

2. TEORI DASAR

2.1 Motor Diesel

Penemu motor diesel adalah Rudolf Diesel, seorang berkebangsaan Jerman, pada tahun 1895. Motor diesel adalah jenis penggerak mula yang termasuk *internal combustion engine*, dimana penyalaan bahan bakarnya dikarenakan penyemprotan bahan bakar ke dalam silinder yang berisi udara terkompresi. Tekanan maupun temperatur udara di dalam silinder sangat tinggi, melebihi temperatur nyala dari bahan bakar, maka motor diesel disebut juga *compression ignition engine*.

Motor diesel mengambil udara dari sekitarnya. Udara dikompresi di dalam silinder dan sebelum torak mencapai titik mati atas bahan bakar disemprotkan ke ruang bakar. Panas akibat kompresi akan menyalakan bahan bakar. Untuk menyemprotkan bahan bakar dibutuhkan sistem injeksi bahan bakar yang komplek. Sistem injeksi bahan bakar harus memiliki tekanan yang lebih tinggi dari tekanan kompresi untuk mengatomisasi bahan bakar dan menyalurkan bahan bakar ke ruang bakar. Motor diesel memiliki rasio kompresi yang lebih tinggi dari motor bensin yaitu antara 1:14 sampai 1:24. Rasio kompresi yang besar diperlukan untuk meningkatkan temperatur udara terkompresi. Temperatur udara terkompresi harus lebih tinggi dari temperatur penyalaan bahan bakar sehingga diharapkan setelah bahan bakar disemprotkan bahan bakar langsung terbakar. Tekanan kompresi yang tinggi mengakibatkan silinder menerima gaya yang besar sehingga diperlukan untuk memperkuat komponen dari silinder. Akibatnya motor diesel menjadi lebih berat ~~dari~~ motor bensin. Perbandingan kompresi yang rendah pada umumnya dipergunakan pada motor Diesel berukuran besar dengan putaran rendah. Perbandingan kompresi yang tinggi banyak dipakai pada motor Diesel berukuran kecil dengan putaran tinggi sekitar 4000 rpm. Perancang cenderung mempergunakan perbandingan kompresi yang serendah-rendahnya berdasarkan pertimbangan kekuatan material serta berat mesinnya. Oleh karena itu, pada

umumnya motor Diesel bekerja dengan perbandingan kompresi antara 1:14 sampai 1:17.

Motor diesel semakin digemari karena penggunaan bahan bakar yang lebih hemat, bahaya polusi yang ditimbulkannya lebih kecil dan perbandingan kompresi yang lebih tinggi dari motor bensin. satu liter solar dapat menyediakan energi kalor yang lebih besar karena massa jenisnya lebih besar sehingga lebih irit, lagipula harga solar lebih murah **dari** bensin. Sebagai perbandingan, nilai kalor bensin adalah **34,4** kJ/liter, sedangkan nilai kalor solar adalah **38,4** kJ/liter. **Asap** diesel banyak mengandung CO₂, akan **tetapi** CO₂ lebih **tidak** berbahaya dibandingkan dengan CO yang banyak dihasilkan motor bensin.

2.2 Siklus Kerja Motor Diesel

Menurut langkah kerjanya motor diesel ada dua macam, yaitu motor diesel empat langkah dan motor diesel dua langkah. Motor diesel empat langkah adalah jenis motor diesel dimana **untuk** melengkapi satu siklus kerjanya dibutuhkan empat langkah gerakan torak atau dua kali putaran poros engkol. Sedangkan motor diesel dua langkah membutuhkan dua langkah gerakan torak atau satu kali putaran poros engkol untuk melengkapi satu **siklus** kerjanya. **Siklus** kerja motor diesel disebut juga siklus sabathe yang merupakan pendekatan dari siklus nyata motor diesel. Siklus ini merupakan siklus dari motor diesel putaran tinggi. Siklus kerja motor diesel empat langkah adalah sebagai berikut:

- Langkah hisap.

Pada langkah ini, torak bergerak dari TMA ke TMB dan pada kondisi **ini** katup hisap terbuka dan katup buang tertutup. Karena gerakan torak tersebut, tekanan **di** dalam silinder menjadi turun sehingga akhirnya udara segar **m a s k** ke dalam silinder. Langkah ini berlangsung sampai torak mencapai TMB.

- Langkah kompresi.

Langkah ini berlangsung setelah langkah hisap selesai. Pada langkah ini semua katup tertutup dan torak bergerak dari TMB ke TMA membuat udara segar terkompresi di dalam silinder sehingga suhu dan tekanannya meningkat. Saat torak hampir mencapai TMA, bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar melalui injektor sehingga membentuk kabut campuran udara-bahan

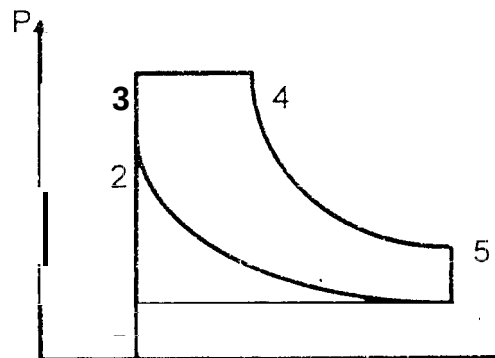
bakar. Karena suhu dalam ruang bakar tersebut melampaui suhu penyalan bahan bakar, maka campuran udara-bahan bakar tersebut akan segera terbakar.

- Langkah kerja atau langkah ekspansi.

Langkah ini sebagai lanjutan dari langkah kompresi. Pada langkah ini semua katup masih dalam keadaan tertutup. Sebagai akibat terbakarnya campuran udara-bahan bakar dalam ruang bakar, maka tekanan dalam ruang bakar meningkat dengan cepat sehingga mendorong torak bergerak dari TMA ke TMB, terjadilah langkah kerja, yaitu pengubahan energi termal menjadi energi mekanis.

- Langkah buang.

Pada langkah buang, katup buang dalam keadaan terbuka dan katup masuk tertutup, sementara itu torak bergerak dari TMB ke TMA sehingga gas sisa pembakaran yang tidak dimanfaatkan lagi terdorong keluar melalui katup buang. Saat torak mencapai TMA katup buang tertutup dan katup hisap terbuka, dan pada akhirnya siklus berulang mulai dari langkah hisap lagi.



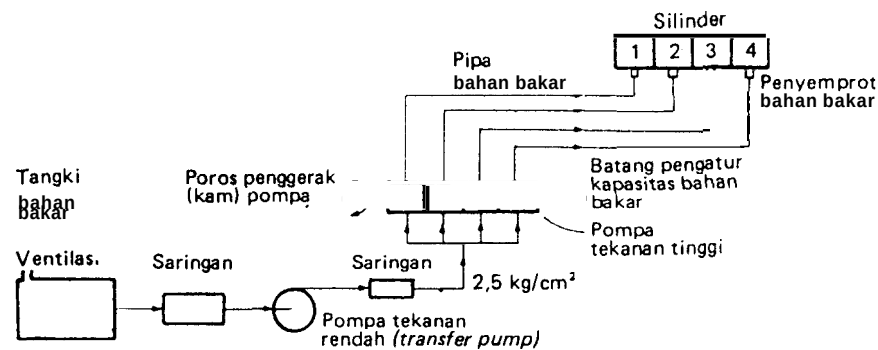
Gambar 2.1 Siklus Motor Diesel¹⁹

23 Sistem Bahan Bakar

Ada tiga sistem bahan bakar yang banyak digunakan, yaitu sistem pompa pribadi, sistem distribusi dan sistem akumulator. Ketiga sistem bahan bakar itu mempergunakan pompa tekanan tinggi, tetapi terdapat perbedaan dalam jumlah atau fungsinya.

2.3.1 Sistem Pompa Pribadi

Sistem pompa pribadi mempergunakan satu pompa tekanan tinggi untuk setiap silindernya. Jadi setiap penyemprot dilayani oleh satu pompa tekanan tinggi. Pompa ini adalah pompa plunyer yang dilengkapi dengan peralatan pengatur kapasitas. Daya yang diperlukan untuk menggerakkan pompa diambil dari daya yang dihasilkan oleh mesin itu sendiri. Sistem pompa pribadi merupakan sistem yang kompak. Akan tetapi harganya relatif lebih mahal oleh karena mempergunakan satu **pompa** untuk setiap silinder dan semua pompa harus bekerja dalam susunan yang serasi. Pada sistem ini tekanan dan kapasitas penyemprotan bahan bakar berubah-ubah sesuai dengan kecepatan putar **poros** daya, karena pompa tersebut digerakkan oleh motor melalui sistem roda gigi.

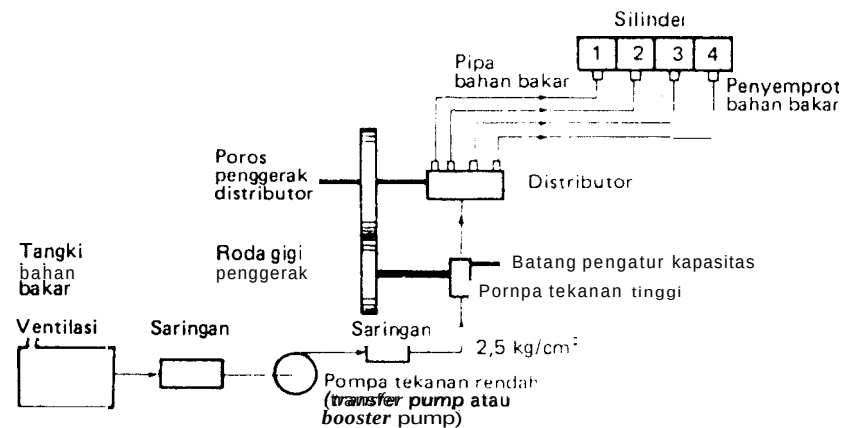


Gambar 2.2 Sistem Pompa Pribadi³

2.3.2 Sistem Distribusi

Sistem distribusi hanya mempergunakan satu pompa tekanan tinggi untuk melayani semua penyemprot yang ada di setiap silindernya. Pada sistem ini, pompa tersebut mengalirkan bahan bakar bertekanan tinggi masuk ke dalam distributor. Distributor adalah alat untuk membagi bahan bakar ke dalam setiap penyemprot sesuai dengan urutan yang telah ditentukan. Distributor juga dilengkapi dengan alat pengatur kapasitas. Sistem distribusi harganya tidak terlalu mahal, karena mempergunakan satu pompa lengkap dengan alat pengatur kapasitasnya. Akan tetapi kerja pompa akan menjadi lebih berat, terutama apabila

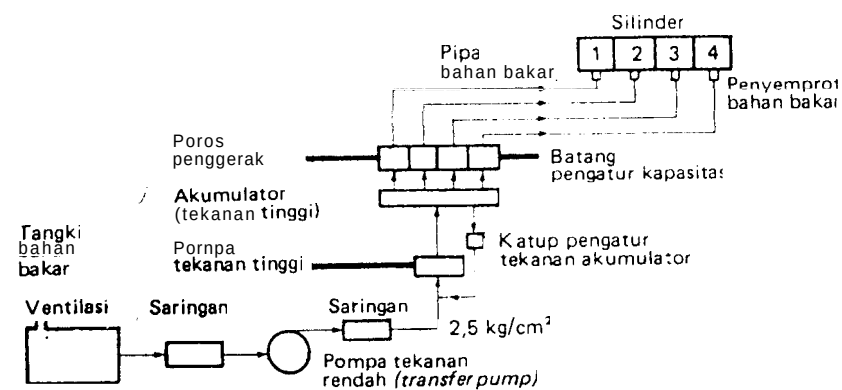
harus melayani jumlah silinder yang banyak. Pada sistem ini tekanan dan kapasitas penyemprotan bahan bakar berubah-ubah sesuai dengan kecepatan putar poros motor, karena pompa tersebut digerakkan oleh motor melalui sistem roda gigi.



Gambar 2.3 Sistem Distribusi³

2.3.3 Sistem Akumulator

Sistem akumulator hanya menggunakan satu pompa tekanan tinggi untuk melayani semua penyemprot yang ada di setiap silindernya. Pada sistem ini tidak terdapat distributor.



Gambar 2.4 Sistem Akumulator³

Pada sistem akumulator pompa tekanan tinggi mengalirkan bahan bakar masuk ke dalam sebuah akumulator yang dilengkapi dengan katup pengatur tekanan sehingga tekanan bahan bakar di dalam akumulator dapat konstan. Apabila tekanan tersebut lebih besar daripada yang ditentukan, Katup pengatur akan terbuka dan bahan bakar akan mengalir kembali ke dalam pipa hisap dari pompa tekanan tinggi.

Dari akumulator bahan bakar mengalir ke dalam alat pengatur kapasitas, baru kemudian ke penyemprot lalu masuk ke dalam silinder, sesuai dengan urutan yang telah ditetapkan. Pada sistem akumulator, pengaturan kapasitasnya dilakukan oleh alat sendiri sehingga sistem akumulator tidak memerlukan ketelitian pembuatan yang terlalu tinggi. Namun demikian, sistem akumulator memerlukan konstruksi penyemprotan yang baik sehingga ke dalam setiap silinder akan dimasukkan jumlah bahan bakar yang sama banyaknya. Sistem akumulator biasanya dipergunakan pada motor diesel berukuran besar dengan kecepatan yang rendah.

2.4 Komponen Sistem Bahan Bakar

Sistem bahan bakar digunakan untuk menyalurkan bahan bakar dari tangki bahan bakar sampai ke dalam silinder. Komponen-komponen yang digunakan untuk menyalurkan bahan bakar adalah:

1. Tangki bahan bakar.
2. Saringan bahan bakar.
3. Pompa tekanan rendah.
4. Governor.
5. *Automatic timer*.
6. Distributor.
7. Pompa tekanan tinggi.
8. Nosel.

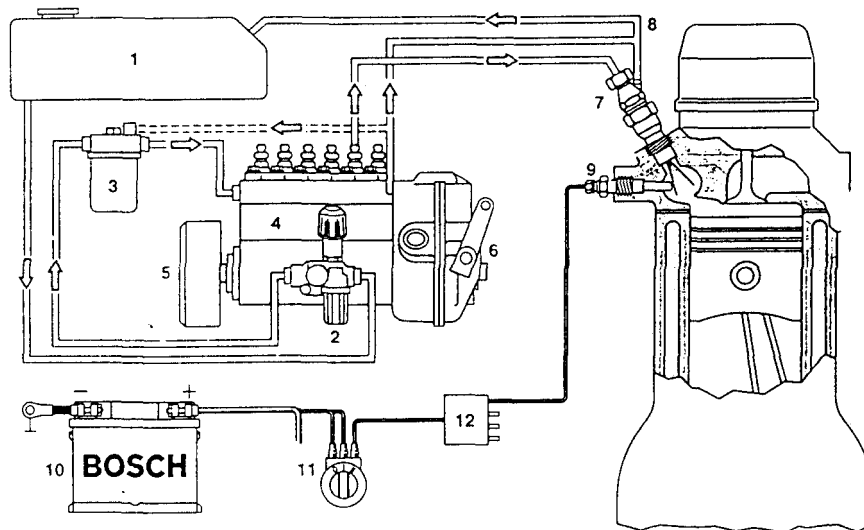
2.4.1 Tangki bahan bakar

Tangki bahan bakar adalah tempat yang digunakan untuk menyimpan, membersihkan dan menyalurkan bahan bakar. Tangki bahan bakar yang baik

terbuat dari material tahan korosi. Tangki bahan bakar juga harus terletak cukup jauh dari tempat motor bakar agar bila terjadi kecelakaan tidak terjadi bahaya kebakaran.

Fig. 1: Fuel-injection system

1 Fuel tank, 2 Fuel-supply pump, 3 Fuel filter, 4 In-line fuel-injection pump, 5 Timing device, 6 Governor
7 Nozzle holder with nozzle, 8 Fuel-return line, 9 Glow plug (GSK) 10 Battery 11 Glow plug and starter switch 12 Glow control unit (GZS)



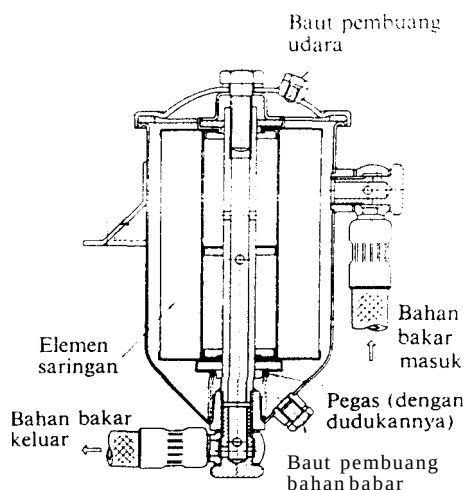
Gambar 2.5 Sistem Bahan Bakar⁶

2.4.2 Saringan Bahan Bakar

Umur dari motor diesel sedikit banyak ditentukan oleh kualitas dari bahan bakar yang masuk ke dalam motor diesel. Semakin tinggi kualitas bahan bakar maka umur motor diesel juga akan semakin lama. Peralatan bahan bakar diesel, seperti pompa tekanan tinggi dan nosel bekerja dengan ketelitian tinggi sehingga ia sangat peka terhadap gangguan. Agar kualitas bahan bakar tetap terjaga, maka pada sistim bahan bakar diberi saringan bahan bakar. Saringan bahan bakar berguna untuk menghilangkan kotoran dan air dari bahan bakar. Selain menyaring kotoran padat, beberapa jenis saringan dapat menghilangkan kotoran yang larut dalam bahan bakar diesel.

Saringan bahan bakar yang paling banyak digunakan berupa kertas yang dilipat seperti akordion. Penyaringan yang baik adalah dengan pemisahan kimiawi oleh saringan kertas yang diberi larutan kimia sehingga air dapat dipisahkan dan

dapat dibuang lewat sekrup pembuang pada mangkuk jebakan air di bawah saringan. Air sangat mengganggu kerja peralatan diesel. Karena itu air serta udara harus benar-benar dibuang dari rangkaian kelengkapan bahan bakar.



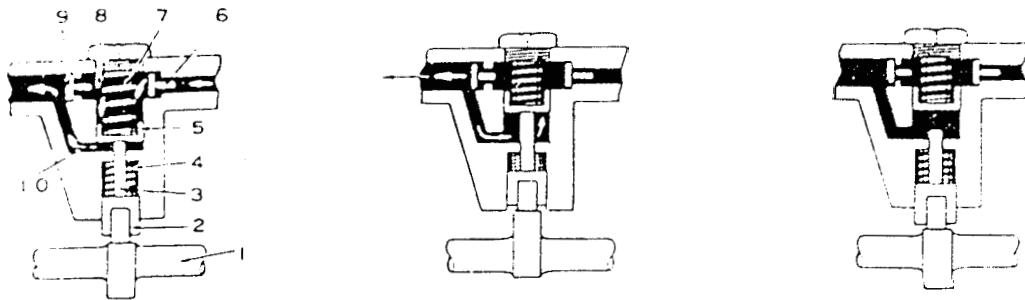
Gambar 2.6 Saringan Bahan Bakar Jenis Saringan Kertas⁴

2.4.3 Pompa tekanan rendah

Pompa tekanan rendah diperlukan untuk menghisap bahan bakar dari tangki dan menekan ke pompa tekanan tinggi melalui saringan. Selain itu ada juga pompa tangan yang digunakan untuk membuang udara dari saluran bahan bakar sebelum motor dihidupkan. Pompa tekanan rendah mengalirkan bahan bakar dari tangki ke pompa tekanan tinggi agar pompa tekanan tinggi itu selalu terisi bahan bakar dalam segala keadaan operasinya. Tekanan aliran pompa tekanan rendah harus selalu lebih tinggi daripada tekanan atmosfer sekitarnya, terutama untuk mencegah masuknya udara ke dalam saluran bahan bakar seandainya terjadi kebocoran. Adanya udara di dalam aliran bahan bakar akan menyebabkan gangguan aliran yang tidak menentu besarnya

Pompa tekanan rendah merupakan pompa kerja tunggal yang ditempatkan disisi pompa tekanan tinggi dan digerakkan oleh kam. Cara kerja pompa tekanan rendah ini adalah sebagai berikut. Pompa digerakkan oleh poros kam yang memberikan gerakan bolak-balik pada plunyer untuk menghisap dan menekan bahan bakar. Bila poros kam tidak mendorong **tappet roller**, plunyer

akan menekan **push rod** karena adanya tegangan pegas dan menambah *volume* pada **pressure chamber**, akibatnya katup hisap membuka dan bahan bakar masuk. Karena poros kam berputar, kam akan mendorong plunyer melalui **tappet roller** dan **push rod**. Gerakan plunyer ini menekan bahan bakar di dalam silinder yang menyebabkan katup hisap tertutup dan katup tekan terbuka, sehingga bahan bakar keluar dari silinder dengan tekanan rendah. Sebagian bahan bakar yang ditekan masuk ke ruangan belakang plunyer. Bila tekanan bahan bakar di belakang plunyer melampaui 1,8-2,2 kg/cm², tegangan pegas tidak mampu mendorong torak. Akibatnya plunyer tidak lagi bergerak bolak-balik dan pompa bahan bakar tidak bekerja. Bila tekanan turun dari spesifikasi, pompa tekanan rendah akan bekerja kembali.



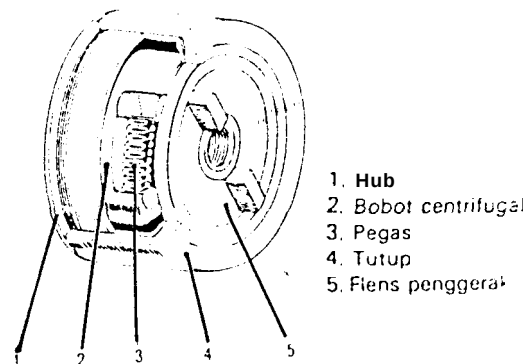
Gambar 2.7 Pompa Tekanan Rendah⁸

2.4.4 Governor

Motor Diesel memerlukan suatu alat penting yang dinamai governor, terutama untuk motor stasioner. Governor adalah alat untuk mengatur putaran motor supaya tetap konstan meskipun bebannya berubah-ubah. Governor mengontrol kecepatan secara akurat baik kecepatan tinggi maupun kecepatan rendah. Variasi kecepatan yang diperbolehkan berkisar pada 4% dari kecepatan operasi yang ditetapkan. Dalam melaksanakan tugasnya governor menggerakkan batang pengatur kapasitas. Apabila putaran motor naik karena beban berkurang, jumlah bahan bakar yang dimasukkan ke dalam silinder harus dikurangi supaya putaran motor dapat kembali pada keadaan semula. Ada 5 macam, tipe governor, yaitu mechanical, pneumatic, servo, hydraulic dan electronic governor.

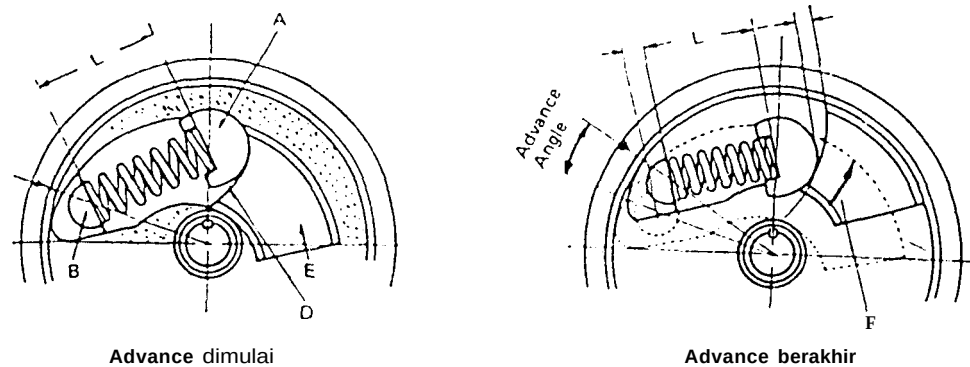
2.4.5 Automatic timer

Pada motor putaran tinggi yang digunakan untuk mobil, tenaga motor dapat bertambah dengan memajukan waktu injeksi sesuai dengan putaran mesin. Untuk tujuan ini digunakan *automatic timer*.



Gambar 2.8 *Automatic Timer*⁸

Automatic timer bekerja atas dasar gaya sentrifugal yang terjadi sehingga majunya waktu injeksi terjadi secara otomatis dan sesuai dengan putaran motor. *Automatic timer* terdiri dari dua buah alat sentrifugal, dua buah pegas, tutup dan flens penggerak. Cara kerja *automatic timer* adalah sebagai berikut. Flens penggerak yang dihubungkan dengan pompa tekanan tinggi dengan adanya penonjolan pada permukaannya. *Hub* dipasangkan dengan poros kam pompa tekanan tinggi melalui pasak dan mur. Bila putaran motor bertambah, gaya sentrifugal (F) bertambah **dan** menyebabkan *timer weight* (E) bergerak arah keluar. Permukaan (D) *timer weight* disesuaikan dengan *advance angle* yang dibutuhkan dan selalu bersinggungan dengan *journal* (A) saat *timer weight* bergerak. Pada saat ini jarak (L) antara *journal* dan **dowel** (B) pada *timer hub* akan berkurang. Jadi flens penggerak dan *hub timer* tetap pada poros penggerak dan poros kam pompa dapat berubah relatif terhadap posisi putarannya, sebesar *advance angle*. Komponen gaya sentrifugal untuk menggerakkan *timer weight* keluar sesuai dengan tegangan pegas (C). *Advance angle* bertambah dengan bertambahnya kecepatan.



Gambar 2.9 Cara Kerja *Automatic Timer*⁸

2.4.6 Distributor

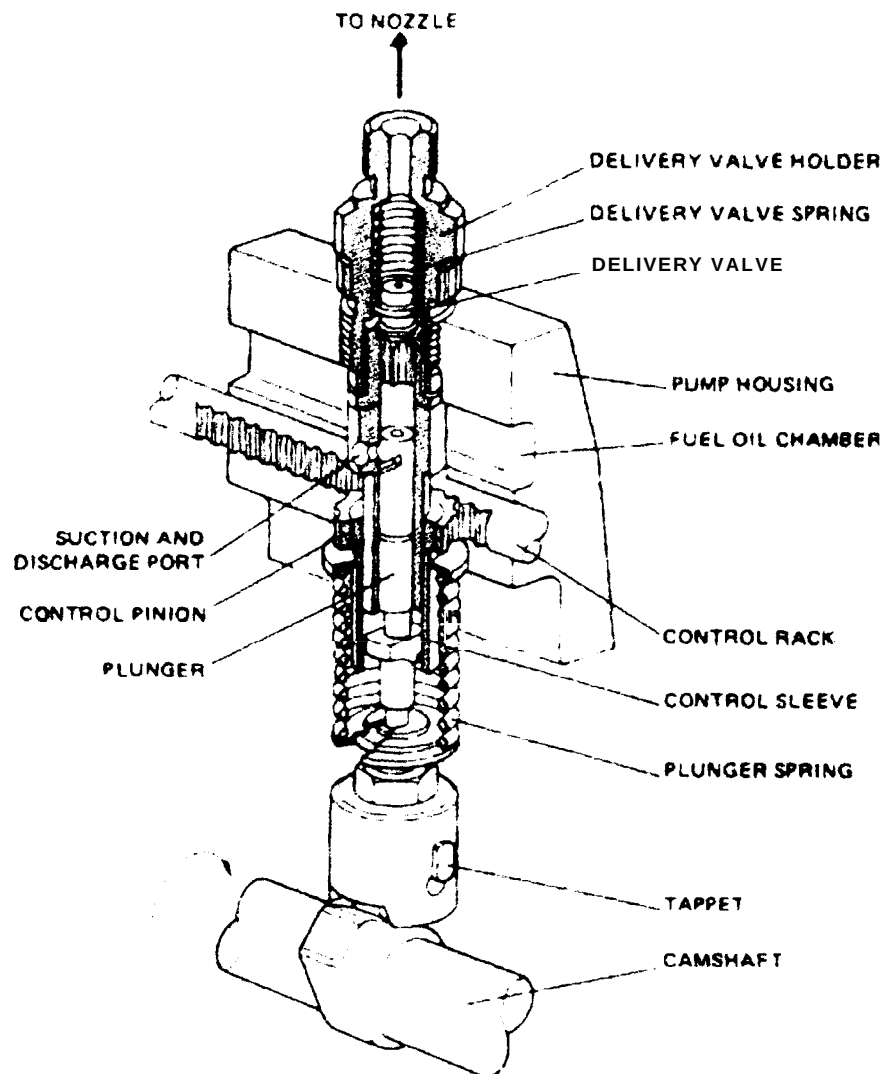
Distributor adalah alat yang digunakan untuk mengatur banyaknya bahan bakar yang diperlukan oleh setiap silinder dan untuk menyetarakan banyaknya bahan bakar yang diperlukan oleh setiap silinder untuk memastikan daya yang sama pada setiap silinder pada motor diesel dengan banyak silinder.

2.4.7 Pompa tekanan tinggi

Rumah pompa tekanan tinggi terbuat dari baja tuang. Poros kam ditumpu oleh dua buah roller bearing dan digerakkan oleh motor melalui gigi. Elemen pompa yang terdiri dari plunyer dan silinder adalah bagian penting dari pompa ini. Plunyer dan silinder dikerjakan sangat teliti sehingga hampir tidak terdapat celah sehingga pompa dapat menahan tekanan yang tinggi tanpa kebocoran. Sebab itu plunyer dan silinder tidak pernah diganti satu-satu, tapi harus satu set.

Ujung *control rack* yang berhubungan dengan governor berkaitan dengan *control pinion*. *Control pinion* berkaitan dengan plunyer. Kaitan-kaitan ini mengatur jumlah bahan bakar yang dikirim dan mengatur saat injeksi pada model-model tertentu. Katup penyalur menahan bahan bakar agar tidak mengalir kembali pada waktu **plunyer** turun dan juga mencegah terjadinya tetesan **pada** nosel setelah menyemprot dengan cara menghisap kembali sisa bahan bakar dalam nosel. Plunyer dan silinder memiliki celah sebesar $1/1000$ mm sehingga cukup baik untuk menahan tekanan tinggi saat injeksi. Bahan bakar masuk ke dalam pompa

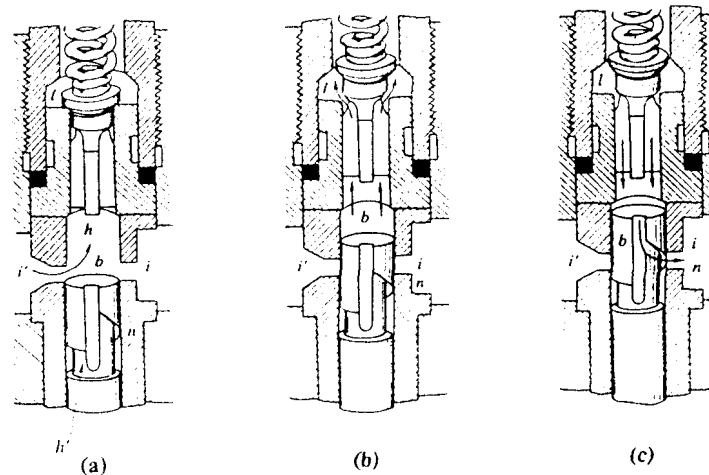
tekanan tinggi dengan tekanan rendah, dan plunyer akan bergerak naik turun sesuai dengan putaran poros kam.



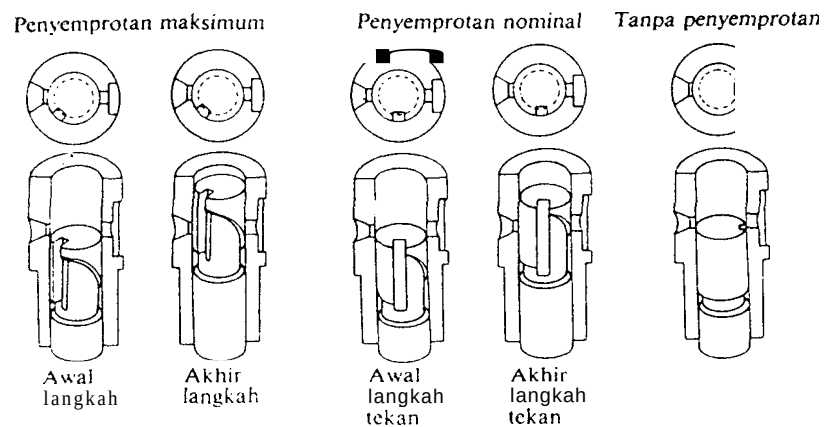
Gambar 2.10 Pompa Tekanan Tinggi¹⁴

Cara kerja pompa tekanan tinggi adalah sebagai berikut. Di dalam silinder terdapat sebuah plunyer yang digerakkan secara translasi oleh poros kam dari pompa tersebut. Pada saat plunyer berada di TMB, bahan bakar masuk melalui lubang pemberi pada silinder ke dalam ruangan di atas plunyer. Karena poros kam, plunyer akan bergerak ke TMA. Setelah plunyer menutup lubang pemberi, tekanan pada bahan bakar akan naik. Plunyer bergerak ke atas dan bahan

bakar membuka katup penyalur dan mengalir ke pipa tekanan tinggi terus ke nosel. Plunyer tetap bergerak ke TMA, tetapi bila alur pengontrol bertemu dengan lubang pemberi, pengiriman bahan bakar berhenti. Selanjutnya bahan bakar di atas plunyer mengalir keluar melalui lubang pada plunyer.



Gambar 2.11 Cara Kerja Pompa Tekanan Tinggi⁴



Gambar 2.12 Kapasitas Pompa⁴

Fungsi pompa tekanan tinggi adalah memasukkan bahan bakar ke dalam ruang bakar pada saat yang telah ditetapkan dalam jumlah sesuai dengan **daya** yang harus dihasilkan. Kapasitas pompa diatur dengan **jalan** mengubah posisi plunyer terhadap lubang hisap, yaitu mengatur posisi saluran pada plunyer terhadap lubang hisap. Jadi, panjang langkah plunyer adalah konstan. Tetapi

dengan jalan memutar plunyer, kita mengatur saat berakhirnya langkah tekan. Sedangkan saat penyemprotan bahan bakar ke dalam ruang bakar dapat diatur dengan jalan mengubah posisi poros kain pompa relatif terhadap poros engkol.

2.4.8 Nosel

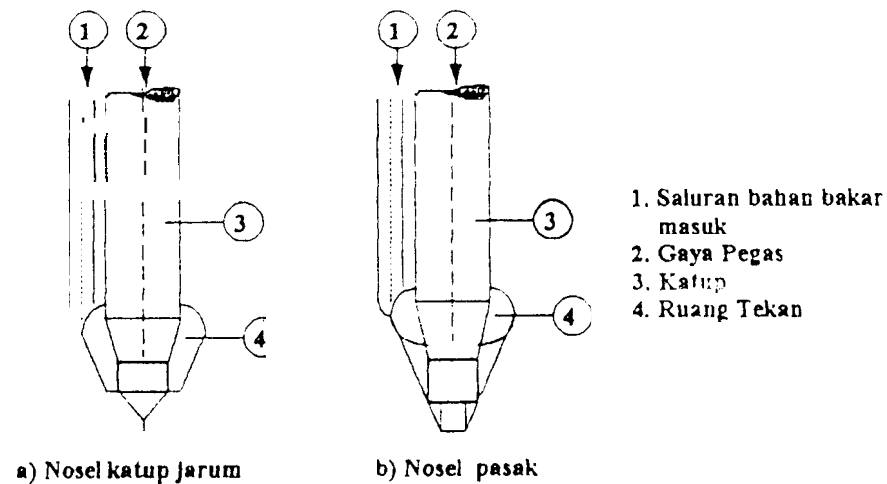
Nosel merupakan salah **satu** komponen sistem bahan bakar yang penting. Nosel berfungsi untuk:

- Memasukkan bahan bakar ke dalam silinder sesuai dengan kebutuhan.
- Mengabutkan bahan bakar sesuai dengan derajat pengabutan yang diminta.
- Mendistribusikan bahan bakar untuk memperoleh pembakaran sempurna dalam waktu yang ditetapkan.

Tekanan udara di dalam silinder sudah sangat tinggi yaitu sekitar 35-50 atm ketika bahan bakar disemprotkan. Dengan sendirinya tekanan penyemprotan haruslah lebih tinggi dari tekanan udara tersebut. Kelebihan tekanan itu juga diperlukan untuk memperoleh kecepatan penyemprotan tertentu, yaitu sesuai dengan derajat pengabutan yang diinginkan. Komponen penyemprot yang mengatur bentuk pancaran bahan bakar dinamai nosel. Ada dua macam nosel yang banyak digunakan pada motor diesel, yaitu nosel katup jarum **dan** nosel pasak. Kedua jenis nosel ini berbeda bentuk ujung katupnya. Kabut bahan bakar yang keluar dari nosel jarum berbentuk kerucut sedangkan dari nosel pasak berbentuk selubung kerucut. Nosel katup jarum dapat berlubang satu atau lebih, berdiameter sangat kecil kira-kira 0,25 mm atau lebih sedikit. Diameter lubang pasak bisa sampai 3 mm. Nosel katup jarum pada umumnya dipergunakan pada motor **diesel dengan** ruang bakar terbuka sedangkan **nosel** pasak banyak dipergunakan pada motor diesel dengan ruang bakar kamar muka.

Cara kerja nosel adalah sebagai berikut. Tekanan penyemprotan dihasilkan oleh pompa bahan bakar tekanan tinggi. Melalui pipa tekanan tinggi yang berdiameter antara 1,5-4 mm (bergantung pada jumlah bahan bakar yang harus disemprotkan) bahan bakar mengalir ke penyemprot dan akhirnya masuk ke ruang tekanan di dalam nosel. Di dalam nosel, katup menutup lubang nosel karena adanya gaya pegas yang besarnya dapat **diatur** sesuai dengan tekanan penyemprotan yang dikehendaki. Apabila gaya bahan bakar yang ada di dalam

ruang tekanan tersebut lebih besar daripada gaya pegas, katup nosel akan terangkat sehingga lubang nosel terbuka. Dengan kecepatan tinggi mengalir bahan bakar ke dalam silinder melalui lubang nosel. Jadi bahan bakar barulah dapat masuk ke dalam ruang bakar apabila tekanannya cukup besar untuk melawan gaya pegas yang menekan katup nosel itu.



Gambar 2.13 Nosel''

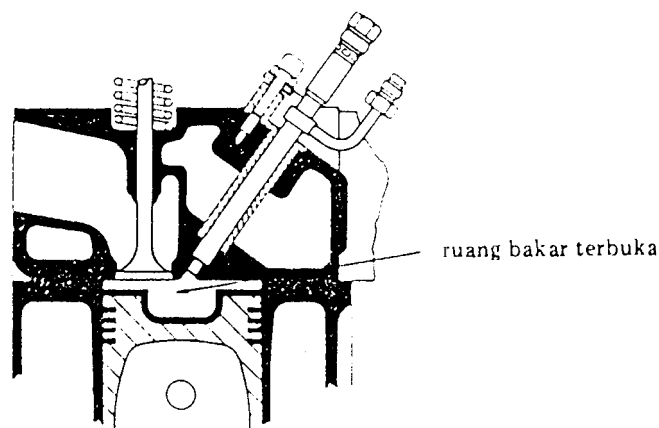
2.5 Ruang Bakar

Ruang bakar didesain untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna dan untuk meningkatkan daya serta efisiensi termal dengan cara mengontrol aliran, kecepatan dan arah udara. Untuk memperoleh proses pembakaran yang sebaik-baiknya, konstruksi ruang bakar perlu di sempurnakan. Beberapa jenis ruang bakar yang banyak dipergunakan motor Diesel antara lain:

1. Ruang bakar terbuka.
2. Ruang bakar kamar muka.
3. Ruang bakar turbulen.
4. Ruang bakar Lanova.

2.5.1 Ruang Bakar Terbuka

Konstruksi ruang bakar terbuka termasuk paling sederhana. Meskipun demikian, tugas penyemprot bahan bakar sangatlah berat yaitu di samping mengabutkan, harus juga mendistribusikan bahan bakar untuk memperoleh campuran bahan bakar-udara yang merata. Partikel bahan bakar harus dapat menerobos lapisan udara yang padat sampai mencapai bagian yang terjauh dari penyemprot. Akan tetapi jangan sampai menyentuh dinding silinder karena bahan bakar dapat merusak lapisan minyak pelumas. Hal terakhir ini dapat dicegah dengan jalan membuat tepi kepala torak yang tinggi. Mengingat akan kondisi ruang bakar itu, haruslah dipergunakan tekanan penyemprotan yang tinggi, yaitu antara 180-300 kg/cm², bahkan kadang-kadang sampai 1500-2000 kg/cm² untuk unit yang besar.



Gambar 2.14 Ruang Bakar Terbuka"

Ruang bakar kamar terbuka tergolong **direct injection**. Ruang bakar terbuka tidak dapat menjamin pembatasan jumlah campuran bahan bakar-udara yang telah ada di dalam silinder selama periode persiapan pembakaran, atau usaha lain untuk memperpendek waktu persiapan pembakaran. Karena itu ruang bakar terbuka lebih cocok untuk motor diesel kecepatan rendah. Motor diesel ruang bakar terbuka merupakan motor diesel yang paling ekonomis dipandang dari penggunaan bahan bakarnya. Pemakaian bahan bakar spesifiknya berkisar antara 150-185 g/PS jam. Prestasinya sangat tergantung pada kondisi penyemprotan bahan bakar yang dipergunakan.

Ruang bakar terbuka memiliki keuntungan-keuntungan sebagai berikut:

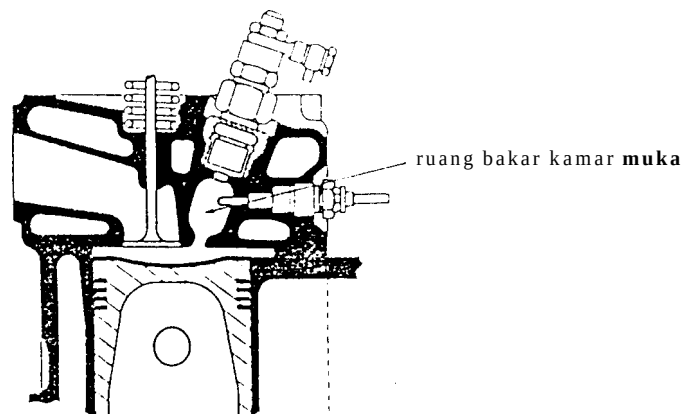
- Bentuk ruang bakar sederhana, jadi efisiensi termisnya lebih tinggi dan pemakaian bahan bakarnya lebih hemat.
- Penyalan dapat dilakukan dengan gampang tanpa alat pemanas (*glowplug*) walaupun mesin kecil dengan perbandingan kompresi sekitar 15.
- Cocok untuk mesin-mesin besar (high power) karena konstruksi dari silinder head sederhana dan kerugian panas kecil.

Ruang bakar terbuka juga memiliki kerugian-kerugian, yaitu:

- Membutuhkan kualitas bahan bakar yang tinggi dan kualitas sangat mempengaruhi motor.
- Membutuhkan tekanan injeksi yang tinggi.
- Sering terjadi gangguan pada nosel.
- Proses penyampuran bahan bakar dengan udara kurang baik, sehingga sukar untuk kecepatan tinggi dan mengontrol emisi.

2.5.2 Ruang Bakar Kamar Muka

Ruang bakar kamar muka yang tergolong *indirect injection* terdiri dan dua bagian yaitu kamar muka dan ruang bakar utama. Kamar muka adalah ruang kecil di sebelah ruang bakar utama, memiliki volume 30-40 % dari volume sisa dan di dalamnya ditempatkan penyemprot bahan bakar. Kedua ruangan tersebut dipisahkan oleh satu atau beberapa saluran sempit. Mnjelang akhir langkah kompresi 25° - 35° sebelum TMA bahan bakar mulai disemprotkan ke dalam kamar muka. Sudah barang tentu tidak dapat diharapkan terjadi pembakaran sempurna karena jumlah udara di dalam kamar **muka** itu terbatas. Namun demikian kenaikan tekanan yang terjadi cukup besar sehingga terdapat perbedaan tekanan yang besar pula antara kamar muka dan ruang bakar utama. Akibatnya bahan bakar menyembur ke dalam ruang bakar utama dengan kecepatan tinggi, bersama-sama dengan bahan bakar yang belum terbakar sempurna dan gas pembakaran yang bertemperatur tinggi. Proses ini merupakan proses pengabutan kedua, bahan bakar cepat bercampur dengan udara di dalam ruang bakar utama dan segera terbakar. Setelah proses pembakaran berlangsung, akhirnya tekanan di dalam ruang bakar itu menjadi sama besarnya.



Gambar 2.15 Ruang Bakar Kamar Muka”

Dari keterangan di atas jelaslah bahwa ruang bakar utama tidak memerlukan penyemprot tekanan tinggi. Penyemprot yang dipergunakan adalah jenis nosel pasak dengan tekanan penyemprotan antara $85-140 \text{ kg/cm}^2$. Hal ini sangat menguntungkan karena harga sistem bahan bakarnya menjadi lebih murah di samping dapat mempergunakan bahan bakar dengan viskositas yang lebih tinggi. Perbandingan kompresi yang biasa dipergunakan berkisar antara 16-17, tetapi dapat dibuat lebih tinggi supaya jangan peka terhadap kualitas bahan bakar yang dipergunakan. Tekanan gas maksimum di dalam kamar muka jarang melampaui $50-60 \text{ kg/cm}^2$. Dibandingkan dengan motor diesel dengan ruang bakar terbuka, pemakaian bahan bakar spesifik dari motor diesel dengan ruang bakar kamar muka kira-kira 15 % lebih tinggi, yaitu antara $190-220 \text{ g/PS jam}$. Hal ini disebabkan oleh luas permukaan pendinginnya yang lebih besar sehingga kerugian kalornya lebih besar pula. Di samping itu terjadi kerugian energi karena sebagian diperlukan untuk memasukkan udara ke dalam kamar muka dan karena adanya kelambatan proses pembakaran.

Ruang bakar kamar muka memiliki keuntungan-keuntungan sebagai berikut:

- Pemakaian jenis-jenis bahan bakar lebih luas dikarenakan turbulensi sangat baik untuk mengabutkan bahan bakar.

- Perawatan pada pompa tekanan tinggi lebih mudah karena tekanan penyemprotan lebih rendah dan tidak terlalu peka terhadap perubahan saat injeksi.

Kerugian-kerugian pemakaian ruang bakar kamar muka adalah:

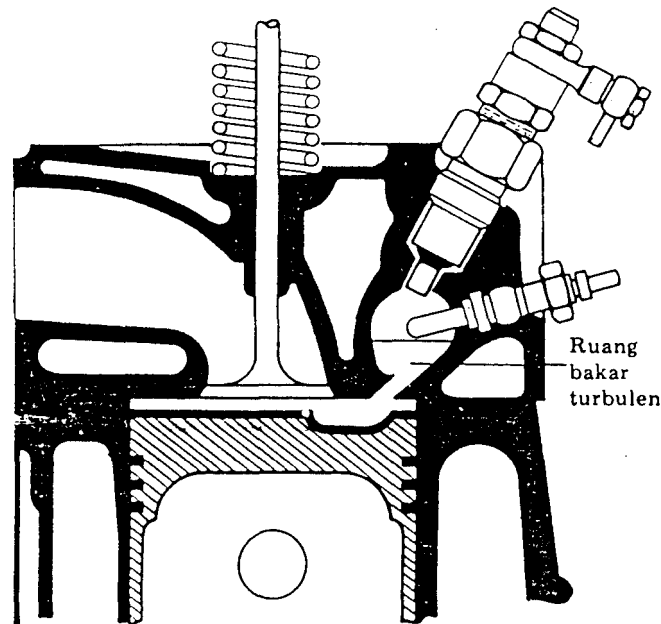
- Biaya pembuatan lebih mahal sebab perencanaan silinder lebih rumit.
- Harus menggunakan glow plug untuk memudahkan penyalaan motor.
- Pemakaian bahan bakar cukup boros.

2.5.3 Ruang Bakar Turbulen

Seperti konstruksi ruang bakar kamar muka, ruang bakar ini juga dibagi dua bagian. Tetapi kamar turbulennya bervolume antara 80-90 % dari volume sisa. Ruang bakar kamar muka juga tergolong *indirect Injection*. Di samping itu kedua ruang bakar tersebut dihubungkan oleh suatu saluran yang berpenampang lebih luas. Pada langkah kompresi, udara dipaksa masuk ke dalam ruang turbulen sehingga terjadi gerak udara berputar-putar. Udara akan berputar makin kencang jika kecepatan torak yang mendorong udara tersebut masuk ke dalam kamar turbulen bertambah besar. Bahan bakar disemprotkan ke dalam arus udara yang berputar di dalam kamar turbulen. Putaran udara itu turut membantu proses pengabutan bahan bakar dan pencampurannya dengan udara. Oleh karena itu motor diesel dengan ruang bakar turbulen tidak memerlukan penyemprot tekanan tinggi.

Motor diesel dengan ruang bakar turbulen mempergunakan penyemprot jenis nosel pasak dengan tekanan penyemprot antara 85-140 kg/cm^2 . Motor Diesel **dengan ruang bakar turbulen juga memerlukan alat pemanas di ruang turbulen.** Sesudah mesin bekerja dengan baik alat pemanas tidak diperlukan lagi. Makin tinggi temperatur dinding kamar turbulen makin cepat pula periode persiapan pembakarannya. Karena itu dalam periode pembakaran cepat dapatlah dicegah terjadinya laju kenaikan tekanan yang terlalu tinggi. Di samping itu udara yang berputar kencang itupun akan menyebabkan makin singkatnya periode pembakaran terkendali. Maka ruang bakar turbulen sangat baik untuk motor diesel kecepatan tinggi. Tekanan maksimumnya berkisar antara 60-70 kg/cm^2 . Laju kenaikan tekanan dalam periode pembakaran cepat berkisar antara 2,5-4 $\text{kg/cm}^2 /$

derajat sudut engkol. Pemakaian bahan bakar spesifiknya mendekati motor diesel dengan ruang bakar terbuka ,yaitu 185-210 kg/PS jam.



Gambar 2.16 Ruang Bakar Turbulen⁷

Keuntungan-keuntungan yang diperoleh bila menggunakan ruang bakar turbulen adalah:

- Dapat menghasilkan putaran tinggi karena terdapat turbulensi yang sangat baik pada saat kompresi.
- Putaran motor lebih tinggi dan operasinya lembut.

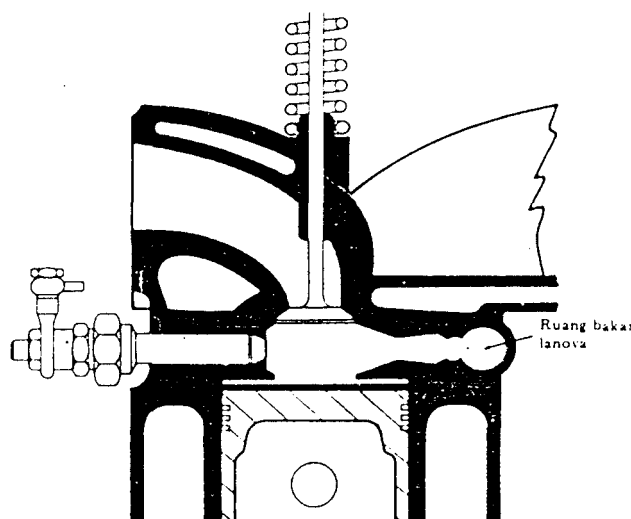
Ruang bakar turbulen memiliki kerugian-kerugian sebagai berikut:

- Bentuk kepala silinder dan blok silinder sangat rumit.
- Efisiensi panas dan pemakaian bahan bakar lebih boros dibandingkan dengan sistem injeksi langsung (***direct injection***).
- Penggunaan alat pemanas tidak begitu efektif sebab ruang bakar sangat luas.

2.5.4 Ruang Bakar Lanova

Prinsip kerja motor diesel dengan ruang bakar Lanova mirip dengan prinsip kerja ruang bakar kamar muka. Ruang bakar lanova juga tergolong ***indirect injection***. Dari segi konstruksi, Perbedaan utamanya terletak pada posisi

penyemprot terhadap ruang lanova, yaitu tidak di dalam ruang tersebut tetapi di sebelah luarnya. Penyemprot dari ruang lanova terletak berhadapan dengan lubang ruang Lanova pada jarak tertentu. Kira-kira 60 % dari bahan bakar yang disemprotkan masuk ke dalam ruang Lanova yang bervolume 10 % dari volume sisa. Ruang lanova sendiri terbagi dua bagian, yaitu ruang lanova besar dan kecil. Proses penyalan pertama terjadi di dalam ruang bakar utama. Sementara penyemprotan bahan bakar masih berlangsung, terjadilah pembakaran di dalam ruang lanova kecil. Kenaikan tekanan yang terjadi karenanya menyebabkan bahan bakar yang belum terbakar sempurna itu tersembur keluar dari penyemprot. Maka terjadilah proses pencampuran yang lebih efektif karena ruang bakar utama dibentuk sedemikian rupa sehingga dapat menyebabkan arus berputar. Pada waktu torak mulai **turun** dari titik mati atas menuju titik mati bawah, terjadilah perbedaan tekanan yang cukup besar antara ruang lanova dan ruang bakar utama. Karena itu proses penyemburan gas dan bahan bakar dari ruang lanova ke dalam ruang bakar utama berlangsung dengan kecepatan lebih tinggi. Dengan demikian diharapkan terjadi proses pembakaran yang lebih halus.



Gambar 2.17 Ruang Bakar Lanova¹⁷

Penyemprotnya mempergunakan nosel pasak dengan tekanan penyemprotan sekitar $125-130 \text{ kg/cm}^2$ dan **sudut** pancaran **yang** lebih kecil. Bahan bakar dengan bilangan setana yang lebih tinggi, yaitu sekitar 50 merupakan bahan

bakar yang sebaiknya dipergunakan dalam hal ini. Motor diesel dengan ruang bakar lanova dapat mempergunakan perbandingan kompresi yang rendah sekitar 13-15 sehingga tidak dijumpai kesulitan untuk menghidupkannya. Penggunaan ruang **bakar** lanova sangat menguntungkan termasuk pada motor diesel yang bekerja pada kecepatan tinggi.

Keuntungan-keuntungan ruang bakar lanova adalah:

- Mudah untuk melakukan penyalaan awal.
- Proses penyampuran bahan bakar dengan udara baik.

Kerugian-kerugian ruang bakar lanova adalah:

- Bentuk ruang bakar yang rumit.
- Harga ruang bakar yang cukup mahal.

2.6 Proses Pembakaran

Proses pembakaran adalah suatu reaksi kimia cepat antara bahan bakar hidrokarbon dengan oksigen yang mengakibatkan pelepasan energi. Oksigen untuk proses pembakaran biasanya didapatkan dari udara. Proses pembakaran ini tidak terjadi sekaligus tetapi memerlukan waktu dan terjadi dalam beberapa tahap. Di samping itu penyemprotan bahan bakar juga tidak dapat dilaksanakan sekaligus tetapi berlangsung antara 30-40 derajat sudut engkol. Tekanan udara akan naik selama langkah kompresi berlangsung. Beberapa derajat sebelum torak mencapai titik mati atas bahan bakar mulai disemprotkan. Bahan bakar akan segera menguap dan bercampur dengan udara yang sudah bertemperatur tinggi. Oleh karena temperaturnya sudah melebihi temperatur penyalaan bahan bakar, bahan bakar akan terbakar sendiri dengan cepat.

Ada empat tahapan dalam proses pembakaran pada motor diesel, yaitu:

- Periode persiapan pembakaran.
Waktu yang diperlukan antara saat bahan bakar mulai disemprotkan dengan saat mulai terjadinya pembakaran dinamai periode persiapan pembakaran. Waktu persiapan 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.

- Periode pembakaran cepat.

Sesudah melampaui periode persiapan pembakaran, bahan **bakar akan** terbakar dengan cepat. Karena proses pembakaran tersebut terjadi dalam suatu proses pengecilan volume. Sampai torak bergerak kembali beberapa sudut engkol sesudah titik mati atas; tekanannya masih bertambah besar tetapi laju kenaikan tekanannya berkurang. Periode pembakaran, ketika terjadi kenaikan tekanan yang berlangsung dengan cepat dinamai periode pembakaran cepat.

- Periode pembakaran terkendali.

Periode pembakaran ketika masih terjadi kenaikan tekanan sampai tercapainya tekanan yang maksimum dalam tahap berikutnya dinamai periode pembakaran terkendali.

- Periode pembakaran lanjutan.

Dalam periode pembakaran lanjutan terjadi proses penyempurnaan pembakaran dan pembakaran dari bahan bakar yang belum sempat terbakar.

Perlu diperhatikan tekanan maksimum yang diperoleh. Supaya diperoleh efisiensi yang setinggi-tingginya, pada umumnya diusahakan agar tekanan maksimum terjadi pada saat torak berada diantara 15-20 derajat sudut engkol sesudah titik mati atas. Hal tersebut dapat dilaksanakan dengan jalan mengatur saat penyemprotan yang tepat. Saat penyemprotan bahan bakar yang optimum bergantung kepada cara pembentukan campuran serta kecepatan mesin yang bersangkutan. Usaha haruslah ditujukan untuk mempersingkat periode persiapan pembakaran, antara lain dengan cara sebagai berikut:

- Mempergunakan perbandingan kompresi yang tinggi.
- Memperbesar tekanan dan temperatur udara masuk.
- Memperbesar volume silinder sedemikian **rupa** sehingga dapat diperoleh perbandingan luas dinding terhadap volume yang sekecil-kecilnya untuk mengurangi kerugian panas.
- Menyemprotkan bahan bakar pada saat yang tepat dan mengatur pemasukkan jumlah bahan bakar yang sesuai dengan kondisi pembakarannya.
- Mempergunakan jenis bahan bakar yang sebaik-baiknya.

- Mengusahakan adanya gerakan udara yang turbulen untuk menyempurnakan proses pencampuran bahan bakar-udara.
- Mempergunakan jumlah udara untuk memperbesar kemungkinan bertemunya bahan bakar dengan oksigen dari udara.

Hal tersebut terakhir merupakan persyaratan mutlak bagi motor diesel karena proses pencampuran bahan bakar-udara hanya terjadi dalam waktu yang sangat singkat.

2.6.1 Detonasi

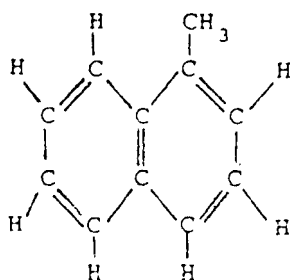
Detonasi pada motor diesel terjadi bila terdapat kerak yang telah mengeras dan angka setana bahan bakar rendah sehingga pembakaran tidak dapat berlangsung dengan cepat. Detonasi dalam silinder ditandai dengan getaran dan suara. Cara mencegah detonasi pada motor diesel, yaitu dengan cara memperpendek waktu pembakaran tertunda. Cara mengurangi detonasi pada motor diesel dengan menggunakan bahan bakar dengan angka setana yang tinggi.

2.7 Bahan Bakar

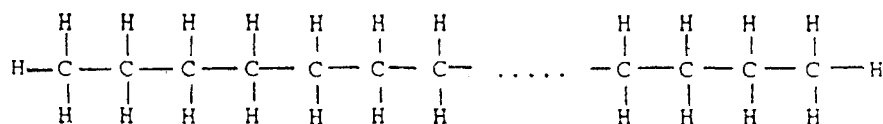
Bahan bakar merupakan suatu sumber energi tersimpan yang kemudian untuk memanfaatkannya direaksikan dulu dengan oksigen yang pada umumnya diambil **dari** udara untuk kemudian energi thermalnya yang merupakan energi transisi dapat dimanfaatkan oleh suatu peralatan untuk diubah menjadi bentuk energi lainnya. Bahan bakar cair adalah suatu bahan bakar yang pada suhu kamar dan tekanan atmosfer wujudnya adalah cair. Berbagai macam bahan bakar cair dapat ditemui seperti bensin, kerosin, solar dan alkohol. Di dalam bahan bakar secara umum hanya terdapat 3 unsur yang penting yaitu karbon, hydrogen dan belerang.

Bahan bakar adalah suatu bahan yang dikonsumsi untuk menghasilkan sejumlah energi panas. Energi adalah suatu kerja yang ada dalam berbagai bentuk dimana energi tersebut dapat dikonversikan dari suatu bentuk ke bentuk lainnya. Panas adalah energi yang bergerak dari suatu sistem ke sistem lain semata-mata karena perbedaan suhu antara kedua sistem. Kualitas bahan bakar motor diesel diukur dengan bilangan setananya. Sebagai bahan bakar standar dipergunakan

bahan bakar hidrokarbon rantai lurus, yaitu *hexadecane* atau *cetane* ($C_{16}H_{34}$) dan *alpha-methylnaphthalene*. $C_{16}H_{34}$ adalah bahan bakar dengan periode persiapan pembakaran yang pendek, kepadanya diberikan bilangan setana 100. *Alpha-methylnaphthalene* mempunyai periode persiapan pembakaran yang panjang jadi tidak baik dipergunakan sebagai bahan bakar motor diesel. Kepadanya diberikan bilangan setana 0. Untuk menentukan bilangan setana dari bahan **bakar** dipergunakan mesin CFR (*Coordinating Fuel Research-Engine*), yaitu sebuah mesin penguji yang perbandingan kompresinya dapat diubah.



Gambar 2.18 *Alpha-methylnaphthalene*¹⁹



Gambar 2.19 *Hexadecane* atau *Cetane*¹⁹

Dengan CFR yang bekerja pada kondisi standar, bahan bakar yang akan diukur bilangan setananya itu dipergunakan sebagai bahan bakarnya. Kemudian perbandingan kompresinya diatur sehingga diperoleh periode persiapan pembakaran sebesar 13 derajat sudut engkol. Sesudah itu, dengan kondisi yang sama, bahan bakar dari mesin CFR tersebut diganti dengan bahan bakar yang terdiri dari campuran $C_{16}H_{34}$ dan *alpha-methylnaphthalene*. Lalu mencari suatu perbandingan campuran yang dapat memberikan periode persiapan pembakaran yang sama yaitu sebesar 13 derajat sudut engkol. Dengan demikian bilangan setana bahan bakar yang diuji sama dengan bilangan setana campuran kedua

bahan bakar tersebut. Bahan bakar dengan bilangan setana lebih tinggi menunjukkan kualitas bahan bakar yang lebih baik untuk dipergunakan pada motor diesel. Bahan bakar motor diesel komersial mempunyai bilangan setana antara 35-55. Pada umumnya bahan bakar hidrokarbon dengan struktur atom rantai lurus mempunyai bilangan setana lebih tinggi daripada bahan bakar dengan struktur atom yang rumit. Motor diesel kecepatan tinggi sebaiknya mempergunakan bahan bakar dengan bilangan setana yang lebih tinggi. Jenis bahan bakar yang dapat digunakan pada motor diesel lebih banyak. Hal ini disebabkan konstruksi dari ruang bakar dan adanya alat pemanas untuk memudahkan penyalaan.

2.7.1 Gas Buang

Komponen-komponen gas buang yang membahayakan antara lain adalah asap hitam, hidrokarbon yang tidak terbakar, karbon monoksida CO, oksida nitrogen NO dan NO₂. NO dan NO₂ biasa dinyatakan dengan NO_x. Jika dibandingkan dengan motor Bensin, gas buang motor diesel tidak banyak mengandung CO dan hidrokarbon. Di samping itu kadar NO₂ sangat rendah jika dibandingkan dengan NO. Jadi boleh dikatakan komponen utama gas buang motor diesel yang membahayakan adalah NO dan asap hitam. Selain itu, bahan bakar dengan kadar belerang tinggi sebaiknya tidak digunakan karena akan mengakibatkan adanya SO₂ di dalam gas buang. Asap hitam disebabkan karena penguapan dan pencampuran bahan bakar dengan udara di dalam silinder tidak dapat berlangsung dengan sempurna. Terutama pada saat-saat dimana terlalu banyak bahan bakar yang disemprotkan, yaitu pada saat akselerasi maka terjadinya asap hitam tidak dapat dihindarkan. NO terjadi karena adanya reaksi antara N₂ dan O₂ pada temperatur tinggi yaitu diatas 2000 °C. NO merupakan gas yang berbahaya karena mengganggu saraf pusat. NO dan O₂ akan bereaksi membentuk NO₂ yang dapat menyebabkan bronchitis.

2.7.2 Karakteristik Bahan Bakar

Bahan bakar memiliki beberapa karakteristik sebagai berikut:

- Berat jenis.

Berat jenis adalah suatu perbandingan berat dari bahan bakar minyak yang dimaksudkan dengan berat dari air dengan volume yang sama, dimana suhu dari bahan bakar minyak dan suhu dari air adalah sama tingginya, yaitu umumnya 60°F. Di Amerika berat jenis minyak pada umumnya menggunakan satuan lain, yaitu derajat API (American Petroleum Institute). Antara derajat API dengan berat jenis memiliki hubungan sebagai berikut:

$$API = \frac{141,5}{SG} - 131,5 \quad (2.1)$$

Air pada 60°F mempunyai API gravity sebesar 10°. Semakin tinggi berat jenis dari bahan bakar maka biasanya nilai kalornya akan semakin tinggi.

- Viskositas.

Viskositas adalah suatu ukuran dari besarnya perlawanan suatu bahan bakar cair untuk mengalir. Viskositas yang besar akan mengakibatkan kerugian gesekan di dalam pipa, kerja pompa akan berat, sulit penyaringannya dan kemungkinan kotoran ikut terendap besar dan sulit mengabutkan bahan bakar. Sedangkan viskositas yang terlalu rendah akan mengakibatkan bahan bakar dikabutkan terlalu halus sehingga penetrasi ke ruang bakar rendah serta dapat merusak nosel karena kurang pelumasan

- Titiknyala.

Titik penyalan adalah temperatur dimana uap bahan bakar tepat menyala bila berdekatan dengan api. Makin tinggi angka setana-nya maka makin rendah titik penyalannya. Titik nyala tidak memiliki efek pada unjuk kerja dan motor diesel. Titik nyala hanya diperlukan untuk pertimbangan keamanan dalam penyimpanan dari bahan bakar tersebut.

- Nilai kalor.

Nilai kalor dari bahan bakar yang dibakar adalah besarnya panas yang dihasilkan oleh bahan bakar dengan jumlah tertentu dalam satuan kcal/kg bahan bakar. Bahan bakar mempunyai nilai kalor 10.000 sampai 11.000 kcal/kg. Kalor pembakaran bawah adalah panas yang dihasilkan pada pembakaran bahan bakar dimana H₂O dari hasil pembakaran tidak terkondensasi. Kalor pembakaran atas adalah panas yang dihasilkan pada

pembakaran bahan bakar dimana hasil pembakaran termasuk air didinginkan kembali sampai temperatur awal sehingga semua air terkondensasi.

- Angkasetana.

Angka setana pada bahan bakar untuk motor diesel menunjukkan kualitas penyalaan dari bahan bakar. Semakin tinggi angka setana, maka semakin pendek waktu penundaan penyalannya. Angka setana mempengaruhi penyalaan saat dingin, proses pembakaran, akselerasi dan jumlah asap. Angka setana di dalam bahan bakar diperlukan untuk mencegah adanya pukulan di dalam ruang pembakaran motor diesel. Motor diesel dengan putaran tinggi, memerlukan bahan bakar dengan angka setana yang tinggi. Bahan bakar dengan angka setana yang rendah akan mengakibatkan motor **susah** untuk penyalaan. Angka setana yang rendah juga akan menyebabkan waktu pembakaran tertunda panjang sehingga mengakibatkan detonasi.