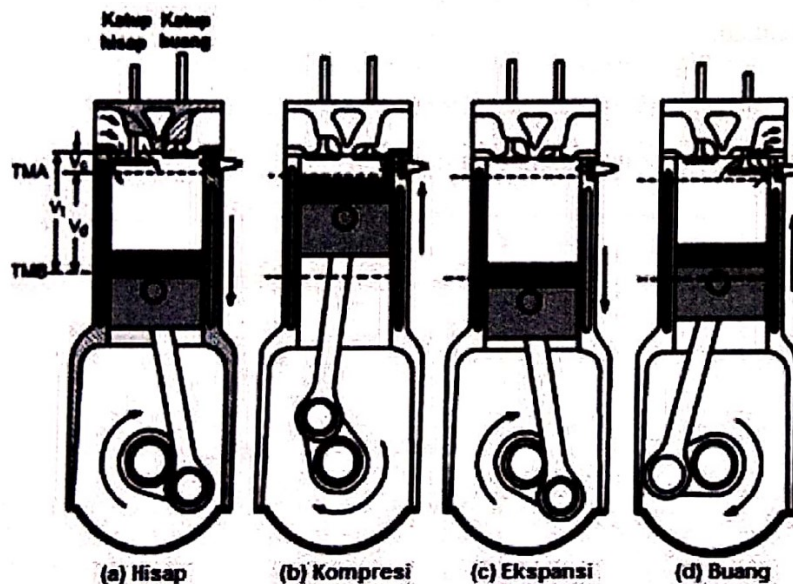


1. **Langkah hisap**, diawali dengan posisi torak di TMA dan berakhir dengan posisi torak di TMB, yang mana menghisap campuran segar ke dalam silinder. Untuk meningkatkan massa campuran yang dihisap, katup masuk terbuka sesaat sebelum langkah hisap dimulai dan menutup setelah berakhirnya langkah tersebut.
2. **Langkah kompresi**, ketika kedua katup tertutup di mana campuran di dalam silinder dimampatkan dan volumenya diperkecil. Menjelang akhir langkah kompresi, pembakaran diaktifkan dan tekanan silinder naik dengan cepat.
3. **Langkah daya** atau langkah ekspansi, diawali dengan posisi torak di TMA dan berakhir di TMB ketika temperatur dan tekanan gas yang tinggi mendorong torak ke bawah dan memaksa poros engkol untuk berputar. Ketika torak mendekati TMB, katup buang terbuka untuk mengawali proses buang dan tekanan silinder turun mendekati tekanan buang.
4. **Langkah buang**, di mana sisa gas yang dibakar keluar dari silinder disebabkan tekanan silinder yang pada hakikatnya lebih tinggi dibanding tekanan buang. Gas kemudian didorong keluar oleh torak ketika bergerak ke arah TMA. Ketika torak mendekati TMA, katup masuk terbuka. Sesaat setelah TMA, katup buang menutup dan siklus dimulai lagi.



Gambar 1-16 Prinsip kerja motor 4-langkah

Untuk memperoleh keluaran daya yang lebih tinggi dari ukuran motor yang ditentukan, dan desain katup yang lebih sederhana, dikembangkan siklus dua langkah. Siklus dua langkah juga dapat digunakan baik untuk motor pengapian percikan maupun pengapian kompresi.

## 1.5 PARAMETER KINERJA MOTOR

Kinerja motor bergantung pada beberapa parameter, yaitu kinematika torak, kerja, tekanan efektif purata, torsi dan daya, serta konsumsi bahan bakar spesifik. Berikut ini akan dibahas satu per satu.



### 1.5.1 KINEMATIKA TORAK

Ada dua mekanisme gerak yang terjadi pada motor bakar, yaitu gerak bolak-balik dan gerak putar. Gerak bolak-balik dilakukan oleh komponen torak, batang torak (*connecting rod*) dan katup. Gerak putar dihasilkan oleh komponen poros engkol, poros bubungan, dan roda penerus (*flywheel*).

Torak bergerak translasi bolak-balik di dalam silinder antara TMA dan TMB dengan kecepatan purata sebanding dengan kecepatan poros engkol. Jadi, dalam sekali putaran poros engkol, torak menjalani lintasan yang sama dari TMA ke TMB dan sebaliknya sebanyak dua kali langkahnya.

$$\bar{v}_t = 2SN \quad (1-1)$$

di mana:

$S$  = panjang langkah (m)

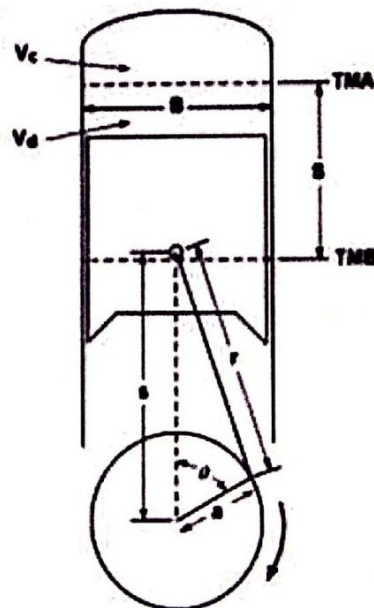
$N$  = putaran poros engkol, putaran/menit (RPM)

$\bar{v}_t$  = kecepatan torak purata (m/s)

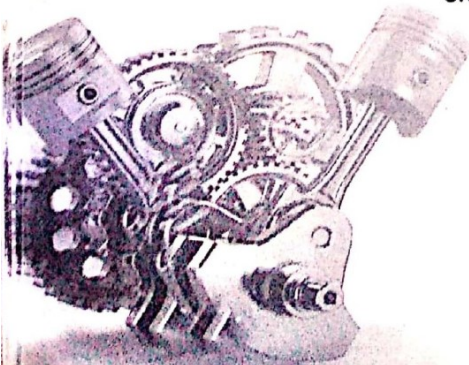
Hubungan antara panjang langkah,  $S$ , dan radius engkol (*crank offset*),  $a$ , suatu motor dengan diameter silinder (*bore*),  $B$  (Gambar 1-17), yang berputar pada kecepatan motor,  $N$ , dinyatakan dengan:

$$\bar{S} = 2a \quad (1-2)$$

$B$  dan  $a$  pada umumnya dinyatakan dalam  $m$  atau  $cm$ .



Gambar 1-17 Geometri torak dan silinder. (Ket:  $B$  = diameter silinder,  $S$  = panjang langkah,  $r$  = panjang langkah penghubung,  $a$  = radius engkol,  $s$  = posisi torak,  $\theta$  = sudut engkol,  $V_c$  = volume sisa (*volume clearance*),  $V_d = V_L$  = volume langkah)



Posisi torak, atau lintasanya sejauh  $s$  dari titik matinya dinyatakan oleh Pulkrabek, 2004 dengan:

$$s = a \cos \theta + \sqrt{r^2 - a^2 \sin^2 \theta} \quad (1-3)$$

di mana:

$a$  = radius engkol,

$r$  = panjang batang penghubung (*connecting rod*),

$\theta$  = sudut engkol, yang diukur dari garis pusat (*centerline*) silinder dan bernilai nol ketika torak berada di TMA.

Jika rasio panjang batang penghubung,  $r$ , terhadap radius engkol,  $a$ , dinyatakan dengan  $R$ , atau:

$$R = r/a \quad (1-4)$$

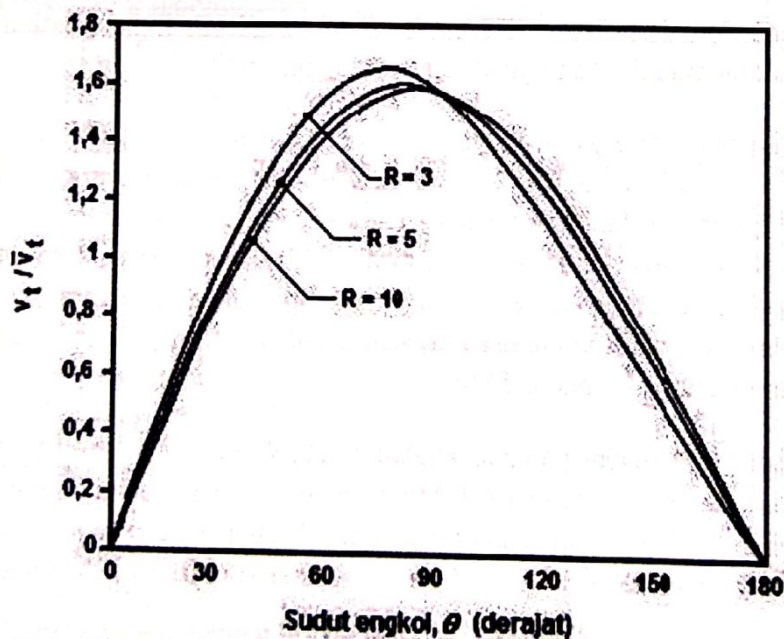
Persamaan (1-3) dapat dinyatakan ulang melalui:

$$s = a \cos \theta + \sqrt{r^2 - a^2 \sin^2 \theta} = a \cos \theta + \sqrt{R^2 a^2 - a^2 \sin^2 \theta}$$

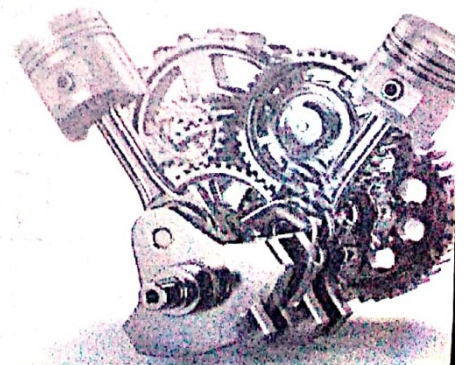
$$s = a \cos \theta + a \sqrt{R^2 - \sin^2 \theta}, \text{ atau}$$

$$s = a \left[ \cos \theta + \sqrt{R^2 - \sin^2 \theta} \right] \quad (1-5)$$

Nilai  $R$  untuk motor kecil pada umumnya antara 3 sampai 4, sedangkan untuk motor besar antara 5 sampai 10. Dalam Gambar 1-18 ditunjukkan pengaruh  $R$  terhadap kecepatan torak.



Gambar 1-18 Kecepatan sesaat torak relatif terhadap kecepatan torak purata sebagai fungsi sudut engkol untuk beberapa nilai  $R$



Jika  $s$  dideferensial terhadap waktu maka diperoleh kecepatan sesaat torak,  $v_i$ :

$$\underline{v_i = \frac{ds}{dt}} \quad (1-6)$$

Rasio kecepatan torak sesaat terhadap kecepatan torak purata dinyatakan dengan:

$$\underline{\frac{v_i}{\bar{v}_i} = \frac{\pi}{2} \sin\theta \left[ 1 + \left( \frac{\cos\theta}{\sqrt{R^2 - \sin^2\theta}} \right) \right]} \quad (1-7)$$

Pada awal langkah, kecepatan torak adalah nol, mencapai maksimum menjelang pertengahan langkah, dan berkurang kembali menjadi nol pada akhir langkah.

Menurut Maalev, 1989, kecepatan purata torak maksimum secara normal berada pada kisaran 5 sampai 20  $m/s$  (terendah pada motor diesel berukuran besar dan tertinggi pada motor berkinerja tinggi). Ada dua alasan mengapa motor beroperasi pada kisaran kecepatan ini. Pertama, berkaitan dengan batas aman yang dapat diterima oleh kekuatan material komponen motor. Pada setiap putaran, torak dipercepat dua kali, dari keadaan diam ke kecepatan maksimum dan kembali diam. Jika motor dioperasikan pada kecepatan lebih tinggi, dimungkinkan terjadi bahaya kegagalan material pada torak dan batang penggerak saat torak dipercepat atau diperlambat pada setiap langkahnya. Dalam persamaan (1-1) ditunjukkan bahwa kecepatan purata torak juga menggambarkan kecepatan putaran motor dan tergantung pada ukuran motor.

Alasan kedua, yaitu karena kecepatan torak menentukan laju aliran spontan udara-bahan bakar ke dalam silinder selama langkah hisap, dan selama langkah buang mengalirkan gas sisa pembakaran keluar dari silinder. Kecepatan torak yang lebih tinggi membutuhkan katup lebih besar untuk memungkinkan laju aliran lebih tinggi.

Beberapa parameter penting yang berhubungan dengan geometri motor bakar torak sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 1-17, di antaranya adalah diameter (*bore*) silinder,  $B$ ; radius engkol,  $a$ ; panjang langkah (*stroke*) torak,  $S$ , yang menyatakan pergerakan torak dari Titik Mati Atas (TMA) ke Titik Mati Bawah (TMB) dan sebaliknya; volume langkah (*displacement*),  $V_L$ , yang menyatakan volume yang dipindahkan oleh torak ketika bergerak sepanjang satu langkah; dan volume sisa (*clearance volume*),  $V_c$ , yang menyatakan volume silinder minimum pada saat torak di TMA.

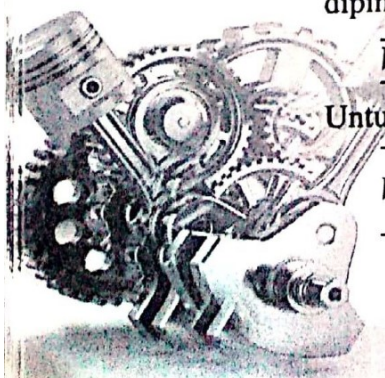
Rasio *bore* silinder,  $B$ , terhadap panjang langkah torak,  $S$ , atau  $B/S$  untuk motor kecil. Pada umumnya berkisar antara 0,8 sampai 1,2. Motor dengan  $B = S$  disebut motor *square*. Jika panjang langkah lebih besar dari diameter silinder disebut dengan motor *under square*, dan jika panjang langkah lebih kecil dari pada diameter silinder maka disebut motor *over square*.

Langkah atau volume *displacement*,  $V_d$ , atau volume langkah,  $V_L$ , adalah volume yang dipindahkan oleh torak ketika bergerak dari TMB ke TMA:

$$\underline{V_L = V_{TMB} - V_{TMA}} \quad (1-8)$$

Untuk satu silinder dinyatakan dengan:

$$\underline{V_L = \left( \frac{\pi}{4} \right) B^2 S} \quad (1-9)$$



Untuk motor dengan  $N_c$  silinder,

$$\overline{V_L} = N_c \left( \frac{\pi}{4} \right) B^2 S \quad (1-10)$$

di mana:

$B$  = diameter silinder,  $S$  = panjang langkah, dan  $N_c$  = jumlah silinder motor.  
Volume langkah motor dinyatakan dalam  $m^3$ ,  $cm^3$ , atau dalam liter ( $L$ ).

Untuk volume langkah tertentu dengan langkah yang lebih panjang maka perlu mempertimbangkan diameter silinder yang lebih kecil (*under square*). Dengan demikian area permukaan ruang bakar lebih kecil sehingga kerugian kalor dapat dikurangi, di mana pada gilirannya akan meningkatkan efisiensi termal. Tetapi langkah yang lebih panjang membutuhkan kecepatan torak yang lebih tinggi. Di samping itu, menghasilkan rugi gesekan yang lebih besar, dan pada gilirannya mengurangi keluaran daya motor. Jika langkah diperpendek, diameter silinder harus diperbesar dan motor menjadi *over square*. Hal ini mengurangi kerugian gesek tetapi meningkatkan kerugian pertukaran kalor. Kebanyakan motor mobil modern mendekati motor *square* dengan beberapa mendekati *over square* atau *under square*.

Volume silinder minimum, di mana jika torak berada di TMA maka disebut dengan volume sisa atau volume *clearance*,  $V_c$ , atau

$$\overline{V_c} = V_{TMA} \quad (1-11)$$

$$\overline{V_{TMB}} = V_c + V_L \quad (1-12)$$

Rasio kompresi motor didefinisikan dengan:

$$r_c = \frac{V_{TMB}}{V_{TMA}} = \frac{(V_c + V_L)}{V_c} = \frac{v_{TMB}}{v_{TMA}} \quad (1-13)$$

Motor bensin modern mempunyai rasio kompresi antara 8 sampai 11, sedangkan motor diesel mempunyai rasio kompresi antara 12 sampai 24. Motor yang dilengkapi supercarjer atau turbocarjer umumnya mempunyai rasio kompresi lebih rendah daripada motor konvensional.

Volume silinder pada setiap sudut engkol dinyatakan dengan:

$$\overline{V} = V_c + \left( \frac{\pi B^2}{4} \right) (r + a - s) \quad (1-14)$$

di mana:

- $V_c$  = volume *clearance* torak
- $B$  = diameter silinder
- $r$  = panjang batang penghubung
- $a$  = radius engkol
- $s$  = posisi torak (Gambar 1-15)

Persamaan (1-14) juga dapat dituliskan dalam bentuk tanpa dimensi dengan membagi kedua ruas persamaan dengan  $V_c$ , substitusi untuk  $r$ ,  $a$  dan  $s$ , dan memanfaatkan definisi  $R$ .

$$\overline{\frac{V}{V_c}} = 1 + \frac{1}{2}(r_c - 1) \left[ R + 1 - \cos\theta - \sqrt{R^2 - \sin^2\theta} \right] \quad (1-15)$$



di mana  $r_c$  = perbandingan kompresi dan  $R = \frac{r}{a}$

Luas penampang silinder dan luas permukaan puncak-datar (*flat-topped*) torak masing-masing dinyatakan oleh

$$A_t = \left(\frac{\pi}{4}\right) B^2 \quad (1-16)$$

Luas permukaan ruang bakar adalah

$$A = A_{ch} + A_t + \pi B(r + a - s) \quad (1-17)$$

di mana  $A_{ch}$  adalah luas permukaan kepala silinder (*cylinder head*), dan sedikit lebih besar dari  $A_t$ .

Jika definisi untuk  $r$ ,  $a$ ,  $s$  dan  $R$  digunakan, maka dapat dituliskan ulang sebagai

$$A = A_{ch} + A_t + \left(\frac{\pi BS}{2}\right) \left[ R + 1 - \cos\theta - \sqrt{R^2 - \sin^2\theta} \right] \quad (1-18)$$

### Contoh Soal 1-1

Motor penyalaan percikan V6 kapasitas 3 L beroperasi pada siklus 4-langkah dengan 3000 RPM. Rasio kompresi 9,5, panjang batang penghubung 16,6 cm, tipe *square* ( $B = S$ ). Pada kecepatan tersebut, pembakaran berakhir pada  $20^\circ$  sesudah TMA. Tentukan:

1. Diameter silinder dan panjang langkah
2. Kecepatan torak purata
3. Volume *clearance* torak pada satu silinder
4. Kecepatan torak pada akhir pembakaran
5. Posisi torak dalam perjalanan dari TMA ke akhir pembakaran.
6. Volume di dalam ruang bakar pada akhir pembakaran

### Penyelesaian:

1. Karena kapasitas silinder diketahui maka diameter silinder dan panjang langkah dapat

dihitung menggunakan persamaan  $V_L = \left(\frac{\pi}{4}\right) B^2 S$  dengan  $B = S$

$$V_L = \left(\frac{\pi}{4}\right) B^2 S = \frac{V_{total}}{6} = \frac{3 L}{6} = 0,5 L = 0,0005 m^3 = \left(\frac{\pi}{4}\right) B^3$$

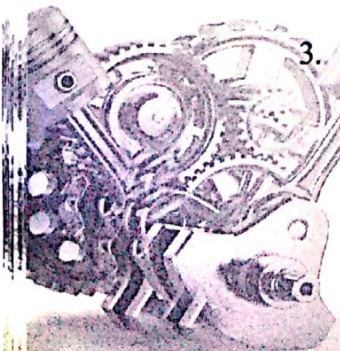
$$B = 0,0860 m = 8,60 cm = S$$

2. Kecepatan torak purata dihitung dari  $\bar{v}_t = 2SN$

$$\bar{v}_t = 2SN = \left(2 \frac{\text{langkah}}{\text{putaran}}\right) \left(0,0860 \frac{m}{\text{langkah}}\right) \left(\frac{3600}{60} \frac{\text{putaran}}{\text{sekon}}\right) = 10,32 \frac{m}{\text{sekon}}$$

3. Gunakan persamaan (1-13) untuk mendapatkan volume *clearance* torak untuk satu silinder.

$$r_c = \frac{V_{TMB}}{V_{TMA}} = \frac{(V_c + V_L)}{V_c} = \frac{v_{TMB}}{v_{TMA}}, \quad 9.5 = \frac{0.0005 + V_c}{V_c} \Leftrightarrow V_c = \underline{0.000059 m^3 = 59 cm^3}$$



4. Radius engkol,  $a = \frac{S}{2} = 0,0430 \text{ m} = 4,30 \text{ cm}$

Gunakan persamaan (1-7) untuk mendapatkan kecepatan sesaat torak:

$$\frac{v_t}{\bar{v}_t} = \frac{\pi}{2} \sin \theta \left[ 1 + \frac{\cos \theta}{\sqrt{R^2 - \sin^2 \theta}} \right]$$

$$\frac{v_t}{\bar{v}_t} = \left( \frac{\pi}{2} \right) \sin 20^\circ \left[ 1 + \frac{\cos 20^\circ}{\sqrt{(3,86)^2 - \sin^2 (20^\circ)}} \right] = 0,668$$

$$v_t = 0,668 \bar{v}_t = \underline{6,89 \text{ m/s}}$$

5. Posisi torak dihitung dengan persamaan (1.3)

$$s = a \cos \theta + \sqrt{r^2 - a^2 \sin^2 \theta}$$

$$= (0,0430 \text{ m}) \cos 20^\circ + \sqrt{(0,166 \text{ m})^2 - (0,0430 \text{ m})^2 \sin^2 (20^\circ)} = \underline{0,206 \text{ m}}$$

Jarak dari TMA adalah:

$$x = r + a - s = (0,166 \text{ m}) + (0,043 \text{ m}) - (0,206 \text{ m}) = \underline{0,003 \text{ m} = 0,3 \text{ cm}}$$

6. Persamaan (1-15) digunakan untuk mendapatkan volume ruang bakar pada akhir pembakaran (volume sesaat)

$$\frac{V}{V_c} = 1 + \frac{1}{2} (r_c - 1) \left[ R + 1 - \cos \theta - \sqrt{R^2 - \sin^2 \theta} \right]$$

$$= 1 + \frac{1}{2} (9,5 - 1) \left[ 3,86 + 1 - \cos 20^\circ - \sqrt{(3,86)^2 - \sin^2 (20^\circ)} \right] = 1,32$$

$$V = 1,32 V_c = (1,32)(59 \text{ cm}^3) = \underline{77,9 \text{ cm}^3} = 0,0000779 \text{ m}^3$$

## 1.5.2 KINERJA

Kinerja pada motor pembakaran dalam dihasilkan oleh gas di dalam silinder ruang bakar. Kinerja merupakan hasil dari suatu gaya yang bekerja melalui suatu jarak tertentu. Ini berkaitan dengan gaya yang dihasilkan tekanan gas pada torak yang bergerak. Kinerja yang dihasilkan pada suatu siklus motor pembakaran dalam:

$$\underline{W = \int F dx = \int P A_t dx} \quad (1-19)$$

di mana

$P$  = tekanan di dalam ruang bakar

$A_t$  = luasan di mana torak bekerja

$x$  = jarak gerakan torak

dan

$$\underline{A_t dx = dV} \quad (1-20)$$

$dV$  adalah volume diferensial yang dipindahkan oleh torak ketika bergerak ke suatu jarak  $dx$  sehingga kerja yang dilakukan dapat dituliskan dengan:

$$\underline{W = \int P dV} \quad (1-21)$$