

KELEBIHAN PEMUSAR UDARA RAM LENGKUNG BERBANDING RAM RATA DALAM MENGURANGKAN EMISI

ISMAIL SAMAT¹ & MOHAMMAD NAZRI MOHD JAAFAR²

Abstrak. Enjin turbin gas digunakan secara meluas dalam bidang industri dan penerbangan. Kecekapan enjin merupakan satu daripada kriteria dalam pemilihan enjin yang baik. Pembakar adalah antara komponen penting dalam enjin turbin gas yang banyak diberikan perhatian oleh penyelidik dalam kajian masing-masing. Pembakar yang baik boleh menghasilkan pembakaran yang sempurna dalam kadar bahan cemar yang minimum. Ini dapat dicapai dengan menggunakan pemusar udara. Oleh itu, dalam kajian ini uji kaji dilakukan untuk mengkaji keberkesanan aplikasi pemusar udara ram lengkung berbanding 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 diperoleh menunjukkan reka bentuk ram lengkung menghasilkan bahan cemar yang lebih rendah berbanding rama rata.

Kata kunci: Pemusar udara, ram lengkung, ram rata, emisi NO_x, emisi CO

Abstract. Gas turbine engine is widely used in the industrial and aviation fields. Engine efficiency is one of the criteria for good engine selection. Combustor is among the vital components in gas turbine engine that has been given attention by researchers in their study. A good combustor should produce a perfect combustion with minimal pollutant emission. This could be achieved with the use of air swirler. Therefore, in this project, a study on the effectiveness of curved vane compared to flat vane swirler application was conducted. The combustion test involved curved and flat vane swirler with variable vane angles. Gaseous emissions level emitted were measured and compared for both swirler. The results obtained indicate that the curver vane produces lower emissions level than the flat vane air swirler.

Keywords: Air swirler, curved vane, flat vane, NO_x emissions, CO emissions

1.0 PENGENALAN

Enjin turbin gas berfungsi dengan menukarkan tenaga bahan api kepada bentuk tenaga yang berguna seperti kuasa mekanikal atau tujuh jet berhalaju tinggi. Enjin turbin gas terdiri daripada pemampat, pembajar, turbin dan nozel.

Pembakar ialah komponen yang penting dalam enjin turbin gas kerana di situ berlakunya pembakaran udara dan bahan api. Gas yang terhasil daripada pembakaran ini menggerakkan turbin dan memberikan tujuh kepada pesawat.

^{1&2} Jabatan Aeronautik dan Automotif, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Skudai, Johor, Malaysia.

Sepanjang setengah abad yang lalu, teknologi pembakar enjin turbin gas dimajukan secara beransur-ansur dan berterusan. Perubahan tidak berlaku secara mendadak kerana [1]:

- (i) Geometri asas pembakar yang terpaksa ditetapkan menurut keperluan supaya panjang dan keluasan hadapannya berada dalam jidar yang ditentukan oleh komponen lain enjin.
- (ii) Reka bentuk pembakar yang perlu dipertimbangkan agar peresap dapat meminimumkan kejatuhan tekanan dan pelapik dapat menyediakan operasi yang stabil dalam jidar nisbah udara bahan api yang luas.
- (iii) Penentuan saiz dan reka bentuk pembakar melibatkan pertimbangan bahan cemar hasil pembakaran.

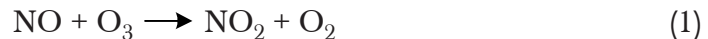
2.0 EMISI

2.1 Bahan Cemar

Bahan cemar yang paling ketara daripada enjin turbin gas ialah asap. Bahan cemar yang lain ialah karbon monoksida (CO), hidrokarbon tak terbakar (UHC), oksida nitrogen (NO_x) dan sulfur dioksida (SO₂). Bahan cemar ini memberikan pelbagai kesan negatif seperti berikut [1]:

- (i) Pancaran asap termasuk partikelnya yang mengotorkan atmosfera dan dipercayai mengandungi karsinogen.
- (ii) Karbon monoksida dan oksida nitrogen membahayakan nyawa binatang dan tanaman.
- (iii) Oksida sulfur (SO_x) yang umumnya terdiri daripada SO₂ dan SO₃ beracun dan mengakis, serta boleh mengakibatkan pembentukan asid sulfurik dalam atmosfera (hujan asid).

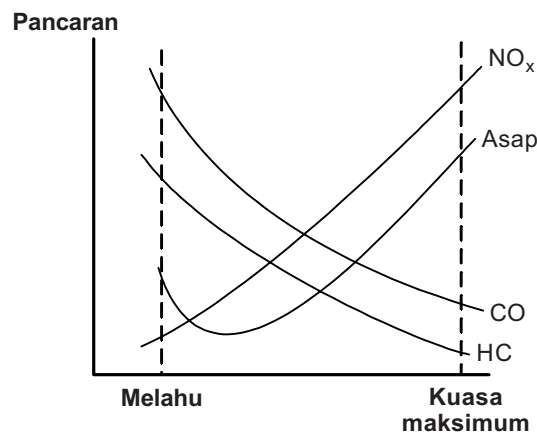
Namun begitu, bahan cemar yang menjadi perhatian di sini ialah NO_x dan tindak balasnya dengan ozon atmosfera. Mekanisme tindak balas ini ditunjukkan seperti berikut:



Tindak balas pertama menunjukkan bagaimana ozon (O₃) dimusnahkan dan tindak balas kedua menunjukkan bagaimana nitrik oksida (NO) dihasilkan semula daripada tindak balas sebelumnya. Oleh itu, pengurangan pencemaran NO_x telah dan masih kekal sebagai matlamat utama pereka bentuk pembakar.

2.2 Mekanisme Pembentukan Bahan Cemar

Tahap keamatan kebanyakan bahan cemar boleh dikaitkan secara langsung dengan suhu, masa dan sejarah keamatan sesuatu pembakar. Sejarah keamatan ini berubah-ubah terhadap sesuatu pembakar dan bagi satu-satu pembakar, ia berubah dengan keadaan operasi. Secara am, keamatan tertinggi bagi karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon tak terbakar (UHC) berlaku pada keadaan kuasa rendah dan berkurang dengan penambahan kuasa [1]. Perkara sebaliknya berlaku terhadap oksida nitrogen (NO_x) dan asap dengan keamatan masing-masing rendah ketika kuasa rendah dan meningkat dengan penambahan kuasa. Corak perubahan ini diberikan dalam Rajah 1.



Rajah 1 Ciri emisi daripada enjin turbin gas [1]

Faktor utama pengawalan bahan cemar daripada pembakar turbin gas boleh dipertimbangkan dalam bentuk:

- (i) Suhu zon utama dan nisbah kesetaraan.
- (ii) Darjah kehomogenan dalam proses pembakaran zon utama.
- (iii) Masa mastautin dalam zon utama.
- (iv) Ciri-ciri lindap kejut dinding pelapik.
- (v) Fungsi zon pertengahan.

Secara umum, terdapat empat permasalahan pencemaran udara iaitu hujan asid, penipisan ozon (O_3), kenaikan suhu bumi (kesan rumah hijau) dan asbut fotokimia.

3.0 PUSARAN

3.1 Aliran Berpusar

Aliran berpusar ialah aliran utama yang dihasilkan oleh pemusar udara di dalam pembakar. Corak aliran yang dihasilkan ini ialah gabungan pusaran dan kerosakan

vorteks. Kerosakan vorteks ialah fenomenon yang terjadi dalam aliran pusar yang menyebabkan ia mengedar semula di kawasan teras apabila jumlah putaran yang diberikan kepadanya adalah tinggi [1].

Aliran berpusar kerap digunakan untuk mengawal nyalaan di kebuk pembakaran. Sifat aerodinamik pada aliran pusar gelora ini ialah hasil gabungan daripada ciri-ciri pergerakan berpusar dan fenomenon gelora bebas yang bertembung dalam aliran jet dan aliran olakan. Sistem gelora berpusar ini boleh dibahagikan kepada beberapa kumpulan iaitu jet gelora berpusar dengan pusar lemah, jet berpusar kuat dengan edaran semula dalaman dan jet gelora dalam edaran berputar [2]. Setiap kes ini terhasil apabila wujudnya keadaan perbezaan ketumpatan antara aliran jet yang memasuki kebuk pembakaran dengan persekitaran daripada dalam kebuk pembakaran.

Percampuran udara dan bahan api yang baik diperoleh dengan mewujudkan aliran berpusar, dan seterusnya mewujudkan aliran berpusar dan kerosakan vorteks. Kelebihan yang diperoleh dengan mewujudkan aliran berputar ini ialah:

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

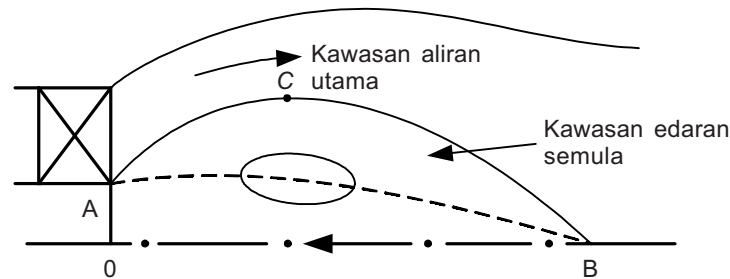
Satu kesan utama aliran berpusar ialah pembentukan zon edaran semula yang bertindak sebagai halangan aerodinamik dengan membantu dalam menstabilkan nyalaan, percampuran udara dan bahan api, serta pengurangan pembentukan bahan cemar. Untuk mendapatkan kestabilan nyalaan pula, kawasan aliran mesti didekati dengan aliran pembakaran mesti sama dengan halaju aliran dan juga sumber haba mesti sesuai untuk memulakan proses pembakaran.

3.2 Pembentukan Pusaran

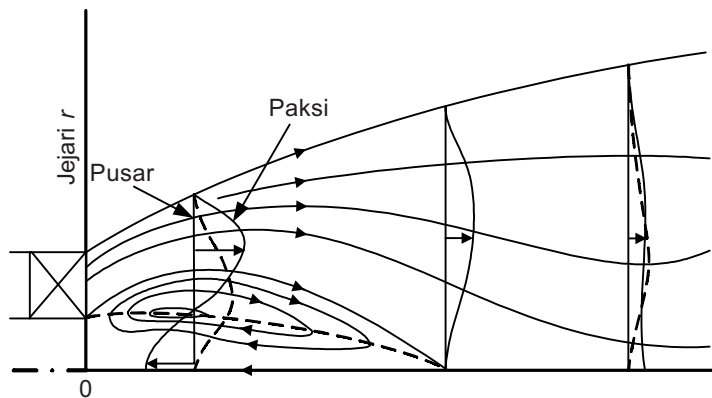
Apabila udara dimasukkan secara tangen ke dalam kebuk pembakaran, ia dipaksa untuk mengubah arah haluan alirannya. Dengan ini, aliran berpusar terbentuk. Keseimbangan tercipta di antara daya empur yang bertindak pada partikel bendalir dengan daya tekanan yang terjadi pada dinding tiub. Keseimbangan daya ini didemonstrasikan oleh pergerakan taburan tekanan statik di 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, maka pada sudut pusar tinggi yang memadai, aliran edaran semula dan vorteks pusar terbentuk. Panjang asas vorteks ini didefinisikan sebagai titik keluar permulaan dari kebuk pembakaran ke titik tempat aliran pembalikan berlaku, bertambah dengan meningkatnya nombor pusar [2].

3.3 Corak Aliran

Kawasan edaran semula dalam aliran bebas putar ditunjukkan dalam Rajah 2 [1]. Oleh sebab aliran dianggap simetri sepaksi, maka hanya separuh corak aliran yang ditinjau. Kawasan edaran semula terkandung dalam lengkung OACB. Titik B dikenali sebagai titik genangan. Aliran di luar kawasan OACB ialah aliran utama yang memandu edaran semula di sepanjang lengkung pepejal AB. Dengan ini tegasan ricih maksimum boleh terjadi hampir pada titik A, di sepanjang sempadan edaran semula. Keadaan halaju paksi sifar diwakili oleh lengkung putus-putus AB. Susuk halaju paksi dan pusat yang biasa ditunjukkan dalam Rajah 3. Semua komponen halaju surut dalam arah muara. Selepas titik genangan, halaju paksi balikan menghilang dan jauh ke muara, puncak susuk halaju paksi berubah ke arah garisan tengah kerana kesan susutan pusaran.



Rajah 2 Kawasan edaran semula dalam medan aliran pusing [1]



Rajah 3 Susuk biasa komponen halaju paksi dan pusar dalam medan aliran pusingan yang kuat [1]

3.4 Nombor Pusing

Nombor pusing ialah nombor parameter tak berdimensi yang merupakan nisbah fluks momentum pusingan aliran paksi terhadap fluks momentum paksi aliran paksi didarab dengan jejari nozel. Kedua-dua fluks momentum ini boleh dipertimbangkan sebagai

ciri-ciri aerodinamik aliran jet. Pembakar mempunyai nombor pular dalam lingkungan 0.6 hingga 2.5. Perwakilan matematik bagi definisi nombor pular diberikan sebagai:

$$S_N = \frac{G_\theta}{G_x R} \quad (3)$$

dengan G_θ ialah fluks arah paksi bagi momentum pular. Dengan memasukkan rangkap tegasan ricih gelora dalam arah $x-\theta$, lalu menjadikan:

$$= \int_0^R (W_r) \rho U 2\pi r dr = \text{malar} \quad (4)$$

dengan G_x ialah fluks arah paksi bagi momentum paksi. Dengan memasukkan rangkap tegasan normal gelora dalam arah x dan rangkap tekanan (tujahan paksi) memberikan:

$$= \int_0^R 2U \rho U \pi dr + \int_0^R 2p \pi dr = \text{malar} \quad (5)$$

dengan R ialah jejari seragam nozel sementara u , v dan w ialah komponen halaju $(x, r, 0)$ dalam arah koordinat kutub dalam bentuk silinder.

Oleh sebab rangkap tekanan dalam Persamaan (5) sukar ditentukan kerana tekanan berubah mengikut kedudukan dalam pularan jet, maka definisi untuk nombor pular boleh dipermudahkan dengan mengabaikan rangkap tekanan tersebut. Nombor pular juga ditakrifkan sebagai:

$$S'_N = \frac{G_\theta}{G'_x R} \quad (6)$$

dengan

$$G'_x = \int_0^R 2U^2 \rho \pi r dr \quad (7)$$

Nombor pular seharusnya boleh ditentukan daripada nilai halaju yang diukur dan daripada susuk tekanan statik. Walau bagaimanapun, keadaan ini biasanya tidak mungkin berlaku kerana keputusan uji kaji yang tidak tepat. Dengan ini, boleh dikatakan bahawa nombor pular yang dikira daripada bentuk geometri kebanyakan penjana pularan boleh diterima. Menurut [3], jika diandaikan bahawa percampuran sempurna berlaku dan perubahan momentum gerakan dapat dikekalkan, maka nombor pular boleh ditakrifkan dalam rangkap geometri sebagai:

$$S_g = \frac{r_o \pi r_e}{A_t} \left[\frac{\text{aliran tangen}}{\text{jumlah aliran}} \right]^2 \quad (8)$$

dengan,

r_e ialah jejari pusaran keluar.
 r_o ialah jejari tangen masukan dari pusat pemusar.
 A_t ialah jumlah luas masukan tangen.

Aliran tangen dan jumlah aliran dikira seperti berikut:

Aliran jisim tangen = $\rho A_{th} V_2 \sin \theta$
 Aliran jisim jejari = $\rho A_{th} V_2 \cos \theta$
 Jumlah aliran jisim = $\rho A_{th} V_2 (\sin \theta + \cos \theta)$

dengan,

V_2 ialah halaju min pada keluaran pemusar.
 A_{th} ialah luas kawasan kerongkong minimum pemusar

Ini memberikan formula berikut untuk nombor pusar geometri:

$$S_g = \frac{r_o \pi r_e}{A_t} \left[\frac{\tan \theta}{1 + \tan \theta} \right]^2 \quad (9)$$

Bentuk nombor pusar geometri yang lain diberikan oleh Al-Kabie [4] dan boleh ditulis sebagai:

$$S_a = \frac{\sin \theta}{1 + 1/\tan \theta} \left[\frac{A_3}{C_c A_2} \right] \quad (10)$$

dengan,

A_3 ialah luas keluaran pemusar
 A_2 ialah luas kawasan kerongkong minimum pemusar
 C_c ialah pekali pengecutan pemusar

Nilai untuk C_c iaitu pekali pengecutan pemusar, C_D iaitu pekali discas pemusar dan seterusnya nombor pusar diperoleh dengan menggunakan Persamaan (7).

Pekali kejatuhan tekanan (K_{th}) boleh ditulis dalam bentuk kadar alir jisim seperti berikut:

$$K_{th} = 2\rho\Delta P \left(\frac{A_2}{\dot{m}} \right)^2 \quad (11)$$

dengan,

ΔP ialah kejatuhan tekanan
 \dot{m} ialah kadar alir jisim

Pekali discas, C_D ditulis sebagai:

$$C_D = \frac{1}{\sqrt{K_{th}}} \quad (12)$$

dengan menggabungkan Persamaan (9) dan Persamaan (10), satu persamaan untuk pekali dalam bentuk kejatuhan tekanan pemusar dan kadar alir jisim udara dapat ditulis sebagai:

$$C_D = \frac{\dot{m}}{A_{th}\sqrt{2\rho\Delta P}} \quad (13)$$

Pekali kejatuhan tekanan boleh juga ditunjukkan dalam bentuk pekali pengecutan, iaitu:

$$K_{th} = \left(\frac{1}{C_C} - \frac{A_{th}}{A_3} \right)^2 \quad (14)$$

Dengan menggabungkan Persamaan (11) dan Persamaan (12), pekali pengecutan dalam bentuk pekali discas, luas kerongkong, dan luas keluaran pemusar dapat ditunjukkan seperti berikut:

$$C_C = \frac{C_D}{1 + \left(\frac{C_D A_{th}}{A_3} \right)} \quad (15)$$

Nilai pekali pengecutan (C_C) adalah bergantung pada nilai pekali discas (C_D) yang diperoleh menerusi uji kaji. Nilai pekali pengecutan yang digunakan dalam Persamaan (8) digunakan untuk menentukan nombor pusar geometri, S_a .

Nombor pusar untuk kebanyakan pemusar biasanya dalam julat 0.6 hingga 2.5. Nilai nombor pusar yang kurang daripada 0.6 dianggap pusaran lemah dan sistem pusaran jenis ini sukar untuk menyebabkan edaran semula apabila dikenakan tekanan paksi. Hanya nombor pusar yang lebih daripada 0.6 berupaya memulakan aliran balikan.

(i) Pusaran lemah ($S < 0.6$).

Dalam sistem pusaran lemah, kecerunan tekanan paksi adalah tidak cukup besar untuk menghasilkan edaran semula dalaman. Pusaran memberikan kesan terhadap kadar penumpuan aliran dan kadar aliran halaju melambat [2].

(ii) Pusaran kuat ($S > 0.6$).

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

Penambahan keamatan aliran pusaran akan menambahkan panjang kawasan edaran semula dan diameternya. Ini berlaku hanya selepas aliran nombor pusar kritikal lebih daripada 0.6. Selepas kawasan edaran semula berada pada keadaan stabil, penambahan nombor pusar yang seterusnya tidak memberikan kesan yang ketara terhadap saiz kawasan itu. Beltagui dan MacCallum [5] menunjukkan bahawa diameter maksimum bagi pusat kawasan edaran semula adalah tidak dipengaruhi oleh penambahan nombor pusar setelah kawasan edaran semula berada dalam keadaan yang stabil. Diameter maksimum bagi kawasan edaran semula dikawal oleh diameter tekak pemusar. Khalil [6] juga menunjukkan kesan yang sama dan didapati terdapatnya hubungan yang linear di antara keamatan pusaran dengan kadar alir jisim purata dan maksimum yang diedarkan semula.

Satu cara untuk meningkatkan nombor pusar adalah dengan menambahkan sudut bilah pandu pemusar. Beberapa kajian menunjukkan kesan penambahan sudut bilah pandu dan didapati sudut bilah pandu yang optimum berlaku di kawasan edaran semula yang maksimum. Rao [7] menjalankan kajian tentang satu julat sudut bilah pandu dari 0° ke 60° . Beliau mendapati bahawa pada sudut bilah pandu 45° , pemusar menghasilkan saiz kawasan edaran semula yang besar. Penambahan seterusnya kepada 60° pula menyebabkan saiz kawasan edaran semula berkurang. Rhode [8] juga membuat kesimpulan yang sama iaitu sudut bilah pandu 45° menghasilkan saiz kawasan edaran semula yang maksimum.

Walau bagaimanapun, Frisker dan Leuckel [9] mempunyai pendapat yang berbeza. Mereka percaya penambahan dalam keamatan pusaran akan membantu pencampuran bahan api dengan udara berbanding cara menghantar kembali aliran gas panas ke tekak pembakar. Claypole dan Syred [3] pula berpendapat dan percaya bahawa nyalaan tidak akan stabil dengan mengedarkan semula spesies aktif panas di kawasan edaran semula pada purata masa yang besar. Sebaliknya, nyalaan distabilkan dengan cara pembentukan kawasan campuran sempurna dengan spesies aktif panas dan reaktan baru isoterma bercampur dengan baik. Walau bagaimanapun, kawasan ini dipengaruhi oleh darjah keamatan pusaran.

Walaupun telah dipersetujui bahawa pusaran menstabilkan nyalaan, Gupta, Sriramulu, dan Domkunwar [10] menyatakan bahawa pusaran yang berlebihan akan

menyebabkan nyalaan lemah dan tidak stabil. Bagi darjah pusaran yang tinggi, vorteks yang mewujudkan edaran semula akan bertambah dari segi saiz. Sebagai tambahan, untuk kestabilan nyalaan, pusaran juga membantu dalam mengurangkan panjang nyalaan. Beltagui dan MacCallum [5] juga menunjukkan kesan yang sama apabila menggunakan suntikan bahan api sisi. Keputusan ini didapati dalam pembakar pendek yang boleh melakukan pembakaran lengkap.

4.0 PEMUSAR UDARA

4.1 Fungsi Pemusar Udara

Satu cara berkesan untuk mengaruh aliran edaran semula seperti ini di zon utama adalah dengan memasang pemusar di kubah sekeliling penyuntik bahan api. 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 kebanyakan peranti pembakaran praktik untuk mengawal kestabilan dan keamatan pembakaran serta saiz dan bentuk kawalan nyalaan.

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 menghasilkan percampuran yang kurang baik. Ini ditentukan dengan kehadiran nyalaan kuning dan sumbangannya terhadap pembentukan pancaran selagi mana masa mastautin semakin meningkat [11]. Tambahan pula nyalaan kuning ialah kawasan yang mempunyai pembakaran yang kurang lengkap semasa melintasi nyalaan dan ini boleh menyebabkan kesan peningkatan terhadap pancaran NO_x .

4.2 Susunan Pemusar

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

4.3 Jenis Pemusar

Jenis reka bentuk pemusar udara bergantung pada kaedah aliran yang digunakan. Terdapat tiga reka bentuk pemusar yang asas iaitu:

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

Secara am, bentuk bilah bagi pemusar udara aliran jejarian terdiri daripada dua iaitu jenis ram rata dan ram lengkung. Kedua-duanya diuji dalam uji kaji ini.

4.4 Parameter Ram (Bilah) yang Mempengaruhi Zon Edaran Semula

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

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

Data uji kaji menunjukkan bahawa saiz edaran semula ditingkatkan oleh [1]:

- (i) Peningkatan pada sudut ram.
- (ii) Peningkatan pada jumlah ram.
- (iii) Pengurangan dalam nisbah (jarak/perentas).
- (iv) Pengurangan pada nisbah aspek ram.
- (v) Penukaran daripada ram rata kepada ram lengkung.

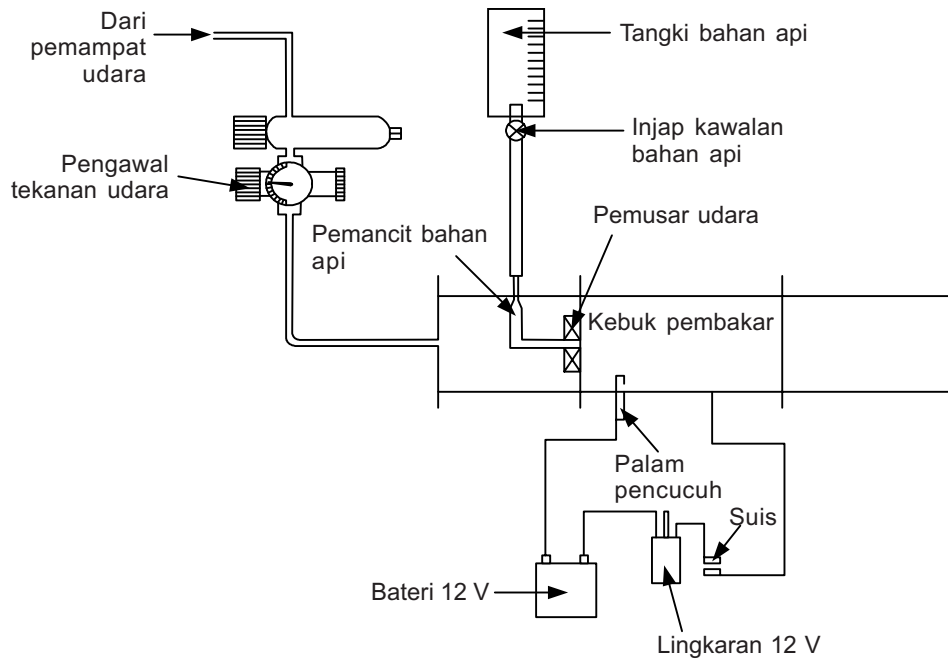
5.0 RIG UJI KAJI

Rajah rig uji kaji pembakar jenis kaleng untuk ujian pembakaran yang dijalankan ditunjukkan dalam Rajah 4. Rig uji kaji tersebut dipasangkan di 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 uji kaji dipasangkan dengan pemancit bahan api jenis memusat. Diameter dalaman kebuk pembakaran ialah 163 mm dan panjangnya ialah 300 mm. Pembakar ini disejukkan secara olakan oleh udara ambien di makmal dan tidak memerlukan kaedah pendinginan yang lain.

Udara yang memasuki kebuk pembakaran melalui kebuk plenum terlebih dahulu, yang mempunyai diameter yang sama dengan kebuk pembakaran. Kebuk plenum ini dipasangkan dengan pemusar udara di satah keluarannya dan pemancit bahan api dengan bahan api cecair dipancarkan.

Kuar pensampelan gas ekzos dipasangkan di bahagian hujung kebuk pembakaran. Penganalisis gas yang digunakan dalam ujian ini ialah jenis penganalisis gas *MSI Dragger* yang mudah alih yang hanya boleh mengukur gas oksida nitrogen, sulfur dioksida dan karbon monoksida. Dengan itu, hanya gas ini yang dibincangkan dalam kertas kerja ini.



Rajah 4 Rig uji kaji pembakar jenis kaleng

6.0 KEADAAN UJI KAJI

Ujian dijalankan pada suhu ambien untuk suhu udara masukan memandangkan tiada alat prapemanas yang digunakan semasa ujian dijalankan. Udara dibekalkan daripada 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 adalah untuk memampatkan bahan api yang dibekalkan supaya terkabus menjadi titisan yang lebih kecil bagi memudahkan pembakaran.

Kerosin digunakan sebagai bahan api untuk keseluruhan ujian yang dijalankan. Parameter yang diubah ialah sudut bilah pemusar udara iaitu 30° dan 60° , jenis ram sama ada lengkung atau rata dan kadar aliran isipadu bahan api untuk melihat kesan keadaan pembakaran kaya dan cair terhadap pembentukan bahan cemar.

7.0 KEPUTUSAN UJI KAJI DAN PERBINCANGAN

Campuran bahan api dan udara di kebuk pembakaran mempengaruhi pembakaran yang diperoleh ketika uji kaji dijalankan. Campuran bahan api dan udara pula dipengaruhi oleh pusaran yang dihasilkan oleh penjana pusar iaitu pemusar udara liran 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.

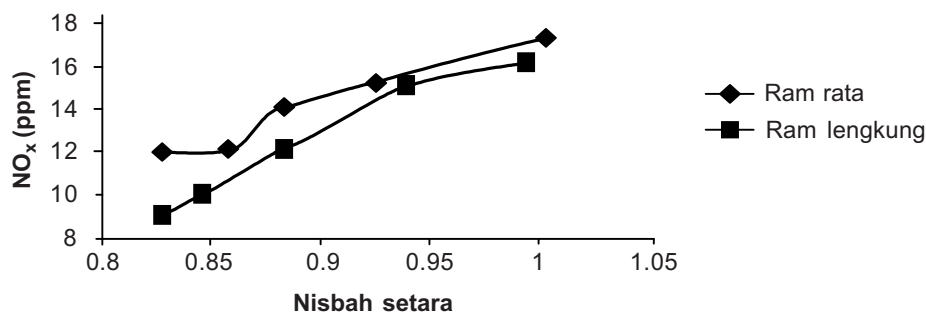
Untuk campuran bahan api dan udara stoikiometri, nisbah kesetaraannya ialah 1. Nisbah kesetaraan kurang daripada 1 menandakan campuran ialah cair bahan api manakala nisbah kesetaraan lebih daripada 1 menandakan campuran kaya bahan api.

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

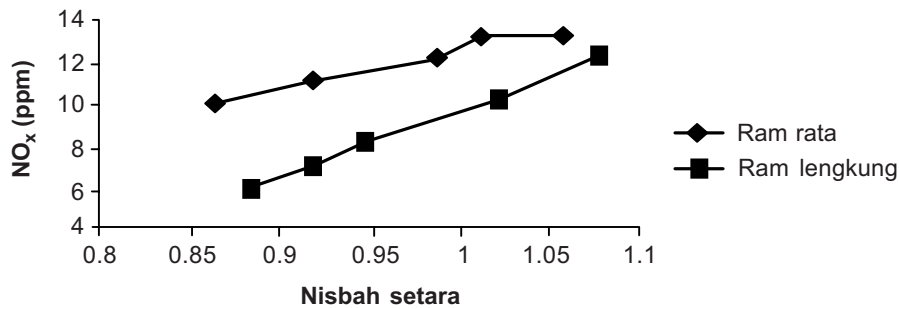
Berdasarkan data yang diperolehi daripada uji kaji yang dijalankan, graf diplotkan untuk mendapatkan perbandingan perbezaan prestasi kedua-dua jenis pemusar. Keputusan uji kaji yang diperolehi menunjukkan bahawa perbezaan jenis dan sudut reka bentuk pemusar udara adalah berbeza dalam mempengaruhi kadar pencemaran pembakaran terhadap alam sekitar. Daripada keputusan yang diperolehi, dapat dilihat reka bentuk pemusar yang paling sesuai untuk digunakan pada enjin turbin gas dalam mengurangkan emisi atau pencemaran.

Daripada uji kaji yang dijalankan, beberapa graf diplot. Graf ini ialah graf emisi NO_x melawan nisbah setara untuk ram lengkung dan ram rata bagi kedua-dua sudut pesongan bilah iaitu 30° dan 60° . Begitu juga untuk emisi karbon monoksida dan sulfur dioksida untuk keadaan yang disebutkan tadi.

Rajah 5 dan Rajah 6 menunjukkan perbandingan secara khusus bagi setiap sudut pemusar di antara pemusar ram rata dengan lengkung yang mengemisi NO_x untuk sudut pesongan 30° dan 60° . Bagi kedua-dua sudut pesongan, pemusar ram lengkung memberikan nilai bacaan NO_x yang lebih rendah berbanding ram rata. Nilai NO_x juga meningkat dengan peningkatan nisbah setara. Dapat diperhatikan bahawa perbezaan nilai NO_x pada nisbah setara tertentu antara ram lengkung dengan 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,



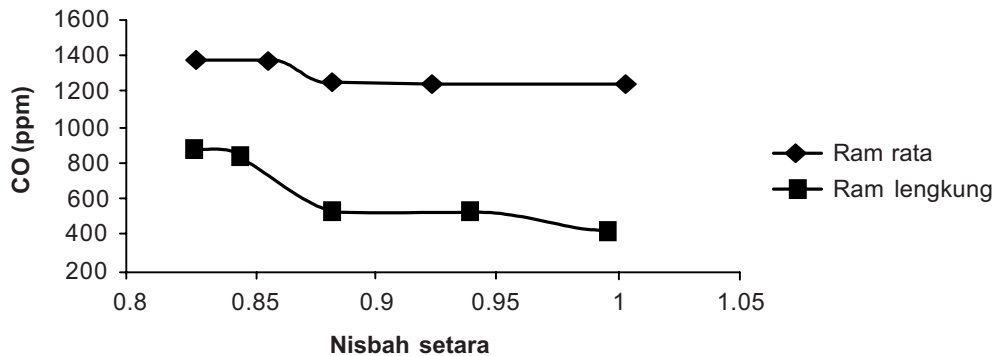
Rajah 5 Oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah setara (ϕ) bagi pemusar udara 30°



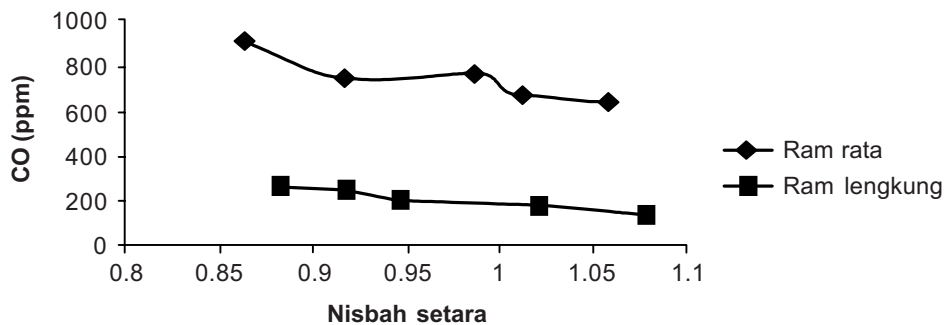
Rajah 6 Oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah setara (ϕ) bagi pemusar udara 60°

pemusar ram lengkung 60° memberikan penurunan penghasilan bahan cemar tertinggi iaitu 36%.

Rajah 7 dan Rajah 8 pula menunjukkan plot emisi karbon monoksida melawan nisbah setara untuk ram lengkung dan ram rata bagi sudut pesongan bilah 30° dan 60° . Daripada graf didapati perbandingan yang dibuat dapat menyerlahkan perbezaan prestasi penghasilan partikel CO antara pemusar udara ram lengkung dengan ram



Rajah 7 Karbon monoksida (CO) melawan nisbah setara (ϕ) bagi pemusar udara 30°

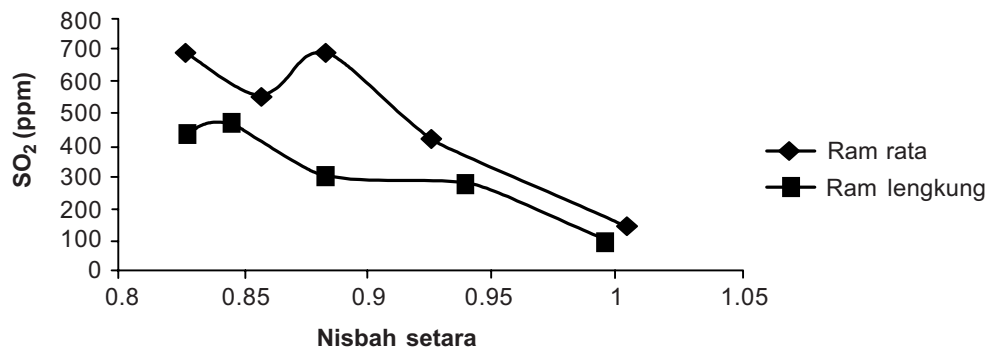


Rajah 8 Karbon monoksida (CO) melawan nisbah setara (ϕ) bagi pemusar udara 60°

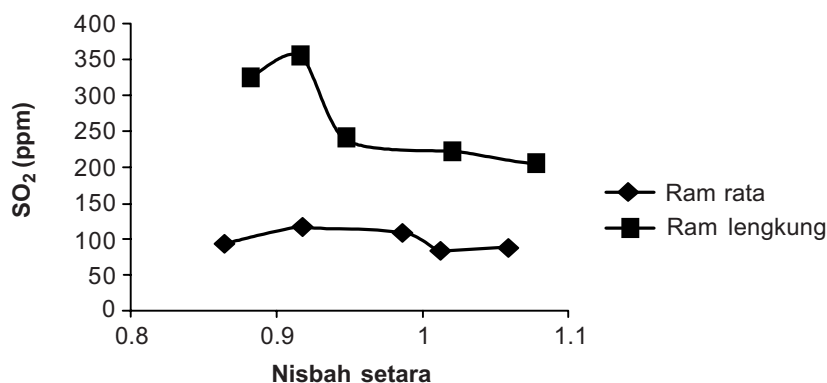
rata untuk kedua-dua sudut pesongan ram. Pemusar udara ram lengkung memberikan nilai bacaan CO yang lebih rendah berbanding pemusar udara ram rata. Dapat diperhatikan juga bagi setiap pemusar, nilai CO berkurang dengan peningkatan nilai setara. Pada nisbah setara 0.9, pemusar ram lengkung 60° memberikan penurunan penghasilan bahan cemar tertinggi iaitu 67%.

Rajah 9 dan Rajah 10 pula menunjukkan plot emisi sulfur dioksida melawan nisbah setara untuk kedua-dua jenis ram dan sudut pesongan bilah. Didapati bahawa terdapat perbezaan yang ketara dalam bentuk graf secara keseluruhan. Bagi pemusar udara pesongan ram 60°, didapati pemusar udara ram rata memberikan nilai SO₂ yang lebih rendah daripada ram lengkung. Walau bagaimanapun, keadaan ini berubah bagi pemusar sudut 30°. Pemusar udara ram lengkung memberikan nilai SO₂ 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%.

Penghasilan NO_x, CO dan SO₂ dipengaruhi oleh pengabusan bahan api yang terhasil, pusan dan kadar alir udara dalam pembakar. Secara umum NO_x wujud melalui pengoksidaan nitrogen dalam atmosfera di kawasan suhu yang panas. Oleh itu, partikel ini wujud hanya di kawasan tengah pembakar yang panas. [1].



Rajah 9 Sulfur dioksida (SO₂) melawan nisbah setara (ϕ) bagi pemusar udara 30°



Rajah 10 Sulfur dioksida (SO₂) melawan nisbah setara (ϕ) bagi pemusar 60°

Jika dilihat pada Rajah 5 hingga Rajah 10, dapat diperhatikan bahawa pemusar udara ram rata menghasilkan NO_x yang lebih tinggi daripada pemusar udara ram lengkung. Dapat diperhatikan juga peningkatan penghasilan partikel NO_x dengan pertambahan nilai setara, iaitu menghampiri keadaan stoikiometri. Ini dapat dijangkakan kerana pembakaran menghampiri keadaan pembakaran sempurna, iaitu campuran lengkap nisbah bahan api. Pada ketika ini, pembakaran membebaskan haba pada tahap yang maksimum.

Sementara itu karbon monoksida pula terbentuk disebabkan oleh kekurangan oksigen 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 diperoleh menunjukkan pembentukan partikel CO untuk pemusar udara ram lengkung lebih rendah berbanding pembentukan partikel CO untuk pemusar ram rata. Ini menunjukkan pembakaran yang berlaku untuk pemusar ram lengkung lebih baik berbanding pembakaran yang berlaku untuk pemusar ram rata. Pemusar udara ram lengkung dengan pesongan sudut ram 60° memberikan bacaan CO lebih rendah berbanding pemusar 30° .

Bagi sulfur dioksida (SO_2), pemusar udara ram lengkung menunjukkan nilai SO_2 yang lebih rendah berbanding pemusar ram rata. Ini berlaku hanya untuk pemusar sudut 30° . Bagi pemusar sudut 60° , nilai SO_2 yang diberikan oleh pemusar ram rata lebih rendah berbanding pemusar ram lengkung. Nilai emisi ini berkurang kerana pembakaran berlaku dengan lebih pantas dan kurangnya unsur sulfur teroksida kepada sulfur dioksida (SO_2).

8.0 KESIMPULAN

Daripada kajian ini dapat disimpulkan bahawa ram lengkung mempamerkan kepekatan emisi yang lebih rendah berbanding ram rata. Ini bersesuaian dengan literatur yang dibuat pada awal kajian yang memerihalkan bahawa ram lengkung menghasilkan emisi yang lebih rendah. Ini kerana dalam ram lengkung, laluan udaranya adalah lebih licin. Sehubungan itu, udara dapat bergerak dengan lancar melalui saluran pemusar tanpa berlakunya kehilangan. Bagi ram rata pula, laluannya 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 bernombor 08-02-06-0061 EA 225 dan juga kepada Universiti Teknologi Malaysia kerana menyediakan ruangan dan peralatan.

RUJUKAN

- [1] Lefebvre, A. H. 1983. *Gas Turbine Combustion*. New York: Hemisphere Publishing.
- [2] Beer, J. M., dan N. A. Chigier. 1972. *Combustion Aerodynamics*. London: Applied Science Publishers Ltd.
- [3] Claypole, T. C., dan N. Syred. 1981. The Effect of Swirl Burner Aerodynamics on NO_x Formation. Eighteenth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 81-89.
- [4] Al-Kabie, H. S. 1989. Radial Swirlers for Low Emissions Gas Turbine Combustion. Ph.D. Thesis. University of Leeds.
- [5] Beltagui, S. A., dan N. R. L. MacCallum. 1988. Characteristics of Enclose Swirl Flames with Peripheral Fuel Injection. *Journal of Institute of Fuel*. 3-16.
- [6] Khalil, K. H., F. M. El-Mahallawi, dan H. A Moneib. 1977. Effect of Combustion Air Swirl on the Flow Pattern in a Cylindrical Oil Fired Furnace. Seventeenth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 135-143.
- [7] Roa, A. N. et al. 1983. Experimental and Theoretical Investigations of Vane-generated Swirling Flows in a Circular Chamber. *Journal of Institute of Energy*. 137-144.
- [8] Rhode, D. L. et al. 1983. Mean Flowfields in Axisymmetric Combustor Geometries with Swirl. *AIAA Journal*. 21(4): 593-600.
- [9] Fricker, N., dan W. Leuckel. 1976. The Characteristics of Swirl-stabilized Natural Gas Flames Part 3: The Effect of Swirl and Burner Mouth Geometry on Flame Stability. *Journal of Institute of Fuel*. 152-160.
- [10] Gupta, M. C., V. Sriramulu, dan V. M. Domkunwar. 1979. Factors Controlling Stability of Swirling Flames at Diffuser in Gas Turbine. *Journal of Institute of Energy*. 17-20.
- [11] Escott, N. H. 1993. Ultra Low NO_x Gas Turbine Combustion Chamber Design. Ph.D. Thesis. University of Leeds.