

KEBERKESANAN PEMBAKARAN UDARA BERPERINGKAT DALAM MENGURANGKAN EMISI DARI PEMBAKAR BERBAHANAPI GAS

Mohammad Nazri Mohd. Jaafar dan Mohd Sharul Sulian

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

ABSTRAK

Process pembakaran dari pembakar yang menggunakan gas sebagai bahanapi berkecenderungan untuk memancarkan emisi yang mengandungi pelbagai bahan cemar seperti NO_x , CO , CO_2 dan sebagainya. Emisi ini perlu dikurangkan kerana kesannya boleh mendatangkan bencana yang buruk ke atas kehidupan di muka bumi. Oleh itu, kajian prestasi bagi pembakar ini amat penting bagi memastikan pembakar dapat beroperasi dengan cekap dalam keadaan penghasilan emisi yang rendah. Ujikaji dijalankan dengan cara mengawal parameter kadar alir udara pada nilai 7, 8, 9, 10 dan 12 g/s. Ujikaji juga turut melibatkan suntikan udara berperingkat bagi mengkaji kesan pengurangan emisi. Hasil ujikaji menunjukkan keadaan pengoperasian pembakar yang optimum adalah pada nisbah kesetaraan 0.86 iaitu pada nilai 17.69 kW

Katakunci : Bahan Api Gas, Emisi NO_x , Pembakar, Pembakaran Udara Berperingkat

ABSTRACT

Combustion process from a gas burner tends to emit emissions containing several different pollutants such as NO_x , CO , CO_2 etc. These emissions must be reduced as they are harmful towards living things. Due to this, a study on the burner performance is very essential to ensure that the burner is able to operate efficiently and producing low emissions level. An experiment has been performed by regulating the airflow rates at 7, 8, 9, 10 and 12 g/s. This experiment also involved injecting secondary air to study the emission reduction. Results obtained showed that the optimum burner operation is at equivalence ratio of 0.86 and at 17.69 kW.

Keywords : Burner, Gas Fuel, NO_x Emission, Staged Air Combustion

1.0 PENGENALAN

Pembakar yang menggunakan gas sebagai bahanapi semakin digunakan secara meluas di Malaysia, sebagai alternatif kepada penggunaan arang dan bahanapi cecair. Ini kerana, pembakaran bahanapi gas tidak membabitkan pembebasan partikel-partikel halus sebagaimana arang, mudah dikawal dan keperluan udara lebihan yang rendah yang membantu dalam meningkatkan kecekapan pembakaran. Penyimpanannya juga tidak serumit bahanapi cecair dan tidak memerlukan ruang yang besar.

Walau bagaimanapun, dalam mana-mana proses pembakaran sekalipun, akan wujud emisi-emisi yang boleh mencemarkan alam sekitar. Paling membimbangkan ialah kewujudan pancaran NO_x . NO_x terhasil akibat daripada pembebasan N_2 yang tidak stabil dan berkecenderungan untuk membentuk konfigurasi oktet yang stabil, maka ia akan bergabung dengan O_2 di udara untuk membentuk NO dan NO_2 atau lebih ringkas sebagai NO_x . Tambahan pula, emisi NO_x akan meningkat di sebalik penurunan emisi CO apabila masa pembakaran bertambah.

Maka kajian ke atas emisi tersebut perlu dilakukan dan salah satu cara untuk mengurangkan dan mengawalinya adalah dengan mengenalpasti parameter-parameter pembakar. Antaranya ialah dengan cara mengawal kadar alir udara. Parameter ini juga boleh menentukan prestasi sesebuah pembakar melalui nisbah kesetaraan di mana ia akan

menentukan sama ada pencampuran yang berlaku di dalam pembakar membentuk campuran kaya bahanapi, stoikiometri atau pun cair bahanapi.

2.0 TEORI

2.1 PEMBAKARAN BAHANAPI GAS

Pembakaran gas berlaku melalui dua cara, bergantung kepada bila bahanapi dan udara dicampurkan. Bila bahanapi dan udara dicampur sebelum proses nyalaan, seperti yang berlaku dalam Penunu Bunsen, pembakaran diteruskan melalui penghidroksilan (*hydroxylation*). Hidrokarbon dan oksigen dari sebatian hidroksil yang menjadi aldehid (*aldehydes*); tambahan haba dan tambahan oksigen menguraikan aldehid kepada H_2 , CO , CO_2 , dan H_2O . Oleh sebab karbon telah ditukarkan kepada aldehid pada peringkat permulaan pencampuran, tiada jelaga boleh terbentuk walaupun sekiranya nyalaan dikenakan proses lindap kejut.

Retak berlaku apabila oksigen ditambah kepada hidrokarbon selepas ia dipanaskan, memecahkan semula hidrokarbon kepada karbon dan hidrogen, di mana apabila ia digabungkan dengan oksigen yang mencukupi, membentuk CO_2 dan H_2O . Jelaga dan karbon hitam akan terbentuk sekiranya oksigen yang tidak mencukupi wujud ataupun jika proses pembakaran dihentikan sebelum lengkap.

Campuran bahan api dan udara di dalam kepek pembakaran mempengaruhi pembakaran yang diperolehi ketika menjalankan ujikaji. Pencampuran bahan api dan udara dikelaskan kepada tiga jenis berdasarkan kepada kandungan bahan api yang digunakan berbanding udara atau oksigen yang dibekalkan. Jenis campuran yang dimaksudkan ialah campuran kaya bahan api, stoikiometri dan cair bahan api (lemah bahan api).

Tahap kandungan bahan api dengan udara ditunjukkan dalam bentuk nisbah bahan api per udara (dalam bentuk jisim), f/a dan nisbah bahan api udara sebenar kepada nisbah bahan api udara stoikiometri sebagai nisbah setara, Φ . Nisbah bahan api per udara boleh didapati melalui pengiraan secara teori ataupun melalui ujikaji. Manakala nisbah kesetaraan pula merupakan perbandingan di antara nisbah bahan api per udara yang didapati melalui pengiraan teori dan ujikaji.

2.2 PEMBAKARAN UDARA BERPERINGKAT

Kaedah pembakaran udara berperingkat adalah salah satu teknik yang berkesan untuk mengawal pancaran iaitu NO_x , CO, asap dan UHC. Udara berperingkat adalah berkaitan dengan pembekalan udara kedua atau mungkin sehingga mencapai ketiga dengan tujuan untuk menambahkan kandungan O_2 di dalam kepek.

Apabila sebahagian daripada bahan bakar habis bertindakbalas dengan udara bekalan utama, udara tambahan dimasukkan bertujuan untuk membolehkan kesemua bahan bakar bertindakbalas dengan lengkap untuk menghasilkan tindakbalas stoikiometri.

2.2.1 KESAN UDARA BERPERINGKAT KE ATAS EMISI NO_x

Gas NO_x terhasil daripada tindakbalas yang berlaku antara O_2 dan N_2 di dalam kepek pada suhu yang tinggi iaitu 1800K dan ke atas. Oleh itu perlu dikurangkan atau dilambatkan masa untuk mencapai suhu puncak ini yang akan dapat mengurangkan kadar penghasilan NO_x . Kaedah yang berkesan ialah dengan menggunakan udara berperingkat.

Dengan cara ini, pembakaran udara yang mencukupi dapat dilakukan tanpa menambahkan suhu kepek secara mendadak. Pada tahap pembakaran utama iaitu semasa udara utama dibekalkan, sebahagian bahan api terbakar di samping meningkatkan suhunya sehingga semua O_2 habis terbakar. Pada ketika ini apabila udara tambahan dibekalkan ia akan melengkapkan proses pembakaran tadi. Semasa udara kedua

dibekalkan, sebahagian haba semasa pembakaran utama tadi dibebaskan akibat tindakan keseimbangan terma dengan udara yang dimasukkan tadi yang menyebabkan masa untuk mencapai suhu puncak semakin bertambah dan mengurangkan suhu kepek yang dapat mengurangkan penghasilan NO_x . Ini berbeza sekiranya sejumlah udara yang banyak dibekalkan sekaligus dengan tujuan untuk menghasilkan pembakaran yang lengkap tetapi pada masa yang sama meninggikan suhu pembakaran akibat masa untuk mencapai suhu puncak yang singkat dan suhunya bertambah apabila pembakaran terus dilakukan.

2.2.2 KESAN UDARA BERPERINGKAT KE ATAS EMISI CO

Terdapat 2 faktor utama penghasilan CO iaitu:

1. Kekurangan bekalan udara yang mengurangkan O_2 dan menghadkan pengoksidaan karbon di dalam bahan bakar.
2. Suhu pembakaran yang rendah di mana suhu yang tinggi diperlukan untuk menghasilkan CO_2 .

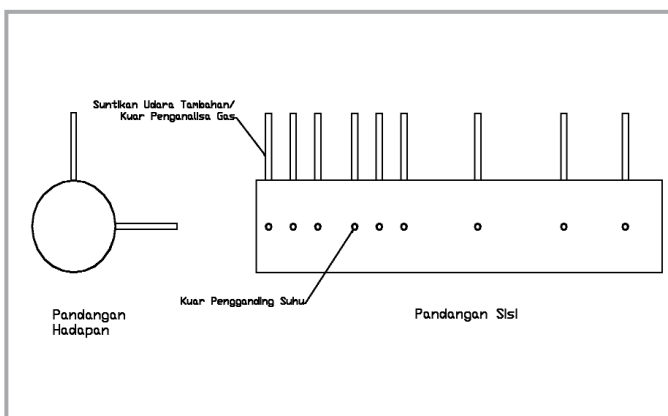
Apabila udara berperingkat dibekalkan maka nisbah udara bahan api akan bertambah dan menambahkan kandungan O_2 dalam kepek yang secara teorinya boleh mengurangkan pancaran CO, tetapi telah dibincangkan sebelum ini bahawa dengan menggunakan udara berperingkat akan mengurangkan suhu kepek. Oleh itu pada peringkat pertama pembakaran iaitu udara utama digunakan maka kadar penghasilan CO adalah tinggi akibat kandungan O_2 yang kurang. Namun apabila udara tambahan dibekalkan lebih banyak O_2 yang dibekalkan dan apabila suhu kepek telah stabil dan mencapai suhu yang tinggi maka CO yang terbentuk akan bertindakbalas dengan O_2 untuk menghasilkan CO_2 .

2.2.3 KESAN UDARA BERPERINGKAT KE ATAS UHC DAN ASAP

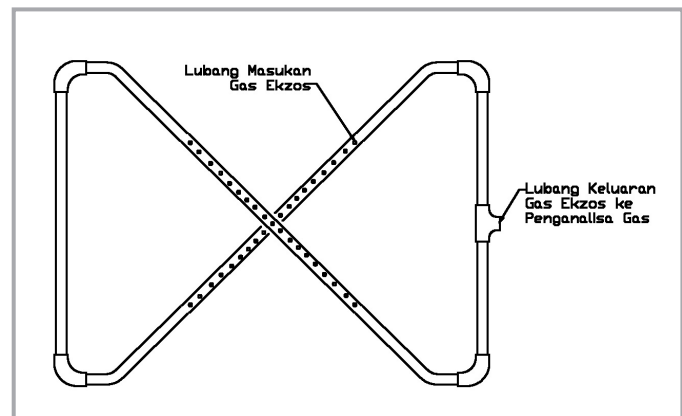
Dengan nisbah udara bahan api yang tinggi, ia dapat mengurangkan penghasilan hidrokarbon tidak terbakar. Udara tambahan yang dibekalkan akan bertindakbalas dengan UHC untuk membentuk wap air (H_2O) dan karbon dioksida (CO_2).



Persamaan (1) menunjukkan pembakaran lengkap yang tidak menghasilkan C manakala persamaan (2) adalah pembakaran tidak lengkap yang menghasilkan C. Udara tambahan juga dapat mengelakkan dari berlakunya asap hitam kerana bekalan O_2 yang mencukupi.

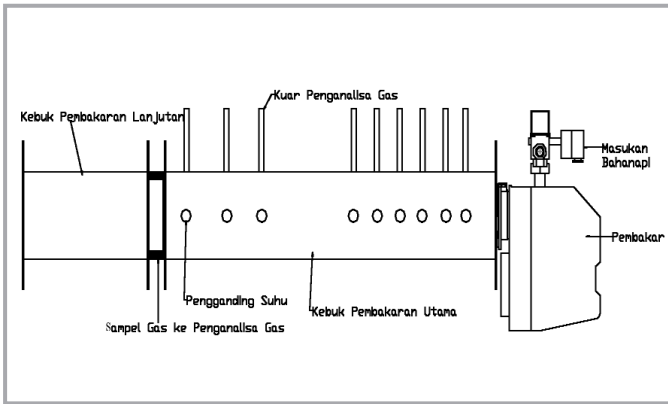


Rajah 1: Rekabentuk kepek pembakaran utama



Rajah 2: Rekabentuk kuar penyampelan purata gas

KEBERKESANAN PEMBAKARAN UDARA BERPERINGKAT DALAM MENGURANGKAN EMISI DARI PEMBAKAR BERBAHANAPI GAS



Rajah 3: Rig ujikaji keseluruhan

3.0 PROSES REKABENTUK, BAHAN DAN FABRIKASI

3.1.1 REKABENTUK KEBUK PEMBAKARAN

Dalam kajian ini 2 buah kebuk pembakaran dihasilkan iaitu bahagian utama dan bahagian lanjutan di mana setiap satunya berbeza dimensi dari segi panjangnya. Pada kedua-dua sisi kebuk-kebuk pembakaran terdapat bebibir (*flange*). Cuma pada kebuk pembakaran utama terdapat tambahan komponen iaitu tiub geronggong bagi tujuan pengukuran suhu dan tekanan.

3.1.2 REKABENTUK KUAR PENYAMPELAN PURATA GAS (*MEAN GAS SAMPLING PROBE*)

Rekabentuk kuar penyampelan purata gas adalah sama seperti yang digunakan oleh [1, 4], cuma yang menjadi perbezaan adalah kuar ini tidak disejukkan dengan air maka terdapat beberapa modifikasi kepada rekabentuk. Kuar ini mempunyai 40 lubang bermula dari tengahnya dengan setiap sisi mempunyai bilangan lubang yang sama.

4.0 METODOLOGI UJIKAJI

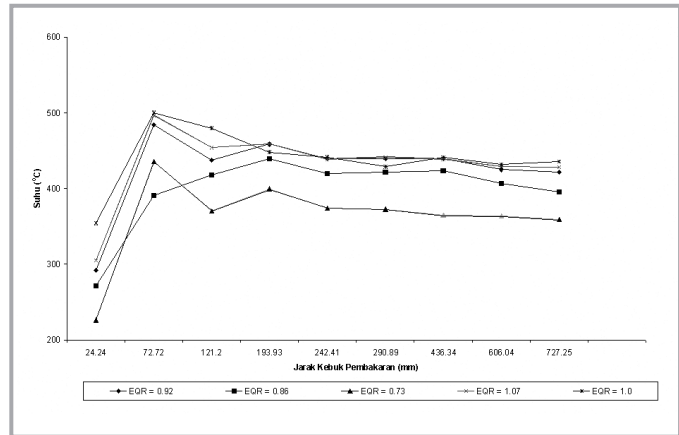
Dalam kajian ini parameter yang dikawal adalah kadar alir udara. Ini adalah kerana kadar alir memainkan peranan penting dalam mempengaruhi kecekapan ujikaji kerana ia mempengaruhi suhu kebuk yang turut mempengaruhi kadar penghasilan gas-gas emisi. Bagi kadar alir udara berperingkat pula, ia ditetapkan pada 40 l/s kerana pada nilai ini, suntikan ke dalam kebuk pembakaran yang lebih mantap dapat dibekalkan. Kadar alir udara diukur dengan menggunakan tiub pitot. Tempat di mana udara kedua ini disalurkan juga mempengaruhi keputusan ujikaji kerana ia mempengaruhi tindakbalas pengoksidaan yang berlaku di dalam kebuk.

Ujikaji dijalankan dengan dua objektif; untuk mendapatkan profil suhu bagi menentukan keberkesanan suntikan udara berperingkat melalui pengurangan emisi dan juga kuasa keluaran optimum pembakar.

5.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

5.1 PROFIL SUHU

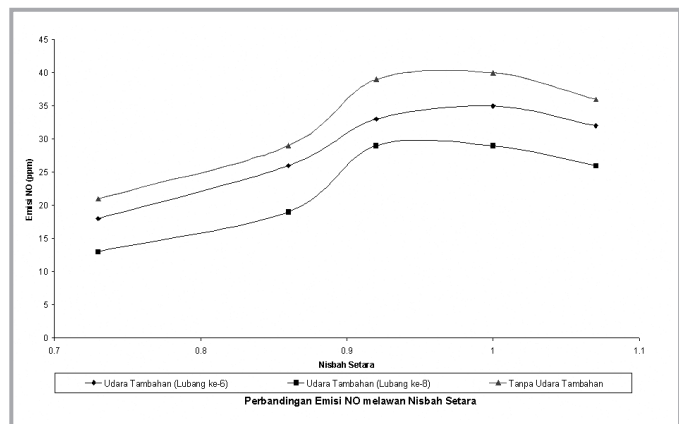
Dengan menetapkan kadar alir bahanapi pada 0.03 kg/min, didapati profil suhu bagi nisbah setara 0.73, 0.86, 0.92, 1.0 dan 1.07 memberikan corak yang hampir sama di mana pada lubang ke-1, ke-2, ke-3, ke-4 dan ke-5, suhu yang dicatatkan tidak stabil (Rajah 4). Ini kerana pada lubang-lubang ini bentuk nyalaan masih lagi wujud. Berbeza pula pada lubang ke-6 dan seterusnya di mana



Rajah 4: Profil suhu melawan jarak kebuk pembakaran

pembakaran tidak lagi berlaku pada kawasan ini maka oleh sebab itu dapat diperhatikan suhu di lingkungan kawasan ini adalah stabil dan hampir sekata. Oleh itu, dapat dibuat rumusan bahawa lubang yang paling efisien untuk disuntik dengan udara berperingkat bagi tujuan pengurangan emisi adalah pada lubang ke-6.

Diperhatikan juga pada $\Phi = 1.0$ memberikan nilai taburan data yang paling tinggi berbanding pada Φ yang lain. Ini adalah kerana pada nilai tersebut, pembakaran adalah stoikiometri di mana oksigen telah terbakar dengan selengkapnya dan melepaskan semua haba pendam pembakaran bahanapi.



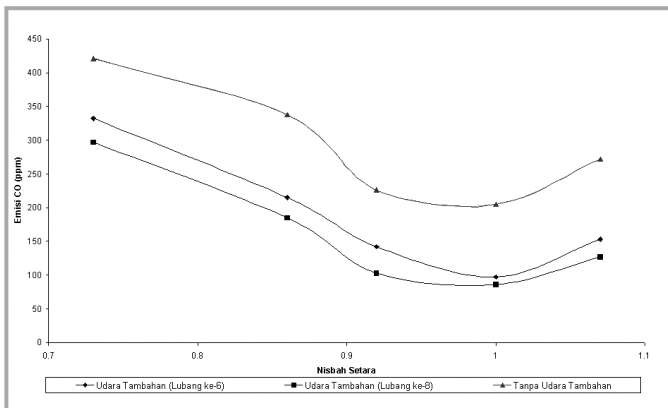
Rajah 5: Perbandingan emisi NO melawan nisbah setara

5.2 EMISI NO MELAWAN NISBAH SETARA

Merujuk kepada Rajah 5, didapati terdapat 2 corak bagi graf yang telah diplotkan di mana pada nilai Φ yang kurang dari 1, bentuknya adalah garis linear dengan kecerunan positif manakala bagi nilai Φ yang besar dari 1, bentuk yang sama tetapi dengan kecerunan yang berbeza terhasil.

Graf yang diplotkan juga menunjukkan perbandingan nilai emisi bagi pembakaran tanpa suntikan udara berperingkat dan pembakaran dengan udara berperingkat. Walau pun berlaku kenaikan emisi pada Φ yang kurang dari 1, tetapi jika dibandingkan dengan pembakaran tanpa udara berperingkat, pembakaran dengan udara berperingkat telah menunjukkan pengurangan emisi. Pengurangan emisi sebanyak 14.3%, 10.4%, 15.4% dan 12.5% dialami dengan suntikan udara berperingkat pada lubang ke-6 manakala sebanyak 38.1%, 34.5%, 25.6% dan 27.5% bagi pembakaran dengan udara tambahan pada lubang ke-8. Begitu juga yang berlaku pada Φ yang besar dari 1 di mana pengurangan sebanyak 11.1% dan 27.8%, masing-masing dengan udara

tambahan pada lubang ke-6 dan 8. Kenaikan pancaran emisi ini berlaku disebabkan oleh peningkatan suhu pada Φ yang berbeza.



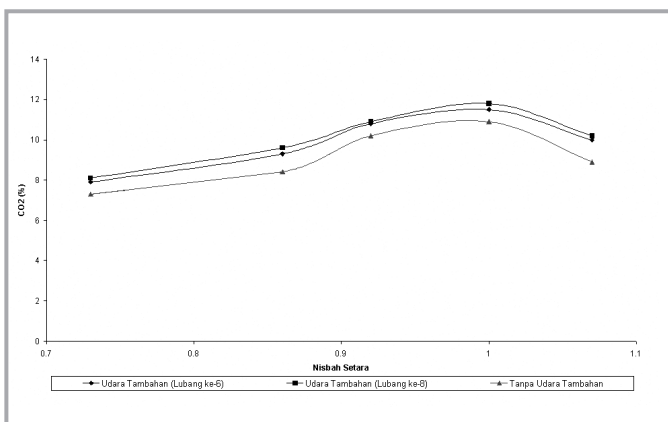
Rajah 6: Perbandingan emisi CO melawan nisbah setara

5.3 EMISI CO MELAWAN NISBAH SETARA

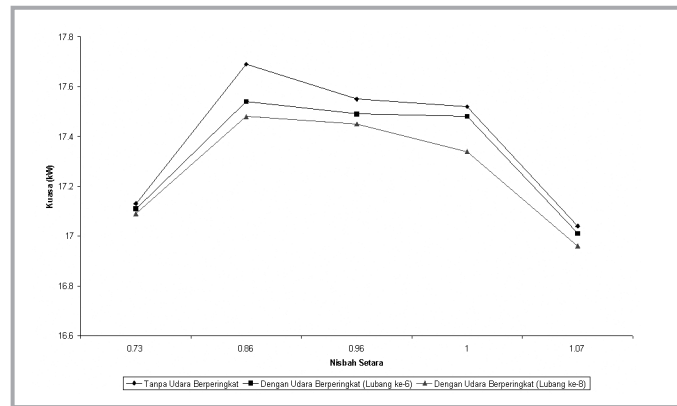
Berdasarkan Rajah 6, corak yang serupa juga diplotkan tetapi merupakan keterbalikan daripada Rajah 5 di mana pada nilai Φ yang kurang dari 1, bentuknya adalah garis linear dengan kecerunan negatif manakala bagi nilai Φ yang besar dari 1, bentuk yang sama tetapi dengan kecerunan yang berbeza terhasil. Ini diperkuatkan lagi oleh teori di mana sebarang peningkatan pancaran NO akan mengurangkan pancaran CO.

Graf yang diplotkan juga menunjukkan perbandingan nilai emisi bagi pembakaran tanpa suntikan udara berperingkat dan pembakaran dengan udara berperingkat. Sama seperti yang berlaku pada emisi NO, pembakaran dengan udara berperingkat telah menunjukkan pengurangan emisi jika dibandingkan dengan pembakaran tanpa udara berperingkat. Pengurangan emisi sebanyak 21.1%, 36.4%, 37.2% dan 52.7% dialami dengan suntikan udara berperingkat pada lubang ke-6 manakala sebanyak 29.5%, 45.3%, 54.4% dan 58.6% bagi pembakaran dengan udara tambahan pada lubang ke-8. Begitu juga yang berlaku pada Φ yang besar dari 1 di mana pengurangan sebanyak 43.8% dan 53.3%, masing-masing dengan udara tambahan pada lubang ke-6 dan 8.

Diperhatikan pada Φ yang lebih besar dari 1 berlakunya peningkatan pancaran CO. Ini adalah kerana pada nilai tersebut campuran bahanapi-udara adalah kaya bahanapi, maka oleh sebab itu kuantiti CO yang banyak akan terpancar daripada proses pembakaran akibat kekurangan oksigen yang mencukupi untuk melengkapkan tindakbalas dari CO kepada CO₂.



Rajah 7: Perbandingan CO₂ melawan nisbah setara



Rajah 8: Perbandingan kuasa keluaran pembakar

5.4 EMISI CO₂ MELAWAN NISBAH SETARA

Terdapat perubahan yang tidak begitu ketara ke atas peratusan CO₂ yang terhasil dari proses pembakaran baik tanpa udara tambahan mahupun dengan udara tambahan. Setelah mengambil kira data penyesuaian terbaik, graf linear diplotkan (Rajah 7). Jika dibandingkan dengan pembakaran tanpa udara berperingkat, didapati berlaku kenaikan peratusan CO₂ sebanyak 7.6%, 9.7%, 5.6%, 5.2% dan 11% bagi pembakaran dengan suntikan udara tambahan pada lubang ke-6, manakala bagi pembakaran dengan udara tambahan pada lubang ke-8 pula, perbezaan peratusan CO₂ yang dicatatkan ialah 13.7%, 12.5%, 6.4%, 7.6% dan 12.8%.

Ini berlaku kerana apabila udara tambahan dibekalkan lebih banyak O₂ yang dibekalkan dan apabila suhu kebuk stabil dan mencapai suhu yang tinggi maka CO yang terbentuk akan bertindakbalas dengan O₂ untuk menghasilkan CO₂. CO₂ merupakan gas yang stabil dan tidak bertoksid. Walaupun ia tidak memancarkan emisi, akan tetapi ia merupakan salah satu daripada komponen gas rumah hijau dan boleh mempengaruhi perubahan suhu muka bumi.

5.5 KUASA KELUARAN PEMBAKAR

Kuasa keluaran pembakar dikira berdasarkan Hukum Pertama Termodinamik bagi Sistem Aliran Mantap. Suhu keluaran kebuk pembakaran dijadikan asas untuk memperolehi nilai kuasa tersebut.

Daripada Rajah 8, diperhatikan bahawa taburan data bagi pembakaran tanpa suntikan udara berperingkat yang tidak wuhud di mana kuasa keluaran pembakar yang terhasil ialah 17.13 kW, 17.69 kW, 17.55 kW, 17.55 kW dan 17.04 kW, masing-masing pada Φ 0.73, 0.86, 0.92, 1.0, dan 1.07. Maka di sini fspy disimpulkan bahawa kuasa keluaran yang paling efisien adalah pada $\Phi = 0.86$. Berkemungkinan taburan data yang terhasil adalah disebabkan oleh perbezaan bilangan mol bagi komposisi elemen dan gas dalam persamaan pembakaran bagi Φ yang berbeza.

Dengan merujuk pada bahagian 2.3, kesemua nilai kuasa yang terhasil termasuk dalam julat yang ditetapkan, tetapi pada nilai yang agak rendah jika dibandingkan dengan nilai kuasa maksimum pada spesifikasi pembakar. Ini adalah kerana kadar alir bahanapi yang rendah digunakan iaitu 0.33 kg/min.

Jika dibandingkan kuasa keluaran bagi pembakaran tanpa dan dengan suntikan udara berperingkat, suntikan udara tambahan akan menyebabkan kuasa keluaran bagi kesemua nilai nisbah setara yang dikaji adalah lebih rendah. Ini kerana ia telah menyebabkan suhu kebuk berkurang dan akan memberi kesan kepada persamaan Sistem Aliran Mantap untuk memperolehi nilai kuasa keluaran pembakar tersebut.

6.0 KESIMPULAN

Secara keseluruhan, kajian ini telah berjaya mencapai objektifnya iaitu mengkaji prestasi pembakar berbahanapi gas dengan cara menentukan keadaan operasi yang optimum bagi pembakar dengan kawalan kadar alir udara yang menjadi parameter penting bagi ujikaji ini. Keberkesanan kaedah suntikan udara berperingkat ke dalam kebuk pembakaran bagi pengurangan emisi dengan cara 'post-flame reduction' telah dapat diperhatikan dan dikaji.

Didapati secara ujikaji, kesemua keadaan pembakaran memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan dengan keadaan pengoperasian yang maksimum adalah pada kadar alir udara 8 g/s iaitu sebanyak 17.69 kW. Walaupun nilai yang dicatatkan berada dalam julat yang rendah, kuasa yang lebih besar akan dapat diperolehi sekiranya kadar alir bahanapi turut ditingkatkan.

Dibuktikan juga dengan suntikan udara berperingkat, nilai pancaran NO dan CO telah dapat dikurangkan dengan peratus pengurangan yang agak besar iaitu sebanyak 14.3%, 10.4%, 15.4%, 12.5% dan 11.1% bagi pancaran NO manakala bagi CO pula sebanyak 21.1%, 36.4%, 37.2%, 52.7% dan 43.8%, masing-masing dengan nisbah setara pada 0.73, 0.86, 0.92, 1.0 dan 1.07 di lubang ke-6. Maka adalah benar seperti yang digariskan di dalam teori bahawa penambahan udara berperingkat berperanan dalam mengurangkan pancaran emisi. ■

REFERENCES

- [1] Ahmad Suhaimi Abd. Rahim (1994), *Gaseous Fuel Gas Turbine For Low Emissions*, Department of Fuel and Energy, University of Leeds, Tesis PhD. (Page 51-55)
- [2] Cengel, Y. A dan Boles, M. A. (2002), *Thermodynamics: An Engineering Approach (4th Edition)*, McGraw-Hill. (Page 711-720)
- [3] Lefebvre, A. H. (1983), *Gas Turbine Combustion*, McGraw-Hill. (Page 562-565)
- [4] Lister, D.H. dan Wedlock, M.I. (1978), *Measurement of Emissions Variability of a Large Aero-Engine*, ASME Paper No. 78-GT-75.
- [5] Mohammad Nazri Mohd Jaafar dan Romales Ramli (Disember 1998), *Bilangan 6: Membangunkan Sebuah Unit Pembakar Jenis Kaleng*, Jurnal Mekanikal, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia. (Page 55-73)
- [6] Raymond, C dan Kagel, R (1990), *Emission From Combustion Processes: Origin, Measurement, Control*, Lewis Publishers Inc.

CONGRATULATIONS MESSAGE

The Standing Committee on Information and Publications would like to congratulate the following members for completing the IEM Readership Survey 2005 in time and winning the Lucky Draw for the limited prizes.

3 x 256 MB USB Thumb Drive

- 1) Ir. Fuad bin Abas (F05492)
- 2) Ir. Lee Lih Cheran (M03726)
- 3) Ir. Ku Mohammad Sani bin Ku Mahmud (M22008)

10 x IEM Souvenir

- 1) Ir. Selva Gunalan s/o Seliah (M16630)
- 2) Ir. Dorhat bin Rahani (M06664)
- 3) Ir. Hong Kok Kiong (M19304)
- 4) Ir. Ngo Kia Sing (M16907)
- 5) Ir. Noorul Nazir bin Mohd. Noor (M24803)
- 6) Ir. Tey Kim En (F04781)
- 7) Ir. Gu Hock Soon (M05706)
- 8) Sdr. Ng Tien Giem (G19680)
- 9) Ir. Khairulezuan bin Harun (M12874)
- 10) Ir. Boon Suan Duan (M08171)

To all the others who have also returned their survey forms, we thank you for your effort and time to contribute towards the success of the survey.