

TESIS
Efek Penambahan Plasma-Ozon Terhadap Kinerja dan Emisi
Gas Buang Mesin Diesel



MELATI NURUL INSANI

D022 19 2009

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2021

TESIS

**Efek Penambahan Plasma-Ozon Terhadap Kinerja dan Emisi Gas Buang
Mesin Diesel**

Disusun dan diajukan oleh:

Melati Nurul Insani
D022 19 2009

**Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2021

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

**Efek Penambahan Plasma-Ozon Terhadap Kinerja dan Emisi Gas Buang
Mesin Diesel**

Disusun dan diajukan oleh

Melati Nurul Insani
D022 19 2009

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin pada tanggal 16 Juli 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping


Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT.

Nip. 197112211998021001


Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT.

Nip. 197911122008122002

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin,

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin


Dr. Hamul Arsyad, ST., MT

Nip. 19750322 200212 1 001


Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT

Nip. 19601231 1986091 001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Melati Nurul Insani
Nomor mahasiswa : D022192009
Program studi : Teknik Mesin / Konversi Energi
Jenjang : Program Magister (S2)

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa karya tulisan saya yang berjudul :

EFEK PENAMBAHAN PLASMA-OZON TERHADAP KINERJA DAN EMISI GAS BUANG MESIN DIESEL

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan pengambilan alihan tulisan orang lain, tesis yang saya tulis benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri. Apabila dikemudian hari dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 16 Juli 2021

Yang menyatakan



Melati Nurul Insani
Nim . D022192009

ABSTRAK

Dalam meningkatkan kinerja dan mengurangi emisi gas buang pada mesin pembakaran, penambahan ozon ke udara yang dipasok di ruang pembakaran dipelajari. Dalam penelitian ini, ozon dapat diproduksi menggunakan teknologi plasma (plasma-ozon) yang merupakan teknologi sederhana dan ramah lingkungan. Plasma-ozon dihasilkan menggunakan metode *Dielectric Barrier Discharge* (DBD). Udara dilewatkan dalam reaktor plasma-ozon pada tegangan yang berbeda dengan variasi ozon 0 mg, 3 mg, 12 mg, 15 mg dan 18 mg diperoleh. Konsentrasi ozon terdeteksi menggunakan *Ozone meter O₃ Air Quality Detector* dan OPA-100 digunakan untuk menentukan emisi gas buang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan ozon dapat mengontrol waktu pembakaran, sehingga berpengaruh pada penurunan konsumsi bahan bakar spesifik, peningkatan perbandingan udara dan bahan bakar, peningkatan efisiensi volumetrik, peningkatan tekanan silinder dan penurunan pelepasan panas. Namun, penambahan ozon lebih efektif pada rasio kompresi rendah yaitu rasio kompresi 14. Penambahan ozon juga mengurangi opasitas emisi gas buang pada mesin diesel TV1 menjadi lebih ramah lingkungan.

ABSTRACT

In improving performance and reducing exhaust emissions in combustion engine, the addition of ozone to the air supplied in the combustion chamber was studied. In this research, ozone can be produced using plasma technology (plasma-ozone) which is a simple and eco-friendly technology. Plasma-ozone was generated using the Dielectric Barrier Discharge (DBD) method. Air is passed in plasma-ozone reactors at different voltages with an ozone variation of 0 mg, 3 mg, 12 mg, 15 mg and 18 mg is obtained. Ozone concentration was detected using an Ozone meter O₃ Air Quality Detector and OPA-100 was used to determine exhaust emissions. The result showed that the addition of ozone to the air supply can control the combustion time, thus effect on the decrease in specific fuel consumption, increase air and fuel comparison, increase volumetric efficiency, increase cylinder pressure, and reduce heat release values. However, the addition of ozone is more effective at a low compression ratio of 14. The addition of ozone also decrease the opacity of exhaust emissions in TV1 diesel engine become more eco-friendly.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur senantiasa penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas rahmat dan berkat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis dengan judul *“Efek Penambahan Plasma-Ozon Terhadap Kinerja dan Emisi Gas Buang Mesin Diesel”* yang mana merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Master Teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Selama proses pengerjaan Tesis ini penulis menerima begitu banyak bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua saya, serta saudara (i) dan keluarga besar yang selalu mendoakan, mendampingi dan memberikan dukungan baik secara moril dan materi.
2. Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT. selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Dr. Hairul Arsyad, ST.,MT. selaku Ketua Program Studi S2 Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT, dan Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT, sebagai Dosen Pembimbing I dan Dosen Pembimbing II yang telah memberikan waktu, arahan, dan saran selama proses pengerjaan tesis ini.
5. Prof. Dr-Ing. Ir. Wahyu H. Piarah, MSME, Dr. Ir. Nasruddin Azis, M.Si dan Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT. selaku penguji yang telah memberikan saran-saran selama proses pengerjaan tesis.
6. Bapak/Ibu dosen Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu, nasehat dan pengalaman kepada penulis selama menempuh pendidikan.
7. Seluruh staf Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

8. Seluruh teman – teman mahasiswa di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan Tesis ini masih jauh dari kesempurnaan baik materi maupun cara penulisannya. Namun demikian, penulis telah berupaya dengan segala kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki sehingga dapat menyelesaikan Tesis ini dengan baik dan oleh karenanya, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari pembaca. Semoga Tesis ini dapat bermanfaat untuk pembaca.

Gowa, 10 Juli 2021

Melati Nurul Insani

DAFTAR ISI

SAMPUL

KATA PENGANTAR.....	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	X
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR SIMBOL.....	xiii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT.....	v
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II LANDASAN TEORI	5
2.1 Mesin Diesel.....	5
2.2 Proses Pembakaran Mesin Diesel.....	7
2.4 Bahan Bakar Diesel.....	12
2.5 Emisi Gas Buang.....	16
2.6 Persamaan Termokimia	19
2.7 Analisa Kinerja Mesin Diesel.....	22
2.8 Plasma	26
2.9 Ozon dalam Meningkatkan Pembakaran.....	30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	35
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	35
3.2 Jenis Penelitian.....	35
3.3 Alat dan Bahan.....	35
3.4 Parameter Penting dalam Pengambilan Data	39
3.5 Proses Pengambilan Data Eksperimental.....	39
3.6 Skema Penelitian	42
3.7 Diagram Alur Penelitian	43

BAB IV HASIL PENELITIAN.....	45
4.1 Pengolahan Data Hasil Perhitungan	45
4.2 Kinerja Mesin Diesel TV1	47
4.3 Kinerja Pembakaran Mesin Diesel TV1	51
4.4 Emisi Gas Buang Mesin Diesel TV-1.....	57
BAB V KESIMPULAN	58
5.1 Kesimpulan.....	58
5.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA.....	59
LAMPIRAN.....	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Proses kerja mesin 4 langkah diesel	5
Gambar 2.2	Tekanan pembakaran pada motor diesel.....	7
Gambar 2.3	Tahapan pembakaran pada motor diesel.....	8
Gambar 2.4	Siklus Udara Tekanan Konstan	10
Gambar 2.5	Siklus Aktual Diesel.....	11
Gambar 2.6	Angka cetana fraksi bahan bakar diesel meningkat dengan temperature didih	12
Gambar 2.7	Sifat didih jenis bahan bakar diesel.....	13
Gambar 2.8	Diagram viskositas-suhu bahan bakar diesel	14
Gambar 2.9	Ilustrasi Fase	27
Gambar 2.10	Bentuk konfigurasi elektroda lucutan plasma penghalang dielektrik, (a) Geometri elektroda tampak samping, (b) Geometri elektroda tampak depan.....	28
Gambar 2.11	Geometri dari lucutan plasma penghalang dielektrik sehingga terbentuk lucutan mikro	29
Gambar 2.12	Ilustrasi lucutan plasma penghalang dielektrik.....	30
Gambar 2.13	Rumus kerangka ozon (a) model bola dan (b) model batang dari molekul Ozon.....	30
Gambar 2.14	Peningkatan produksi CH_2O yang diinduksi oleh ozon	31
Gambar 2.15	Korelasi antara ozon dan CN bahan bakar untuk kondisi awal yang berbeda.....	32
Gambar 2.16	Variasi pentahapan nyala api utama yang diinduksi dengan menghidupkan dan mematikan generator ozon. (a) Kasus langsung off-on. (b) Balikkan kasus off - on	33
Gambar 2.17	Representasi skematis dari generator ozon yang bekerja berdasarkan prinsip Dielectric Barrier Discharge(DBD)	33
Gambar 3.1	Mesin Diesel TV1.....	36
Gambar 3.2	Panel Mesin.....	37
Gambar 3.3	Komputer.....	37

Gambar 3.4	Pompa.....	38
Gambar 3.5	Generator Ozon.....	38
Gambar 3.6	Biodiesel (B30).....	38
Gambar 3.7	Skema eksperimental.....	42
Gambar 3.8	Diagram alur penelitian.....	44
Gambar 4.1	Perbandingan daya efektif terhadap beban	47
Gambar 4.2	Perbandingan konsumsi bahan bakar spesifik terhadap beban....	48
Gambar 4.3	Perbandingan udara dan bahan bakar terhadap beban	49
Gambar 4.4	Perbandingan efisiensi volumetrik terhadap beban.....	50
Gambar 4.5	Perbandingan tekanan silinder terhadap sudut engkol pada beban 5 kg rasio kompresi 14.....	51
Gambar 4.6	Perbandingan tekanan silinder terhadap sudut engkol pada beban 5kg rasio kompresi 16	51
Gambar 4.7	Perbandingan tekanan silinder terhadap sudut engkol pada beban 5kg rasio kompresi 18	52
Gambar 4.8	Perbandingan tekanan silinder terhadap volume silinder pada beban 5kg rasio kompresi 14.....	53
Gambar 4.9	Perbandingan tekanan silinder terhadap volume silinder pada beban 5kg rasio kompresi 16	53
Gambar 4.10	Perbandingan tekanan silinder terhadap volume silinder pada beban 5kg rasio kompresi 18.....	54
Gambar 4.11	Perbandingan pelepasan panas (<i>net heat release</i>) terhadap sudut engkol pada beban 5 kg rasio kompresi 14.....	55
Gambar 4.12	Perbandingan pelepasan panas (<i>net heat release</i>) terhadap sudut engkol pada beban 5 kg rasio kompresi 16	55
Gambar 4.13	Perbandingan pelepasan panas (<i>net heat release</i>) terhadap sudut engkol pada beban 5 kg rasio kompresi 18	56
Gambar 4.14	Opasitas emisi gas buang	57

DAFTAR TABEL

Table 2.1	Nilai kalor dan analisis unsur bahan bakar diesel yang tersedia secara komersial	15
Table 2.2	Ambang batas emisi kendaraan bermotor menurut kepmen LH No. 06 tahun 2006.....	17

DAFTAR SIMBOL

IP	Daya indikasi	kW
BP	Daya efektif	kW
η_m	Efisiensi mekanis	%
N	Putaran poros	rpm
n	Jumlah putaran persiklus	-
FC	Konsumsi bahan bakar	kg/h
VGU	Volume gelas ukur	cc
ρ_f	Massa jenis bahan bakar	kg/h
SFC	Konsumsi bahan bakar spesifik	kg/h
Ma	Laju aliran udara aktual	kg/h
K	koefisien	-
C	kecepatan aliran udara	m/s
Do	Diameter orifice	mm
h _o	Beda tekanan pada manometer	mmH ₂ O
ρ_a	Massa jenis udara pada kondisi masuk	kg/m ³
M _{th}	Laju udara secara teoritis	kg/h
V _s	Volume silinder	-
ρ_{ud}	Massa jenis udara	kg/m ³
Ka	konstanta untuk motor 4 langkah	-
d	Diameter selinder	mm

s	Panjang langkah selinder	mm
z	Jumlah selinder	-
AFR	Rasio udara-bahan bakar	-
η_{vo}	Efisiensi volumetris	%
η_{th}	Efisiensi thermis	%
Q_{tot}	Kalor total	kW
LHV_{bb}	Nilai kalor bahan bakar	kJ/kg

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mesin diesel adalah sumber tenaga transportasi komersial, yang digunakan di truk, bus, kereta api, dan kapal serta kendaraan industri *off-road* seperti mesin penggalian dan peralatan pertambangan. Mesin ini memiliki efisiensi tinggi, daya tahan, dan biaya pengoperasian yang rendah[1]. Namun, kendaraan berbahan bakar diesel global memberikan dampak besar pada kualitas udara, kesehatan manusia, dan perubahan iklim[2][3]. Khususnya, gas buang diesel mengandung lebih banyak karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), hidrokarbon (HC), sulfur oksida (SO_x), partikulat (PM), dan emisi NO_x yang berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan[4][5]. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa emisi sektor transportasi di jalan merupakan kontributor utama peningkatan konsentrasi PM_{2.5} dan O₃ permukaan, yang terkait dengan sekitar 165.000–385.000 kematian dini manusia per tahun[6]. Karena kelebihan NO_x, solar biasanya mendapat perhatian lebih dari bensin. Pengurangan emisi transportasi memainkan peran penting dalam mencapainya. Oleh karena itu, potensi ruang lingkup mitigasi di sektor ini perlu dikaji.

Penelitian sebelumnya telah mempelajari tentang modifikasi bahan bakar untuk mengetahui pengaruh performa dan pengurangan emisi pada mesin diesel[7][8][9]. Secara umum penggunaan BBM saat ini telah mencapai pemanfaatan energi alternatif yang maksimal (100% biodiesel), sehingga perlu pengembangan dalam inovasi. Penambahan hidrogen mampu mengurangi konsumsi bahan bakar spesifik, dan konsumsi energi juga meningkat sekitar 20%[10]. Penambahan hidrogen saat dicampur dengan udara juga mampu mengurangi emisi[11]. Namun, penyimpanan dan penanganan cairan hidrogen juga sangat sulit. Methoxyethyl acetate (MEA) juga mampu digunakan untuk mengurangi emisi diesel. Hasil penelitian menunjukkan penurunan opasitas sekitar 50% dan efisiensi termal mesin meningkat sekitar 2%[12].

Zat aditif yang ditambahkan ke gas alam dulunya adalah nitrat, peroksida, dan banyak partikel reaktif lainnya[13]. Ozon menarik sebagai akselerator, terutama karena sifat pengoksidasinya. Saat ini, proses pembakaran juga dapat melibatkan ozon sebagai oksidator. Efek ozon dalam pembakaran telah dipelajari selama reaksi kimia[14][15]. Penambahan ozon juga dapat mengurangi emisi pada mesin diesel[16]. Mesin pengapian terkompresi (CI) di ruang bakar mengkonsumsi udara dengan ozon, menawarkan potensi emisi rendah dengan peningkatan kinerja. Gas ozon, yang merupakan spesies dengan tingkat reaktivitas kimia yang sangat tinggi, dapat dimanfaatkan untuk mengontrol dan meningkatkan proses pembakaran[17][18]. Peningkatan ozon unggulan menambah energi dan efisiensi exergi[19]. Hasil percobaan yang dilakukan selama ini menunjukkan manfaat yang dihasilkan dari penambahan ozon dalam hal konsumsi bahan bakar dan pengurangan toksisitas gas buang[20]. Yamada dkk[21] melakukan penelitian eksperimental dalam mesin HCCI dan membuktikan ozon sebagai salah satu promotor pembakaran yang paling menjanjikan yang menghasilkan pengurangan waktu pengapian dan mempertahankan pembakaran di bawah rasio ekivalensi yang rendah. Liang dkk telah mempelajari pembakaran ozon pada pengapian yang dicampur dengan H₂/CO/N₂/udara. Ditemukan bahwa peningkatan pembakaran maksimum sebesar 18,74% pada rasio $\Phi = 0,7$ [22]. Halter et al menyatakan bahwa penambahan ozon menghasilkan peningkatan 3-8% selama 0,8-1,3 cm/s pada kecepatan pembakaran metana[23]. Selain itu, Yagyuu dkk[24] menunjukkan adanya perubahan komposisi senyawa hidrokarbon dengan penambahan ozon pada mesin pembakaran dalam yang dianalisis menggunakan FTIR. Namun, konsentrasi O₃ yang dihasilkan oleh produk sampingan sangat rendah, 0,62 g/m³ dalam pengujian, meskipun ketika O₃ yang disuntikkan melebihi sekitar 2 g/m³, O₃ dipancarkan sebagai tambahan. Studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa O₃ dapat mempercepat pengapian[25], menurunkan emisi bahan bakar[26], dan karakteristik reaksi[27]. Dengan demikian, peningkatan efisiensi konversi energi mesin pembakaran dalam dapat dilakukan dengan penambahan ozon.

Dalam penelitian ini, ozon diproduksi dengan memanfaatkan teknologi plasma. Pembakaran dengan bantuan plasma telah menunjukkan potensi untuk meningkatkan dan mengontrol proses pembakaran[28][29]. Prinsip dasar pembakaran dengan bantuan plasma adalah bahwa zat aktif yang dihasilkan oleh plasma, seperti atom oksigen, O_2 tereksitasi, dan ozon (O_3), dapat meningkatkan proses pembakaran. Ozon yang dihasilkan dari plasma disebut plasma-ozon. Plasma-ozon menggunakan metode *Dielectric Barrier Discharge* (DBD) plasma. Cara ini dapat menghasilkan ratusan kilogram ozon per jam dengan konsumsi daya yang tinggi (Megawatt). Oleh karena itu, penambahan plasma-ozon pada udara sebelum masuk ke ruang bakar yang diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dan mengurangi emisi gas buang dari mesin diesel. Maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan plasma-ozon terhadap kinerja dan emisi gas buang mesin diesel dengan bahan bakar biodiesel 30% (B30).

1.2 Rumusan Masalah

Adapun beberapa rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

- 1.2.1 Bagaimana pengaruh penambahan ozon dengan variasi beban terhadap kinerja mesin diesel?
- 1.2.2 Bagaimana pengaruh penambahan ozon terhadap emisi gas buang pada mesin diesel?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini proses pengujian ozon sebagai bahan tambah di dalam proses pembakaran mesin akan dibatasi sebagai berikut:

- 1.3.1 Bahan bakar yang digunakan adalah biodiesel B30.
- 1.3.2 Menggunakan mesin diesel tipe TV1.
- 1.3.3 Beban yang di gunakan 1 kg, 3 kg, 5 kg, 7 kg, dan 9 kg.
- 1.3.4 Emisi gas buang yang di hasikan mesin diesel TV1 berupa opasitas.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini sebagai berikut:

- 1.4.1 Menganalisis pengaruh penambahan ozon dengan variasi beban terhadap kinerja mesin diesel.
- 1.4.2 Menganalisis pengaruh penambahan ozon terhadap emisi gas buang pada mesin diesel.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa:

- 1.5.1 Memperoleh pembakaran bahan bakar dan udara yang sempurna pada ruang bakar.
- 1.5.2 Mengurangi kadar emisi gas buang pembakaran yang dapat membahayakan lingkungan.
- 1.5.3 Memberikan solusi alternatif untuk mengatasi pencemaran polutan seperti CO.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Mesin Diesel

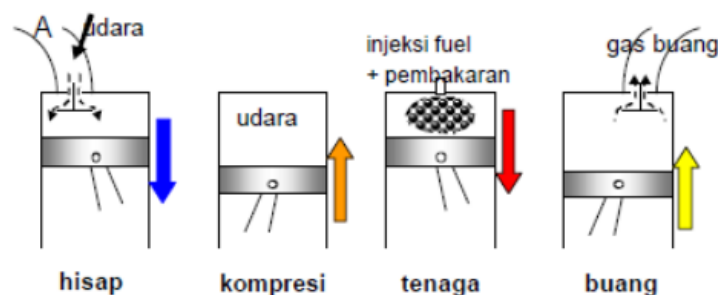
2.1.1 Pengertian Mesin Diesel

Mesin diesel adalah mesin yang sistem pembakarannya di dalam (*internal combustion engine*) dan pembakaran terjadi karena udara murni dimampatkan (dikompresi) dalam suatu ruang bakar (silinder) sehingga diperoleh udara bertekanan tinggi serta panas yang tinggi, bersamaan dengan itu disemprotkan/dikabutkan bahan bakar sehingga terjadilah pembakaran.

Pembakaran yang berupa ledakan akan menghasilkan panas mendadak naik dan tekanan menjadi tinggi didalam ruang bakar . Tekanan ini mendorong piston kebawah yang berlanjut dengan poros engkol berputar. Sesuai dengan gerakan piston untuk mendapatkan satu kali proses tersebut maka mesin diesel tersebut dibagi dalam 2 macam: 1.Mesin diesel 4 langkah (4 tak) dan 2. Mesin diesel 2 langkah (2 tak).

2.1.2 Prinsip Kerja Mesin Diesel 4 Langkah

Mesin diesel empat langkah mempunyai empat prinsip kerja, yaitu langkah hisap, langkah kompresi, langkah usaha dan langkah buang. Keempat langkah mesin diesel ini bekerja secara bersamaan untuk menghasilkan sebuah tenaga yang menggerakkan komponen lainnya.



Gambar 2.1 Proses kerja mesin 4 langkah diesel[30]

Langkah hisap yaitu ketika piston bergerak dari titik mati atas (TMA) ke titik mati bawah (TMB), pada saat ini kondisi katup hisap membuka dan katup buang menutup. Kondisi ini menyebabkan volume ruang bakar dan kevakuman

meningkat sehingga campuran bahan bakar dan udara masuk ke dalam ruang silinder atau pembakaran. Proses pemasukkan udara ke dalam ruang bakar diakibatkan oleh tekanan atmosfer di luar silinder lebih besar dibandingkan di dalam silinder, kemudian bahan bakar masuk dikarenakan kevakuman yang besar di ruang bakar.

Langkah kompresi yaitu piston bergerak dari titik mati bawah (TMB) ke titik mati atas (TMA), katup hisap dan katup buang tertutup. Campuran bahan bakar dan udara yang masuk ke dalam ruang silinder atau ruang bakar dikompresikan atau dimampatkan, proses ini terjadi dikarenakan adanya penyempitan ruangan yang terjadi sehingga tekanan dan suhu di silinder mengalami peningkatan.

Langkah usaha (*Work*) yaitu setelah bunga api membakar campuran bahan bakar dan udara terkompresikan, terjadilah ledakkan yang berakibat tekanan dan suhu meningkat kondisi kedua katup menutup. Tekanan yang besar menggerakkan piston dari titik mati atas (TMA) ke titik mati bawah (TMB). Pada saat ini, gerakan translasi dari piston diubah oleh poros engkol menjadi gerak putar, sehingga kendaraan dapat bergerak maju atau mundur sesuai dengan kecepatan.

Langkah buang yaitu pada akhir langkah usaha, piston bergerak dari titik mati bawah (TMB) ke titik mati atas (TMA), gas sisa hasil pembakaran dibuang menuju katup buang. *Overlapping* terjadi disaat katup buang dan katup hisap terbuka bersama-sama, kondisi ini memiliki tujuan untuk membantu proses pembilasan didalam ruang silinder.

Setelah langkah buang selesai siklus dimulai lagi dari langkah hisap dan seterusnya. Piston bergerak dari TMA-TMB-TMA-TMB-TMA membentuk satu siklus. Ada satu langkah tenaga dengan dua putaran poros engkol. Motor bakar yang bekerja dengan siklus lengkap tersebut termasuk golongan motor 4 langkah.

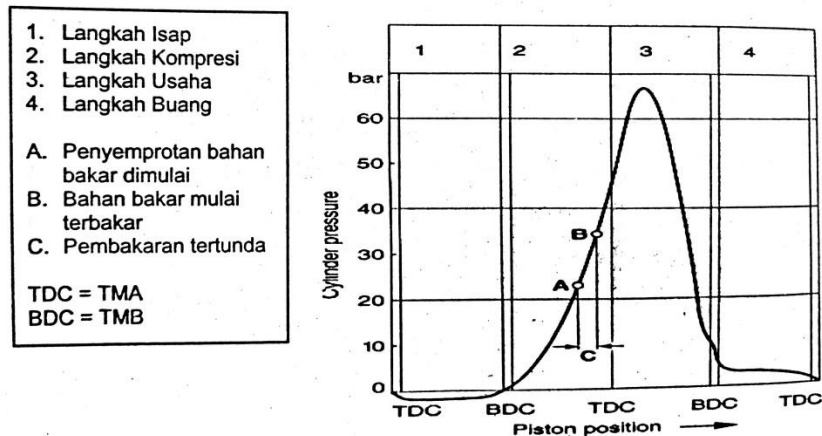
2.1.3 Proses Pembakaran

Proses pembakaran bertujuan untuk menghasilkan energi panas dan menaikkan tekanan yang tinggi di dalam silinder, tekanan tersebut untuk dikonversikan menjadi energi mekanik pada proses engkol. Bahan bakar diesel dimasukkan ke dalam silinder pada akhir langkah kompresi, dengan cara diinjeksikan dengan tekanan yang tinggi hingga diperoleh kabutan yang halus.

Pada diagram gambar 2-3 tersebut, merupakan diagram tekanan terhadap sudut engkol, yang menggambarkan proses pembakaran yang terjadi di dalam silinder mesin diesel. Garis ke atas menunjukkan garis tekanan dan garis mendatar menunjukkan skala sudut engkol. Garis sebelum TMA naik menggambarkan kenaikan tekanan pada saat piston bergerak menuju TMA melakukan proses kompresi.

2.2 Proses Pembakaran Mesin Diesel

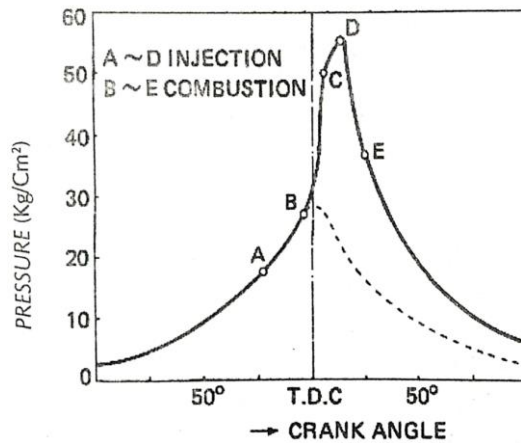
2.2.1 Diagram Pembakaran



Gambar 2.2 Tekanan pembakaran pada motor diesel[31]

Pada waktu pompa injeksi mulai menginjeksikan bahan bakar maka akan terjadi proses yang disebut dengan penundaan pembakaran antara awal menyemprotkan dengan mulainya bahan bakar terbakar (A-B) atau sepanjang daerah C (gambar 2.2). Saat bahan bakar mulai disemprokan pada titik A (pada akhir langkah kompresi) maka bahan bakar tidak akan langsung terbakar pada titik A tersebut, akan tetapi awal pembakaran baru terjadi pada titik B. Injector akan

terus menyemprotkan bahan bakar sampai piston melewati TMA setelah langkah kompresi atau awal langkah usaha.



Gambar 2.3 Tahapan pembakaran pada motor diesel[31]

Pembakaran tertunda (A-B)

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

Rambatan api (B – C)

Campuran yang mudah terbakar telah terbentuk dan merata di seluruh bagian dalam ruang bakar. 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.

Pembakaran langsung (C-D)

Injektor terus menyemprotkan bahan bakar dan berakhir pada titik D. Karena injeksi bahan bakar terus berlangsung didalam udara yang bertekanan dan bersuhu tinggi, maka bahan bakar yang diinjeksikan akan langsung terbakar. Pada tahap ini pembakaran dikontrol oleh jumlah bahan bakar yang diinjeksikan, sehingga tahap ini disebut juga tahap pengontrolan bahan pembakaran.

Pembakaran Lanjutan (D-E)

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

2.2.2 *Knocking* Pada Motor Diesel

Apabila pembakaran tertunda diperpanjang atau lebih banyak bahan bakar yang tertunda, maka banyaknya campuran yang sedang terbakar akan berlebihan, terlalu lama perambatan api, akan menyebabkan terlalu cepat naiknya tekanan dalam silinder, sehingga akan menimbulkan getaran dan bunyi. Ini disebut *diesel knock*. Untuk mencegah diesel knock maka perlu dihindari meningkatnya tekanan secara tiba-tiba dengan adanya terbentuknya campuran yang mudah terbakar saat temperatur rendah. Dengan pembakaran diperpendek atau mengurangi bahan bakar yang diinjeksikan selama pembakaran tertunda. Untuk mengurangi knock diesel, terjadinya pengapian spontanitas dibuat lebih awal.

2.2.3 Jenis Pembakaran

Produk pembakaran campuran udara – bahan bakar dapat dibedakan menjadi:

1. Pembakaran sempurna (pembakaran ideal)

Setiap pembakaran sempurna menghasilkan karbon dioksida dan air. Peristiwa ini hanya dapat berlangsung dengan perbandingan udara-bahan bakar stoikiometris dan waktu pembakaran yang cukup bagi proses ini.

2. Pembakaran tak sempurna

Peristiwa ini terjadi bila tidak tersedia cukup oksigen. Produk pembakaran ini adalah hidrokarbon tak terbakar dan bila sebagian hidrokarbon terbakar maka aldehide, ketone, asam karbosiklis dan sebagian karbon monoksida menjadi polutan dalam gas buang.

3. Pembakaran dengan udara berlebihan

Pada kondisi temperatur tinggi nitrogen dan oksigen dari udara pembakaran akan bereaksi dan akan membentuk oksida nitrogen (NO dan NO₂).

Di samping itu produk yang dihasilkan dari proses pembakaran dapat berupa oksida timah, oksida hlogenida, oksida sulfur, serta emisi evaporatif seperti hidrokarbon ringan yang teremisi dari sistem bahan bakar.

2.3 Siklus Termodinamika Motor Bakar

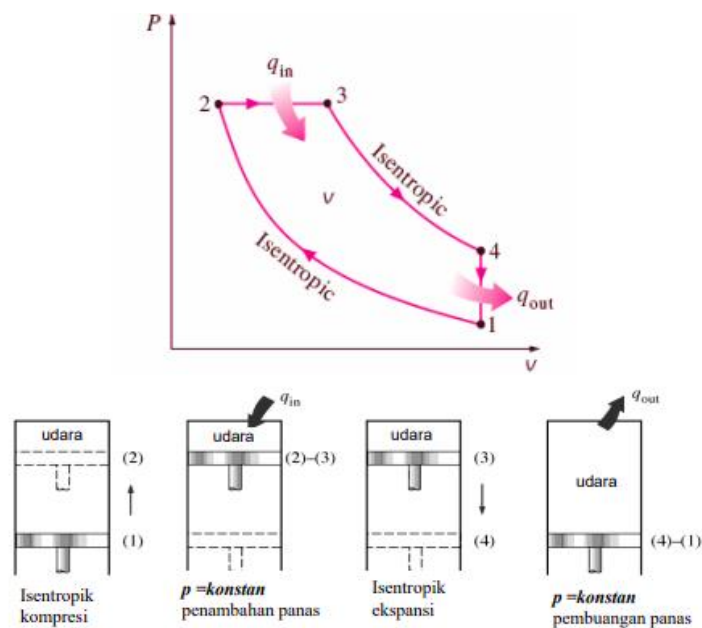
2.3.1 Siklus Udara Ideal

Penggunaan siklus ini berdasarkan beberapa asumsi adalah sebagai berikut

1. Fluida kerja dianggap udara sebagai gas ideal dengan kalor spesifik konstan (tidak ada bahan bakar).
2. Langkah isap dan buang pada tekan konstan.
3. Langkah kompresi dan tenaga pada keadaan adiabatic.
4. Kalor diperoleh dari sumber kalor dan tidak ada proses pembakaran atau tidak ada reaksi kimia.

Siklus termodinamika dalam motor bakar terbagi menjadi tiga pokok bagian yaitu:

1. Siklus udara pada volume konstan (Siklus Otto)
2. Siklus udara pada tekanan konstan (Siklus Diesel)
3. Siklus udara tekanan terbatas (Siklus gabungan).



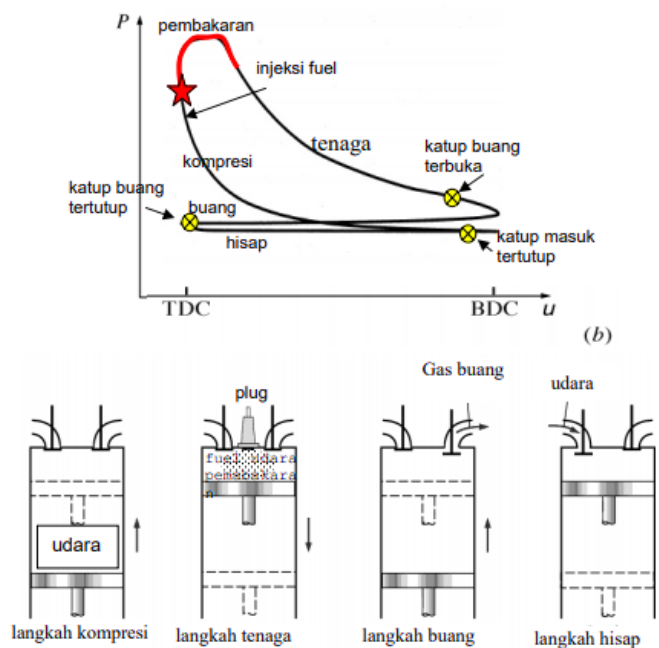
Gambar 2.4 Siklus Udara Tekanan Konstan[30]

Siklus ideal tekanan konstan ini adalah siklus untuk mesin diesel. Gambar 2.4 adalah diagram P-V untuk siklus ideal Diesel. Adapun urutan prosesnya adalah sebagai berikut:

1. Langkah isap (0-1) merupakan proses tekanan konstan.
2. Langkah kompresi (1-2) merupakan proses adiabatik.
3. Langkah kerja (2-3) merupakan proses adiabatik.
4. Langkah buang (3-0) merupakan proses tekanan konstan.

Dapat dilihat dari urutan proses diatas bahwa pada siklus tekanan konstan pemasukan kalornya pada tekanan konstan berbeda dengan siklus volume konstan yang proses pemasukan kalornya pada kondisi volume konstan. Siklus tekanan konstan sering disebut dengan siklus diesel. Rudolf Diesel yang pertama kali merumuskan siklus ini dan sekaligus pembuat pertama mesin diesel. Proses penyalan pembakaran terjadi tidak menggunakan busi, tetapi terjadi penyalan sendiri karena temperatur didalam ruang bakar tinggi karena kompresi.

2.3.2 Siklus Aktual



Gambar 2.5 Siklus Aktual Diesel[30]

Pada gambar 2.5 diatas adalah siklus aktual dari mesin diesel. Alasan yang sama dengan mesin, dengan perbedaan pada disel pada langkah isap hanya udara saja, bahan bakar diseprotkan melalui nosel di kepala silinder. Proses pembakaran untuk menghasilkan panas karena kompresi, atau pembakaran kompresi.

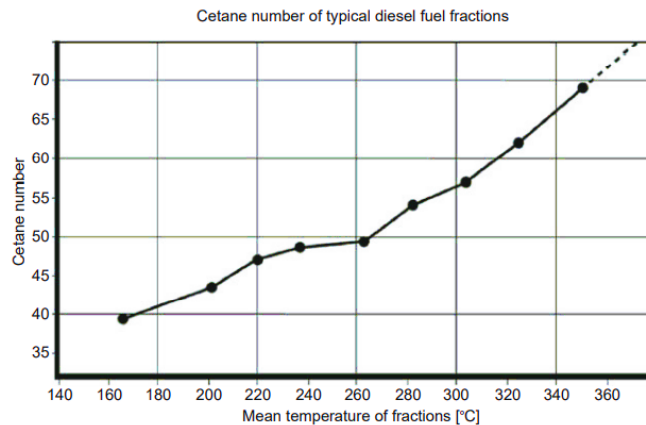
2.4 Bahan Bakar Diesel

2.4.1 Karakteristik Bahan Bakar

Penggunaan bahan bakar yang bermutu tinggi pada mesin diesel akan memperbaiki sifat Atomisasi dan kebersihan ruang bakar serta mencegah terbentuknya endapan sehingga dapat mencapai pembakaran sempurna dan normal. Selain mutu bahan bakar yang diukur dengan angka cetana, sifat-sifat lain dari bahan bakar diesel yang sangat penting dan langsung mempengaruhi tingkat mutu yang tercantum dalam spesifikasi bahan bakar adalah:

1. Angka cetana

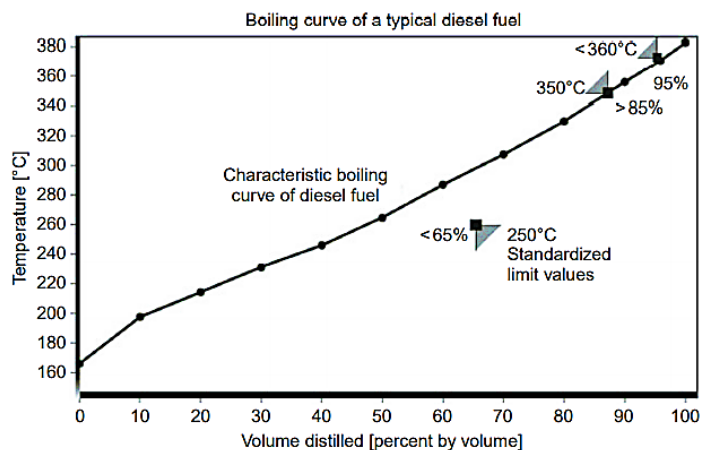
Angka cetana adalah karakteristik bahan bakar untuk menyala dengan sendirinya pada tekanan dan temperatur tertentu di dalam ruang bakar. Angka cetana yang tinggi menggambarkan penyalaan sendiri yang cepat dari bahan bakar tersebut. Penyalaan sendiri (*Auto Ignition*) adalah kemampuan bahan bakar untuk menyala dengan sendirinya pada tekanan dan temperatur tertentu. Kebisingan dan khususnya emisi gas buang HC dan CO serta NO_x juga meningkat pada mesin diesel dengan meningkatnya angka cetane.



Gambar 2.6 Angka cetana fraksi bahan bakar diesel meningkat dengan temperatur didih[32].

2. Sifat didih

Bahan bakar diesel terdiri dari campuran hidrokarbon yang mendidih pada kisaran suhu sekitar 170–380°C. Mesin diesel bereaksi kurang kritis terhadap laju didih bahan bakar. Menurunkan titik didih telah terbukti meningkatkan kinerja pembakaran dan mengurangi emisi gas buang pada mesin diesel kecepatan tinggi.



Gambar 2.7 Sifat didih jenis bahan bakar diesel[32].

3. Kandungan sulfur

Minyak mentah sudah mengandung sulfur dalam jumlah yang bervariasi. Pembentukan SO_2 selama pembakaran, emisi sulfat, peningkatan emisi partikulat dan kerusakan gas buang setelah sistem pengolahan (katalis) membuat desulfurisasi bahan bakar diesel menjadi penting. Gas buang setelah sistem pengolahan membutuhkan bahan bakar bebas sulfur ($\text{S} < 10$ ppm). Kadar belerang yang tinggi dalam bahan bakar akan menimbulkan keausan pada bagian-bagian mesin. Keausan yang ditimbulkan dari bahan bakar yang mempunyai kadar belerang tinggi yang terutama adalah ruang bakar dan injektor.

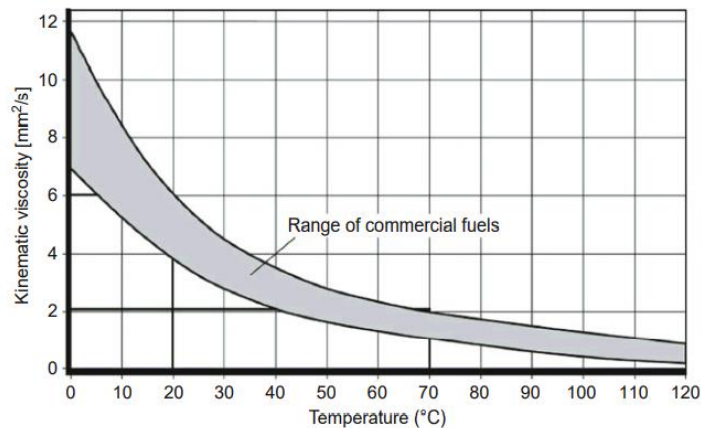
4. Densitas

Massa jenis adalah massa volume bahan bakar tertentu yang ditentukan dalam kg/m^3 pada 15°C (EN ISO 3675, EN ISO 12185). Densitas bahan bakar diesel meningkat seiring dengan meningkatnya kandungan karbonnya.

5. Viskositas

Viskositas adalah kemampuan bahan yang dapat mengalir untuk menyerap tegangan saat mengalami deformasi. Ini hanya tergantung pada laju

deformasi (DIN 1342). Viskositas meningkat pada saat suhu turun dan tekanannya menjadi naik. Misalnya, viskositas bahan bakar diesel berlipat ganda ketika suhu turun dari 40 menjadi 20°C (Gambar 2.8) atau tekanan meningkat menjadi sekitar 600 bar.



Gambar 2.8 Diagram viskositas-suhu bahan bakar diesel[32].

Viskositas mempengaruhi aliran bahan bakar dan karakteristik pompa dalam sistem bahan bakar dan pengembangannya pada saat semprotan injeksi di ruang bakar, yang dibentuk oleh nozel injeksi. Viskositas yang terlalu tinggi menghalangi daya pompa pada suhu rendah, sementara viskositas yang terlalu rendah menyebabkan kehilangan daya pada suhu tinggi dan keausan pompa.

6. Titik nyala

Titik nyala cairan adalah suhu terendah pada tekanan normal di mana ia menguap dalam bejana tertutup dalam jumlah sedemikian rupa sehingga campuran uap-udara dihasilkan, yang dapat menyebabkan penyalaan eksternal untuk menyala (sebagaimana ditentukan oleh EN ISO 2719). Titik nyala adalah parameter keamanan. Risiko penyalaan menurun saat titik nyala meningkat (dalam °C). Maksimum 55°C ditentukan untuk bahan bakar diesel.

7. Kemurnian

Kemurnian meliputi kriteria standar residu karbon, kadar abu, pengotor total dan kadar air. Karena bahan bakar diesel adalah sumber daya bermutu tinggi dan penggunaannya dalam mesin diesel memerlukan persyaratan yang ketat, bahan bakar tersebut harus bersih dan murni saat dipompa ke dalam tangki

kendaraan. Itu harus bebas dari asam dan kotoran padat dan bersih pada suhu kamar.

8. Nilai kalor

Nilai kalor adalah nilai yang dihasilkan dari massa jenis, sifat didih dan komposisi bahan bakar. Itu tidak diukur untuk tujuan pengendalian kualitas selama produksi bahan bakar. Tabel 2.1 menyajikan nilai-nilai dari beberapa jenis bahan bakar diesel. Mengingat kepadatannya yang lebih tinggi (fraksi karbon yang lebih tinggi), bahan bakar diesel memiliki nilai kalor volumetrik yang kira-kira 15% lebih tinggi dari pada bensin.

Tabel 2.1 Nilai kalor dan analisis unsur bahan bakar diesel yang tersedia secara komersial[32].

Diesel Fuel	Density at 15°C [kg/m ³]	Elemental Analysis			H _o MJ/kg	H _u MJ/k g	H _u MJ/kg
		C	H	O			
		Percent by weight					
A	829.8	86.32	13.18	-	45.74	42.87	35.37
B	837.1	85.59	12.7	-	45.64	42.9	35.91
C	828.3	86.05	13.7	-	46.11	43.12	35.72
Mean	831.7	85.99	13.19	-	45.84	42.96	35.73

9. Stabilitas Oksidasi

Bahan bakar dapat teroksidasi dan berpolimerisasi sebagian jika disimpan dalam waktu lama (> 1 tahun sebagai stok strategis / cadangan minyak bumi). Hal ini dapat menyebabkan pembentukan konstituen yang tidak larut dan dengan demikian filter kendaraan akan tersumbat. Antioksidan (aditif) dapat mencegah atau secara efektif mengganggu proses oksidasi dan polimerisasi yang disebabkan oleh pembentukan 'radikal bebas' selama proses tersebut.

2.4.2 Minyak Solar/Biodiesel

Minyak solar adalah bahan bakar minyak hasil sulingan dari minyak bumi mentah, bahan bakar ini mempunyai warna kuning coklat yang jernih. Minyak solar ini biasanya digunakan sebagai bahan bakar pada semua jenis motor diesel dan juga sebagai bahan bakar untuk pembakaran langsung di dalam dapur-dapur kecil yang menghendaki hasil pembakaran yang bersih. Minyak ini sering di sebut juga sebagai *gas oil*, ADO, HSD, atau *Dieseline*. Pada temperatur biasa, artinya pada suhu kamar tidak menguap, dan titik nyalanya jauh lebih tinggi dari pada bahan bakar bensin. Kualitas solar dinyatakan dengan angka setana atau *cetane*

number (CN). Angka setana yaitu besar persentase volume normal *cetana* dalam campurannya dengan methylnapthalene yang menghasilkan karakteristik pembakaran yang sama dengan solar yang bersangkutan. Secara umum solar dapat diklasifikasikan sebagai berikut[33]:

1. *Light Diesel Fuel* (LDF)
2. *Medium Diesel Fuel* (MDF)
3. *Heavy Diesel Fuel* (HDF)

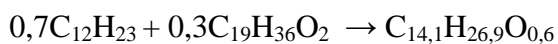
2.5 Emisi Gas Buang

Gas buang adalah gas yang berasal dari suatu proses pembakaran yang suhunya relatif lebih tinggi daripada suhu atmosfer yang dapat dimanfaatkan untuk tujuan tertentu. Sedangkan emisi gas buang adalah sisa hasil pembakaran bahan bakar dari mesin pembakaran dalam (*Internal Combution*)/mesin pembakaran luar (*External Combution*) yang dikeluarkan melalui sistem pembuangan mesin. Gas buang berbentuk kabut asap atau dalam bahasa inggris disebut “*smog*”. Untuk menganalisa hasil pembakaran dapat dilakukan dengan menggunakan kesetimbangan energi dengan basis per satu mol bahan bakar, sehingga reaksi pembakaran solar secara stokiometri dan secara aktual adalah sebagai berikut:

Rumus kimia solar = $C_{12}H_{23}$

Rumus kimia biodiesel = $C_{19}H_{36}O_2$

Reaksi pencampuran solar 70% dan biodiesel 30%:



Opasitas atau kepekatan asap merupakan indikator baik tidaknya sistem pembakaran yang terjadi pada kendaraan diesel. Opasitas diukur dalam persen, semakin besar persentasi, maka semakin pekat asap knalpot kendaraan. Asap hitam membahayakan tidak hanya karena mengeruhkan udara sehingga mengganggu pandangan tetapi juga karena adanya kemungkinan mengandung “karsinogen”. Kepekatan asap biasanya dihasilkan dari hasil pembakaran kendaraan yang biasa menyebabkan pencemaran pada udara, bahkan bisa menyebabkan mengangu pandangan apabila hendak berkendara. Ada banyak

kemungkinan yang terjadi apabila tidak di perhatikan karena adanya kandungan yang berbahaya didalam asap yang dikeluarkan hasil pembakaran. Dari pendapat diatas maka dapat disimpulkan bahwa kepekatan asap adalah kemampuan asap untuk meredam cahaya dan opasitas atau kepekatan asap merupakan baiknya pembakaran yang terjadi pada kendaraan diesel.

2.5.1 Ambang batas emisi gas buang

Penetapan baku mutu gas buang kendaraan bermotor yang selalu memperhatikan beberapa hal antaranya adalah ketersediaan, perkembangan dan penggunaan teknologi kendaraan, ketersediaan bahan bakar, usia kendaraan dan perilaku perawatan pemilik kendaraan. Sehingga masing-masing negara selalu memiliki perbedaan dalam parameter emisi dan besarnya pun akan berbeda. Seperti yang berlaku di Indonesia peraturan perundang-undangan yang berkaitan dengan pengendalian emisi kendaraan adalah:

Tabel 2.2 Ambang batas emisi kendaraan bermotor menurut kepmen LH
No. 06 tahun 2006[34]

Kendaraan bermotor kategori "L"					
Kategori	Tahun pembuatan	Parameter			Metode uji
		CO (%)	HC (ppm)	Opasitas (%)	
Sepeda motor 2 langkah	< 2010	4.5	12000		Idle
Sepeda motor 4 langkah	< 2010	5.5	2400		Idle
Sepeda motor (2 langkah dan 4 langkah)	> 2010	4.5	2000		Idle
Bendaran bermotor kategori "M, N dan O"					
Berpenggerak motor bakar	< 2007	4.5	1200		Idle
	> 2007	1.5	200		

cetus api (bensin)					
Berpenggerak motor bakar penyalaan kompresi (diesel) GVW < 3.5 ton	< 2010			70	Percepatan bebas (free running acceleration)
	> 2010			40	
Berpenggerak motor bakar penyalaan kompresi (diesel) GVW > 3.5 ton	< 2010			70	
	> 2010			50	

Adapun beberapa senyawa yang terkandung dalam gas buang antara lain[35]:

1. Hidrokarbon (HC)

HC yang dipancarkan dalam proses pembakaran dari mesin pembakaran internal yang membakar cairan atau produk minyak bumi bisa berbentuk gas, cair, atau padat (partikulat). Inihanya dapat diamati dalam keadaan cair atau padat ketika mereka dapat dilihat sebagai asap putih (emisi cairan) atau asap hitam (emisi partikulat).

2. Karbon monoksida (COx)

Karbon monoksida adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, dan sangat beracun. Ini adalah hasil dari pembakaran bahan bakar hidrokarbon yang tidak sempurna. Karbon monoksida dapat dibakar untuk membentuk CO₂ yang tidak berbahaya. Paparan CO dapat merusak fungsi otak, menyebabkan kelelahan, dan bisa berakibat fatal dalam konsentrasi tinggi.

3. Sulfur

Kandungan sulfur maksimum yang diizinkan saat ini dalam bahan bakar ASTM 1D atau 2D adalah 0.0015% (15 ppm). Ketika belerang dioksidasi dalam proses pembakaran, ia membentuk belerang dioksida (SO₂). Sulfur bersifat asam, beracun, dan merupakan bahan untuk hujan asam. Emisi

belerang menghasilkan bau asam yang tidak menyenangkan. Karena keasamannya, emisi sulfur yang tinggi dari mesin diesel biasanya akan menghasilkan gangguan seperti karat pada pipa knalpot.

4. Oksida Nitrogen

Nitrogen membentuk hampir 80 persen dari apa yang kita sebut udara di permukaan tanah. Nitrogen dapat terlibat dalam proses pembakaran, dan jika terjadi, nitrogen akan teroksidasi. Saat ia bereaksi, seperti bahan bakar HC, ia teroksidasi. Ini membentuk dinitrogen oksida (N₂O), nitrogen monoksida (NO), dan nitrogen dioksida (NO₂) ketika teroksidasi. Semua oksida nitrogen yang diproduksi di silinder mesin dikenal sebagai NO_x. NO_x secara langsung mempengaruhi orang dengan masalah pernapasan.

2.6 Persamaan Termokimia

Persamaan termokimia merupakan persamaan reaksi yang menyertakan perubahan entalpinya. Persamaan ini juga memberikan jumlah mol yang bereaksi sehingga sesuai dengan reaksi stoikiometri. (Kondisi pada rasio 14 beban 5 kg)

Rumus kimia solar = C₁₂H₂₃

Rumus kimia biodiesel = C₁₉H₃₆O₂

Rumus kimia udara = 0,21O₂ + 0,78N₂

Reaksi pencampuran solar 70% dan biodiesel 30%:

$0,7C_{12}H_{23} + 0,3C_{19}H_{36}O_2 \rightarrow C_{14,1}H_{26,9}O_{0,6}$

ρ bahan bakar = 863 kg/m³

Nilai kalor bahan bakar = 36417 kJ/kg

v bahan bakar = 13 cc = 1,3x10⁻⁵ m³

m bahan bakar = (863 kg/m³)(1,3x10⁻⁵ m³) = 0,01122 kg = 11,22 g

Kalor yang dilepaskan = 36417 kJ/kg x 0,01122 kg = -408,6 kJ

Atom relatif C = 12, H = 1, O = 16, N = 14

Molekul relatif C_{14,1}H_{26,9}O_{0,6} = (12x14,1) + (1x26,9) + (16x0,6) = 206,9 g/mol

Jumlah mol C_{14,1}H_{26,9}O_{0,6} = 11,22 g : 206,9 g/mol = 0,053 mol

ΔH C_{14,1}H_{26,9}O_{0,6} = (-408,6 kJ) : 0,053 mol = -7709,43kJ/mol

ΔH O₃ = 142,3 kJ/mol

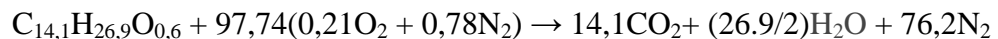
$$\Delta H \text{ CO}_2 = -393,5 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H \text{ H}_2\text{O} = -242 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H \text{ O}_2 = 0 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H \text{ N}_2 = 0 \text{ kJ/mol}$$

1. Persamaan tanpa penambahan ozon



$$\Delta H \text{ reaksi} = \Delta H \text{ produk} - \Delta H \text{ reaktan}$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = [(14,1 \times \Delta H \text{ CO}_2) + ((26,9/2) \times \Delta H \text{ H}_2\text{O})] - [(\Delta H \text{ C}_{14,1}\text{H}_{26,9}\text{O}_{0,6}) + (20,525 \times \Delta H \text{ O}_2) + (76,2 \times \Delta H \text{ N}_2)]$$

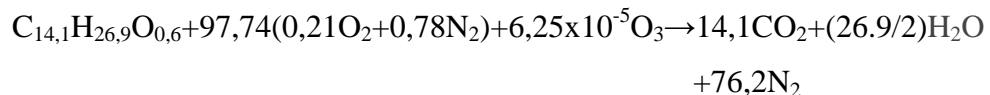
$$\Delta H \text{ reaksi} = [(14,1 \times -393,5) + ((26,9/2) \times -242)] - [(1 \times -7709,43) + (20,525 \times 0) + (76,2 \times 0)]$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = [(-5548,35) + (-3254,9)] - [(-7709,43) + (0) + (0)]$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = -1093 \text{ kJ/mol}$$

2. Persamaan dengan konsentrasi ozon 3 mg

$$\text{Jumlah mol O}_3 = 0,003 \text{ g} : 48 \text{ g/mol} = 6,25 \times 10^{-5} \text{ mol}$$



$$\Delta H \text{ reaksi} = \Delta H \text{ produk} - \Delta H \text{ reaktan}$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = [(14,1 \times \Delta H \text{ CO}_2) + ((26,9/2) \times \Delta H \text{ H}_2\text{O})] - [(\Delta H \text{ C}_{14,1}\text{H}_{26,9}\text{O}_{0,6}) + (20,525 \times \Delta H \text{ O}_2) + (76,2 \times \Delta H \text{ N}_2) + (6,25 \times 10^{-5} \times \Delta H \text{ O}_3)]$$

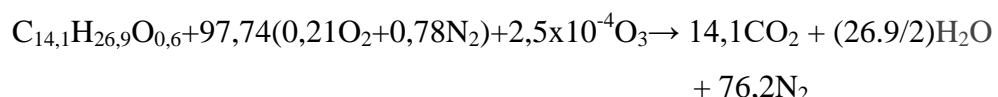
$$\Delta H \text{ reaksi} = [(14,1 \times -393,5) + ((26,9/2) \times -242)] - [(1 \times -7709,43) + (20,525 \times 0) + (76,2 \times 0) + (6,25 \times 10^{-5} \times 142,3)]$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = [(-5548,35) + (-3254,9)] - [(-7709,43) + (0) + (0) + (0,009)]$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = -1094 \text{ kJ/mol}$$

3. Persamaan dengan konsentrasi ozon 12 mg

$$\text{Jumlah mol O}_3 = 0,012 \text{ g} : 48 \text{ g/mol} = 2,5 \times 10^{-4} \text{ mol}$$



$$\Delta H \text{ reaksi} = \Delta H \text{ produk} - \Delta H \text{ reaktan}$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = [(14,1 \times \Delta H \text{ CO}_2) + ((26,9/2) \times \Delta H \text{ H}_2\text{O})] - [(\Delta H \text{ C}_{14,1}\text{H}_{26,9}\text{O}_{0,6}) + (20,525 \times \Delta H \text{ O}_2) + (76,2 \times \Delta H \text{ N}_2) + (2,5 \times 10^{-4} \times \Delta H \text{ O}_3)]$$

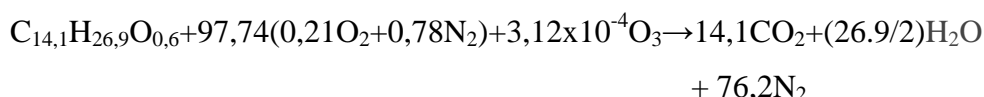
$$\Delta H \text{ reaksi} = [(14,1 \times -393,5) + ((26,9/2) \times -242)] - [(1 \times -7709,43) + (20,525 \times 0) + (76,2 \times 0) + (2,5 \times 10^{-4} \times 142,3)]$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = [(-5548,35) + (-3254,9)] - [(-7709,43) + (0) + (0) + (0,0356)]$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = -1094 \text{ kJ/mol}$$

4. Persamaan dengan konsentrasi ozon 15 mg

$$\text{Jumlah mol } O_3 = 0,015 \text{ g} : 48 \text{ g/mol} = 3,12 \times 10^{-4} \text{ mol}$$



$$\Delta H \text{ reaksi} = \Delta H \text{ produk} - \Delta H \text{ reaktan}$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = [(14,1 \times \Delta H CO_2) + ((26,9/2) \times \Delta H H_2O)] - [(\Delta H C_{14,1}H_{26,9}O_{0,6}) + (20,525 \times \Delta H O_2) + (76,2 \times \Delta H N_2) + (3,12 \times 10^{-4} \Delta H O_3)]$$

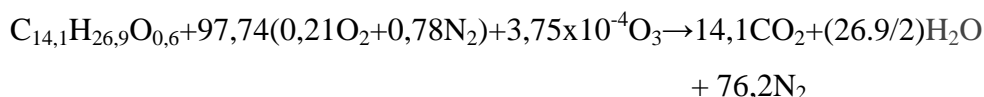
$$\Delta H \text{ reaksi} = [(14,1 \times -393,5) + ((26,9/2) \times -242)] - [(1 \times -7709,43) + (20,525 \times 0) + (76,2 \times 0) + (3,12 \times 10^{-4} \times 142,3)]$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = [(-5548,35) + (-3254,9)] - [(-7709,43) + (0) + (0) + (0,044)]$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = -1094 \text{ kJ/mol}$$

5. Persamaan dengan konsentrasi ozon 18 mg

$$\text{Jumlah mol } O_3 = 0,018 \text{ g} : 48 \text{ g/mol} = 3,75 \times 10^{-4} \text{ mol}$$



$$\Delta H \text{ reaksi} = \Delta H \text{ produk} - \Delta H \text{ reaktan}$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = [(14,1 \times \Delta H CO_2) + ((26,9/2) \times \Delta H H_2O)] - [(\Delta H C_{14,1}H_{26,9}O_{0,6}) + (20,525 \times \Delta H O_2) + (76,2 \times \Delta H N_2) + (3,75 \times 10^{-4} \Delta H O_3)]$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = [(14,1 \times -393,5) + ((26,9/2) \times -242)] - [(1 \times -7709,43) + (20,525 \times 0) + (76,2 \times 0) + (3,75 \times 10^{-4} \times 142,3)]$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = [(-5548,35) + (-3254,9)] - [(-7709,43) + (0) + (0) + (0,0534)]$$

$$\Delta H \text{ reaksi} = -1094 \text{ kJ/mol}$$

Dari persamaan di atas, dapat dilihat bahwa penambahan ozon tidak berpengaruh terhadap entalpi pembakaran.

2.7 Analisa Kinerja Mesin Diesel

Parameter-parameter yang akan dijadikan sebagai perhitungan dalam pengujian ini adalah : Daya efektif (BP), Konsumsi Bahan Bakar (FC), Konsumsi Bahan Bakar (SFC), Konsumsi Udara aktual (Maac), Konsumsi Udara Teoritis (Matt), Perbandingan Udara Bahan Bakar (AFR), Efisiensi Volumetris (η_{vol}) dan Efisiensi Thermis (η_{th}).

2.7.1 Daya Efektif, BP (kW)

Daya efektif merupakan salah satu parameter dalam menentukan performa motor. Perbandingan perhitungan daya terhadap berbagai macam motor tergantung pada putaran mesin dan momen putar itu sendiri, semakin cepat putaran mesin, rpm yang dihasilkan akan semakin besar, sehingga daya yang dihasilkan juga semakin besar, begitu juga momen putar motornya, semakin banyak jumlah gigi pada roda giginya semakin besar torsi yang terjadi. Dengan demikian jumlah putaran (rpm) dan besarnya momen putar atau torsi mempengaruhi daya motor yang dihasilkan oleh sebuah motor. Maka daya efektif dari mesin merupakan karakteristik mesin dalam pembangkitan daya pada berbagai kondisi operasi, dapat dihitung menurut persamaan[36]:

$$BP = \frac{T.N}{9545,3} \text{ (kW)}$$

Dimana :

BP = Daya efektif, (kW)

N = Putaran poros, (rpm)

T = Momen Torsi, (N.m)

9543.5 = Konstanta dynamometer

2.7.2 Konsumsi Bahan Bakar, FC (kg/h)

Konsumsi bahan bakar menunjukkan jumlah pemakaian bahan bakar yang dihitung dengan jalan mengukur waktu yang diperlukan oleh mesin untuk menghabiskan sejumlah bahan bakar yang terdapat pada gelas ukur, dapat dihitung dari persamaan[36]:

$$FC = \frac{VGU \cdot 10^{-3} \cdot \rho_f \cdot 3600}{W} \left(\frac{kg}{h} \right)$$

Dimana :

FC = Konsumsi Bahan Bakar (kg/h)

VGU = Volume gelas ukur

ρ_f = Massa jenis bahan bakar, (kg/h)

10^{-3} = Faktor konversi cc ke dm^3

3600 = Faktor konversi detik ke jam

2.7.3 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik, SFC (kg/kW.h)

Konsumsi bahan bakar spesifik menyatakan jumlah bahan bakar untuk menghasilkan suatu kW setiap satu satuan waktu pada beban tertentu. SFC merupakan parameter keekonomisan suatu motor bakar. Parameter ini dapat dirumuskan sebagai berikut [36]:

$$SFC = \frac{FC}{BP} \text{ (kg/kW.h)}$$

Dimana :

SFC = Konsumsi bahan bakar spesifik (kg/kW.h)

2.7.4 Laju Aliran Udara aktual, Ma (kg/h)

Untuk mengukur jumlah pemakaian udara sebenarnya, digunakan sebuah plat *orifice* sisi tajam dengan diameter 20 mm yang dihungkan sebuah manometer presisi. Perbedaan tekanan akibat aliran udara melintasi plat *orifice* diukur oleh manometer, menggambarkan konsumsi udara yang sanggup di isap oleh mesin selama langkah pemasukan. Maka dari itu persamaan Ma adalah [36]:

$$Ma = k \cdot \frac{\pi}{4} \cdot Do^2 \cdot C \cdot \rho_a \text{ (kg/h)}$$

Hubungan antara beda tekanan dengan ekspansi gas diberikan oleh persamaan berikut :

$$Ho = \frac{\rho a \cdot C}{2} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Dimana :

H_o = beda tekanan dalam manometer, (N/m^2)

ρ_a = massa jenis udara pada kondisi masuk, (kg/m^3)

C = kecepatan aliran udara, (m/s)

Karena beda tekanan pada manometer terukur dalam dimensi mmH₂O, dimana 1 mmH₂O = 9.81 N/m², maka persamaan menjadi,

$$C = \sqrt{\frac{2 \cdot h_o}{\rho_a}}$$

Dari hasil pengujian ternyata bahwa beda tekanan pada manometer dan kondisi ruangan merupakan variabel, maka persamaan menjadi,

$$Ma = K_d \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_o^2 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 \cdot 4,4295 \cdot \sqrt{h_o \cdot \rho_a} \text{ (kg/h)}$$

Dimana :

K_d = koefisien discharger (0,6)

D_o = diameter orifice, (20 mm)

H_o = beda tekanan pada manometer (mmH₂O)

10^{-6} = faktor konversi dari mm^2 ke m^2

3600 = faktor konversi dari detik ke jam

2.7.5 Laju Aliran Udara Teoritis, M_{th} (kg/h)

Banyaknya bahan bakar yang dapat terbakar sangat bergantung pada jumlah udara yang terisap selama langkah pemasukan, karna itu perlu diperhatikan berapa jumlah udara yang dikumsumsi selama pemasukan. Dalam keadaan teoritis, jumlah massa udara yang dapat masuk ke dalam ruangan dapat dirumuskan sebagai berikut[36]:

$$M_{th} = \frac{V_s \cdot 10^{-3} \cdot N \cdot 60 \cdot \rho_{ud}}{K_a} \text{ (kg/h)}$$

dan,

$$V_s = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot s \cdot z}{4 \cdot 10^6}$$

Dimana :

V_s = volume selinder

- 10^3 = faktor konversi dari cc ke liter
- N = putaran poros (rpm)
- ρ_{ud} = massa jenis udara (kg/m^3)
- Ka = 2 (konstanta untuk motor 4 langkah)
- d = Diameter selinder (87.5 mm)
- s = panjang langkah selinder (110 mm)
- z = jumlah selinder (1)

2.7.6 Perbandingan Udara Bahan Bakar, *AFR*

Perbandingan udara bahan bakar sangat penting bagi pembakaran sempurna. Konsumsi udara bahan bakar yang dihasilkan akan sangat mempengaruhi laju dari pembakaran dan energi yang dihasilkan. Secara umum *air fule consumption* dapat dihitung dengan persamaan[36]:

$$AFR = \frac{Ma}{FC}$$

Dimana :

Ma= konsumsi udara aktual (kg/h)

FC= konsumsi bahan bakar (kg/h)

2.7.7 Efisiensi Volumetrik, η_{vol} (%)

Efisiensi volumetrik adalah perbandingan antara jumlah udara terisap sebenarnya pada proses pengisapan, dengan jumlah udara teoritis yang mengisi volume langkah pada saat temperatur dan tekanan sama. Dengan demikian η_{vo} dapat di rumuskan sebagai berikut[36] :

$$\eta_{vo} = \frac{Ma}{Mth} \cdot 100 \quad (\%)$$

Dimana :

Ma = konsumsi udara aktual (kg/h)

Mth = konsumsi udara teoritis (kg/h)

2.7.8 Efisiensi Thermis, η_{th} (%)

Efisiensi thermis didefinisikan sebagai perbandingan antara besarnya energi kalor yang di ubah menjadi daya efektif dengan jumlah kalor bahan bakar yang disuplai ke dalam silinder. Parameter ini menunjukkan kemampuan suatu mesin untuk mengkonversi energi kalor dari bahan bakar menjadi energi mekanik. η_{th} dapat dihitung dengan rumus berikut[36]:

$$\eta_{th} = \frac{BP}{Q_{tot}} (\%)$$

dan,

$$Q_{tot} = \frac{FC.LHV_{bb}}{3600} \text{ (kW)}$$

Dimana :

Q_{tot} = kalor total yang di suplai, (kW)

LHV_{bb} = nilai kalor bahan bakar (kJ/kg)

3600 = faktor konversi jam ke detik

BP = daya efektif (kW)

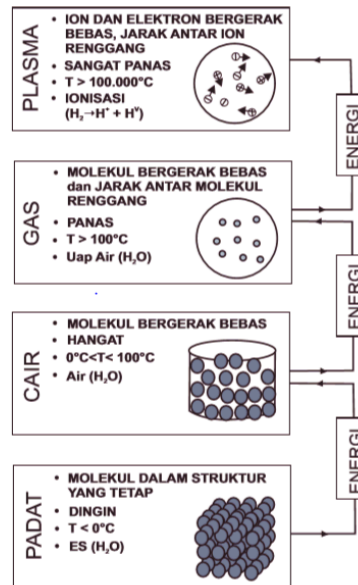
2.8 Plasma

2.7.1 Pengertian Plasma

Plasma adalah suatu lautan muatan listrik. Plasma juga sering disebut gas yang bermuatan listrik atau gas yang terionisasi (gas yang elektronnya lepas). Menurut Chen plasma merupakan daerah reaksi tumbukan elektron yang sangat signifikan untuk terjadi. Plasma dapat terjadi ketika temperatur atau energi suatu gas dinaikkan sehingga memungkinkan atom-atom gas terionisasi akan membuat gas tersebut melepaskan elektron-elektronnya yang pada keadaan normal mengelilingi inti[37].

Plasma dapat pula didefinisikan sebagai percampuran kuasi-netral dari elektron, radikal, ion positif dan negatif. Maka secara sederhana plasma didefinisikan sebagai gas terionisasi dan dikenal sebagai fase materi ke empat setelah fase padat, cair, dan fase gas[38]. "Terionisasi" berarti bahwa setidaknya satu elektron tidak terikat pada atom atau molekul, mengubah Atom atau molekul

menjadi ion bermuatan positif[39]. Dalam hal ini plasma bersifat konduktor listrik sehingga sangat kuat bereaksi dengan medan elektromagnetik.



Gambar 2.9 Ilustrasi Fase[38]

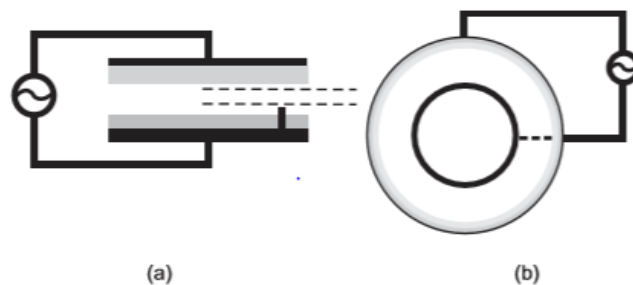
Dilihat dari gambar diatas bahwa fase plasma memiliki sifat – sifat yang berbeda dengan fase padatan, fase cairan, dan fase gas. Ilustrasi pada gambar 4 menunjukkan terbentuknya plasma dari proses perubahan melalui urutan padat, cair, gas dan akhirnya plasma. Gambar tersebut menunjukkan bahwa jika es (merupakan materi padat) mendapat energi, maka ia akan mencair pada suhu di atas 0°C menjadi air. Jika air diberikan energi, setelah melewati suhu 100°C akan menjadi uap air dengan molekul H_2O . Pemberian energi secara terus menerus pada uap air akan memecahkan molekul air menjadi H_2 dan O_2 dan akhirnya molekul-molekul ini akan terionisasi menjadi ion-ion positif dan elektron yang dalam keadaan tertentu dan ruang tertentu (*microspace*) terjadi keseimbangan antara ion dan elektron. Pada keadaan ini disebut plasma.

2.7.2 Plasma *Dielectric Barrier Discharge* (DBD) *Atmosphere Pressure*

Lucutan plasma senyap (*Silent Discharge Plasma*) juga dikenal dengan sebutan lucutan plasma berpenghalang dielektrik (*Dielectric Barrier Discharge*) adalah lucutan plasma yang dapat dioperasikan pada tekanan atmosfer. Lucutan plasma senyap ini dalam industri skala besar digunakan sebagai pembangkit ozon.

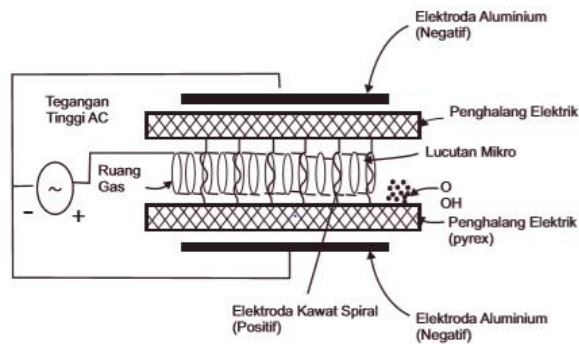
Dengan gas sumber yang digunakan adalah udara bebas maupun oksigen. Karakteristik utama dari lucutan senyap adalah celah lucutan yang sempit dengan jarak milimeter dan salah satu elektrodanya ditutupi dengan lapisan isolator. Berdasarkan aplikasinya, lucutan plasma senyap juga dikenal sebagai lucutan penghasil ozon. Pada lucutan plasma senyap terjadi proses oksidasi yang dapat menghasilkan radikal bebas secara kimia pada temperatur udara dan tekanan atmosfer, untuk mengoksidasi fase gas yang terkandung di dalam reaktor tersebut[38].

Sistem pembangkit lucutan plasma penghalang dielektrik menggunakan gas sumber udara bebas pada tekanan atmosfer sebagai gas masukan. Ozon diproduksi di dalam lucutan plasma penghalang dielektrik dari gas di udara atau gas oksigen murni yang melewati celah diantara dua elektroda.



Gambar 2.10. Bentuk konfigurasi elektroda lucutan plasma penghalang dielektrik, (a) Geometri elektroda tampak samping, (b) Geometri elektroda tampak depan[38]

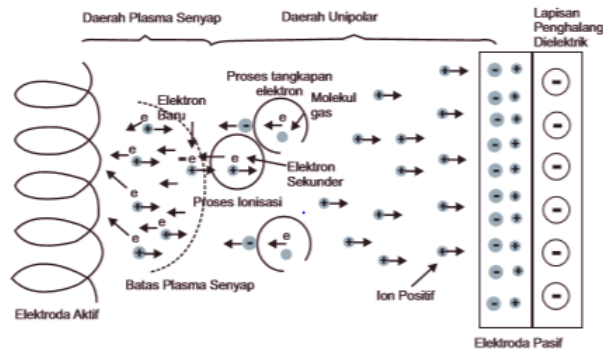
Pada gambar 2.10, ditunjukkan konfigurasi elektroda dari lucutan plasma penghalang dielektrik dan warna abu-abu menunjukkan bahan dielektrik, dengan karakteristik sebagai berikut: lucutan plasma penghalang dielektrik dioperasikan pada tekanan atmosfer diantara logam elektroda yang salah satunya dilindungi oleh penghalang dielektrik. Pembangkit AC (*alternating current*) tegangan tinggi akan menghasilkan lucutan di antara celah elektroda sehingga gas akan terionisasi. Bahan gelas dan keramik yang berbeda pada umumnya digunakan sebagai material penghalang. Lucutan biasanya terjadi dalam jumlah besar sepanjang daerah filamen (100-200 μm).



Gambar 2.11 Geometri dari lucutan plasma penghalang dielektrik sehingga terbentuk lucutan mikro[38]

Gambar 2.11 menunjukkan geometri dari lucutan plasma dengan penghalang sehingga terjadi lucutan mikro. Ketika gas berada dalam pengaruh medan listrik yang mampu menimbulkan pergerakan spesies gas, elektron yang berenergi akan mentransferkan energinya pada molekul gas melalui tumbukan, eksitasi molekul, tangkapan elektron, disosiasi dan ionisasi. Spesies aktif utama yang dihasilkan dari proses transfer energi elektron adalah ion, radikal dan atom tereksitasi. Lucutan plasma dengan penghalang dielektrik terbentuk di dalam medan listrik yang tak seragam, yang terjadi di daerah sekitar elektroda aktif yang dapat memungkinkan terjadinya ionisasi dan pembentukan elektron berenergi tinggi di daerah tersebut.

Gambar 2.12 menunjukkan elektron-elektron yang bergerak menuju elektroda aktif akan menumbuk atom atau partikel di antara celah elektroda dan mengakibatkan atom menjadi ion bermuatan positif. Jika ionisasi terjadi di udara, karena medan listrik yang cukup kuat antar elektroda, ion nitrogen akan dipercepat bergerak menuju elektroda pasif.



Gambar 2.12. Ilustrasi lucutan plasma penghalang dielektrik

DBD memiliki banyak aplikasi karena beroperasi pada kondisi yang sangat non-kesetimbangan pada tekanan atmosfer gas yang berbeda, termasuk udara, pada tingkat daya yang cukup tinggi dan tanpa menggunakan pasokan listrik pulsa canggih. DBD secara luas diterapkan untuk generator ozon; dalam sumber UV dan lampu *excimer*; dalam pengobatan polimer[39].

2.9 Ozon dalam Meningkatkan Pembakaran

2.9.1 Interaksi ozon – hidrokarbon

Ozon adalah molekul anorganik dengan rumus kimia O_3 . Ozon adalah alotrop oksigen yang jauh lebih stabil dibandingkan dengan alotrop diatomik O_2 .

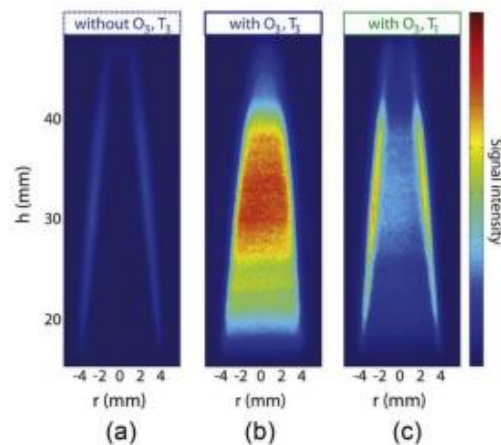


Gambar 2.13 Rumus kerangka ozon (a) model bola dan (b) model batang dari molekul Ozon[40]

Ozon adalah oksidan kuat (jauh lebih daripada dioksigen) dan memiliki banyak aplikasi industri dan konsumen yang berkaitan dengan oksidasi, seperti pengolahan air, pembuatan obat-obatan, ozonisasi asam oleat dan lain-lain. Dalam beberapa tahun terakhir, karena fitur pengoksidasi yang kuat, ozon telah diteliti untuk aplikasi yang berhubungan dengan pembakaran.

2.9.2 Pengaruh ozon pada karakteristik pembakaran

Menambahkan ozon terbukti memperkenalkan jalur baru dalam mekanisme oksidasi. Perubahan dalam kimia pembakaran ini menyebabkan konsekuensi dalam perilaku pembakaran seperti pembentukan OH ekstra dan formaldehida yang dapat diamati secara eksperimental. Efek ozon diselidiki pada api udara metana yang bercampur. Fluoresensi yang diinduksi laser planar dari CH₂O dilakukan untuk memahami mekanisme di balik dampak ozon pada oksidasi metana. Seperti dapat dilihat pada Gambar 2.14, peningkatan yang cukup besar dalam produksi formaldehida diamati ketika ozon ditambahkan ke campuran CH₄-udara. Efek ini diamati untuk suhu dan rasio kesetaraan yang berbeda.



Gambar 2.14 Peningkatan produksi CH₂O yang diinduksi oleh ozon[40].

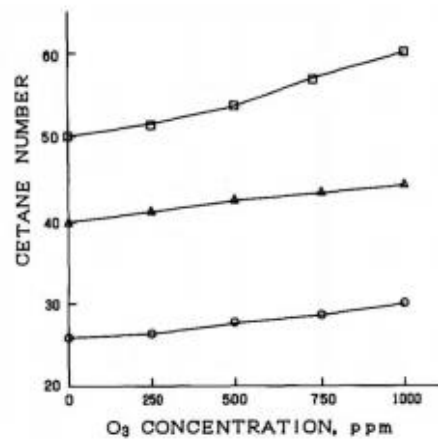
Kimia oksidasi dengan mudah mengungkap mekanisme di balik peningkatan produksi formaldehida. Begitu ozon menyemai campuran bahan bakar-udara, atom oksigen yang berasal dari dekomposisi molekul O₃ bereaksi dengan molekul CH₄, menghasilkan radikal OH yang bereaksi cepat dengan metana. Metana kemudian diubah menjadi formaldehida melalui urutan reaksi $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 - \text{CH}_3\text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O}$. Melalui jalur reaksi ini beberapa radikal OH diproduksi, sehingga akan meningkatkan reaktivitas sistem secara keseluruhan.

2.9.3 Dampak ozon pada pembakaran mesin IC

Aplikasi ozon pertama untuk mesin IC diusulkan oleh Tachibana dkk pada tahun 1991. Dalam studi mereka, penulis menyelidiki efek ozon pada pembakaran di mesin Diesel CI. Eksperimen yang dilakukan pada mesin CFR, penelitian

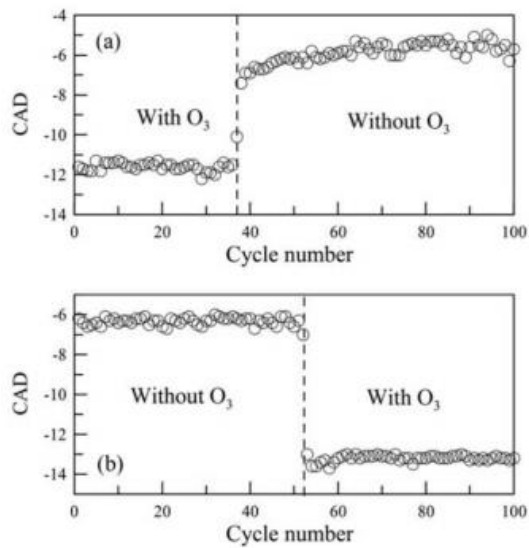
bahan bakar kooperatif diesel menunjukkan bahwa efek penambahan ozon sama dengan efek peningkatan CN bahan bakar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tergantung pada kondisi awal yang dipilih, 500 ppm ozon berhubungan dengan peningkatan CN dari 2 menjadi 4, yang secara jelas menunjukkan efek peningkatan ozon pada reaktivitas bahan bakar[25].

Sebagian besar studi mengenai aplikasi ozon untuk mesin IC berkaitan dengan mode pembakaran canggih yang inovatif. Secara khusus, aplikasi ozon diselidiki sebagai solusi yang mungkin untuk mengatasi keterbatasan praktis yang menghalangi strategi pembakaran canggih yang berpotensi bersih dan efisien ini untuk digunakan dalam mesin IC pada aplikasi komersial skala besar.



Gambar 2.15 Korelasi antara ozon dan CN bahan bakar untuk kondisi awal yang berbeda[40].

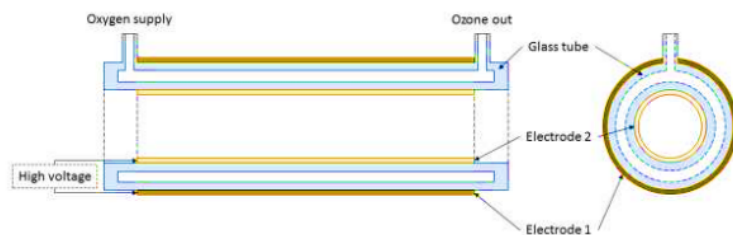
Potensi generator ozon untuk kontrol siklus-ke-siklus pembakaran diselidiki, dan hasilnya menunjukkan bahwa dengan mengalihkan *power supply* dengan generator ozon terjadi perubahan konsekuen dari 0 menjadi 49 ppm konsentrasi ozon dalam aliran udara masuk menyebabkan variasi fase pembakaran 7 CAD dalam satu siklus mesin, seperti yang dapat diamati pada Gambar 2.16



Gambar 2.16 Variasi pentahapan nyala api utama yang diinduksi dengan menghidupkan dan mematikan generator ozon. (a) Kasus langsung off-on. (b) Balikkan kasus off - on[40]

2.9.4 Generator Ozon

Ozon dapat dihasilkan dengan menggunakan generator ozon. Ozon diproduksi oleh *ozonizer* yang bekerja berdasarkan prinsip pelepasan penghalang dielektrik, yang menghasilkan ozon di antara dua elektroda yang dipisahkan oleh bahan dielektrik dan didukung oleh sinyal tegangan tinggi.



Gambar 2.17 Representasi skematis dari generator ozon yang bekerja berdasarkan prinsip *Dielectric Barrier Discharge*(DBD)[40].

Seperti yang ditunjukkan pada gambar, dua elektroda mengelilingi kaca: satu di dalam silinder dan yang lainnya di luar. Ozon dihasilkan dari molekul oksigen yang terurai di dalam silinder di bawah pengaruh pelepasan tegangan tinggi dan kemudian bergabung kembali, membentuk molekul O₃. Oleh karena

itu, jumlah ozon dapat dikontrol dengan memvariasikan frekuensi tegangan *ozonizer*. Cara lain untuk mengontrol ozon yang dihasilkan adalah dengan mengatur aliran yang melintasi volume silinder. Generator ozon yang dijelaskan sebelumnya menghasilkan ozon berdasarkan kapasitas yang diberikan sebagai persentase tetapi perangkat tidak menunjukkan jumlah ozon yang dihasilkan. Oleh karena itu, penganalisis ozon digunakan untuk mengukur konsentrasi yang sesuai asupan mesin. Alat yang digunakan untuk memantau konsentrasi ozon adalah *Ozone Gas Detector*. Penentuan konsentrasi ozon didasarkan pada penyerapan radiasi UV oleh ozon.