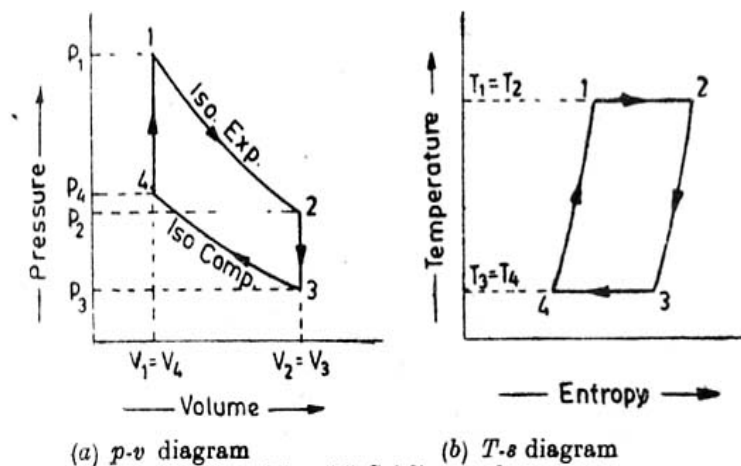


Siklus Stirling

Siklus ini ditemukan oleh Stirling, dimana terdiri dari dua proses isotermal dan dua proses volume konstan. Dua proses terakhir terjadi dengan bantuan sebuah *regenerator* untuk membuat siklus ini reversibel. Diagram $p-v$ dan $T-s$ siklus ini ditunjukkan oleh gambar 5.



Gambar 5. Siklus Stirling.

Sekarang kita lihat empat tingkat siklus Stirling. Misalkan silinder mesin berisi m kg udara pada keadaan awal, yang ditunjukkan oleh titik 1.

Tingkat pertama

Udara berekspansi secara isotermal, pada temperatur konstan T_1 dari v_1 ke v_2 . Kalor yang diberikan sumber eksternal diserap selama proses.

∴ Kalor yang diberikan = kerja yang dilakukan selama proses isotermal

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} \\
 &= mRT_1 \ln \frac{v_2}{v_1} \\
 &= mRT_1 \ln r \qquad \dots (r = v_2 / v_1, \text{ rasio ekspansi})
 \end{aligned}$$

Tingkat kedua

Sekarang udara lewat melalui *regenerator* dan didinginkan pada volume konstan ke temperatur T_3 . Proses ini digambarkan oleh grafik 2-3 pada diagram $p-v$ dan $T-s$. Pada proses ini kalor dibuang ke generator.

$$\therefore \text{Kalor yang dilepaskan ke generator} = m C_v (T_2 - T_3)$$

Tingkat ketiga

Udara dikompresi secara isothermal di dalam silinder mesin dari v_3 ke v_4 . Proses ini digambarkan oleh grafik 3-4 pada diagram p - v dan T - s . Lagi kalor dibuang oleh udara.

\therefore Kalor yang dilepaskan oleh udara:

$$\begin{aligned} Q_2 &= p_3 v_3 \ln \frac{v_3}{v_4} \\ &= mRT_3 \ln \frac{v_3}{v_4} \\ &= mRT_3 \ln r \qquad \dots (r = v_3 / v_4, \text{ rasio kompresi}) \end{aligned}$$

Tingkat keempat

Terakhir, udara dipanaskan pada volume konstan ke temperatur T_1 dengan melewati udara ke *regenerator* dalam arah yang berlawanan dengan proses 2-3. Pada proses ini kalor diserap oleh udara dari *regenerator* selama proses ini, yaitu proses 4-1.

\therefore Kalor yang diserap oleh udara

$$= m.C_v (T_1 - T_4) = m.C_v(T_1 - T_3) \qquad \dots(\text{karena } T_3 = T_4)$$

Terlihat bahwa kalor yang dilepaskan ke regenerator selama proses 2-3 adalah sama dengan kalor yang diambil dari regenerator selama proses 4-1. jadi, tidak ada pertukaran kalor ke sistem selama proses-proses ini. Pertukaran kalor hanya terjadi selama dua proses isothermal.

\therefore Kerja yang dilakukan = Kalor yang disuplai – Kalor yang dibuang

$$\begin{aligned} &= mRT_1 \ln r - mRT_3 \ln r \\ &= mR \ln r (T_1 - T_3) \end{aligned}$$

dan efisiensi:

$$\eta = \frac{\text{Kerja yang dilakukan}}{\text{Kalor yang disuplai}} = \frac{mR \ln r (T_1 - T_3)}{mRT_1 \ln r}$$

$$= \frac{T_1 - T_3}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_1}$$

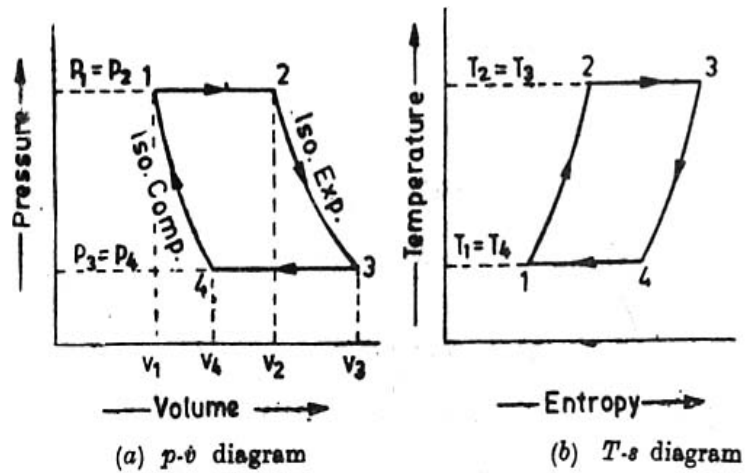
Catatan:

1. Efisiensi siklus Stirling adalah sama dengan siklus Carnot. Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa siklus adalah reversibel, dan semua siklus reversibel mempunyai efisiensi yang sama.
2. Jika efisiensi *regenerator* adalah η_r maka kalor yang diambil dari regenerator selama proses 4-1 adalah: $mC_v (T_1 - T_3)(1 - \eta_r)$. Dalam hal ini:

$$\eta = \frac{mR \ln r (T_1 - T_3)}{mRT_1 \ln r + mC_v (T_1 - T_3)(1 - \eta_r)}$$

$$= \frac{R \ln r (T_1 - T_3)}{RT_1 \ln r + C_v (T_1 - T_3)(1 - \eta_r)}$$

Siklus Ericsson



Gambar 6. Siklus Ericsson.

Siklus ini ditemukan oleh Ericsson, yang terdiri dari dua proses isothermal dan dua proses tekanan konstan. Diagram $p-v$ dan $T-s$ ditunjukkan oleh Gambar 6. Saat ini siklus Ericsson banyak digunakan dalam pembuatan turbin gas jenis siklus tertutup.

Misalkan mesin berisikan m kg udara yang posisi awalnya ditandai oleh titik 1 pada diagram $p-v$ dan $T-s$.

Tingkat pertama

Udara dipanaskan pada tekanan konstan dari temperatur awal T_1 ke temperatur T_2 , yang ditunjukkan oleh grafik 1-2 pada gambar 6.

∴ Kalor yang diberikan ke udara:

$$= m.C_p (T_2 - T_1) \quad (i)$$

Tingkat kedua

Udara dibiarkan berekspansi secara isothermal (yaitu pada temperatur konstan $T_2 = T_3$) dari volume awal v_2 ke v_3 yang ditunjukkan oleh grafik 2-3 pada gambar 6. Kerja pada ekspansi eksotermal memanfaatkan sebagian dari kalor yang diberikan pada tingkat pertama.

∴ Kalor yang dimanfaatkan selama ekspansi isothermal:

$$\begin{aligned} &= p_2 v_2 \ln (v_3/v_2) \\ &= mRT \ln (v_3/v_2) \\ &= mRT \ln r \quad (r = v_3/v_2 = \text{rasio ekspansi}) \end{aligned}$$

Tingkat ketiga

Sekarang udara didinginkan pada tekanan konstan dari temperatur awal T_3 ke temperatur T_4 yang ditunjukkan oleh grafik 3-4 pada gambar 6.

∴ Kalor yang dilepaskan oleh udara:

$$= m.C_p (T_3 - T_4)$$

Tingkat keempat

Terakhir, udara di kompresi secara isothermal dari volume v_3 ke v_4 yang ditunjukkan oleh grafik 4-1 pada gambar 6. Pada proses ini sebagian kalor dibuang oleh udara untuk melakukan kerja pada udara.

∴ Kalor yang dilepaskan selama kompresi isothermal:

$$\begin{aligned} Q_2 &= p_4 v_4 \ln \frac{v_4}{v_1} \\ &= mRT_4 \ln \frac{v_4}{v_1} \\ &= mRT_4 \ln r \quad (\because \frac{v_4}{v_1} = \text{rasio kompresi}) \end{aligned}$$

Kita lihat bahwa kalor diberikan selama proses 1-2 adalah sama dengan kalor yang dilepaskan selama proses 3-4 (karena $T_2 - T_1 = T_3 - T_4$).

∴ Kerja yang dilakukan = kalor yang diberikan – kalor yang dilepaskan

$$= mRT_2 \ln r - mRT_4 \ln r$$

$$= mR \ln r (T_2 - T_4)$$

dan efisiensi:

$$\eta = \frac{\text{kerja yang dilakukan}}{\text{kalor yang diberikan}} = \frac{mR \ln r (T_2 - T_4)}{mRT_2 \ln r}$$

$$= \frac{T_2 - T_4}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

Catatan: 1. Efisiensi siklus Ericsson adalah sama dengan efisiensi Carnot, yaitu:

$$1 - \frac{\text{temperatur paling rendah}}{\text{temperatur paling tinggi}}$$

2. Jika efisiensi generator adalah η_r , maka kalor yang diambil dari generator selama proses 4-1 adalah: $mC_p (T_4 - T_2)(1 - \eta_r)$. Dalam hal ini:

$$\eta = \frac{mR \ln r (T_2 - T_4)}{mRT_2 \ln r + mC_p (T_4 - T_2)(1 - \eta_r)}$$

$$= \frac{R \ln r (T_2 - T_4)}{RT_2 \ln r + C_p (T_4 - T_2)(1 - \eta_r)}$$

Siklus Joule

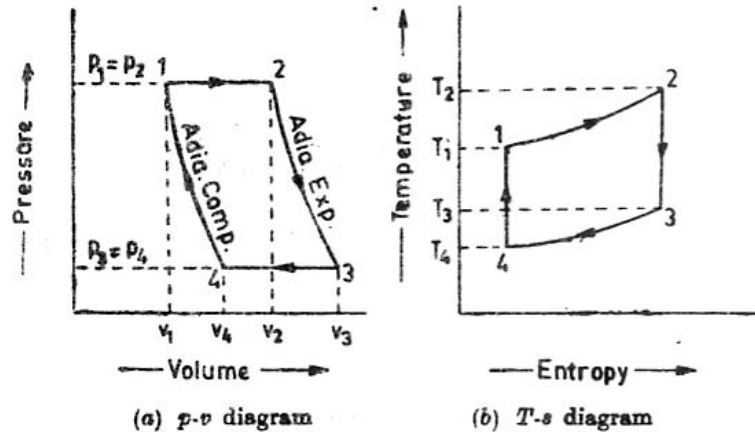
Siklus ini terdiri dari dua proses tekanan konstan dan dua proses adiabatik. Diagram p - v dan T - s ditunjukkan oleh gambar 7.

Tingkat pertama

Udara dipanaskan pada tekanan konstan dari temperatur awal T_1 ke temperatur T_2 , yang ditunjukkan oleh grafik 1-2 pada gambar 7.

∴ Kalor yang diberikan ke udara:

$$= mC_p (T_2 - T_1) \quad (i)$$



Gambar 7. Siklus Joule.

Tingkat kedua

Udara dibiarkan berekspansi secara adiabatik dari v_2 ke v_3 yang ditunjukkan oleh grafik 2-3 pada gambar 7. Temperatur turun dari T_2 ke T_3 . Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dilepaskan oleh udara.

Tingkat ketiga

Sekarang udara didinginkan pada tekanan konstan dari temperatur awal T_3 ke temperatur T_4 yang ditunjukkan oleh grafik 3-4 pada gambar 7.

∴ Kalor yang dilepaskan oleh udara:

$$= m \cdot C_p (T_3 - T_4)$$

Tingkat keempat

Udara sekarang dikompresikan secara adiabatik dari v_4 ke v_1 yang ditunjukkan oleh grafik 4-1 pada gambar 7. Temperatur naik dari T_4 ke T_1 . Tetap pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dilepaskan oleh udara.

Terlihat dari penjelasan di atas bahwa tidak terjadi pertukaran kalor selama dua proses adiabatik. Pertukaran kalor hanya terjadi selama proses tekanan konstan.

∴ Kerja yang dilakukan = kalor yang diberikan – kalor yang dilepaskan

$$= mC_p (T_2 - T_1) - mC_p (T_3 - T_4)$$

dan efisiensi:

$$\eta = \frac{\text{kerja yang dilakukan}}{\text{kalor yang diberikan}} = \frac{mC_p (T_2 - T_1) - mC_p (T_3 - T_4)}{mC_p (T_2 - T_1)}$$

$$= 1 - \frac{T_3 - T_4}{T_2 - T_1} = 1 - \frac{T_3 \left(1 - \frac{T_4}{T_3}\right)}{T_2 \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)} \quad \dots \text{ (i)}$$

Pada ekspansi adiabatik 2-3:

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_3}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \dots \text{ (ii)}$$

dan untuk kompresi adiabatik 4-1,

$$\frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_4}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{p_4}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \dots \text{ (iii)}$$

$$\therefore \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \quad \text{atau} \quad \frac{T_4}{T_3} = \frac{T_1}{T_2} \quad \dots (\because p_1 = p_2 \text{ dan } p_3 = p_4)$$

dengan memasukkan harga T_4/T_3 pada persamaan (i),

$$\eta = 1 - \frac{T_3}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_1} \quad \dots (\because \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1})$$

Dari persamaan (ii) dan (iii), diperoleh:

$$\left(\frac{v_2}{v_3}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{v_1}{v_4}\right)^{\gamma-1} \quad \dots (\because \frac{p_3}{p_2} = \frac{p_4}{p_1})$$

atau

$$\frac{v_2}{v_3} = \frac{v_1}{v_4} = \frac{1}{r} \quad \dots (\because r = \frac{v_3}{v_2} = \frac{v_4}{v_1})$$

$$\therefore \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{1}{r}\right)^{\gamma-1} = \frac{1}{(r)^{\gamma-1}}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}}$$

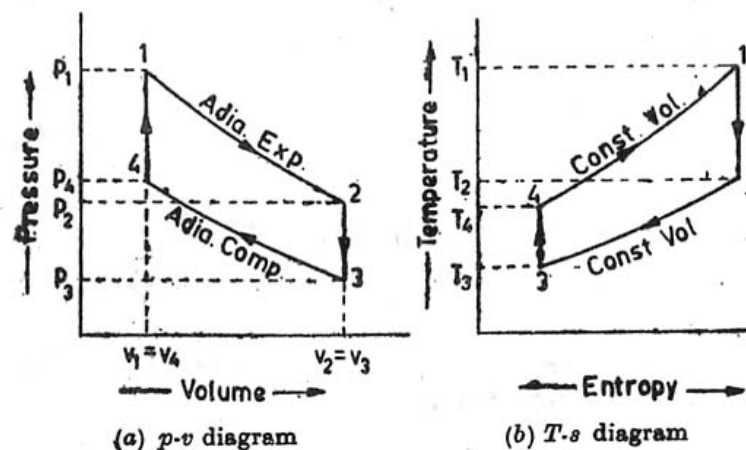
Catatan : 1. Efisiensi siklus Joule lebih rendah dari efisiensi siklus Carnot. Alasannya adalah bahwa semua kalor tidak diserap pada temperatur paling tinggi dan dibuang pada temperatur paling rendah.

2. Siklus secara termodinamik tidak reversibel, sebab tidak ada *regenerator* untuk memberikan temperatur yang konstan selama pemanasan dan pendinginan pada tekanan konstan.
3. Kebalikan siklus Joule disebut dengan siklus Bell-coleman, dan diterapkan pada refrigerator, dimana udara digunakan sebagai refrigeran.

Siklus Otto

Mesin pertama yang sukses bekerja dengan siklus ini dibuat oleh A. Otto. Saat ini, banyak mesin berbahan bakar gas, bensin dan minyak lainnya berjalan berdasarkan siklus ini. Siklus ini dikenal juga sebagai siklus volume konstan, dikarenakan kalor diterima dan dibuang pada volume konstan.

Siklus Otto ideal terdiri dari dua proses volume konstan dan dua proses adiabatik, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 8.



Gambar 8. Siklus Otto.

Tingkat pertama

Udara diekspansikan secara adiabatik dari temperatur awal T_1 ke temperatur T_2 seperti ditunjukkan oleh grafik 1-2 pada gambar 8. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dibuang oleh udara.

Tingkat kedua

Udara didinginkan pada volume konstan dari temperatur T_2 ke temperatur T_3 seperti yang ditunjukkan oleh grafik 2-3 pada gambar 8. Kalor yang dibuang oleh udara selama proses ini :

$$Q_2 = m.C_v(T_2 - T_3) \quad \dots (i)$$

Tingkat ketiga

Udara dikompresikan secara adiabatik dari temperatur T_3 ke temperatur T_4 , seperti yang ditunjukkan oleh grafik 3-4 pada gambar 8. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dilepaskan oleh udara.

Tingkat keempat

Udara sekarang dipanaskan pada volume konstan dari temperatur T_4 ke temperatur T_1 , seperti yang ditunjukkan oleh grafik 4-1 pada gambar 8. Kalor yang diserap selama proses:

$$Q_1 = m.C_v(T_1 - T_4) \quad \dots \text{ (ii)}$$

Terlihat bahwa udara dibawa kembali ke kondisi tekanan, volume dan temperatur awal, sehingga menyudahi satu siklus.

Kerja yang dilakukan = kalor yang diserap – kalor yang dibuang

$$= m.C_v(T_1 - T_4) - m.C_v(T_2 - T_3)$$

Efisiensi ideal atau efisiensi standar udara:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{kerja yang dilakukan}}{\text{kalor yang diserap}} \\ &= \frac{m.C_v(T_1 - T_4) - m.C_v(T_2 - T_3)}{m.C_v(T_1 - T_4)} \\ &= 1 - \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_4} = 1 - \frac{T_3 \left(\frac{T_2}{T_3} - 1 \right)}{T_4 \left(\frac{T_1}{T_4} - 1 \right)} \quad \text{(iii)} \end{aligned}$$

Untuk proses ekspansi adiabatik (1-2):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{1}{r} \right)^{\gamma-1} \quad \dots \left(\because r = \frac{v_2}{v_1} \right)$$

Dengan cara yang sama, untuk proses kompresi adiabatik:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_3} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{1}{r} \right)^{\gamma-1} \quad \dots \left(\because r = \frac{v_4}{v_3} = \frac{v_2}{v_1} \right)$$

Dari kedua persamaan di atas, kita peroleh:

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1}$$

atau
$$\frac{T_1}{T_4} = \frac{T_2}{T_3}$$

masukkan T_1/T_4 ke persamaan (iii), sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{T_3}{T_4} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \\ &= 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \quad \dots \text{(iv)} \end{aligned}$$

Catatan: 1. Kita lihat dari persamaan (iv) bahwa efisiensi siklus Otto bergantung pada rasio kompresi (r).

2. Rasio kompresi,

$$\begin{aligned} r &= \frac{\text{Volume silinder total}}{\text{Volume celah}} \\ &= \frac{\text{Volume celah} + \text{Volume langkah}}{\text{Volume celah}} \end{aligned}$$

∴ Volume celah :

$$= \frac{\text{Volume Langkah}}{r - 1}$$

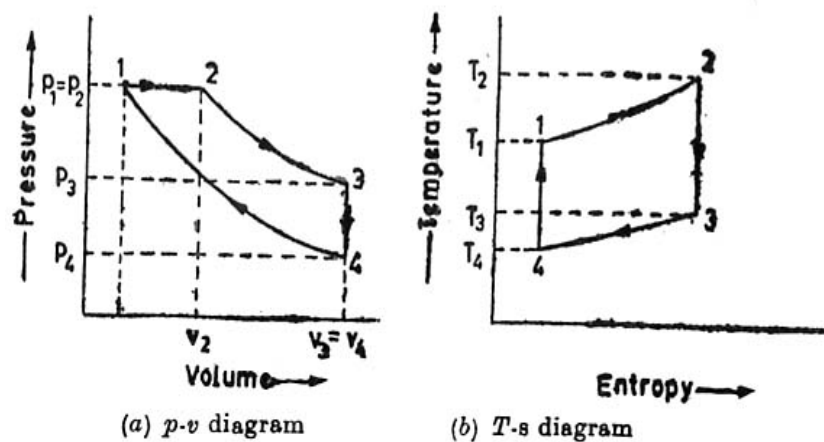
3. Hubungan antara tekanan dan temperatur atau tekanan dan volume bisa diperoleh dari persamaan adiabatik, yaitu:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \text{dan} \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{\gamma} \quad \text{atau} \quad \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\gamma}$$

Siklus Diesel

Siklus ini ditemukan oleh Dr. Rudolph Diesel pada tahun 1893, dengan ide untuk mendapatkan efisiensi termal yang lebih tinggi dengan kompresi rasio tinggi. Ini adalah siklus penting dimana semua mesin diesel bekerja berdasarkan siklus ini. Dikenal juga sebagai siklus tekanan konstan sebab kalor diterima pada tekanan konstan.

Siklus diesel ideal terdiri dari dua proses adiabatik, sebuah proses tekanan konstan dan sebuah proses volume konstan. Proses ini ditunjukkan oleh diagram $p-v$ dan $T-s$ pada gambar 9.



Gambar 9. Siklus Diesel.

Tahap-tahap proses dijelaskan berikut ini.

Tingkat pertama

Udara dipanaskan pada tekanan konstan dari temperatur awal T_1 ke temperatur T_2 yang ditunjukkan oleh grafik 1-2 pada Gambar 9.

Kalor yang diberikan ke udara:

$$= m \cdot C_p (T_2 - T_1) \quad (i)$$

Tingkat kedua

Udara diekspansikan secara adiabatik dari temperatur T_2 ke temperatur T_3 seperti yang ditunjukkan oleh grafik 2-3 pada gambar 9. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dibuang oleh udara.

Tingkat ketiga

Sekarang udara didinginkan pada volume konstan dari temperatur T_3 ke temperatur T_4 , seperti yang ditunjukkan oleh grafik 3-4 pada gambar 9. Kalor yang dilepas oleh udara:

$$= m.C_v (T_3 - T_4) \quad (\text{ii})$$

Tingkat keempat

Udara dikompresikan secara adiabatik dari temperatur T_4 ke temperatur T_1 , seperti yang ditunjukkan oleh grafik 4-1 pada gambar 9. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dibuang oleh udara.

Terlihat bahwa udara dibawa kembali ke kondisi tekanan, volume dan temperatur awal, sehingga menyudahi satu siklus.

Kerja yang dilakukan = kalor yang diserap – kalor yang dibuang

$$= m.C_p (T_2 - T_1) - m.C_v (T_3 - T_4)$$

Efisiensi ideal atau efisiensi standar udara:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{kerja yang dilakukan}}{\text{kalor yang diserap}} \\ &= \frac{m.C_p (T_2 - T_1) - m.C_v (T_3 - T_4)}{m.C_p (T_2 - T_1)} \\ &= 1 - \frac{C_v (T_3 - T_4)}{C_p (T_2 - T_1)} = 1 - \frac{1}{\gamma} \left(\frac{T_3 - T_4}{T_2 - T_1} \right) \quad (\text{iii}) \end{aligned}$$

rasio kompresi:

$$r = \frac{v_4}{v_1}$$

rasio cut-off:

$$\rho = \frac{v_2}{v_1}$$

rasio ekspansi:

$$r_1 = \frac{v_3}{v_2} = \frac{v_4}{v_2} \quad \dots (v_3 = v_4)$$

$$= \frac{v_4}{v_1} \times \frac{v_1}{v_2} = r \times \frac{1}{\rho} = \frac{r}{\rho}$$

Untuk proses pemanasan pada tekanan konstan (1-2):

$$= \frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$$

$$\therefore T_2 = T_1 \times \frac{v_2}{v_1} = T_1 \times \rho \quad \text{(iv)}$$

Dengan cara yang sama, untuk proses kompresi adiabatik (2-3):

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_3} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{1}{r_1} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\gamma-1}$$

$$\therefore T_3 = T_2 \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\gamma-1} = T_1 \times \rho \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\gamma-1} \quad \text{(v)}$$

dan proses kompresi adiabatik (4-1),

$$\frac{T_1}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_1} \right)^{\gamma-1} = (r)^{\gamma-1}$$

$$T_1 = T_4 (r)^{\gamma-1} \quad \text{(vi)}$$

Substitusikan harga T_1 ke persamaan (iv) dan (v),

$$T_2 = T_4 (r)^{\gamma-1} \times \rho \quad \text{(vii)}$$

dan $T_3 = T_4 (r)^{\gamma-1} \times \rho \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\gamma-1} = T_4 \cdot \rho^\gamma \quad \text{(viii)}$

Sekarang substitusikan harga T_1 , T_2 dan T_3 ke persamaan (ii),

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \left[\frac{(T_4 \cdot \rho^\gamma) - T_4}{T_4 (r)^{\gamma-1} \rho - T_4 (r)^{\gamma-1}} \right]$$

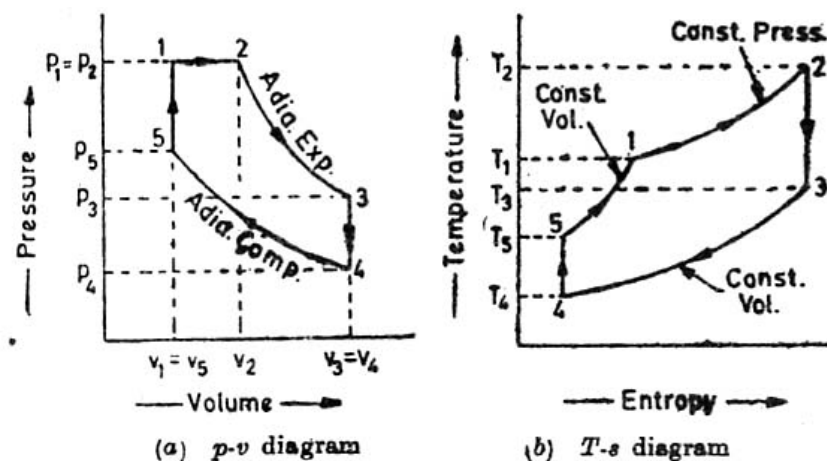
$$= 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \left[\frac{\rho^\gamma - 1}{\gamma(\rho - 1)} \right]$$

Catatan: 1. Efisiensi siklus diesel ideal lebih rendah dari siklus Otto untuk rasio kompresi yang sama.

2. Efisiensi siklus diesel meningkat dengan menurunnya *cut-off* dan mendekati maksimum (sama dengan efisiensi siklus Otto) jika harga *cut-off* adalah nol, yaitu $\rho = 1$.

Siklus Pembakaran Dual

Siklus ini adalah kombinasi dari siklus Otto dan Diesel. Siklus ini kadang-kadang disebut siklus semi-diesel, sebab mesin semi-diesel bekerja berdasarkan siklus ini. Pada siklus ini, kalor diserap sebagian pada volume konstan dan sebagian lagi pada tekanan konstan.



Gambar 10. Siklus Pembakaran Dual.

Siklus pembakaran dual terdiri dari dua buah proses adiabatik, dua proses volume konstan dan satu proses tekanan konstan. Proses ini ditunjukkan oleh gambar 10.

Tingkat pertama

Udara dipanaskan pada tekanan konstan dari temperatur awal T_1 ke temperatur T_2 yang ditunjukkan oleh grafik 1-2 pada Gambar 10.

Kalor yang diberikan ke udara:

$$= m.C_p (T_2 - T_1) \quad (i)$$

Tingkat kedua

Udara diekspansikan secara adiabatik dari temperatur T_2 ke temperatur T_3 seperti yang ditunjukkan oleh grafik 2-3 pada gambar 10. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dibuang oleh udara.

Tingkat ketiga

Sekarang udara didinginkan pada volume konstan dari temperatur T_3 ke temperatur T_4 , seperti yang ditunjukkan oleh grafik 3-4 pada gambar 10. Kalor yang dilepas oleh udara:

$$= m.C_v (T_3 - T_4) \quad (ii)$$

Tingkat keempat

Udara dikompresi secara adiabatik dari temperatur T_4 ke temperatur T_5 , seperti yang ditunjukkan oleh grafik 4-5 pada gambar 10. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dibuang oleh udara.

Tingkat kelima

Udara terakhir dipanaskan pada volume konstan dari temperatur T_5 ke temperatur T_1 , seperti ditunjukkan oleh grafik 5-1 pada gambar 10.

Kalor yang diserap oleh udara :

$$= m.C_v (T_1 - T_5) \quad (iii)$$

Terlihat bahwa udara dibawa kembali ke kondisi tekanan, volume dan temperatur awal, sehingga menyudahi satu siklus.

Kerja yang dilakukan = kalor yang diserap – kalor yang dibuang

$$= m.C_p (T_2 - T_1) + m.C_v (T_1 - T_5) - m.C_v (T_3 - T_4)$$

Efisiensi ideal atau efisiensi standar udara:

$$\eta = \frac{\text{kerja yang dilakukan}}{\text{kalor yang diserap}}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{m.C_p(T_2 - T_1) + m.C_v(T_1 - T_5) - m.C_v(T_3 - T_4)}{m.C_p(T_2 - T_1) + m.C_v(T_1 - T_5)} \\
&= 1 - \frac{C_v(T_3 - T_4)}{C_p(T_2 - T_1) + C_v(T_1 - T_5)} = 1 - \frac{T_3 - T_4}{\gamma(T_2 - T_1) + (T_1 - T_5)} \quad (\text{iv})
\end{aligned}$$

rasio kompresi:

$$r = \frac{v_4}{v_5} = \frac{v_3}{v_1}$$

rasio cut-off:

$$\rho = \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_2}{v_5}$$

rasio ekspansi atau tekanan:

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{p_1}{p_5} \\
&= \frac{v_4}{v_1} \times \frac{v_1}{v_2} = r \times \frac{1}{\rho} = \frac{r}{\rho}
\end{aligned}$$

Untuk proses pemanasan pada tekanan konstan (1-2):

$$\begin{aligned}
&= \frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \\
\therefore T_2 &= T_1 \times \frac{v_2}{v_1} = T_1 \times \rho \quad (\text{v})
\end{aligned}$$

Dengan cara yang sama, untuk proses kompresi adiabatik (2-3):

$$\begin{aligned}
\frac{T_3}{T_2} &= \left(\frac{v_2}{v_3} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{v_2}{v_1} \times \frac{v_1}{v_3} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\gamma-1} \\
\therefore T_3 &= T_2 \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\gamma-1} = T_1 \times \rho \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\gamma-1} \quad (\text{vi})
\end{aligned}$$

dan proses kompresi adiabatik (4-5),

$$\frac{T_5}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^{\gamma-1} = (r)^{\gamma-1}$$

$$T_5 = T_4 (r)^{\gamma-1} \quad (\text{vii})$$

Sekarang proses pemanasan pada volume konstan (5-1):

$$\frac{p_5}{T_5} = \frac{p_1}{T_1}$$

$$T_1 = T_5 \times \frac{p_1}{p_5} = T_5 \times \alpha = T_4 (r)^{\gamma-1} \cdot \alpha \quad (\text{viii})$$

Substitusikan harga T_1 ke persamaan (v) dan (vi),

$$T_2 = T_4 (r)^{\gamma-1} \times \alpha \cdot \rho$$

dan
$$T_3 = T_4 (r)^{\gamma-1} \cdot \alpha \cdot \rho \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\gamma-1} = T_4 \cdot \alpha \cdot \rho^\gamma$$

Sekarang substitusikan harga T_1 , T_2 , T_3 dan T_5 ke persamaan (iv),

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{1(T_4 \cdot \alpha \cdot \rho^\gamma) - T_4}{\gamma[T_4 (r)^{\gamma-1} \cdot \alpha \cdot \rho - T_4 (r)^{\gamma-1} \cdot \alpha] + [T_4 (r)^{\gamma-1} \cdot \alpha - T_4 (r)^{\gamma-1}]} \\ &= 1 - \frac{T_4 (\alpha \cdot \rho^\gamma - 1)}{T_4 (r)^{\gamma-1} [\gamma(\alpha \cdot \rho - \alpha) + (\alpha - 1)]} \\ &= 1 - \frac{(\alpha \cdot \rho^\gamma - 1)}{(r)^{\gamma-1} [\gamma(\alpha \cdot \rho - \alpha) + (\alpha - 1)]} \\ &= 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \left[\frac{\alpha \cdot \rho^\gamma - 1}{(\alpha - 1) + \gamma \alpha (\rho - 1)} \right] \end{aligned}$$

Catatan: 1. Untuk siklus Otto, $\rho = 1$, maka efisiensi siklus:

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}}$$

2. Untuk siklus diesel, $\alpha = 1$, maka efisiensi siklus:

$$\eta_{diesel} = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \left[\frac{\rho^\gamma - 1}{\gamma(\rho - 1)} \right]$$

3. Efisiensi siklus pembakaran dual lebih besar dari siklus diesel dan lebih kecil dari siklus Otto, untuk rasio kompresi yang sama.

DAFTAR PUSTAKA

1. Michael J. Moran, HN. Shapiro. *Fundamentals Of Engineering Thermodynamics., 2th edition.* John Wiley and Son, 1993.
2. R.S. Khurmi. *A Text Book of Mechanical Technology, Thermal Engineering.* S. Chand & Company LTD, 1995.
3. Abbott MM, HC. Van Ness, *Theory and problems of Thermodynamics,* Schaum's Outline Series McGraw-Hill International Book Company, 1981.