

KULIAH - XIV

TERMODINAMIKA TEKNIK I TKM 203 (4 SKS) SEMESTER III

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SUMATERA UTARA
TAHUN 2006

BAB IV HUKUM TERMODINAMIKA II

Hukum Termodinamika I adalah :

- Menetapkan adanya suatu ekivalensi antara panas dan kerja (panas \leftrightarrow kerja)
- Digunakan untuk menghubungkan dan menentukan type – type energi yang terlibat dalam suatu proses.
- atau menyatakan bahwa sewaktu proses berlangsung terdapat suatu keseimbangan energi.

Hukum termodinamika I merupakan pernyataan dari hukum kekekalan energi dan tidak menyatakan sesuatu apapun mengenai arah dari proses yang berlangsung.

Proses termodinamika itu dapat berlangsung kedua arah yaitu :

- Diekspansikan (pengembangan)
- Dikompresikan (penekanan)

Hukum Termodinamika I juga belum menjelaskan kearah mana suatu perubahan keadaan itu berjalan dan apakah perubahan itu reversible atau irreversible.

→ Dalam pengembangannya diterangkan dan dibahas dalam Hukum Termodinamika II

Jadi : Hukum Termodinamika II, memberikan batasan-batasan tentang arah yang dijalani suatu proses, dan memberikan kriteria apakah proses itu reversible atau irreversible dan salah satu akibat dari Hukum Termodinamika II ialah perkembangan dari suatu sifat fisik alam yang disebut ENTROPI.

Perubahan entropi → menentukan arah yang dijalani suatu proses.

Hukum Termodinamika II menyatakan :

* Tidak mungkin panas dapat dirubah menjadi kerja seluruhnya, tetapi sebaliknya kerja dapat dirubah menjadi panas.

atau : $Q \not\rightarrow \underline{W \text{ seluruhnya}}$
 $W \rightarrow Q \text{ (sama besarnya)}$

atau untuk mendapatkan sejumlah kerja (W) dari suatu siklus, maka kalor (Q) yang harus diberikan kepada sistem selalu lebih besar.

→ $Q_{\text{diserap}} > W$
sehingga, $\eta_{\text{siklus}} < 100 \%$.

* Suatu yang bekerja sebagai sebagai suatu siklus tidak dapat memindahkan kalor (Q) dari bagian yang bertemperatur rendah ke bagian yang bertemperatur lebih tinggi, tanpa menimbulkan perubahan keadaan pada sistem yang lain.

Dari kedua hal tersebut diatas, menyatakan tentang arah proses perubahan energi dalam dalam bentuk panas ke bentuk kerja → yang menyatakan adanya pembatasan transformasi energi.

KULIAH - XV

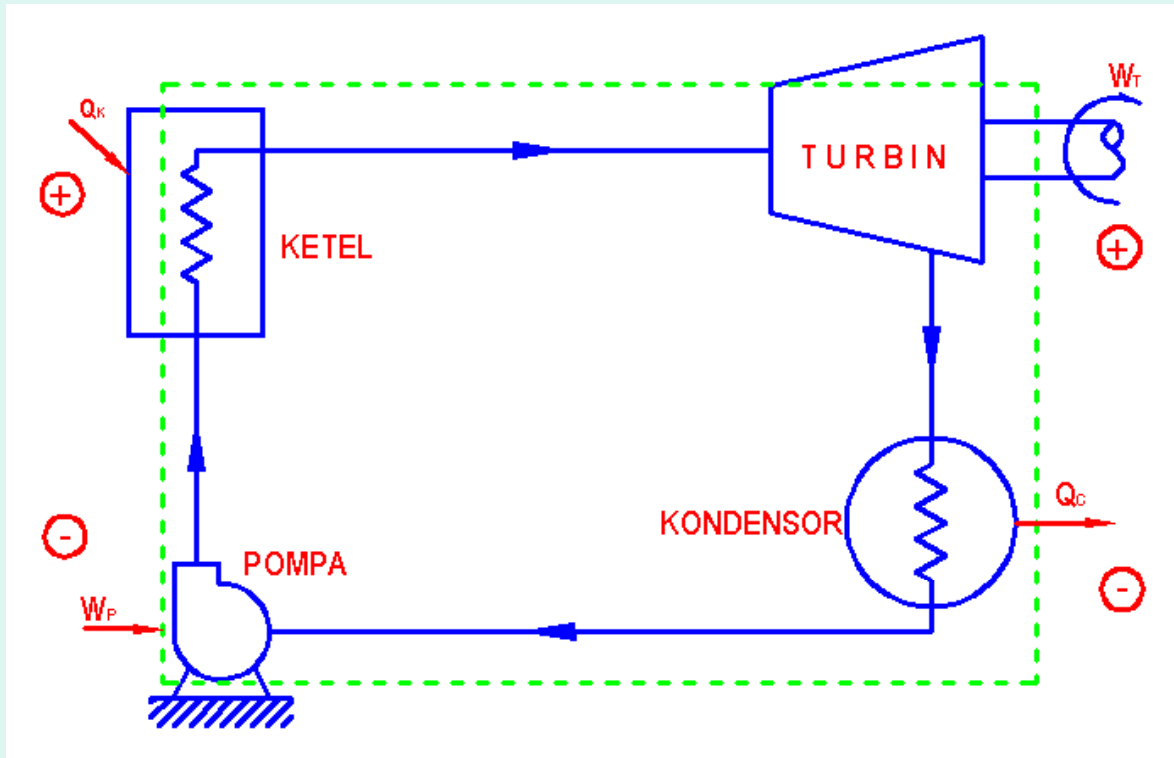
TERMODINAMIKA TEKNIK I TKM 203 (4 SKS) SEMESTER III

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SUMATERA UTARA
TAHUN 2006

Mesin Panas (Heat Engine)

Mesin panas adalah sistem yang bekerja secara siklus, dan melalui permukaan-permukaan batasannya, energi dalam bentuk panas dan kerja yang dapat mengalir.

Tujuannya mengubah panas menjadi kerja. Mesin panas mengalami proses – proses secara periodik kembali ke keadaan semula (reversible). Sebagai contoh yaitu PEMBANGKIT TENAGA UAP, fluida kerjanya adalah H₂O yang mengalir secara kontiniu dan stasioner melalui : Ketel (dalam bentuk air dan kemudian menguap), mengalir ke Turbin. Keluar dari turbin sebagai uap air pada temperatur dan tekanan rendah. H₂O (uap air) masuk ke Condenser, disini H₂O (uap air) berubah menjadi air kembali, dan air ini di pompa kembali ke ketel. Proses ini berlangsung secara periodik.



Menurut Hukum Termodinamika I : $\oint dQ = \oint dW$

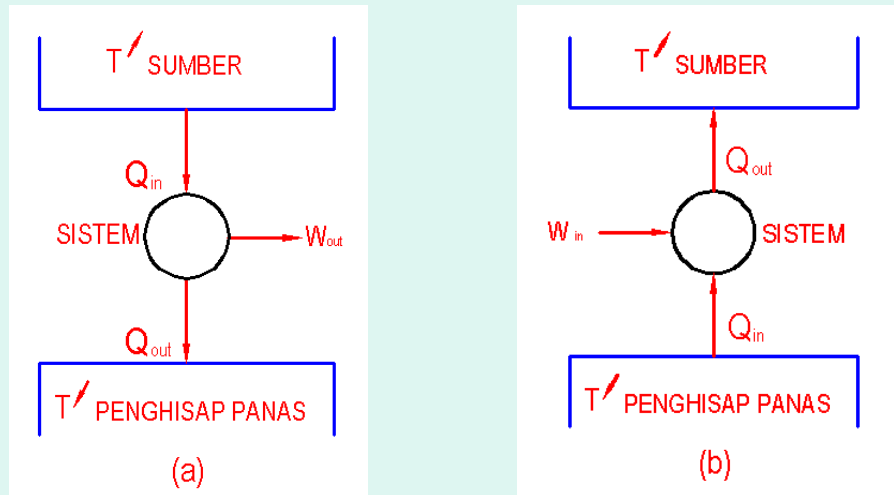
atau $Q_k - Q_c = W_T - W_P$

Maka, Effisiensi Termik dari siklus tertutup ini adalah :

$$\eta_{th} = \frac{W_T - W_P}{Q_K} = \frac{Q_K - Q_C}{Q_K} = 1 - \frac{Q_C}{Q_K}$$

Disini dapat dilihat bahwa, sistem menerima panas pada temperatur tinggi, kemudian panas dibuang oleh sistem temperatur rendah, dan kerja dilakukan pada lingkungan.

Kita ambil “dua mesin pemanas”, yang tujuan utamanya adalah mengubah panas menjadi kerja, dan melakukan kerja pada lingkungan.



Untuk mesin panas : $W_{out} = Q_{in} - Q_{out}$

$$W_{out} + Q_{out} = Q_{in}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{out}}{Q_{in}} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

Untuk pompa panas : $W_{in} = Q_{out} - Q_{in}$

$$W_{in} + Q_{in} = Q_{out}$$

koefisien prestasi = $\frac{\text{efek energi yang dituju}}{\text{pemasukan energi yang diperlukan}}$

$$(KP)_{\text{pompa panas}} = \frac{Q_{out}}{W_{in}} = \frac{Q_{out}}{Q_{out} - Q_{in}} = \frac{1}{1 - \frac{Q_{in}}{Q_{out}}}$$

(KP)_{mesin pendingin} = $\frac{\text{efek energi yang dituju (efek pendinginan)}}{\text{pemasukan energi yang diperlukan}}$

$$(KP)_{\text{mesin pendingin}} = \frac{Q_{in}}{Q_{out} - Q_{in}} = \frac{1}{\frac{Q_{in}}{Q_{out}} - 1}$$

Contoh Soal

1. Panas yang digunakan oleh suatu mesin panas adalah : 1150 Kj/mnt dan mesin menghasilkan 7,5 Kw

Ditanya : a. $\eta_{th} = \dots\dots\dots ?$

b. $Q_{out} = \dots\dots\dots ?$

Jawab : $Q_{in} = 1150 \text{ kJ/mnt}$
 $W_{out} = 7,5 \text{ kW} = 7,5(60) = 450 \text{ kJ/mnt}$

$$\text{a. } \eta_{th} = \frac{450}{1150} \text{ kJ / mnt} = 0,391 \text{ (39,1\%)}$$

$$\text{b. } Q_{out} = Q_{in} - Q_{out} = (1150 - 450) \text{ kJ/mnt} \\ = 700 \text{ kJ/mnt}$$

2. Sebuah bangunan memerlukan panas : 100.000 Kj/mnt dari suatu pompa panas yang menyerap panas dari udara dingin diluar dan memberikannya ke ruangan – ruangan bangunan tersebut. untuk menjalankan pompa diperlukan kerja :14.800 Kj.

Ditanya : a) Besarnya panas yang diserap dari udara luar (Q_{in})
b) (KP) pompa panas

Jawab : $Q_{out} = 100.000 \text{ kJ/mnt}$

a) Jumlah panas yang diperlukan pompa panas :

$$Q_{out} - Q_{in} = 14.800 \text{ kJ / mnt}$$

jadi : $Q_{in} = 85.200 \text{ kJ/mnt}$

b) Koefisien Panas pompa panas = $\frac{Q_{out}}{Q_{out} - Q_{in}} = \frac{100.000 \text{ kJ / mnt}}{14.800 \text{ kJ / mnt}} = 6,75$

KULIAH - XVI

TERMODINAMIKA TEKNIK I TKM 203 (4 SKS) SEMESTER III

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SUMATERA UTARA
TAHUN 2006

KEGUNAAN HUKUM TERMODINAMIKA II

1. Menentukan efisiensi paling tinggi dari mesin panas atau KP yang maximum dari mesin pendingin.
2. Menentukan apakah proses dapat berlangsung atau tidak (irreversible atau reversible).
3. Menentukan arah atau derajat suatu reaksi kimia.
4. Menentukan skala temperatur yang tidak tergantung pada sifat-sifat fisik tiap zat.
5. Mendefinisikan suatu sifat yang sangat berguna.

PROSES REVERSIBEL

1. Gerakan relative tanpa gesekan (licin)
2. Peregangan dan penekanan suatu pegas.
3. Ekspansi dan kompresi adiabatik tanpa gesekan.
4. Ekspansi dan kompresi isotermik
5. Ekspansi dan kompresi polintropik.
6. Elektrolisa

PROSES IRREVERSIBEL

1. Gerakan relatif dengan gesekan.
2. Ekspansi bebas (tidak ada kerja karena $Q = 0 \rightarrow U = 0$)
3. Pembakaran.
4. Proses difusi.

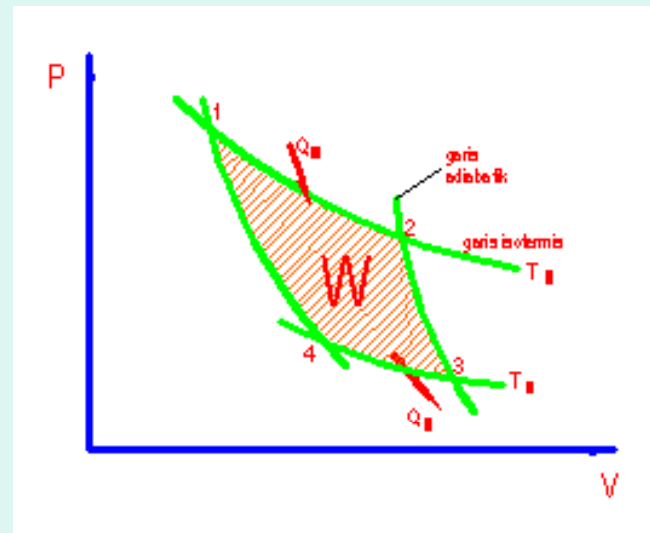
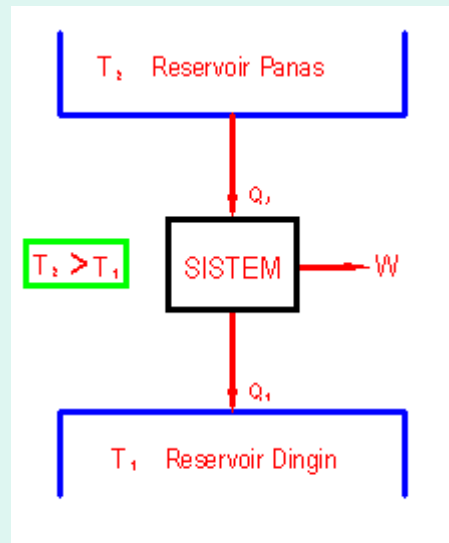
SIKLUS REVERSIBEL : SIKLUS CARNOT

Siklus carnot ini terdiri dari :
- 2 proses isotermik
- 2 proses adiabatik reversibel

Siklus carnot : Memiliki medium kerja yang menerima panas dari suatu temperatur dan melepaskannya pada temperatur yang lain \rightarrow jadi diperlukan dua reservoir yang berdasarkan hukum termodinamika kedua merupakan jumlah minimum.

Siklus ini dapat terjadi pada proses-proses tak mengalir reversibel atau pada proses-proses stasioner.

Siklus Carnot pada diagram P-V :



Karena sistem mengalami satu siklus maka energi dalam tidak berubah, jadi $\Delta U = 0$.
Maka Hukum Termodinamika I diperoleh:

$$\oint dQ = \oint dW = Q_2 - Q_1$$

dimana : W adalah kerja total
Q₂ panas yang diserap sistem
Q₁ panas yang dilepaskan oleh sistem

Maka efisiensi termik siklus carnot, yaitu hasil bagi kerja yang dilakukan sistem dengan panas yang diserap sistem pada temperatur tinggi :

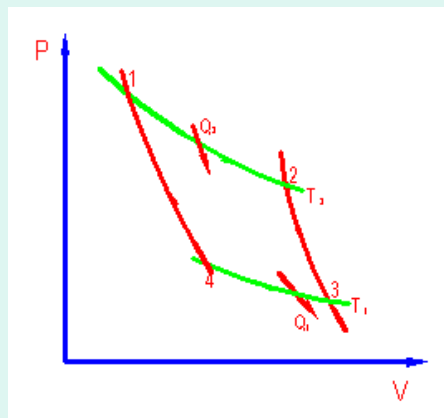
$$\eta = \frac{W}{Q_2} = \frac{\oint dW}{Q_2} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$$

Contoh:

Perhitungan efisiensi termik mesin carnot yang menggunakan gas ideal :
Jawab:

untuk gas ideal: $PV = mRT$ atau $pv = RT$
 $du = C_v \cdot dT$

- Proses 1-2 : proses isotermik, $pv = \text{konstan}$.



$$W_{da} = \int_1^2 p dV = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$q = w = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$q = w = RT_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

- **Proses 2-3 : proses adiabatik reversible, $p v \gamma = \text{konstan}$, $dq = 0$.**

$$W = -\Delta U = -C_v (T_3 - T_2) \quad \text{atau} \quad W = -\Delta U = -C_v (T_1 - T_2)$$

$$W = -\Delta U = C_v (T_2 - T_1)$$

$$W = -\Delta U = C_v (T_2 - T_1)$$

- **Proses 3-4 : Proses isotermik ; $\Delta U = 0$**

$$W_{da} = \int_3^4 p dV = -p_3 v_3 \ln \left(\frac{p_4}{p_3} \right)$$

$$q = w = -p_3 v_3 \ln \left(\frac{p_4}{p_3} \right) = -RT_3 \ln \left(\frac{p_4}{p_3} \right)$$

- Proses 4-1 : Adiabatik reversible $dq = 0$, $pvy = \text{konstan}$

$$w = -\Delta U = -C_v (T_1 - T_4)$$

$$\text{atau } w = -C_v (T_2 - T_1)$$

$$w = C_v (T_1 - T_2)$$

→ Jadi jumlah kerja siklus :

$$\oint dQ = \oint dW$$

$$\oint dW = q_{1-2} - q_{3-4}$$

$$\oint dW = RT_2 \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) - RT_1 \ln\left(\frac{p_4}{p_3}\right)$$

→ Untuk proses adiabatik :

$$\frac{p_2}{p_3} = \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$\frac{p_1}{p_4} = \left(\frac{T_1}{T_4}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$\frac{p_2}{p_3} = \frac{p_1}{p_4}$$

atau

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{p_1}{p_2}$$

$$\phi dW = RT_2 \ln \frac{p_1}{p_2} - RT_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = R(T_2 - T_1) \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$\eta_{th} = \frac{\phi dw}{q_{1-2}} = \frac{R(T_2 - T_1) \ln \frac{p_1}{p_2}}{RT \ln \frac{p_1}{p_2}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Jadi η Carnot hanya bergantung pada T_1 dan T_2 .
Maka akan diperoleh ; efisiensi carnot adalah:

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

atau:

$$\frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1}$$

KULIAH - XVII

TERMODINAMIKA TEKNIK I TKM 203 (4 SKS) SEMESTER III

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SUMATERA UTARA
TAHUN 2006

"ENTROPI"

- Hukum Termodinamika II dalam bentuk ketidaksamaan clausius mengenai entropi
- Dari proses reversibel siklus carnot diketahui :

$$\frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1}$$

dimana : Q_2 = panas masuk sistem (+)
 Q_1 = panas keluar sistem (-)

Persamaan diatas ditulis : $\frac{Q_2}{T_2} = -\frac{Q_1}{T_1}$

$$\text{atau : } \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} = \frac{\Sigma Q}{T} = 0$$

Persamaan diatas untuk proses reversibel siklus carnot dapat ditulis:

$$\oint_{rev} \frac{dQ}{T} = 0$$

Untuk suatu siklus yang irreversibel integral siklus ini akan lebih kecil dari nol dan dapat ditulis sebagai;

$$\oint_{irrev} \frac{dQ}{T} < 0$$

Persamaan diatas dapat ditulis sebagai berikut :

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0 \quad \text{Ketidaksamaan clausius}$$

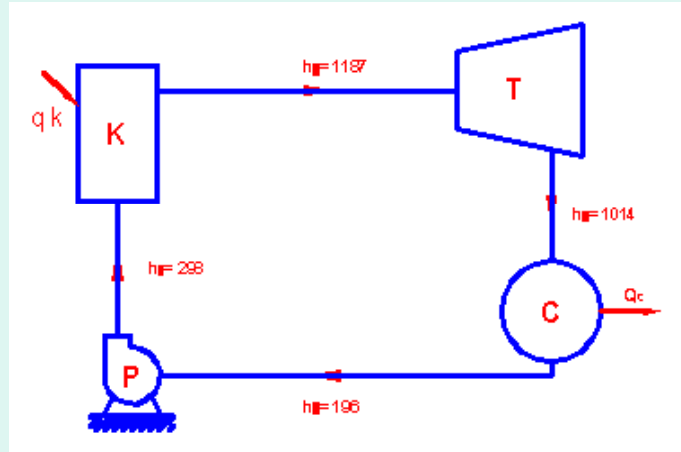
besaran $\frac{dQ}{T}$ merupakan parameter sistem dan disebut "ENTROPI"

ENTROPI adalah perbandingan panas yang ditransfer selama proses reversibel dengan temperatur absolut sistem.

Contoh soal :

Sebuah mesin uap bekerja diantara sebuah ketel pada temperatur tetap 3280 F, dan sebuah kondensator dengan temperatur 1260 F. Air masuk kedalam ketel dalam keadaan cair jenuh. tunjukkanlah bahwa berlaku ketidaksamaan clausius untuk siklus ini.

Jawab :



Perpindahan panas terjadi dalam ketel dan kondensor

Ketel :

$$q_k = h_2 - h_1$$

$$q_k = 1187 - 298 = 889 \text{ BTU/Lbm}$$

Kondensor $q_k = h_4 - h_3$

$$q_k = 196 - 1014 = -818 \text{ BTU/Lbm}$$

Jadi Integral siklus :

$$\oint \frac{dq}{T} = \frac{q_k}{T} + \frac{q_c}{T} = \frac{889}{788} + \frac{818}{586} = -0,26 \text{ BTU/lbm, } ^\circ R$$

→ Berlaku ketidaksamaan Clausius.

Jadi entropi merupakan perbandingan panas yang ditransfer selama proses reversibel dengan temperatur absolut siklus.

Secara matematis $ds = \left(\frac{dQ}{T} \right)_{rev}$

atau : $\Delta s = \int \left(\frac{dQ}{T} \right)_{rev}$

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{dQ}{T} \right)_{rev}$$

→ Perubahan Entropi dari keadaan 1 ke keadaan 2

KULIAH - XVIII

TERMODINAMIKA TEKNIK I TKM 203 (4 SKS) SEMESTER III

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SUMATERA UTARA
TAHUN 2006

PERHITUNGAN PERUBAHAN ENTROPI

$$\text{Perubahan Entropi} \quad \Delta s = \int_1^2 \left(\frac{dQ}{T} \right)_{rev}$$

$$\Delta s = \int \left(\frac{dQ}{T} \right)_{rev} = \int \left(\frac{dU + dW}{T} \right)_{rev}$$

$$T ds = dU + p dV$$

$$\text{dimana : } \begin{aligned} H &= U + pV \\ U &= H - pV \end{aligned}$$

$$T ds = d(H - pV) + p dV$$

$$T ds = dH - p dV$$

$$\text{Satuan Entropi} \quad S = \left\{ \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \cdot ^\circ\text{R}} \right\}; \left\{ \frac{\text{Kal}}{\text{gr} \cdot \text{K}} \right\}$$

$$(\text{Entropi persatuan massa}) \quad S = \left\{ \frac{\text{Btu}}{^\circ\text{R}} \right\}; \left\{ \frac{\text{Kal}}{\text{K}} \right\}$$

$$T ds = dH - V dp$$

Untuk satu satuan massa :

$$T ds = dh + v dp$$

Contoh:

Hitunglah perubahan entropi untuk 3 kg gas ideal dengan $C_v = (18,94 + 0,0528 T)$ kg/kg K, selama proses volume tetap dari 75o C sampai 100o C.

Jawab :

Untuk gas ideal : $PV = RT$, $du = C_v \cdot dT$
dalam satu satuan massa : $Tds = du + pdv$; ($pdv = 0$)
 $Tds = C_v \cdot dT + pdv$

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + \frac{P}{T} dv = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v \frac{dT}{T} + R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} \rightarrow R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = 0 ; \text{ karena } v = \text{kons tan}$$

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} (18,94 + 0,0528T) \frac{dT}{T}$$

$$s_2 - s_1 = 18,94 \ln \frac{373}{348} + 0,0528 (373 - 348)$$

$$s_2 - s_1 = 2,627 \text{ KJ/kg K}$$

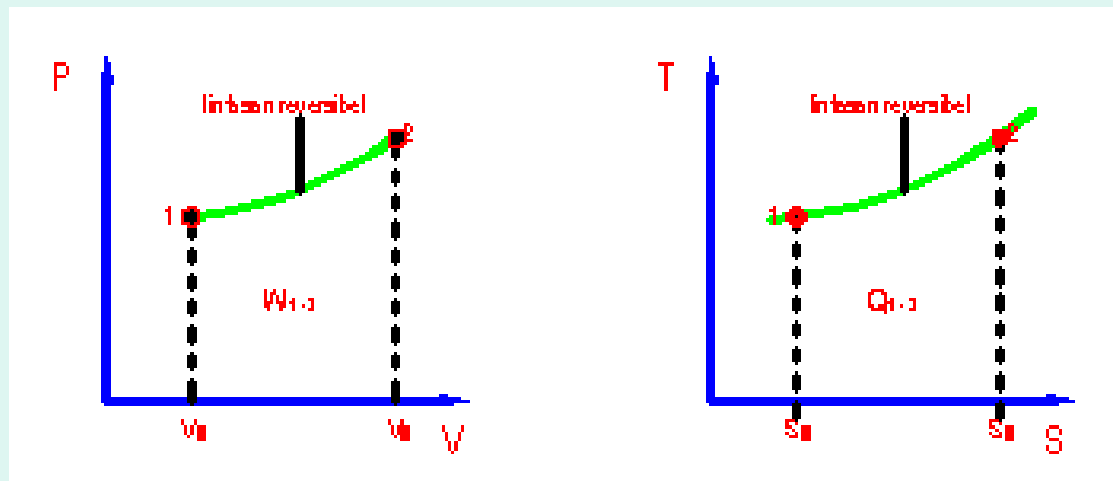
Untuk 3 kg, maka : $\Delta S = 3(2,627) = 7,881 \text{ KJ/kg}$

DIAGRAM TEMPERATUR – ENTROPI

Dari persamaan : $dS = \frac{dQ}{T}$

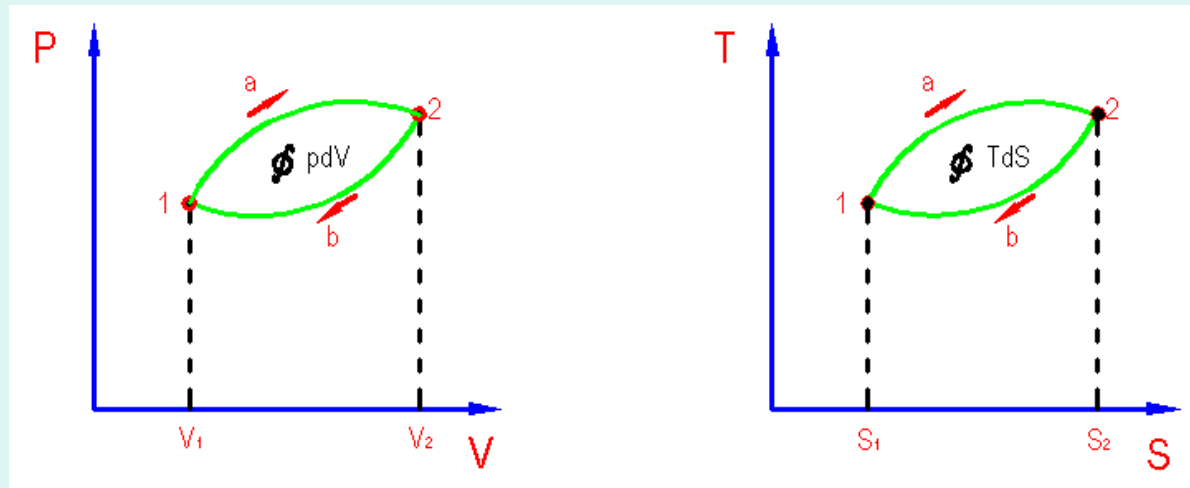
atau $dQ = T ds$

$$Q_{1-2} = \int_{s1}^{s2} T ds$$



$$W_{12} = \int_1^2 p dv$$

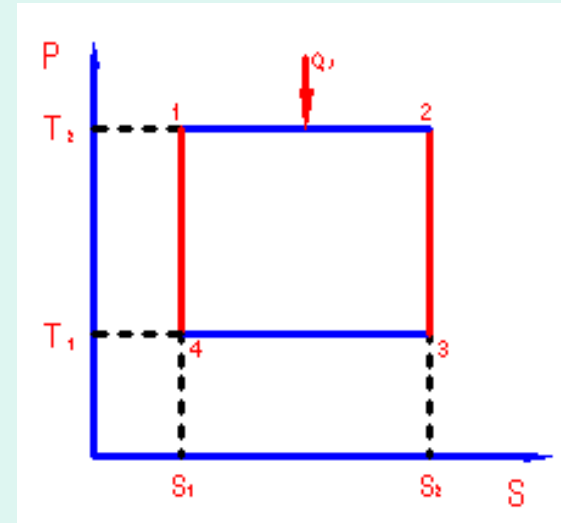
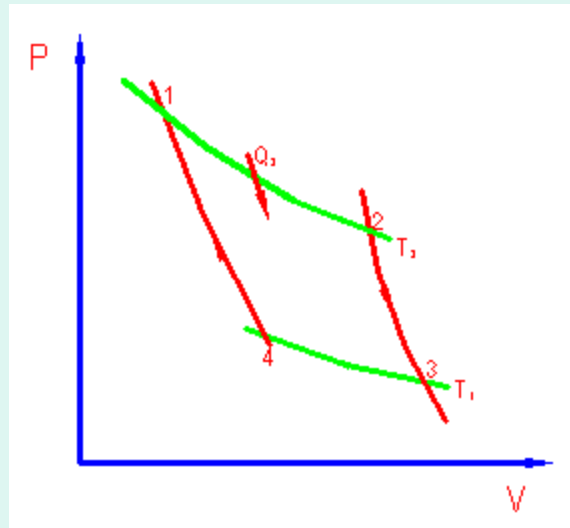
$$Q_{12} = \int_1^2 T ds$$



$$\oint dW = \oint dQ$$

$$\oint p dV = \oint T dS$$

Diagram P-V dan T-S menyatakan proses reversibel dapat kita ambil contoh pada proses / siklus carnot, sebagai berikut :



Garis 1-2 dan 3-4 : proses isotermik ($dT = 0$)

Garis 2-3 dan 4-1 : proses adiabatik reversibel ($dQ = 0 = T dS$) ; $T \neq 0$; $dS = 0$

Jadi, adiabatik reversibel = isentropik (entropi konstan)

Effisiensi siklus carnot dapat dihitung dari diagram T-S :

$$\eta_{th} = \frac{\oint dw}{Q_{in}} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{T_2 (s_2 - s_1) - T_1 (s_2 - s_1)}{T_2 (s_2 - s_1)}$$

$$\eta_{th} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

KULIAH - XIX

TERMODINAMIKA TEKNIK I TKM 203 (4 SKS) SEMESTER III

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SUMATERA UTARA
TAHUN 2006

AZAS PERTAMBAHAN ENTROPI

$$\Delta S_S + \Delta S_L = \Delta S_{KS}$$

$$\Delta S_{SK} = \Delta S_{System} + \Delta S_{Lingkungan} \geq 0 \quad (\text{untuk proses reversibel dan irreversibel})$$

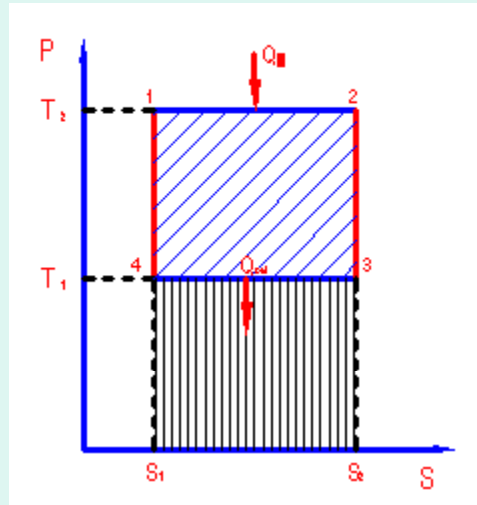
Bila sistem diisolasi, maka tidak ada hubungan energi dengan lingkungan, sehingga entropinya tetap.

$$\Delta S_{LING} = 0$$

$$\Delta S_{SK} = \Delta S_{SYS} \geq 0$$

ENERGI YANG HILANG PADA PROSES

Sebagai contoh pada siklus carnot :



Effisiensi siklus carnot dan hubungannya dengan temperatur :

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

$$\left(\frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} \right) = \left(\frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}} \right)$$

Jumlah kerja yang diperoleh :

$$W = Q \left[\frac{T_2 - T_1}{T_2} \right] = Q \left[1 - \frac{T_1}{T_2} \right]$$

$$W = Q - T_1 \Delta S$$

Q = Energi yang masuk $T_1 \Delta S$

$T_1 \Delta S$ = Energi yang hilang