

PEMBANGUNAN PEMBAKAR BERBAHAN API CECAIR
DENGAN CIRI-CIRI RENDAH NO_x

MOHAMAD SHAIFUL ASHRUL B. ISHAK

Tesis dikemukakan
sebagai memenuhi syarat penganugerahan
ijazah Sarjana Kejuruteraan (Mekanikal)

Fakulti Kejuruteraan Mekanikal
Universiti Teknologi Malaysia

OGOS 2005

Buat bonda & ayahanda...

Terima kasih di atas sokonganmu selama ini...

Buat Sahabat semua...

Terima kasih kerana menemaniku di saat suka dan duka...

Buat Kolej Tun Razak & Kolej 9...

Terima kasih kerana mengajarku erti kemanusiaan...

Buat awek iklan Sunsilk...

The only thing that your eyes didn't told me is your name...

Buat seorang AKU...

Banyak lagi yang perlu dilakukan...

Tabahkanlah hatimu...

LOST & PRIDE!

PENGHARGAAN

Syukur alhamdulillah, dengan izinNya maka dapatlah tesis ini disudahkan dengan jayanya. Semoga hasil penyelidikan ini membawa kebaikan dan memberi pengetahuan kepada semua, sama ada secara langsung ataupun tidak.

Saya ingin merakamkan penghargaan yang tidak terhingga kepada semua pihak yang terlibat dalam usaha menyiapkan projek ini terutama buat penyelia projek, Prof. Madya Dr. Mohammad Nazri bin Mohd Jaafar yang telah banyak memberikan nasihat serta tunjuk ajar dalam menjalankan penyelidikan. Jutaan terima kasih kepada rakan-rakan seperjuangan dan juruteknik Makmal Pembakaran, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal kerana telah begitu banyak membantu melicinkan perjalanan projek ini baik dari segi luahan kudrat mahu pun pendapat.

Akhir sekali ucapan penghargaan dan terima kasih kepada kedua ibu bapa saya, Ishak Ariffin dan Aminah Yaacob serta keluarga kerana telah banyak memberikan sokongan dan dorongan selama ini. Segala pengorbanan kalian tidak akan dilupakan buat selama-lama.

Duhai insan;
budimu abadi...

Wassalam.

Julai 2005

ABSTRAK

Suatu penyelidikan telah dijalankan ke atas sebuah pembakar berbahan api cecair yang menggunakan pemusar udara bilah lengkung aliran jejarian dengan nombor pusar dari 0.046 hingga 1.911. Pembakar suntikan nozel bahan api tunggal telah digunakan dalam melihat pengaruh nombor pusar terhadap pembentukan emisi terutama NO_x dan emisi-emisi lain seperti CO, UHC dan CO_2 . Aliran pusar memberi kesan dalam pembentukan zon edaran semula yang bertindak sebagai halangan aerodinamik di mana akan membantu dalam menstabilkan nyalaan, percampuran udara dan bahan api serta mempengaruhi pembentukan bahan cemar. Kaedah aliran pusar didapati berhasil mengurangkan emisi NO_x sehingga 26% apabila aliran pusar dinaikkan dari nombor pusar 0.046 ke 1.427. Satu kaedah meningkatkan kecekapan percampuran bahan api udara dan menghasilkan daya edaran semula yang tinggi adalah dengan menyelitkan plat orifis pada bahagian satah keluaran pemusar, iaitu pada laluan masuk campuran bahan api udara ke kebuk pembakaran. Penyelitan plat orifis ini akan menyebabkan peningkatan terhadap kehilangan tekanan di bahagian keluaran pemusar dan seterusnya meningkatkan gelora yang menambah kadar percampuran bahan api dengan udara. Penggunaan teknik ini meningkatkan lagi pengurangan emisi NO_x sehingga 22%. Pembakaran menggunakan agihan udara berperingkat juga telah dikenalpasti sebagai satu teknik lain yang dapat mengurangkan lagi emisi NO_x . Kaedah udara berperingkat berjaya memastikan pembakaran berjalan secara sempurna dan mengurangkan penghasilan NO_x dengan mengelakkan kenaikan suhu kebuk secara mendadak. Kaedah ini juga meningkatkan lagi pengurangan emisi NO_x sehingga 18%.

ABSTRACT

A liquid fuel burner system with curved radial air swirler vane angles with swirl number variation between 0.046 to 1.911 has been investigated. A combustor with single central fuel nozzle is used to determine the effect of swirl number in emissions formation especially NO_x as well as the other emissions such as CO, UHc and CO_2 . Swirling flow affect the formation of recirculation zone thus provides the aerodynamics blockage to stabilise the flame, improve mixing between air and fuel and affect formation of emissions. NO_x reduction of more than 26% was observed as the swirl number increases from 0.046 to 1.427. In order to achieve an enhanced recirculation zone as well as to have a better control on mixing process, a swirler, which consist of an orifice plate at the outlet of radial swirler was introduced. The purpose of orifice plate insertion was to create pressure loss at the swirler outlet. The pressure loss contribute to the increase of the turbulence and hence assist in mixing of air and fuel. This technique has show a further increase in the reduction of NO_x formation of about 22%. Air staged combustion has also been recognised as other solution to further reduce emissions from combustion process. The secondary air introduced downstream of the fuel rich primary zone help to complete the combustion and reduced the formation NO_x by suppressing the increase in combustion temperature. This technique has also shown on improvement in the reduction of NO_x emissions for about 18%.

KANDUNGAN

BAB	PERKARA	MUKA SURAT
	JUDUL KAJIAN	i
	PENGAKUAN	ii
	DEDIKASI	iii
	PENGHARGAAN	iv
	ABSTRAK	v
	ABSTRACT	vi
	KANDUNGAN	vii
	SENARAI JADUAL	xi
	SENARAI RAJAH	xii
	SENARAI SIMBOL	xvii
	SENARAI LAMPIRAN	xx
1	Pengenalan	
1.1	Kepentingan Penyelidikan	2
1.2	Kenyataan Permasalahan	3
1.3	Objektif dan skop penyelidikan	4
	1.3.1 Objektif	4
	1.3.2 Skop Penyelidikan	4
1.4	Gariskasar Tesis	5

2	KAJIAN LITERATUR EMISI DAN KAWALAN	
	EMISI DARI PEMBAKAR BERBAHAN API CECAIR	
	DAN FAKTOR AERODINAMIK DALAM SISTEM	
	PEMBAKARAN	
2.1	Peraturan dan Akta Pencemaran	6
2.2	Kesan Buruk Oksida Nitrogen (NO _x)	9
2.3	Kesan Emisi NO _x terhadap alam sekitar	
2.3.1	Hujan Asid	9
2.3.2	Penipisan Lapisan Ozon	10
2.3.3	Kenaikan Suhu Bumi	12
2.3.4	Asbut fotokimia	13
2.4	Kesan NO _x ke atas Kesihatan Manusia dan Haiwan	14
2.5	Emisi dari Pembakar	15
2.5.1	Karbon Monoksida (CO)	15
2.5.2	Hidrokarbon Tak Terbakar (UHC)	17
2.6	Emisi Oksida Nitrogen, NO _x	18
2.6.1	Faktor kimia dalam pembentukan NO _x	19
2.6.2	Mekanisma Zeldovich	20
2.6.3	Mekanisma Fenimore	23
2.6.4	Pembentukan NO _x Bahan Api	25
2.6.5	Pembentukan NO _x di dalam Sistem Praktikal	27
	2.6.5.1 Pembentukan NO _x di dalam pembakaran pra-campur	27
	2.6.5.2 Pembentukan NO _x di dalam pembakaran tiada pra-campur	28
2.7	Pendekatan untuk merekabentuk pembakar beremisi rendah	28
2.8	Pengubahsuaian proses pembakaran	29
2.8.1	Pembakar rendah NO _x	30
2.8.2	Pembakaran Udara Berperingkat	32
2.9	Rawatan pasca pembakaran	35
2.9.1	Penurunan bermangkin terpilih (SCR)	35

2.9.2	Penurunan bukan bermangkin terpilih (<i>SNCR</i>)	36
2.10	Penggunaan aliran pusar dan kesan pusaran dalam pembakaran	37
2.10.1	Kesan-kesan utama aliran pusar	39
2.10.2	Ciri-ciri aliran pusar	40
2.10.3	Nombor Pusar, S_N	40
2.10.3.1	Aliran pusaran lemah ($S_N < 0.6$)	45
2.10.3.2	Aliran pusaran kuat ($S_N > 0.6$)	46
2.10.4	Kesan tahap pusaran	47
2.10.5	Fenomena kerosakan vorteks	49
2.10.6	Kejatuhan tekanan	50
2.10.7	Kesan penyelitan plat orifis	53
2.11	Kesimpulan penyelidikan terdahulu	56

3 REKABENTUK PEMUSAR UDARA, KEBUK PEMBAKAR DAN PENYEDIAAN RIG UJIKAJI

3.1	Pengenalan	60
3.2	Rekabentuk pemusar udara	61
3.3	Rekabentuk kebuk pembakar	64
3.3.1	Zon nyalaan	65
3.3.2	Penentuan panjang dan diameter nyalaan	66
3.4	Nisbah bahan api udara (nisbah kesetaraan, ϕ)	66
3.5	Sistem ujikaji	68
3.5.1	Sistem bekalan bahan api	69
3.5.2	Sistem suntikan bahan api	70
3.5.3	Sistem bekalan udara	71
3.5.4	Instrumentasi kebuk pembakar	72
3.5.5	Sistem persampelan gas ekzos	73
3.5.6	Sistem penganalisa gas	74
3.6	Prosedur ujian umum	75

4	PEMBAKAR BERPEMUSAR ALIRAN JEJARIAN UNTUK PEMBAKARAN RENDAH NO_x	
4.1	Pengenalan	79
4.2	Pekali discas, C _D dan tekanan statik dinding	79
4.3	Kesan penggunaan pemusar aliran jejarian	81
4.3.1	Profil taburan suhu	81
4.3.2	Pengaruh nombor pusar, S _N terhadap emisi purata pembakar	83
4.4	Perbandingan pembakaran dengan bahan api berbeza	86
4.4.1	Profil taburan suhu	86
4.4.2	Kesan bahan api terhadap emisi purata pembakar	87
4.5	Pembakaran dengan penyelitan plat orifis dan agihan udara sekunder	89
4.6	Kesan penyelitan plat orifis pada pemusar aliran jejarian	91
4.6.1	Pengaruh penyelitan orifis terhadap emisi purata pembakar	91
4.6.2	Ulasan pembakaran dengan penyelitan plat orifis	95
4.7	Kesan agihan udara dua peringkat ke atas prestasi pembakar	96
4.7.1	Pengaruh agihan udara berperingkat dalam pembakaran bahan api cecair	97
4.7.2	Ulasan pembakaran agihan udara berperingkat dalam pembakaran bahan api cecair	99
5	KESIMPULAN DAN CADANGAN	
5.1	Kesimpulan secara umum	124
5.2	Kesimpulan tentang emisi pembakaran	126
5.3	Cadangan penyelidikan pada masa akan datang	127
	RUJUKAN	129
	LAMPIRAN A – D	136

SENARAI JADUAL

JADUAL		MUKA SURAT
2.1	Had kepekatan emisi dibenarkan bagi industri di Malaysia	8
2.2	Oksida nitrogen	19
3.1	Maklumat lengkap rekabentuk pemusar aliran jejarian	63
3.2	Perbandingan reka bentuk pemusar antara penyelidik terdahulu	64
3.3	Perbandingan nisbah kesetaraan	67
3.4	Komposisi kimia bahan api, diesel dan kerosin komersial	70
3.5	Julat pengesanan dan kejituan penganalisa gas	74

SENARAI RAJAH

RAJAH		MUKA SURAT
2.1	Pengaruh tekanan pembakaran terhadap emisi CO dan UHc	18
2.2	Perkaitan emisi NO enjin dengan suhu masukan pembakar	22
2.3	Perbandingan data NO pada dua aras tekanan	22
2.4	Pengaruh masa mastautin terhadap NO _x dalam sistem bahan api udara pracampur	23
2.5	Gambarajah pembentukan NO menurut mekanisma Fenimore	25
2.6	Ringkasan teknologi pengurangan NO _x	29
2.7	Pengaruh tekanan dan nisbah udara bahan api terhadap emisi NO _x	31
2.8	Rajah skematik udara berperingkat pada kebuk pembakaran	33
2.9	Lukisan skematik pembakar agihan udara berperingkat	34
2.10	Lukisan skematik sistem <i>SCR</i>	36
2.11	Lukisan skematik sistem <i>SNCR</i>	37
2.12	Susuk biasa komponen halaju paksi dan pusar dalam medan pusaran	38
2.13	Bentuk aliran pusaran lemah	45
2.14	Taburan jejarian halaju paksi	45
2.15	Bentuk aliran pusaran kuat	46
2.16	Pengaruh sudut dan jenis bilah terhadap pekali kehilangan tekanan	51
2.17	Pengaruh nombor pusar terhadap aliran jisim balikan maksimum	52
2.18	Pengaruh sudut bilah terhadap aliran jisim balikan maksimum	53
3.1	Skema rekabentuk pemusar aliran jejarian	63

3.2	Pemasangan pemusar aliran jejarian pada pembakar	64
3.3	Skema rekabentuk kebuk pembakaran	65
3.4	Jumlah penggunaan udara pembakaran untuk variasi nisbah kesetaraan, ϕ	68
3.5	Bentuk semburan bahan api pada pelbagai sudut	71
3.6	Skema kuar instrumentasi pada kebuk pembakar	72
3.7	Skema kuar persampelan 'X' gas ekzos	73
3.8	Skema keseluruhan pembakar berbahan api cecair pada skala makmal	77
4.1	Pekali discas melawan nombor Reynolds pada variasi sudut bilah pemusar, ujian sejuk	101
4.2	Pekali discas melawan nombor Reynolds pada variasi sudut bilah pemusar dengan 45mm plat orifis, ujian sejuk	101
4.3	Pekali discas melawan nombor Reynolds pada variasi sudut bilah pemusar dengan 40mm plat orifis, ujian sejuk	102
4.4	Pekali discas melawan nombor Reynolds pada variasi sudut bilah pemusar dengan 35mm plat orifis, ujian sejuk	102
4.5	Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=1.10$, bahan api: diesel	103
4.6	Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=1.00$, bahan api: diesel	103
4.7	Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=0.833$, bahan api: diesel	104
4.8	Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel	104
4.9	Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel	105
4.10	Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel	105
4.11	Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel	106
4.12	Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel	106
4.13	Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=1.10$, bahan api: kerosin	107

4.14	Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=1.00$, bahan api: kerosin	107
4.15	Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=0.833$, bahan api: kerosin	108
4.16	Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)	108
4.17	Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)	109
4.18	Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)	109
4.19	Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)	110
4.20	Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)	110
4.21	Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $S_N=0.780$, variasi orifis	111
4.22	Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $S_N=1.427$, variasi orifis	111
4.23	Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $S_N=0.780$, variasi orifis	112
4.24	Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $S_N=1.427$, variasi orifis	112
4.25	Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $S_N=0.780$, variasi orifis	113
4.26	Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $S_N=1.427$, variasi orifis	113
4.27	Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $S_N=0.780$, variasi orifis	114
4.28	Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $S_N=1.427$, variasi orifis	114
4.29	Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $S_N=0.780$, variasi orifis	115

4.30	Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $S_N=1.427$, variasi orifis	115
4.31	Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$, bebilang pemusar, agihan udara pada 100mm	116
4.32	Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$, bebilang pemusar, agihan udara pada 200mm	116
4.33	Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$, bebilang pemusar, agihan udara pada 300mm	117
4.34	Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$, bebilang pemusar, agihan udara pada 100mm	117
4.35	Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$, bebilang pemusar, agihan udara pada 200mm	118
4.36	Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$, bebilang pemusar, agihan udara pada 300mm	118
4.37	Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$, bebilang pemusar, agihan udara pada 100mm	119
4.38	Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$, bebilang pemusar, agihan udara pada 200mm	119
4.39	Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$, bebilang pemusar, agihan udara pada 300mm	120
4.40	Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$, bebilang pemusar, agihan udara pada 100mm	120
4.41	Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$, bebilang pemusar, agihan udara pada 200mm	121
4.42	Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$, bebilang pemusar, agihan udara pada 300mm	121
4.43	Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$, bebilang pemusar, agihan udara pada 100mm	122
4.44	Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$, bebilang pemusar, agihan udara pada 200mm	122

- 4.45 Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah udara, $\phi=1.0$,
bebilang pemusar, agihan udara pada 300mm

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

u	-	halaju arus
U	-	halaju semasa
UHC	-	hidrokarbon tak terbakar
U_m	-	halaju min
V	-	volt
VOC	-	sebatian organik mudah ruap
W	-	kerja
W	-	Watt
z	-	turus

SENARAI LAMPIRAN

LAMPIRAN	MUKA SURAT
A1	Kejatuhan tekanan pemusar 137
A2	Pekali discas 138
B1	Komposisi kimia bahan api (Analisis CHN) 139
B2	Penukaran nilai kalori kasar (Q_{gr}) kepada nilai kalori bersih (Q_{net}) 139
C1	Pengiraan kecekapan pembakaran 140
D1	Reka bentuk pemusar aliran jejarian 142
D2	Reka bentuk pembakar berbahan api cecair 143
D3	Ujikaji pembakaran pemusar aliran jejarian 144

BAB 1

PENGENALAN

Semenjak 150 tahun kebelakangan ini, emisi oksida nitrogen telah meningkat dengan mendadak di persekitaran bumi. Kenaikan emisi ini di dalam atmosfera telah mendatangkan kesan yang buruk sama ada pada ekologi haiwan, tumbuhan dan kesihatan manusia. Sumber utama emisi oksida nitrogen adalah disebabkan oleh pembakaran bahan api fosil dan biojisim. Bermula dengan revolusi industri dan kenaikan jumlah penggunaan kenderaan di jalanraya, penggunaan bahan api fosil bertambah dan meningkatkan lagi kadar emisi oksida ini. Pertambahan industri pengangkutan udara secara pesat juga menambahkan lagi kadar emisi ini terus ke troposfera. Secara umumnya, emisi oksida nitrogen adalah merujuk kepada NO_x yang komponen di dalamnya terdiri daripada NO , NO_2 dan N_2O . Walaupun begitu, emisi nitrik oksida (NO) adalah yang paling ketara kerana lebih 90% daripada NO_x yang terbentuk hasil daripada pembakaran adalah dalam bentuk nitrik oksida. Sementara itu, emisi nitrus oksida (N_2O) terbentuk hasil tindakbalas dengan oksigen. Maka, usaha untuk mengurangkan emisi NO_x di dalam atmosfera lebih tertumpu kepada penurunan NO yang terhasil semasa proses pembakaran.

Bab ini terdiri daripada penerangan berkenaan pentakrifan masalah dan kepentingan penyelidikan. Bahagian seterusnya adalah tentang objektif, skop dan ringkasan penyelidikan diterangkan di akhir bab ini.

1.1 Kepentingan Penyelidikan

Kini, kawalan terhadap emisi NO_x telah menjadi sangat penting kerana kesan-kesan buruk terhadap kesihatan manusia dan alam sekitar yang akan dibincangkan dalam seksyen 2.2. Perkembangan sektor industri telah menjadi penyebab utama pertambahan kepekatan emisi oksida nitrogen NO_x dalam atmosfera. Kesemua proses-proses pembakaran menyumbang kepada pembentukan NO_x . Industri yang menjalankan operasi dandang dan relau adalah penyumbang utama kepada kenaikan emisi ini. Peningkatan secara janjang geometri emisi NO_x adalah satu petanda amaran kepada kesihatan dan keadaan persekitaran. Dengan kadar kenaikan emisi oksida ini, undang-undang yang tegas telah dilaksanakan dan pencemaran daripada sektor yang terlibat berada pada tahap malar untuk tempoh beberapa tahun kebelakangan ini. Maka teknologi pembakaran rendah NO_x adalah sangat penting kepada negara-negara membangun dalam mengurangkan lagi pembebasan gas oksida ini ke atmosfera. Ramai penyelidik diperlukan untuk membangunkan teknologi ini dan seterusnya digunapakai di sektor industri.

Dalam mengurangkan emisi NO_x terdapat 2 kaedah yang boleh digunakan untuk mengawal emisi NO_x dari alat pembakar. Pertama adalah menghalang pembentukan emisi nitrik oksida (NO) dan kaedah yang kedua adalah dengan melupuskan emisi NO daripada hasil pembakaran. Kaedah menghalang pembentukan NO merangkumi perubahan kepada reka bentuk dan operasi pembakar sedia ada. Dalam penyelidikan ini, alat pembakar direka bentuk dengan memperkenalkan aliran pusar bagi tujuan mempertingkatkan aliran gelora bagi membantu percampuran antara udara dan bahan api sebelum proses penyalaan. Aliran pusar menyebabkan terbentuk zon aliran gelora yang kuat dan akan terbentuk kawasan aliran kitaran semula di dalamnya (Khezzar,1998). Fenomena ini memainkan peranan yang besar dalam proses menstabilkan nyalaan pembakaran dengan menyediakan ruang aliran gas panas bergerak kembali ke kawasan percampuran bahan api dan udara dan membantu pembakaran (Gupta *et al.*, 1984).

Aliran pusar telah didapati dapat menstabilkan nyalaan pembakaran serta memperbaiki percampuran bahan api dan udara. Nisbah percampuran yang baik

dapat mengurangkan zon suhu tinggi dan seterusnya mengurangkan pembentukan NO_x . Sementara itu, kaedah pembakaran agihan udara sekunder digunakan untuk memodulkan pembakaran stoikiometri tetapi dengan mengagihkan udara kepada dua bahagian iaitu agihan udara utama dan agihan udara sekunder pada beberapa nisbah tertentu. Kaedah pembakaran udara berperingkat adalah salah satu teknik yang didapati berkesan untuk mengawal emisi iaitu NO_x , CO dan UHc. Sistem ini mempunyai potensi dalam menyelesaikan masalah emisi pembakar sektor industri dalam mematuhi undang-undang sedia ada dan meningkatkan lagi kecekapannya.

1.2 Kenyataan Permasalahan

Peraturan yang ketat tentang pelepasan gas oksida nitrogen (NO_x) ke udara membawa kepada pembangunan pelbagai reka bentuk pembakar yang menggunakan pelbagai teknik atau kaedah pengurangan NO_x . Kaedah-kaedah yang digunakan dalam reka bentuk pembakar dapat dibahagikan kepada dua jenis. Pertama pengubahsuaian kaedah pembakaran dan yang kedua rawatan pada pasca-pembakaran. Pengubahsuaian kaedah pembakaran mengurangkan penghasilan NO_x dengan mengubah suhu puncak nyalaan, nisbah kesetaraan dan percampuran udara bahan api. Sementara itu, teknologi pengurangan emisi pada pasca-pembakaran adalah berkenaan rawatan gas ekzos sebelum terlepas ke atmosfera dengan tidak mengubahsuaikan kaedah pembakaran. Kini dengan perkembangan teknologi yang pesat dan reka bentuk pembakar yang kompak, faktor saiz pembakar menjadi elemen yang penting dalam reka bentuk. Rawatan pasca pembakaran memerlukan pertambahan komponen pada pembakar dan sudah pasti akan menambah saiz dan kos untuk membina dan menyelenggara peralatan tersebut. Kaedah pengubahsuaian kaedah pembakaran dilihat berkesan untuk menghalang pembentukan emisi oksida nitrogen (NO_x) untuk pembakar yang kecil dan ringan kerana kaedah ini hanya merangkumi perubahan kecil kepada reka bentuk dan operasi pembakar sedia ada tanpa pertambahan komponen yang besar.

1.3 Objektif dan skop penyelidikan

1.3.1 Objektif

Objektif utama penyelidikan ini adalah:

- i. Menyelidik dan memilih kaedah yang sesuai dalam mengurangkan emisi secara pra pembakaran terhadap pembakar berbahan api cecair.
- ii. Mereka bentuk pembakar berbahan api cecair yang menggunakan kaedah yang dipilih.
- iii. Membangunkan prototaip, sebuah pembakar yang mesra alam dan cekap.
- iv. Menguji prestasi pembakar dari aspek pembentukan pencemaran dan kecekapan pembakaran berdasarkan dengan kaedah yang dipilih.

1.3.2 Skop Penyelidikan

- i. Mereka bentuk dan membangunkan sebuah pembakar berbahan api cecair pada skala makmal untuk mengkaji kaedah aliran pusar dalam mengurangkan emisi.
- ii. Mereka bentuk dan membangunkan sebuah kebuk pembakaran yang boleh digunapakai bersama pembakar di atas untuk mengkaji proses pembakaran melalui kaedah agihan udara skunder.
- iii. Kajian secara ujikaji prestasi isoterma pembakar menggunakan aliran pusar secara jejarian pada beberapa sudut bilah bagi mendapatkan nombor pusar.

- iv. Mengkaji pembakaran aliran pusar pada bahan api diesel dan kerosin komersil bagi melihat prestasi dari aspek pencemaran dan kecekapan.
- v. Mengkaji pembakaran secara agihan udara sekunder dan penyelitan plat orifis pada bahan api diesel komersil bagi melihat prestasi dari aspek pencemaran dan kecekapan.

1.4 Gariskasar Tesis

Tesis ini terdiri daripada 5 bab yang telah disusun seperti di bawah:

Bab 2 merangkumi kajian literatur berkenaan beberapa keadaan mekanisma pembentukan emisi NO_x , peranan aliran pusar dalam meningkatkan kecekapan pembakaran dan seterusnya mengurangkan pencemaran pada keadaan prapembakaran dan kaedah agihan udara skunder untuk keadaan pasca pembakaran. Bab 3 adalah penerangan terperinci berkenaan penyediaan rig ujikaji dan prosedur ujikaji. Perbincangan keputusan ujikaji terdapat di bab 4 terdiri daripada perbincangan berkenaan kesan aliran pusar dari segi prestasi pembakar kaedah penyelitan plat orifis, agihan udara sekunder dan penggunaan bahan api yang berbeza. Bab 4 juga mengandungi perbandingan keputusan dengan penyelidik-penyelidik terdahulu. Akhir sekali, bab 5 iaitu kesimpulan penyelidikan dan pembaikan-pembaikan yang dapat dibuat pada masa yang akan datang dalam penyelidikan ini.

RUJUKAN

Afroz R., (2002), 'Review of Air Pollution and Health Impacts in Malaysia', Academic Press, Elsevier Science: 71-77.

Ahmad Suhaimi, (1994), "Gaseous Fuel Gas Turbine For Low Emissions.", Department of Fuel and Energy, University of Leeds, Tesis PhD.

Ahmad, N.T., Andrews, G.E., Kowkabi, M. dan Sharif S.F., (1985), "Centrifugal Mixing in Gas and Liquid Fuelled Lean Swirled Stabilized Primary Zone", *ASME*. 85-GT-103.

Al-Kabie, H.S., (1989). *Radial Swirlers for Low Emissions Gas Turbine Combustion*. University of Leeds, Dept. of Fuel and Energy: PhD.

Anderson D.N., (1975), "*Effect of Equivalence Ratio and Dwell Time on Exhaust Emissions from an Experimental Premixed Prevaporising Burner*", ASME Paper 75-GT-69.

Bahr D.W., (1973), Technology for Reduction of Aircraft Turbine Engine Exhaust Emissions Paper 29, "*Atmospheric Pollution by Aircraft Engine*", AGARD CP-125, Advisory Group for Aerospace Research and Development.

Ballal, D.R. dan Lefebvre, A.H. (1979), "Weak Extinction Limits of Turbulent Flowing Mixtures", *Journal Engineering for Power*. Vol. 101. pp.343-348.

Bathie, W.B., (1984), "Fundamental of Gas Turbine", John Wiley, New York.

Beer, J.M., and Chigier N. A., (1972). *Combustion Aerodynamics*. Applied Science Publishers Ltd.

Beltagui, S.A dan MacCallum, N.R.L., (1976), "Aerodynamics of vane-swirled flames in furnaces", *Journal of Institute of Fuel*, hlm 183-193.

Beltagui, S.A dan MacCallum, N.R.L., (1988), "Characteristics of enclosed swirl flames with peripheral fuel injection", *Journal of Institute of Fuel*, hlm 3-16.

Blazowski, W.S dan Walsh, D.E. (1975). *Catalytic Combustion: An Important Consideration for Future Applications*. *Combustion Science Technologies*. Vol.10.pp.233-244

Bowman, C. T., (1992). “*Control of Combustion-Generated Nitrogen Oxide Emissions: Technology Driven by Regulation*”, *Proceedings of the Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion*. Combustion Institute, Pittsburgh.

British Standards Institution, BS 1041:1992, “Temperature Measurement”, Part 4. Guide to the Selection and Used of Thermocouples.

British Standards Institution, BS 799:1981, “Oil Burning Equipment” Part 2. Vaporizing Burners.

British Standards Institution, BS 845: 1987, “Assessing Thermal Performance of Boilers for Steam, Hot Water and Temperature Heat transfer fluids” Part 2. Concise Prosedur.

Charles, R.E. dan Samuelson, G.S.,(1988), “An Experiment Data Base for the Computational Fluid of Combustion”, ASME paper 88-GT-25.

Claypole, T.C., dan N. Syred. (1981), ‘The Effect of Swirl Bunner Aerodynamics on NO_x Formation.’ Eighteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 81-89, The Combustion Institute.

De Soete, G. G., ‘Overall Reaction Rates of NO and N₂ formation from Fuel Nitrogen’, *Fifteenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1093-1102.

Dean, A. J, Hanson, R. K. dan Bowman, C. T. (1990). ‘High Temperature Shock Tube Study of Reactions of CH and C-Atoms with N₂.’, *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 259-265.

Delavan, (2000), “A Total Look at Oil Burner Nozzles”, Delavan Spray Technologies: Fuel Metering Production Operation, South Carolina.

Demetri, E.P.,(1974), “Effect of major design and operation parameter on achieving low emissions from gas turbine combustor”, *Fluid Mechanics of Combustion*, ASME, hlm. 233-253.

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

Environmental Quality Act and Regulation Malaysia, Act. 127, MDC Publisher Printers Sdn. Bhd.

Escott, N.H.,(1993), “*Ultra Low NO_x Gas Turbine Combustion Chamber Design*”, University of Leeds, Department of Fuel and Energy, PhD.

Fenimore, C. P. (1970), “*Destruction of NO by NH₃ in Lean burnt Gases*”, *Combustion and Flame*. (37): 245-250

Fletcher R.S. dan Lefebvre A.H., (1976), “*Gas Turbine Engine*”, Science Research Council Report on Combustion Generated Pollution, HMSO.

Flury, F. and Zernick, F. (1931). ‘Schadliche Gas.’, Berlin, Springer.

Fricker, N. dan Leuckel, W., (1976), “The Characteristics of Swirl-stabilized Natural Gas Flames Part 3: The effect of swirl and burner mouth geometry on flame stability”, *Journal of Institute of Fuel*, hlm 152-160.

Gerhold, B.W., C.P. Fenimore, P.K. Dederick, (1979), ‘Two-stage Combustion of Plain and N Doped Oil’, 17th Symp. Of Combustion, The Combustion Institute.

Graves, C.C. dan Scull, W.E., (1960), “Mixing process, design and performance of gas turbine power plant”, *High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion*, Princeton, hlm. 166-245.

Gupta, M.C., Sriramulu, V. dan Domkunwar, V.M.,(1979), “Factors controlling stability of swirling flames at diffuser in gas turbine”, *Journal of Institute of Energy*, hlm. 17-20.

Gupta,A.K., Lilley, D.G. dan Syred, N., (1984), ‘Swirl Flow’, Abacus Press. Great Britain.

Heberling, P. V. (1976). Prompt NO Measurements at high Pressures, *Sixteenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 159-168.

Henry M. C., Ehrlich, R., Blair, W. H., (1965), ‘Effect of Nitrogen Dioxide on Resistance of Squirrel Monkeys to Klebsiella Pneumoniae Infection.’, *Arch. Environ. Health*. (18): 580.

Iverach, D., Basden, K. S., Kirvo, N. Y. (1973). ‘Formation of Nitric-Oxide in Fuel-Lean and Fuel-Rich Flames.’, *Fourteenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 767-775.

Khalil, K.H., El-Mahallawi, F.M. dan Moneib, H.A., (1977), “Effect of combustion air swirl on the flow pattern in a cylindrical oil fired furnace”, *Seventeenth Symposium (International) on Combustion*, hlm.135-143, The Combustion Institute.

Khezzar L., (1998), ‘Velocity Measurement in the Near Field of a Radial Swirler.’ *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol 16, pp 230-236, Elsevier Science Inc.

Kilik, E.,(1976), “The influence of swirler design parameter on the aerodynamics of the downstream recirculation region”, School of Mechanical Engineering, Cranfield Institute of Technology, England :PhD.

Kim, M.N. (1995), “*Design of Low NO_x Gas Turbine Combustion Chamber*”, University of Leeds, Dept. of Fuel and Energy: PhD.

Knight, M.A. dan Walker, R.B.,(1957), “The component pressure losses in combustion chamber”,Aeronautical Research Council, England.

Lefebvre, A.H. dan Durrant, T., (1960), “Design Characteristics Affecting Gas Turbine Combustion Performance”, Esso Air World, jld. 13, no. 3, hlm 64-69.

Lefebvre, A.H., (1983), “*Gas Turbine Combustion*”,Hemisphere Publishing Corporation.

Lindackers, D., Burmeister, M. dan Roth, P. (1990). ‘Perturbation Studies of High Temperature C and CH Reactions with N₂ and NO’, *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 251-257.

Lipfert F.W.,(1972), “*Correlation of Gas Turbine Emissions Data*”,ASME Paper 72-GT-60.

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

Longcore, J.R., Boyd, H., Brooks, R.T., Haramis G.M., McNicol D.K., Newman, J.R. Smith K.A., and Stearns, F. (1993) Acidic Depositions: Effects on Wildlife and Habitats. *Wildlife Society Tech. Rev.* 93-1: 42.

Masataka A., (2000), “Flue Gas Recirculation for Low NO_x Combustion System”, *2000 International Joint Power Generation Conference*. Florida.

Mathur, M.L. dan Maccallum, N.R.L.,(1967), “Swirling air jets issuing from vane swirling part 1: Free jets”, *Journal of Institute of Fuel*, hlm 214-225.

McLaughlin, B.R., Jones Jr., E.A. dan Lewis, E.C. (1997). Selective Catalyst Reduction (SCR) Retrofit at San Diego Gas and Electric Company South Bay Generation Station. *EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollution Control Symposium*. Washington.

Mellor, A.M., (1976), “Gas Turbine Engine Pollution”, *Prog. Energy Combustion Science*, Pergamon Press, bil. 1, hlm. 111-133.

Mestre, A. (1974),‘Efficiency and Pollutant Formation Studies in a Swirling Flow Combuster.’ *Fluid Mechanics of Combustion*, Edited by Dussord *et al.*, New York: The American Society of Mech.Engineers.

Michaud, M. G. Westmoreland, P. R. dan Feitelberg, A. S. (1992). Chemical Mechanism of NO_x Formation for Gas Turbine Conditions. *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 879-887.

Mikus, T. dan Heywood, J.B. (1971), "The Automotive gas Turbine and Nitric Oxide Emissions", *Combustions Science Technology*. Vol 4. pp. 149-158.

Miller, H., (1998), "Gas turbine", G E Power System, Schenectady New York, Bab 57, Mechanical Engineering Handbook 2nd Ed., John Willey and Son Inc.

Miller, J. A. dan Bowman, C. T. (1989), "*Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion*", *Progress in energy and Combustion Science*. (15): 287-338.

Milosavljevic, V.D., Taylor, A.M.K.P., dan Whitelaw, J.H., (1990), 'The Influence of Burner Geometry and Flow Rates on Stabilised and Symmetry of Swirl-Stabilised Nonpremixed Flames.', *Combustion and Flame*, The Combustion Institute, New York, jld. 80 hlm. 196-208.

Miyauchi, T., Mori, Y., dan Imamura, A. A. (1976). 'A Study of Nitric Oxide Formation in Fuel- Rich Hydrocarbon Flames: Role of Cyanic Species, H, OH, and O.', *Sixteenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1073- 1082.

Mohammad Nazri, (1997), 'Emissions from Gas Burner, Their Impact on the Environment and Abatement Technique: A Review', *Jurnal Mekanikal*, Jilid 1, 50-70.

Mohd Nazri, M.N., Andrew, G.E. dan Mk Padi, M.C., (1999), "The effect of orifice plate insertion of low NO_x radial swirl burner performance (simulated variable area burner)", *Proceeding of the World Renewable Energy congress'99*, Malaysia.

Mohd Nazri, M.N., (2002), "Emissions reduction from oil burner applying orifice plate insertion", *4th Asian Science and Technology Congress 2002*, Kuala Lumpur.

Mohd. Nazri, M.N, (1999), 'Emissions Reduction From Gas Burner System Applying Swirling Flows.', *Malaysian Science and Technology Congress '99*, Kuching Hilton, Malaysia .

Mohd. Radzi M.Y., (2002). *A Study of Swirled Air Method in The Reduction of Emissions from the Combustion of Liquid Fuel*, University Teknologi Malaysia, Dept. Aeronautics and Automotive. Masters Thesis.

Mularz, E.J., Wear, J.D. dan Verbulecz, P.W. (1975), “ Exhaust Pollutant Emissions from Swirl-Can Combustor Module Arrays at Parametric Test Conditions”, *NASA TM X-3237*.

Nimmo, W., E. Hampartsoumian, K. Sedighi dan Williams, (1991), ‘Control of NO_x Emissions by Combustion Air-staging: the measurement of NH₃, HCN, NO and N₂O concentrations in fuel-oil flames.’ *Journal of the Inst. Of Energy*, Vol. 64, pp 128-134.

Noel de Nevers, (1995), ‘Air Pollution Control Engineering’, McGraw Hill Inc. U.S.

Norster, E.R. dan Lefebvre, A.H., (1972), “*Effect of Fuel Injection Method on Gas Turbine Combustion System*”, dalam Cornelius, W. dan Agnew, W.G., *Emissions from Gas Turbine Combustion System*, hlm 255-278, Plenum, New York.

Pershing, D. W., Cichanowicz, J. E., England, G. C., Heap, M.P. dan Martin, G. B. (1978). The Influence of Fuel Composition and Flame Temperature on the Formation of Thermal and Fuel NO_x in Residual Oil Flames. *Seventeenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 715-725.

Rao, A.N. *et al.*, (1983), “Experimental and theoretical investigations of vane-generated swirling flows in a circular chamber”, *Journal of Institute of Energy*, hlm. 137-144.

Rhode, D.L. *et al.*, (1983), “Mean flowfields in axisymmetric Combustor geometries with swirl”, *AIAA Journal*, Jld. 21, no. 4, hlm. 593-600.

Roffe G. dan Venkataramani K.S., (1975) “*Emissions Measurement for Lean Premixed Propane/ Air System at Pressure up to 30 Atmosphere*”, NASA CR-159421.

Sarofim, A. S. dan Flagan, R. C. (1976). NO_x Control of Stationary Combustion Sources. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2.1-25.

Shy C. M., Creason, J. P., Pearlman M. E., McChain, K. E., Benson, F. B., Young, M. M. (1970). Effects of Community Exposure to Nitrogen Dioxide. Incidence of Acute Respiratory Illness. *J.A.P.C.A.* (20): 582.

Sloss, L. L., hajalmarsson, A. K., Soud, H. N., Campbell, L. M., Stone, D. K., Shareef, G. S., Emmel, T., Maibodi, M., Livengood, C. D. dan Markussen, J. (1992).

Nitrogen Oxides Control Technology Fact Book. Leslie S. Sloss (eds), USA: Noyes data Corporation.

Streichsbier, M. (1998). *Non-Catalytic NO_x Removal from Gas Turbine Exhaust with Cyanuric Acid in a Recirculating Reactor*. University of California, Berkeley: PhD. Thesis.

Syred, N. dan Beer, J.M. (1974). Combustion in Swirling Flows: A Review. *Combustion and Flame*. Vol. 23.pp. 143-201.

Technical data on Fuel, 7th Edition. 1977. *The British National Committee, World Power Conference*. London. Edited by H.M. Spiers.

U. S, EPA (1991). *Source Book: Nitrogen Oxides Control Technology Data*. Report No: EPA-600/2-91-029. Government Printing Office, Washing D.C.

Waibel, R. T. (1993). Ultra Low NO_x Burners for Industrial Process Heaters. *Second International Conference on Combustion Technologies for a Clean Environment*. Lisbon.

Williams, A. (1990), "Combustion of Liquid Fuel Sprays", Butterworth-Heinemann Ltd., London.