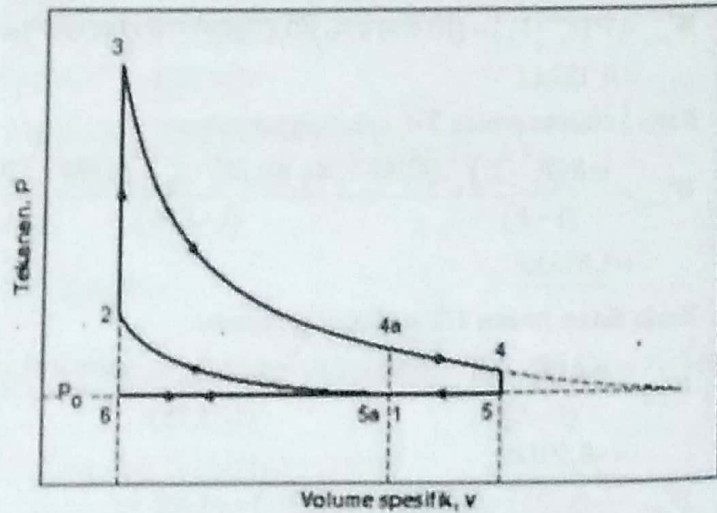


2.5 SIKLUS ATKINSON

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.

Siklus Atkinson mengacu pada motor empat langkah, di mana katup hisap ditahan terbuka lebih lama untuk mengizinkan aliran balik ke dalam manifold hisap. Hal ini mengurangi rasio kompresi efektif dan memungkinkan rasio ekspansi melebihi rasio kompresi sedangkan tekanan kompresi dijaga normal. Dari siklus ini, diharapkan ekonomi bahan bakar dapat diperbaiki karena rasio kompresi pada motor bensin dibatasi oleh tingkat oktan bahan bakar, sedangkan rasio ekspansi yang tinggi memberikan langkah daya lebih panjang dan mengurangi limbah kalor pada buangan sehingga membuat motor lebih efisien.

Gambar 2-7 Siklus Atkinson udara baku 6-1-2-3-4-5-6, dengan rasio ekspansi v_4/v_3 lebih besar dari rasio kompresi v_1/v_3 . Motor yang sama beroperasi dengan siklus Otto 1-2-3-4a-5a-6



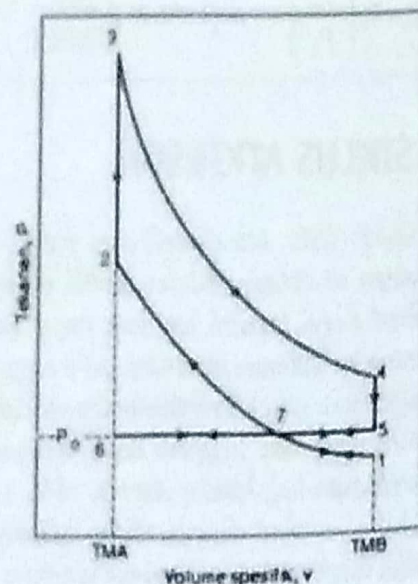
2.6 SIKLUS MILLER

Siklus Miller (Gambar 2-8), dinamai menurut penemunya, R.H. Miller (1890–1967), merupakan modifikasi dari siklus Atkinson modern dan mempunyai rasio ekspansi lebih besar dari rasio kompresi.

Saluran masuk udara pada siklus Miller tanpa trotel. Jumlah udara yang dicerna pada setiap silinder selanjutnya dikendalikan dengan penutupan katup hisap pada saat yang tepat, jauh sebelum TMB (titik 7 dalam Gambar 2-8).

Saat torak bergerak secara kontinu ke TMB sepanjang akhir langkah hisap, tekanan silinder berkurang melalui proses 7-1. Saat torak mencapai TMB dan mulai kembali menuju TMA, tekanan silinder meningkat lagi melalui proses 1-7. Siklus yang dihasilkan adalah 6-7-1-7-2-3-4-5-6.

Gambar 2-8 Siklus Miller udara baku motor bensin 4-langkah pada kondisi *unthrottle*. Jika katup masuk menutup lebih awal, siklusnya 6-7-1-7-2-3-4-5-7-6. Jika katup masuk terlambat menutup, siklusnya 6-7-5-7-2-3-4-5-7-6.



Kerja yang dihasilkan pada bagian pertama proses masukan 6-7 ditiadakan oleh bagian dari langkah buang 7-6, proses 7-1 ditiadakan oleh proses 1-7, dan kerja indikasi netto adalah luasan di bawah kurva 7-2-3-4-5-7. Dalam proses ini pada dasarnya tidak ada kerja pompa.

Rasio kompresi siklus Miller

$$\epsilon_c = \frac{V_1}{V_2} \quad (2-77)$$

dan rasio ekspansi yang lebih besar adalah

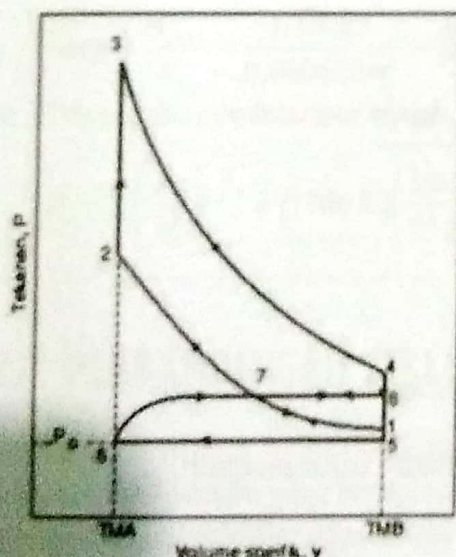
$$\epsilon_e = \frac{V_3}{V_2} = \frac{V_3}{V_1} \quad (2-78)$$

Langkah kompresi yang lebih pendek, yang menyerap kerja, dikombinasikan dengan langkah ekspansi yang lebih panjang, yang menghasilkan kerja, mengakibatkan kerja indikasi netto per siklus lebih besar.

Variasi lain dari siklus ini dihasilkan jika masukan udara tanpa trotel dan katup hisap tertutup setelah TMB. Dalam kondisi ini udara dimanfaatkan sepanjang langkah hisap, tetapi beberapa di antaranya kemudian didorong kembali ke manifold hisap sebelum katup masuk tertutup. Siklus yang dihasilkan 6-7-5-7-2-3-4-5-6 (Gambar 2-8). Kerja indikasi netto kembali pada luasan di bawah kurva 7-2-3-4-5-7. Agar setiap variasi siklus bekerja secara efisien, hal yang penting adalah katup hisap diupayakan untuk dapat menutup pada saat yang tepat di dalam siklus (titik 7). Namun kendali ini tidak mungkin dilakukan sampai ditemukan dan disempurnakannya sistem timing katup variabel.

Produksi motor mobil pertama yang beroperasi pada siklus Miller menggunakan dua metode, yaitu metode penutupan katup hisap lebih awal dan metode penutupan katup hisap lebih lambat. Beberapa jenis sistem timing katup variabel telah dikembangkan dan digunakan. Pembukaan dan penutupan katup dengan aktuator elektronik tanpa menggunakan poros bubungan, menawarkan fleksibilitas paling besar, baik untuk timing dan langkah katup variabel (*variable timing and lift, VTEC*).

Siklus Miller pada umumnya menggunakan pompa kompresor (*supercharged*) atau turbo-carjer dengan tekanan puncak manifold hisap 150–200 kPa. Gambar 2-9 menunjukkan suatu motor siklus Miller yang dilengkapi dengan supercarjer.



Gambar 2-9 Siklus Miller udara baku motor bensin 4-langkah dengan supercarjer atau turbocarjer. Jika katup masuk menutup lebih awal, siklusnya 6-7-1-7-2-3-4-5-6. Jika katup masuk terlambat menutup, siklusnya 6-7-8-7-2-3-4-5-6

Jika katup hisap tertutup lebih awal, siklusnya adalah 6-7-1-7-2-3-4-5-6. Jika katup hisap terlambat menutup, siklusnya menjadi 6-7-8-7-2-3-4-5-6.

Contoh Soal 2-4

Motor bensin mobil, 4-silinder, 2,5 liter pada Contoh Soal 2-1 diubah untuk beroperasi pada siklus Miller udara baku dengan menutup katup masuknya lebih awal (siklus 6-7-1-7-2-3-4-5-6 dalam Gambar 2-8). Rasio kompresi 8:1 dan rasio ekspansi 10:1. Suatu supercarjer ditambahkan, memberikan tekanan silinder 160 kPa jika katup masuk tertutup, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2-9. Temperatur di titik tersebut 60°. Bahan bakar serta rasio udara-bahan bakar yang digunakan sama dengan efisiensi pembakaran $\eta_c = 100\%$. Hitung:

1. Temperatur dan tekanan pada semua titik dalam siklus
2. Efisiensi termal indikasi
3. Tekanan efektif purata indikasi
4. Temperatur buang

Penyelesaian:

Dari Contoh Soal 2-1, untuk satu silinder,

$$V_L = 0,000626 m^3$$

Rasio ekspansi dihitung menggunakan persamaan:

$$r_e = \frac{V_4}{V_3} = \frac{(V_L + V_c)}{V_c} \rightarrow 10 = \frac{(0,000625 + V_c)}{V_c}$$

$$V_c = 0,000069 m^3 = V_2 = V_3 = V_6$$

$$V_1 = V_4 = V_5 = (V_L + V_c) = 0,000694 m^3$$

Rasio kompresi dihitung menggunakan persamaan

$$V_7 = V_2 r_c = (0,000069)(8) = 0,000552 m^3$$

1. Temperatur dan tekanan:

$$T_7 = 60^\circ C = 333 K \text{ diberikan dalam soal}$$

$$P_7 = P_8 = 160 kPa \text{ diberikan dalam soal}$$

$$P_1 = P_7 \left(\frac{V_7}{V_1} \right)^k = (160 kPa) \left(\frac{0,000552}{0,000694} \right)^{1,35} = 117 kPa$$

$$T_1 = T_7 \left(\frac{V_7}{V_1} \right)^{k-1} = (333 K) \left(\frac{0,000552}{0,000694} \right)^{0,35} = 307 K = 34^\circ C$$

$$T_2 = T_7 (r_c)^{k-1} = (333 K)(8)^{0,35} = 689 K = 416^\circ C$$

$$P_2 = P_7 (r_c)^k = (160 kPa)(8)^{1,35} = 2650 kPa$$

Massa gas di dalam silinder adalah:

$$m_1 = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{(117 kPa)(0,000694 m^3)}{(0,287 kJ/kg \cdot K)(307 K)} = 0,000922 kg$$

Jika AF = 15 dan residu buangan, $x_r = 4\%$, massa bahan bakar menjadi:

$$m_{bb} = \left(\frac{1}{16} \right) (0,96)(0,000922) = 0,000055 kg$$

$$Q_{in} = m_{bb} Q_{HV} \eta_c = (0,000055 \text{ kg})(44.300 \text{ kJ/kg})(1,00) = 2,437 \text{ kJ}$$

$$Q_{in} = m_{comp} c_v (T_3 - T_2)$$

$$2437 = (0,000922 \text{ kg})(0,821 \text{ kJ/kg-K})(T_3 - 689) \text{ K}$$

$$T_3 = 3908 \text{ K} = 3635^\circ \text{C}$$

$$P_3 = P_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right) = (2650 \text{ kPa}) \left(\frac{3908}{689} \right) = 15,031 \text{ kPa}$$

$$T_4 = T_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1} = T_3 \left(\frac{1}{r_c} \right)^{k-1} = (3908 \text{ K}) \left(\frac{1}{10} \right)^{0,35} = 1746 \text{ K} = 1473^\circ \text{C}$$

$$P_4 = P_3 \left(\frac{1}{r_c} \right)^k = (15,031 \text{ kPa}) \left(\frac{1}{10} \right)^{1,35} = 671 \text{ kPa}$$

$$V_4 = \frac{mRT_4}{P_4} = \frac{(0,000922 \text{ kPa})(0,287 \text{ kJ/kg-K})(1746 \text{ K})}{(671 \text{ kPa})} = 0,000694 \text{ m}^3$$

Ini sesuai dengan nilai yang diperoleh sebelumnya.

$$P_5 = P_b = 100 \text{ kPa}$$

$$T_5 = T_4 \left(\frac{P_5}{P_4} \right) = (1746 \text{ K}) \left(\frac{100}{671} \right) = 260 \text{ K}$$

2. Efisiensi termal indikasi dihitung sebagai berikut:

$$W_{3-4} = \frac{mR(T_4 - T_3)}{(1-k)} = \frac{(0,000922 \text{ kg})(0,287 \text{ kJ/kg-K})(1746 - 3908) \text{ K}}{(1-1,35)} = 1,635 \text{ kJ}$$

$$W_{7-2} = \frac{mR(T_2 - T_7)}{(1-k)} = \frac{(0,000922 \text{ kg})(0,287 \text{ kJ/kg-K})(689 - 333) \text{ K}}{(1-1,35)} = -0,269 \text{ kJ}$$

$$W_{6-7} = P_7 (V_7 - V_6) = (160 \text{ kPa})(0,000552 - 0,000069) \text{ m}^3 = 0,077 \text{ kJ}$$

$$W_{5-6} = P_5 (V_6 - V_5) = (100 \text{ kPa})(0,000069 - 0,000694) \text{ m}^3 = -0,063 \text{ kJ}$$

$$W_{net} = (+1,635) + (-0,269) + (+0,077) + (-0,063) = +1,380 \text{ kJ}$$

$$(\eta_t)_{MILLER} = \frac{|W_{net}|}{|Q_{in}|} = \frac{(1,380 \text{ kJ})}{(2,437 \text{ kJ})} = 0,566 = 56,6\%$$

3. Tekanan efektif purata indikasi, gunakan persamaan (1-29)

$$imep = \frac{W_{neto}}{V_L} = \frac{1,380 \text{ kJ}}{0,000625 \text{ m}^3} = 2208 \text{ kPa}$$

4. Temperatur pembuangan adalah

$$T_b = T_4 \left(\frac{P_b}{P_4} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = (1746 \text{ K}) \left(\frac{100}{671} \right)^{0,35} = 1066 \text{ K} = 793^\circ \text{C}$$

2.7 PERBANDINGAN SIKLUS MILLER DAN SIKLUS OTTO

Ketika motor dengan siklus Otto dalam Contoh Soal 2-1 dan Contoh Soal 2-2 dibandingkan dengan motor serupa yang beroperasi dengan siklus Miller seperti pada Contoh Soal 2-4, keunggulan siklus Miller dapat dilihat pada Tabel 2-2.

Temperatur awal pembakaran pada kedua siklus hampir sama, kecuali temperatur buang. Temperatur buang siklus Miller lebih rendah karena memiliki ekspansi pendinginan yang lebih besar. Rendahnya temperatur buang berarti lebih sedikit energi yang hilang di dalam buangan, dengan lebih banyak digunakan sebagai kerja keluaran pada langkah ekspansi yang lebih panjang. Tekanan pada siklus Miller lebih tinggi dibanding siklus Otto, sebagian besar oleh karena sistem masukan yang dilengkapi dengan pengisian tekan (*supercharged*).

Tabel 2-2 Perbandingan siklus Otto dan siklus Miller

Paremeter	Siklus Miller	Siklus Otto
Temperatur awal pembakaran, T_2 .	689 K	707 K
Takanan awal pembakaran, P_2 .	2650 kPa	1826 kPa
Temperatur maksimum, T_3 .	3908 K	3915 K
Tekanan maksimum, P_3 .	15.031 kpa	10.111 kPa
Temperatur pembuangan	1066 K	1183 K
Kerja netto indikasi per silinder per siklus untuk Q_m yang sama	1380 kJ	1030 kJ
Efisiensi termal indikasi	56,6%	52,9%
Tekanan efektif purata indikasi	2208 kPa	1649 kPa

Keunggulan teknis siklus Miller, di antaranya *IMEP*, efisiensi termal, dan kerja pada siklus Miller secara keseluruhan lebih tinggi dibanding siklus Otto. Sebagian dari kerja indikasi dan efisiensi termal indikasi siklus Miller hilang berkaitan dengan kebutuhan untuk menggerakkan *supercharger*.

Rangkuman

Untuk menganalisis siklus yang terjadi pada motor bakar, digunakan pendekatan teoretis siklus termodinamika yang menggunakan siklus udara yang dapat dianggap sebagai gas ideal. Siklus yang dianalisis pada umumnya siklus volume konstan, tekanan konstan, dan tekanan terbatas; yang mana masing-masing digunakan sebagai pendekatan teoretis proses pembakaran pada motor, baik pada motor bensin (siklus Otto) maupun pada motor diesel (siklus diesel).

Siklus termodinamika baku udara ideal terjadi pada sistem tertutup dengan komposisi campuran konstan. Ini tidak terjadi pada motor pembakaran dalam. Analisis baku udara hanya memberikan estimasi yang paling baik untuk kondisi-kondisi aktual, dan hanya dapat digunakan sebagai pendekatan teoretis

Siklus Otto didekati dengan siklus volume konstan, sedangkan siklus diesel didekati dengan siklus tekanan konstan. Siklus untuk motor penyalaan kompresi modern menggunakan pendekatan siklus ganda. Disebut siklus ganda karena proses pemasukan kalor pada proses pembakaran terbaik dapat didekati melalui proses ganda, yaitu volume konstan yang diikuti oleh tekanan konstan.

Pengembangan lebih lanjut dari siklus motor bakar dilakukan oleh James Atkinson (1882), yang dikenal dengan siklus Atkinson atau siklus over-ekspansi. Siklus ini memiliki langkah ekspansi lebih panjang dibanding langkah kompresi. Pengembangan siklus Atkinson

dilakukan oleh R.H. Miller (1890-1967), yang dikenal dengan siklus Miller. Siklus Miller merupakan suatu peningkatan dari siklus Otto yang disempurnakan oleh beberapa kemajuan teknologi, sebagian besar melalui timing kendali katup variabel. Kendali katup mempertimbangkan suatu siklus yang lebih efisien dengan mengurangi kerugian pompa dan memberi suatu rasio ekspansi lebih besar dari rasio kompresi efektif.