

## **BAB 2**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Motor Diesel**

Motor pembakaran dalam didefinisikan sebagai mesin kalor yang berfungsi mengkonversikan energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi mekanis dan prosesnya terjadi di dalam suatu ruang bakar yang tertutup. Energi kimia dalam bahan bakar terlebih dahulu diubah menjadi energi termal melalui proses pembakaran. Energi termal yang diproduksi akan menaikkan tekanan yang kemudian menggerakkan mekanisme pada mesin seperti torak, batang torak, dan poros engkol.

##### **1.1.1 Siklus Kerja Motor Diesel**

Siklus Kerja mesin Diesel 4 langkah, pada prinsipnya hampir sama dengan mesin Otto, dimana piston bergerak secara translasi dari Titik Mati Atas (TMA) ke Titik Mati Bawah (TMB) dan sebaliknya berulang-ulang sebanyak 4 kali dalam satu siklus. Urutan Siklusnya sebagai berikut.

##### **1. Langkah Hisap (Intake)**

Katup hisap terbuka dan piston bergerak dari TMA ke TMB, menghisap udara pada tekanan mendekati atmosfer yang menjadikan ruang bakar terisi udara.

##### **2. Langkah Kompresi (Compression)**

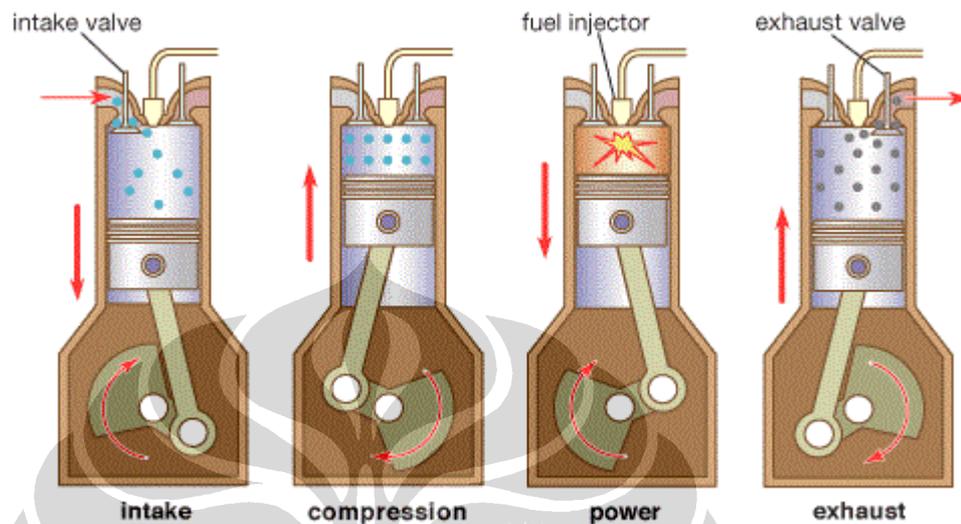
Semua katup tertutup dan piston bergerak dari TMB ke TMA, mengkompresi udara sehingga menaikkan suhu dan tekanan. Injeksi bahan bakar terjadi persis sebelum TMA dan segera sesudahnya terjadi pembakaran yang menyebabkan kenaikan suhu dan tekanan cukup tinggi.

##### **3. Langkah Ekspansi (Power)**

Semua katup tertutup dan piston bergerak dari TMA ke TMB, mengekspansi ruang bakar sehingga mengurangi suhu dan tekanannya.

#### 4. Langkah Buang (Exhaust)

Katup buang terbuka dan piston bergerak dari TMB ke TMA, membuang semua hasil pembakaran dan menyelesaikan siklus.



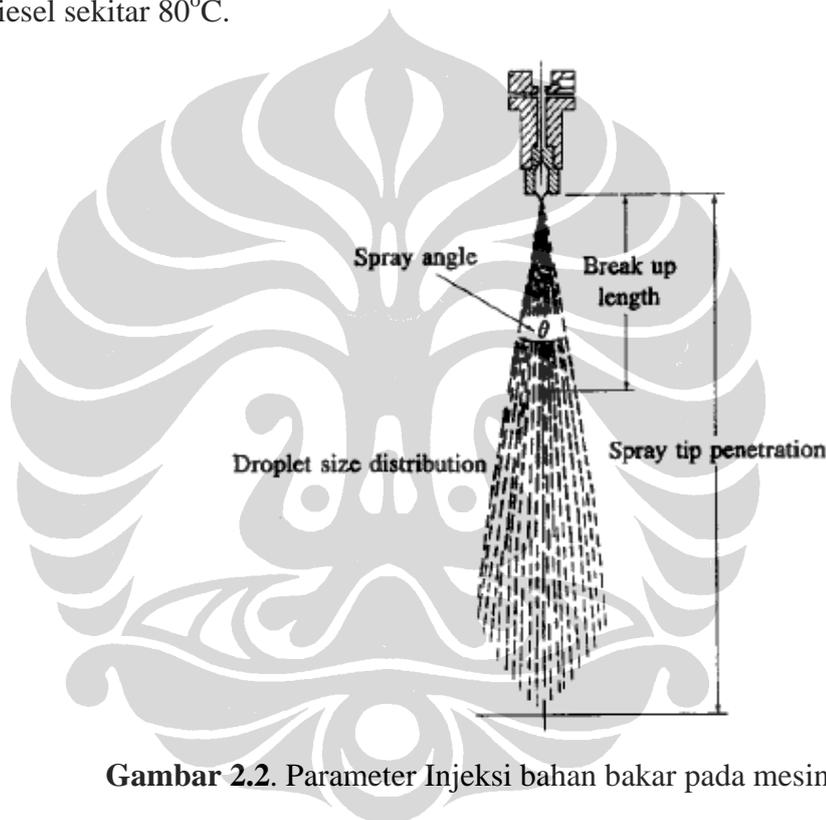
**Gambar 2.1.** Proses Kerja Motor Diesel Empat Langkah

#### 1.1.2 Sauter Mean Diameter (SMD)

Karakterisasi pengkabutan (atomisasi) biodiesel sangat membantu dalam memprediksi kualitas pencampuran bahan bakar udara dan kualitas pembakaran. Hasil analisa karakteristik pengkabutan dapat digunakan sebagai gambaran awal tentang unjuk kerja pada mesin dan dapat digunakan untuk mempersingkat waktu simulasi unjuk kerja dengan software. Parameter kualitas pengkabutan yang terpenting adalah ukuran butiran bahan bakar setelah diinjeksi yaitu SMD (Sauter Mean Diameter). SMD didefinisikan sebagai diameter butiran bahan bakar dimana rasio volume terhadap permukaan-nya sama dengan kabut bahan bakar (*spray*). Besaran SMD ditentukan oleh viskositas, densitas dan tegangan permukaan bahan bakar. Perhitungan ketiga parameter tersebut telah diuraikan pada paragraph sebelumnya. Korelasi paling relevan antara diameter butiran dengan viskositas ( $\nu_m$ ), densitas ( $\rho_m$ ) dan tegangan permukaan bahan bakar ( $\gamma_m$ ) adalah persamaan Elkoth [9] berikut:

$$SMD = 6156 \cdot (\nu_m)^{0,385} \cdot (\gamma_m)^{0,737} \cdot (\rho_m)^{0,737} (\rho_m)^{0,06} \cdot (\Delta P_L)^{-0,54}$$

Dimana  $\rho_a$  adalah densitas udara ( $\text{kg/m}^3$ ) dalam ruang bakar dan  $\Delta P_L$  adalah perbedaan tekanan antara saluran sistem injeksi dan ruang bakar. Satuan SMD,  $v_m$ ,  $\rho_m$  dan  $\gamma_m$  adalah  $\mu\text{m}$ ,  $\text{m}^2/\text{detik}$ ,  $\text{kg/m}^3$  dan  $\text{N/m}$ . Persamaan tersebut telah digunakan oleh Ejim et al [9] untuk memprediksi ukuran butiran hasil injeksi pada mesin diesel injeksi langsung (DI). Hasil perhitunga SMD menggunakan persamaan tersebut juga tidak menunjukkan variasi yang signifikan jika tipe injektor dan geometri injektor berubah. Viskositas, densitas dan tegangan permukaan yang digunakan dalam perhitungan ini adalah pada temperatur mesin diesel sekitar  $80^\circ\text{C}$ .

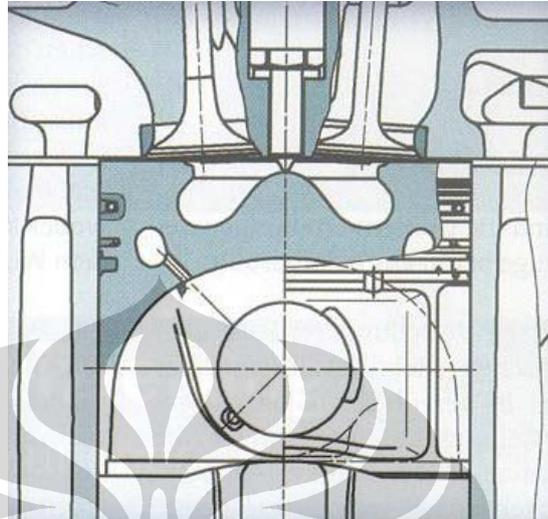


Gambar 2.2. Parameter Injeksi bahan bakar pada mesin Diesel

### 1.1.3 Pembakaran dalam Ruang Bakar Mesin Diesel

Dalam mesin Diesel injeksi langsung, bahan bakar disemprotkan ke dalam ruang bakar tepat di atas piston. Pada umumnya piston memiliki mangkuk (bowl) yang dirancang untuk membatasi udara ke dalam daerah yang sesuai dengan lintasan semprotan bahan bakar. Piston jenis ini bergantung pada momentum semprotan sehingga terjadi campuran bahan bakar dengan udara. Kelemahan dari sistem semacam ini adalah besarnya kemungkinan bahan bakar yang tidak terbakar menempel pada dinding silinder dapat melewati *ring piston* ke *crankcase*.

Ketika mesin ini dioperasikan pada bahan bakar dengan volatilitas yang rendah, sebagian dari bahan bakar yang lambat menguap dapat menempel pada dinding silinder sehingga berakibat menipiskan minyak pelumas.

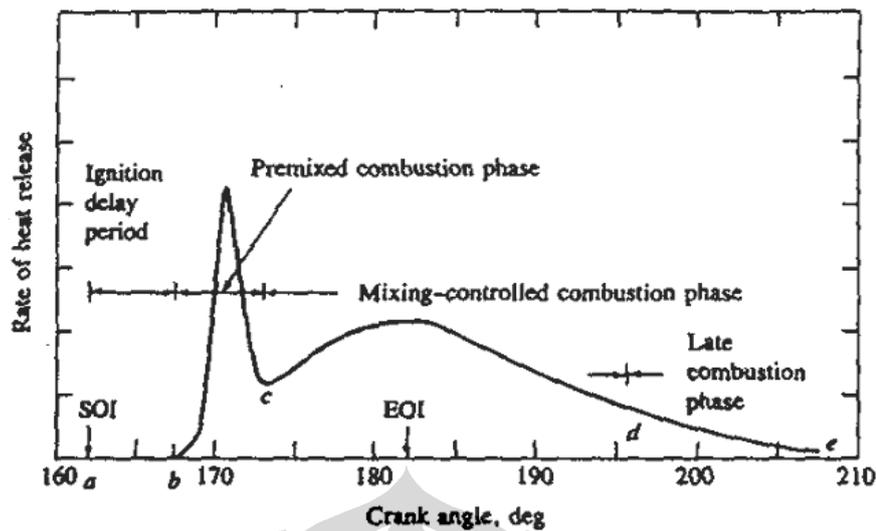


**Gambar 2.3.** Model geometri mesin Diesel Injeksi langsung

Proses injeksi bahan bakar pada mesin Diesel terjadi persis sebelum TMA, dengan tekanan yang sangat tinggi menggunakan satu atau lebih injektor. Injektor akan menghasilkan pola semprotan dengan keadaan 100% bahan bakar di intinya dan 100% udara dibagian luarnya. Percampuran semprotan bahan bakar dan udara harus terjadi, dengan udara berputar-putar, sehingga terjadi percampuran optimal dan tercapailah kinerja yang menghasilkan emisi yang sesuai standar.

#### **1.1.4 Pembakaran Pada Mesin Diesel Injeksi Langsung**

Secara garis besar proses pembakaran pada motor Diesel *direct injection* (DI) terbagi menjadi empat tahap, yaitu *Ignition delay*, *Premixed or rapid combustion phase*, *Mixing –controlled combustion phase*, *Late combustion phase*



Gambar 2.4. Tipikal Diagram Kecepatan *Heat Release* pada Pembakaran Mesin Diesel Injeksi Langsung

**a) Fase persiapan pembakaran a-b (*Ignition delay*).**

*Ignition delay* adalah waktu yang diperlukan antara bahan bakar mulai disemprotkan dengan saat mulai terjadinya pembakaran. Waktu pembakaran bergantung pada beberapa faktor, antara lain pada tekanan dan temperatur udara pada saat bahan bakar mulai disemprotkan, gerakan udara dan bahan bakar, jenis dan derajat pengabutan bahan bakar, serta perbandingan bahan bakar - udara lokal. Jumlah bahan bakar yang disemprotkan selama periode persiapan pembakaran tidaklah merupakan faktor yang terlalu menentukan waktu persiapan pembakaran.

**b) Fase pembakaran cepat b-c (*premixed or rapid combustion phase*)**

Pada fase ini udara dan bahan bakar yang telah tercampur (*air-fuel mixture*) akan terbakar dengan cepat dalam beberapa derajat. Proses pembakaran tersebut terjadi dalam suatu proses pengecilan volume (selama piston masih bergerak menuju ke *top dead center*). Sampai piston bergerak kembali beberapa derajat sudut engkol sesudah TDC, tekananya masih bertambah besar tetapi laju kenaikan tekanan yang seharusnya terjadi dikonvensasikan oleh bertambah besarnya volume ruang bakar sebagai akibat bergerak piston dari TDC ke BDC (*bottom*

*dead center*). Pada *premixed* terjadi kenaikan tekanan dan temperatur secara drastis.

**c) Fase pembakaran terkendali c-d (*mixing controlled combustion phase*).**

Setelah campuran bahan bakar-udara (*air-fuel mixture*) terbakar pada fase *premixed*, kecepatan pembakaran ditentukan oleh tersedianya campuran yang siap terbakar. Beberapa proses yang terjadi disini adalah antara lain *atomisasi* bahan bakar, penguapan, pencampuran dengan udara dan reaksi kimia, sehingga proses pembakaran ditentukan oleh proses pencampuran antara udara dan bahan bakar.

**d) Fase pembakaran lanjutan d-e (*late combustion phase* )**

Pada fase ini terjadi proses penyempurnaan pembakaran dan pembakaran bahan bakar yang belum sempat terbakar. Pelepasan energi akan terus berlangsung dengan kecepatan rendah sampai langkah *ekspansi*.

Ada beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya pembakaran lanjut ini antara lain sebagian kecil bahan bakar belum terbakar dan sebagian energi bahan bakar tersebut menjadi *soot* dan produk pembakaran campuran kaya, yang energinya masih dapat terlepas.

## **2.2. Prinsip Dasar CFD**

CFD adalah suatu teknik analisa dari suatu sistem meliputi aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena yang terlibat didalamnya seperti reaksi kimia dengan bantuan komputer berdasarkan simulasi.

Pada CFD semua kodenya terdiri dari tiga unsur utama yaitu:

a). *Pre processor*, melibatkan definisi geometri dari daerah yang dianalisa, pengembangan *grid*, pemilihan fenomena fisik yang diperlukan dan spesifikasi dari kondisi batas yang sesuai.

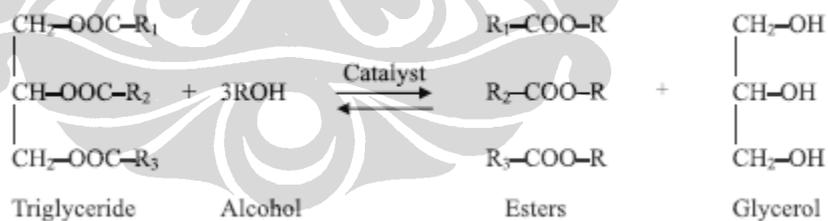
b). *Solver*, melibatkan aproksimasi dari variabel fluida yang tidak diketahui dengan bantuan fungsi sederhana, diskretisasi dari aproksimasi kedalam persamaan atur aliran dan manipulasi matematis dan solusi dari persamaan aljabar.

c). *Post processor*, termasuk geometri domain dan *grid display*, pengeplotan vektor, garis dan plot kontour bayangan, plot permukaan 3 dimensi.

### 2.3. Biodiesel

Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif untuk mesin Diesel yang dibuat dari bahan nabati. Pada umumnya Biodiesel dapat diproduksi dari minyak nabati dan lemak hewan. Diantaranya minyak sawit, kelapa, jagung, kedelai, jatropha, castor, nyamplung, kisemir dll

Methyl ester (Biodiesel) dapat dibuat dengan proses transesterifikasi minyak nabati dengan methanol atau proses esterifikasi langsung asam lemak hasil hidrolisis minyak nabati dengan methanol. Pemilihan proses berdasarkan kandungan FFA (Free Fatty Acid) pada bahan baku. Bila FFA < 5% maka proses yang digunakan adalah transesterifikasi. Dan bila FFA > 5% maka perlu dilakukan pre-esterifikasi dengan menggunakan katalis asam.



Gambar 2.5 Proses Transesterifikasi

### 2.4 Sifat Kimia Fisika Biodiesel

Karakteristik bahan bakar biodiesel yang digunakan sebagai pengganti solar harus memenuhi standar mutu biodiesel Indonesia. Standart Nasional Indonesia untuk biodiesel ditunjukkan pada tabel berikut :

No	Parameter	Unit	Value	Method
1	Viscosity at 40°C	cSt	2,3 – 6	ASTM D - 445
2	Density at 15 °C	gr/cm <sup>3</sup>	0,85 – 0,90	IP – 365
3	Flash Point	°C	> 100	IP – 404
4	Cloud Point	°C	< 18	ASTM D - 2500
5	Pour Point	°C	-	ASTM D - 97
6	Water Content	% wt	< 0,05	ASTM D - 2709
7	Free Glycerol	% wt	< 0,02	ASTM D - 6584
8	Total Glycerol	% wt	< 0,24	ASTM D – 6584
9	Total Acid Number	mg KOH/gr	< 0,8	ASTM D – 664
10	Ester Content	% wt	> 96,5	Perhitungan

Sumber : (SNI 04-7182-2006)

Tabel 2.1. Standar Biodiesel Indonesia

Karakteristik (sifat kimia fisika) biodiesel sangat menentukan unjuk kerja dari mesin diesel. Karakteristik biodiesel yang dominan dalam unjuk kerja mesin baik dalam jangka pendek (power/torsi, konsumsi bahan bakar, emisi) maupun jangka panjang (ketahanan mesin) adalah viskositas, bilangan setana dan stabilitas oksidasi. Sifat aliran fluida pada suhu rendah (cold flow properties: titik pengkabutan, titik tuang) juga merupakan karakteristik yang penting karena menentukan operasional mesin. Sedangkan properties yang bersifat pendukung kualitas adalah lubrisitas.

Berikut adalah properties dari methyl ester sawit (MES), jatropha dan castor sebagai komponen biodiesel campuran.

Properties	SNI 2006	ME-Sawit	ME-Jatropha	ME-Castor
Viskositas 40°C, cSt	2,3-6,0	4,50	4,40	13,75
Bilangan Setana	Min 51	59-70	57	42,3
Stabilitas Oksidasi, hrs	Min 6	13,37	3,3	0,67 (risinoleat)
Titik Pengkabutan, °C	Max. 18	16	4	-11,3
HFFR Lubrisitas 60°C, µm	-	217	-	-
Asam Lemak Tak Jenuh, %	-	56,6	80%	>95%

Tabel 2.2 Properties biodiesel, komponen penyusun campuran dan standar kualitas SNI

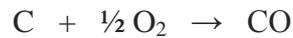
## 2.5. Emisi Gas Buang Pada Motor Diesel

Pada prakteknya pembakaran dalam motor tidak pernah terjadi dengan sempurna meskipun sudah dilengkapi dengan kontrol yang canggih. Pada motor diesel, besarnya emisi bentuk opasitas (ketebalan asap) tergantung banyaknya jumlah bahan bakar yang disemprotkan dalam silinder, karena pada motor diesel yang dikompresikan adalah udara murni. Dengan kata lain semakin kaya campuran maka semakin besar konsentrasi  $\text{NO}_x$ , CO dan asap (smoke). Sementara itu semakin kurus campuran konsentrasi  $\text{NO}_x$ , CO dan asap juga semakin kecil.

### 2.5.1. Pembentukan Karbon Monoksida (CO)

Pada proses pembakaran, bila karbon di dalam bahan bakar terbakar dengan sempurna akan menghasilkan  $\text{CO}_2$  (karbon dioksida). Tetapi jika unsur

oksigen (udara) tidak cukup maka yang terjadi adalah pembakaran tidak sempurna, sehingga karbon di dalam bahan bakar terbakar dalam suatu proses sebagai berikut :



Dengan kata lain, emisi CO dari kendaraan banyak dipengaruhi oleh perbandingan campuran antara udara dengan bahan bakar yang masuk ke ruang bakar (*Air-Fuel Ratio*). Jadi untuk mengurangi CO perbandingan campuran ini harus dibuat kurus (*excess air*).

Namun akibat lain HC dan NO<sub>x</sub> lebih mudah timbul dan output motor menjadi berkurang. Emisi karbon monoksida tidak beraroma dan tidak berwarna, namun sangat beracun. Pengaruh buruk pada motor apabila CO berlebihan adalah pembentukan deposit karbon yang berlebihan katup, ruang bakar, kepala piston, dan busi (untuk motor bensin). Deposit yang ditimbulkan tersebut secara alami mengakibatkan fenomena *Self-Ignition (dieseling)* dan mempercepat kerusakan mesin. Emisi CO berlebihan banyak disebabkan oleh faktor kesalahan pencampuran udara dan bahan bakar yang masuk ke dalam motor.

### **2.5.2. Pembentukan Hidrokarbon (HC)**

Pada proses pembakaran, gas buang hidrokarbon yang dihasilkan dibedakan menjadi dua kelompok yaitu :

1. Bahan bakar yang tidak terbakar dan keluar menjadi gas mentah.
2. Bahan bakar terpecah karena reaksi panas yang berubah menjadi gugus HC lain dan keluar bersama gas buang.

Ada beberapa penyebab utama timbulnya hidrokarbon (HC) diantaranya adalah sebagai berikut :

- Dinding-dinding ruang bakar yang bertemperatur rendah mengakibatkan hidrokarbon (HC) di sekitar dinding tidak terbakar.
- Terjadi *missfiring* (gagal pengapian) ini bisa terjadi pada saat motor *diakselerasi* ataupun *deselerasi*.
- Adanya *overlap intake valve* (kedua valve bersama-sama terbuka) sehingga HC berfungsi sebagai gas pembilas/pembersih.

- Ignition delay yang panjang merupakan faktor yang mendorong terjadinya peningkatan emisi HC.

Selain mengganggu kesehatan, emisi HC yang berlebihan juga menyebabkan fenomena *photochemical smog* (kabut). Karena HC merupakan sebagian bahan bakar yang tidak terbakar, makin tinggi emisi HC berarti tenaga motor makin berkurang dan konsumsi bahan bakar semakin meningkat.

### 2.5.3. Pembentukan Nitrogen Oksida (NO<sub>x</sub>)

Nitrogen oksida dihasilkan akibat adanya N<sub>2</sub> (nitrogen) dalam campuran udara dan bahan bakar serta suhu pembakaran yang tinggi, sehingga terjadi pembentukan NO<sub>x</sub>. Biasanya timbul ketika mesin bekerja pada beban yang berat. Bila terdapat N<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> pada temperatur 1800 - 2000° C akan terjadi reaksi pembentukan gas NO seperti di bawah ini :



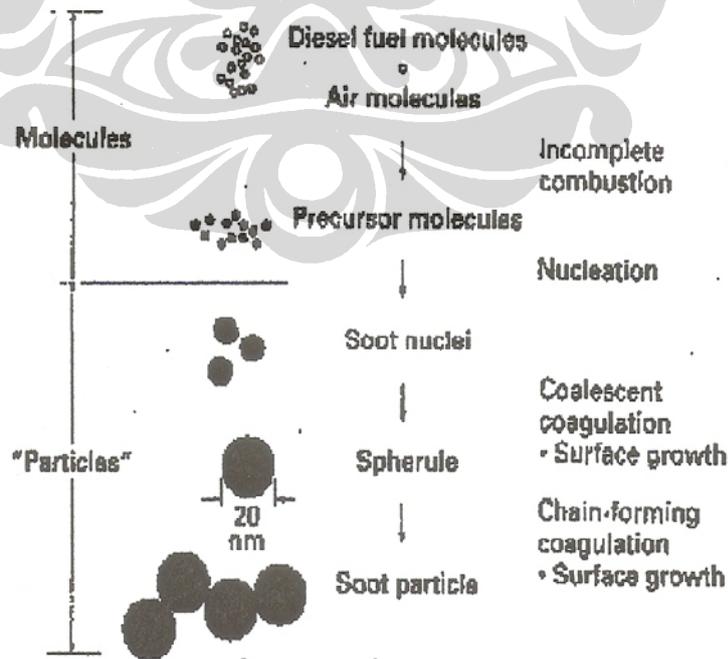
Selanjutnya gas NO bereaksi lebih lanjut di udara menjadi NO<sub>2</sub>. Temperatur pembakaran yang melebihi 2000° dalam ruang bakar mengakibatkan gas NO<sub>x</sub>. Sementara itu gas buang terdiri dari 95% NO, 3-4% NO<sub>2</sub>, sisanya N<sub>2</sub>O dan N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Substansi NO<sub>x</sub> tidak beraroma, namun terasa pedih di mata. Faktor-faktor utama yang mempengaruhi konsentrasi NO<sub>x</sub> selama pembakaran diantaranya maksimum temperatur yang dapat dicapai dalam ruang bakar, dan perbandingan udara - bahan bakar (AFR). Sehingga solusi untuk mengurangi kandungan NO<sub>x</sub> dalam gas buang yaitu dengan mengupayakan temperatur ruang bakar tidak mencapai 1800° atau dengan mengusahakan sesingkat mungkin mencapai temperatur maksimum. Cara lain yaitu dengan mengurangi konsentrasi O<sub>2</sub>.

### 2.5.4. Pembentukan Partikulat (*Particulate Matter*)

Partikulat dihasilkan oleh adanya residu bahan bakar yang terbakar dalam ruang bakar, dan keluar melalui pipa gas buang. Partikel-partikel seperti jelaga, asap dan debu secara umum terbagi menjadi dua bagian yaitu partikel-partikel yang merupakan emisi langsung biasanya disebut partikel utama (*primary particles*) dan partikel-partikel hasil transformasi gas lain atau disebut partikel

sekunder (*secondary particles*). Ukuran partikel bervariasi, dengan ukuran besar cenderung berasal dari faktor geologi, seperti debu dan pasir yang ditiup angin. Sedangkan yang berukuran kecil terutama dari sumber-sumber pembakaran dan perubahan dari gas-gas emisi yang lain, seperti sulfur dioksida menjadi sulfat dan nitrogen oksida menjadi nitrat. Dari sini jelas bahwa emisi gas buang merupakan unsur yang berbahaya. Sebagian besar partikulat mengandung unsur karbon dan kotoran lain berbentuk butiran/partikel dengan ukuran  $\pm 0,01 - 10 \mu\text{m}$ . Gas buang diesel sebagian besar berupa partikulat dan berada pada dua fase yang berbeda namun saling menyatu yaitu fase padat, terdiri dari residu/kotoran, abu, bahan aditif, bahan korosif, keausan metal, dan fase cair terdiri dari minyak pelumas yang tak terbakar.

Gas buang yang berbentuk cair akan meresap ke dalam fase padat. Buangan ini disebut partikel. Partikel-partikel tersebut berukuran mulai dari 100 mikron hingga kurang dari 0,01 mikron. Partikulat yang berukuran kurang dari 10 mikron memberikan dampak terhadap visibilitas udara karena partikulat tersebut akan memudarkan cahaya. Pembentukan partikel tersebut dapat dilihat pada gambar 2.4 dibawah.



Gambar 2.6. Pembentukan *Soot Particle*

Berdasarkan ukurannya partikel dikelompokkan menjadi tiga yaitu :

- a. 0,01 – 110  $\mu\text{m}$  disebut partikel smoke/kabut/asap
- b. 10 – 50  $\mu\text{m}$  disebut dust/debu
- c. 50 – 100  $\mu\text{m}$  disebut ash/abu

Penyebab terjadinya partikulat antara lain tekanan injeksi yang terlalu rendah dan saat pengapian yang kurang tepat.

#### **2.5.5. Pembentukan Emisi Asap (*Smoke*)**

Emisi asap (*smoke*) merupakan polutan utama pada mesin diesel. Pembentukan *smoke* pada mesin diesel terjadi karena kekurangan oksigen, hal itu terjadi pada inti (*core*) *spray* yang mempunyai  $\lambda \leq 0,8$ .

Dalam proses pembakaran berlangsung ketika bahan bakar yang disemprotkan ke dalam silinder yang berbentuk butir-butir cairan yang halus saat keadaan di dalam silinder tersebut sudah bertemperatur dan bertekanan tinggi sehingga butir-butir tersebut akan menguap. Namun jika butir-butir bahan bakar yang terjadi karena penyemrotan itu terlalu besar atau apabila beberapa butir terkumpul menjadi satu, maka akan terjadi dekomposisi. Dekomposisi itu akan menyebabkan terbentuknya karbon-karbon padat (*angus*). Hal ini disebabkan karena pemanasan udara yang bertemperatur tinggi, tetapi penguapan dan pencampuran dengan udara yang ada di dalam silinder tidak dapat berlangsung sempurna. Terutama pada saat-saat dimana terlalu banyak bahan bakar yang disemprotkan, yaitu pada waktu daya mesin akan diperbesar. Misalnya untuk akselerasi maka *angus* akan terjadi. Jika *angus* yang terjadi itu terlalu banyak, gas buang yang keluar dari mesin akan berwarna hitam dan mengotori udara serta mengganggu pemandangan.

