

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1. PROSES PEMBAKARAN PADA MESIN DIESEL**

Pada mesin diesel yang juga disebut dengan *Compressed Ignition Engine*, proses pembakaran terjadi secara spontan akibat adanya pencampuran bahan bakar pada udara yang bertekanan tinggi diruang bakar. Pada mesin otto yang biasa disebut *Spark Ignition Engine*, penyalaan bahan bakar yang sebelumnya dicampur dengan udara di dalam karburator menggunakan percikan bunga api dari busi.

Proses pembakaran yang terjadi didalam ruang bakar mesin diesel dimulai dengan penyemprotan bahan bakar pada temperatur tertentu dan tekanan yang tinggi agar butiran-butiran bahan bakar secara langsung akan berubah menjadi uap didalam ruang bakar. Temperatur dan tekanan bahan bakar yang masuk ke ruang bakar akan mengkondisikan kecepatan penguapan bahan bakar tersebut. Uap bahan bakar yang terjadi selanjutnya bercampur dengan udara disekitarnya (didalam ruang bakar) sehingga tercapai pencampuran yang sesuai antara uap bahan bakar dengan udara pembakar. Pencampuran uap bahan bakar dengan udara pembakar akan sangat menentukan kesempurnaan proses pembakaran yang diawali dengan proses penyalaan. Proses penyalaan pada mesin diesel dapat terjadi pada banyak tempat, yaitu tempat-tempat dimana terdapat campuran yang sesuai antara bahan bakar dengan udara untuk proses penyalaan. Proses penyalaan yang terjadi akan dengan sangat cepat meningkatkan temperatur dan tekanan campuran uap bahan bakar dan udara sehingga mengakibatkan terjadinya proses pembakaran pada campuran tersebut.

Proses pembakaran dapat dipercepat dengan cara memusar udara yang masuk kedalam silinder sehingga terjadi percepatan pencampuran uap bahan

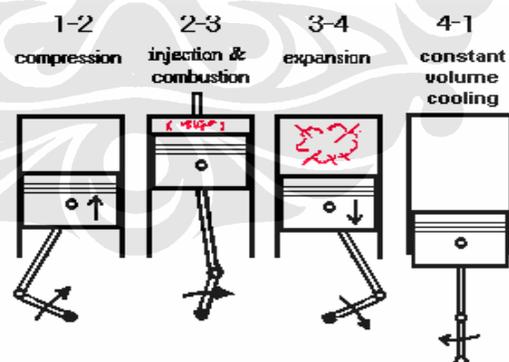
bakar dengan udara. Hal ini bertujuan agar terjadi proses pembakaran yang lebih sempurna sehingga power yang dihasilkan menjadi lebih besar dan pemakaian bahan bakar menjadi lebih efisien.

Efisiensi pembakaran yang terjadi sangat ditentukan jenis bahan bakar yang digunakan. Karakteristik bahan bakar yang dimiliki oleh setiap jenis bahan bakar sangat berpengaruh desain ruang bakar mesin diesel. Umumnya desain ruang bakar mesin diesel didahului dengan penentuan jenis bahan bakar yang digunakan serta karakteristik dari bahan bakar tersebut. Penggunaan bahan bakar dengan karakteristik yang berbeda dari karakteristik bahan bakar yang direncanakan pada saat engineering desain ruang bakar akan menyebabkan perubahan unjuk kerja mesin tersebut serta perubahan dampak kerusakan yang mungkin diakibatkan pada periode operasi yang sama yang menyebabkan perubahan periode pemeliharaan pada mesin tersebut.

### 2.1.1. Proses Pembakaran Pada Mesin Diesel 4-Langkah

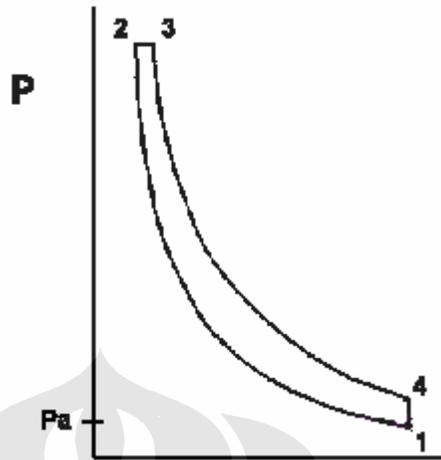
Perkembangan mesin diesel yang ada saat ini memang sudah cukup pesat, salah satunya pada kendaraan bermotor. Adapun proses pembakaran di dalam mesin diesel 4-langkah untuk kendaraan bermotor terbagi atas 2 yaitu :

a) Siklus Tertutup



Gambar 2.1. Siklus diesel  
(sumber : "Motor Pembakaran Dalam" Bambang Sugiarto)

Siklus ini merupakan permodelan ideal untuk menganalisa proses termodinamika pada siklus *Diesel*. Diasumsikan gas yang terdapat pada silinder adalah udara. Pada persamaan di bawah, udara diasumsikan sebagai gas ideal dengan *specific heat* konstan. Siklus termodinamika yang terjadi pada siklus ialah :

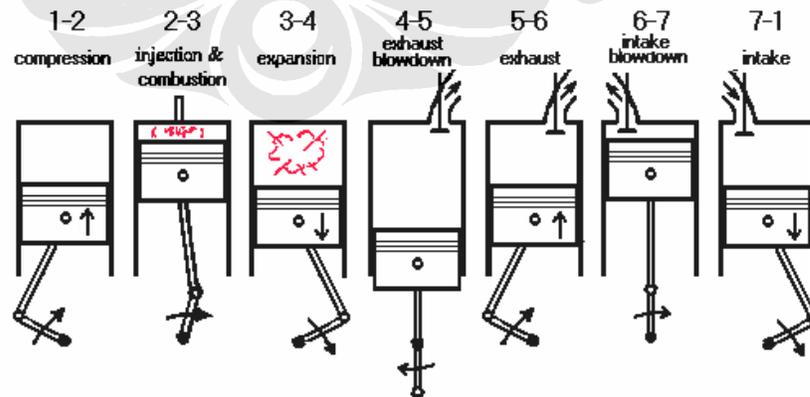


Grafik 2.1. Diagram P-V siklus diesel  
(sumber : "Motor Pembakaran Dalam" Bambang Sugiarto)

- 1 ke 2 : kompresi isentropik
- 2 ke 3 : pemanasan reversibel tekanan konstan
- 3 ke 4 : ekspansi isentropik
- 4 ke 1 : pendinginan reversibel volume konstan

b) Siklus Terbuka

Siklus *Diesel* terbuka merupakan permodelan ideal untuk menganalisa proses yang terjadi pada *compression-ignition engine*. Siklus ini terdiri dari tujuh macam proses, termasuk proses yang ada pada mesin aktual, namun tanpa proses *overlapping*.



Gambar 2.2. Siklus diesel terbuka  
(sumber : "Motor Pembakaran Dalam" Bambang Sugiarto)

#### *Compression (1 - 2)*

Proses dimulai pada saat posisi piston berada di titik mati bawah (TMB) dan posisi katup *intake* ditutup sampai dengan posisi piston berada pada titik mati atas (TMA). Proses ini biasanya diasumsikan sebagai reversibel adiabatik, maka siklus termodinamika yang terjadi ialah isentropik. Gas yang dikompresikan merupakan udara yang dibawa ke silinder dari langkah *intake* (7 - 1).

#### *Fuel Injection and Combustion (2 - 3)*

Dimulai pada posisi TMA ketika volume berada pada nilai minimum. Tidak seperti siklus *spark-engine*, tidak ada bahan bakar pada silinder. Selama proses pembakaran, bahan bakar diinjeksikan dan dibakar. Pada permodelan ideal, pembakaran digantikan dengan pemanasan pada tekanan konstan, dimana panas yang dimasukkan sama dengan energi yang dilepaskan pada pembakaran bahan bakar.

#### *Expansion (3 - 4)*

Merupakan perpanjangan dari akhir proses *injection-combustion* menuju TMB. Proses ini diasumsikan sebagai isentropik.

#### *Exhaust Blowdown (4 - 5)*

Terjadi ketika katup *exhaust* terbuka. Gas meninggalkan silinder hingga tekanan pada silinder sama dengan tekanan pada *exhaust manifold*.

#### *Exhaust (5 - 6)*

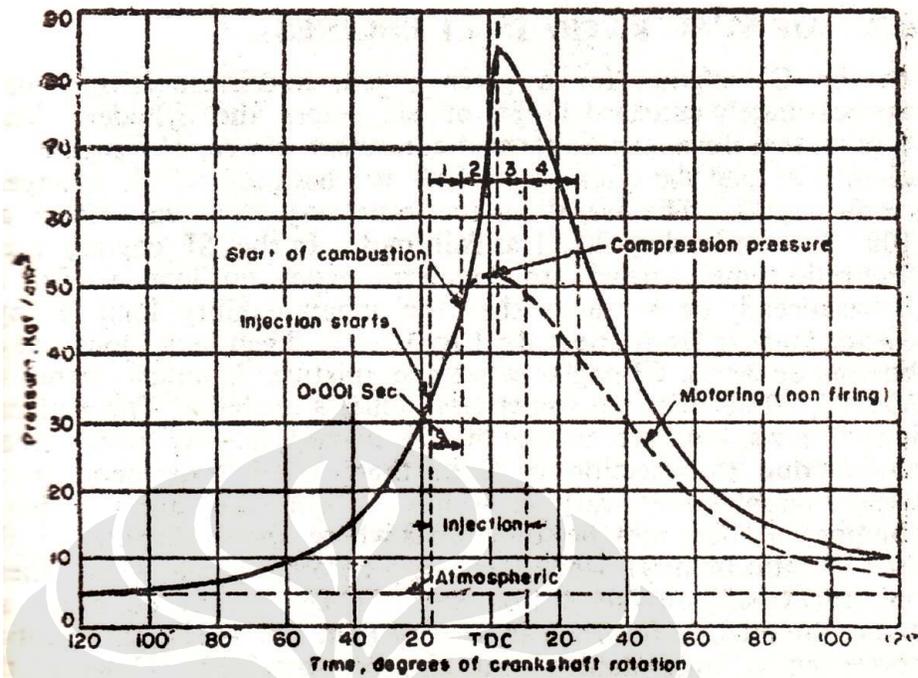
Mencakup dari TMB hingga TMA, gas pada silinder didorong keluar pada tekanan yang konstan. Pada permodelan ideal, tekanan pada katup *exhaust* diabaikan.

#### *Intake Blowdown (6 - 7)*

Terjadi ketika katup *exhaust* dalam posisi tertutup dan katup *intake* dalam posisi terbuka. Tekanan pada silinder sama dengan tekanan pada manifold *intake*.

#### *Intake (7 - 1)*

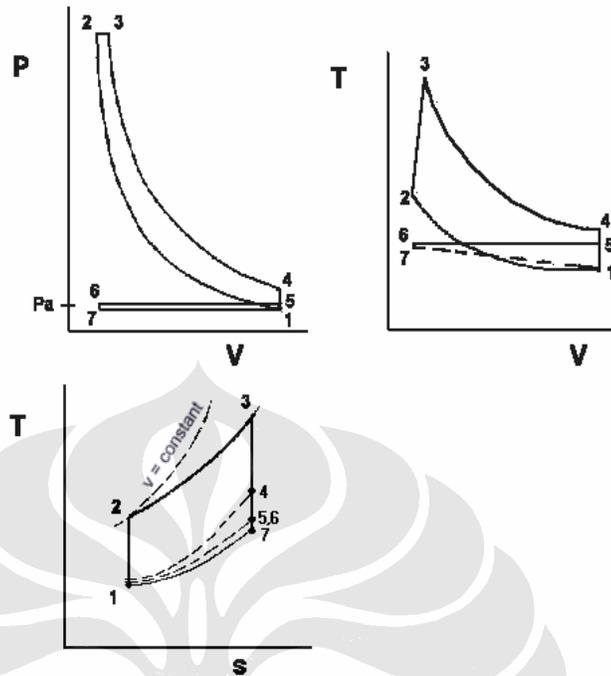
Pada saat piston menuju ke bawah, udara ditarik masuk ke silinder. Tekanan pada katup *intake* diabaikan.



Grafik 2.2. Tahap-tahap pembakaran pada CI engine

(sumber : "A Course Internal Combustion Engines". M.L. Mathur, R.P. Sharma)

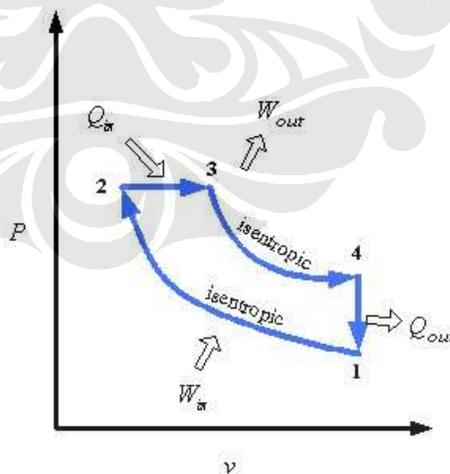
- 1 : *Ignition delay*
- 2 : *Rapid or uncontrolled combustion* = pada akhir ignition delay sampai dengan tekanan maksimal pada indicator
- 3 : *Controlled combustion* = peningkatan tekanan dapat dikontrol
- 4 : *After burning* = 70° - 80° dari TDC



Grafik 2.3. Diagram P-V, T-V dan T-s dari siklus diesel  
(sumber : "Motor Pembakaran Dalam" Bambang Sugiarto)

### 2.1.1.1 Persamaan-Persamaan Pada Siklus Diesel Ideal

Persamaan energi yang terjadi pada keempat proses adalah :



Grafik 2.4. Diagram P-V siklus Diesel ideal  
(sumber : "Motor Pembakaran Dalam" Bambang Sugiarto)

$$u_2 - u_1 = q_{12} - w_{12}$$

$$u_4 - u_3 = q_{34} - w_{34}$$

$$u_3 - u_2 = q_{23} - w_{23}$$

$$u_1 - u_4 = q_{41} - w_{41}$$

Persamaan gas ideal dapat dinyatakan dengan :

$$P.v = R.T$$

$$u = c_v.T$$

$$h = c_p.T$$

$$s = c_p \ln(T) - R \ln(P)$$

$$c_v = R/(k-1)$$

$$c_p = k.c_v$$

Maka, persamaan untuk keempat proses ialah :

### **Kompresi :**

Karena  $s_2 = s_1$ ,

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k = r_c^k$$

$$\frac{T_2}{T_1} = r_c^{(k-1)}$$

dimana  $r_c$  ialah rasio kompresi pada mesin

$$w_{12} = \frac{P_2.v_2 - P_1.v_1}{1-k} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-k} = u_1 - u_2 = c_v(T_1 - T_2)$$

$$q_{12} = 0$$

### **Combustion:**

Pada langkah ini, tekanan konstan, maka

$$w_{23} = P_2(v_3 - v_2) = P_3.v_3 - P_2.v_2 = R(T_3 - T_2)$$

$$q_{23} = (h_3 - h_2) = q_{in} = c_p(T_3 - T_2)$$

$\beta = v_3/v_2$  atau disebut juga sebagai 'cut-off ratio', karena ini merupakan perbandingan volume ketika aliran bahan bakar dihentikan dengan volume ketika aliran bahan bakar baru dimasukkan.

**Ekspansi :**

Reaksi termodinamika yang terjadi ialah isentropis, sehingga  $v_4 = v_1$ ,

$$\frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^k \quad \text{dan} \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{k-1}$$

$$q_{34} = 0$$

$$w_{34} = \frac{P_4 \cdot v_4 - P_3 \cdot v_3}{1 - k} = \frac{R(T_4 - T_{31})}{1 - k} = u_3 - u_4 = c_v(T_3 - T_4)$$

**Cooling:**

Karena volume konstan, maka

$$w_{41} = 0$$

$$q_{41} = (u_1 - u_4) = q_{out} = c_v \cdot (T_1 - T_4)$$

Energi yang terjadi pada siklus *Diesel* ini ialah :

$$W_{net} = W_{12} + W_{34}$$

- Efisiensi thermal sebesar :

$$\eta_t = \frac{w_{net}}{q_{23}} = 1 - \frac{|q_{out}|}{|q_{in}|}$$

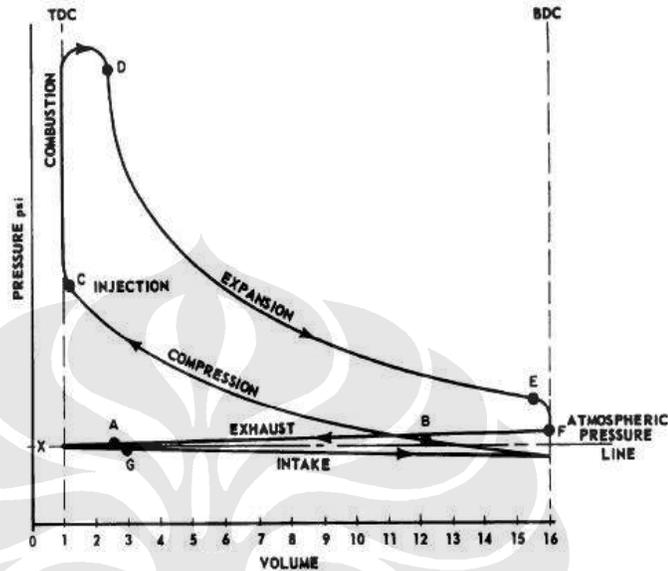
$$\eta_t = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{k(T_3 - T_2)}$$

$$\eta_t = 1 - \left(\frac{1}{r_c}\right)^{k-1} \left[ \frac{\beta^k - 1}{k(\beta - 1)} \right]$$

### 2.1.1.2 Siklus Diesel Aktual

Siklus aktual ini digunakan sebagai dasar untuk desain dari hampir semua mesin *Diesel* modern.



Grafik 2.5. Siklus Diesel aktual

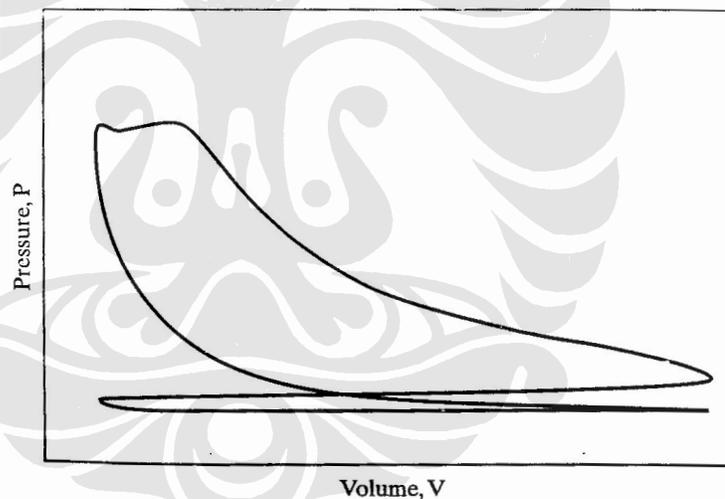
(sumber : "Motor Pembakaran Dalam" Bambang Sugiarto)

Gambar diatas merupakan diagram P-V untuk mesin *Diesel* 4-langkah. Dari gambar, dapat terlihat bahwa garis volume dibagi menjadi 16 unit. Unit-unit ini menggambarkan rasio kompresi sebesar 16 : 1. Semakin besar rasio kompresi, maka temperatur yang dibutuhkan untuk pembakaran juga semakin meningkat.

Bahan bakar diinjeksikan pada titik C, dan proses pembakaran dijabarkan dengan garis CD. Proses pembakaran pada mesin *Diesel* terjadi dengan volume yang dapat dikatakan konstan dalam waktu yang singkat. Pada periode ini terjadi kenaikan tekanan yang drastis hingga piston mencapai titik sedikit melebihi *TDC*. Kemudian, proses pembakaran berlanjut dengan tekanan yang relatif konstan yang kemudian turun perlahan hingga proses ini berhenti di titik D.

Diagram P-V untuk bahan bakar dari mesin *Diesel* yang mengoperasikan siklus 2-langkah hampir sama dengan diagram diatas. Perbedaan yang terjadi disebabkan tidak adanya saluran *exhaust* dan *intake* yang dipisah. Hal ini terjadi karena proses *intake* dan *exhaust* terjadi dalam interval waktu yang relatif singkat (meliputi BCD) dan tidak membutuhkan langkah penuh dari piston seperti dalam mesin 4-langkah. Sehingga, jika diagram siklus *Diesel* 2-langkah dianalogikan dengan diagram diatas, fase *exhaust* dan *intake* berada diantara titik E dan B dengan beberapa *overlap* pada pelaksanaannya.

Ada dua jenis perlakuan yang diterapkan agar penggunaan bahan bakar dari jenis yang berbeda dari jenis bahan bakar desainnya dapat beroperasi pada mesin diesel yang ada. Perlakuan tersebut meliputi modifikasi mesin dan *treatment* bahan bakar. Modifikasi mesin dapat dilakukan dengan perubahan sistem suplai bahan bakar misalnya dengan perubahan atau penambahan tangki bahan bakar, penambahan pemanas bahan bakar dan perubahan sistem injeksi bahan bakar. Modifikasi mesin umumnya dilakukan untuk penggunaan bahan minyak nabati (*Straight Vegetable Oil/SVO*) atau minyak hewani secara langsung dan penggunaan minyak bakar (*Marine Fuel Oil/MFO*) sebagai bahan bakar mesin diesel. *Treatment* bahan bakar dilakukan dengan membuat jenis bahan bakar yang berbeda tersebut sehingga memiliki karakteristik utama yang mirip dengan jenis bahan bakar desainnya. *Treatment* bahan bakar ini diterapkan pada penggunaan bahan bakar biodiesel sebagai bahan bakar untuk mesin diesel.



Grafik 2.6. Contoh lain penggambaran siklus diesel aktual  
(sumber : "Engineering Fundamental Of The Internal Combustion Engine" Willard W Pulkrabek)

## 2.2. BAHAN BAKAR MESIN DIESEL

Bahan bakar yang digunakan untuk pengoperasian mesin diesel umumnya berasal dari bahan bakar petroleum diesel. Khususnya di Indonesia, bahan bakar tersebut lebih dikenal dengan nama bahan bakar solar. Berdasarkan penggunaannya pada jenis putaran mesin, bahan bakar mesin diesel dibagi menjadi 2 jenis, yaitu:

1. *Automotive Diesel Oil (ADO)*. Bahan bakar ini digunakan khusus untuk mesin diesel yang termasuk dalam kategori putaran tinggi (*high speed diesel engine*) dengan kecepatan putaran mesin lebih dari 1000 rpm. Bahan bakar jenis inilah yang sering disebut sebagai solar yang pada umumnya digunakan untuk kendaraan bermotor dan pembangkit listrik tenaga diesel dengan kapasitas per unitnya kurang dari 3 MW.
2. *Industrial Diesel Oil (IDO)*, bahan bakar jenis ini digunakan untuk mesin diesel yang termasuk dalam kategori putaran rendah (*low speed diesel engine*) dengan kecepatan putaran mesin kurang dari 1000 rpm. Bahan bakar ini biasa disebut dengan minyak diesel yang pada umumnya digunakan untuk pembangkit listrik tenaga diesel dengan kapasitas per unitnya lebih besar dari 3 MW.

Bahan bakar solar memiliki karakteristik yang berbeda dengan minyak diesel. Karakteristik tersebut berhubungan dengan kemampuan terbakar sendiri (*auto ignition*), kemampuan mengalir di dalam saluran bahan bakar, kemampuan untuk teratomisasi, kemampuan lubrikasi, nilai kalor serta karakteristik lainnya. Karakteristik bahan bakar solar dan minyak diesel ditunjukkan pada Tabel II.1 berikut :

Tabel 2.1. Karakteristik Bahan Bakar Solar dan Minyak Diesel

Karakteristik	Satuan	Solar		Minyak Diesel	
		Min.	Max.	Min.	Max.
Berat Jenis pada 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	820	870	840	920
Viskositas pada 40 °C	cSt	2,0	5,0	35	45
Titik Tuang	°C	-	18	-	65
Titik Nyala	°C	60	-	150	-
Angka Setana		45	-	*)	*)
Kandungan Air	Mg/kg	-	500	-	-
	% vol			-	0,25
Kandungan Sulfur	% wt	-	0,35	-	1,5
Kandungan Abu	% wt	-	0,01	-	0,02
Kandungan Sedimen	% wt	-	0,02	-	0,01
Nilai Kalor (LHV **)	kJ/kg	40.297		*)	

sumber : Pertamina-2007 & Workshop Pemanfaatan Biodiesel sebagai Bahan Bakar Alternatif Mesin Diesel, Jakarta, 26 Mei 2005 \*\*) \*, \*) Tidak ada informasi

### 2.2.1. Kerapatan (*Density*)

Kerapatan atau massa jenis didefinisikan sebagai perbandingan antara massa fluida (bahan bakar) per satuan volume. Dalam sistem BG,  $\rho$  mempunyai satuan slugs/ft<sup>3</sup> dan dalam satuan SI adalah kg/m<sup>3</sup>. Karakteristik ini sangat berhubungan erat dengan nilai kalor dan daya yang dihasilkan oleh suatu mesin diesel per satuan bahan bakar yang digunakan. Bahan bakar solar dijual dengan satuan volume, sehingga bahan bakar sejenis yang memiliki berat jenis yang lebih besar akan mendapatkan nilai kcal/kg lebih besar pula.

### 2.2.2. Viskositas (*Viscosity*)

Viskositas dikenal sebagai tahanan yang dimiliki oleh suatu fluida bila dialirkan di dalam pipa kapiler terhadap gaya gravitasi, yang pada umumnya dinyatakan dalam satuan waktu yang dibutuhkan untuk mengalir sejauh jarak tertentu. Viskositas kinematik sering dinyatakan dalam sistem metrik CGS (centimeter-gram-second) dengan satuan dyne·s/cm<sup>2</sup>, kombinasi ini disebut poise, disingkat *P*. Dalam sistem CGS, viskositas kinematik mempunyai satuan cm<sup>2</sup>/s, dan kombinasi ini disebut stoke, disingkat *St*. Pada mesin diesel viskositas berpengaruh pada kemudahan bahan bakar untuk mengalir di dalam saluran bahan bakar dan injektor. Semakin rendah viskositasnya, maka semakin mudah bahan bakar tersebut mengalir. Selain itu viskositas juga menggambarkan tingkat pelumasan dari bahan bakar. Secara logika, viskositas bahan bakar yang lebih tinggi memiliki tingkat pelumasan yang lebih baik. Disebabkan karena fungsi solar adalah sebagai bahan bakar, maka nilai viskositas diusahakan tidak terlalu tinggi. Oleh karena itu bahan bakar solar memiliki viskositas yang relatif rendah agar bahan bakar lebih mudah teratomisasi pada saat diinjeksikan ke dalam ruang bakar dan tidak mengalami hambatan di dalam sistem pemompaan dan injeksi. Disisi lain viskositas yang terlalu rendah akan menyebabkan panas berlebihan yang ditimbulkan oleh kurangnya pelumasan pada dinding silinder dan piston sehingga membuat komponen mesin menjadi cepat aus.

### **2.2.3. Cloud Point**

Cloud point adalah temperatur terendah dimana wax/lilin yang berada di dalam minyak memisah keluar dan membentuk padatan. Padatan wax/lilin dapat menyumbat saluran dan saringan bahan bakar.

### **2.2.4. Titik Tuang (*Pour Point*)**

Titik tuang adalah suhu terendah dari bahan bakar minyak sehingga minyak tersebut masih dapat mengalir karena gaya gravitasi titik tuang ini dibutuhkan sehubungan dengan adanya persyaratan praktis dari prosedur penimbunan dan pemakaian dari bahan bakar minyak. Hal ini dikarenakan bahan bakar minyak sering sulit untuk dipompa apabila suhunya telah dibawah titik tuangnya. Titik tuang dipengaruhi oleh derajat ketidak jenuhan (angka iodium), semakin tinggi angka iodium maka nilai titik tuang akan semakin rendah. Selain itu titik tuang juga dipengaruhi oleh panjang rantai karbon, semakin panjang rantai karbon maka semakin tinggi pula nilai titik tuang. Pour point biasanya 5 – 10°C dibawah dari cloud point.

### **2.2.5. Titik Nyala (*Flash Point*)**

Titik nyala adalah suhu terendah suatu bahan bakar minyak dimana akan timbul penyalaaan api sesaat, apabila pada permukaan minyak tersebut di dekatkan nyala api

Titik nyala ini diperlukan sehubungan dengan adanya pertimbangan-pertimbangan mengenai keamanan (safety) dari penimbunan minyak dan pengangkutan bahan bakar minyak terhadap bahaya kebakaran. Titik nyala ini tidak mempunyai pengaruh yang besar dalam persyaratan pemakaian bahan bakar minyak untuk mesin diesel atau ketel uap.

### **2.2.6. Fire point**

Fire point adalah temperatur dimana flash/pancaran api dapat berlangsung secara kontinu paling tidak selama lima detik. Fire point 5-10°C diatas Flash point.

### **2.2.7. Angka Setana (*Cetane Number*)**

Pada minyak solar, angka setana menunjukkan kemampuan bahan bakar untuk menyala dengan sendirinya (*auto ignition*). Pengukuran cetane number dilakukan di CFR engine dimana dengan membandingkan delay period (13°C) antara bahan bakar uji dengan bahan bakar referensi: cetana (100) yang memiliki kualitas penyalaan tinggi dan heptamethylnonane (15) basis volume yang memiliki kualitas penyalaan rendah.

Semakin tinggi nilai setana suatu bahan bakar, maka kemampuan *auto ignition*nya akan semakin baik. Pada temperatur yang relatif rendah bahan bakar dapat dengan mudah menyala. Sebaliknya, dengan nilai setana yang rendah bahan bakar baru akan menyala pada suhu yang tinggi. Hal ini akan menimbulkan *knocking* pada mesin, sehingga pembakaran di ruang bakar tidak sempurna yang juga dapat menyebabkan penurunan performa mesin dan asap hasil pembakaran menjadi berwarna hitam. Oleh karena itu *knocking* dapat dikurangi dengan jalan menaikkan angka setana bahan bakar.

### **2.2.8. Volatility (Kemudahan Menguap)**

Volatility berkaitan dengan proses evaporasi dan pencampuran droplet dengan udara yang mana hal tersebut sangat penting bagi *ignition & burning*.

### **2.2.9. Kadar Air (*Water Content*)**

Kadar air pada bahan bakar diesel merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kinerja mesin. Adanya kandungan air pada bahan bakar meskipun dalam jumlah sedikit akan menyebabkan terjadinya penyumbatan pada saluran dan filter bahan bakar, terutama untuk negara yang memiliki musim dingin. Hal tersebut terjadi karena terbentuknya kristal-kristal es pada suhu rendah di dalam bahan bakar.

### **2.2.10. Kadar Belerang (*Sulfur Content*)**

Kadar belerang dalam bahan bakar diesel dari hasil penyulingan pertama (*straight-run*) sangat bergantung pada asal minyak mentah yang akan diolah. Minyak mentah yang mengandung kadar belerang tinggi akan berpengaruh

terhadap ketahanan mesin diesel. Kandungan belerang yang berlebihan akan menyebabkan keausan pada komponen mesin. Hal ini terjadi disebabkan oleh adanya partikel-partikel padat yang terbentuk pada saat pembakaran, selain itu juga dapat disebabkan oleh adanya oksida belerang, seperti  $\text{SO}_2$  dan  $\text{SO}_3$ .

### **2.3. BAHAN BAKAR BIOFUEL**

Bahan bakar *biofuel* adalah bahan bakar yang dihasilkan dari sumber daya hayati. Bahan bakar biofuel yang ada umumnya terdiri dari 3 jenis yaitu biodiesel, *straight vegetable oil (SVO)* dan bioethanol. Biodiesel adalah bahan bakar mesin diesel yang berasal dari sumber daya nabati dan hewani yang diproses melalui reaksi kimia transesterifikasi trigliserida sehingga didapat struktur metil ester atau etil ester. *Straight vegetable oil (SVO)* adalah bahan bakar mesin diesel yang berasal dari minyak tumbuh-tumbuhan yang merupakan struktur trigliserida dan dipergunakan secara langsung tanpa proses kimia transesterifikasi. Bioethanol atau yang biasa disebut gasohol adalah bahan bakar mesin bensin yang dihasilkan dari pati tumbuh-tumbuhan dan nira.

#### **2.3.1. Bahan Bakar Biodiesel**

Biodiesel umumnya dibuat melalui reaksi metanolis (atau etanolis) minyak-minyak nabati atau hewani dengan alkohol (metanol atau etanol). Bahan bakar ini murni, bersih, bebas sulfur, dan hemat karena harga yang lebih murah dan juga dapat menghasilkan lapangan pekerjaan baru dengan adanya proyek pembuatan biodiesel ini. Biodiesel ini dapat dibuat dari minyak kelapa sawit (CPO), minyak jagung, minyak jarak, dan lain-lain. Produk samping reaksi ini adalah gliserin, suatu bahan kimia yang juga berpangsa-pasar besar. Biodiesel dapat dimanfaatkan secara murni ataupun dalam bentuk campuran dengan minyak solar tanpa mengharuskan adanya modifikasi signifikan pada mesin kendaraan. Bentuknya yang cair dan kemampuan dicampurkan dengan solar pada segala perbandingan merupakan salah satu keunggulan penting biodiesel. Pemanfaatannya secara komersial tidak memerlukan infrastruktur penyediaan yang baru, karena dapat langsung menggunakan infrastruktur yang sudah ada

untuk penyediaan minyak solar (stasiun pengisian, truk tangki, dispenser, dan lain-lain).

Sampai saat ini berbagai negara sudah memproduksi dan menggunakan biodiesel secara komersial dengan memanfaatkan bahan mentah minyak nabati yang banyak tersedia diwilayahnya. Negara-negara seperti : Jerman, Perancis, dan Austria menggunakan biodiesel berbahan baku minyak lemak dari tanaman Kanola (*repeseed*) yang tumbuh baik di negara subtropis. Amerika Serikat (USA) bertumpu pada minyak kedelai (*soybean*), Spanyol pada minyak zaitun (*olive oil*), Italia pada minyak bunga matahari (*sunflower oil*), Mali dan Afrika Selatan pada minyak jarak pagar, Filipina pada minyak kelapa dan Malaysia pada minyak sawit. Selain itu di beberapa kota besar di negara maju juga memanfaatkan minyak jelantah (*used frying oil*).

#### 2.3.1.1 Flash Point Bahan Bakar Biodiesel

Flash point merupakan suatu ukuran seberapa natural nyala api bahan bakar tersebut, atau titik temperatur dimana permukaan bahan bakar akan menangkap api atau terbakar. Berikut titik nyala api biodiesel dibandingkan dengan bakar bakar lain.

Tabel 2.2 Flash point biodiesel

Bahan bakar	Flash Point
Bensin	7.2 °C
Solar	51.6 °C
Biodiesel	148.8 °C

Dari perbandingan diatas dapat dilihat bahwa biodiesel lebih aman karena memiliki titik nyala yang jauh lebih besar.

#### 2.3.1.2 Biodiesel Properties Dan Emisi Mesin

Table 2.3. Biodiesel Fuel properties

	Fuel Weight Kg/m <sup>3</sup> .	Heat of Combustion Joule/m <sup>3</sup>	Cetane Number	Viscosity Centistokes
No. 2 diesel	844.7	39	48	3.0
100% Biodiesel (B100)				

Methyl or ethyl ester	874.7	36.2	55	5.7
B20 mix (20/80)	850.7	38.5	50	3.3
Raw vegetable oil	898.7	36.2	35 to 45	40 to 50

Table 2.4. Hasil emisi engine

Emission	100% Ester Fuel (B100)	20/80 Mix (B20)
Hydrocarbons	- 52.4%	-19.0%
Carbon Monoxide	- 47.6%	-26.1%
Nitrous Oxides	- 10.0%	-3.7%
Carbon Dioxide	+ 0.9%	+ .7%
Particulates	+ 9.9%	-2.8%

sumber : University of Idaho

Table 2.5 Bahan bakar potensial

Crop	m <sup>2</sup> in State (juta)	Yield	Oil (%)	m <sup>3</sup> (per m <sup>2</sup> )
Soybean	8,498	4.07 Kg/m <sup>2</sup>	18	4.58E-5
Sunflower	4,451	0.15 Kg/m <sup>2</sup>	44	7.85E-5
Canola	4,856	0.14 Kg/m <sup>2</sup>	43	7.1E-5

sumber : North Dakota oil crops (2001)

### 2.3.2. Bahan Bakar CPO

Bahan bakar CPO termasuk jenis *straight vegetable oil (SVO)* dan memiliki komposisi kimia yang sama dengan *vegetable oil* yaitu triglycerol ( $C_3H_8(OOCR)_3$ ) dengan struktur seperti gambar II.1 diatas. Struktur kimia CPO ini berbeda dengan struktur kimia biodiesel yang berupa asam lemak (alkyl ester & methyl ester) ( $3RCOOH$ ). Pengolahan CPO menjadi biodiesel akan menimbulkan penurunan berat molekul dari bahan bakar nabati tersebut sebesar 30% dan penurunan viskositas yang cukup signifikan.

Pemanfaatan *straight vegetable oil* sebagai bahan bakar mesin diesel pada mulanya dilakukan oleh Rudolf Diesel pada tahun 1900 dengan menggunakan minyak kacang tanah (*peanut oil*). Pengujian tersebut dilakukan dengan menggunakan bahan bakar minyak kacang tanah pada mesin diesel yang didesain menggunakan bahan bakar solar (petroleum oil) tanpa merubah atau memodifikasi mesin. Hasil pengujian menyebutkan bahwa pengoperasian mesin diesel dapat berjalan dengan baik tanpa adanya kesulitan yang berarti dengan konsumsi bahan bakar sebesar 240 gram/BHP pada nilai kalor bahan bakar sebesar 8.600 kalori/kg. Penggunaan bahan bakar minyak nabati secara langsung juga digunakan

oleh Amerika pada saat perang dunia ke 2 dengan memanfaatkan minyak biji kapas dan minyak jagung. Walton J tahun 1938 menyampaikan bahwa terdapat 20 jenis *vegetable oil* (jarak/*castor*, biji anggur/*grapeseed*, *maize*, *camelina*, biji labu/*pumpkinseed*, *beechnut*, lobak/*rapeseed*, *lupin*, *pea*, *poppyseed*, kacang tanah/*peanut*, ganja/*hemp*, rami/*linseed*, *chestnut*, biji bunga matahari/*sunflower seed*, sawit/*palm*, zaitun/*olive*, kedelai/*soybean*, biji kapas/*cottonseed*, and *shea butter*) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel.

Penggunaan minyak nabati sebagai bahan bakar mesin diesel dikarenakan adanya persamaan sifat-sifat atau karakteristik minyak nabati dengan petrodiesel. Adanya persamaan karakteristik disini tidak berarti mutlak seluruh parameter minyak diesel harus sama dan terpenuhi pada minyak nabati. Parameter utama yang paling penting agar penggunaan bahan bakar minyak nabati dapat dilakukan secara langsung sebagai bahan bakar mesin diesel adalah viskositas bahan bakar, asam lemak bebas, density, titik nyala dan nilai kalor bahan bakar. Karakteristik bahan bakar minyak sawit dan biodiesel ditunjukkan pada Tabel 2.2 berikut :

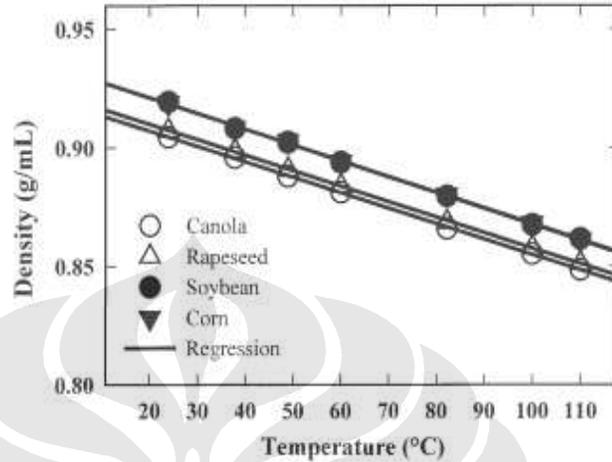
Tabel 2.6. Karakteristik Minyak Sawit CPO dan Biodiesel

No	Uraian	Unit	Biodiesel	Minyak Sawit CPO *)
1	Kinematic Viscosity at 40°C	cSt	2.3 – 6	45.898
2	Density at 40 °C	gr/cm <sup>3</sup>	0.85 – 0.90	-
3	Density at 15 °C	gr/cm <sup>3</sup>	-	0,9232
4	Total Acid Number (TAN)	mg KOH/gr	< 0.8	7,8
5	Flash Point	°C	> 100	239
6	Water Content	% vol	< 0.05	0,05
7	Cetane Index		62.1 **)	62,5
8	Heating Value	kJ/kg	37.114 **)	36.711

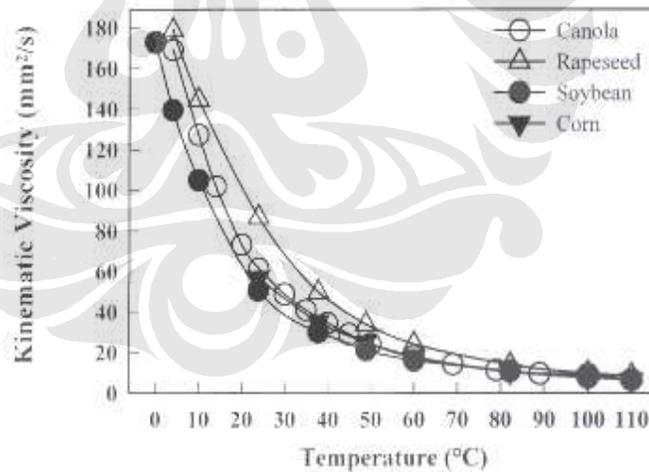
sumber : BPPT, *Standard Biodiesel Indonesia (SNI), Workshop Pemanfaatan Biodiesel sebagai Bahan Bakar Alternatif Mesin Diesel, Jakarta, 26 Mei 2005 \*\*), [www.coderat.com](http://www.coderat.com) \*)*

Karakteristik viskositas dan density (berat jenis) bahan bakar minyak nabati jenis *straight vegetable oil (SVO)* sangat tergantung pada perubahan temperatur bahan bakar. Hal ini yang menyebabkan bahan bakar tersebut dijual

berdasarkan satuan berat (kg atau ton), sedangkan bahan bakar petrodiesel dijual dengan satuan volume (liter atau barrel). Pengaruh perubahan temperatur terhadap viskositas dan densitas ditunjukkan pada gambar 2.2 dan 2.3 dibawah ini.



Grafik 2.7. Pengaruh Temperatur terhadap Densitas Bahan Bakar Nabati  
(sumber : "Canola Oil : Physical and Chemical Properties" Dr. Roman Przybylsk)



Grafik 2.8. Pengaruh Temperatur terhadap Viskositas Bahan Bakar Nabati  
(sumber : "Canola Oil: Physical and Chemical Properties" Dr. Roman Przybylsk)

Di Indonesia, pemanfaatan minyak tumbuhan secara langsung sebagai bahan bakar mesin diesel saat ini belum berkembang dengan baik dibandingkan pemanfaatan biodiesel dengan mengkonversikan minyak nabati menjadi ester (metil atau etil ester). Hal ini disebabkan karena adanya pandangan bahwa pada

proses thermal (panas) di dalam mesin akan menyebabkan minyak nabati terurai menjadi gliserin dan asam lemak. Asam lemak dapat teroksidasi atau terbakar relatif sempurna, akan tetapi gliserin akan menghasilkan pembakaran yang kurang sempurna dan dapat terpolimerisasi menjadi senyawa plastis yang agak padat. Senyawa ini akan menyebabkan kerusakan pada mesin, karena membentuk deposit pada pompa injektor. Oleh karena itu perlu dilakukan modifikasi pada mesin-mesin kendaraan bermotor komersial apabila menggunakan minyak tumbuhan langsung (100 %) sebagai bahan bakar pengganti solar / minyak diesel.

## 2.4. PARAMETER UNJUK KERJA MESIN DIESEL

Beberapa parameter yang dicatat selama pengujian unjuk kerja mesin digunakan sebagai data mentah yang kemudian diolah menjadi data hasil pengujian. Dari data hasil pengujian akan terlihat ada tidaknya peningkatan atau penurunan performa mesin yang diuji dengan menggunakan bahan bakar CPO 100% dan campurannya dengan solar. Hasil pengujian tersebut ditunjukkan dengan parameter *Fuel Consumption*, *Specific fuel consumption*, Daya, Effisiensi Thermal dan komposisi gas buang yang pada pengujian ini akan diukur opasitasnya. Hasil akhir dari pengujian bahan bakar CPO 100% dan campurannya dengan solar pada variasi campuran yang didapat akan dibandingkan dengan bahan bakar solar murni sebagai pembanding (dasar acuan) dan direpresentasikan ke dalam bentuk grafik karakteristik mesin diesel genset. Berikut ini akan diuraikan metode perhitungannya, sedangkan tabel data mentah serta tabel hasil perhitungan disertakan pada Lampiran.

### 2.4.1 Laju Konsumsi Bahan Bakar (FC)

Konsumsi bahan bakar per satuan waktu (*FC – Fuel Consumption*) dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$FC = \frac{3600 \times V_g}{t} \quad [\text{L/HR}]$$

dimana :  $V_g$  = Volume bahan bakar yang dipergunakan [liter]

$t$  = waktu yang dibutuhkan [detik]

#### 2.4.2. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC)

Persamaan untuk menghitung Konsumsi Bahan Bakar Spesifik ( *Specific Fuel Consumption* ) adalah sebagai berikut :

$$SFC = \frac{m_{bb}}{E} = \frac{m_{bb}}{W.t}$$

dimana: SFC = Spesific fuel oil consumption (kg/kWh)  
E = Energi yang terukur (kWh)  
W = Daya yang dihasilkan (kW)  
t = waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi (s)  
 $m_{bb}$  = jumlah bahan bakar (kg) =  $V_g * \rho$   
 $V_g$  = volume bahan bakar yang dipergunakan (L/hr)  
 $\rho$  = berat jenis bahan bakar (kg/L)

#### 2.4.3. Daya Listrik yang Dihasilkan

Keluaran daya listrik yang dihasilkan mesin diesel genset diukur dengan bantuan Watthour meter pada satuan waktu pengukuran. Besarnya Daya listrik yang dihasilkan ditentukan berdasarkan persamaan sebagai berikut:

$$W = \frac{E}{t}$$

dimana ; W = Daya listrik yang dihasilkan (kW)  
E = Energi listrik yang terukur (kWh)  
t = waktu pengukuran (s)

#### 2.4.4. Jumlah Input Energi Bahan Bakar

Jumlah kalor masuk ( $Q_m$ ) dirumuskan:

$$Q_m = m_{bb} * LHV$$

dimana:  $Q_m$  = jumlah kalor masuk (kcal)  
LHV = nilai kalor bawah bahan bakar (kcal/kg)  
 $m_{bb}$  = jumlah bahan bakar (kg)

#### 2.4.5. Efisiensi Thermal ( $\eta_{th}$ )

Efisiensi thermal dari mesin diesel genset menyatakan besarnya efektifitas energi bahan bakar yang disuplai ke ruang bakar dalam menghasilkan kerja. Efisiensi thermal dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$\eta_{th} = \frac{Output}{Input} * 100\% = \frac{E}{Q_m} * 100\% = \frac{W.t}{m_{bb} * LHV} * 100\%$$

dimana:

- $\eta_{th}$  = Efisiensi thermal
- E = Energi yang terukur (kWh)
- W = Daya listrik yang dihasilkan (kW)
- t = waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi (s)
- $Q_m$  = jumlah kalor masuk (kcal)

#### 2.4.6. Emisi Gas Buang

Dewasa ini masalah pencemaran dan polusi udara di dunia, yang sebagian besar disebabkan oleh gas buang kendaraan bermotor, terus meningkat. Hal ini memberi dampak yang sangat berbahaya bagi kehidupan manusia dan lingkungan hidup. Dampak yang berbahaya seperti efek rumah kaca (*Green House Effect*), menipisnya lapisan ozon, kerusakan sistem pernapasan manusia, keracunan yang menyebabkan kematian dan banyak lagi dampak berbahaya lainnya. Semua itu disebabkan oleh zat-zat yang terkandung dalam emisi gas buang kendaraan bermotor tidak sesuai dengan kadar batas yang diizinkan. Zat-zat berbahaya yang terkandung dalam gas buang dari kendaraan bermotor, antara lain : CO (karbon monoksida), HC (hidrokarbon), CO<sub>2</sub> (karbon dioksida), NO<sub>x</sub>, dan beberapa zat berbahaya lainnya. Zat-zat berbahaya pada gas buang kendaraan bermotor tersebut dihasilkan melebihi ambang batas oleh kendaraan bermotor jika terjadi pembakaran yang tidak sempurna oleh mesin kendaraan tersebut.

Oleh karena itu, untuk mengurangi tingkat pencemaran dan polusi udara di dunia, hampir setiap negara mulai memberlakukan peraturan mengenai emisi gas buang kendaraan bermotor yang sesuai standar dan sesuai batas ambang tidak berbahaya. Jadi, setiap kendaraan bermotor harus diperiksa apakah emisi gas buangnya tidak melebihi batas-batas yang telah ditentukan, biasanya dinamakan

uji emisi. Untuk mengetahui emisi gas buang dari kendaraan bermotor diperlukan alat untuk mengetahui kadar atau komposisi dari gas buang tersebut. Alat untuk mengetahui emisi gas buang dari kendaraan bermotor dibagi menjadi dua, untuk kendaraan bermotor dengan berbahan bakar bensin (mesin *Otto*) dinamakan *Exhaust Gas Analyzer*, dan untuk yang berbahan bakar solar (mesin *Diesel*) dinamakan *Smoke Analyzer*.

Dengan menggunakan alat ini, tidak hanya kadar emisi gas buang kendaraan bermotor yang dapat diketahui tetapi juga dapat mengetahui bagaimana performa sebuah mesin dari hasil kadar emisi gas buang itu sendiri. Dari hasil emisi gas buang, dapat diketahui apakah pembakaran pada mesin sempurna atau tidak. Sempurna atau tidaknya pembakaran pada mesin tergantung pada campuran bahan bakar dengan udara, apakah campurannya terlalu banyak bahan bakarnya (campuran kaya) atau terlalu banyak udaranya (campuran kurus).

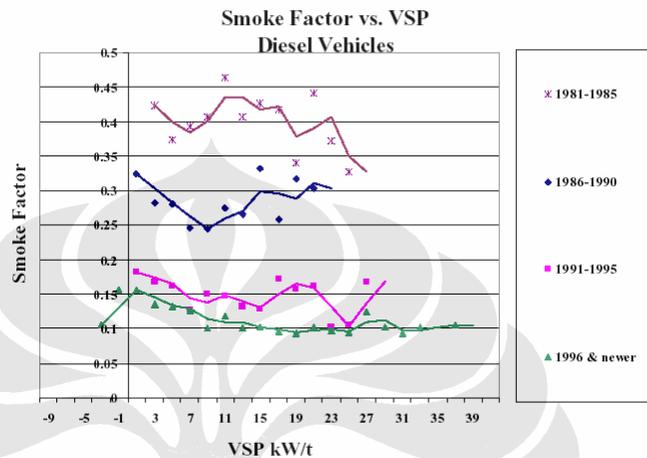
Pada bagian selanjutnya akan dibahas mengenai alat yang dipakai untuk mengukur gas buang hasil pembakaran pada pengujian ini yaitu *Smoke Analyzer*

#### 2.4.6.1. *Smoke Analyzer*

*Exhaust Diesel* menghasilkan lebih dari 400 campuran partikel berbeda, uap dan material racun organik, yang disebabkan akibat proses pembakaran bahan bakar. Beberapa racun yang ditemukan pada *exhaust Diesel* antara lain :

- *carbon monoxide*
- *sulfur dioxide*
- *arsenic*
- *acetaldehyde*
- *benzene*
- *formaldehyde*
- *inorganic lead*
- *manganese compounds*
- *mercury compounds*
- *methanol*
- *phenol*
- *cyanide compounds*

Tingkat polutan pada kendaraan juga tergantung pada tahun pembuatan, kebanyakan mobil tua menghasilkan asap yang lebih banyak sehingga menghasilkan polutan yang besar pula. Dibawah ini ditampilkan grafik perbandingan antara *smoke factor* yang diakibatkan berdasarkan daya per waktu yang dihasilkan yang dikaitkan dengan tahun pembuatan mobil.



Grafik 2.9. Pengaruh asap terhadap tenaga per satuan waktu yang dihasilkan mesin

(sumber : "Motor Pembakaran Dalam" Bambang Sugiarto)

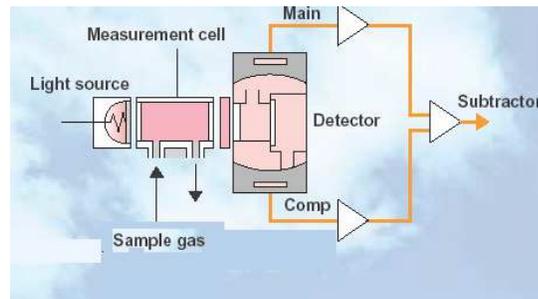
Oleh karena itu, harus ada proses pencegahan agar efek dari *exhaust Diesel* dapat dikurangi sehingga tidak membahayakan bagi lingkungan. Untuk mengetahui tingkat polutan pada *exhaust Diesel* digunakan *smoke analyzer*. *Smoke analyzer* ini digunakan untuk mengukur nilai opasitas suatu *exhaust Diesel*.



Gambar 2.7 Portable smoke analyzer

(sumber : "Motor Pembakaran Dalam" Bambang Sugiarto)

#### 2.4.6.4.1. Cara Kerja Smoke Analyzer



Gambar 2.8 Diagram skematik smoke analyzer  
(sumber : "Motor Pembakaran Dalam" Bambang Sugiarto)

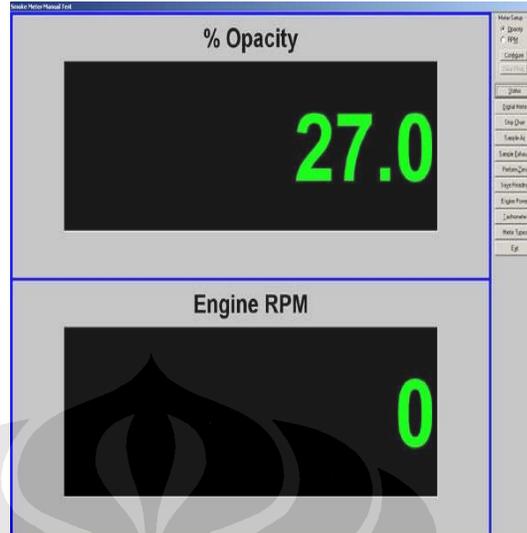
Sampel gas dimasukkan kedalam *measurement cell*, *light source* memancarkan sinar, apabila *receiver* menerima sinar secara penuh berarti opasitas 0% dan jika sinar tidak diterima sama sekali berarti opasitas 100%, jadi makin besar cahaya yang dikirim terganggu dibaca oleh *receiver* maka makin besar nilai opasitasnya.



Gambar 2.9. Aplikasi penggunaan smoke analyzer  
(sumber : "Motor Pembakaran Dalam" Bambang Sugiarto)

Saat digunakan, *probe smoke analyzer* biasa diletakkan pada sistem *exhaust* knalpot, setelah itu mesin dijalankan pada rpm tertentu hingga didapatkan nilai opasitas yang konstan.

#### 2.4.6.4.2 Tampilan Dari Smoke Analyzer



Gambar 2.10. Contoh hasil pengujian smoke analyzer  
(sumber : "Motor Pembakaran Dalam" Bambang Sugiarto)

Gambar diatas adalah contoh tampilan keluaran dari pengujian *smoke analyzer*. Dapat dilihat bahwa pada saat mesin 0 rpm, tingkat opasitasnya 27 %.



Gambar 2.11. Hasil pengukuran smoke analyzer  
(sumber : "Motor Pembakaran Dalam" Bambang Sugiarto)

Tampilan gambar diatas menunjukkan hasil dari *smoke analyzer* dalam bentuk grafik dimana pada contoh diatas mesin dipertahankan melakukan putaran 3000 rpm sampai 3400 rpm.

Pada pengujian mesin Diesel sebagai parameter untuk gas buang adalah Opasitas atau kadar kepekatan asap, Total Oxides of Nitrogen (NO<sub>x</sub>), Total Particulate Matter <10 μm (PM-10 or PM), Carbon Monoxide (CO), and Total Hydrocarbon (THC) mengacu prosedur pengetesan yang ditetapkan oleh Environmental Protection Agency (EPA). Namun pada pengujian mesin Diesel ini hanya Opasitas atau kadar kepekatan asap yang menjadi parameter gas buang (dimana standar pengujian yang dipakai standard pengujian ISO 3046 dan uji laik operasi SPLN/ No. 47-5, 1986) yang ditunjukkan dengan persentase dari cahaya yang dapat diterima pada sensor kepekatan (100% = pekat sempurna, 0%= cahaya dapat diteruskan).

