

**PENGARUH WATER-INJECTION
TERHADAP KADAR EMISI NITROGEN OKSIDA (NO_x)
PADA MOTOR DIESEL YANG BAHAN BAKARNYA DIPANASKAN**

SKRIPSI

*Diajukan kepada Tim Penguji Skripsi Jurusan Teknik Otomotif
Sebagai salah satu persyaratan Guna memperoleh Gelar Sarjana Pendidikan*



Oleh:

Rusanto

NIM. 2006/74228

**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN TEKNIK OTOMOTIF
JURUSAN TEKNIK OTOMOTIF
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2011**

PERSETUJUAN SKRIPSI

PENGARUH WATER INJECTION

TERHADAP KADAR EMISI NITROGEN OKSIDA (NO_x)

PADA MOTOR DIESEL YANG BAHAN BAKARNYA DIPANASKAN

Nama : Rusanto
NIM/BP : 74228 / 2006
Program Studi : Pendidikan Teknik Otomotif
Jurusan : Teknik Otomotif
Fakultas : Teknik

Padang, Agustus 2011

Disetujui Oleh,

Pembimbing I

Pembimbing II

Drs. Hasan Maksum, MT

NIP: 19660817 199103 1 007

Drs. Martias, M.Pd

NIP : 19640801 199203 1 003

PENGESAHAN

**Dinyatakan lulus setelah dipertahankan di depan Tim Penguji Skripsi
Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif
Jurusan Teknik Otomotif Fakultas Teknik
Universitas Negeri Padang**

**Judul : Pengaruh Water Injection terhadap Kadar Emisi Nitrogen
Oksida (NO_x) pada Motor Diesel yang Bahan Bakarnya
Dipanaskan**
Nama : Rusanto
NIM/BP : 74228 / 2006
Program studi : Pendidikan Teknik Otomotif
Jurusan : Teknik Otomotif
Fakultas : Fakultas Teknik

Padang, Agustus 2011

Tim Penguji

	Nama	Tanda Tangan
1. Ketua	Drs. Hasan Maksum, MT	1. _____
2. Sekretaris	Drs. Martias, M.Pd	2. _____
3. Anggota	Prof. Dr. Nasrun	3. _____
4. Anggota	Drs. Darman, M.Pd	4. _____
5. Anggota	Donny Fernandez, S.Pd, M.Sc	5. _____

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar karya saya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang lazim.

Padang, Agustus 2011

Yang menyatakan,

Rusanto

74228/2006

ABSTRAK

Rusanto : Pengaruh *Water injection* Terhadap Kadar Emisi Nitrogen Oksida (NO_x) pada Motor Diesel yang Bahan Bakarnya Dipanaskan

Pemanasan bahan bakar sebagai upaya menghemat penggunaan bahan bakar telah terbukti dapat meningkatkan unjuk kerja motor diesel. Peningkatan unjuk kerja motor diesel juga diikuti dengan meningkatnya kadar emisi nitrogen oksida (NO_x) yang bersifat racun dan polutan. Salah satu cara menurunkan kadar emisi nitrogen oksida (NO_x) adalah dengan menggunakan sistem *water injection*. *Water injection* berkerja dengan cara memasukan butiran air ke dalam ruang bakar mesin, sehingga temperatur ruang bakar mesin turun dan pembentukan nitrogen oksida dapat dikurangi.

Model desain yang dipakai dalam penelitian ini adalah *one group pretest posttest design*. Pengujian standar yaitu pengujian motor diesel dengan pemanas bahan bakar tanpa *water injection* (*pretest*) dan pengujian terhadap perlakuan (*posttest*) yaitu dengan menambahkan sistem *water injection*. Indikator yang akan dilihat adalah kadar emisi nitrogen oksida (NO_x). Kemudian hasil penelitian dianalisa dan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik kemudian dibandingkan dan disimpulkan mana yang lebih baik. Untuk melihat ada tidaknya pengaruh dilakukan uji hipotesis menggunakan uji-t.

Dari hasil penelitian terlihat bahwa kadar emisi nitrogen oksida (NO_x) mengalami penurunan pada semua putaran mesin yang diuji (700, 1200, 1700 dan 2200 rpm), penurunan terbesar terjadi pada putaran mesin 700 rpm yaitu sebesar 36 ppm atau sebesar 21, 95 %. Berdasarkan hasil uji-t diketahui terdapat perbedaan signifikan kadar emisi NO_x antara motor diesel yang bahan bakarnya dipanaskan dan dipasang *water injection* dengan yang tidak dipasang *water injection*.

Kata Kunci : Motor Diesel, Pemanasan Bahan Bakar, *Water injection*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'alamin, puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT, yang senantiasa meilmpahkan rahmat, nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **"Pengaruh *Water Injection* terhadap Kadar Emisi Nitrogen Oksida (NOx) pada Motor Diesel yang Bahan Bakarnya Dipanaskan"**. Skripsi ini merupakan salah satu persyaratan untuk menyelesaikan Program Strata Satu (S1) di Jurusan Teknik Otomotif Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang. Shalawat dan salam semoga selalu tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Besar Muhammad SAW.

Selama mengerjakan skripsi ini, penulis telah mendapatkan banyak bantuan baik moril maupun materil, terutama dalam menghadapi setiap kesulitan, hambatan dan rintangan yang penulis alami. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.
2. Bapak Drs. Hasan Maksum, MT, selaku Ketua Jurusan Teknik Otomotif FT-UNP, Dosen Pembimbing I dan Penasehat Akademik Penulis yang telah sangat banyak membantu baik selama perkuliahan maupun dalam pengerjaan skripsi ini.
3. Bapak Drs. Martias, M.Pd. selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak membantu dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Seluruh Dosen, Teknisi dan Staf Administrasi Jurusan Teknik Otomotif Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.
5. Kedua orang tua dan keluarga yang selalu memberikan dukungan baik moril maupun materil serta selalu menyalakan semangatku sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
6. Ibu Asnelly dan Bapak Manius serta Keluarga Besar RM. Sambalado
7. Rekan-rekan Teknik Otomotif '06 senasib sepenanggungan: The AutoCAD Team dan OBI

8. Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis berharap semoga bantuan dan dukungan yang diberikan mendapat imbalan yang berlipat-lipat dari Allah SWT. Penulis menyadari dalam penulisan Skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan dan masih jauh dari kesempurnaan maka penulis mengharapkan saran dan kritikan dari semua pihak.

Akhirnya penulis berharap semoga Skripsi ini dapat bermanfaat untuk menambah khasanah ilmu pengetahuan terutama bagi penulis sendiri.

Padang, Agustus 2011

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
 BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Identifikasi Masalah	3
C. Batasan Masalah	4
D. Rumusan Masalah	4
E. Asumsi Penelitian	5
F. Tujuan Penelitian	5
G. Manfaat Penelitian	6
 BAB II KAJIAN TEORI	
A. Landasan Teori	7
1. <i>Water injection</i>	7
2. Cara Kerja Motor Diesel	11
3. Bahan Bakar Motor Diesel	13
4. Pembakaran	15
5. Pembakaran Motor Diesel	18
6. Efek Pemanasan Bahan Bakar dan <i>Water Injection</i> pada Pembakaran Motor Diesel	23
7. Nitrogen Oksida (NO _x)	25
8. Pemanasan Bahan Bakar	27
B. Penelitian Yang Relevan	29

C. Kerangka Pikir	30
D. Hipotesis Penelitian	30

BAB III METODE PENELITIAN

A. Desain Penelitian	32
B. Definisi Operasional Variabel Penelitian	33
C. Instrumen dan Teknik Pengambilan Data	33
D. Teknik Analisis Data	36

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Deskripsi Pelaksanaan Penelitian	38
B. Deskripsi Data Hasil Penelitian	40
C. Analisa dan Pembahasan	41
D. Keterbatasan Penelitian	46

BAB V PENUTUP

A. Simpulan	47
B. Saran	47

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Format Tabel Kadar Emisi NO _x Pada Motor Diesel	35
2. Data Kadar Emisi Nitrogen Oksida (NO _x) pada Motor Diesel dengan Pemanas Bahan Bakar Tanpa <i>Water injection</i>	40
3. Data Kadar Emisi Nitrogen Oksida (NO _x) pada Motor Diesel dengan Pemanas Bahan Bakar Dengan <i>Water injection</i>	40
4. Nilai Rata-rata Kadar Emisi Nitrogen Oksida (NO _x)	41
5. Perbedaan Kadar Emisi Nitrogen Oksida antara Motor Diesel yang Tidak dengan yang Dipasangkan Sistem <i>Water injection</i>	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Regulasi Emisi NO _x dan PM	2
2. Sistem <i>Direct Water injection</i> pada Motor Diesel	10
3. Cara kerja Motor Diesel	11
4. Proses Pembakaran Motor Diesel	19
5. Karakteristik Pembakaran pada Motor Diesel	21
6. Molekul NO ₂ dan NO	26
7. Kerangka Berpikir	30
8. Skema penelitian <i>one-group pretest posttest</i>	32
9. Grafik Kadar Emisi Nitrogen Oksida (NO _x) Rata-rata Pada Berbagai Putaran Mesin	44

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Perhitungan Statistik	49
2. Tabel distribusi-t	52
3. Surat Izin Penelitian	53
4. Surat Balasan Permohonan Izin Penelitian	54
5. Surat Keterangan Telah Melaksanakan Penelitian	55
6. Data Hasil Pengukuran Kadar Emisi NOx	56
7. Dokumentasi	57
8. Spesifikasi Mesin L300 Colt Diesel	60

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Meningkatnya jumlah populasi manusia dan industrialisasi di dunia telah meningkatkan kebutuhan terhadap energi (Gupta dan Roy, 2007 : 1). Minyak bumi sebagai salah satu sumber energi tak-terbaharukan mulai berkurang ketersediaannya, menyebabkan meningkatnya harga minyak dunia.

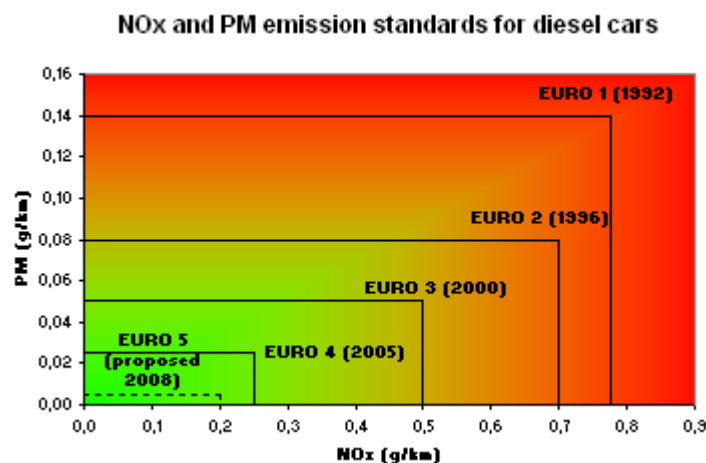
Perkembangan teknologi otomotif telah banyak memberikan manfaat bagi kehidupan manusia, mulai dari bidang transportasi, militer sampai pertanian. Penelitian dan pengembangan (*research and development*) terus dilakukan untuk mencapai teknologi otomotif yang lebih aman, nyaman, efisien, terpercaya (*reliable*) dan performa optimal.

Motor diesel merupakan salah satu jenis motor bakar yang banyak digunakan terutama sebagai perangkat stationari (pembangkit listrik, mesin diesel industri dll), karena motor diesel memiliki efisiensi panas tinggi. Banyak penelitian dilakukan untuk meningkatkan performa motor diesel. Salah satunya adalah upaya meningkatkan sifat-sifat bahan bakar dengan jalan memberikan perlakuan panas pada bahan bakar (*fuel heat treatment*) sebelum diinjeksikan ke ruang bakar.

Pemanasan bahan bakar yang akan diinjeksikan ke ruang bakar telah terbukti dapat meningkatkan daya poros, efisiensi panas dan tekanan efektif rata-rata serta menurunkan penggunaan bahan bakar spesifik (*specific fuel*

consumption) motor diesel. Akan tetapi pemanasan bahan bakar sebelum diinjeksikan dapat memicu timbulnya nitrogen oksida (NOx) pada gas buang mesin (Budi, 2002 : 22-32).

Pemanasan pada bahan bakar dengan temperatur 50 °C menyebabkan peningkatan kadar emisi nitrogen oksida sebesar 9,14 % atau rata-rata sebesar 100 ppm, padahal konsentrasi NOx sebanyak 100 ppm dapat menyebabkan kematian pada manusia, 5 ppm setelah 5 menit dapat menyebabkan sesak nafas, selain itu kadar emisi NOx sebesar 10 ppm dapat menurunkan kemampuan fotosintesis tumbuhan antara 60 % – 70 % (Yoky, 2010). Selain bersifat racun, NOx juga bersifat polutan NOx dapat menyebabkan terjadinya fenomena kabut fotokimia (Pulkrabek, 2004 : 339). Kabut fotokimia merupakan masalah pencemaran udara serius terutama di daerah dengan jumlah kendaraan bermotor cukup besar, karena dapat menyebabkan berkurangnya jarak pandang, iritasi mata serta fenomena hujan asam.



Gambar 1. Regulasi Emisi NOx dan PM
(Sumber: <http://www.en.wikipedia.org>)

Water injection merupakan teknologi yang berguna untuk mendinginkan ruang bakar (*combustion chamber*) mesin. Pendinginan bertujuan untuk mencegah *knocking*/detonasi, menurunkan kadar emisi NO_x dan meningkatkan efisiensi volumetrik mesin (www.en.wikipedia.org). Dengan dipasangnya *water injection* pada motor diesel diharapkan dapat menciptakan mesin yang ramah lingkungan dengan performa daya poros yang lebih optimal serta konsumsi bahan bakar yang lebih efisien.

Melalui pemanasan bahan bakar dan *water injection* pada motor diesel diharapkan dapat menurunkan kadar emisi NO_x dengan tetap menjaga konsumsi bahan bakar dan daya poros motor diesel tetap optimal. Berdasarkan paparan di atas maka penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul **“Pengaruh *Water injection* Terhadap Kadar Emisi Nitrogen Oksida (NO_x) Pada Motor Diesel Yang Bahan Bakarnya Dipanaskan”**.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latarbelakang masalah diatas dapat diidentifikasi masalah antara lain:

1. Konsumsi bahan bakar fosil semakin meningkat sedangkan ketersediaannya semakin berkurang, karena minyak bumi merupakan sumber daya alam yang tak terbaharukan sehingga menyebabkan meningkatnya harga minyak bumi.
2. Selain meningkatkan unjuk kerja mesin, pemanasan bahan bakar juga menyebabkan peningkatan kadar emisi nitrogen oksida (NO_x).

3. Konsentrasi NO_x sebanyak 100 ppm dapat menyebabkan kematian pada manusia dan 5 ppm setelah 5 menit dapat menyebabkan sesak nafas.
4. Kadar emisi NO_x sebesar 10 ppm dapat menurunkan kemampuan fotosintesis tumbuhan antara 60 – 70 %.

C. Batasan Masalah

Terdapat batasan masalah agar penelitian ini menjadi lebih terarah, antara lain:

1. Temperatur pemanasan bahan bakar yang diuji hanya 50 °C yaitu temperatur pemanasan yang menghasilkan unjuk kerja paling optimal.
2. Emisi yang dihasilkan mesin yang diukur hanya nitrogen oksida (NO_x).
3. Sistem *water injection* yang digunakan hanya memanfaatkan hisapan mesin tanpa adanya sistem khusus.

D. Rumusan Masalah

Apakah terdapat perbedaan kadar emisi nitrogen oksida (NO_x) yang signifikan antara motor diesel yang bahan bakarnya dipanaskan dan dipasang *water injection* dengan yang tidak dipasang *water injection*?

E. Asumsi Penelitian

Berdasarkan kajian yang diperoleh dapat diasumsikan bahwa:

1. Mesin yang digunakan sebagai objek penelitian adalah motor diesel Mitsubishi 4D56 yaitu motor penggerak yang digunakan pada kendaraan Mitsubishi L300 Colt Diesel Minibus, dimana pada saat penelitian, mesin diatur dalam kondisi standar dan sama pada setiap perlakuan penelitian.
2. Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis solar dan persis sama pada setiap perlakuan penelitian.
3. Alat ukur yang akan digunakan sudah dikalibrasi sebelum digunakan pada setiap perlakuan penelitian.
4. Temperatur, tekanan dan jumlah udara masuk ke dalam silinder, diasumsikan konstan sepanjang penelitian. Hal ini dimungkinkan, karena waktu pengujian yang relatif singkat dan kondisi lingkungan (ruangan) selama proses pengujian tidak mengalami perubahan berarti, sehingga tidak memberikan pengaruh yang signifikan.

F. Tujuan Penelitian

Mengungkapkan perbedaan kadar emisi nitrogen oksida (NO_x) antara motor diesel yang bahan bakarnya dipanaskan dan dipasang *water injection* dengan yang tidak dipasang *water injection*.

G. Manfaat Penelitian

1. Sebagai referensi bagi penelitian lainnya tentang penerapan *water injection* pada motor diesel secara khusus dan pada motor bakar secara umum.
2. Menambah wawasan tentang usaha penurunan emisi NOx dengan pemasangan *water injection*.
3. Sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan pada Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif – Universitas Negeri Padang.

BAB II

KAJIAN TEORI

A. Landasan Teori

1. *Water injection*

Water injection adalah salah satu metode pendinginan ruang bakar (*combustion chamber*) pada motor bakar (*combustion engine*) dengan cara menginduksikan air (H_2O) kedalam ruang bakar mesin (en.wikipedia.org). Teknologi *water injection* pertama kali digunakan pada perang dunia II untuk meningkatkan performa tinggal landas (*take off*) dan ketinggian jelajah pesawat-pesawat tempur yang menggunakan *supercharger* dan *turbocharger* (www.alcoholinjectionsystem.com). Pada perkembangannya metode *water injection* banyak diterapkan pada motor-motor penggerak kendaraan, kapal laut dan perangkat stasionari (Pulkrabek, 2004 : 390). *Water injection* berfungsi untuk:

a) Mengurangi kadar emisi nitrogen oksida (NO_x)

Menurut Pulkrabek (2004 : 339-340) NO_x terbentuk akibat temperatur ruang bakar yang terlalu tinggi, sehingga memungkinkan terjadinya ikatan antara molekul N_2 dengan O_2 yang terkandung dalam udara yang dihisap mesin. Air yang dimasukkan melalui metode *water injection* akan menurunkan temperatur silinder sehingga mencegah terjadinya pembentukan NO_x .

b) Mencegah terjadinya detonasi / *knocking*

Detonasi adalah kejadian yang ditimbulkan akibat fenomena penyalan sendiri (*self ignition*) pada campuran bahan bakar dan udara. Detonasi dapat menyebabkan terjadinya kerusakan pada mesin (Pulkrabek, 2004 : 158). Penyalan sendiri terjadi akibat temperatur dalam silinder telah melebihi temperatur menyala sendiri (SIT) campuran udara dan bahan bakar, temperatur silinder yang tinggi salah satunya disebabkan oleh perbandingan kompresi yang terlalu tinggi. *Water injection* menyerap panas yang ada didalam silinder sehingga mengurangi terjadinya fenomena penyalan sendiri.

c) Meningkatkan efisiensi volumetrik mesin

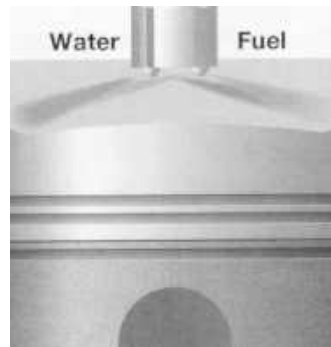
Untuk menghasilkan tenaga yang besar mesin perlu membakar lebih banyak campuran udara dan bahan bakar. Untuk melakukan hal tersebut mesin perlu mengisap udara dengan jumlah maksimum dalam setiap siklus kerja mesin. Massa udara yang mampu dihisap mesin secara ideal sebanding dengan kerapatan udara atmosfer dikali dengan volume langkah (*displacement volume*) silinder mesin (Pulkrabek, 2004 : 69). Udara dengan temperatur yang lebih rendah memiliki kerapatan (*density*) yang lebih tinggi dibanding udara dengan temperatur tinggi. Sehingga mesin yang menghisap udara yang lebih dingin akan mampu memasukkan massa udara lebih besar, selanjutnya meningkatkan jumlah bahan bakar yang akan dicampurkan untuk dibakar. Udara dengan temperatur rendah dapat dicapai dengan melakukan

pendinginan terlebih dahulu sebelum dimasukan ke dalam mesin. *Water injection* mendinginkan udara sebelum dimasukkan ke dalam mesin.

Menurut Pulkrabek (2004 : 391) *water injection* dapat dilakukan dengan tiga cara, yaitu: 1) menginjeksikan air ke udara yang lewat, baik melalui sistem pemasukan (*intake system*) maupun secara langsung ke ruang bakar, 2) mengemulsikan air dengan bahan bakar, dan 3) menggunakan saluran masuk udara dengan tingkat kelembaban tinggi (*high humidity inlet air*).

Penginjeksian air ke dalam ruang bakar dilakukan dengan cara memasang sebuah mekanisme nosel pada saluran masuk (*intake manifold*) mesin. Pada saat piston melakukan langkah hisap air dalam tangki penampungan akan ikut terhisap bersama udara akibat adanya kevakuman. Karena adanya mekanisme nosel air yang keluar akan berbentuk butiran-butiran halus, teknik ini disebut juga teknik fumigasi (Bedford et al, 2000). Selain dengan mekanisme nosel yang dipasang pada saluran masuk, penginjeksian air juga dapat dilakukan secara langsung ke dalam ruang bakar mesin, metode ini disebut *Direct Water injection* (DWI) (Wartsila NSD, 2000). DWI membutuhkan sebuah injektor yang dipasang pada kepala silinder. Injektor dihubungkan dengan sebuah pompa air melalui saluran tekanan tinggi. Pompa air digerakkan oleh mesin dengan *timing* tertentu. Pada saat tertentu pompa akan menekan air menuju injektor

untuk disuntikan kedalam ruang bakar mesin. Tekanan pemompaan air berkisar antara 200 – 400 bar (Wartsila NSD, 2000).



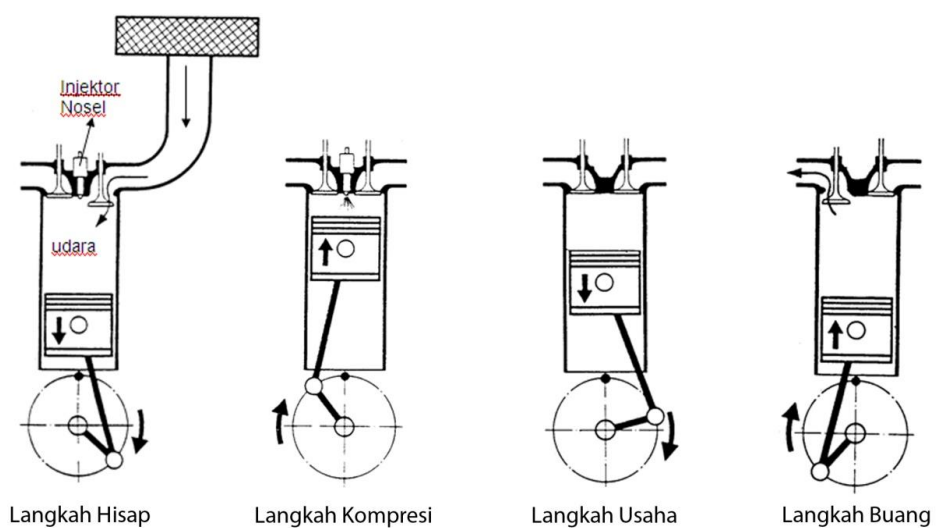
Gambar 2. Sistem *Direct Water injection* pada Motor Diesel
(Sumber: Wartsila NSD, 2000:41)

Memasukkan air ke dalam ruang bakar dapat juga dilakukan dengan cara mencampurkan / mengemulsikan air dengan bahan bakar dengan komposisi tertentu. Metode ini telah terbukti mampu menurunkan kadar emisi NO_x sebesar 20 - 30 % dan *Particulate Matter* (PM) (Bedford, 2000 ; Wartsila NSD, 2000). Kekurangan pengemulsian air kedalam bahan bakar adalah jumlah campuran konstan pada berbagai kondisi mesin (Bedford, 2000).

Saluran masuk udara dengan kelembaban tinggi dapat dimanfaatkan untuk memasukan air kedalam ruang bakar. Udara yang masuk kedalam mesin yang dilewatkan melalui saluran yang lembab akan mengandung air, sehingga air akan ikut terbawa masuk kedalam mesin. Metode ini dapat menurunkan emisi NO_x sebesar 10 – 30 % (Wartsila NSD, 2000). Kelemahan penggunaan saluran masuk lembab adalah resiko terjadinya korosi / erosi pada saluran masuk dan katup (Pulkrabek, 2004 : 391).

2. Cara Kerja Motor Diesel

Motor diesel adalah salah satu jenis motor bakar torak pembakaran dalam (*internal combustion engine*). Motor diesel mengubah energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi termal yang kemudian diubah menjadi energi mekanis yang umumnya berupa kerja poros. Pengubahan energi kimia menjadi energi termal dilakukan dengan proses pembakaran, pada motor diesel pembakaran terjadi dengan memanfaatkan *self ignition temperature* campuran bahan bakar dan udara. Tekanan yang dihasilkan dari proses pembakaran kemudian dimanfaatkan oleh mekanisme piston-batang piston-poros engkol untuk menghasilkan putaran yang dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan. Pembakaran pada motor diesel tidak terjadi secara terus menerus, akan tetapi berlangsung secara periodik pada setiap siklus. Pada motor diesel empat langkah pembakaran terjadi sebanyak satu kali dalam empat kali langkah piston dari titik mati atas (TMA) ke titik mati bawah (TMB) atau sebaliknya.



Gambar 3. Cara kerja Motor Diesel
(Sumber: Swiss Contact, 2003 : 2)

Proses penghasilan tenaga pada motor diesel dimulai dengan bergeraknya piston dari TMA ke TMB, pada saat yang bersamaan saluran masuk terbuka sehingga udara dari atmosfer dihisap masuk kedalam ruang silinder, kejadian ini disebut **langkah hisap**. Setelah piston mencapai TMB, piston akan mulai bergerak kembali menuju TMA. Pada saat piston bergerak menuju TMA saluran masuk dan saluran buang tertutup, sehingga udara yang berada didalam ruang silinder volumenya menjadi mampat dan meningkatkan temperatur sampai sekitar 700 - 900 °C serta tekanan sampai sekitar 2000 bar (Swiss Contact, 2003 : 2), kejadian ini disebut dengan **langkah kompresi**. Perbandingan kompresi dibuat berkisar antara 12 sampai 24 : 1 (Pulkrabek, 2004: 297). Piston terus bergerak dari TMB menuju TMA memampatkan udara yang ada di dalam silinder, sekitar 30° - 10° engkol sebelum piston mencapai TMA bahan bakar diinjeksikan oleh injektor nosel kedalam ruang bakar. Ledakan yang dihasilkan dari proses pembakaran mendesak piston bergerak menuju TMB, selama proses pembakaran saluran masuk dan saluran keluar tertutup, proses ini disebut **langkah usaha**. Tekanan pembakaran yang dihasilkan mencapai 4 – 12 MPa. Dengan saluran masuk dalam keadaan tertutup dan saluran buang terbuka piston bergerak dari TMB menuju TMA mendesak gas sisa pembakaran keluar menuju saluran buang. Setelah proses pembuangan selesai mesin akan memulai kembali siklus selanjutnya dari langkah hisap dan seterusnya.

3. Bahan Bakar Motor Diesel

Untuk mendapatkan kinerja mesin yang optimal terdapat beberapa persyaratan pada bahan bakar motor diesel, yaitu (Step 2, 1979 : 2-5):

a. Sifat nyala yang baik (*Flash Point*)

Sifat nyala yang baik adalah sifat mudah menyala pada saat kompresi tinggi dari motor diesel. Dengan temperatur yang tinggi ini bahan bakar yang disemprotkan akan mudah terbakar. Karena dengan bahan bakar motor diesel yang baik titik nyalanya, maka mesin akan lebih mudah dan jalan mesin akan lebih halus karena diesel knock-nya lebih kecil.

b. Viskositas yang tepat

Viskositas dari bahan bakar motor diesel bukan hanya mempengaruhi kemampuan mesin saja, tetapi juga akan mempengaruhi kerja pompa injeksi. Viskositas bahan bakar terlalu tinggi akan menyebabkan bahan bakar mengalir lebih lambat serta beban pompa injeksi menjadi lebih besar sehingga lebih sukar untuk terbakar. Selanjutnya bila nilai viskositas terlalu rendah, sifat lumas bahan bakar menjadi buruk yang mengakibatkan pelumasan pada pompa injeksi menjadi rendah. Bahan bakar dengan viskositas yang terlalu rendah apabila disemprotkan ke dalam silinder, butiran uapnya akan menjadi terlalu kecil sehingga jarak terbang udara yang ditekan menjadi lebih pendek, jadi tenaga tekannya menjadi lebih kecil

sehingga campuran dengan udara menjadi jelek yang selanjutnya menyebabkan pembakaran tidak sempurna.

c. Penguapan

Titik penguapan yang tinggi dengan sisa karbon yang sekecil mungkin. Bila bagian yang menguap sedikit, meskipun tidak berpengaruh terhadap mesin akan menyebabkan gas buang menjadi bau dan hitam. Dan apabila sisa karbon sesudah pembakaran terlalu banyak di ruang bakar di sekeliling lubang nosel injeksi dapat menyebabkan rusak atau tersumbatnya nosel.

d. Kandungan sulfur rendah

Sulfur pada bahan bakar akan menambah deposit pada silinder dan torak yang mempercepat rusaknya silinder dan torak. Persentase sulfur sebesar 1 % pada prakteknya tidak menyebabkan kerusakan pada mesin, biasanya solar yang dijual di pasaran mengandung 0,8 – 0,9 % sulfur.

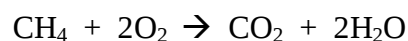
e. Kemampuan Lumas

Bahan bakar motor diesel tidak boleh menyebabkan korosi dan keausan pada komponen-komponen mesin baik sebelum dan sesudah terjadi pembakaran. Sifat ini berkaitan langsung dengan kandungan sulfur, serta abu dan residu dalam bahan bakar.

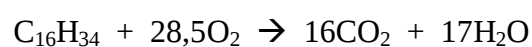
4. Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi kimia yang terjadi selama proses oksidasi dan pelepasan energi dalam jumlah besar (Cengel, 2000 : 734). Proses oksidasi yang terjadi dalam proses pembakaran adalah antara bahan bakar dengan oksidator. Bahan bakar yang digunakan dalam proses pembakaran adalah hidrokarbon. Sedangkan oksidator yang umum digunakan dalam proses pembakaran adalah oksigen. Energi yang dilepaskan dari proses pembakaran biasanya berupa cahaya dan panas.

Jumlah energi yang dilepaskan dalam pembakaran akan maksimal apabila bahan bakar bereaksi dengan oksigen dalam jumlah stokiometri. Oksigen stokiometri hanya cukup untuk mengubah seluruh karbon dalam bahan bakar menjadi karbondioksida dan seluruh hydrogen menjadi H₂O, tanpa sisa oksigen. Sehingga persamaan reaksi untuk bentuk hidrokarbon paling sederhana, metana CH₄, yang dibakar dengan oksigen yang stokiometri adalah:

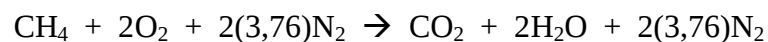


Persamaan reaksi tersebut membutuhkan 2 mol oksigen untuk bereaksi dengan 1 mol bahan bakar, dengan menghasilkan 1 mol karbondioksida dan 2 mol uap air. Jika bahan bakar yang digunakan dalam proses pembakaran adalah solar (C₁₆H₃₄), reaksi stokiometri pembakarannya menjadi:

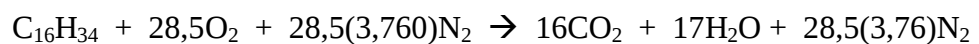


Dalam persamaan reaksi molekul bereaksi dengan molekul, sehingga dalam menyetarakan suatu persamaan reaksi, yang digunakan adalah kuantitas molar bukan kuantitas massa. Dalam proses pembakaran zat yang ada sebelum terjadi reaksi kimia disebut reaktan, dan zat yang ada sesudah terjadinya reaksi kimia disebut produk.

Selain oksigen yang dibutuhkan dalam proses pembakaran pada atmosfer juga terkandung nitrogen, argon dan CO₂, Ne, CH₄, He, H₂O dan lain-lain. Dengan komposisi nitrogen 78%, oksigen 21%, argon 1% dan sisanya CO₂, Ne, CH₄, He, H₂O dan lain-lain. Karena hal tersebut untuk setiap oksigen yang masuk kedalam silinder selalu terdapat nitrogen sebesar 3,76 bagian yang ikut terbawa masuk, serta zat-zat lain sesuai perbandingan komposisinya di atmosfer. Oleh karena itu persamaan reaksi pembakaran stokiometri menjadi:



Untuk bahan bakar metana, sedangkan untuk bahan bakar solar menjadi:



Nitrogen yang terkandung di dalam udara atmosfer tidak bereaksi dengan bahan bakar maupun dengan oksigen, karena nitrogen bersifat netral. Akan tetapi pada temperatur yang lebih tinggi nitrogen akan mengikat oksigen untuk membentuk NO_x.

Jumlah oksigen yang bereaksi dengan bahan bakar tidak selalu stokiometri, oksigen yang bereaksi dapat berjumlah lebih banyak atau lebih sedikit dari jumlah oksigen pada reaksi stokiometri. Reaksi kimia

yang mengandung oksigen lebih banyak dari jumlah oksigen stokiometri disebut campuran kurus (*lean mixture*), sedangkan reaksi kimia dengan jumlah oksigen lebih sedikit dari jumlah oksigen stokiometri disebut reaksi kaya. Pada reaksi kimia dengan jumlah oksigen lebih banyak akan menghasilkan sisa oksigen pada sisi produk reaksi, sedangkan pada reaksi dengan jumlah oksigen yang lebih sedikit akan menghasilkan gas karbonmonoksida, yang merupakan gas beracun yang tidak berwarna dan tidak berbau

Panas yang dibebaskan dari reaksi dalam pembakaran bahan bakar hidrokarbon berbeda antara entalpi total produk dengan entalpi total reaktan. Hal ini disebut panas reaksi (*heat of reaction*), panas pembakaran (*heat of combustion*), atau entalpi reaksi (*enthalpy of reaction*) dan dinyatakan dengan

$$Q = \sum_{PROD} N_i h_i - \sum_{REACT} N_i h_i \quad \dots\dots (\text{Pulkrabek, 2004:147})$$

Dimana:

N_i = jumlah mol komponen i

$$h_i = (h_f^o)_i + \Delta h_i$$

h_f^o = entalpi pembentukan, entalpi yang dibutuhkan untuk membentuk suatu komponen pada kondisi standar 25°C dan 1 atm

Δh_i = perubahan entalpi pada temperatur standar untuk komponen i

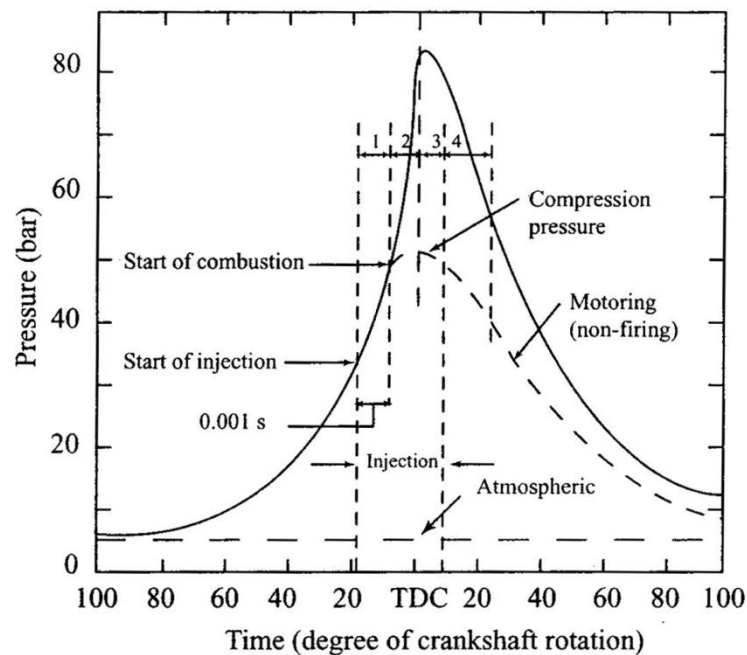
Q bernilai negatif, yang berarti panas dilepaskan oleh gas-gas yang bereaksi. Nilai h_f^o dan Δh merupakan molar spesifik dan dapat dilihat pada buku-buku teks termodinamika.

5. Pembakaran Motor Diesel

Pembakaran pada motor diesel merupakan suatu proses tak-tunak (*unsteady-process*) yang terjadi secara bersamaan (*simultaneously*) pada banyak titik (*spots*) dalam campuran yang sangat tidak seragam (*nonhomogenous mixture*). Pada motor diesel jumlah udara yang masuk tidak diatur menggunakan *throttle*, untuk mengatur torsi dan tenaga yang dihasilkan mesin jumlah bahan bakar yang diinjeksikan diatur dalam setiap siklusnya. Karena jumlah udara yang masuk ke mesin tidak dikontrol oleh *throttle* maka tekanan pada saluran masuk (*intake manifold*) selalu mendekati satu atmosfer. Hal ini membuat kurva kerja pompa (*pump work loop*) menjadi sangat kecil (Pulkrabek, 2004 : 297).

Karena hanya udara yang ada dalam silinder mesin selama langkah kompresi, memungkinkan motor diesel didesain dengan perbandingan kompresi yang lebih tinggi, berkisar 12 – 24 (Pulkrabek, 2004: 297). Karena perbandingan campuran udara dan bahan bakar pada motor diesel lebih kurus (*lean*), menyebabkan motor diesel menghasilkan daya yang lebih rendah untuk mesin dengan panjang langkah yang sama.

Pembakaran pada motor diesel terbagi menjadi empat tahap, yaitu:



Gambar 4. Proses Pembakaran Motor Diesel
(Sumber: Ganesan, 2003 : 413)

a. Pembakaran tertunda (1)

Tahap ini merupakan persiapan pembakaran. Bahan bakar yang disemprotkan oleh injektor berupa kabut ke udara panas dalam ruang bakar bercampur sehingga menjadi campuran yang mudah terbakar. Pada tahap ini bahan bakar belum terbakar atau dengan kata lain pembakaran belum dimulai. Pembakaran akan mulai terjadi pada titik B. Peningkatan tekanan terjadi secara konstan karena piston terus bergerak ke TMA.

b. Rambatan Api (2)

Campuran yang mudah terbakar telah terbentuk dan merata di seluruh bagian dalam silinder. Awal pembakaran mulai terjadi di beberapa bagian dalam silinder

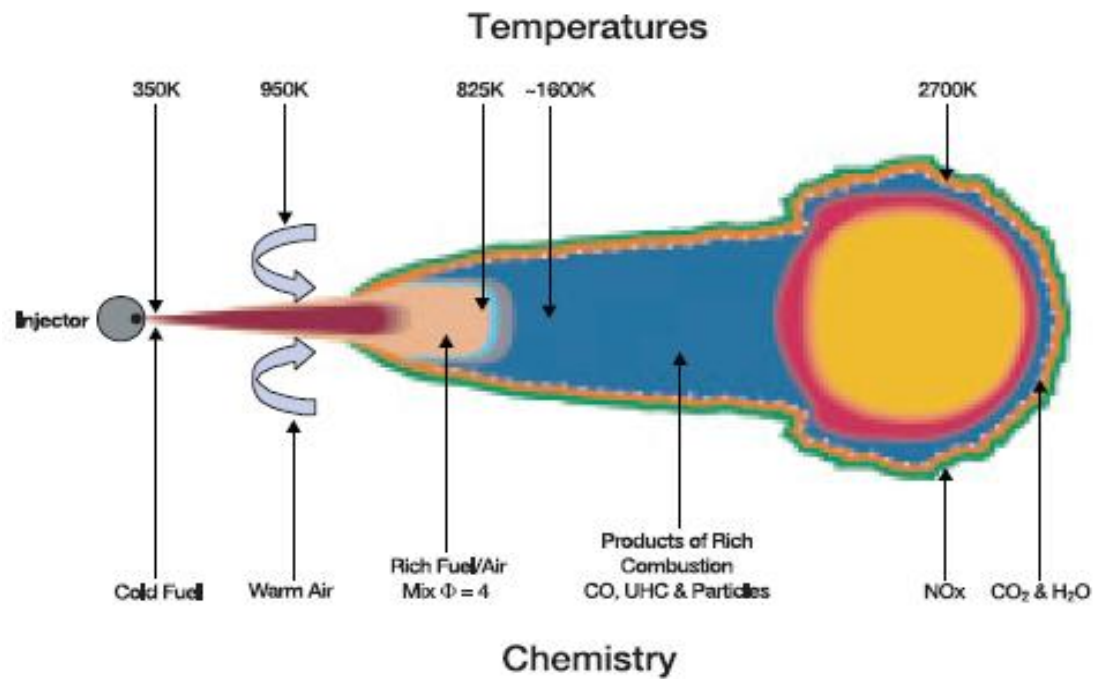
Pembakaran ini berlangsung sangat cepat sehingga terjadilah letupan (*explosive*). Letupan ini berakibat tekanan dalam silinder meningkat dengan cepat pula. Akhir tahap ini disebut tahap pembakaran letupan.

c. Pembakaran Langsung (3)

Injektor terus menyemprotkan bahan bakar dan berakhir pada titik D. Karena injeksi bahan bakar terus berlangsung maka tekanan dan suhu tinggi terus berlanjut di dalam silinder. Akibatnya, bahan bakar yang diinjeksi langsung terbakar oleh api. Pembakaran dikontrol oleh jumlah bahan bakar yang diinjeksikan sehingga tahap ini disebut juga tahap pengontrolan pembakaran.

d. Pembakaran Lanjut (4)

Pada titik D, injeksi bahan bakar berhenti, namun bahan bakar masih ada yang belum terbakar. Pada periode ini sisa bahan bakar diharapkan akan terbakar seluruhnya. Apabila tahap ini terlalu panjang akan menyebabkan suhu gas buang meningkat dan efisiensi pembakaran berkurang.



Gambar 5. Karakteristik Pembakaran pada Motor Diesel
(Sumber: Johnson dalam Xinqun, 2010:8)

Setelah tahap injeksi berlangsung bahan bakar perlu melalui urutan kejadian berikut untuk memastikan terjadinya proses pembakaran yang sesuai (Pulkrabek, 2004 : 297 - 299)

- a. *Atomisasi*. Bahan bakar pecah menjadi butiran-butiran yang sangat kecil. Semakin kecil ukuran butiran yang dipancarkan oleh injektor, maka akan semakin cepat dan lebih efisien proses atomisasi.
- b. *Penguapan*. Butiran-butiran cair bahan bakar berubah menjadi uap. Hal ini terjadi sangat cepat karena temperatur udara yang sangat tinggi yang dihasilkan oleh perbandingan kompresi motor diesel. Sekitar 90 % dari bahan bakar yang diinjeksikan ke dalam silinder telah berubah menjadi uap dalam waktu 0,001 detik setelah diinjeksikan. Dengan menguapnya bahan bakar, udara dalam ruang bakar menjadi lebih dingin karena pendinginan evaporasi.

- c. *Pencampuran*. Setelah proses penguapan, uap bahan bakar bercampur dengan udara membentuk campuran dengan perbandingan udara-bahan bakar dalam kisaran mampu-bakar (*combustible range*). Pencampuran ini terjadi karena bahan bakar yang diinjeksikan dengan kecepatan tinggi disemprotkan ke udara silinder yang turbulen dan berpusar.
- d. *Penyalaan Sendiri*. Sekitar 8° sebelum titik mati atas, $6 - 8^{\circ}$ setelah awal tahap injeksi, campuran udara-bahan bakar mulai menyala sendiri. Pembakaran sesungguhnya didahului oleh reaksi sekunder, yaitu pemecahan molekul-molekul hidrokarbon menjadi ukuran yang lebih kecil dan proses oksidasi.
- e. *Pembakaran*. Pembakaran dimulai dari saat penyalaan sendiri yang terjadi secara simultan pada berbagai lokasi pada sedikit bagian pada zona campuran kaya (*rich zone*) dari jet bahan bakar (*fuel jet*). Pada tahap ini antara 70 % - 90 % bahan bakar yang ada di dalam ruang bakar dalam bentuk uap. Saat proses pembakaran dimulai beberapa *flame front* menyebar dari berbagai tempat terjadinya penyalaan sendiri secara cepat membakar semua campuran gas dengan perbandingan udara-bahan bakar yang tepat, bahkan pada tempat-tempat yang penyalaan sendiri tidak terjadi. Hal ini menyebabkan meningkatnya temperatur dan tekanan di dalam silinder. Tingginya temperatur dan tekanan mengurangi waktu penguapan dan waktu pembakaran tertunda untuk setiap bahan bakar yang ditambahkan dan menyebabkan terjadinya lebih banyak titik-titik penyalaan sendiri untuk peningkatan

lebih lanjut dari proses pembakaran. Bahan bakar cair terus diinjeksikan ke dalam silinder setelah bahan bakar pertama sudah terbakar.

6. Efek Pemanasan Bahan Bakar dan *Water Injection* pada Pembakaran Motor Diesel

Perlakuan pada proses pembakaran mempengaruhi keseluruhan proses pembakaran maupun sebagian dari periode dalam proses pembakaran, salah satunya pada periode pembakaran tunda. Berikut pengaruh beberapa variable terhadap periode pembakaran tunda pada motor diesel:

Tabel 1. Pengaruh beberapa variabel terhadap periode pembakaran tunda

Peningkatan Nilai Variabel	Pengaruh Terhadap Periode Pembakaran Tunda	Alasan
Angka Setana Bahan Bakar	Berkurang	Mengurangi Temperatur Nyala Sendiri (<i>Self Ignition Temperature</i>)
Tekanan Injeksi	Berkurang	Mengurangi penundaan fisis (<i>physical delay</i>) karena lebih besarnya perbandingan permukaan volume
Pemajuan Saat Penginjeksian	Berkurang	Mengurangi tekanan dan temperatur ketika injeksi dimulai
Perbandingan Kompresi	Berkurang	Meningkatkan temperatur udara dan tekanan serta temperatur nyala sendiri (<i>autoignition temperature</i>)
Temperatur Pemasukan	Berkurang	Meningkatkan temperatur udara masuk
Temperatur <i>Water Jacket</i>	Berkurang	Meningkatkan temperatur dinding silinder menyebabkan temperatur udara
Temperatur Bahan Bakar	Berkurang	Meningkatkan reaksi kimia karena baiknya penguapan
Tekanan Pemasukan (<i>supercharge</i>)	Berkurang	Meningkatkan kerapatan udara dan juga menurunkan temperatur nyala sendiri (<i>autoignition temperature</i>)
Kecepatan Mesin	Mempercepat sudut engkol, mempercepat waktu	Menurunkan kehilangan panas
Beban (perbandingan udara-bahan bakar)	Berkurang	Meningkatkan temperatur operasi mesin
Ukuran Mesin	Memperlambat sudut engkol, sehingga memperpanjang waktu	Mesin ukuran besar umumnya beroperasi pada putaran rendah
Jenis Ruang Bakar	Lebih rendah untuk mesin dengan <i>precombustion chamber</i>	Karena kompaknya ruang bakar

(Sumber: Ganesan, 2003: 421)

Efek pemanasan bahan bakar dan *water injection* pada pembakaran motor diesel akan dibahas terutama pada fase pembakaran tertunda. Dengan meningkatnya temperatur bahan bakar akan meningkatkan reaksi kimia yang terjadi antara bahan bakar dengan udara yang disebabkan oleh kemampuan penguapan bahan bakar yang lebih baik, sehingga akan mengurangi periode pembakaran tertunda (Ganesan, 2003 : 421). Awal dari proses pembakaran akan terjadi lebih dini, karena SIT campuran dapat tercapai dengan lebih cepat.

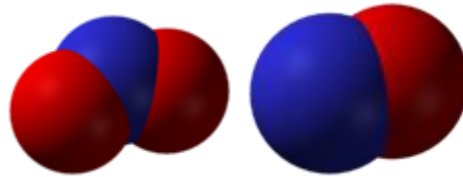
Air yang ikut masuk bersama udara kedalam silinder mesin akan menurunkan temperatur masuk (intake temperature) mesin. Dengan temperatur udara masuk yang lebih rendah, maka akan menghasilkan temperature udara kompresi yang lebih rendah. Turunnya temperature udara kompresi akan menyebabkan meningkatnya periode pembakaran tertunda pada motor diesel.

Pemanasan bahan bakar menyebabkan periode pembakaran tertunda menjadi lebih singkat sedangkan *water injection* memperpanjang periode pembakaran tertunda pada motor diesel. Oleh karena itu dengan adanya kedua perlakuan ini periode pembakaran tertunda secara umum akan tetap stabil.

7. Nitrogen Oksida (NO_x)

Nitrogen oksida (NO_x) merujuk pada kelompok gas nitrogen yang terdapat di atmosfer yang terdiri dari nitrogen monoksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO₂). Gas NO tidak berwarna dan tidak berbau,

sedangkan gas NO_2 berwarna coklat kemerahan dan berbau tajam (Wisnu, 2004 : 43). Gas NO_2 memiliki sifat toksik 4x lebih kuat dari gas NO . Jumlah gas NO diudara lebih banyak daripada gas NO_2 . Gas NO_x merupakan hasil samping dari reaksi kimia proses pembakaran.



Gambar 6. Molekul NO_2 (kanan) dan NO (kiri)
(Sumber: <http://www.en.wikipedia.org>)

Emisi gas buang motor bakar mengandung lebih dari 2000 ppm NO_x , sebagian besar berupa NO dan sebagian kecil berupa NO_2 . NO_x yang dihasilkan mesin umumnya berasal dari nitrogen yang ada di udara atmosfer, selain dari udara atmosfer nitrogen yang masuk ke mesin juga bisa berasal dari campuran-campuran bahan bakar (*fuel blends*), seperti NH_3 , NC dan HCN (Pulkrabek, 2004 : 339)

NO_x memiliki efek negatif terhadap kesehatan manusia. Gas NO dalam konsentrasi tinggi dapat menyebabkan terjadinya sesak nafas, gangguan syaraf dan kejang-kejang. Berdasarkan penelitian yang dilakukan pada tikus percobaan kadar NO_x sebesar 2500 ppm yang dipajankan selama 12 menit dapat menyebabkan hilang kesadaran dan kematian (www.jurnalingkungan.wordpress.com). Selain berdampak langsung bagi kesehatan manusia NO_x juga memiliki dampak negatif terhadap lingkungan, emisi NO_x dapat menyebabkan *Peroxy Acetil Nitrate* (PAN), kabut fotokimia dan pembentukan ozon (O_3) (Wisnu, 2004 : 45).

NO_x pada motor bakar terbentuk karena terjadinya pemecahan molekul nitrogen diatomik (N₂) yang terkandung pada udara yang dihisap mesin menjadi molekul nitrogen monoatomik (2N). Peristiwa tersebut terjadi pada temperatur 2500 – 3000 K (Pulkrabek, 2004 : 340). Selanjutnya molekul nitrogen monoatomik tersebut bereaksi dengan atom oksigen yang terkandung dalam udara yang dihisap mesin membentuk NO dan NO₂.

8. Pemanasan Bahan Bakar

Pemanasan bahan bakar merupakan salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan sifat-sifat fisik bahan bakar. Dengan naiknya temperatur bahan bakar menyebabkan cairan bahan bakar berubah menjadi uap. Cairan bahan bakar yang mudah menguap memperhalus butiran bahan bakar dan memudahkan proses pembakaran sehingga bahan bakar terbakar seluruhnya (www.energilipi.go.id). Bahan bakar yang dipanaskan akan diurai molekulnya agar mudah mengikat oksigen dan bahan bakar menjadi semi gas sehingga menghasilkan daya ledak yang baik saat pembakaran. Pemanasan bahan bakar menurunkan kekentalan agar lancar saat dipompa dengan injektor.

Pemanasan bahan bakar solar berarti proses untuk meningkatkan suhu yang menyebabkan turunnya viskositas dan naiknya volume bahan bakar yang menyebabkan bertambahnya energi. Energi diserap oleh molekul-molekul dan menyebabkan reaksi jarak antar molekul-molekul tersebut menjadi lebih renggang sehingga lebih mudah mengikat oksigen.

Turunnya viskositas dan terjadinya pemuaian volume menyebabkan butir-butir bahan bakar akan lebih mudah menguap yang dapat mempengaruhi proses pengkabutan saat penyemprotan sehingga mempercepat dan memperbaiki proses pencampuran bahan bakar dengan udara. Viskositas yang terlalu tinggi menyebabkan solar mengalir terlalu lambat dan beban dari pompa injeksi menjadi lebih berat yang dapat mengakibatkan butir-butir bahan bakar yang terjadi saat penyemprotan terlalu besar atau beberapa butir terkumpul menjadi satu (dekomposisi) sehingga bahan bakar lebih sukar terbakar (Wiranto Arismunandar, 2002 : 12)

Aliran bahan bakar yang rendah karena viscositas tinggi menyebabkan sulit terjadinya atomisasi bahan bakar yang baik. Buruknya proses atomisasi berkorelasi langsung dengan kualitas pembakaran, daya mesin, dan emisi gas buang (www.beritaiptek.com). Akibatnya dengan viscositas yang terlalu tinggi menyebabkan bahan bakar tidak terbakar seluruhnya dan proses pembakaran tidak terjadi dengan sempurna sehingga mempengaruhi besar konsumsi bahan bakar. Selain itu banyaknya bahan bakar yang disemprotkan tidak terbakar karena terjadinya dekomposisi menyebabkan terbentuknya karbon-karbon padat (hangus) yang menyebabkan gas buang yang keluar dari mesin berwarna hitam.

Pemanasan dengan temperatur yang terlalu tinggi yaitu melebihi batas temperatur titik didih menyebabkan bahan bakar akan menjadi campuran uap dari cairan sebelum bercampur dengan udara. Di samping itu

viskositas bahan bakar menjadi terlalu rendah yang menyebabkan sifat lumpasnya semakin buruk dan bila disemprotkan ke dalam silinder butiran uapnya akan menjadi terlalu kecil sehingga jarak terbang udara yang ditekan menjadi lebih pendek dan pencampuran dengan udara di dalam silinder tidak berlangsung sempurna.

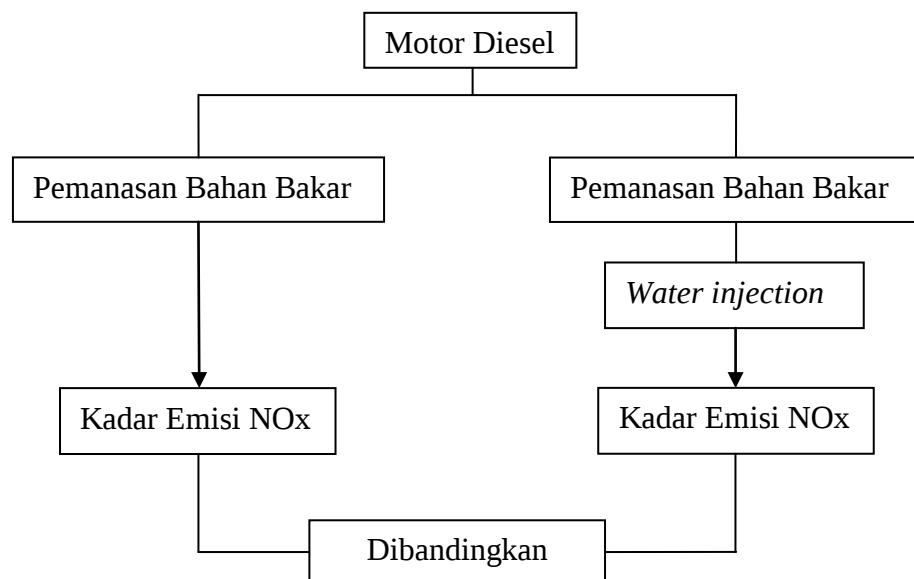
B. Penelitian Yang Relevan

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang berkenaan dengan penelitian ini diantaranya:

1. Gusnaedi Rachmanas dari Jurusan Teknik Otomotif Universitas Negeri Padang dengan judul *Pengaruh Penggunaan Water injection Terhadap Kadar Emisi Karbonmonoksida (CO) dan Konsumsi Bahan Bakar Pada Sepeda Motor Suzuki Satria F-150*. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan *water injection* pada sepeda motor Satria F-150 dapat mengurangi kadar emisi karbonmonoksida (CO) sampai 81,81 %.
2. Bedford et al. dari Universitas Wisconsin dan DaimlerChrysler Research dengan judul *Effect of Direct Water injection (DWI) on DI Diesel Engine Combustion*. Hasilnya dengan kadar air sebanyak 45 % yang diinjeksikan langsung kedalam ruang bakar mesin dapat menurunkan kadar emisi NOx sebesar 60%.

C. Kerangka Pikir

Dari deskripsi diatas terlihat bahwa pemanasan bahan bakar selain dapat meningkatkan unjuk kerja mesin juga meningkatkan kadar emisi NOx. *Water injection* dapat menurunkan temperatur pembakaran sehingga dapat mengurangi terjadinya pembentukan NOx. Sehingga dapat disusun suatu kerangka berpikir sebagai berikut:



Gambar 7. Kerangka Berpikir

D. Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kajian teori dan beberapa penelitian yang relevan maka disusun hipotesis dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

H_0 : “Tidak terdapat perbedaan kadar emisi Nitrogen Oksida (NOx) yang signifikan pada motor diesel yang bahan bakarnya dipanaskan dan dipasang *water injection* dengan yang tidak dipasang *water injection*”.

H_A : “Terdapat perbedaan kadar emisi Nitrogen Oksida (NOx) yang signifikan pada motor diesel yang bahan bakarnya dipanaskan dan dipasang *water injection* dengan yang tidak dipasang *water injection*”.

BAB V

PENUTUP

A. Simpulan

Setelah dilaksanakannya penelitian dan berdasarkan pembahasan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan pemasangan sistem *water injection* terjadi penurunan kadar emisi nitrogen oksida (NO_x), yaitu sebesar 21,19 % pada 700 rpm, 8,8 % pada 1200 rpm, 4,3 % pada 1700 rpm dan 1,7 % pada 2200 rpm.
2. Terdapat perbedaan yang signifikan kadar emisi nitrogen oksida (NO_x) antara motor diesel yang bahan bakarnya dipanaskan dan dengan *water injection* dengan tanpa *water injection*, yaitu sebesar 34,33 ppm pada 700 rpm, 9,33 ppm pada 1200 rpm, 4 ppm pada 1700 rpm dan 1,66 ppm pada 2200 rpm.

B. Saran

Sehubungan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan terdapat beberapa saran, yaitu:

1. Sistem *water injection* mengalami penurunan unjuk kerja pada putaran tinggi disebabkan kevakuman langkah hisap terjadi lebih singkat. Oleh karena itu pada penelitian selanjutnya diperlukan sistem *water injection* yang pengoperasiannya tidak tergantung pada kevakuman mesin, yaitu dengan menggunakan tekanan pompa.

2. Unjuk kerja merupakan parameter utama suatu mesin. Pada penelitian selanjutnya diharapkan dilakukan pengukuran terhadap *Specific Fuel Consumption* dan Efisiensi Termal Mesin.
3. Terdapat berbagai metode uji emisi untuk kendaraan dengan penggerak motor diesel. Pada penelitian selanjutnya diharapkan menggunakan metode uji emisi standar seperti ECE R49, yaitu regulasi nomor 49 yang dikeluarkan oleh *Europe Commission for Economic*, yang mana pada pengujian ini massa NO_x yang dihasilkan mesin akan dibandingkan dengan daya yang dihasilkan oleh mesin.

DAFTAR PUSTAKA

- Bedford, F. et al. (2000). "Effects of Direct Water Injection on DI Diesel Engine". *Society of Automotive Engineers Journal* (Vol. 1 Tahun 2000). Hlm. 1 – 10
- Budi Hariadi. (2002). "Pengaruh Suhu Bahan Bakar Terhadap Unjuk Kerja dan Emisi NO_x Gas Buang Motor Diesel". *Skripsi tidak diterbitkan*. Jurusan Teknik Otomotif – Universitas Negeri Padang
- Cengel, Yunus A., & Boles, Michael A. (2005). *Thermodynamic: An Engineering Approach*. New York: McGraw Hill
- Ganesan, V. (2003). *Internal Combustion Engine*. Tata: McGraw Hill
- Gupta, Harsh, & Roy, Sukanta. (2007). *Geothermal Energy: An Alternative Resouce for 21st Century*. Amsterdam: Elsevier
- Pulkrabek, Willard W. (2004). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. New Jersey: Prentice Hall
- Suharsimi Arikunto. (2009). *Manajemen Penelitian*. Jakarta: Rineka Cipta
- Swiss Contact. (2003). *Handout Diesel SC*. Jakarta: Swiss Contact
- Tedjo N. Reksoatmodjo. (2009). *Statistika Eksperimen Rekayasa*. Bandung: PT. Refika Aditama
- Wartsila NSD Corporation. (2000). "Direct Water Injection to be Installed on Ro-ro Vessels". *Millieu Press Release Wartsila*. Hlm. 40 – 42
- Wiranto Arismunandar. 1988. *Penggerak Mula Motor Bakar Torak*. Bandung: Penerbit ITB
- Wiranto Arismunandar & Koichi Tsuda. (2002). *Motor Diesel Putaran Tinggi*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita
- Wisnu Arya Wardhana. 2004. *Dampak Pencemaran Lingkungan*. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Xinqun, Gui, Dou, Danan & Winsor, Richard. (2010). "Non-Road Diesel Engine Emissions and Technology Option for Meeting Them". *Tractor Design* No. 34