

UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA

BORANG PENGESAHAN
LAPORAN AKHIR PENYELIDIKAN

TAJUK PROJEK : CIRI-CIRI PEMBAKARAN UDARA BERPERINGKAT KE ATAS
PEMBAKAR BERBAHAN API GAS

Saya MOHAMMAD NAZRI MOHD JAAFAR
(HURUF BESAR)

**Mengaku membenarkan Laporan Akhir Penyelidikan ini disimpan di Perpustakaan
Universiti Teknologi Malaysia dengan syarat-syarat kegunaan seperti berikut :**

1. Laporan Akhir Penyelidikan ini adalah hakmilik Universiti Teknologi Malaysia.
2. Perpustakaan Universiti Teknologi Malaysia dibenarkan membuat salinan untuk tujuan rujukan sahaja.
3. Perpustakaan dibenarkan membuat penjualan salinan Laporan Akhir Penyelidikan ini bagi kategori TIDAK TERHAD.
4. * Sila tandakan (/)

SULIT

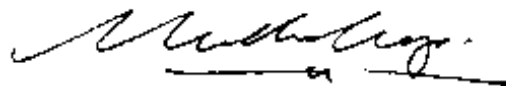
(Mengandungi maklumat yang berdarjah keselamatan atau Kepentingan Malaysia seperti yang termaktub di dalam AKTA RAHSIA RASMI 1972).

TERHAD

(Mengandungi maklumat TERHAD yang telah ditentukan oleh Organisasi/badan di mana penyelidikan dijalankan).

TIDAK TERHAD

TANDATANGAN KETUA PENYELIDIK



Nama & Cop Ketua Penyelidik

Tarikh : 01/02/2006

MOHAMMAD NAZRI MOHD JAAFAR
Ketua Projek
Fakulti Kejuruteraan Mekanikal
Universiti Teknologi Malaysia
81310 UTM Skudai, Johor

CATATAN : * Jika Laporan Akhir Penyelidikan ini SULIT atau TERHAD, sila lampirkan surat daripada pihak berkuasa/organisasi berkenaan dengan menyatakan sekali sebab dan tempoh laporan ini perlu dikelaskan sebagai SULIT dan TERHAD.

**CIRI-CIRI PEMBAKARAN UDARA BERPERINGKAT KE ATAS PEMBAKAR
BERBAHAN API GAS**

PENYELIDIK:

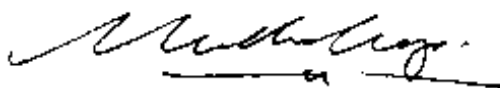
**PROF. MADYA DR. MOHAMMAD NAZRI MOHD. JAAFAR (KETUA)
DR. MAZLAN ABDUL WAHID
DR. AZEMAN MUSTAFA
MOHAMAD SHAIFUL ASHRUL ISHAK**

**NO. VOT PENYELIDIKAN:
75123**

**FAKULTI KEJURUTERAAN MEKANIKAL
UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA**

2006

“Saya akui laporan penyelidikan bertajuk “CIRI-CIRI PEMBAKARAN UDARA BERPERINGKAT KE ATAS PEMBAKAR BERBAHAN API GAS” adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang tiap-tiap satunya telah saya jelaskan”



Tandatangan :

Nama Penulis : **Mohammad Nazri Mohd. Jaafar**

Tarikh : **1 Februari, 2006**

CIRI-CIRI PEMBAKARAN UDARA BERPERINGKAT KE ATAS PEMBAKAR BERBAHAN API GAS

(Katakunci: Pembakaran, Udara berperingkat, Gas ekzos, Emisi NO_x)

ABSTRAK

Proses pembakaran dari pembakar yang menggunakan gas sebagai bahanapi berkecenderungan untuk memancarkan emisi yang mengandungi pelbagai bahan cemar seperti NO_x, CO, CO₂ dan sebagainya. Emisi ini perlu dikurangkan kerana kesannya boleh mendatangkan bencana yang buruk ke atas hidupan 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. Kaedah udara berperingkat berjaya memastikan pembakaran berjalan secara sempurna dan mengurangkan penghasilan NO_x dengan mengelakkan kenaikan suhu kebabak secara mendadak. Kaedah ini juga meningkatkan lagi pengurangan emisi NO_x sehingga 13%.

Penyelidik utama:

Prof. Madya Dr. Mohammad Nazri Mohd. Jaafar (Ketua)
Dr. Mazlan Abdul Wahid
Dr. Azeman Mustafa
Mohamad Shaiful Ashrul Ishak

Email: nazri@fkm.utm.my
Tel. No.: 607-5534661
Fax. No.: 607-5566159

COMBUSTION CHARACTERISTIC OF AIR STAGING IN GAS BURNER SYSTEM

(Keywords: Combustion, Air staging, Exhaust Gas, NO_x emission)

ABSTRACT

The combustion process from a burner which utilizes gas fuel tends to produce emission containing various hazardous substances such as NO_x, CO, CO₂ etc. These emissions must be reduced due to its' fatal effects that could bring harm to the livings. Thus, a performance study of air staging for this type of burner is essential to ensure that the burner does operate efficiently as well as producing less emission. This technique has also shown improvement in the reduction of NO_x emissions of about 13%.

Key researchers:

Assoc. Prof. Dr. Mohammad Nazri Mohd. Jaafar (Head)

Dr. Mazlan Abdul Wahid

Dr. Azeman Mustafa

Mohamad Shaiful Ashrul Ishak

Email: nazri@fkm.utm.my

Tel. No.: 607-5534661

Fax. No.: 607-5566159

PENGHARGAAN

Para penyelidik ingin mengucapkan setinggi-tinggi penghargaan dan terima kasih kepada Universiti Teknologi Malaysia kerana membantu dalam menguruskan penyelidikan ini. Penyelidikan ini dibiayai di bawah skim jangka pendek melalui nombor projek 75123. Penghargaan dan terima kasih juga kepada pelajar-pelajar ijazah pertama, ijazah sarjana dan juruteknik-juruteknik di atas bantuan dan idea yang diberikan sepanjang penyelidikan ini dijalankan. Akhir sekali terima kasih kepada Pusat Pengurusan Penyelidikan (RMC, UTM) dan Jawatankuasa Penyelaras Penyelidikan, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, UTM di atas segala pertolongan dalam menjayakan penyelidikan ini.

KANDUNGAN

BAB	PERKARA	MUKA SURAT
	JUDUL KAJIAN	ii
	PENGAKUAN	iii
	ABSTRAK	iv
	ABSTRACT	v
	PENGHARGAAN	vi
	KANDUNGAN	vii
	SENARAI JADUAL	xi
	SENARAI RAJAH	xii
	SENARAI SIMBOL	xiii
	SENARAI LAMPIRAN	xvi
1	LATAR BELAKANG PROJEK	
	1.1 Pengenalan	1
	1.2 Tajuk	2
	1.3 Objektif	2
	1.4 Skop Penyelidikan	3

2	KAJIAN LITERATUR	
2.1	Pembakar	
2.1.1	Pengenalan	4
2.1.2	Fungsi	5
2.2	Pembakar Gas	6
2.2.1	Pembakar Pracampur Penuh	7
2.2.2	Pembakar Pracampur Sebahagian	7
2.2.3	Pembakar Campuran Nozel	8
2.2.4	Pembakar Berperingkat	9
2.2.4.1	Pembakar Udara Berperingkat	9
2.2.4.2	Pembakar Bahanapi Berperingkat	10
2.3	Bahanapi	
2.3.1	Petroleum Gas Cecair (LPG)	9
2.3.2	Propana	14
2.3.3	Butana	14
2.4	Pembakar Bahanapi Gas	15
2.4.1	Nisbah Bahanapi per Udara	16
2.4.2	Nisbah Setara	17
2.5	Entalpi Pembakaran	18
2.6	Analisis Hukum Pertama bagi Sistem Tindakbalas	
2.6.1	Sistem Aliran mantap	21
2.7	Emisi	23
2.7.1	Oksida Nitrogen, NO _x	24
2.7.2	Oksida Sulfur	25
2.7.3	Tindakbalas Karbon	26
2.7.4	Asap	27
2.7.5	Hidrokarbon Tak Terbakar	27
2.7.6	Emisi Lain	28
2.8	Akta Kawalan	28
2.9	Kaedah Pengurangan Emisi	30

2.9.1	Pembakaran Udara Berperingkat	31
2.9.1.1	Kesan Udara Berperingkat ke atas Emisi NO _x	32
2.9.1.2	Pengaruh Udara Berperingkat ke atas Emisi CO	32
2.9.1.3	Kesan Udara Berperingkat ke atas Emisi UHc	33
3	PROSES REKABENTUK, BAHAN DAN FABRIKASI	
3.1	Rekabentuk Rig Ujikaji	35
3.1.1	Rekabentuk Kebuk Pembakaran	35
3.1.2	Rekabentuk Probe Penyampelan Purata Gas	37
3.2	Bahan	38
3.3	Proses Fabrikasi	39
3.3.1	Kebuk Pembakaran	39
3.3.2	Kuar Penyampelan Purata Gas	40
4	METODOLOGI UJIKAJI	
4.1	Peralatan Ujikaji	42
4.2	Parameter Ujikaji	43
4.2.1	Tiub Pitot	44
4.3	Kaedah Ujikaji	45
4.3.1	Profil taburan suhu	45
4.3.2	Pengukuran Emisi	46
5	KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN PEMBAKAR MENGGUNAKAN AGIHAN UDARA SEKUNDER.	
5.1	Kesan Agihan Udara Dua Peringkat ke atas Prestasi Pembakar	50
5.2	Pengaruh Agihan Udara Berperingkat dalam Pembakaran bahan api gas	51
5.3	Ulasan Pembakaran Agihan Udara Berperingkat dalam Pembakaran Bahan Api Gas	52

5	KESIMPULAN DAN CADANGAN	
5.1	Kesimpulan tentang Emisi Pembakaran	57
5.2	Cadangan Penyelidikan Pada Masa Akan Datang	58
	RUJUKAN	59
	LAMPIRAN A – C	61

SENARAI JADUAL

JADUAL	MUKA SURAT
2.1 Sifat-sifat Propana dan Butana Komersial	13
2.2 Perbandingan Nisbah Setara	18
2.3 Had Kepekatan Emisi Dibenarkan bagi Industri di Malaysia	29

SENARAI RAJAH

RAJAH		MUKA SURAT
2.1	Susunan Pemegang Nyalaan	6
2.2	‘Inspirator’ atau Pencampur Jet Gas	8
2.3	‘Aspirator’ atau Pencampur Jet Udara	8
2.4	Pembakar Rendah NO _x dengan Udara Berperingkat dan Edaran Semula Gas Serombong	10
2.5	Pembakar Rendah NO _x dengan Bahanapi Berperingkat	11
2.6	Hubungan Emisi dengan Nisbah Kesetaraan	17
2.7	Skematik Udara Berperingkat pada Kebuk Pembakaran	31
3.1	Rekabentuk Kebuk Pembakaran Utama	37
3.2	Rekabentuk Probe Penyampelan Purata Gas	38
4.1	Rajah Keseluruhan Rig Ujikaji	43
4.2	Tiub Pitot	44
5.1	Emisi oksida nitrogen (NO _x) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$	54
5.2	Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$	55
5.3	Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$	55
5.4	Emisi karbon dioksida (CO ₂) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$	56
5.5	Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$	56

SENARAI SIMBOL

\bar{h}_f	-	entalpi pembentukan
\bar{h}^o	-	entalpi rasa pada 25°C dan 1 atm
\bar{h}	-	entalpi rasa pada titik tertentu
ρ	-	ketumpatan
ϕ	-	nisbah setara
Δh	-	kehilangan turus
a/f	-	nisbah udara bahanapi
atm	-	atmosfera
C_3H_8	-	propana
CO	-	karbon monoksida
CO ₂	-	karbon dioksida
D	-	diameter
d	-	diameter dalam pemusar
D	-	diameter luar pemusar
E	-	tenaga
f/a	-	nisbah bahanapi udara
g	-	gram, pecutan graviti
H ₂	-	hidrogen (gas)
H ₂ O	-	air
h_{fg}	-	entalpi pemeruapan air
H_{prod}	-	entalpi hasil tindakbalas

H_{react}	-	entalpi bahan tindakbalas
Hz	-	Hertz
J	-	Joule
K	-	Kelvin
kg	-	kilogram
L	-	kedalaman bilah pemusar
l	-	liter
L	-	panjang
m	-	jisim
m	-	meter
n	-	bilangan bilah
N	-	Newton
N_2	-	nitrogen (gas)
N_2O	-	nitrus oksida
NO	-	nitrik oksida
NO_3	-	nitrogen trioksida
NO_x	-	oksida nitrogen
N_p	-	bilangan mol hasil tindakbalas
N_r	-	bilangan mol bahan tindakbalas
O_2	-	oksigen (gas)
O_3	-	ozon
$^{\circ}C$	-	darjah Celcius
p	-	hasil tindakbalas
p	-	tekanan
Pa	-	Pascal
ppm	-	bahagian per juta
Q	-	haba
r	-	bahan tindakbalas
s	-	saat
<i>sat.</i>	-	terlarut
SO_x	-	oksida sulfur

<i>u</i>	-	halaju arus
U	-	halaju semasa
U _{Hc}	-	hidrokarbon tak terbakar
U _m	-	halaju min
V	-	volt
VOC	-	sebatian organik mudah ruap
<i>W</i>	-	kerja
W	-	Watt
<i>z</i>	-	turus

SENARAI LAMPIRAN

LAMPIRAN	MUKA SURAT
A Penukaran nilai kalori kasar (Q_{gr}) kepada nilai kalori bersih (Q_{net})	62
B Pengiraan kecekapan pembakaran	63
C Ilustrasi pembakaran	64

BAB I

LATAR BELAKANG PROJEK

1.1 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 yang berbahaya sebagaimana bahan api pepejal seperti arang batu, 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 emisi oksida nitrogen (NO_x). NO_x terhasil akibat daripada pembebasan gas nitrogen (N_2) yang tidak stabil dan berkecenderungan untuk membentuk konfigurasi oktet yang stabil, maka ia akan bergabung dengan gas oksigen (O_2) di dalam udara untuk

membentuk NO dan NO₂ 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 bagi agihan udara utama dan udara sekunder. 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.

1.2 Tajuk

CIRI-CIRI PEMBAKARAN UDARA BERPERINGKAT KE ATAS PEMBAKAR BERBAHAN API GAS

1.3 Objektif

- i. Mengkaji kesan kaedah pembakaran secara udara berperingkat ke atas gayalaku pembakaran.
- ii. Mengkaji sama ada kaedah ini dapat meningkatkan hasil keluaran terma.
- iii. Mengkaji sama ada kebanyakan emisi menurun kepekatannya.

1.4 Skop Penyelidikan

Skop bagi kajian ini adalah seperti yang berikut:

- i. Membangunkan sistem pembakar menggunakan bahan api gas.
- ii. Mengubahsuai rig pembakaran dengan memasukkan pembekal udara berperingkat.
- iii. Mengambil data ujikaji seperti taburan suhu kebuk pembakaran, kepekatan emisi dan kecekapan pembakaran.
- iv. Menganalisis data dan membuat laporan.

BAB II

KAJIAN LITERATUR

2.1 Pembakar

2.1.1 Pengenalan

Pembakar adalah sejenis alat yang diperbuat daripada besi dan tahan haba yang menerima sejumlah kuantiti udara dan bahanapi dan mencampurkannya sehomogen mungkin dan menyebabkan bahanapi terbakar menerusi proses-proses tindakbalas kimia yang stabil. Fungsi fizik mesti dipenuhi dan diutamakan berbanding fungsi kimia yang menghasilkan gas nyalaan panas. Proses campuran mesti mendahului pembakaran. Keadaan campuran akan menentukan keadaan apa pembakaran wujud.

2.1.2 Fungsi

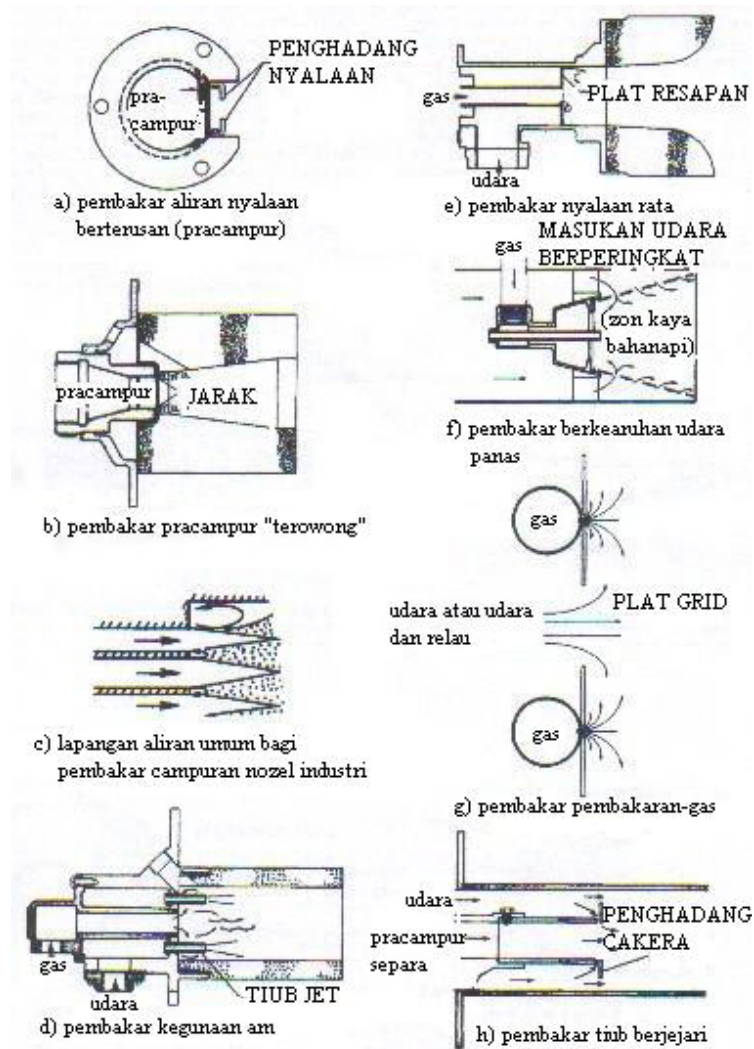
Fungsi pembakar ialah untuk memindahkan haba kepada kandungan gas dalam relau seragam yang mungkin untuk menghasilkan profil suhu tinggi sepanjang jisim gas relau seboleh yang mungkin. Walau bagaimanapun, keadaan ideal ini adalah mustahil untuk diperolehi kecuali dengan penggunaan pembakar kecil yang banyak, yang mana secara ekonominya tidak munasabah. Disebabkan keadaan yang wujud dalam pembakaran adalah kurang daripada keadaan ideal, maka akan wujud keadaan relau yang kurang daripada yang ideal. Alat pembakar yang digunakan perlu memiliki keupayaan tinggi untuk menyebarkan haba ke atmosfera relau yang bergas jika hanya pemanas yang memadai diperlukan.

Pembebasan haba dalam kuantiti yang memadai ke atmosfera relau supaya dapat diserap, adalah jauh daripada ciri sebuah pemanas yang baik. Tiada elemen dalam suatu rekabentuk asas sebuah pemanas yang lebih penting daripada pemilihan alat pembakar yang baik, untuk operasi yang bakal dilakukan, dengan bahan api yang ada.

Tidak ada sebuah pembakar daripada sebarang jenis bahanapi yang boleh dianggap memenuhi semua keadaan pembakaran yang diperlukan untuk pemindahan haba kepada bahan untuk pemrosesan. Pembakar merupakan sumber tenaga utama untuk menghasilkan pergerakan gas yang memuaskan. Selain menyediakan tenaga inersia bagi pergerakan gas, pembakar juga mesti mampu meresap haba ke relau gas tanpa merosakkan tiub ataupun kawasan berlakunya pemindahan haba. Semua fungsi ini adalah penting menyebabkannya sukar untuk menentukan peranannya yang terbesar.

2.2 Pembakar Gas

Pembakar gas boleh diklasifikasikan kepada pracampur atau tanpa pracampur (Perry, 1997). Pelbagai jenis penstabil nyalaan bekerja di dalam pembakar gas, seperti dalam Rajah 2.1. Jasad tubir, pusran dan kombinasi keduanya merupakan mekanisma penstabilan yang begitu berpengaruh.



Rajah 2.1 Susunan Pemegang Nyalaan (Perry, 1997).

2.2.1 Pembakar Pracampur Penuh

Pembakar pracampur penuh adalah termasuk bahagian untuk pencampuran lengkap bahanapi dan udara menghala ke pembakar. Pembakar mengandungi sebuah pemegang nyalaan; seperti Rajah 2.1(a), (b). Laluan yang membenarkan campuran ke kebuk pembakaran direkabentuk sedemikian untuk menghasilkan halaju tinggi yang munasabah sepanjang orifis bagi mengelakkan kemungkinan nyalaan berbalik ke pemegang nyalaan dan menyalakan campuran di laluan pembakar.

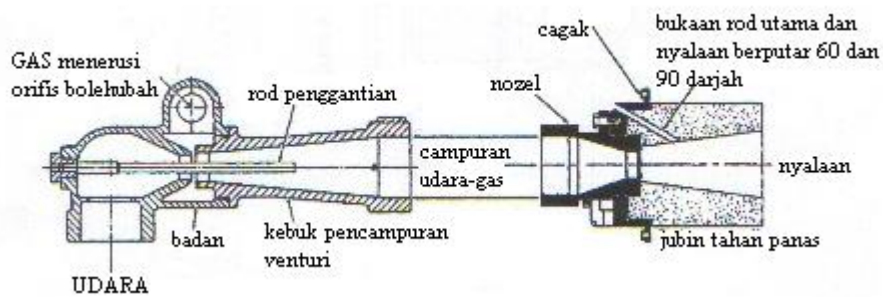
Peralatan permukaan pembakaran direkabentuk bagi pracampur penuh bahanapi dan udara dan membakarnya pada permukaan sinaran berliang. Pengganding tertutup dalam proses pembakaran dengan permukaan pembakar menghasilkan suhu nyalaan yang rendah dan pada masa yang sama membentuk NO_x yang rendah. Bahan permukaan termasuk gentian seramik, seramik terselirat dan tika besi aloi. Pendekatan ini membolehkan bentuk pembakar disesuaikan dengan profil pemindahan haba.

2.2.2 Pembakar Pracampur Sebahagian

Pembakar jenis ini mempunyai bahagian pracampur di mana campuran yang boleh bakar sebahagian besar bercampur sebelum pembakaran. Udara pembakaran kedua kemudiannya dibekalkan sekeliling pemegang nyalaan. Bahanapi mungkin digunakan untuk mendorong udara pembakaran atau sebaliknya. Contoh bagi keduanya ditunjukkan pada Rajah 2.2 dan 2.3.



Rajah 2.2 'Inspirator' atau Pencampur Jet Gas (Perry, 1997).



Rajah 2.3 'Aspirator' atau Pencampur Jet Udara (Perry, 1997).

2.2.3 Pembakar Campuran Nozel (muncung)

Penggunaan kaedah ini cukup meluas dalam industri pembakar menggunakan gas. Udara dan bahanapi dari sumber yang berlainan bercampur dengan pantas dan bertindakbalas selepas meninggalkan ruangan percampuran. Rajah 2.1 (c), (d), (e), (f) dan (h) memberikan beberapa contoh akan kepelbagaian rekabentuk nozel campuran yang digunakan. Pembakar ini menyediakan julat nisbah bahanapi udara yang besar, kepelbagaian bentuk nyalaan dan kebolehan membakar pelbagai jenis bahanapi. Ia boleh digunakan untuk menghasilkan udara khas dengan mengoperasikannya pada keadaan yang cukup tinggi (50 peratus udara lebihan) ataupun pada keadaan yang cukup rendah (1000 peratus udara lebihan). Dengan cara menukar bentuk nozel dan darjah pusran,

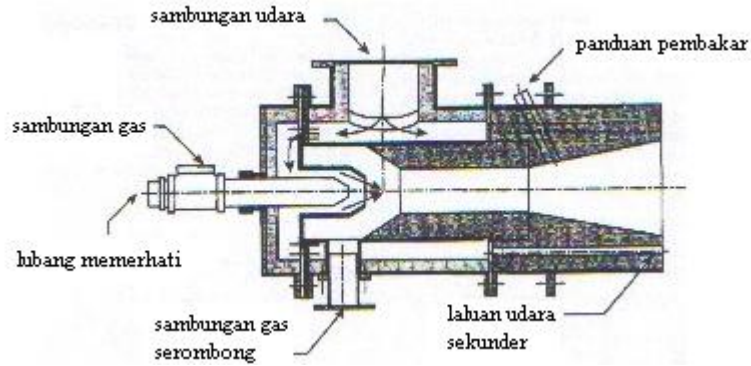
profil nyalaan dan kadar campuran boleh dipelbagaikan, daripada nyalaan pantas campur yang pendek ($L/D=1$), kepada nyalaan konvensional ($L/D= 5$ ke 10), kepada nyalaan lambat campur yang panjang ($L/D=20$ ke 50).

2.2.4 Pembakar Berperingkat

Pemeringkatan bahan api atau udara yang betul dalam proses pembakaran adalah salah satu teknik untuk meminimumkan emisi NO_x . Terdapat pembakar gas yang mencapai peringkat sedemikian rupa.

2.2.4.1 Pembakar Udara Berperingkat

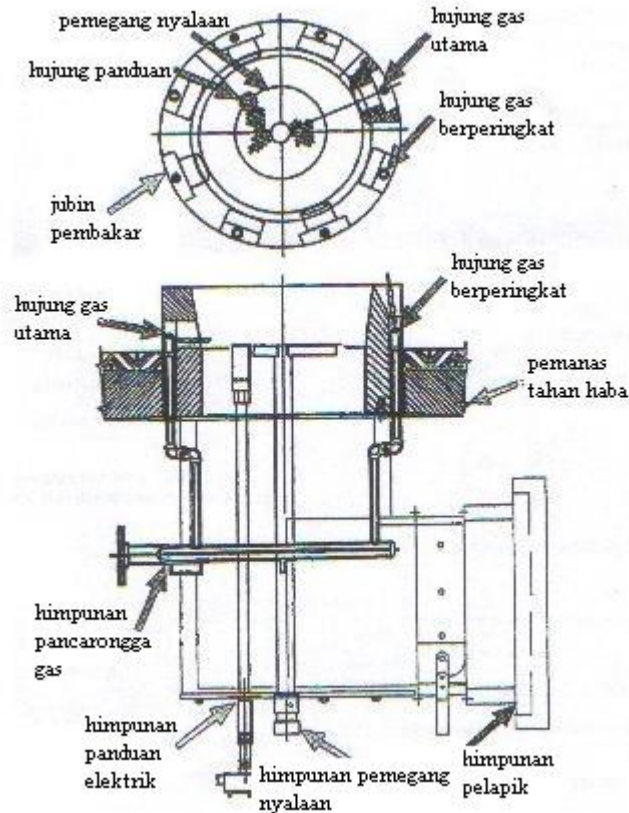
Pembakar rendah NO_x yang berkecekapan tinggi bagi relau bersuhu tinggi adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.4. Dalam rekabentuk ini, kedua-dua pemeringkatan udara dan edaran semula gas serombong luaran digunakan untuk mencapai paras emisi NO_x yang cukup rendah (dianggarkan 90 peratus daripada pembakar konvensional). Gas ekzos diedar semula oleh pam jet yang dipacu dari udara pembakaran utama.



Rajah 2.4 Pembakar Rendah NO_x dengan Udara Berperingkat dan Edaran Semula Gas Serombong (Perry, 1997).

2.2.4.2 Pembakar Bahanapi Berperingkat

Penggunaan pembakar bahanapi berperingkat merupakan pendekatan pembakaran yang lebih sesuai untuk mengawal NO_x kerana bahanapi gas kebiasaannya mengandungi sedikit atau tiada langsung nitrogen tetap. Rajah 2.5 menunjukkan pembakar yang menjalani proses penyaringan bahanapi berperingkat menggunakan draf biasa. Bahanapi dipecahkan kepada utama (30 ke 40 peratus) dan sekunder (60 ke 70 peratus) arus. Gas relau mungkin diedar semula secara dalaman melalui jet gas utama sebagai tambahan kepada kawalan NO_x . Pengurangan NO_x dari 80 sehingga 90 peratus akan dapat dicapai dengan melakukan pembakaran bahanapi berperingkat.



Rajah 2.5 Pembakar Rendah NO_x dengan Bahanapi Berperingkat (Perry, 1997).

2.3 Bahanapi

2.3.1 Petroleum Gas Cecair (LPG)

Petroleum gas cecair adalah dalam bentuk propana atau butana (Francis,1980). Gas-gas ini dicairkan pada suhu atmosfera normal (20°C) dan masing-masing pada tekanan 0.86 MPa dan 0.20 MPa, dan boleh didapati dalam tangki silinder dalam bentuk

cecair pada tekanan yang telah dinyatakan tersebut. Propana cecair selalunya didapati bagi kegunaan industri disebabkan tekanannya yang lebih tinggi, manakala butana pula bagi kegunaan domestik. Tangki silinder mampu menanggung berat gas cecair sehingga 45 kg. Sumber perolehan gas-gas cecair ini adalah daripada:

1. Gas asli dari telaga minyak.
2. Gas saringan.

Butana cecair komersial kebanyakannya mengandungi hidrokarbon-hidrokarbon C_4 yang terlarut mahupun tak terlarut, di samping mengandungi kurang dari 20% C_3 dan kurang dari 2% C_5 . Propana komersial pula kebanyakannya mengandungi hidrokarbon-hidrokarbon C_3 (propana dan propylene jika diperolehi dari gas saringan) dan juga kurang dari 5% hidrokarbon C_2 dan kurang 10% hidrokarbon C_4 . Spesifikasi bagi gas-gas ini kebiasaannya termasuk terhadap kepada tekanan meruap dan jumlah sulfur yang cukup rendah (<0.02%). Gas-gas ini bebas dari H_2S dan H_2O , tetapi terdapat bau organik sulfida yang agak kurang menyenangkan yang ditambah bagi tujuan amaran sekiranya berlaku kebocoran. Secara ringkasnya beberapa sifat bagi propana dan butana diterangkan dalam Jadual 2.1.

Secara amnya, gas-gas ini merupakan bahanapi yang paling sesuai bagi peralatan-peralatan pembakaran yang telah direkabentuk. Ia adalah bersih untuk digunakan, mudah dikawal, memberikan suhu nyalaan yang tinggi, dan mobilitinya membuatkan ia sesuai digunakan dalam pelbagai aplikasi. Disebabkan oleh nilai kalori dan ketumpatan yang tinggi, nisbah udara yang tinggi diperlukan bagi tujuan pembakaran, dan oleh kerana halaju nyalaan yang rendah dan julat ketidakbolehnyaanya yang padat menyebabkan ia tidak boleh digunakan bagi peralatan yang direka untuk kegunaan gas arang batu.

Jadual 2.1 Sifat-sifat Propana dan Butana Komersial (Francis,1980).

	Propana	Butana
Takat didih °C pada tekanan atmosfera	-42	-6
Tekanan ruapan, Mpa pada 20°C 38°C	0.86 1.52	0.21 0.48
Graviti tentu cecair pada 15°C	0.51	0.59
Graviti tentu gas (udara = 1)	1.5	2.0
m ³ gas dari 1dm ³ cecair pada <i>s.t.p.</i>	0.25	0.21
Nilai kalorifik gas, MJm ⁻³ (kasar) pada <i>s.t.p. sat.</i>	98.8	126.4
Kasar pada <i>s.t.p.</i> MJkg ⁻¹	50.0	49.3
Haba pendam pada <i>b.p.</i> (tekanan atmosfera) MJkg ⁻¹ MJdm ⁻³	0.43 0.22	0.45 0.22
Had ketakbolehnyalaan (% gas dalam udara/campuran gas)	2.0 ke 9.5	2.0 ke 8.5
Udara teori bagi pembakaran, m ³ udara/m ³ gas	23	30
Suhu nyalaan, °C	500	480
Suhu nyalaan maks. dalam udara, °C	1950	1880

2.3.2 Propana

- a) Disebabkan tekanan tabung yang tinggi, propana cecair lebih sesuai digunakan dalam industri berbanding untuk kegunaan domestik.
- b) Pembakar bertekanan tinggi adalah jenis yang paling sesuai dan ekonomi digunakan.
- c) Pada kadar pembakaran yang tinggi, pembekuan injap dan saluran paip mungkin berlaku. Peralatan pemeruapan turut dipasang bagi tujuan pencegahan.
- d) Aplikasi bahanapi termasuk semua jenis kerja relau dan kegunaan dengan oksigen bagi pemotongan besi dan kimpalan logam bukan ferus.
- e) Gas boleh digunakan bagi tujuan pencahayaan, seperti contoh apungan marin dan rumah api.
- f) Gas ini merupakan bahanapi yang paling sesuai untuk enjin nyalaan cucuh disebabkan pembentukan karbon yang rendah.

2.3.3 Butana

- a) Tekanan tabung yang rendah membuatnya lebih sesuai untuk kegunaan domestik.
- b) Gas dibekalkan melalui saluran paip bagi peralatan pembakaran menerusi pengawal tekanan pada tekanan 250mm ke 300mm H₂O.
- c) Pembakar khas digunakan bagi menyesuaikan ketumpatannya yang tinggi dan kadar penyebaran nyalaannya yang rendah.
- d) Butana cecair juga boleh digunakan dalam industri sebagai alternatif kepada propana, tetapi akan menimbulkan masalah yang lebih besar akibat pembekuan injap dan saluran yang boleh terjadi.

2.4 Pembakaran Bahanapi Gas

Pembakaran gas berlaku melalui dua cara, bergantung kepada bila bahanapi dan udara dicampurkan. Apabila 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.

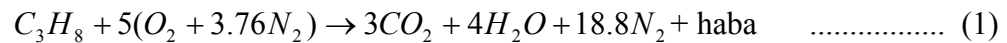
Campuran bahanapi dan udara di dalam kebuk pembakaran mempengaruhi pembakaran yang diperolehi ketika menjalankan ujikaji (Mohammad Nazri Mohd Jaafar & Romales Ramli, 1998). Pencampuran bahanapi dan udara dikelaskan kepada tiga jenis berdasarkan kepada kandungan bahanapi yang digunakan berbanding udara atau oksigen yang dibekalkan. Jenis campuran yang dimaksudkan ialah campuran kaya bahanapi, stoikiometri dan cair bahanapi (lemah bahanapi).

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

2.4.1 Nisbah Bahanapi per Udara, f/a

Nisbah bahanapi per udara yang didapati daripada pengiraan teori adalah berdasarkan kepada komposisi kimia dan jisim molekul tindakbalasnya. Nilai yang didapati daripada pengiraan ini mewakili nisbah bahanapi per udara untuk campuran stoikiometri.

Tindakbalas kimia untuk pembakaran bahanapi propana diberikan seperti berikut:



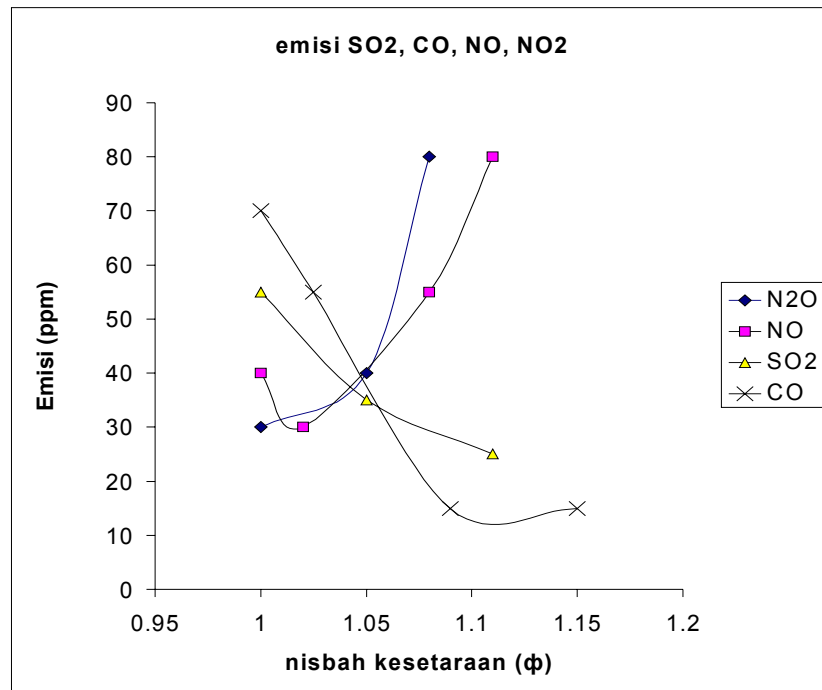
Pengiraan untuk campuran stoikiometri adalah seperti berikut:

$$\text{Udara} : (5 \times 32) + (5 \times 3.76 \times 28) = 686.4 \text{ kg}$$

$$\text{Bahanapi} : (12 \times 3) + (8 \times 1) = 44 \text{ kg}$$

Oleh itu, nisbah bahanapi per udara, $f/a = 0.064103$

2.4.2 Nisbah Setara, ϕ



Rajah 2.6 Hubungan Emisi dengan Nisbah Kesetaraan

Nisbah setara merupakan perbandingan antara nisbah bahanapi per udara semasa ujikaji dengan nisbah bahanapi per udara stoikiometri yang didapati melalui pengiraan. Ia dapat memberi gambaran mengenai campuran yang terjadi di dalam kebuk pembakaran. Apabila nisbah setara bersamaan dengan 1.0 pada puncak aliran jisim udara, campuran bahanapi dengan udara adalah sempurna dan nilai nisbah bahanapi per udara ujikaji adalah bersamaan dengan nilai nisbah bahanapi per udara stoikiometri. Nisbah setara yang melebihi nilai 1.0 pada sebelah luar kawasan stabil pula menunjukkan campuran kaya bahanapi. Manakala, nisbah setara yang kurang daripada 1.0 pada luar kawasan stabil pula menunjukkan campuran cair bahanapi.

Secara jelas, nisbah udara-bahanapi (A/F) merupakan balikan kepada nisbah bahanapi-udara (F/A) (Edwards, 1974). Oleh itu, perlu disedari walaupun nisbah setara bagi keduanya pada nilai stoikiometrik adalah sama, tetapi pada campuran yang kaya

dan lemah bahanapi nilainya berlainan disebabkan keterbalikannya antara satu sama lain. Ini dapat diterangkan dengan lebih jelas melalui Jadual 2.2.

Jadual 2.2 Perbandingan Nisbah Setara (Edwards, 1974).

Definisi Φ	Campuran	Nilai
(F/A)	Kaya	$\Phi > 1$
	Stoikiometrik	$\Phi = 1$
	Lemah	$\Phi < 1$
(A/F)	Kaya	$\Phi < 1$
	Stoikiometrik	$\Phi = 1$
	Lemah	$\Phi > 1$

2.5 Entalpi Pembakaran

Dalam proses pembakaran, entalpi tindakbalas kebiasaannya dirujuk sebagai entalpi pembakaran, h_c , yang mana mewakili sejumlah haba yang terbebas semasa proses pembakaran bagi aliran mantap iaitu apabila 1 kmol (atau 1 kg) bahanapi dibakar selengkapnya pada suhu dan tekanan tertentu (Cengel, 2002). Entalpi pembakaran bagi jenis bahanapi tertentu berbeza pada suhu dan tekanan. Ini diwakili oleh persamaan

$$h_c = H_{prod} - H_{react} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Entalpi pembakaran merupakan sifat yang paling berguna dalam menganalisis proses pembakaran bagi bahanapi. Bagaimanapun, terdapat begitu banyak bahanapi dan campurannya yang berbeza dan adalah tidak praktikal untuk menyenaraikan nilai-nilai h_c bagi semua kemungkinan kes. Tambahan pula entalpi pembakaran adalah tidak berguna

sekiranya pembakaran tidak lengkap. Oleh itu suatu pendekatan yang lebih praktikal diperlukan agar dapat mewakili tenaga kimia bagi satu elemen atau kompaun pada suatu titik rujukan. Sifat ini lebih dikenali sebagai entalpi pembentukan \bar{h}_f , yang dapat dilihat sebagai entalpi bagi suatu bahan pada keadaan tertentu akibat daripada komposisi kimianya.

Bagi memulakannya, kesemua entalpi pembentukan bagi elemen stabil (seperti O_2 , N_2 , H_2 dan C) diletakkan nilai sifar pada rujukan piawai $25^\circ C$ dan 1 atm. Dengan itu, $\bar{h}_f = 0$ bagi semua elemen stabil. Apa yang dimaksudkan sebagai stabil ialah dari segi bentuk kimianya pada $25^\circ C$ dan 1 atm. Nitrogen sebagai contoh, wujud dalam bentuk dwiatom (N_2) pada $25^\circ C$ dan 1 atm. Oleh itu, bentuk nitrogen yang stabil pada rujukan piawai adalah nitrogen dwiatom N_2 dan bukannya nitrogen monoatom N . Sekiranya suatu elemen wujud lebih dari satu keadaan stabil pada $25^\circ C$ dan 1 atm, salah satu daripadanya perlu dikhususkan sebagai bentuk stabil. Bagi karbon sebagai contoh, bentuk yang stabil dianggap grafit dan bukannya berlian.

Pertimbangkan pembentukan CO_2 daripada elemennya iaitu C dan O_2 pada $25^\circ C$ dan 1 atm semasa proses pembakaran aliran mantap. Perubahan entalpi semasa proses ini ditentukan sebanyak $-393,520 \text{ kJ/kmol}$ (Cengel, 2002). Bagaimanapun, $H_{react} = 0$ memandangkan kedua-dua bahan tindakbalas adalah elemen pada titik rujukan piawai, dan hasil tindakbalas mengandungi 1 kmol CO_2 pada titik yang sama. Oleh itu, entalpi pembentukan CO_2 pada titik rujukan piawai adalah $-393,520 \text{ kJ/kmol}$. Iaitu,

$$\bar{h}_{f,CO_2} = -393,520 \text{ kJ / kmol}$$

Penandaan negatif adalah kerana entalpi bagi 1 kmol CO_2 pada $25^\circ C$ dan 1 atm adalah $393,520 \text{ kJ}$ kurang daripada entalpi bagi 1 kmol C dan 1 kmol O_2 pada titik yang sama. Dalam erti kata yang lain, $393,520 \text{ kJ}$ tenaga kimia terbebas (meninggalkan sistem sebagai haba) apabila C dan O_2 bergabung untuk membentuk 1 kmol CO_2 . Oleh itu, suatu entalpi pembentukan yang negatif bagi satu kompaun menunjukkan bahawa haba

terbebas semasa pembentukan kompaun tersebut dari elemen stabilnya. Nilai positif pula menunjukkan bahawa haba diserap.

Satu lagi bentuk yang sering digunakan dalam pembakaran bahanapi adalah nilai pemanasan bagi bahanapi, yang ditakrifkan sebagai jumlah haba yang terbebas apabila bahanapi dibakar dengan selengkapnya dalam suatu proses aliran mantap dan hasil tindakbalas berbalik semula ke titik bahan tindakbalas. Dalam erti kata lain, nilai pemanasan bagi suatu bahanapi adalah sama dengan nilai mutlak entalpi pembakaran bahanapi tersebut. Iaitu,

$$\text{Nilai pemanasan} = |h_c| \quad (\text{kJ/kg bahanapi})$$

Nilai pemanasan bergantung kepada fasa H₂O di dalam hasil tindakbalas. Nilai pemanasan disebut sebagai nilai pemanasan tinggi (HHV) apabila H₂O di dalam hasil tindakbalas adalah dalam bentuk cecair, dan nilai pemanasan rendah (LHV) sekiranya H₂O adalah dalam bentuk ruapan. Kedua-dua nilai pemanasan dihubungkan melalui

$$\text{HHV} = \text{LHV} + (mh_{fg})_{\text{H}_2\text{O}} \quad (\text{kJ/kg bahanapi}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

dengan m adalah jisim H₂O di dalam hasil tindakbalas per unit jisim bahanapi dan h_{fg} adalah entalpi pemeruapan air pada suhu tertentu.

2.6 Analisis Hukum Pertama Bagi Sistem Bertindakbalas

2.6.1 Sistem Aliran Mantap

Sebelum dapat mengungkapkan hubungan keseimbangan tenaga, adalah perlu menyatakan entalpi bagi suatu komponen dalam bentuk yang bersesuaian bagi kegunaan sistem bertindakbalas, iaitu bentuk entalpi perlu berkurang kepada entalpi pembentukan pada titik rujukan piawai. Ini dapat diterangkan menerusi persamaan berdasarkan unit mol, iaitu

$$\text{Entalpi} = \bar{h}_f^\circ + (\bar{h} - \bar{h}^\circ) \quad (\text{kJ/kmol}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

dengan bentuk di atas mewakili entalpi rasa (sensible) relatif kepada titik rujukan piawai, di mana perbezaan di antara \bar{h} (entalpi rasa pada titik tertentu) dan \bar{h}° (entalpi rasa pada 25°C dan 1 atm). Definisi ini membolehkan nilai entalpi digunakan dari jadual tanpa mengira titik rujukan yang digunakan dalam membinanya.

Bila perubahan tenaga kinetik dan keupayaan diabaikan, hubungan keseimbangan tenaga aliran mantap $\dot{E}_{masuk} = \dot{E}_{keluar}$ dapat dinyatakan bagi tindakbalas kimia dalam sistem aliran mantap dengan lebih jelas iaitu

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{masuk} + \dot{W}_{masuk} + \sum \dot{n}_r (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r = & \dots\dots\dots (5) \\ \dot{Q}_{keluar} + \dot{W}_{keluar} + \sum \dot{n}_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p & \end{aligned}$$

dengan persamaan di sebelah kiri merupakan kadar pemindahan tenaga masuk bersih disebabkan oleh haba, kerja dan jisim manakala persamaan di sebelah kanan pula merupakan kadar pemindahan tenaga keluar bersih disebabkan oleh haba,

kerja dan jisim. Dalam persamaan (5) di atas juga \dot{n}_p dan \dot{n}_r mewakili kadar alir mol bagi hasil tindakbalas p dan bahan tindakbalas r .

Dalam analisis pembakaran, adalah lebih sesuai untuk berurusan dengan kuantiti dalam bentuk per mol bahanapi. Hubungan tersebut dapat diperolehi dengan cara membahagikan setiap bentuk dalam persamaan (5) di atas dengan kadar alir mol bagi bahanapi, menjadikannya

$$Q_{masuk} + W_{masuk} + \sum N_r (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_r = \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_{keluar} + W_{keluar} + \sum N_p (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_p$$

dengan N_r dan N_p mewakili bilangan mol bagi bahan tindakbalas r dan hasil tindakbalas p , masing-masing per unit mol bahanapi. $N_r = 1$ bagi bahanapi, manakala nilai N_r dan N_p boleh diperolehi secara langsung dari persamaan seimbang pembakaran. Dengan mengambil pemindahan haba ke dalam sistem dan kerja yang dilakukan oleh sistem sebagai kuantiti positif, hubungan keseimbangan haba boleh dinyatakan dengan lebih padat sebagai

$$Q - W = \sum N_p (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_p - \sum N_r (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_r \dots\dots\dots (7)$$

ataupun sebagai

$$Q - W = H_{prod} - H_{react} \quad (\text{kJ/kmol bahanapi}) \dots\dots\dots (8)$$

dengan

$$H_{prod} = \sum N_p (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_p \quad (\text{kJ/kmol bahanapi}) \dots\dots\dots (9)$$

$$H_{react} = \sum N_r (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_r \quad (\text{kJ/kmol bahanapi}) \dots\dots\dots (10)$$

Sekiranya entalpi pembakaran \bar{h}_c^o bagi tindakbalas tertentu wujud, persamaan tenaga aliran mantap per mol bahanapi boleh dinyatakan sebagai

$$Q - W = \bar{h}_c^o + \sum N_p (\bar{h} - \bar{h}^o)_p - \sum N_r (\bar{h} - \bar{h}^o)_r \quad (\text{kJ/kmol}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

Hubungan keseimbangan tenaga di atas kadangkala dinyatakan tanpa bentuk kerja kerana kebanyakan proses pembakaran aliran mantap tidak melibatkan interaksi kerja.

Kebuk pembakaran kebiasaannya melibatkan haba keluaran tetapi tanpa haba masukan. Oleh sebab itu, keseimbangan tenaga bagi proses pembakaran aliran mantap yang umum akhirnya menjadi

$$Q_{keluar} = \sum N_r (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_r - \sum N_p (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_p \quad \dots\dots\dots (12)$$

Persamaan di atas menunjukkan haba keluaran semasa proses pembakaran adalah merupakan perbezaan di antara tenaga bahan tindakbalas yang masuk dengan tenaga hasil tindakbalas yang meninggalkan kebuk pembakaran.

2.7 Emisi

Emisi adalah gas-gas yang terhasil melalui proses pembakaran baik secara tertutup ataupun terbuka iaitu di atmosfera biasa yang mendatangkan kesan buruk bukan sahaja kepada manusia malahan kepada hidupan lain dan alam sekitar. Terdapat beberapa jenis gas emisi yang utama iaitu oksida-oksida nitrogen (NO_x), karbon monoksida (CO), hidrokarbon tidak terbakar (UHC), asap dan oksida-oksida sulfur (SO_x) sekiranya terdapat unsur sulfur dalam bahan bakar.

2.7.1 Oksida Nitrogen (NO_x)

Oksida nitrogen terbebas hasil dari sebarang bentuk pembakaran yang melibatkan penggunaan udara dari atmosfera. Ini adalah disebabkan oleh kandungan nitrogen (N_2) dalam atmosfera merupakan yang tertinggi iaitu melebihi 70% daripada kandungan gas di atmosfera.

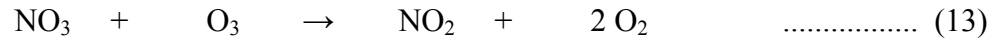
Jumlah emisi NO_x yang terhasil adalah sukar untuk diramalkan kerana ia bergantung kepada pelbagai faktor seperti jenis bahanapi yang digunakan, keadaan ambien (suhu, ketumpatan udara dan sifat-sifat udara yang lain), keadaan pembakaran (saiz, kadar alir udara, pemeringkatan udara dan lain-lain) dan keadaan proses pembakaran. Kehadiran oksida nitrogen ini hanya dapat dikenalpasti bermula pada suhu 1800K, dengan paras tertingginya adalah pada keadaan kuasa maksimum. Oksida nitrogen boleh terbentuk melalui 3 cara:

- i) NO_x terma akibat daripada proses pengoksidaan nitrogen dari atmosfera selepas nyalaan.
- ii) NO_x bahanapi akibat daripada proses pengoksidaan nitrogen yang terkandung dalam bahanapi.
- iii) NO_x penggesa akibat daripada tindakbalas pantas di permulaan nyalaan.

Pembentukan NO_2 kebiasaannya bermula dari pembakar itu sendiri dan boleh mencapai sehingga 50% daripada keseluruhan jumlah oksida nitrogen.

Oksida-oksida nitrogen dan sulfur menyumbang kepada penghasilan hujan asid yang memberi kesan buruk kepada hidupan dan juga bangunan. Menerusi set tindakbalas yang kompleks dengan sebatian organik yang mudah meruap (VOC), oksida nitrogen membentuk jerebu paras rendah (ground-level smog) yang mana ia boleh menipiskan lapisan ozon.

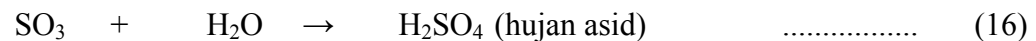
Tindakbalas yang berlaku di antara oksida nitrogen dan ozon adalah seperti berikut:



Persaman (13) menerangkan bagaimana ozon dihapuskan melalui tindakbalas oksida nitrogen. Persamaan (14) menunjukkan nitrik oksida bergabung semula untuk kembali bertindakbalas.

2.7.2 Oksida Sulfur

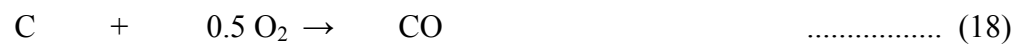
Oksida sulfur merupakan salah satu pencemaran yang terpancar daripada proses pembakaran. Gas ini akan bertindakbalas dengan hujan untuk membentuk hujan asid di mana ia memberi kesan bahaya kepada manusia dan hidupan lain.



Bagaimanapun, gas ini tidak akan dibincangkan di dalam kajian ini.

2.7.3 Tindakbalas Karbon

Proses pembakaran merupakan suatu proses yang kompleks di mana tindakbalas yang sebenar berlaku masih belum benar-benar difahami. Bagaimanapun, satu set persamaan boleh digunakan untuk menjelaskan tindakbalas utama yang melibatkan karbon dan oksigen yang berlaku semasa proses pembakaran, iaitu:



Secara teorinya, oksigen perlu meresap ke dalam zarah dan karbon dioksida perlu membebaskan diri dari zarah, dan kedua-dua karbon dan oksigen bertindakbalas dengan karbon di dalam bahanapi.

Sekiranya campuran udara-bahanapi adalah kaya bahanapi, kuantiti CO yang banyak akan terpancar daripada proses pembakaran akibat kekurangan oksigen yang mencukupi untuk melengkapkan tindakbalas dari CO kepada CO₂. Secara teorinya, pancaran emisi CO dapat dikurangkan dengan cara menyuntik udara tambahan semasa proses pembakaran, tetapi terdapat beberapa percanggahan di antara teori dan ramalan praktikal.

2.7.4 Asap

Pelepasan asap daripada proses pembakaran berpunca dari penghasilan zarah berjelaga yang halus di dalam lingkungan kaya bahanapi nyalaan di mana pencampuran adalah kurang. Partikel-partikel halus (habuk) yang terbebas ke atmosfera juga menyumbang kepada pencemaran alam sekitar dan kesihatan manusia.

2.7.5 Hidrokarbon Tak Terbakar (UHC)

Hidrokarbon terhasil dari pembakaran yang tidak lengkap. Selalunya pembebasan hidrokarbon berlaku pada nisbah bahanapi udara kaya. Paras hidrokarbon di dalam gas ekzos umumnya diukur dalam bentuk jumlah kepekatan hidrokarbon dan dinyatakan dalam unit bahagian per juta (ppm). Campuran udara bahanapi memainkan peranan yang penting dalam pembebasan hidrokarbon, kerana pencampuran yang tidak lengkap menyebabkan bahanapi tidak terbakar dengan sepenuhnya dan keluar bersama-sama gas ekzos ke atmosfera. Antara kaedah yang dapat mengurangkan pancaran UHC adalah dengan pembaikan pengabusan bahanapi. Pembaikan ini akan menghasilkan titisan bahanapi yang lebih kecil, dengan titisan yang kecil ini bahanapi mudah untuk terbakar.

2.7.6 Emisi Lain

Terdapat juga emisi-emisi yang lain yang turut terbebas semasa proses pembakaran tetapi tidak akan dibincangkan di dalam tesis ini, iaitu:

- i) Logam berat seperti kadmium, plumbum dan merkuri.
- ii) Logam alkali seperti sodium dan potassium
- iii) Gas berbahaya seperti halogen dan sebatian organik.

2.8 Akta Kawalan

Pelbagai akta telah dikuatkuasakan bagi mengatasi masalah pembebasan gas emisi dari sektor perindustrian baik oleh negara kita mahupun oleh negara-negara membangun dan maju lain. Amerika Syarikat contohnya telah menetapkan satu undang-undang pada tahun 1978 yang dikenali sebagai 'Environmental Quality (Clean Air) Regulation, 1978' (Clement & Kagel, 1990). Akta ini menetapkan:

1. Menghadkan bilangan industri baru yang didapati mempunyai potensi menghasilkan pencemaran berdekatan taman-taman perumahan.
2. Mengawal pembakaran terbuka terutama pembakaran untuk melupuskan sisa-sisa tanaman.
3. Pengawasan emisi di dalam atmosfera.

Bagi negara kita pula, satu akta telah dibentuk pada 1970. Akta yang dipanggil 'Pindaan Udara Bersih 1970' ini telah menetapkan beberapa perkara iaitu :

1. Setiap negeri mempunyai tanggungjawab utama untuk menentukan mutu udara di keseluruhan kawasan geografi yang dilingkungi negeri tersebut.
2. Satu keperluan bahawa piawaian mutu udara ambien kebangsaan akan ditubuhkan oleh Agensi Pelindung Alam Sekitar (EPA).
3. Pihak industri mesti mengawasi dan menyelenggara rekod-rekod pancaran dan memberikannya kepada pegawai EPA.

Hasil dari akta pindaan ini, EPA telah menetapkan had kepekatan maksimum karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), nitrogen oksida (NO_x), sulfur oksida (SO₂), zarah atau partikel (Jadual 2.3). EPA juga telah menerbitkan piawai pancaran pesawat udara pada 17 Julai 1973. Piawaian pancaran ini mula dikuatkuasakan pada 1976 dengan melakukan beberapa pengubahsuaian, antaranya membenarkan pengoperasian industri dengan mengambil kira kemajuan pengetahuan dan teknologi yang dijalankan hasil dari usaha yang kuat oleh kerajaan.

Jadual 2.3 Had Kepekatan Emisi Dibenarkan bagi Industri di Malaysia
(Jabatan Alam Sekitar, 1998).

Pencemar	Purata masa	Had ppm	g/m ³
Ozon	1 jam	0.10	200
	8 jam	0.06	120
CO (mg/m ³)	1 jam	30.0	35
	8 jam	9.0	10
NO ₂	1 jam	0.17	320
	24 jam	0.06	113
SO ₂	10 jam	0.19	500
	1 jam	0.13	350
	24 jam	0.04	105
Partikel	24 jam		260
	1 jam		90

2.9 Kaedah Pengurangan Emisi

Pelbagai kaedah telah digunakan untuk mengatasi masalah pancaran gas-gas emisi (Lefebvre, 1997) iaitu:

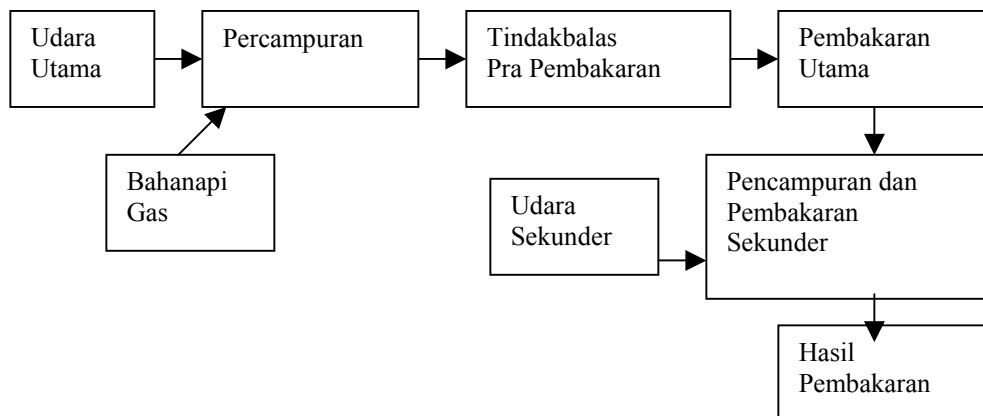
1. Geometri boleh ubah
2. Pembakaran pracampur-prawap cecair
3. Pembakaran udara berperingkat
4. Pembakaran bermangkin

Pembakaran geometri boleh ubah biasanya digunakan bersama-sama dengan pembakaran pracampur-prawap cecair kerana setiap kaedah ini memberikan kesan yang berbeza ke atas jenis gas yang berbeza iaitu pembakaran geometri boleh ubah adalah satu kaedah di mana udara dimasukkan dengan banyak pada kuasa yang maksimum. Ini membantu mengurangkan pancaran NO_x dan juga pembentukan jelaga akibat udara yang dibekalkan mencukupi untuk menghasilkan tindakbalas stoikiometri (tindakbalas di mana nisbah percampuran udara bahan api adalah mencukupi antara satu sama lain untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna) tanpa mencapai suhu puncak pembentukan NO_x iaitu 1800K. Manakala bagi pembakaran pracampur-prawap cecair, konsep yang digunakan adalah penyejatan dan pencampuran lengkap bahanapi dengan udara sebelum pembakaran. Kaedah ini menghasilkan suhu tindakbalas yang rendah dan menghapuskan bintik-bintik panas di dalam zon pembakaran. Dengan penggabungan dan penghapusan titik-titik panas ini pembentukan NO_x dapat dikurangkan dan bintik-bintik sejuk yang meningkatkan CO.

2.9.1 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 kebuk (Rajah 2.7). (Edwards, 1974).

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.



Rajah 2.7 Rajah Skematik Udara Berperingkat pada Kebuk Pembakaran (Edwards,1974).

2.9.1.1 Kesan Udara Berperingkat ke atas Emisi NO_x

Gas NO_x terhasil daripada tindakbalas yang berlaku antara O₂ dan N₂ di dalam kebuk 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 kebuk secara mendadak. Pada tahap pembakaran utama iaitu semasa udara utama dibekalkan, sebahagian bahan api terbakar di samping meningkatkan suhunya sehingga semua O₂ 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 kebuk yang dapat mengurangkan penghasilan NO_x (Clement & Kagel, 1990). 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.

2.9.1.2 Pengaruh Udara Berperingkat ke atas Emisi CO

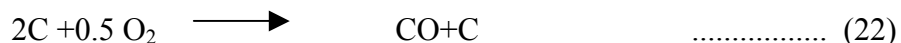
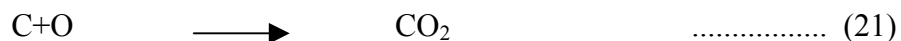
Terdapat 2 faktor utama kepada penghasilan CO iaitu :

1. Kekurangan bekal udara yang mengurangi O_2 yang 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 yang akan menambahkan kandungan O_2 dalam kebuk yang secara teorinya boleh mengurangkan pancaran CO , tetapi telah dibincangkan sebelum ini bahawa dengan menggunakan udara berperingkat akan mengurangkan suhu kebuk. 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 kebuk tadi telah stabil dan mencapai suhu yang tinggi maka CO yang terbentuk tadi akan bertindakbalas dengan O_2 untuk menghasilkan CO_2 .

2.9.1.3 Kesan Udara Berperingkat terhadap 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 (21) menunjukkan pembakaran lengkap yang tidak menghasilkan C manakala persamaan (22) adalah pembakaran tidak lengkap yang menghasilkan C.

Udara tambahan juga dapat mengelakkan dari berlakunya asap hitam kerana bekalan O_2 yang mencukupi.

BAB III

PROSES REKABENTUK, BAHAN DAN FABRIKASI

3.1 Rekabentuk Rig Ujikaji

Sebelum sesuatu fabrikasi dijalankan, rekabentuk bagi rig ujikaji perlu ditentukan terlebih dahulu bagi memperolehi ketepatan dimensi rig yang bakal dihasilkan di samping dapat memberikan gambaran yang jelas akan perjalanan proses fabrikasi berpandukan kepada lukisan kejuruteraan.

3.1.1 Rekabentuk Kebuk Pembakaran

Dalam ujikaji 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 penyukatan suhu dan tekanan. Spesifikasi rekabentuk adalah seperti berikut:

(i) Kebuk Pembakaran Utama

- o Panjang = 500 mm
- o Diameter dalam = 100 mm
- o Ketebalan = 2 mm
- o Kuantiti = 1

(ii) Kebuk Pembakaran Lanjutan

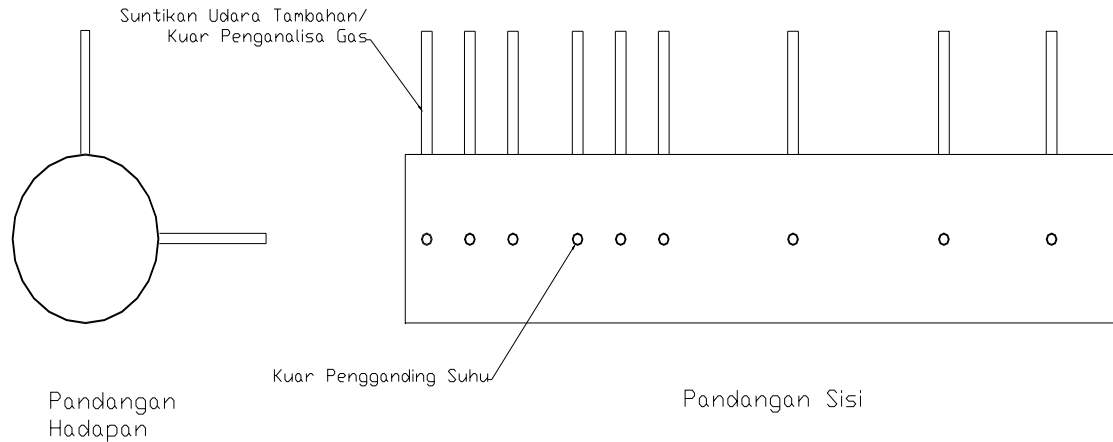
- o Panjang = 300 mm
- o Diameter dalam = 100 mm
- o Ketebalan = 2 mm
- o Kuantiti = 1

(iii) Bebibir

- o Diameter Dalam = 100 mm
- o Diameter Luar = 180 mm
- o Ketebalan = 2 mm
- o Kuantiti = 6

(iv) Tiub Geronggong

- o Panjang = 120 mm
- o Diameter = 10 mm
- o Ketebalan = 1 mm
- o Kuantiti = 9

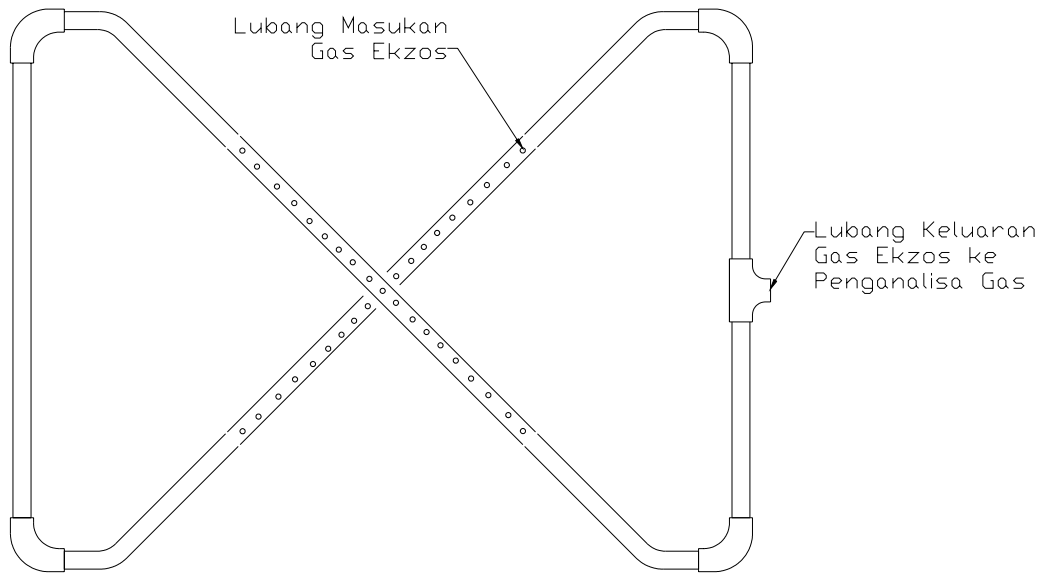


Rajah 3.1 Rekabentuk Kebuk Pembakaran Utama

3.1.2 Rekabentuk Probe Penyampelan Purata Gas (Mean Gas Sampling Probe)

Rekabentuk probe penyampelan purata gas adalah sama seperti yang digunakan oleh Lister dan Wedlock (1978) dan Ahmad Suhaimi Ahmad Rahim (1998) cuma yang menjadi perbezaan adalah probe ini tidak disejukkan dengan air maka terdapat beberapa modifikasi kepada rekabentuk. Probe ini mempunyai 40 lubang bermula dari tengahnya dengan setiap sisi mempunyai bilangan lubang yang sama. Spesifikasi rekabentuk adalah seperti berikut:

- o *Elbow fitting 45°* = 4 buah
- o *T fitting* = 1 buah



Rajah 3.2 Rekabentuk Probe Penyampelan Purata Gas

3.2 Bahan

Keluli tahan karat (*Stainless steel*) digunakan sebagai bahan utama dalam merekabentuk kedua-dua kebuk pembakaran disebabkan oleh sifat mekanikalnya yang tahan panas pada suhu yang tinggi, keras dan memenuhi ciri-ciri keselamatan yang dikehendaki. Bagi bebibir dan tiub geronggong, ia dihasilkan menggunakan keluli lembut.

Untuk probe penyampelan purata gas pula, batang-batang tiub tembaga yang berdiameter $\frac{1}{4}$ inci digunakan. Saiz ini ditetapkan sedemikian kerana kebolehdapatan *elbow* dan *T fitting* bagi diameter berkenaan di pasaran.

3.3 Proses Fabrikasi

3.3.1 Kebuk Pembakaran

Proses pembuatan yang terlibat dalam penghasilan kebuk pembakaran ialah mencanai, menggerudi dan mengimpal. Kebuk pembakaran utama yang direkabentuk mempunyai bebibir yang berfungsi sebagai penyambung dan juga tiub geronggong yang bertujuan untuk memegang serta melaraskan kedudukan pengganding suhu dan probe tekanan.

Bebibir dibentuk terlebih dahulu dengan cara dipotong dalam bentuk segiempat sama sebelum dicanai yang membentuknya menjadi donat dengan diameter dalam dan luarnya ialah 100 mm dan 180mm bagi bebibir A manakala bagi bebibir B dan C pula 168 mm dan 236 mm. Mata alat bagi mesin canai dengan diameter 5 mm dan 7 mm telah digunakan dalam proses ini.

Selesai dicanai, kepingan tadi seterusnya digerudi bagi mendapatkan lubang-lubang yang berdiameter 7 mm dengan menggunakan mesin yang sama. Kesemua bebibir mempunyai 4 lubang di mana bagi bebibir B dan C, ia digerudi pada jarak 85 mm dari garis tengah bebibir manakala bagi bebibir A pula, 50 mm dari garis tengah.

Proses seterusnya melibatkan penghasilan tiub geronggong. Tiub geronggong yang berdiameter 10 mm dipotong dengan panjang setiap satunya ialah 120 mm yang mana sebanyak 18 batang dipotong. Kebuk pembakaran utama juga perlu digerudi bagi tujuan pemasangan tiub geronggong tersebut di mana ia ditebuk dengan mata gerudi berdiameter 10 mm. Sebanyak 18 lubang digerudi di mana 9 lubang digerudi pada bahagian atas kebuk pembakaran utama manakala bakinya digerudi berserenjang

dengan lubang yang telah ditebuk sebelumnya iaiu pada sisi kebuk pembakaran. Setiap lubang digerudi berdasarkan kepada jarak-jarak yang telah ditetapkan oleh Ahmad Suhaimi Ahmad Rahim (1998).

Proses terakhir dalam fabrikasi kebuk pembakaran melibatkan proses kimpalan bebibir dan tiub geronggong ke atas kebuk pembakaran utama serta bebibir bagi kebuk pembakaran lanjutan. Bebibir B dan C dikimpal pada kedua-dua sisi kebuk pembakaran utama dan lanjutan manakala bebibir A pada muncung pembakar. Bagi tiub geronggong pula, ia dikimpal pada lubang yang telah dibentuk pada kebuk pembakaran utama.

3.3.2 Probe Penyampelan Purata Gas

Proses fabrikasi probe ini tidaklah sukar. Ini kerana penggunaan tiub tembaga memudahkan lagi proses membentukkannya menjadi bentuk 'X'. Tiub tembaga mulamulanya dipotong dengan menggunakan pemotong tiub kepada saiz-saiz seperti yang telah ditetapkan semasa proses merekabentuk. Batang-batang tiub yang terhasil ini kemudiannya dibengkokkan pada darjah yang bersesuaian dengan menggunakan pembengkok tiub agar penyambungannya kepada 'fitting elbow 45°' dan juga 'T fitting' menampakkan bentuk 'X'. Akan tetapi semasa proses pembengkokan ini ia perlu dilakukan secara berhati-hati supaya permukaan tiub tidak mengalami kecacatan (*deform*) akibat kenaan daya yang berlebihan. Bagi mengukuhkan penyambungan tiub-tiub kepada *fitting-fitting* tersebut, proses *blazing* dilakukan di mana prinsip *blazing* ini samalah seperti kimpalan gas melainkan peralatan *blazer* ini jauh lebih kecil dan mudah alih berbanding peralatan kimpalan gas yang biasa diketahui. Bagi memudahkan probe ini tergantung pada kebuk pembakaran, *flange* digunakan sebagai tapak untuk probe bergantung dengan *flange* ini mempunyai ukuran dimensi yang sama seperti yang terdapat pada kebuk pembakaran utama dan lanjutan. Dengan itu, probe dikimpal pada

flange dengan cara kimpalan gas. Proses terakhir sekali adalah menggerudi sebanyak 40 lubang masukan sampel gas dengan setiap lubang berjarak 4mm antara satu dengan yang lain. Seperti juga dalam proses pembengkokkan, penelitian juga perlu diberikan semasa proses menggerudi ini agar permukaan tiub tidak *deform*. Mata gerudi yang digunakan berdiameter 2mm.

BAB IV

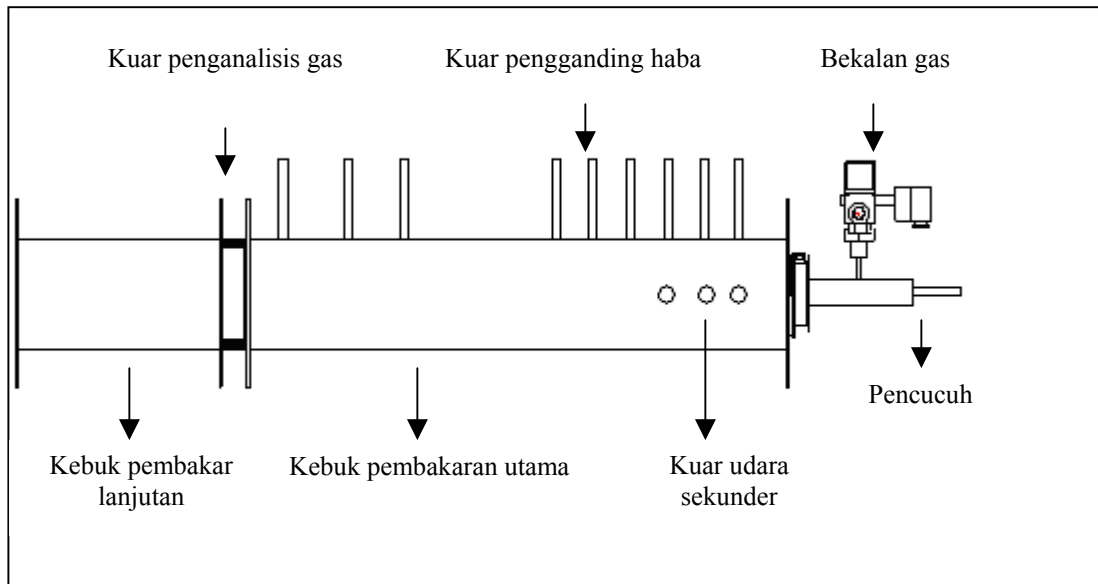
METODOLOGI UJIKAJI

4.1 Peralatan Ujikaji

Senarai peralatan yang digunakan:

- 1) Pembakar
- 2) Silinder Gas berisi Propana (Tekanan Minimum 4 Bar)
- 3) Pengganding haba dan Pengrekodan Data
 - Chromel-Alumel K-type *Thermocouple*
 - Yokogawa Thermocouple Recorder
- 4) Suntikan Udara Tambahan
 - Pemampat Ingresol Rand
- 5) Pengukuran Masa
 - Jam Randik
- 6) Pengukuran Keadaan Ambient
 - Termometer
 - Barometer
- 7) Pengukuran Emisi Gas Ekzos jenis *Kane May*

- 8) Pengukuran Kadar Alir Udara
 - Tiub Pitot
- 9) Unit Pembakar
 - Kebuk Pembakaran (Utama dan Lanjutan)
 - Probe Penyampelan Purata Gas



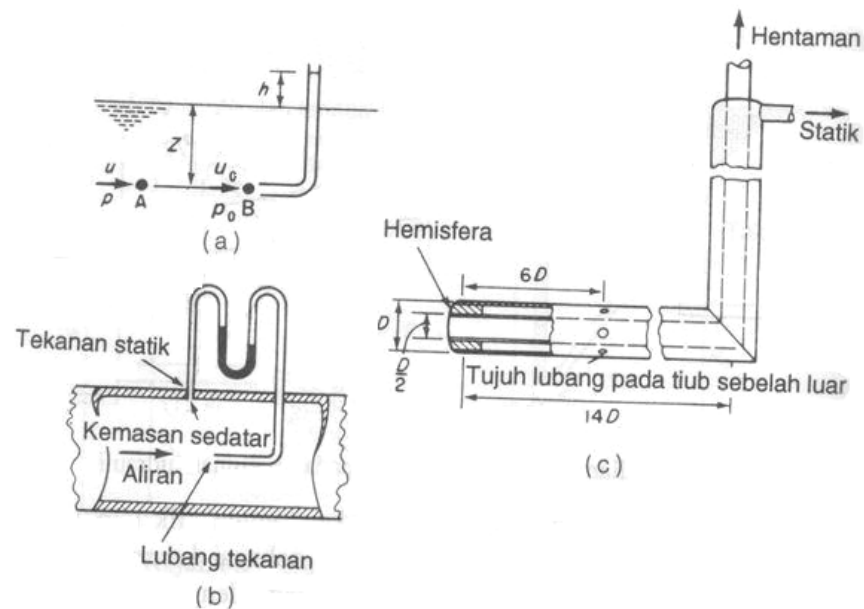
Rajah 4.1 Rajah Keseluruhan Rig Ujikaji

4.2 Parameter Ujikaji

Dalam ujikaji 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.

4.2.1 Tiub Pitot



Rajah 4.2 Tiub Pitot

Tiub pitot digunakan untuk mengukur halaju arus dan terdiri daripada tiub ringkas berbentuk L menghalu ke aliran yang mendatang (Rajah 4.2(a)). Jika halaju arus di A ialah u , zarah yang bergerak dari A ke mulut tiub B akan dihentikan gerakannya sehingga u_0 di B adalah sifar. Daripada persamaan Bernoulli,

$$\begin{aligned} \text{Jumlah tenaga per unit} &= \text{jumlah tenaga per unit} \\ \text{berat di titik A} &\quad \text{berat di titik B} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u^2 / 2g + p / \rho g &= u_o^2 / 2g + p_o / \rho g \\ p_o / \rho g &= u^2 / 2g + p / \rho g \end{aligned}$$

oleh sebab $u_o=0$, maka p_o lebih besar daripada p . Jadi $p / \rho g = z$ dan $p_o / \rho g = h + z$. Oleh sebab itu,

$$u^2 / 2g = (p_o - p) / \rho g = h,$$

$$\text{halaju di A} = u = \sqrt{2gh}$$

Apabila tiub Pitot digunakan dalam saluran, nilai h dapat ditentukan (seperti dalam Rajah 4.2(a)), tetapi jika tiub pitot digunakan dalam paip, perbezaan antara tekanan statik dengan tekanan dalam lubang hentaman mestilah diukur dengan menggunakan tolok tekanan kebezaan dengan menggunakan salur tekanan statik di dinding paip (seperti dalam Rajah 4.2(b)) atau tiub Pitot statik gabungan (seperti dalam Rajah 4.2(c)). Dalam tiub Pitot statik, tiub di sebelah dalam digunakan untuk mengukur tekanan hentaman manakala sarung di luarnya mempunyai lubang-lubang di permukaannya untuk mengukur tekanan statik.

4.3 Kaedah Ujikaji

4.3.1 Profil Suhu

1. Set pengukuran suhu dipastikan terlebih dahulu bagi mendapatkan nilai bacaan tanpa ralat yang besar.

2. Kuar *thermocouple* diletakkan pada kesemua lubang kebuk pembakaran dengan kedalaman yang sekata.
3. Kadar alir udara yang masuk ke pembakar ditetapkan.
4. Suis pembakar dihidupkan dan *ionizing electrode* akan dicaskan.
5. Bahanapi dibekalkan selama 10 saat. Sekiranya nyalaan tidak berlaku, bahan api akan disekat dan langkah 3 akan diulangi sehingga nyalaan yang stabil diperolehi.
6. Bacaan data bagi suhu yang terpapar pada *Thermocouple Recorder* dicatatkan.
7. Bagi mengkaji keberkesanan suntikan udara berperingkat, udara tambahan disuntik pada lubang ke-2.
8. Langkah 3 hingga 7 diulangi dengan mengubah kadar alir udara untuk ujikaji dijalankan dalam keadaan stoikiometri.

4.3.2 Pengukuran Emisi

Tanpa Udara Berperingkat

1. Penganalisis gas jenis *Kane May* ditentukan terlebih dahulu bagi mendapatkan nilai bacaan tanpa ralat yang besar.
2. Kadar alir udara yang masuk ke dalam pembakar ditetapkan.
3. Suis pembakar dihidupkan dan *ionizing electrode* akan dicaskan.
4. Bahanapi dibekalkan selama 10 saat. Sekiranya nyalaan tidak berlaku, bahan api akan disekat dan langkah 3 akan diulangi sehingga nyalaan yang stabil diperolehi.

5. Setelah pembakar berjaya dihidupkan dan stabil, kuar penganalisis gas diletakkan pada hujung keluaran probe penyampelan purata gas. Ini adalah supaya pancaran emisi yang terhasil dari pembakaran dapat dikumpulkan pada suatu nilai yang sekata.
6. Bacaan data bagi pancaran yang terpapar pada penganalisa gas dicatatkan.
7. Langkah 3 hingga 6 diulangi dengan mengubah kadar alir udara untuk ujikaji dijalankan dalam keadaan stoikiometri.

Dengan Udara Berperingkat

1. Penganalisis gas jenis *Kane May* ditentukur terlebih dahulu bagi mendapatkan nilai bacaan tanpa ralat yang besar.
2. Kadar alir udara tambahan yang masuk ke dalam kebuk pembakaran ditetapkan.
3. Kadar alir udara yang masuk ke dalam pembakar ditetapkan.
4. Suis pembakar dihidupkan dan *ionizing electrode* akan dicaskan.
5. Bahanapi dibekalkan selama 10 saat. Sekiranya nyalaan tidak berlaku, bahan api akan disekat dan langkah 3 akan diulangi sehingga nyalaan yang stabil diperolehi.
6. Kuar penganalisa gas diletakkan pada penghujung kebuk pembakaran.
7. Bacaan data bagi pancaran yang terpapar pada penganalisa gas dicatatkan.
8. Langkah 3 hingga 6 diulangi dengan mengubah kadar alir udara tambahan untuk ujikaji dijalankan dalam keadaan stoikiometri.

BAB V

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN PEMBAKAR MENGGUNAKAN AGIHAN UDARA SEKUNDER

Pembakar direka bentuk supaya aliran udara memasuki pembakar dapat diagihkan secara berperingkat. Udara dapat diagihkan dari dua sumber pada nisbah yang dikehendaki. Pendekatan ini melibatkan ciri-ciri di mana zon utama pembakar akan menyediakan pembakaran pada suhu yang rendah (pembakaran kaya bahan api) dan sumber haba bagi aliran edaran semula. Udara kedua diagihkan kepada pembakar untuk melengkapkan pembakaran. Dalam pendekatan ini, penekanan ialah kepada pengoptimuman nisbah agihan udara dan jarak tempat suntikan pada pembakar. Matlamat umum kaedah ini untuk mengawal suhu pembakaran bagi mencapai keadaan emisi NO_x yang rendah pada semua keadaan kendalian. Kaedah ini juga memberi kesan terhadap emisi CO. Bagi emisi karbon monoksida, CO terdapat dua faktor utama penghasilan iaitu, pertamanya ialah kekurangan bekalan udara yang mengurangkan bekalan gas oksigen (O_2). Ini menghadkan pengoksidaan karbon di dalam bahan bakar. Keduanya ialah suhu pembakaran yang rendah di mana suhu yang tinggi diperlukan untuk menghasilkan CO_2 (Lefebvre, 1983). Apabila udara berperingkat dibekalkan maka nisbah udara bahan api akan bertambah yang akan menambahkan kandungan O_2 dalam kebuk yang secara teorinya boleh mengurangkan emisi CO. Namun telah dibincangkan

sebelum ini bahawa dengan menggunakan udara berperingkat akan mengurangkan suhu kebuk. Oleh itu pada peringkat pertama pembakaran iaitu udara utama digunakan maka kadar penghasilan CO adalah tinggi akibat kandungan O₂ yang kurang. Namun apabila udara tambahan dibekalkan lebih banyak O₂ yang dibekalkan dan apabila suhu kebuk tadi telah stabil dan mencapai suhu yang tinggi maka CO yang terbentuk tadi akan bertindak balas dengan O₂ untuk menghasilkan CO₂ (Nimmo,1991).

5.1 Kesan agihan udara dua peringkat ke atas prestasi pembakar

Secara umumnya jumlah emisi NO_x yang terhasil daripada pembakaran meningkat dengan peningkatan udara lebihan dan suhu pembakaran disebabkan bekalan oksigen dan suhu pembakaran yang tinggi untuk pembentukan emisi NO_x. Usaha semasa yang dijalankan adalah untuk mengurangkan pembentukan emisi ini dengan memeringkatkan udara pembakaran seperti ujikaji yang telah dijalankan oleh penyelidik terdahulu. Pembakaran udara berperingkat dijalankan dengan menyuntik udara sekunder pada 2 jarak yang berbeza iaitu jarak 100 mm dan 200 mm dari penulu (bekalan udara utama). Udara diagihkan kepada beberapa nisbah udara sekunder kepada jumlah udara iaitu 0.1, 0.2, 0.3 dan 0.4 atau dalam bentuk peratusan sebanyak 10%, 20%, 30% dan 40% udara dilencongkan kepada udara masukan kedua. Ujikaji dijalankan dengan penggunaan bahan api gas bagi melihat ragam pembentukan emisi. Ujikaji dilakukan pada nisbah kesetaraan stoikiometri ($\phi=1.0$). Emisi yang dibincangkan ialah oksida nitrogen (NO_x), karbon monoksida (CO), hidrokarbon tidak terbakar (UHC) dan karbon dioksida (CO₂) serta prestasi pembakaran dilihat dari aspek kecekapan pembakaran (η).

5.2 Pengaruh agihan udara berperingkat dalam pembakaran bahan api gas

Rajah 5.1, menunjukkan pembentukan oksida nitrogen, NO_x berfungsikan nisbah udara sekunder kepada jumlah udara pada dua jarak suntikan udara sekunder. Daripada graf tersebut dapat dilihat emisi NO_x dipengaruhi oleh nisbah udara yang dibekalkan dan jarak suntikan. Jika dilihat daripada Rajah 5.1 untuk suntikan pada jarak 100 mm didapati emisi NO_x meningkat sehingga 20% apabila 10% udara dilencongkan ke peringkat kedua. Selepas itu emisi oksida ini menurun secara seragam hingga 30% udara dilencongkan ke peringkat kedua. Kesan yang sama didapati jika udara sekunder disuntik pada jarak 200 mm dari udara utama tetapi kenaikan hanya 13% sahaja dan terus turun secara seragam.

Rajah 5.2, menunjukkan pembentukan oksida nitrogen, CO berfungsikan nisbah udara sekunder kepada jumlah udara pada dua jarak suntikan udara sekunder. Daripada graf tersebut dapat dilihat emisi CO dipengaruhi oleh nisbah udara yang dibekalkan dan jarak suntikan. Jika dilihat daripada Rajah 5.2 untuk suntikan pada jarak 100 mm didapati emisi CO menurun sedikit dalam lingkungan 8% sahaja apabila 10% udara dilencongkan ke peringkat kedua. Selepas itu emisi oksida ini meningkat secara seragam hingga 30% udara dilencongkan ke peringkat kedua. Kesan yang sama didapati jika udara sekunder disuntik pada jarak 200 mm dari udara utama tetapi kenaikan hanya 4% sahaja dan terus meningkat secara seragam.

Rajah 5.3, menunjukkan pembentukan oksida nitrogen, UHc berfungsikan nisbah udara sekunder kepada jumlah udara pada dua jarak suntikan udara sekunder. Daripada graf tersebut dapat dilihat emisi UHc dipengaruhi oleh nisbah udara yang dibekalkan dan jarak suntikan. Jika dilihat daripada Rajah 5.3 untuk suntikan pada jarak 100 mm didapati emisi UHc menurun sehingga 7% apabila 10% udara dilencongkan ke peringkat kedua. Selepas itu emisi oksida ini meningkat sedikit secara seragam hingga 30% udara dilencongkan ke peringkat kedua. Kesan yang sama didapati jika udara sekunder disuntik pada jarak 200 mm dari udara utama tetapi kenaikan hanya 5% sahaja dan terus

turun secara seragam. Dapat diperhatikan juga suntikan udara sekunder pada jarak ini kadar kenaikannya lebih rendah daripada suntikan pada jarak 100 mm.

Rajah 5.4 menunjukkan pembentukan emisi karbon dioksida (CO_2) berfungsikan nisbah udara sekunder kepada jumlah udara jumlah pada dua jarak suntikan udara sekunder. Pengaruh terhadap agihan udara dapat dilihat pada graf tersebut dari aspek kedudukan udara sekunder dibekalkan. Graf emisi suntikan udara sekunder, didapati bacaan CO_2 adalah malar pada semua nisbah udara lencongan, bacaan berlegar sekitar 11.5% pada jarak 100mm dari satah keluaran pemusar dan 11.3% pada jarak 200mm dari satah keluaran pemusar. Walaupun begitu bacaan yang diperolehi masih rendah berbanding pembakaran tanpa agihan udara sekunder.

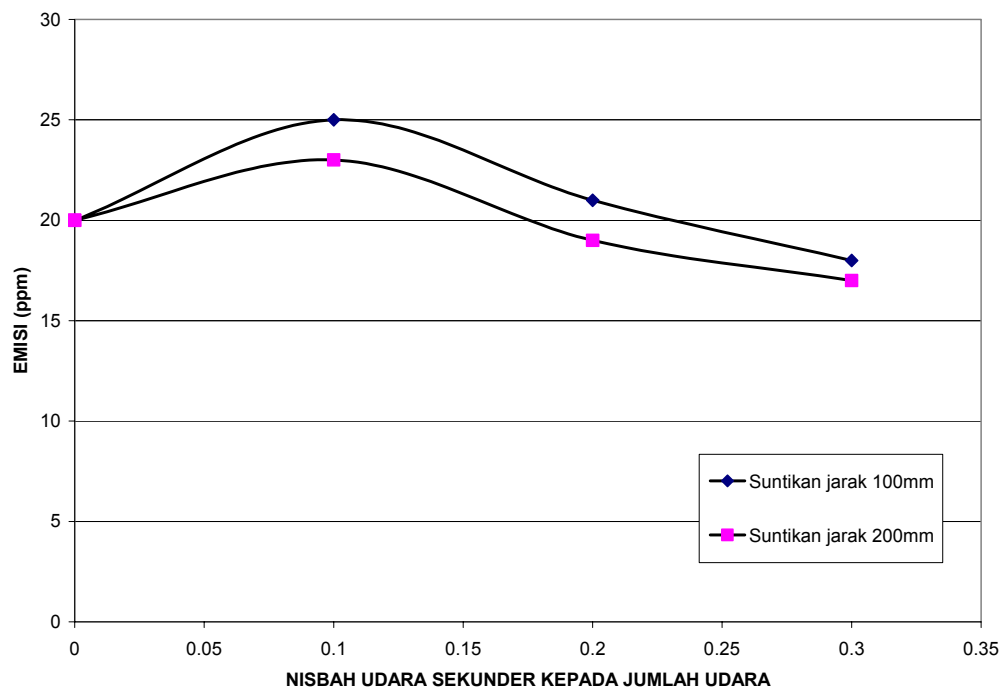
Rajah 5.5 menunjukkan kecekapan pembakaran (η) berfungsikan nisbah udara kedua kepada jumlah udara pada nisbah 0%, 10%, 20%, 30% dan 40% agihan udara sebagai udara sekunder untuk dua jarak suntikan udara sekunder iaitu 100mm dan 200mm dari satah bekalan udara utama. Bagi suntikan udara sekunder pada jarak 100mm, didapati nilai kecekapan ini malar sepanjang nisbah udara sekunder kepada udara jumlah. Nilai kecekapan pembakaran berada dalam lingkungan 84%. Sementara itu, bagi suntikan udara sekunder pada jarak 200mm, didapati nilai kecekapan ini masih malar sepanjang nisbah udara sekunder kepada udara jumlah. Nilai kecekapan pembakaran rendah sedikit dari sebelum ini dan berada dalam lingkungan 82%.

5.3 Ulasan Pembakaran Agihan Udara Berperingkat dalam Pembakaran Bahan Api Gas

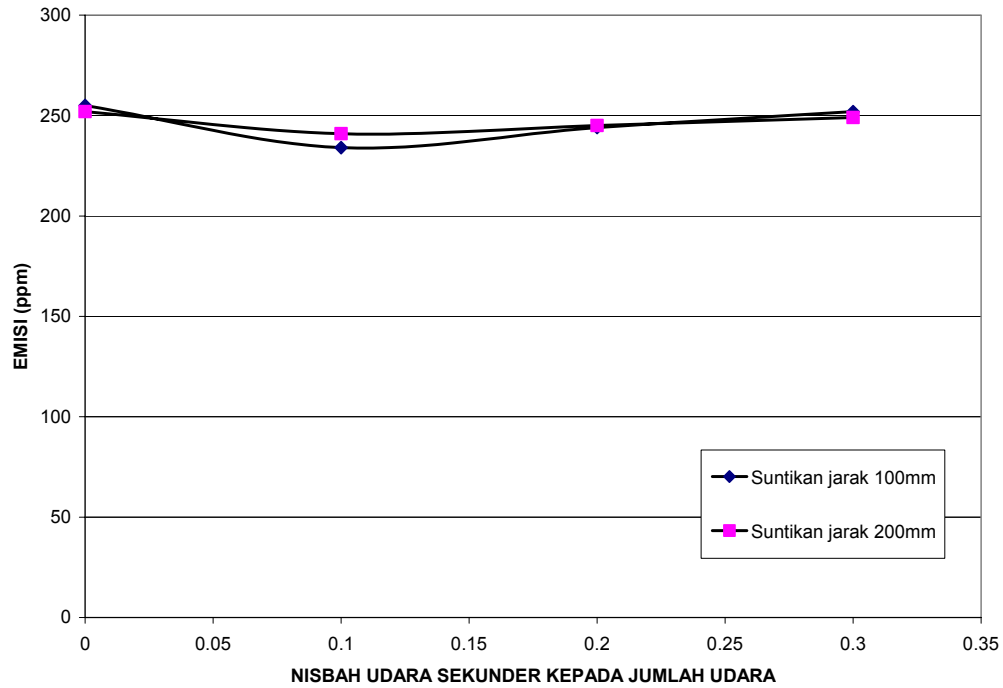
Pembakaran menggunakan pengubahsuaian agihan udara berperingkat dalam beberapa keadaan adalah yang termudah jika dibandingkan menggunakan kaedah SNCR, SCR atau pembakaran semula. Pemisahan bahagian udara untuk pembakaran menjadi alat campuran udara secara berturutan kepada api nyalaan dan mewujudkan pembakaran yang kaya bahan api ($\phi > 1$) berhampiran dengan muka pembakar di mana akan mengurangkan pembentukan NO_x disebabkan suhu pembakaran yang rendah. Daripada ujikaji penggunaan udara berperingkat dengan agihan sehingga 30% udara kepada udara kedua pada dua jarak suntikan yang berbeza didapati terdapat perubahan terhadap pembentukan emisi dari pembakaran. Emisi NO_x dilihat meningkat apabila udara kedua disuntik pada jarak 100mm dan 200mm dari satah keluaran pemusar dan peratusan yang paling kecil. Keadaan ini disebabkan pembakaran berlaku pada keadaan kaya bahan api tetapi amat hampir dengan stoikiometri dan suhu pembakaran masih tinggi untuk menyebabkan pembentukan emisi oksida nitrogen (NO_x). Apabila nisbah ini dinaikkan atau dengan kata lain udara utama membakar dalam keadaan amat kaya bahan api dan udara kedua melengkapkannya, emisi NO_x menurun lebih rendah dari pembakaran tanpa pemeringkatan udara.

Emisi CO juga menunjukkan perkaitan yang serupa dengan NO_x di mana emisi ini menurun ketika emisi NO_x tinggi pada semua keadaan ujikaji. Keadaan ini seperti dibincangkan terdahulu (Lefebvre, 1983). Pembebasan CO dilihat meningkat dan ini menunjukkan peratusan udara sekunder yang tinggi pada jarak yang jauh dari satah keluaran pemusar, tidak membantu pembakaran dengan berkesan. Jika dilihat kepada emisi UHC pula, emisi ini meningkat apabila peratus udara sekunder dalam pembakaran ditambah sesuai dengan pembentukan CO (Bahr, 1973). Sementara itu, emisi CO_2 dilihat pembebasannya hampir malar jika udara sekunder dibekalkan dari 100mm dari satah keluaran pemusar tetapi menurun pada jarak 200mm. Pembebasan gas ini dilihat berkurangan sesuai dengan peningkatan CO. Nimmo (1991) telah menjalankan ujikaji

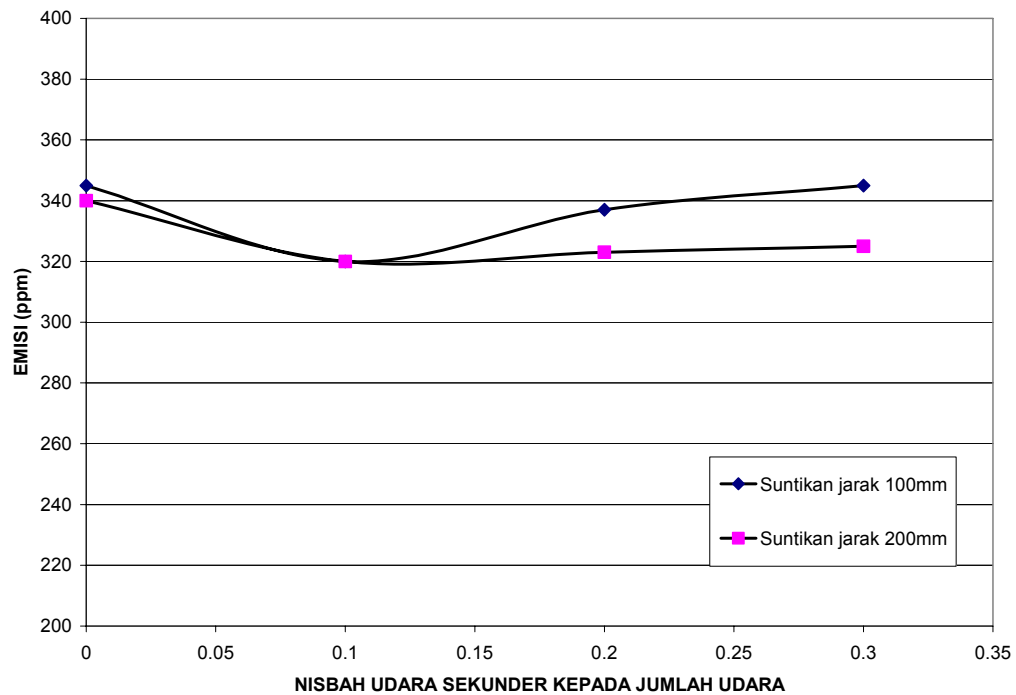
yang hampir serupa dan hanya memfokuskan kepada emisi NO_x . Beliau mendapati emisi ini dapat diturunkan apabila peratus udara kedua dinaikkan tetapi tidak berkesan untuk emisi-emisi lain. Terdapat penyelidik lain seperti Gerhold dan rakan-rakan (1979) yang memberikan cadangan yang mana jika pemeringkatan udara dibuat, pembakaran pada udara utama tidak melebihi nisbah kesetaraan, $\phi=1.2$. Selain itu, pembakaran ini juga tidak berada di kawasan yang amat cair bahan api, tidak kurang dari 0.8 nisbah kesetaraan. Jika tidak, emisi NO_x dan emisi-emisi lain akan meningkat.



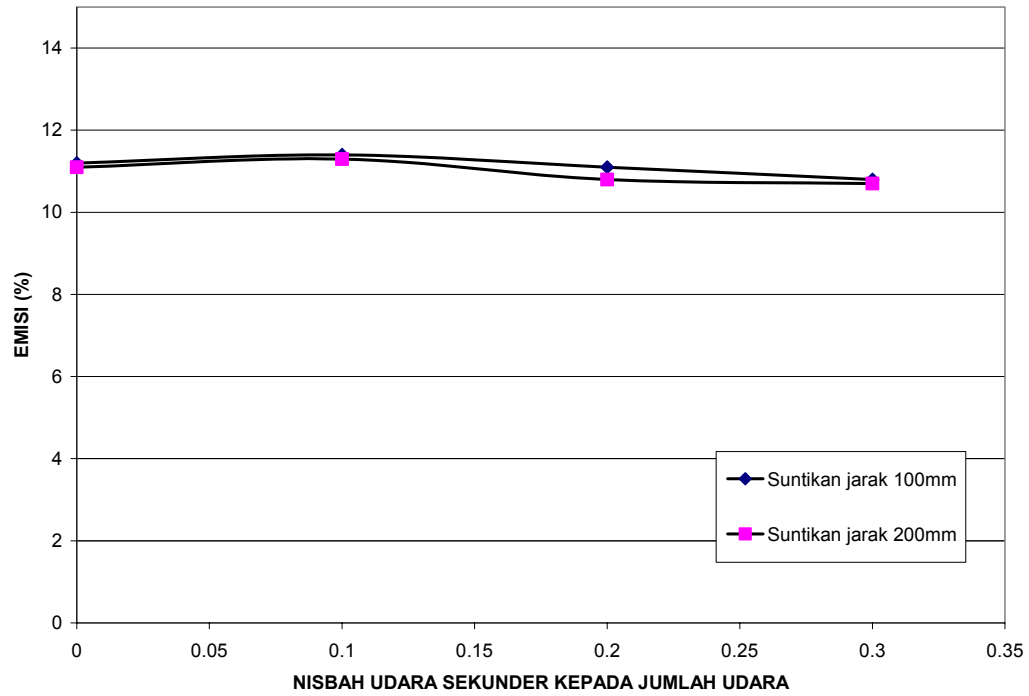
Rajah 5.1 Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$



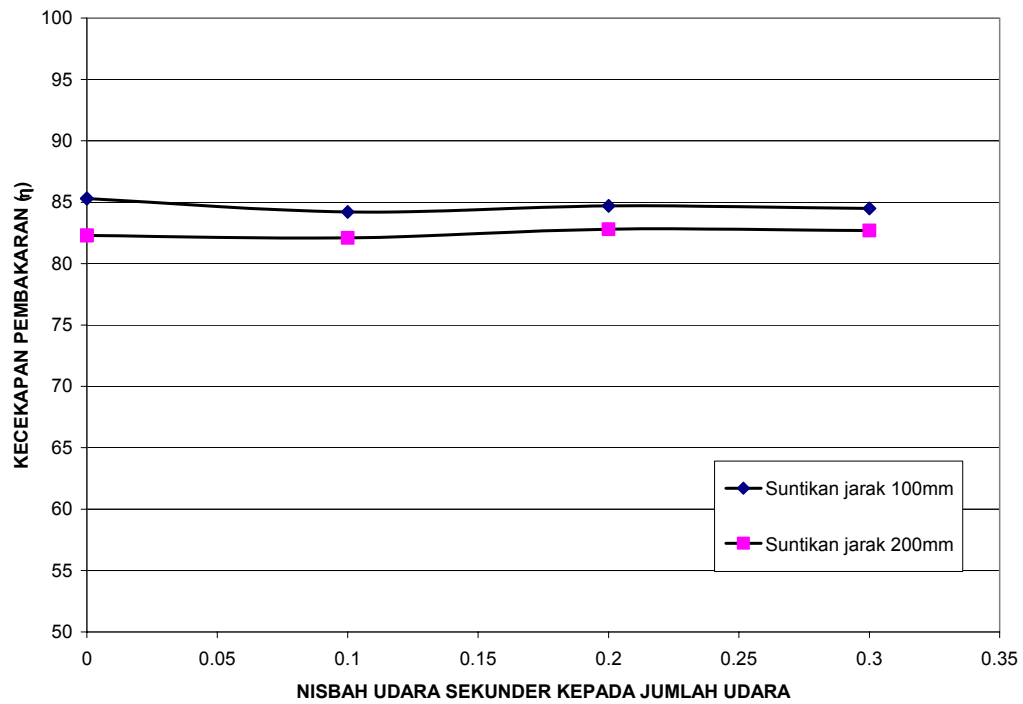
Rajah 5.2 Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$



Rajah 5.3 Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$



Rajah 5.4 Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$



Rajah 5.5 Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$

BAB VI

KESIMPULAN

6.1 Kesimpulan tentang emisi pembakaran

Secara keseluruhan, ujikaji 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 bentuk pembakaran bagi pengurangan emisi dengan cara '*post-flame reduction*' telah dapat diperhatikan dan dikaji.

Penggunaan kaedah agihan udara sekunder kepada pembakar dapat mengurangkan lagi pembentukan emisi dari pembakaran bahan api cecair. Secara keseluruhannya nisbah udara sekunder terhadap jumlah udara sebanyak 20% pada jarak suntikan 200mm dari agihan udara utama memberikan pelepasan emisi yang baik jika dibandingkan dengan peratus nisbah dan jarak suntikan yang lain. Pengurangan emisi NO_x sehingga 13% dan 10% bagi CO diperolehi pada keadaan ini.

6.2 Cadangan penyelidikan pada masa akan datang

Penggunaan agihan udara sekunder dilihat mempunyai potensi untuk dibangunkan. Kajian reka bentuk pembakar supaya agihan udara kedua juga mengalami pusaran yang mana dijangkakan akan dapat membantu melengkapkan pembakaran di dalam kebuk pembakar seperti mana diketahui aliran pusar dapat memperbaiki percampuran udara bahan api. Agihan ini juga berkemungkinan besar dapat dijalankan lebih daripada dua peringkat jika pembakar bersaiz lebih besar digunakan.

Penggunaan perisian komputer seperti analisis menggunakan dinamik bendalir berkomputer (CFD) seperti perisian FLUENT dilihat akan dapat meramalkan ciri-ciri pembakaran yang berlaku di dalam kebuk pembakar. Sebarang perubahan dari segi jarak suntikan, sudut suntikan dan nisbah duntikan boleh disimulasikan sama ada melalui keadaan isoterma dan pembakaran. Prestasi pembakar seperti pembentukan emisi dan kecekapan pembakaran dapat diramal terlebih dahulu sebelum ujikaji sebenar dijalankan. Simulasi ini perlu sebelum ujikaji sebenar kerana ujikaji hanya dijalankan pada keadaan dan rekabentuk yang terbaik. Ini dapat menjimatkan masa dan kos bahan.

RUJUKAN

Ahmad Suhaimi Abd. Rahim (Oktober 1994), 'Gaseous Fuel Gas Turbine For Low Emissions.', Department of Fuel and Energy, University of Leeds, Tesis PhD. (Page 51-55)

Cengel, Y. A dan Boles, M. A. (2002), 'Thermodynamics: An Engineering Approach (4th Edition).', McGraw-Hill. (Page 711-720)

Douglas J. F. *et al* (1995), 'Mekanik Bendalir.', Dewan Bahasa dan Pustaka. (Page 195-196)

Edwards, J. B., (1974), 'Combustion: Formation and Emission of Trace Species.', Michigan, USA: Ann Arbor Science Publishers, Inc.

Francis, W. (1980), 'Fuels and Fuel Technology.', 2nd Edition, Pergamon Press. (Page 377 – 380)

Goodger, E. M., (1988), 'Hitungan Pembakaran: Teori, Contoh Penyelesaian dan Masalah.', Dewan Bahasa dan Pustaka.

Laporan Tahunan Alam Sekitar 1998, Jabatan Alam Sekitar.

Lefebvre, A. H. (1983), 'Gas Turbine Combustion.', McGraw-Hill. (Page 562-565)

Lister, D.H. dan Wedlock, M.I. (1978), 'Measurement of Emissions Variability of a Large Aero-Engine.', ASME Paper No. 78-GT-75.

Muhammad Nazri Mohd Jaafar, Romales Ramli (Disember 1998), 'Bilangan 6: Membangunkan Sebuah Unit Pembakar Jenis Kaleng.', Jurnal Mekanikal, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia. (Page 55-73)

Ng Lai Guan (2000), 'The Study of The Effectiveness of air Staging in Reducing Emissions from A Self-Sustainable Fixed Bed Combustor.', Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia. (Page 3-5)

Perry, R. H., (1997), 'Perry's Chemical Engineers' Handbook.', McGraw-Hill. (Page 27:37-27:39)

Raymond, C dan Kagel, R (1990), 'Emission From Combustion Processes: Origin, Measurement, Control.', Lewis Publishers Inc.

LAMPIRAN

LAMPIRAN A

Penukaran nilai kalori kasar (Q_{gr}) kepada nilai kalori bersih (Q_{net})

Penukaran ini berdasarkan **ASTM D240-76**, '*Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuel by Bomb Calorimeter.*' oleh An American National Standard.

$$Q_{net} = 1.8 Q_{gr} - 91.23 \times H \quad \dots A1$$

Dengan

Q_{net} = nilai kalori bersih, Btu/lb (1 Btu/lb = 2.326 kJ/kg)

Q_{gr} = nilai kalori kasar, cal/g (1 cal/g = 4.1868 kJ/kg)

H = komposisi hidrogen dalam sampel, %

LAMPIRAN B

Pengiraan kecekapan pembakaran

Kecekapan pembakaran dikira berdasarkan *British Standard :BS845*.

Terdapat 2 sumber yang menyebabkan pengurangan kecekapan pembakaran semasa pembakaran bahan api cecair.

- a. Pengurangan disebabkan gas ekszos
 - kehilangan gas ekszos kering
 - kehilangan disebabkan kelembapan
 - kepekaan terhadap wap air
 - pengaruh gas tidak terbakar

- b. Pengurangan disebabkan bendasing
 - abu pembakaran
 - habuk pembakaran

Pengiraan kecekapan

Data bahan api yang diketahui:

Q_{gr} - nilai kalori kasar (kJ/kg)

Q_{net} - nilai kalori bersih (kJ/kg)

K1 - pekali berdasarkan nilai kalori kasar dan bersih

$K1g$ - $(255 \times \% \text{ karbon dalam bahan api})/Q_{gr}$

$K1n$ - $(255 \times \% \text{ karbon dalam bahan api})/Q_{net}$

K2 - % maksimum secara teori CO_2 (ketika kering)

K3 - % kehilangan akibat kelembapan

K4 - % kehilangan karbon tak terbakar (48 untuk bahan api petroleum)

Data yang diukur

T_f - suhu gas ekszos ($^{\circ}\text{C}$)

T_i - suhu masukan udara ($^{\circ}\text{C}$)

O_2m - % oksigen dalam gas ekszos

Data yang dikira

T_{net} - beza suhu ($^{\circ}\text{C}$)

η_{net} - % kecekapan pembakaran

$\eta_{\text{net}} = 100\% - \text{kehilangan gas ekszos kering} \quad \dots\text{B1}$

$\text{Kehilangan gas ekszos kering} = 20.9 \times K1n \times (T_{\text{net}}) / K2 \times (20.9 - \% \text{O}_2\text{m}) \quad \dots\text{B2}$

LAMPIRAN C

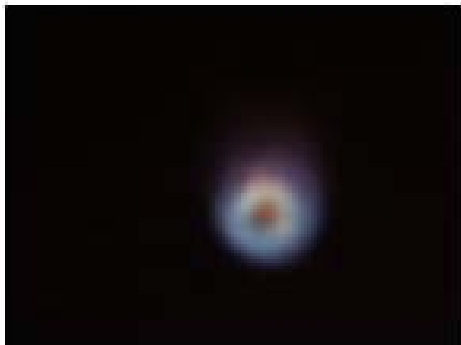
Ilustrasi pembakaran



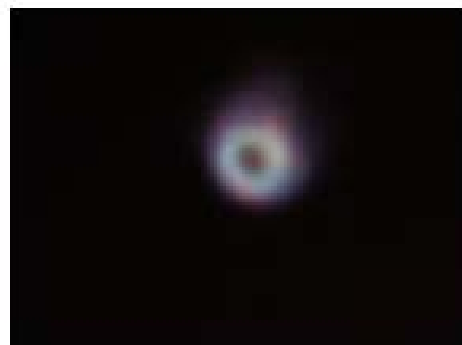
Pembakaran 0% udara berperingkat



Pembakaran 10% udara berperingkat
suntikan 100mm



Pembakaran 20% udara berperingkat
Pembakaran suntikan 100mm



Pembakaran 20% udara berperingkat
Pembakaran suntikan 200mm



Rigujikaji