

**RAMALAN DAN KAWALAN KELUARAN NO<sub>x</sub>  
DARI ENJIN DIESEL SATU SELINDER  
MENGUNAKAN RANGKAIAN NEURAL  
BUATAN**

oleh

**MOHD MAHADZIR MOHAMMUD @ MAHMOOD**

**Tesis yang diserahkan untuk memenuhi  
keperluan bagi Ijazah Sarjana Sains**

**Jun 2004**

## PENGHARGAAN

Bismillahirrahmanirahim, Alhamdulillah, dengan izin Allah akhirnya kajian penyelidikan ini telah berjaya disiapkan. Penulis mengucapkan penghargaan yang tidak terhingga pada isteri dan anak yang dicintai lagi disayangi bersama dengan emak ayah sekeluarga yang telah banyak memberi sokongan yang tidak berbelah bahagi sepanjang menyiapkan penyelidikan ini.

Terima kasih juga diucapkan kepada penyelia penyelidik iaitu En Khairil Faizi Mustafa dari Pusat Pengajian Kejuruteraan Mekanik USM yang telah memberi banyak pedoman, bimbingan dan cadangan terhadap kajian ini. Tanpa ilmu dan pengalamannya, mungkin kajian ini tidak akan berjaya disiapkan. Selain itu, ucapan penghargaan juga diberikan kepada bekas penyelia bersama, Prof. Madya Dr Saiful Bari yang telah memberi sedikit sebanyak idea yang menolong menggerakkan kajian penyelidikan ini.

Tidak dilupakan ucapan terima kasih kepada pihak Universiti Teknologi MARA (UiTM) yang telah memberikan biasiswa bagi melanjutkan pengajian ini. Tanpanya mungkin pengajian dan penyelidikan tidak dapat dijalankan. Selain itu penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat secara langsung atau tidak dalam menjayakan kajian penyelidikan ini.

# JADUAL KANDUNGAN

TAJUK	i
PENGHARGAAN	ii
JADUAL KANDUNGAN	iii
SENARAI JADUAL	viii
SENARAI PLAT	x
SENARAI RAJAH	xi
SIMBOL DAN TATA TANDA	xiv
ABSTRAK	xviii
ABSTRACT	xx
<b>BAB 1 PENGENALAN</b>	
1.1 Secara Umum	1
1.2 Objektif Penyelidikan	5
1.3 Jangkaan Keputusan	5
1.4 Had Penyelidikan	6
<b>BAB 2 ENJIN PEMBAKARAN DALAM-DIESEL</b>	
2.1 Pengenalan	8
2.1.1 Kendalian Enjin Diesel	11

2.1.2 Komponen Enjin Diesel	14
<b>2.2 Keluaran Ekzos Enjin Diesel</b>	<b>17</b>
2.2.1 Nitrogen Oksida (NO <sub>x</sub> )	17
2.2.2 Perundangan Keluaran Ekzos NO <sub>x</sub>	22
<b>2.3 Teknologi Kawalan Keluaran Ekzos NO<sub>x</sub> Enjin Diesel</b>	<b>25</b>
<b>BAB 3 RANGKAIAN NEURAL</b>	
<b>3.1 Latarbelakang</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Rangkaian Neural Buatan (ANN)</b>	<b>32</b>
3.2.1 Apakah ANN?	32
3.2.2 Struktur Asas ANN	35
3.2.3 Seni Bina Rangkaian dan Proses Pembelajaran	38
<b>3.3 Binaan Rangkaian Neural Buatan</b>	<b>40</b>
3.3.1 Rangkaian Suap Depan Berbilang Lapisan	40
3.3.2 Algoritma Perambatan Belakang	41
3.3.2a) Algoritma <i>BP</i> - Pendekatan Matematik	46
<b>3.4 Aplikasi Rangkaian Neural Buatan</b>	<b>50</b>
3.4.1 Situasi Ramalan	50
3.4.2 Situasi Kawalan	55
3.4.2a) Peringkat Pengenalpastian Sistem	59
3.4.2b) Peringkat Reka Bentuk Pengawal	61
<b>3.5 Kaedah Analisis Pasca Latihan</b>	<b>63</b>
<b>BAB 4 PROSEDUR UJIKAJI</b>	
<b>4.1 Penentukuran Peralatan</b>	<b>65</b>

4.2 Peralatan	66
4.3 Ujian Prestasi Keluaran Ekzos NO <sub>x</sub>	71
<b>BAB 5 PEMODELAN</b>	
5.1 Model Ramalan ANN	74
5.1.1 Persediaan Pemodelan	74
5.1.2 Prosedur Pemodelan	76
5.2 Model Kawalan ANN	81
5.2.1 Prosedur Pengenalpastian Sistem	82
5.2.2 Prosedur MerekaBentuk Model Kawalan	86
<b>BAB 6 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN</b>	
6.1 Analisis Keluaran Ekzos Gas NO <sub>x</sub>	89
6.2 Analisis Model Ramalan ANN	96
6.2.1 Proses Fasa Latihan	96
6.2.2 Proses Fasa Ujian	100
6.2.3 Proses Pengesahan	103
6.3 Analisis Model Kawalan ANN	105
6.3.1 Model Loji Rangkaian Neural (NNPM)	106
6.3.2 Kawalan Rujukan Model (MRC)	110
6.3.3 Model Pengawal Rangkaian Neural (NNCM)	114
<b>BAB 7 KESIMPULAN DAN CADANGAN</b>	
Kesimpulan dan Cadangan	119

<b>RUJUKAN</b>	123
<b>LAMPIRAN</b>	
<b>LAMPIRAN A</b>	134
Algoritma Perambatan Belakang- Pendekatan Matematik	134
<b>LAMPIRAN B</b>	138
B.1 Struktur Terperinci Kawalan Rujukan Model	139
B.2 Struktur Terperinci Kawalan Rujukan Model Yang Digunakan	140
<b>LAMPIRAN C</b>	141
C.1 Prosedur Arahan Mendapatkan Bilangan Neuron Optimum Semasa Pemodelan Ramalan Dalam Perisian Matlab	142
C.2 Prosedur Arahan Pemodelan Ramalan Keluaran NO <sub>x</sub> Dalam Perisian Matlab	143
C.3 Prosedur Arahan Pemodelan Kawalan Keluaran NO <sub>x</sub> Dalam Perisian Matlab	145
<b>LAMPIRAN D Data-Data Mentah Ujian Prestasi Keluaran Ekzos</b>	149
<b>LAMPIRAN E Data-Data Latihan dan Ujian Pemodelan Kawalan</b>	170
<b>LAMPIRAN F Contoh Pengiraan</b>	175

**PENERBITAN**

## SENARAI JADUAL

Jadual 2.1	Komponen-komponen utama enjin Diesel	14
Jadual 2.2	Pemiawaian pemisahan ekzos/serombong	24
Jadual 3.1	Definasi ANN	32
Jadual 3.2	Senarai dan prestasi rangkap latihan algoritma perambatan belakang	43
Jadual 3.3	Huraian singkatan parameter	53
Jadual 3.4	Parameter masukan dan keluaran daripada enjin Navistar	53
Jadual 4.1	Spesifikasi enjin yang digunakan	69
Jadual 5.1	Persediaan parameter bagi model ramalan	75
Jadual 5.2	Spesifikasi NNPM	83
Jadual 6.1	$W$ dan $b$ optimum NNPM dalam a). lapisan terlindung b). lapisan keluaran	108
Jadual 6.2	Pemberat $W$ dan pincang $b$ optimum NNPM pada struktur MRC a). lapisan 1 b). lapisan 2	113
Jadual 6.3	Keputusan peratusan ralat NNPM	116
Jadual D.1	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 1720 rpm	150
Jadual D.2	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 1860 rpm	151
Jadual D.3	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 1920 rpm	152
Jadual D.4	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 2040 rpm	153



Jadual D.5	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 2170 rpm	154
Jadual D.6	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 2260 rpm	155
Jadual D.7	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 2370 rpm	156
Jadual D.8	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 2430 rpm	157
Jadual D.9	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 2570 rpm	158
Jadual D.10	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 2620 rpm	159
Jadual D.11	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 2720 rpm	160
Jadual D.12	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 2810 rpm	161
Jadual D.13	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 2910 rpm	162
Jadual D.14	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 3020 rpm	163
Jadual D.15	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 3140 rpm	164
Jadual D.16	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 3230 rpm	165
Jadual D.17	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 3310 rpm	166
Jadual D.18	Ujian prestasi keluaran ekzos pada halaju 3420 rpm	167
Jadual D.19	Ujian prestasi keluaran ekzos bagi 10 data rawak	168
Jadual E.1	Data latihan bagi proses kawalan	171
Jadual E.2	Data ujian bagi proses kawalan	174

## SENARAI PLAT

Plat 4.1	Enjin, penutup gandingan dan dinamometer	66
Plat 4.2	Panel kawalan dan paparan katil ujian enjin	67
Plat 4.3	Pandangan belakang struktur katil ujian enjin	67
Plat 4.4	Pandangan keseluruhan alatan ujikaji	71

## SENARAI RAJAH

Rajah 2.1	Enjin “serbuk bedilan” Huygens	9
Rajah 2.2	Prinsip kendalian enjin Diesel empat lejang	11
Rajah 2.3	Kedudukan komponen utama enjin Diesel	17
Rajah 2.4	Corak hubungan antara keluaran ekzos NO dan <i>A/F</i> bagi enjin petrol/Diesel	21
Rajah 2.5	Gambarajah skema penurunan bermangkin memilih menggunakan ammonia	28
Rajah 2.6	Gambarajah skema penurunan bermangkin memilih menggunakan larutan urea	29
Rajah 3.1	Struktur Asas Neuron	36
Rajah 3.2	a) Rangkap pindah sigmoid b) Rangkap pindah lurus	38
Rajah 3.3	Rangkaian suap depan berbilang lapisan	40
Rajah 3.4	Rangkaian berbilang lapisan perambatan belakang	46
Rajah 3.5	Gambarajah kawalan rujukan model secara umum	58
Rajah 3.6	Struktur terperinci NNPM	60
Rajah 3.7	Proses model loji rangkaian neural	60
Rajah 3.8	Struktur terperinci NNCM	62
Rajah 4.1	Blok diagram sistem rangkaian asas pengujian enjin	68

Rajah 5.1	Carta alir proses struktur optimum ANN ramalan	78
Rajah 5.2	Carta alir proses pemodelan keluaran ramalan NO <sub>x</sub> Diesel	79
Rajah 5.3	Gambaran proses ramalan dan kawalan	81
Rajah 5.4	Gambarajah skema MRC	82
Rajah 5.5	Struktur terperinci MNPM	84
Rajah 5.6	Carta alir proses pemodelan NNPM	85
Rajah 5.7	Carta alir proses pemodelan kawalan keluaran NO <sub>x</sub> enjin Diesel	87
Rajah 6.1	163 set data bagi tork-halaju	90
Rajah 6.2	Keluaran NO <sub>x</sub> enjin Diesel	91
Rajah 6.3	Keluaran NO <sub>x</sub> enjin Diesel	92
Rajah 6.4	Keluaran ekzos NO <sub>x</sub> melawan $A/F$	94
Rajah 6.5	Keluaran ekzos NO <sub>x</sub> melawan $\phi_{A/F}$	95
Rajah 6.6	Prestasi sse bilangan neuron lapisan terlindung	96
Rajah 6.7	Struktur optimum model ramalan ANN	97
Rajah 6.8	Perbandingan keluaran ramalan-sebenar fasa latihan dengan analisis regresi	98
Rajah 6.9	Keluaran ramalan-sebenar NO <sub>x</sub> model ramalan ANN semasa fasa latihan	100
Rajah 6.10	Perbandingan keluaran ramalan-sebenar fasa ujian dengan analisis regresi	101
Rajah 6.11	Keluaran ramalan-sebenar NO <sub>x</sub> model ramalan ANN semasa fasa ujian	102
Rajah 6.12	Perbandingan keluaran ramalan-sebenar fasa pengesahan dengan analisis regresi	103

Rajah 6.13	Keluaran ramalan-sebenar $\text{NO}_x$ model ramalan ANN semasa fasa pengesahan	105
Rajah 6.14	Perbandingan keluaran $\text{NO}_x$ kepekatan rendah NNPM dengan keluaran sebenar dari <i>SCR</i>	106
Rajah 6.15	Keluaran $\text{NO}_x$ NNPM dan $\text{NO}_x$ sebenar melawan bilangan sampel	109
Rajah 6.16	Perbandingan keluaran $\text{NO}_x$ daripada kawalan NNCM dengan keluaran $\text{NO}_x$ dikehendaki pada <i>SCR</i>	110
Rajah 6.17	Keluaran $\text{NO}_x$ MRC dan $\text{NO}_x$ sebenar melawan bilangan sampel	112
Rajah 6.18	Perbandingan keluaran $\text{NO}_x$ daripada kawalan NNCM dengan keluaran $\text{NO}_x$ dikehendaki pada <i>SCR</i>	115
Rajah 6.19	Kepekatan keluaran $\text{NO}_x$ enjin Diesel melawan bilangan sampel menggunakan NNCM	117
Rajah B.1	Struktur Terperinci Kawalan Rujukan Model	139
Rajah B.2	Struktur Terperinci Kawalan Rujukan Model Yang Digunakan	140

## SIMBOL DAN TATA TANDA

$V_f$	kadar alir isipadu bahan api
$V_a$	kadar alir isipadu udara
$m_f$	kadar alir jisim bahan api
$m_a$	kadar alir jisim udara
$\phi_{A/F}$	nisbah setara udara bahan api
$\alpha$	kadar pembelajaran
$\delta$	nilai sebutan ralat
$\Sigma$	rangkap penjumlahan
$\rho_a$	ketumpatan udara
$\rho_f$	ketumpatan bahan api
$A$	luas permukaan ombok
$A$	udara
$A/F$	nisbah udara bahan api
ABDC	selepas pusat mati bawah
ANN	rangkaian neural buatan
ATDC	selepas pusat mati atas
$b$	pincang
BBDC	sebelum pusat mati bawah

BDC	titik mati bawah
$B_p$	kuasa brek
$BP$	perambatan belakang
bsfc	penggunaan bahan api spesifik brek
BTDC	sebelum pusat mati atas
BTH	terma brek
CO	karbon monoksida
$d$	diameter orifis
$d$	keluaran $NO_x$ sebenar
exp	exponen
$F$	bahan api
F	daya
fp	kuasa geseran
H	bilangan parameter masukan
$h$	perbezaan tekanan merintasi orifis dalam mmWg
$ip$	kuasa tertunjuk
$Ir$	kadar pembelajaran
J	bil. set setiap parameter masukan
$\eta_{BTH}$	kecekapan terma brek
$L$	lapisan
$L$	panjang lejang
Lcv	nilai kalori rendah bahan api
$L_o$	beban enjin
MRC	kawalan rujukan model
$mu$	parameter pelarasan Marquardt

$n$	bil. selinder
$N$	bilangan neuron
$N$	halaju enjin
$N_2$	nitrogen
$NH_2CONH_2$	urea
$NH_3$	ammonia
$NN$	rangkaian neural
$NNCM$	model pengawal rangkaian neural
$NNPM$	model loji rangkaian neural
$NO$	nitrik oksida
$NO_2$	nitrogen dioksida
$NO_x$	nitrogen oksida
$NSCR$	penurunan bermangkin tak memilih
$O$	keluaran sebenar
$O_2$	oksigen
$P$	matrik $H^*J$
$p$	tekanan
$Pa$	tekanan atmosfera
$PID$	terbitan kamiran berkadar
$PM$	habuk
$ppm$	bahagian per juta
$R$	pekali sekaitan
$rpm$	pusingan per minit
$s$	jarak
$SCR$	pengurangan bermangkin memilih



$SO_2$	sulfur dioksida
sse	penjumlahan ralat kuasa dua
t	masa
$T$	sasaran
T	tork
TDC	titik mati atas
$T_e$	suhu ekzos
$T_i$	suhu pengambilan udara
V	isipadu
$V_f$	isipadu bahan api
$W$	pemberat sinaps
x	masukan
y	keluaran
z	hasil penjumlahan

## ABSTRAK

Kerja tesis ini berkenaan dengan kajian ujikaji dan simulasi komputer yang digunakan untuk membina model-model yang sesuai untuk ramalan dan kawalan keluaran nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ) daripada enjin Diesel Yanmar L60AE-D satu selinder suntikan terus. Hari ini, enjin Diesel merupakan antara loji kuasa yang terbaik di kalangan semua jenis enjin pembakaran dalam. Walau bagaimanapun,  $\text{NO}_x$  yang terkandung di dalam gas ekzos enjin Diesel telah dikenal pasti sebagai elemen yang bertanggungjawab mencemarkan atmosfera kita dan menyebabkan masalah-masalah kesihatan. Untuk mengurangkan keluaran pencemaran enjin Diesel, dua aplikasi berdasarkan kepada model-model rangkaian neural buatan telah dibangunkan. Aplikasi pertama adalah untuk mendapatkan model ramalan kepekatan keluaran  $\text{NO}_x$  di bawah keadaan kendalian pelbagai. Struktur rangkaian neural buatan suap depan telah dipilih bersama dengan prosedur latihan perambatan belakang bagi model ramalan ini. Empat parameter kendalian (halaju enjin,  $N$ ; beban enjin,  $L_o$ ; suhu ekzos,  $T_e$  dan nisbah udara bahan api,  $A/F$ ) telah digunakan sebagai data masukan semasa proses pemodelan. Pemodelan dilaksanakan dengan pengambilan pelbagai set ukuran untuk mempelajari bagaimana untuk meramalkan keluaran  $\text{NO}_x$  daripada empat parameter kendalian. Nilai-nilai ramalan yang didapati dibandingkan dengan nilai-nilai ujikaji. Kajian menunjukkan bahawa keputusan-keputusan ramalan adalah dalam kesamaan baik dengan nilai-nilai

ujikaji, iaitu dalam lingkungan kurang daripada 9 % ralat relatif. Bagi aplikasi kedua pula, pendekatan kepada kawalan rujukan model (MRC) berasaskan rangkaian neural disarankan dan dianalisis bagi sistem dinamik tak lurus. Pada tugas tentu pemodelan, model loji rangkaian neural (NNPM) dibina sebagai pengenal pasti untuk kenal pasti sistem loji yang hendak dikawal melalui pemerhatian dan ia digunakan untuk melatih pengawal. Pada tugas tentu kawalan pula, model kawalan rangkaian neural (NNCM) dibina sebagai pengawal yang mempunyai kelakuan sehampir mungkin kepada model rujukan yang digunakan. Struktur NNCM dan NNPM menggunakan struktur rangkaian neural buatan suap depan dengan algoritma latihan perambatan belakang. Kajian menunjukkan bahawa keputusan NNPM dan NNCM juga berada dalam kesamaan baik dengan nilai sebenar dan nilai rujukan yang digunakan, di mana ralat relatif 0 % dan 0.01337 % diperolehi.

# PREDICTION AND CONTROL OF THE NO<sub>x</sub> EMISSION OF A SINGLE CYLINDER DIESEL ENGINE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

## ABSTRACT

This thesis work concerns with an experimental and computer simulation studies used to develop suitable models to predict and control the oxides of nitrogen (NO<sub>x</sub>) emitted from the Yanmar L60AE-D single cylinder direct injection diesel engine, fitted in a Cusson's Engine Test Bed Model P8160. Today, diesel engine is the most efficient power plant among all known types of internal combustion engines. However, the NO<sub>x</sub> contained in the exhaust gases of diesel engines have been identified as elements responsible for polluting our atmosphere and causing health problems. In order to reduce diesel engine polluting emissions, two applications based on artificial neural network models have been developed. The first application is to obtain the prediction model of NO<sub>x</sub> emission concentration under various operating condition. The feed forward artificial neural network structure has been selected with a back propagation training procedure for this prediction model. Four operating parameters (engine speed,  $N$ ; engine load,  $L_o$ ; exhaust temperature,  $T_e$  and air fuel ratio,  $A/F$ ) have been used as an input data in the modeling process. The modeling implemented, took a large set of measurements to learn how to predict the NO<sub>x</sub> emission from four operating parameters. The predicted values obtained are compared with the experimental values. The studies show that the predicted results are in good agreement with experimental values, within less than 9 % relative error. For the second application, an approach to model reference

control (MRC) based on neural network is proposed and analyzed for the non-linear dynamic system. In the modeling task, the neural network plant model (NNPM) is developed as an identifier to identify the plant system to be controlled through supervised and then used to train the controller. In the control task, the neural network controller model (NNCM) is developed as a controller whose behavior is as close as possible to the given reference model. For the purpose of NNCM and NNPM, the feed forward artificial neural network has been selected and used with a back propagation training algorithm. The studies show that the NNPM and NNCM results are in good agreement with actual values and reference values used, where relative error 0 % and 0.01337 % are obtained.

## BAB 1

### PENGENALAN

#### 1.1 Secara Umum

Enjin Diesel atau enjin cucuhan mampatan digunakan secara meluas misalnya dalam bidang perindustrian, pengangkutan, perladangan, perlombongan dan pembinaan. Perkara ini adalah disebabkan enjin Diesel mempunyai kebolehan memberi keluaran tork yang tinggi, antara 200 hingga 350 Nm (Pulkrabek, 1997), ketahananlasakan dan mampu untuk menghasilkan kuasa serta kecekapan terma yang tinggi, selalunya dalam julat 30 hingga 40 % pada beban penuh (Roger dan Mayhew, 1992). Sungguhpun ia mempunyai kelebihan yang tersendiri, prestasi sesebuah enjin Diesel perlu diuji dan ditentukan terlebih dahulu bagi memastikan ia berada dalam keadaan yang optimum dengan melakukan pelbagai analisis. Salah satu daripada analisis yang perlu dilakukan adalah pada keluaran ekzos.

Keluaran ekzos enjin Diesel adalah hasil daripada pembakaran yang berlaku di dalam enjin selinder semasa proses penukaran tenaga kimia yang terkandung di dalam bahan api Diesel kepada kuasa mekanikal. Produk keluaran ekzos ini merupakan salah satu punca kepada masalah pencemaran udara khususnya di kawasan bandar (Rachid *et al.*, 1998).

Enjin Diesel mempunyai campuran keluaran ekzos yang sangat kompleks. Keluaran ini terdiri daripada bahan-bahan komponen organik dan tidak organik yang tersebar dengan banyaknya dalam bentuk zarah dan gas. Dalam fasa zarah, terdapat banyak bahan kimia merbahaya dipercayai mutagen dan karsinogen yang terserap pada permukaannya manakala fasa gas kebanyakannya terdiri daripada bahan-bahan yang bertoksik. Nitrogen teroksida ( $\text{NO}_x$ ), adalah salah satu gas keluaran ekzos yang terhasil daripada pembakaran bahan api Diesel. Keluaran ekzos gas  $\text{NO}_x$  ini akan mencemarkan alam sekitar amnya dan mengancam kesihatan manusia khususnya, apabila ia bertindak balas secara kimia di dalam atmosfera.

Menurut Berita Harian (2001), kerajaan Malaysia amat membimbangi pencemaran gas  $\text{NO}_x$ . Misalnya, pelepasan gas  $\text{NO}_x$  daripada kenderaan bermotor yang didaftarkan pada tahun 1998 adalah sebanyak 273 000 tan setahun. Ini tidak termasuk pelepasan gas  $\text{NO}_x$  daripada punca-punca enjin pegun.

Menurut Aminuddin Ishak (2001) pula, taburan kenderaan Diesel berdaftar pada tahun 2000 adalah sebanyak 1.2 juta dan berlaku peningkatan pada tahun-tahun berikutnya. Peningkatan ini yang seiring dengan peningkatan kilang-kilang perindustrian dan loji-loji kuasa telah menambahkan lagi jumlah pencemaran  $\text{NO}_x$  ke atmosfera. Justeru itu, keluaran ekzos gas  $\text{NO}_x$  ini perlu diawasi dan seterusnya dikawal agar tidak mendatangkan masalah khususnya kepada masyarakat masa kini dan juga pada masa hadapan.

Pencemaran  $\text{NO}_x$  daripada keluaran ekzos enjin Diesel masih boleh dikurangkan. Menurut Stone (1985) dan Heywood (1988), usaha untuk meminimumkan pencemaran keluaran ekzos  $\text{NO}_x$  telah dilakukan sejak awal tahun 1960an lagi, apabila keadaan atmosfera pada masa itu dikesan membawa kepada pembentukan kabus fotokimia. Pengurangan keluaran  $\text{NO}_x$  ini telah menghasilkan perubahan yang bermakna kepada enjin Diesel dari segi rekabentuk dan kendaliannya.

Traver *et al.* (1999) telah menulis bahawa sejak kebelakangan ini sahaja penyelidikan menggunakan rangkaian neural buatan bagi tujuan meramal keluaran ekzos berasaskan kepada parameter enjin Diesel dikaji. Menurut Berry *et al.* (2001) pula, menganalisis dan mengawal keluaran ekzos enjin Diesel menggunakan model rangkaian neural buatan (ANN) dapat memberikan data yang berguna tentang keadaan, kelakuan, prestasi dan impak kepada persekitaran tentang pencemaran enjin.

Pemodelan serta simulasi dengan menggunakan komputer ke atas enjin Diesel secara tidak langsung telah dapat membantu mengawasi pencemaran udara yang terhasil daripada keluaran ekzos  $\text{NO}_x$  enjin Diesel. Oleh itu, dalam penyelidikan ini, penggunaan kaedah pengkomputeran berasaskan rangkaian neural buatan (ANN) diaplikasikan kepada enjin Diesel bagi mendapatkan ramalan tentang keluaran ekzos  $\text{NO}_x$  yang terhasil dan kemudiannya digunakan bagi mengawal keluaran gas  $\text{NO}_x$  itu.

Proses kajian yang dilakukan dalam penyelidikan ini adalah secara luar talian. Kajian secara luar talian ini bermaksud data-data yang diperolehi daripada ujikaji enjin Diesel dimasukkan ke dalam komputer melalui kaedah insani (*manual*). Proses kajian penyelidikan ini pula dipecahkan kepada tiga bahagian utama. Bahagian pertama adalah



mendapatkan data-data dengan menjalankan ujikaji ke atas enjin Diesel Yanmar L60AE-DTM satu selinder. Sebanyak 163 set data sahaja diperolehi setelah menjalankan ujikaji. Data-data ini terdiri dari data halaju (unit rpm), beban (unit  $N$ ), nisbah udara bahan api, suhu keluaran ekzos (unit  $K$ ) dan keluaran ekzos  $NO_x$  (unit rpm). Bahagian kedua, melakukan proses ramalan menggunakan model ANN. Model yang digunakan ialah rangkaian suap depan dengan algoritma perambatan belakang. Aplikasi model ini dianalisis dengan menggunakan kaedah analisis pasca latihan untuk mendapat kebolehpaya ramalan yang dilakukan. Bahagian ketiga pula melakukan proses kawalan berasaskan ANN. Satu pendekatan digunakan dalam proses kawalan ini iaitu dengan melaksanakan kaedah kawalan rujukan model (MRC) bagi mengawal keluaran ekzos  $NO_x$  enjin Diesel. Keupayaan dan kebolehkawalan yang dihasilkan dianalisa dengan menggunakan kaedah analisis pasca latihan. Akhir sekali keputusan proses simulasi dibandingkan antara keluaran ekzos  $NO_x$  yang sebenar dengan yang dikawal.

Keluaran enjin Diesel yang dikenali sebagai salah satu punca pencemaran keluaran ekzos  $NO_x$ , akan dapat dipantau dan dikawal, seterusnya dikurangkan kepekatannya agar tidak lagi menjadi sebahagian daripada masalah utama pencemaran kepada manusia dan alam sekitar.

## 1.2 Objektif Penyelidikan

Penyelidikan ini mempunyai tiga objektif. Objektif pertama ialah membina model berdasarkan kepada rangkaian neural buatan (ANN) supaya boleh meramal keluaran ekzos gas nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ) enjin Diesel Yanmar L60AE-D suntikan terus satu selinder. Objektif kedua ialah membina model berasaskan kepada ANN supaya dapat mengawal keluaran ekzos gas  $\text{NO}_x$  enjin Diesel Yanmar L60AE-D suntikan terus satu selinder. Objektif ketiga adalah untuk mengurangkan kadar pencemaran keluaran ekzos gas  $\text{NO}_x$  enjin Diesel dengan menggunakan pendekatan kaedah pengkomputeran iaitu kawalan rujukan model (MRC) yang berasaskan kepada ANN.

## 1.3 Jangkaan Keputusan

Semasa melakukan ujikaji, penambahan halaju pada enjin Diesel dijangka akan menaikkan suhu keluaran ekzos,  $T_e$ ; beban,  $L_o$  dan akan berlaku perubahan pada nisbah udara-bahan api,  $A/F$  yang digunakan. Selain itu, penambahan halaju ini juga akan menghasilkan produk bahan cemar nitrogen oksida,  $\text{NO}_x$  yang berbeza-beza kepekatannya dari keluaran ekzos enjin Diesel. Dengan kata lain, akan wujud perhubungan atau sekaitan di antara parameter masukan yang diberi pada enjin dengan parameter keluaran yang terhasil daripada enjin Diesel. Daripada perhubungan sekaitan ini, dijangka akan dapat membantu semasa proses pemodelan ramalan dan kawalan keluaran ekzos gas  $\text{NO}_x$  menggunakan aplikasi rangkaian neural buatan, ANN.

Aplikasi ANN terhadap enjin Diesel untuk mendapatkan keluaran ekzos  $\text{NO}_x$  secara ramalan dijangka akan memberikan keputusan yang hampir sama dengan keputusan keluaran ekzos  $\text{NO}_x$  yang diperolehi daripada ujikaji apabila dibandingkan. Keputusan yang diperolehi ini akan dianalisis serta dinilai menggunakan kaedah analisis pasca latihan.

Dari segi kawalan pula, pelaksanaan kaedah kawalan rujukan model pada enjin Diesel dijangka akan memberi kesan yang memberangsangkan. Keputusan simulasi pengkomputeran yang diperolehi dijangka dapat menunjukkan nilai kepekatan keluaran ekzos  $\text{NO}_x$  yang belum dikawal (bahan cemar) menurun dan menuju kepada nilai yang dikehendaki (dikawal) dan secara langsung akan mengurangkan serta mengawal pencemaran ekzos gas  $\text{NO}_x$ .

#### **1.4 Had Penyelidikan**

Persediaan ujikaji hanya terhad kepada enjin Diesel pegun yang mempunyai suntikan terus dan juga peranti yang digunakan untuk mendapatkan bacaan halaju, suhu, kadar alir dan beban. Pengiraan data-data masukan hanya terhad kepada halaju,  $N$ ; suhu keluaran ekzos,  $T_e$ ; beban,  $L_o$  dan nisbah udara-bahan api,  $A/F$ . Pengiraan ini dikira berdasarkan daripada keputusan kadar alir udara dan bahan api Diesel yang akan didapati.

Alat penganalisa gas jenis berbilang padat MSI digunakan di dalam penyelidikan ini. Alat penganalisa ini hanya dapat mengukur nilai bacaan gas  $\text{NO}_x$  yang tidak melebihi daripada 3999 ppm. Ini akan menghadkan jumlah dan jarak pengambilan data gas  $\text{NO}_x$ . Selain itu, pelaksanaan NN dilakukan secara luar talian pada enjin Diesel mengakibatkan pengambilan dan pemprosesan data hanya dilakukan secara insani (*manual*) menggunakan komputer peribadi.

## BAB 2

### ENJIN PEMBAKARAN DALAM-DIESEL

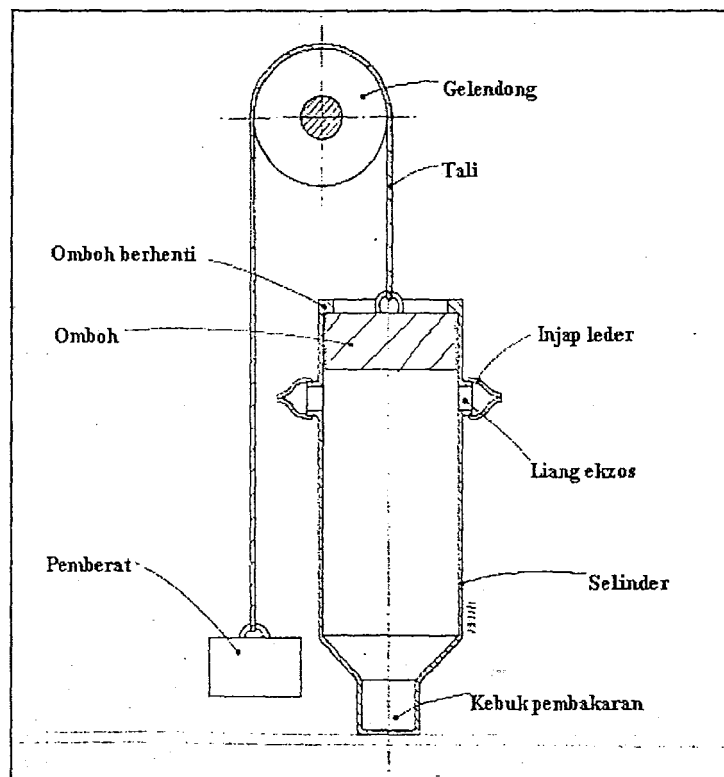
#### 2.1 Pengenalan

Enjin pembakaran dalam ditakrifkan sebagai enjin haba yang menukarkan tenaga kimia di dalam bahan api kepada tenaga mekanikal melalui proses pembakaran dan seterusnya memutarakan aci engkol. Menurut Hartman dan Armstrong (1959), Obert (1968), Heywood (1988) dan Pulkrabek (1997), enjin pembakaran dalam menghasilkan kuasa mekanikal daripada tenaga kimia yang terdapat di dalam bahan api. Tenaga kimia di dalam bahan api ini ditukarkan kepada tenaga haba dengan membakar campuran kimia tersebut bersama udara dari atmosfera yang disalurkan ke dalam kebuk pembakaran enjin. Tenaga haba ini, menghasilkan suhu dan tekanan yang tinggi di dalam kebuk pembakaran enjin. Gas yang berada di dalam kebuk pembakaran enjin menjadi bertekanan tinggi dan mengembang serta menolak omboh yang berada di dalam selinder enjin. Perubahan ini akan memutarakan aci engkol yang berpaut pada mekanisme mekanik dan seterusnya memindahkan tenaga keluaran enjin ini kepada bahagian-bahagian lain.

Enjin pembakaran dalam kebanyakannya terdiri dari enjin salingan. Pergerakan salingan (mundar-mandir atau atas-bawah atau depan- belakang) omboh ini akan memusingkan aci engkol dengan bantuan rod penyambung. Enjin salingan boleh dikelaskan kepada

dua jenis. Jenis pertama adalah enjin Diesel. Enjin Diesel memulakan pembakaran dalam kebuk pembakaran dengan menghasilkan cucuhan bahan api secara spontan. Cucuhan ini disebabkan kenaikan suhu dan tekanan semasa proses mampatan apabila campuran udara bahan api Diesel terbakar akibat pemampatan campuran yang melebihi daripada suhu nyalaannya sendiri. Jenis kedua pula ialah enjin cucuhan bunga api. Enjin ini memulakan pembakaran campuran udara bahan-api dengan menggunakan palam pencucuh.

Konsep awal perkembangan enjin pembakaran dalam bermula pada tahun 1673 apabila seorang yang bernama Christiaan Huygens menjalankan ujikaji yang menyerupai konsep enjin bekerja menggunakan serbuk bedilan bagi membekalkan kuasa (Monaghan, 1988). Rajah 2.1 menunjukkan enjin “serbuk bedilan” Huygens.



Rajah 2.1: Enjin “serbuk bedilan” Huygens (Monaghan, 1988).

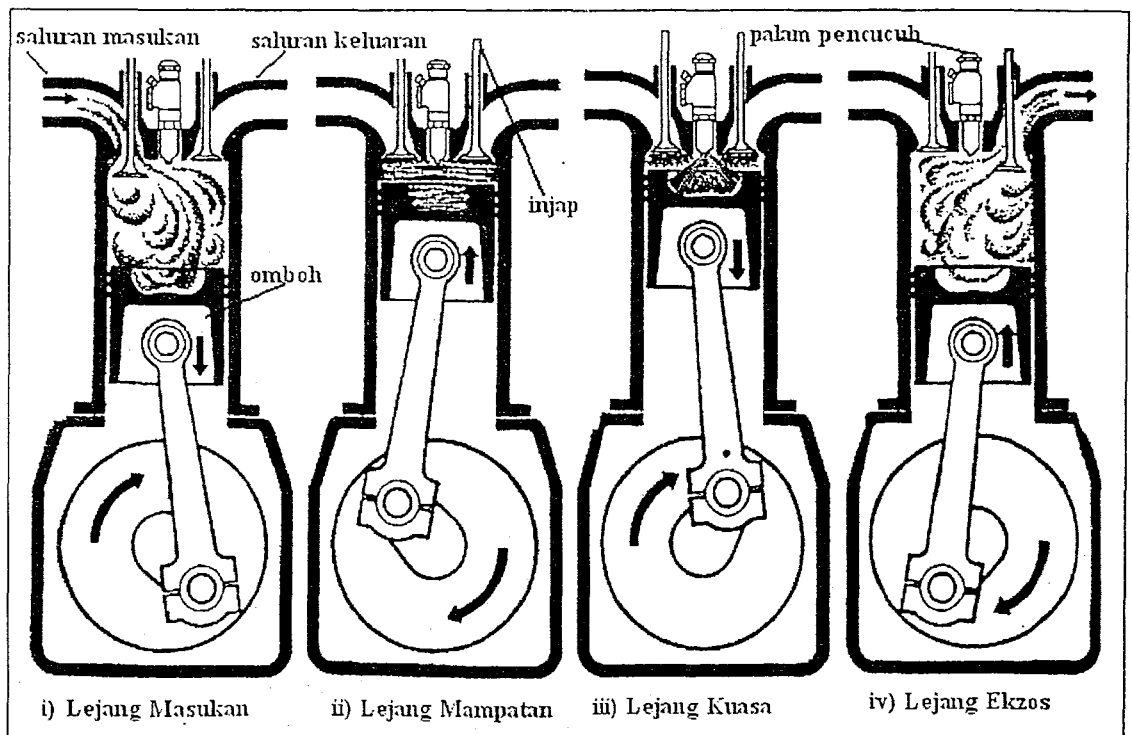
Enjin ini mempunyai omboh yang bebas bergerak di dalam selinder dan terdapat satu kebuk pembakaran terletak pada bahagian bawah. Semasa dan selepas pembakaran berlaku, omboh akan tertolak ke atas sehingga melepasi liang ekzos, kemudian gas yang terbakar akan keluar melalui liang ekzos dan seterusnya omboh akan kembali ke bawah. Omboh di sambungkan kepada pemberat dengan tali melalui gelendong. Gelendong ini berputar apabila omboh bergerak dan seterusnya kerja dihasilkan.

Dengan merujuk konsep penghasilan kerja oleh pengembangan omboh dalam selinder enjin serbuk bedilan Huygens, pada tahun 1860, enjin pertama yang diguna umum dihasilkan oleh Lenoir, J.J.E. (1822-1900) dicipta. Enjin ini menggunakan campuran pembakaran gas arang batu udara pada tekanan atmosfera dan dengan cucuhan bunga api elektrik. Kemudiannya pada tahun 1890, seorang jurutera dari German, Rudolf Diesel (1858-1913) telah mengemukakan konsep baru dalam enjin pembakaran dalam. Konsepnya berdasarkan kepada pembakaran melalui penyemburan cecair bahan api kepada udara panas yang dimampatkan di dalam enjin selinder kerana ini dapat menggandakan kecekapan pada enjin. Pada tahun 1892, hasilnya telah dipatenkan dan berjaya menghasilkan contoh sulung pada tahun 1895 dan seterusnya dikomersialkan pada tahun 1896 (Kelm, 1987). Enjin ini dinamakan enjin Diesel sempena nama penciptanya.

### 2.1.1 Kendalian Enjin Diesel

Enjin Diesel merupakan sumber kuasa yang mempunyai ketegapan dan ketahanan bagi kegunaan kenderaan di atas atau di luar jalan. Enjin Diesel boleh direka bentuk agar dikendalikan sama ada dengan dua lejang atau empat lejang. Dalam penyelidikan ini tinjauan bacaan hanya dikhususkan kepada kitar empat lejang kerana enjin yang digunakan dalam penyelidikan adalah berdasarkan enjin Diesel empat lejang.

Kitar kendalian enjin Diesel empat lejang melaksanakan empat peringkat lejang yang lengkap di dalam selinder seperti yang ditunjukkan dalam rajah 2.2. Satu selinder memerlukan dua pusingan aci engkol ( $720^\circ$ ) untuk melengkapkan satu kitar termodinamik. Dalam satu kitar terdapat empat lejang iaitu lejang masukan, lejang mampatan, lejang kuasa dan lejang ekzos.



Rajah 2.2: Prinsip kendalian enjin Diesel empat lejang (Haddad dan Watson, 1984).



Semasa lejang masukan, udara dari atmosfera disedut masuk secara terus ke dalam kebuk pembakaran dengan membuka injap masukan dan omboh bergerak dari pusat mati atas (TDC) ke pusat mati bawah (BDC). Semasa proses lejang mampatan pula, kedua-dua injap tertutup dan udara dimampatkan dengan omboh bergerak ke TDC. Menurut Ferguson (1986) dan Heywood (1988) udara dimampatkan sebanyak 1 per 20 isipadu asal iaitu kepada tekanan dan suhu kira-kira 4 MPa dan 800 K. Nisbah mampatan enjin Diesel iaitu nisbah di antara isipadu maksimum (isipadu tersapu) yang terbentuk oleh selinder kepada isipadu minimum (isipadu kelegaan) kebiasaannya adalah dalam julat 12-24 kepada 1 (Haddad dan Watson, 1984; Pulkrabek, 1997 dan *ESI International*, 1999). Nisbah mampatan ini adalah untuk memastikan bahawa suhu yang tinggi dicapai di dalam selinder supaya bahan api Diesel yang disembur terbakar dengan spontan.

Sungguhpun diketahui nisbah mampatan yang tinggi boleh meningkatkan prestasi enjin, namun meninggikan nisbah mampatan juga akan meninggikan kecenderungan mengetuk. Menurut Stone (1985) dan Heywood (1988), ketukan adalah nama yang ditujukan kepada bunyi bising yang dipindahkan melalui struktur enjin apabila berlaku pencucuhan spontan gas tak terbakar dan kenaikan tekanan yang pantas. Akibat daripada ketukan, lapisan sempadan haba pada dinding kebuk pembakaran boleh musnah. Ini mengakibatkan pertambahan kadar pemindahan haba. Ini boleh membuatkan sesetengah permukaan itu terjadinya prapencucuhan. Prapencucuhan adalah disebabkan oleh campuran mencucuh akibat daripada sentuhan dengan permukaan panas, misalnya injap ekzos. Prapencucuhan selalunya dicirikan dengan 'berjalan terus', iaitu enjin terus membakar selepas pencucuhan dipadamkan.

Pada hujung lejang mampatan iaitu sebelum omboh tiba ke pusat mati atas kira-kira  $20^{\circ}$ - $14^{\circ}$ , bahan api disemburkan secara semburan halus ke dalam selinder (Hartman dan Armstrong, 1959; Obert, 1968 dan Heywood, 1988). Di sekeliling setiap titisan bahan api yang berbentuk titisan wap ini, akan bercampur bersama udara panas pada tekanan tinggi membentuk campuran boleh nyala. Campuran ini akan menyala dengan spontan apabila suhu campuran udara bahan api melebihi daripada titik suhu pencucuhan bahan api. Pembakaran ini berlaku secara nyalaan resapan. Nyalaan pembakaran akan meresap ke bahagian-bahagian lain dan berlaku di sempadan antara bahan api dengan bahan pengoksidaan. Hasil pembakaran meresap ke dalam bahan pengoksidaan, begitu juga sebaliknya. Proses yang serupa berlaku di bahagian nyalaan bahan api dan kadar pembakaran dikawal ini oleh resapan. Semasa nyalaan resapan masih berlaku antara campuran udara bahan api dan gas yang terbakar, omboh akan bergerak ke pusat mati bawah (rujuk Rajah 2.2 bahagian iii). Lejang ini dinamakan lejang pengembangan atau kuasa. Pada hujung lejang kuasa, injap ekzos akan terbuka.

Pembukaan injap ekzos akan mengakibatkan berlaku perubahan tekanan dalam selinder. Omboh kemudiannya tertolak naik dari pusat mati bawah ke pusat mati atas. Lejang ini dinamakan lejang ekzos. Semasa omboh bergerak naik ke pusat mati atas, ia akan menolak hasil pembakaran keluar ke atmosfera. Akhirnya pada hujung lejang ekzos, injap ekzos ditutup dan injap kemasukan terbuka. Walaupun hasil pembakaran telah dikeluarkan semasa lejang ekzos tetapi masih terdapat sejumlah gas baki yang tertinggal dalam silinder disebabkan oleh injap bertindih (Pulkrabek, 1997). Gas baki ini akan mencairkan cas-cas udara yang masuk. Kemudian proses kitar ini berulang semula.

## 2.1.2 Komponen Enjin Diesel

Sebelum ujikaji dan analisis enjin Diesel dijalankan, pemahaman serta tinjauan ilmiah tentang komponen-komponen enjin Diesel haruslah dikenal pasti. Senarai komponen-komponen utama ditunjukkan seperti dalam Jadual 2.1 dan Rajah 2.3 menggambarkan kedudukan komponen utama ini (Obert, 1968; Thiessen dan Dales, 1982; Heywood, 1988 dan Pulkrabek, 1997).

Jadual 2.1: Komponen-komponen utama enjin Diesel.

Bil	Komponen	Huraian
1	Tangki minyak	Tangki takungan minyak pelincir yang terdapat di bahagian bawah blok enjin. Ia merupakan sebahagian daripada kotak enjin.
2	Aci engkol	Merupakan aci yang berpusing dan menolong untuk memindahkan kuasa keluaran kepada sistem luar. Diperbuat daripada besi tuangan nodul atau keluli tempa. Ia disambungkan kepada blok enjin melalui galas utama. Ia berpusing dalam satah pusingan 360° apabila omboh bergerak ke bawah dan menolak rod penyambung pada aci engkol.
3	Rod penyambung	Terletak antara omboh dan aci engkol. Diperbuat dari keluli terkeras atau besi tertempa. Ia membantu memberi gerakan lurus omboh kepada gerakan membulat pada aci engkol.

Jadual 2.1: sambungan

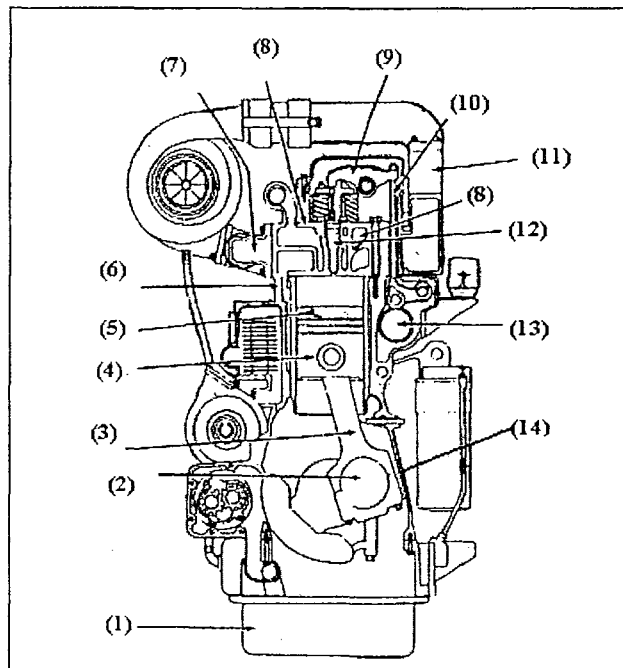
4	Omboh	Berperanan untuk memindahkan daya disebabkan oleh tekanan dalam selinder kepada aci engkol supaya berputar. Berbentuk selinder dengan berongga di bahagian bawah dan bergerak secara salingan dalam blok selinder. Permukaan atas omboh dinamakan mahkota omboh manakala sisi tepinya dinamakan skirt omboh. Bersambung kepada rod penyambung melalui pin omboh. Diperbuat daripada aloi aluminium atau besi tuang atau keluli.
5	Gelang omboh	Kedudukannya pada skirt omboh dan bersentuh dengan dinding selinder. Gelang mampatan berada di bahagian hampir kepada mahkota omboh. Selalunya terdapat dua atau lebih gelang mampatan. Gelang mampatan berfungsi untuk memastikan tiada kebocoran gas bertekanan tinggi melalui antara omboh dan dinding selinder. Bahagian bawah omboh terdapat sekurang-kurangnya satu gelang omboh dinamakan gelang kawalan minyak. Ia berfungsi untuk menahan minyak pelincir dari memasuki kebuk pembakaran.
6	Blok	Merupakan badan enjin yang mengandungi selinder. Diperbuat daripada aluminium atau besi tuangan. Mempunyai rongga aliran air bertujuan untuk penyejukan.
7	Panca rongga ekzos	Saluran paip yang membenarkan hasil pembakaran keluar dari enjin ke atmosfera. Diperbuat daripada besi tuangan.

Jadual 2.1: sambungan

8	Kepala selinder	Menutup bahagian atas selinder blok dan selalunya mengandungi isipadu kelegaan bagi kebuk pembakaran. Diperbuat daripada besi tuangan atau aluminium.
9	Lengan jumpelang	Penghubung mekanikal antara rod tolak dengan injap. Diperbuat daripada besi tuangan.
10	Rod tolak	Penghubung mekanikal antara aci sesondol dengan injap bagi enjin injap atas.
11	Panca rongga pengambilan	Saluran paip yang membenarkan aliran udara dari atmosfera terus ke dalam selinder. Ia diperbuat daripada bahan komposit atau logam tuangan atau plastik.
12	Penyuntik bahan api	Muncung tekanan yang menyembur bahan api Diesel pada udara yang dimampatkan di dalam selinder mengikut masa tertentu.
13	Aci sesondol	Aci yang berputar digunakan bagi mengawal atau menolak pembukaan dan menutup injap masukan dan ekzos dalam masa yang sesuai bagi satu kitar enjin. Penggunaan aci sesondol boleh dilakukan secara terus ataupun melalui penghubung mekanikal seperti rod tolak, lengan jumpelang, aci lengan jumpelang dan tapet. Diperbuat daripada besi tuangan boleh keras dan digerakkan melalui penyambungan tali sawat dari aci engkol. Di dalam kitar 4 lejang, aci sesondol berputar setengah kali daripada kelajuan enjin.
14	Kotak engkol	Merupakan sebahagian daripada blok enjin. Ia menutup kawasan kendalian aci engkol.

Jadual 2.1: sambungan

15	Injap	Berfungsi membenarkan aliran masuk dan keluar dari kebuk pembakaran mengikut masa tertentu. Diperbuat daripada keluli. Enjin moden Diesel menggunakan injap popet.
----	-------	--



Rajah 2.3: Kedudukan komponen utama enjin Diesel (Kelm, 1987).

## 2.2 Keluaran ekzos enjin Diesel

### 2.2.1 Nitrogen Oksida

Nitrogen, kandungan yang paling banyak di dalam udara sebanyak 78% merupakan sumber utama pembentukan nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ). Kandungan molekul nitrogen juga boleh wujud di dalam bahan api Diesel. Menurut Heywood (1988) dan Pulkrabek

(1997), ia boleh diabaikan kerana mempunyai peratusan kandungan yang kecil berbanding dengan nitrogen dalam udara.  $\text{NO}_x$  adalah sebutan terhimpun yang merujuk kepada dua spesies utama pengoksidaan nitrogen iaitu nitrik oksida (NO) dan nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ). NO adalah gas tanpa warna, boleh terbakar dan mempunyai sedikit bau manakala  $\text{NO}_2$  pula adalah gas berwarna coklat kemerahan, tidak boleh terbakar dan mempunyai bau yang busuk.

*United States Army Corps of Engineers* (1988) melaporkan bahawa kira-kira 90-95% daripada gas  $\text{NO}_x$  di dalam produk pembakaran adalah NO dan 5-10% sahaja  $\text{NO}_2$  dan sedikit kandungan nitrogen teroksida lain yang boleh diabaikan. Begitu juga dengan Hilliard dan Wheeler (1979) telah menyatakan bahawa enjin Diesel memberikan kira-kira 10-30% gas  $\text{NO}_2$  dari keseluruhan keluaran ekzos  $\text{NO}_x$ .

Kedua-dua gas (dikenali  $\text{NO}_x$ ) dilepaskan ke atmosfera dan akan bertindak balas dengan bahan kimia lain terutamanya pada cahaya suria yang kuat untuk menghasilkan ozon aras bumi dan ini merupakan satu penyebab utama pembentukan kabus fotokimia (Pulkrabek 1997, Khalid Hasnan 1997, Heinsohn dan Kabel, 1999). Kabus fotokimia boleh menyebabkan segelintir manusia sukar bernafas dan menghadkan jarak penglihatan di dalam udara. Menurut Ahmad Razlan Yusoff (2002), pencemaran  $\text{NO}_x$  memberi kesan berbahaya kepada manusia dan alam persekitaran. Misalnya kerosakan pada lapisan ozon dan penapis ultra ungu membawa kepada penyakit kanser dan kulit. Begitu juga dengan pendedahan kepada kepekatan  $\text{NO}_x$  yang tinggi menghasilkan kabus fotokimia dan hujan asid yang boleh mengakibatkan kerosakan kepada sistem pernafasan.

Pembentukan  $\text{NO}_x$  dalam enjin Diesel sangat bergantung kepada suhu, tekanan, nisbah udara bahan api dan ketumpatan oksigen pembakaran (*United States Army Corps of Engineers* 1988, Pulkrabek 1997 dan Lim 2000). Pembentukan bermula apabila molekul dwiatom nitrogen yang berada dalam keadaan stabil pada suhu rendah berpecah disebabkan oleh pembakaran pada suhu dan tekanan tinggi. Menurut Bacha *et al.* (1998), nitrogen berpecah kepada monoatom nitrogen apabila suhu pembakaran mencecah 1873 K dan akan bertambah dengan cepatnya apabila suhu semakin bertambah. Hal ini juga diperakui oleh Thiessen dan Dales (1982) yang menyatakan bahawa pembentukan  $\text{NO}_x$  khususnya NO terjadi apabila suhu pembakaran melebihi 1723 K.

Stone (1985) dan Heywood (1988) pula menulis bahawa proses pembentukan  $\text{NO}_x$  adalah kompleks kerana proses ini bergantung kepada siri tindak balas seperti mekanisme Zeldovich:



Pembentukan NO (kandungan terbanyak dalam  $\text{NO}_x$ ) dalam kebuk pembakaran terbentuk pada segenap gas yang terbakar pada suhu dan tekanan yang tinggi di belakang nyalaan dan pasca nyalaan melalui tindak balas kimia. Penambahan suhu pembakaran dan tekanan gas akan menaikkan kadar pembentukan NO. Fenomena ini berterusan sehingga suhu dan tekanan gas dalam selinder pembakaran menurun apabila berlakunya lejang pengembangan atau kuasa di mana tindak balas kimia antara nitrogen dan oksigen terhenti.



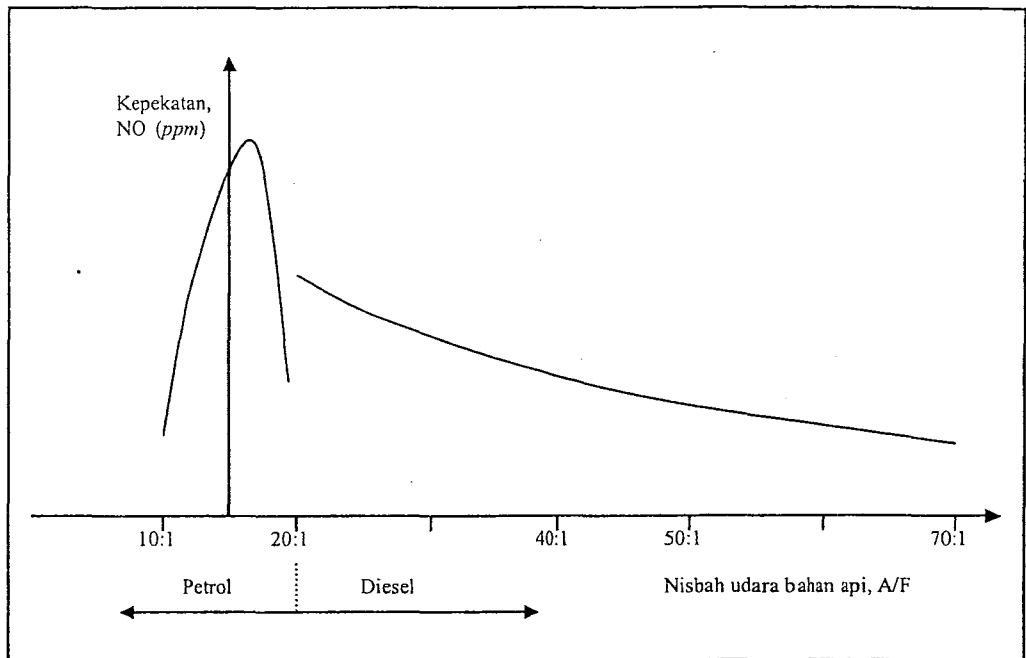
Selain daripada suhu dan tekanan pembakaran, kepekatan NO juga bergantung kepada nisbah udara bahan api ( $A/F$ ) yang digunakan. Pengurangan penggunaan  $A/F$  akan mengakibatkan pertambahan pada nisbah setara udara bahan api ( $\phi_{A/F}$ ) seperti persamaan (2.3):

$$\phi_{A/F} = \frac{(A/F)_{\text{stoikiometri}}}{(A/F)_{\text{sebenar}}} \quad (2.3)$$

dimana  $(A/F)_{\text{stoikiometri}}$  adalah campuran udara bahan api yang ideal (pembakaran sempurna) iaitu 14.5 bagi enjin Diesel ringan (Heywood, 1988) manakala  $(A/F)_{\text{sebenar}}$  ialah campuran udara bahan api yang sebenar.

Menurut Heywood (1988) lagi, kepekatan NO adalah maksimum pada bahagian campuran bahan api kurang ( $\phi_{A/F} < 1$ ) dan menghampiri kepada stoikiometri ( $\phi_{A/F} = 1$ ). Lim (2000) menulis bahawa kepekatan NO adalah rendah bagi campuran bahan api lebih ( $\phi_{A/F} > 1$ ) dan menjadi maksimum apabila berada dalam keadaan campuran bahan api kurang iaitu kira-kira 10% lebihan udara.

Haddan dan Watson (1984) dan Bacha *et al.* (1998) juga menyatakan bahawa kepekatan NO berpotensi terbentuk maksimum pada bahagian campuran bahan api kurang (lebih ketumpatan oksigen) dan hampir kepada stoikiometri. Rajah 2.4 menunjukkan corak keadaan dimana kepekatan NO bertambah apabila campuran  $A/F$  berkurangan.



Rajah 2.4: Corak hubungan antara keluaran ekzos NO dan  $A/F$  bagi enjin petrol/Diesel (Haddan dan Watson, 1984).

Selain kandungan gas NO, bahan cemar  $\text{NO}_x$  juga mempunyai kandungan gas  $\text{NO}_2$ . Pulkrabek (1997) telah melaporkan bahawa tindak balas yang berkemungkinan menghasilkan NO dalam proses pembakaran adalah seperti mekanisme Zeldovich dan kemudiannya menghasilkan gas  $\text{NO}_2$  melalui tindak balas:



Disebabkan peratusan keluaran ekzos enjin Diesel  $\text{NO}_2$  adalah kecil, keluaran NO selalunya diutamakan dalam kajian gas  $\text{NO}_x$  (Lim 2000).

### 2.2.2 Perundangan Keluaran Ekzos NO<sub>x</sub>

Dunia tidak terkecuali daripada mengalami masalah pencemaran alam sekitar khususnya pencemaran udara. Pencemaran udara berpunca daripada penambahan bahan cemar seperti gas, debu dan asap ke atmosfera sehingga mengganggu dan membahayakan kehidupan manusia, haiwan dan tumbuhan. Selain itu, ia juga menyebabkan perubahan kepada iklim bumi (Lam *et al.* 2001).

Malaysia sebagai sebuah negara membangun tidak terlepas daripada pencemaran udara. Statistik yang dikeluarkan oleh Jabatan Alam Sekitar (JAS) Malaysia menunjukkan pelepasan asap dan gas daripada kenderaan bermotor dikenali sebagai punca utama pencemaran udara dengan menyumbang sebanyak 70-75% bahan cemar ke atmosfera (Berita Harian, 2001). Analisis yang dibuat oleh Aminuddin Ishak (2001) menunjukkan salah satu faktor peningkatan pencemaran di Malaysia, adalah peningkatan kenderaan bermotor dari 8.9 juta yang didaftarkan pada tahun 1998 kepada 10.6 juta pada tahun 2000. Daripada 10.6 juta ini, 11% adalah kenderaan berenjin Diesel.

Enjin Diesel pada mulanya tidak banyak mempengaruhi alam sekitar sehinggalah pada tahun 1920an dan awal 1930an. Ini disebabkan adanya versi-versi automotif yang pesat membangun (Obert, 1968; Haddan dan Watson, 1984). Selain itu, Pulkrabek (1997) pula menulis bahawa keluaran ekzos enjin Diesel telah mencemarkan alam sekitar dan menyebabkan masalah kesihatan kepada manusia. Sebanyak 90% pencemaran telah berjaya dikurangkan pada tahun 1940 diikuti dengan 95% pada 1970 hingga 1980an tetapi ia masih menjadi masalah kepada kesihatan. Juteru itu, banyak negara-negara

telah mengeluarkan garis panduan, peraturan dan perundangan terhadap bahan cemar keluaran ekzos.

Di Malaysia peraturan dan undang-undang memainkan peranan dalam menjaga alam sekitar. Undang-undang boleh dikuatkuasa untuk mengawal kemusnahan alam sekitar khususnya pencemaran udara daripada enjin Diesel. Tetapi piawaian JAS, Malaysia dari sudut kenderaan bermotor hanya menekankan penguatkuasaan kepada pelepasan asap hitam sahaja untuk kenderaan berenjin Diesel (Laporan Kualiti Alam Sekitar, 1998) dan tidak kepada pelepasan gas nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ). Mengikut akta peraturan kualiti alam sekeliling (kawalan pelepasan daripada enjin Diesel) 1996, setiap kenderaan Diesel dikehendaki mematuhi pelepasan asap tidak melebihi 50 *hatridge smoke unit*. Selain membebaskan asap hitam, enjin Diesel turut membebaskan gas-gas nitrogen oksida,  $\text{NO}_x$ , sulfur dioksida,  $\text{SO}_2$ , karbon monoksida, CO dan habuk, PM yang merbahaya. Oleh itu satu garis panduan tentang perundangan keluaran gas  $\text{NO}_x$  amnya perlu diperolehi.

Menurut Khalid Hasnan (1997) kewujudan perbezaan perundangan keluaran yang diamalkan di seluruh dunia dan pengenalan kawalan lebih ketat ketika teknologi bertambah baik menyukarkan kita memperolehi maklumat menyeluruh dan terkini tentang perundangan keluaran ekzos. Namun begitu, Ahmad Razlan Yusoff (2002) telah menyatakan bahawa peraturan had dan perundangan boleh didapati dengan merujuk kepada keluaran piawaian JAS dari sudut yang lain. Beliau telah menunjukkan pemiawaian pemisahan ekzos/serombong bagi bahan cemar  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , PM dan CO yang didapati daripada perundangan JAS Malaysia dan *Ministry of Industry USA* seperti Jadual 2.2.

Jadual 2.2: Pemiawaian pemisahan ekzos / serombong (Ahmad Razlan Yusoff, 2002).

Perundangan \ Bahan Cemar	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO
JAS Malaysia				
mg/Nm <sup>3</sup>	400	350	1700	
(ppm)	(351)	(307)	(1491)	
<i>Ministry of Industry USA</i>				
mg/Nm <sup>3</sup>				992
(ppm)				(870)

Di dalam penyelidikan ini, penumpuan hanya diberi kepada keluaran ekzos gas NO<sub>x</sub>. Perundangan dan had keluaran ekzos gas NO<sub>x</sub> yang ditunjukkan dalam Jadual 2.2 diguna-pakai sebagai had maksimum keluaran NO<sub>x</sub> yang dibenarkan dari ekzos enjin Diesel. Kawalan yang dibuat akan merujuk kepada had ini dan dibincangkan dalam bab 5 dan 6.