

Kalor yang ditambahkan per satuan massa untuk satu siklus:

$$q_{in} = q_{2-3} = c_p (T_3 - T_2) = (1,108 \text{ kJ/kg-K})(2683 - 875)K = 2033,3 \text{ kJ/kg}$$

Efisiensi termal indikasi dihitung dengan persamaan.

$$\eta_t = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{1049,6}{2003,3} = 0,524 = 52,4\%$$

Efisiensi termal juga dapat dihitung melalui persamaan (2-59) atau (2-60):

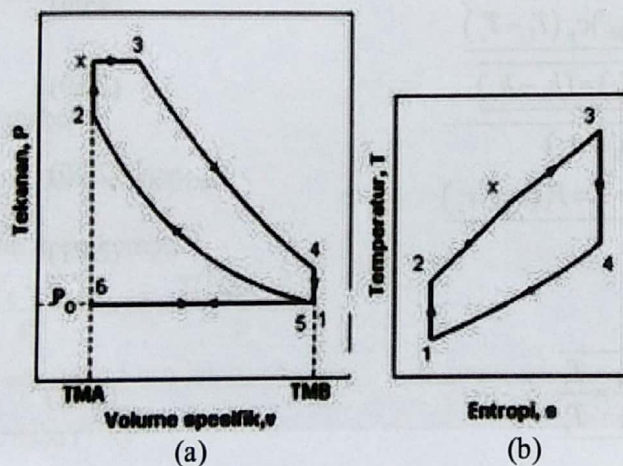
$$\eta_t = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{[k(T_3 - T_2)]} = 1 - \frac{(1489 - 328)}{[1,35(2683 - 875)]} = 0,524$$

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

$$= 1 - \left(\frac{1}{16,5}\right)^{1-1,35} \left\{ \frac{(3,08)^{1,35} - 1}{1,35(3,08 - 1)} \right\} = 0,524$$

2.4 SIKLUS GANDA

Siklus ganda (*dual cycle*), atau kadang-kadang siklus **tekanan terbatas** (Gambar 2-6), merupakan siklus udara standar yang digunakan untuk menganalisis siklus motor pengapian kompresi modern. Disebut siklus ganda karena pemasukan kalor pada proses pembakaran yang terbaik dapat didekati melalui proses ganda, yaitu proses volume konstan diikuti proses tekanan konstan. Dapat juga dianggap sebagai modifikasi siklus Otto dengan suatu batasan tekanan bagian atas.



Gambar 2-6 Siklus dual udara standar motor diesel 6-1-2-x-3-4-5-6 (a) pada koordinat tekanan-volume, dan (b) pada koordinat temperatur-entropi

2.4.1 ANALISIS TERMODINAMIKA SIKLUS GANDA UDARA STANDAR

Analisis siklus ganda udara standar sama seperti siklus diesel, kecuali untuk proses pemasukan kalor (pembakaran) 2-x-3.

Proses 2-x:

Pemasukan kalor pada volume konstan (bagian pertama pembakaran).

Seluruh katup tertutup:

$$\overline{V_x} = \overline{V_2} = \overline{V_{TMA}} \quad (2-61)$$

$$\overline{w_{2 \rightarrow x}} = 0 \quad (2-62)$$

$$\overline{Q_{2 \rightarrow x}} = m_{camp} c_v (T_x - T_2) \quad (2-63)$$

$$\overline{Q_{2 \rightarrow x}} = (m_{ud} + m_{bb}) c_v (T_x - T_2) \quad (2-64)$$

$$\overline{q_{2 \rightarrow x}} = c_v (T_x - T_2) = (u_x - u_2) \quad (2-64)$$

$$\overline{P_x} = \overline{P_{maks}} = \overline{P_2} \frac{T_x}{T_2} \quad (2-65)$$

Rasio tekanan didefinisikan sebagai kenaikan tekanan selama pembakaran, diberikan melalui persamaan:

$$\alpha = \frac{\overline{P_x}}{\overline{P_2}} = \frac{\overline{P_3}}{\overline{P_2}} = \frac{T_x}{T_2} = \left(\frac{1}{r_c} \right)^k \left(\frac{\overline{P_3}}{\overline{P_1}} \right) \quad (2-66)$$

Proses x-3:

Pemasukan kalor pada tekanan konstan (bagian kedua pembakaran).

Seluruh katup tertutup:

$$\overline{P_3} = \overline{P_x} = \overline{P_{maks}} \quad (2-67)$$

$$\overline{Q_{x \rightarrow 3}} = m_{camp} c_p (T_3 - T_x) \quad (2-68)$$

$$= (m_{ud} + m_{bb}) c_p (T_3 - T_x)$$

$$\overline{q_{x \rightarrow 3}} = c_p (T_3 - T_x) = (h_3 - h_x) \quad (2-69)$$

$$\overline{w_{x \rightarrow 3}} = \overline{q_{x \rightarrow 3}} - (u_3 - u_x) \quad (2-70)$$

$$= \overline{P_x} (v_3 - v_x) = \overline{P_3} (v_3 - v_x)$$

$$\overline{T_3} = \overline{T_{maks}} \quad (2-71)$$

Rasio *cutoff*:

$$\beta = \frac{v_3}{v_x} = \frac{v_3}{v_2} = \frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_x} \quad (2-72)$$

Panas yang masuk:

$$\overline{Q_{in}} = \overline{Q_{2 \rightarrow x}} + \overline{Q_{x \rightarrow 3}} = m_{bb} \overline{Q_{HV}} \eta_c \quad (2-73)$$

$$\overline{q_{in}} = \overline{q_{2 \rightarrow x}} + \overline{q_{x \rightarrow 3}} = (u_x - u_2) + (h_3 - h_x) \quad (2-74)$$

Efisiensi termal siklus dual:

$$(\eta_t)_{Dual} = \frac{|w_{netto}|}{|q_{in}|} = 1 - \left(\frac{q_{out}}{q_{in}} \right) \quad (2-75a)$$



atau:

$$(\eta_t)_{Dual} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{[c_v(T_x - T_2) + c_p(T_3 - T_x)]} \quad (2-75b)$$

atau:

$$(\eta_t)_{Dual} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{[(T_x - T_2) + k(T_3 - T_x)]} \quad (2-75c)$$

Persamaan ini dapat diatur kembali untuk menghasilkan

$$(\eta_t)_{DUAL} = 1 - \left(\frac{1}{r_c}\right)^{k-1} \left[\frac{\{\alpha\beta^k - 1\}}{\{k\alpha(\beta - 1) + \alpha - 1\}} \right] \quad (2-76)$$

di mana: r_c = rasio kompresi, $k = c_p / c_v$, α = rasio tekanan dan β = rasio *cutoff*.

Contoh Soal 2-3

Suatu truk kecil bermesin diesel, 4-silinder, 4-liter beroperasi pada siklus ganda udara standar menggunakan bahan bakar diesel ringan pada rasio udara-bahan bakar 18. Rasio kompresi mesin adalah 16:1 dan diameter silinder 10,0 cm. Pada awal langkah kompresi, kondisi di dalam silinder adalah 60°C dan 100 kPa dengan residu pembuangan 2%. Dapat diasumsikan bahwa separuh panas yang masuk dari pembakaran ditambahkan pada volume konstan dan separuh lagi pada tekanan konstan. Hitunglah:

1. Temperatur dan tekanan pada setiap keadaan siklus
2. Efisiensi termal indikasi
3. Temperatur pembuangan

Penyelesaian:

1. Untuk satu silinder,

$$V_L = \frac{4l}{4} = 1l = 0,01m^3 = 1000cm^3$$

Dari persamaan rasio kompresi

$$r_c = \frac{V_{TMB}}{V_{TMA}} = \frac{(V_L + V_c)}{V_c} \rightarrow 16 = \frac{(1000 + V_c)}{V_c}$$

$$V_c = 66,7cm^3 = 0,0667L = 0,0000667m^3$$

Gunakan persamaan (1-8)

$$V_L = \left(\frac{\pi}{4}\right)B^2S, \text{ atau}$$

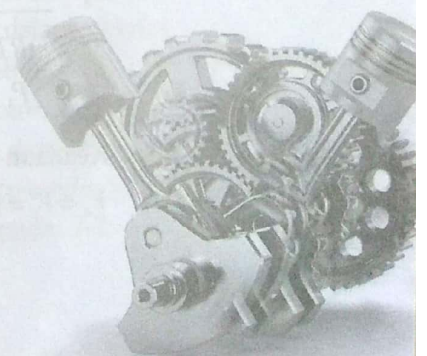
$$1000 = \left(\frac{\pi}{4}\right)(0,10m)^2S, \quad S = 0,127m = 12,7cm$$

Kedaaan 1:

$$T_1 = 60^\circ C = 333K \text{ diberikan dalam soal}$$

$$P_1 = 100kPa \text{ diberikan dalam soal}$$

$$V_1 = V_{TMB} = V_L + V_c = 0,001 + 0,0000667 = 0,0010667m^3$$



Massa gas di dalam silinder pada awal kompresi adalah

$$m_{\text{komp}} = \frac{PV_1}{RT_1} = \frac{(100 \text{ kPa})(0,0010677 \text{ m}^3)}{(0,287 \text{ kJ/kg-K})(333 \text{ K})} = 0,00112 \text{ kg}$$

Massa bahan bakar yang diinjeksikan per silinder per siklus adalah

$$m_{\text{bb}} = (0,00112)(0,98) \left(\frac{1}{19} \right) = 0,0000578 \text{ kg}$$

Keadaan 2: Temperatur, tekanan dan volume sesudah kompresi:

$$T_2 = T_1 (r_c)^{\gamma-1} = (333 \text{ K})(16)^{0,35} = 879 \text{ K} = 606^\circ\text{C}$$

$$P_2 = P_1 (r_c)^\gamma = (100 \text{ kPa})(16)^{1,35} = 4222 \text{ kPa}$$

$$V_2 = \frac{mRT_2}{P_2} = \frac{(0,00112 \text{ kg})(0,287 \text{ kJ/kg-K})(879 \text{ K})}{4222 \text{ kPa}} = 0,000067 \text{ m}^3 = V_c$$

atau dari persamaan (1-12)

$$V_2 = \frac{V_1}{r_c} = \frac{0,0010667}{16} = 0,0000667 \text{ m}^3$$

Keadaan x: Nilai kalor untuk bahan bakar diesel ringan diperoleh dari Tabel A-2 pada lampiran.

$$Q_{in} = m_{\text{bb}} Q_{HV} = (0,0000578 \text{ kg})(42.500 \text{ kJ/kg}) = 2,46 \text{ kJ}$$

Jika separuh dari Q_{in} terjadi pada volume konstan atau 1,23 kJ, dan separuh pada tekanan konstan maka dihasilkan:

$$Q_{2 \rightarrow x} = 1,23 \text{ kJ} = m_{\text{komp}} c_v (T_x - T_2)$$

$$123 = (0,00112 \text{ kg})(0,821 \text{ kJ/kg-K})(T_x - 879) \text{ K}$$

$$T_x = 2217 \text{ K} = 1944^\circ\text{C}$$

$$V_x = V_2 = 0,0000667 \text{ m}^3$$

$$P_x = \frac{mRT_x}{V_x} = \frac{(0,00112 \text{ kg})(0,287 \text{ kJ/kg-K})(2217 \text{ K})}{0,0000667 \text{ m}^3} = 10.650 \text{ kPa} = P_{\text{maks}}$$

$$\text{atau } P_x = P_2 \left(\frac{T_x}{T_2} \right) = (4222 \text{ kPa}) \left(\frac{2217}{879} \right) = 10.650 \text{ kPa}$$

Keadaan 3:

$$P_3 = P_x = 10.650 \text{ kPa} = P_{\text{maks}}$$

Dari persamaan

$$Q_{x \rightarrow 3} = 1,23 \text{ kJ} = m_{\text{komp}} c_p (T_3 - T_x)$$

$$123 \text{ kJ} = (0,00112 \text{ kg})(1,108 \text{ kJ/kg-K})(T_3 - 2217) \text{ K}$$

$$T_3 = 3208 \text{ K} = 2935^\circ\text{C} = T_{\text{maks}}$$

$$V_3 = \frac{mRT_3}{P_3} = \frac{(0,00112 \text{ kg})(0,287 \text{ kJ/kg-K})(3208 \text{ K})}{10.650 \text{ kPa}} = 0,000097 \text{ m}^3$$

Keadaan 4:

$$V_4 = V_1 = 0,0010676 \text{ m}^3$$



Temperatur dan tekanan setelah ekspansi:

$$T_4 = T_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1} = (3208 \text{ K}) \left(\frac{0,000097}{0,0010677} \right)^{0,35}$$

$$T_4 = 1386 \text{ K} = 1113^\circ\text{C}$$

$$P_4 = P_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^k = (10.650 \text{ kPa}) \left(\frac{0,000097}{0,0010667} \right)^{1,35} = 418 \text{ kPa}$$

Kerja keluaran proses x-3 untuk satu silinder dan satu siklus:

$$W_{x-3} = P(V_3 - V_x) = (10.650 \text{ kPa})(0,000097 - 0,0000667) \text{ m}^3 \\ = 0,323 \text{ kJ}$$

Kerja keluaran proses 3-4, gunakan persamaan:

$$W_{3-4} = \frac{mR(T_4 - T_3)}{(1-k)} = \frac{(0,00112 \text{ kg})(0,287 \text{ kJ/kg-K})(1386 - 3208) \text{ K}}{(1-1,35)} \\ = 1,673 \text{ kJ}$$

Kerja dalam proses 1-2, gunakan persamaan:

$$W_{1-2} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{(1-k)} = \frac{(0,00112 \text{ kg})(0,287 \text{ kJ/kg-K})(879 - 333) \text{ K}}{(1-1,35)} \\ = -0,501 \text{ kJ}$$

$$W_{net} = (+0,323) + (+1,673) + (-0,501) = +1,495 \text{ kJ}$$

2. Efisiensi termal indikasi siklus dual

$$(\eta_t)_{DUAL} = \frac{|W_{net}|}{|Q_{in}|} = \frac{(1,495 \text{ kJ})}{(2,46 \text{ kJ})} = 0,607 = 60,7\%$$

Rasio tekanan adalah:

$$\alpha = \frac{P_x}{P_2} = \frac{10.650}{4222} = 2,52$$

$$\text{Rasio cutoff adalah: } \beta = \frac{V_3}{V_x} = \frac{0,000097}{0,0000667} = 1,45$$

3. Temperatur pembuangan dihitung dari

$$T_b = T_4 \left(\frac{P_b}{P_4} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = (1386 \text{ K}) \left(\frac{100}{418} \right)^{\frac{(1,35-1)}{1,35}} = 957 \text{ K} = 684^\circ\text{C}$$

2.5 SIKLUS ATKINSON

Pada siklus Otto dan diesel, saat katup masuk terbuka menjelang akhir langkah ekspansi, tekanan di dalam silinder masih sekitar 3 sampai 5 atmosfer. Kemampuan melakukan tambahan kerja selama langkah daya akan hilang jika katup buang terbuka dan tekanan berkurang ke tekanan atmosfer. Jika katup buang tidak terbuka sampai gas di dalam silinder dimungkinkan untuk berekspansi ke tekanan atmosfer, sejumlah kerja yang lebih besar akan diperoleh pada saat langkah daya, dengan meningkatkan efisiensi termal motor. Berdasarkan pemikiran ini, *James Atkins*, 1882 memperkenalkan siklus yang serupa dengan siklus udara baku, disebut dengan **siklus Atkinson** atau **siklus over-ekspansi** (*over-expanded*). Sering juga disebut **siklus ekspansi lengkap** sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2-7.