran olakan. Sistem gelora berpusing ini dapat dibahagikan kepada beberapa kumpulan iaitu [8], jet gelora berpusing dengan pusar lemah, jet berpusing kuat dengan edaran semula dalaman dan jet gelora di dalam edaran berputar. Setiapi kes ini terhasil apabila wujudnya keadaan perbezaan ketumpatan antara aliran jet yang memasuki kebuk pembakaran dan persekitaran dari dalam kebuk pembakaran.

Percampuran udara dan bahanapi yang baik boleh diperolehi dengan mewujudkan aliran berpusing yang mana seterusnya akan mewujudkan aliran berpusing dan kerosakan vorteks. Kelebihan yang diperolehi dengan mewujudkan aliran berputar ini ialah:

- i) Kecekapan pembakaran yang tinggi.
- ii) Pembakaran yang stabil dalam julat kawasan operasi pembakaran.
- iii) Edaran suhu yang baik.
- iv) Meminimumkan saiz tiub nyalaan.
- v) Mengurangkan pembentukan bahan cemar.

Satu kesan utama aliran berpusing ini adalah pembentukan zon edaran semula yang akan bertindak sebagai halangan aerodinamik, di mana ia akan membantu dalam menstabilkan nyalaan, percampuran udara dan bahanapi serta pengurangan

pembentukan bahan cemar. Untuk mendapatkan kestabilan nyalaan pula, kawasan aliran mesti 'didekati' di mana aliran pembakaran mesti sama dengan halaju aliran dan juga sumber haba mesti sesuai untuk memulakan proses pembakaran.

2.2 PEMBENTUKAN PUSARAN

Apabila udara dimasukkan secara tangen ke dalam kebuk pembakaran, ia dipaksa untuk mengubah arah haluan alirannya, jadi aliran berpusar akan terbentuk. Keseimbangan tercipta di antara daya empur yang bertindak pada partikel bendalir dan daya tekanan yang terjadi pada dinding tiub. Keseimbangan daya ini didemonstrasikan oleh pergerakan taburan tekanan statik di dalam kebuk pembakar. Ia juga boleh diambil sebagai taburan tekanan yang dikira daripada pengukuran taburan halaju tangen. Tekanan yang rendah di pusat teras aliran pusar, berterusan dipulihkan dengan kemunculan aliran jet daripada kebuk pembakaran. Ini menghasilkan kecerunan tekanan paksi yang berlawanan, jadi pada sudut pusar tinggi yang memadai, aliran membalikkan arah pergerakannya dan vorteks pusar terbentuk. Panjang asas vorteks ini ditakrifkan daripada titik keluar permulaan dari kebuk pembakaran ke titik di mana aliran membalikkan berlaku, meningkat dengan peningkatan nombor pusar [8].

2.3 NOMBOR PUSAR

Nombor pusar adalah nombor parameter tidak berdimensi yang merupakan nisbah antara fluks momentum pusaran aliran paksi kepada fluks momentum paksi aliran paksi didarab dengan jejari nozel. Kedua-dua fluks momentum ini boleh dipertimbangkan sebagai ciri-ciri atau sifat aerodinamik aliran jet. Pembakar tipikal selalunya mempunyai nombor pusar dalam lingkungan 0.6 hingga 2.5 [9].

Pusaran Lemah ($S < 0.6$)

Di dalam sistem pusaran lemah, kecerunan tekanan paksi adalah tidak cukup besar untuk menghasilkan edaran semula dalaman. Pusaran memberikan kesan kepada kadar penumpuan aliran dan kadar aliran halaju melambat [8].

Pusaran Kuat ($S > 0.6$)

Pusaran kuat berlaku apabila keamatan pusaran meningkat di dalam aliran jet, di mana satu titik akan dicapai bila kecuraman suhu yang rendah di sepanjang aliran paksi jet tidak dapat ditampung oleh tenaga kinetik zarah bendalir dalam aliran paksi.

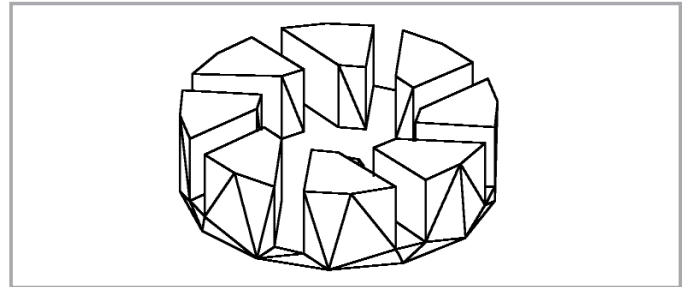
3 PEMUSAR UDARA

3.1 FUNGSI PEMUSAR UDARA

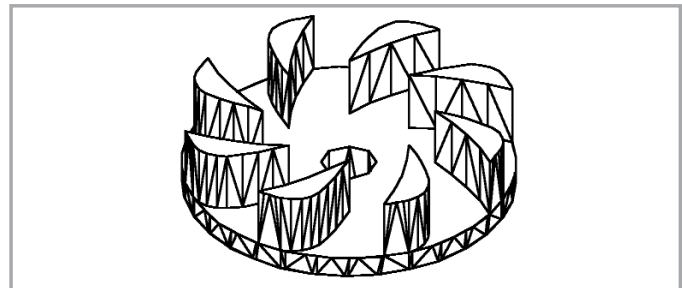
Satu cara berkesan untuk mengaruh aliran edaran semula seperti ini di dalam zon utama ialah dengan memasang pemusar di dalam kubah sekeliling penyuntik bahanapi. Komponen pusar diperhatikan dapat menghasilkan kawasan riakan yang kuat, gelora tinggi dan kadar percampuran yang cepat [1]. Ciri aliran pusaran ini telah lama diaplikasikan di dalam kebanyakan peranti pembakaran praktik untuk mengawal kestabilan dan keamatan pembakaran serta saiz dan bentuk kawalan nyalaan.

Di dalam sistem pembakaran yang berterusan seperti pembakar turbin gas selalunya bantuan nyalaan mengarahkan nyalaan yang pendek dan kesungguhan nyalaan ini bagi mencapai kadar pelepasan haba yang cepat. Nyalaan yang panjang secara umumnya menghasilkan percampuran yang

kurang baik, ini boleh ditentukan oleh nyalaan kuning yang hadir dan sumbangannya kepada pembentukan pancaran selagi mana masa mastautin makin meningkat [10]. Tambahan pula nyalaan kuning adalah kawasan yang mempunyai pembakaran



Rajah 1: Pandangan isometrik pemusar udara ram rata sudut 40°



Rajah 2: Pandangan isometrik pemusar udara ram lengkung sudut 30°

yang kurang lengkap semasa melintasi nyalaan dan ini boleh menyebabkan kesan peningkatan terhadap pancaran NO_x .

3.2 SUSUNAN PEMUSAR

Terdapat dua susunan yang biasanya digunakan dalam pembakar tiub dan anulus iaitu pemusar udara tunggal dan pemusar kembar. Pemusar tunggal digunakan bersama dengan pemancit bahanapi yang dipasangkan di tengah bagi menghasilkan edaran berputar. Pemusar kembar pula digunakan bersama pemancit bahanapi tekanan mudah yang juga dipasangkan di tengah bagi menghasilkan edaran kontra berputar.

3.3 JENIS PEMUSAR

Jenis-jenis rekabentuk pemusar udara bergantung kepada kaedah aliran yang digunakan. Terdapat tiga rekabentuk pemusar yang asas iaitu:

- i) Pemusar aliran paksi
- ii) Pemusar aliran jejarian
- iii) Pemusar aliran gabungan
- iv) Pemusar jenis *jet discrete*

Manakala secara amnya, bentuk bilah bagi pemusar udara aliran jejarian terdiri daripada dua iaitu jenis ram rata (Rajah 1) dan ram lengkung (Rajah 2) [11].

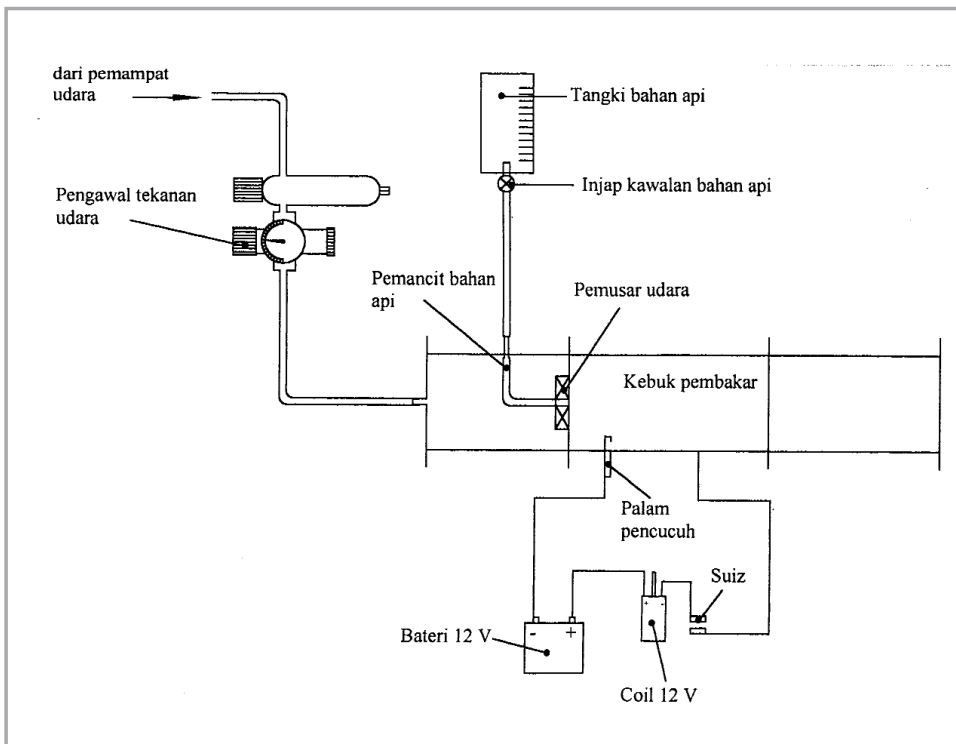
3.4 PARAMETER RAM (BILAH) YANG MEMPENGARUHI ZON EDARAN SEMULA

Saiz zon edaran ini dipengaruhi oleh kesan berasingan akibat perubahan-perubahan dalam [1]:

- i) Jenis ram (lengkung/rata)
- ii) Sudut ram
- iii) Nisbah aspek ram
- iv) Nisbah jarak per rentas

Data-data ujikaji menunjukkan bahawa saiz edaran semula ditingkatkan oleh [1]:

- i) Peningkatan pada sudut ram
- ii) Peningkatan pada jumlah ram



Rajah 3: Rig ujikaji pembakar jenis kaleng

- iii) Pengurangan dalam nisbah (jarak/perentas)
- iv) Pengurangan pada nisbah aspek ram
- v) Penukaran dari ram rata kepada ram lengkung

4.0 RIG UJIKAJI

Rajah rig ujian pembakar jenis kaleng untuk ujian pembakaran yang dijalankan ditunjukkan di dalam Rajah 3. Rig ujian ini telah direkabentuk oleh Romales Ramli [12]. Namun rig ujian yang digunakan sekarang telah dilakukan beberapa pembaharuan dan pengubahsuaian. Rig ujian tersebut dipasangkan ke atas troli boleh gerak pada kedudukan mendatar. Udara dimasukkan ke dalam kebuk melalui paip masukan dan mengalir secara memaksi sebelum masuk ke dalam kebuk pembakaran melalui pemusar udara aliran jejarian dengan garis pusat keluaran sebanyak 40 mm.

Rig ujian tersebut dipasangkan dengan pemancit bahan api jenis memusat. Garis pusat dalaman kebuk pembakaran ialah 163 mm dan panjangnya ialah 300 mm. Pembakar ini disejukkan secara olakan oleh udara ambien di dalam makmal dan tidak memerlukan kaedah pendinginan yang lain.

Udara yang memasuki kebuk pembakaran melalui kebuk plenum terlebih dahulu yang mempunyai garis pusat yang sama dengan kebuk pembakaran. Di dalam kebuk plenum ini dipasangkan dengan pemusar udara di satah keluarannya dan pemancit bahan api di mana bahan api cecair dipancarkan.

Kuar pensampelan gas ekzos dipasangkan di bahagian hujung kebuk pembakaran. Penganalisis gas yang digunakan di dalam ujian ini adalah jenis penganalisis gas MSI Dragger yang mudah alih yang hanya boleh mengukur

gas-gas oksida nitrogen, sulfur dioksida dan karbon monoksida. Dengan itu, hanya gas-gas ini sahaja yang akan dibincangkan di dalam kertas kerja ini.

5.0 KEADAAN UJIKAJI

Ujian dijalankan pada suhu ambien untuk suhu udara masukan memandangkan tiada alat prapemanas yang digunakan semasa ujian-ujian ini dijalankan. Udara dibekalkan dari bekalan utama udara termampat di makmal pembakaran. Tekanan udara bekalan dimeterkan menggunakan pengatur tekanan udara. Udara bekalan ini dibahagikan kepada dua bahagian; satu untuk membekalkan udara kepada kebuk pembakaran dan yang satu lagi ialah untuk memampatkan bahan api yang dibekalkan supaya terkabus kepada titisan yang lebih kecil bagi kemudahan pembakaran.

Kerosin digunakan sebagai bahan api untuk keseluruhan penyiasatan yang dijalankan. Parameter yang diubah ialah sudut bilah pemusar udara iaitu 30°, 40°, 50° dan 60°, jenis ram sama ada lengkung atau rata dan kadar aliran isipadu bahan api untuk

melihat kesan keadaan pembakaran kaya dan cair ke atas pembentukan bahan cemar.

6.0 KEPUTUSAN UJIKAJI DAN PERBINCANGAN

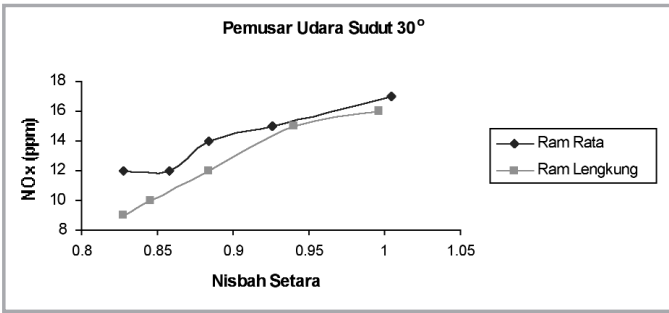
Campuran bahan api dan udara di dalam kebuk pembakaran mempengaruhi pembakaran yang diperolehi ketika ujikaji dijalankan. Campuran bahan api dan udara ini pula dipengaruhi oleh pusingan yang dihasilkan oleh penjana pusing iaitu pemusar udara aliran jejarian. Percampuran bahan api dan udara dikelaskan kepada tiga jenis berdasarkan kandungan bahan api berbanding udara atau oksigen yang dibekalkan. Jenis campuran yang dimaksudkan ialah campuran kaya bahan api, stoikiometri dan cair bahan api.

Percampuran stoikiometri menghasilkan pembebasan haba yang tinggi manakala percampuran kaya bahan api menghasilkan pembebasan haba yang rendah di samping kesan emisi yang tinggi. Kombinasi percampuran bahan api dan udara berlaku dalam nisbah yang tertentu dan dikenali sebagai nisbah bahan api/udara, f/a .

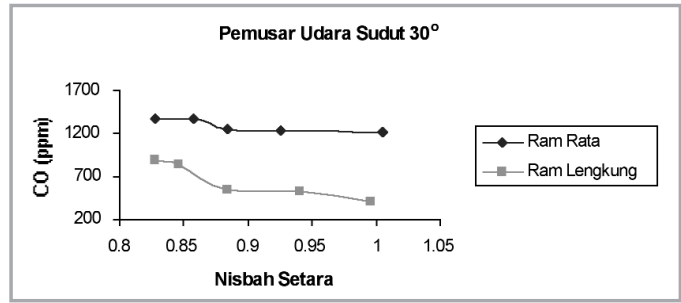
Untuk campuran bahan api dan udara stoikiometri nisbah kesetaraannya ialah 1. Bagi nisbah kesetaraan kurang daripada 1 menandakan campuran adalah cair bahan api manakala nisbah kesetaraan lebih daripada 1 menandakan campuran kaya bahan api.

Hasil pembakaran daripada pembakar akan menghasilkan gas yang tidak dikehendaki iaitu asap, hidrokarbon tak terbakar, karbon monoksida, oksida nitrogen dan oksida sulfur. Kesemua gas ini berbahaya dan mengancam alam sekitar. Pembakaran yang baik dan lengkap akan dapat mengurangkan pembebasan bahan ini.

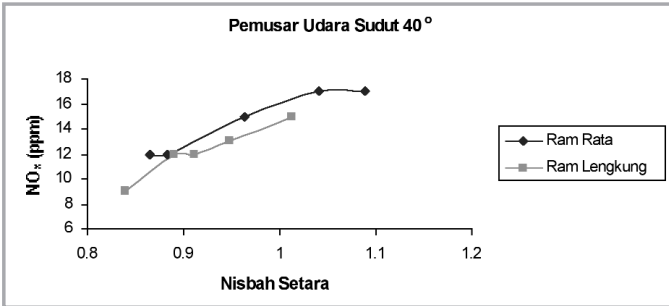
KAJIAN PERBANDINGAN RAM LENGKUNG DAN RAM RATA BAGI PEMUSAR UDARA ALIRAN JEJARIAN DALAM MENGURANGKAN EMISI



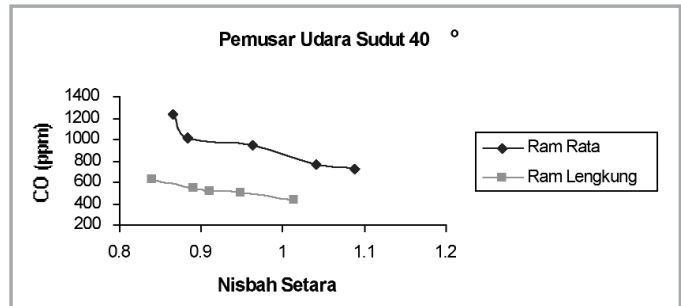
Rajah 4: Graf oksida nitrogen, NO_x melawan nisbah setara, ϕ bagi pemusar udara 30°



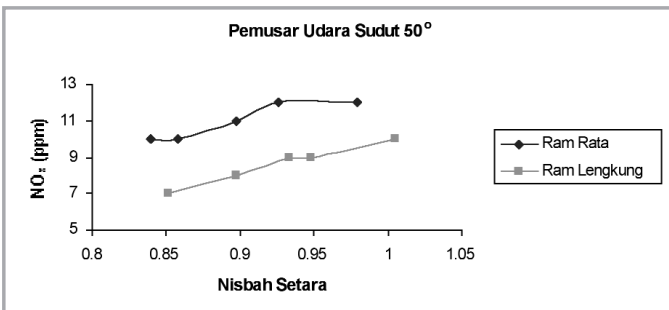
Rajah 8: Graf karbon monoksida, CO melawan nisbah setara, ϕ bagi pemusar 30°



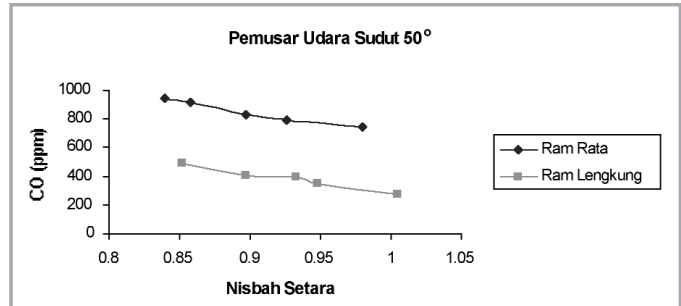
Rajah 5: Graf oksida nitrogen, NO_x melawan nisbah setara, ϕ bagi pemusar 40°



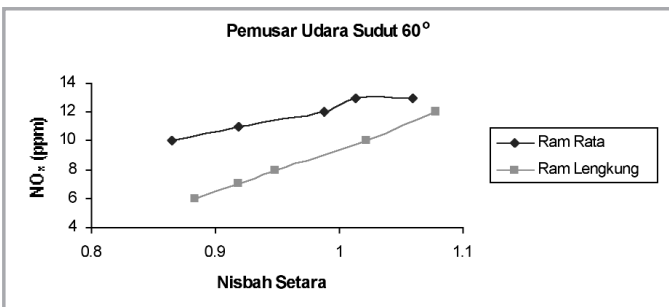
Rajah 9: Graf karbon monoksida, CO melawan nisbah setara, ϕ bagi pemusar 40°



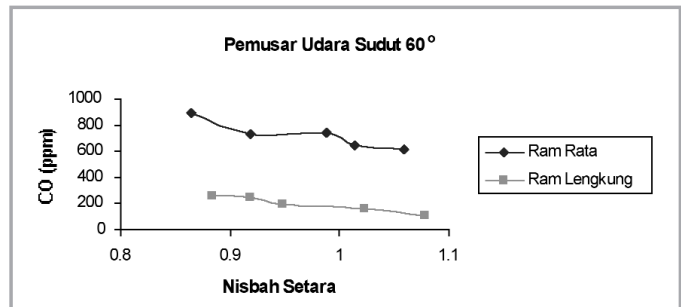
Rajah 6: Graf oksida nitrogen, NO_x melawan nisbah setara, ϕ bagi pemusar 50°



Rajah 10: Graf karbon monoksida, CO melawan nisbah setara, ϕ bagi pemusar 50°



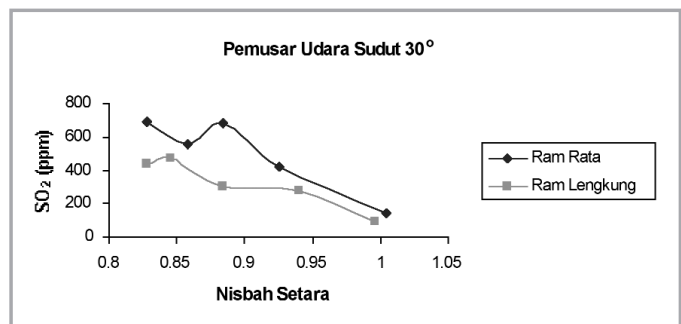
Rajah 7: Graf oksida nitrogen, NO_x melawan nisbah setara, ϕ bagi pemusar 60°



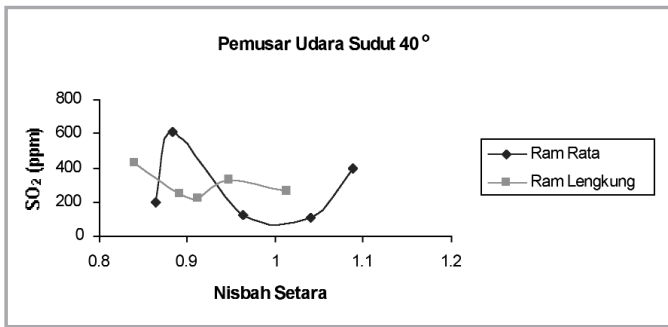
Rajah 11: Graf karbon monoksida, CO melawan nisbah setara, ϕ bagi pemusar 60°

Dari ujikaji yang dijalankan beberapa graf telah diplotkan. Graf-graf ini adalah graf emisi NO_x melawan nisbah setara untuk ram lengkung dan ram rata bagi kesemua sudut pesongan bilah iaitu 30°, 40°, 50° dan 60°. Begitu juga untuk emisi karbon monoksida dan sulfur dioksida untuk keadaan-keadaan yang disebutkan tadi.

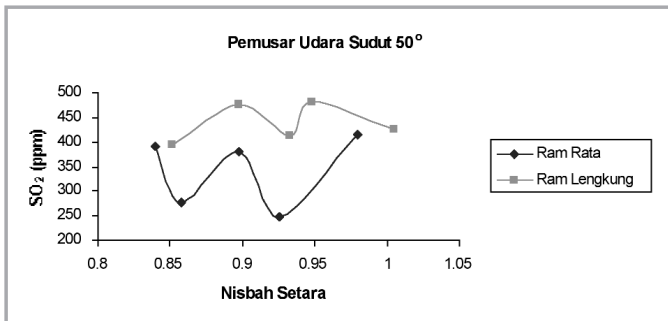
Graf-graf ini (Rajah 4 hingga Rajah 7) diplotkan untuk mendapatkan perbandingan secara khusus bagi setiap sudut pemusar di antara pemusar ram rata dan lengkung. Bagi semua sudut pesongan, pemusar ram lengkung memberikan nilai bacaan NO_x yang lebih rendah berbanding dengan ram rata.



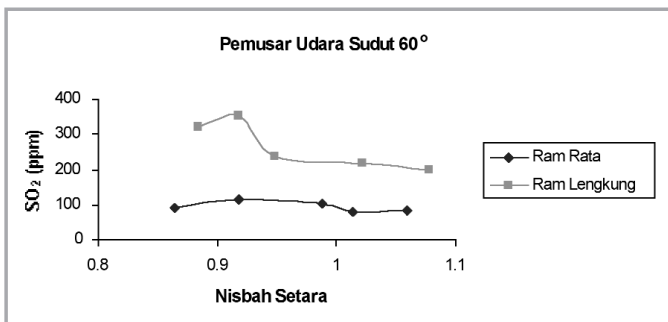
Rajah 12: Graf sulfur dioksida, SO_2 melawan nisbah setara, ϕ bagi pemusar 30°



Rajah 13: Graf sulfur dioksida, SO_2 , melawan nisbah setara, ϕ bagi pemusar 40°



Rajah 14: Graf sulfur dioksida, SO_2 , melawan nisbah setara, ϕ bagi pemusar 50°



Rajah 15: Graf sulfur dioksida, SO_2 , melawan nisbah setara, ϕ bagi pemusar 60°

Nilai NO_x juga meningkat dengan peningkatan nisbah setara. Dapat diperhatikan perbezaan nilai NO_x pada nisbah setara tertentu antara ram lengkung dan rata semakin berkurang dengan pengurangan sudut pesongan bilah. Pemusar 60° memberikan perbezaan tertinggi iaitu 4 ppm maksimum manakala pemusar 30° memberikan perbezaan terendah iaitu 3 ppm maksimum. Pada nisbah setara 0.9 pemusar ram lengkung 60° memberikan penurunan penghasilan bahan cemar tertinggi iaitu 36%. Ini diikuti oleh pemusar 50° , 30° dan 40° masing-masing dengan 27%, 14% dan 13%. Ini menunjukkan perbezaan prestasi pembebasan NO_x bagi pemusar pesongan ram 60° dengan yang lain.

Daripada Rajah 8 hingga Rajah 11 yang telah diplotkan, didapati perbandingan yang dibuat dapat menyerlahkan perbezaan prestasi penghasilan partikel CO antara pemusar udara ram lengkung dengan ram rata untuk setiap sudut pesongan ram. Pemusar udara ram lengkung memberikan nilai bacaan CO yang lebih rendah berbanding dengan pemusar udara ram rata. Dapat diperhatikan juga bagi setiap pemusar, nilai CO berkurang dengan peningkatan nilai setara. Pada nisbah setara 0.9 pemusar ram lengkung 60° memberikan penurunan penghasilan bahan cemar tertinggi iaitu 67%. Ini

diikuti oleh pemusar 30° , 50° dan 40° masing-masing dengan 52%, 51% dan 46%.

Daripada Rajah 12 hingga Rajah 15 yang diplotkan, didapati bahawa terdapat perbezaan yang ketara dalam bentuk graf secara keseluruhannya. Bagi pemusar udara pesongan ram 60° dan 50° , didapati pemusar udara ram rata memberikan nilai SO_2 yang lebih rendah daripada ram lengkung. Bagaimanapun, keadaan ini berubah pada pemusar sudut 40° dan 30° . Pemusar udara ram lengkung memberikan nilai SO_2 yang lebih rendah daripada pemusar udara ram rata. Pada nisbah setara 0.9 pemusar ram lengkung 60° memberikan penurunan penghasilan bahan cemar tertinggi iaitu 67%. Ini diikuti oleh pemusar 40° , 30° dan 50° masing-masing dengan 59%, 55% dan 20%.

Penghasilan partikel seperti oksida nitrogen, NO_x , karbon monoksida, CO dan sulfur dioksida, SO_2 dipengaruhi oleh pengabusan bahan api yang terhasil, pusaran dan kadar alir udara dalam pembakar. Secara umumnya partikel-partikel NO_x wujud melalui pengoksidaan nitrogen di atmosfera dalam kawasan suhu yang panas. Oleh itu partikel ini wujud hanya dalam kawasan tengah pembakar yang panas [1].

Jika dilihat pada Rajah 4 hingga Rajah 15 dapat diperhatikan pemusar udara ram rata menghasilkan partikel NO_x yang lebih tinggi daripada pemusar udara ram lengkung pada sebarang sudut pesongan ram. Kadar ini berubah dengan perubahan sudut ram. Dapat diperhatikan peningkatan penghasilan partikel NO_x dengan pertambahan nilai setara iaitu menghampiri kepada keadaan stoikiometri. Ini dapat dijangkakan kerana pembakaran menghampiri kepada keadaan pembakaran sempurna iaitu campuran lengkap nisbah bahan api. Pada ketika ini pembakaran membebaskan haba pada tahap yang maksimum. Daripada graf yang diplotkan pemusar udara ram lengkung dengan sudut pesongan 60° menghasilkan partikel NO_x yang paling sedikit berbanding dengan pemusar lain.

Sementara itu karbon monoksida, CO pula terbentuk disebabkan oleh kekurangan oksigen yang cukup untuk melengkapkan tindak balas kepada CO_2 . Mengikut teori keseimbangan, pembentukan CO juga berpunca daripada pembakaran bahan api yang tidak lengkap [1]. Hasil keputusan yang diperolehi menunjukkan pembentukan partikel CO untuk pemusar udara ram lengkung lebih rendah berbanding dengan pembentukan partikel CO untuk pemusar ram rata. Ini menunjukkan pembakaran yang berlaku untuk pemusar ram lengkung lebih baik berbanding dengan pembakaran yang berlaku untuk pemusar ram rata. Pemusar udara ram lengkung dengan pesongan sudut ram 60° memberikan bacaan CO terendah berbanding dengan pemusar yang lain.

Pembentukan pembakaran yang baik adalah bergantung kepada percampuran bahan api dan udara yang baik dalam kebuk pembakar. Percampuran bahan api dan udara ini pula bergantung kepada pengabusan bahan api dan kekuatan pusaran udara yang terhasil. Pusaran udara ini dipengaruhi oleh jenis pemusar yang digunakan. Secara teorinya pusaran udara yang terbentuk dari rekabentuk pemusar ram lengkung adalah lebih baik jika dibandingkan jika dibandingkan dengan pusaran yang terhasil daripada pemusar ram rata. Ini disebabkan geometrinya yang berbentuk lengkung menyebabkan aliran udara yang memasuki kebuk pembakar dapat dipesongkan secara perlahan-lahan untuk mewujudkan aliran pusaran yang seragam dalam kebuk pembakar [1, 8].

Bagi sulfur dioksida, SO_2 pula, pemusar udara ram lengkung menunjukkan nilai partikel SO_2 yang lebih rendah

berbanding dengan pemusar ram rata. Ini berlaku hanya untuk pemusar sudut 40° dan 30°. Manakala bagi pemusar sudut 50° dan 60°, nilai SO₂ yang diberikan oleh pemusar ram rata lebih rendah berbanding dengan pemusar ram lengkung. Di samping itu graf yang diplotkan juga tidak mempunyai perubahan data yang konsisten terhadap perubahan nisbah setara dan sudut pesongan ram. Trend perubahan yang tidak berterusan ini mungkin disebabkan terdapat masalah penderia dalam penganalisis gas yang digunakan. Namun dapat dibuat perbandingan mudah bahawa pemusar udara ram lengkung menghasilkan partikel SO₂ yang lebih rendah berbanding dengan pemusar ram rata.

7.0 KESIMPULAN

Dari kajian ini dapatlah disimpulkan bahawa ram lengkung mempamerkan kepekatan emisi yang lebih rendah berbanding ram rata. Ini ditunjukkan oleh pengurangan sebanyak 36%, 67% dan 67% dalam emisi NO_x, CO dan SO₂ masing-masing yang diperolehi dengan menggunakan ram lengkung berbanding dengan ram rata. Kesemua ini dicapai pada sudut pesongan ram 60°. Ini mengesahkan literatur yang dibuat di awal kajian yang mana memperihalkan bahawa ram lengkung menghasilkan emisi yang lebih rendah. Ini disebabkan dalam ram lengkung laluan udara adalah lebih licin secara aerodinamik di mana udara dapat bergerak secara licin melalui saluran pemusar tanpa berlaku banyak kehilangan. Manakala untuk ram rata pula, oleh kerana laluan adalah tegak, maka terdapat sedikit kehilangan semasa udara melalui saluran pemusar udara.

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan setinggi-tinggi terima kasih kepada Kementerian Sains, Teknologi dan Alam Sekitar kerana memperuntukkan geran penyelidikan di bawah projek nombor 08-02-06-0030 EA 207 dan kepada Universiti Teknologi Malaysia kerana menyediakan ruang dan peralatan. ■

RUJUKAN

- [1] Lefebvre, A.H. (1997). "*Pembakaran Turbin Gas*", Skudai, Penerbit UTM.
- [2] Mohd Nazri Mohd Jaafar (1997). "*Emissions from Gas Burner, Their Impact on The Environment and Abatement Techniques: A Review.*", Jurnal Mekanikal, Jun 1997, Jilid 1, Bil. 3, ms 50-70.
- [3] M. N. Mohd-Jaafar, Andrews, G.E. dan MkPadi, M.C. (1999). "*Application of Fuel Staging on Reducing NO_x from Domestic Central Heating Burner System*", Journal of Energy and Environment, November 1999, Vol. 1, ms 17-24.
- [4] Mohammad Nazri Mohd Jaafar, Ismail Samat dan Muhamad Shukri Abdul Mookmin. (2002). "*The Influence of Variable Vane Angle Air Swirler on Reducing Emissions from Combustion Process*", Jurnal Mekanikal, Disember 2002, Bil. 14, ms 93-100.
- [5] Mohammad Nazri Mohd Jaafar, Andrews, G.E. dan MkPadi, M.C. (2000). "*NO_x Emission Reduction from Gas Burner System Applying Water Cooling Technique*", Jurnal Mekanikal, Disember 2000, Jilid 2, Bil. 10, ms 58-72.
- [6] Khandoker Abul Hossain, Mohammad Nazri Mohd Jaafar, Azeman Mustafa dan Farid Nasir Ani. (2005). "*Application of Commercial Grade Ammonia Liquor in the Selective Non-Catalytic Reduction of NO_x in Combusted Gas from a Diesel Burner*", Jurnal Teknologi, Jun 2005, No. 42(A), Penerbit UTM, ms 107-118.
- [7] Glassman, Irvin, (1977), '*Combustion.*', Academic Press.
- [8] Beer. J. M. dan Chigier N. A. (1972). "*Combustion Aerodynamics*". London: Applied Science.
- [9] Mohd Nazri Mohd Jaafar (1998). "*Cold Flow Performance of Radial Swirler Gas Burner System*", Jurnal Teknologi, Jun 1999, No. 30(A), Penerbit UTM, ms 61-74.
- [10] Escott, N. H (1993). "*Ultra Low NO_x Gas Turbine Combustion Chamber Design*" The University of Leeds. Tesis Ph.D
- [11] Roazam Ahmad (2000). "*Merekabentuk Pemusar Udara Untuk Kegunaan Ke atas Pembakar*", Universiti Teknologi Malaysia: Tesis Sarjana Muda.
- [12] Romales Ramli (1998). "*Merekabentuk, Membina dan Menguji Sebuah Unit Pembakar*", Universiti Teknologi Malaysia: Tesis Sarjana Muda.