

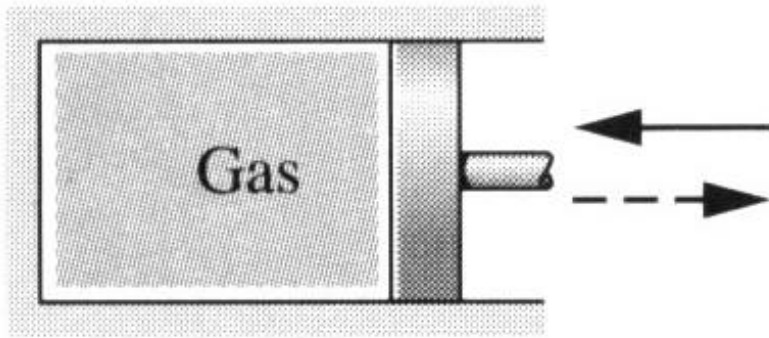
HUKUM THERMODINAMIKA 2

Pemicu Hk Thermodinamika II

Hukum Tk I:

Energi tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan, namun energi hanya dapat dirubah bentuk.

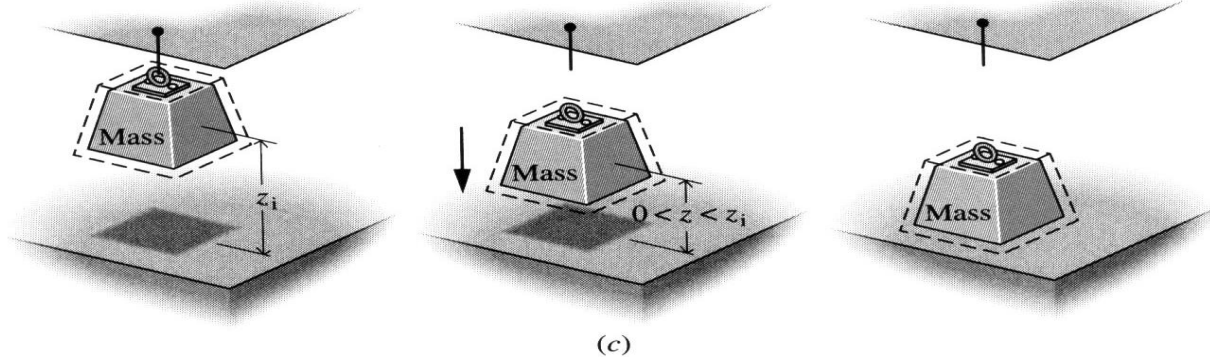
Reversibel

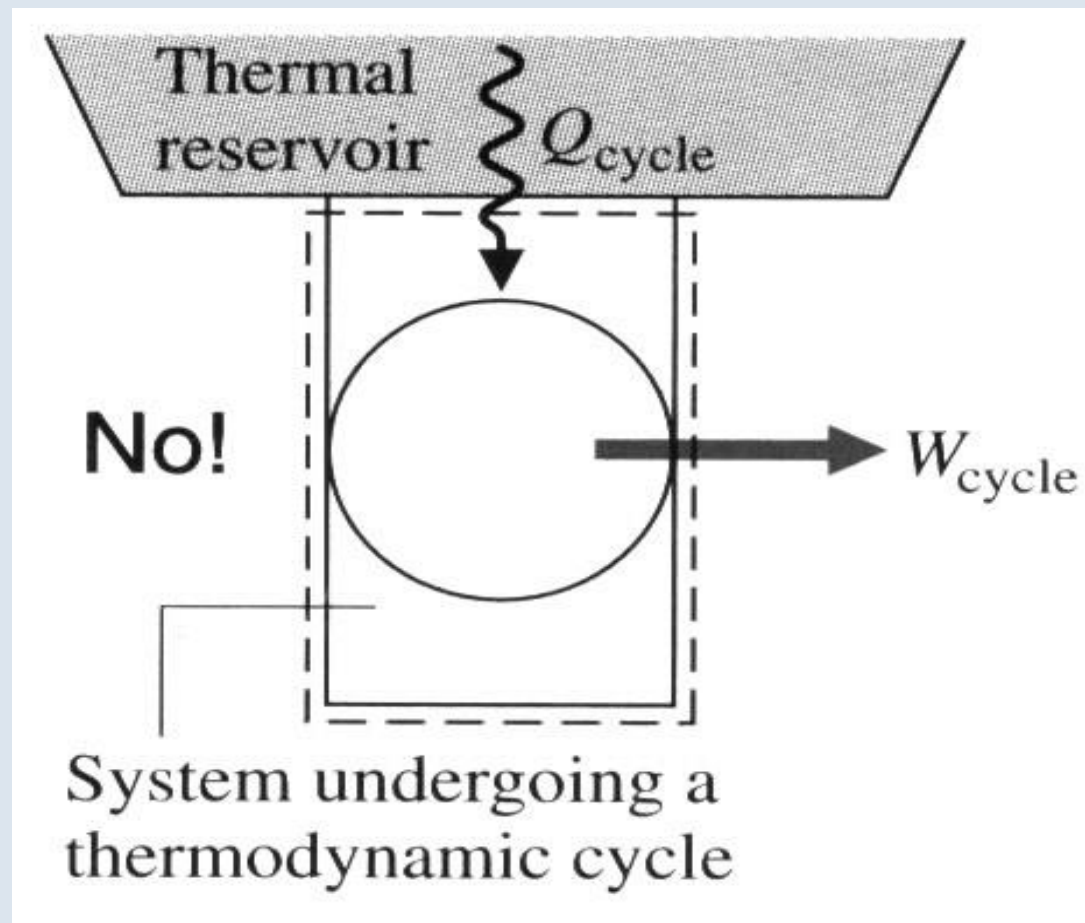


$$\Delta U = Q + W$$

Pada Keadaan Gas Ideal, $\Delta U = 0$

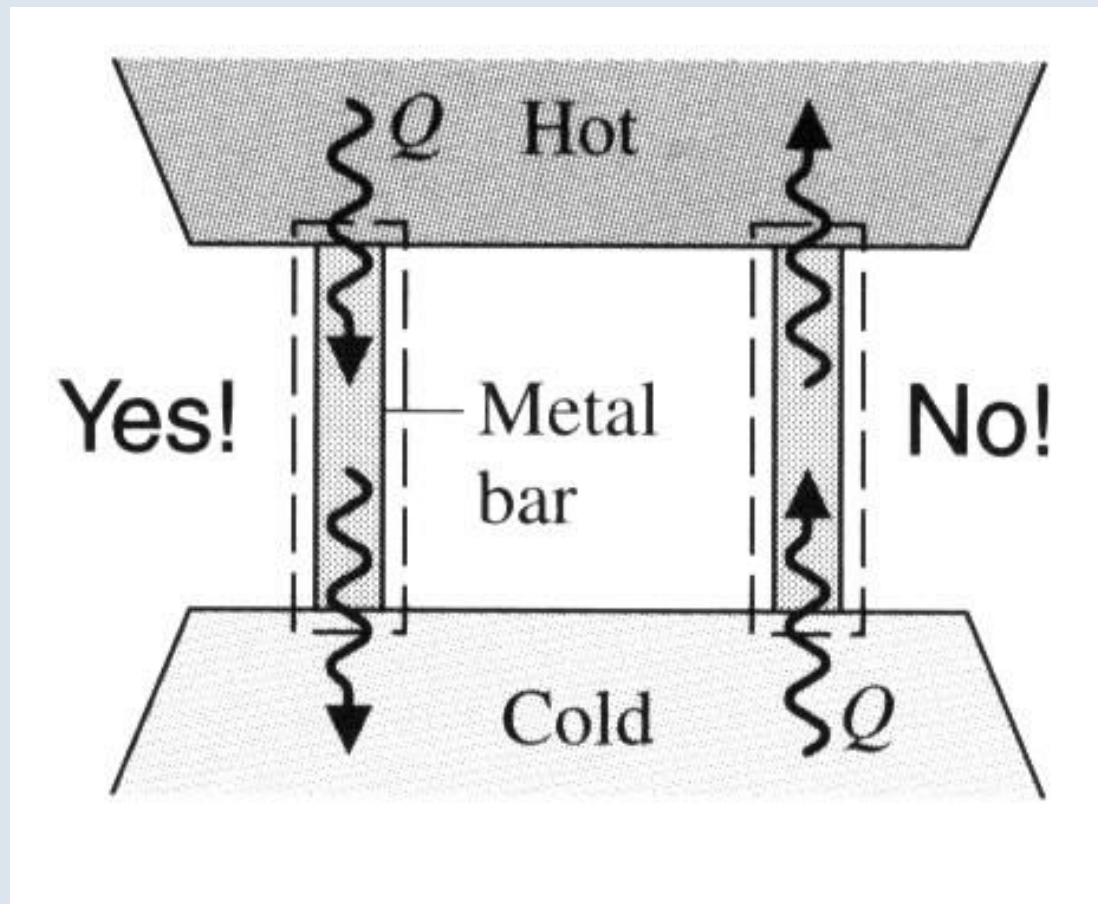
$$Q = -W$$





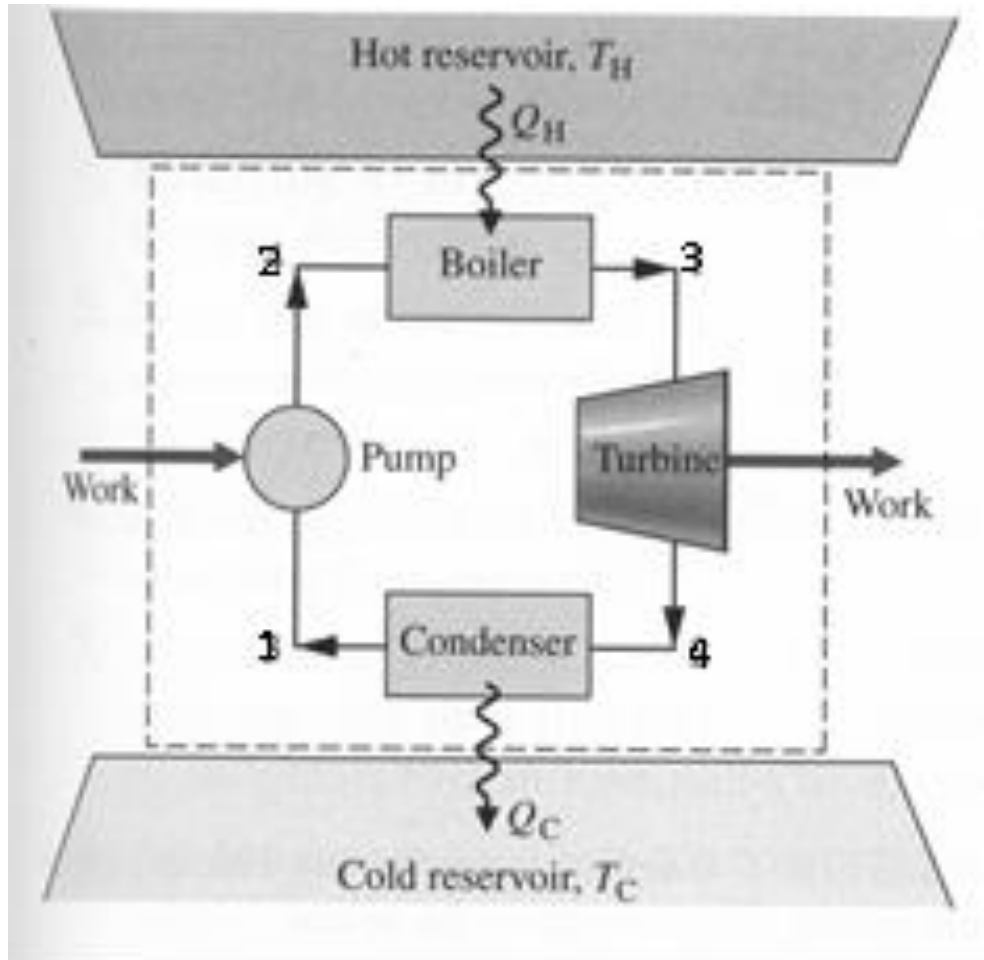
Hukum Thermodinamika 2

Statmen 1 (**Kelvin-Planck**): Kalor tidak dapat dirubah seluruhnya menjadi energi dan usaha.



- Statmen 2 (**Clausius**): Tidak mungkin suatu sistem apapun bekerja sedemikian rupa sehingga hasil satu-satunya adalah perpindahan energi sebagai panas dari sistem yang lebih dingin ke sistem yang lebih panas

APLIKASI HUKUM TERMO 2 PADA SIKLUS TERMODINAMIKA



Steam Power Plant

□ $W = Q_H - Q_C$

Efisiensi adalah rasio kerja yang dihasilkan dengan kalor yang diserap.

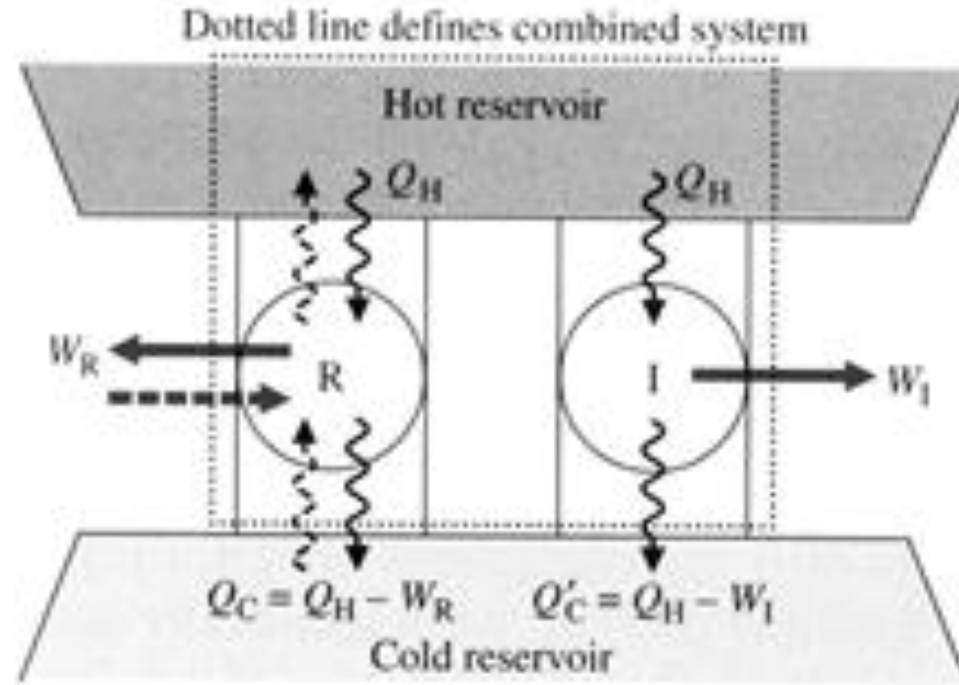
□
$$\begin{aligned}\eta &= \frac{W}{Q_H} \\ &= \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} \\ &= 1 - \frac{Q_C}{Q_H}\end{aligned}$$

Bila $Q_C = 0$, $\eta = 100\%$ (tidak mungkin oleh Kelvin Planck). Jadi efisiensi harus lebih kecil dari 100%.

TEOREMA CARNOT

Korolari 1:

Efisiensi termal dari siklus daya tak terbalikkan selalu lebih rendah dari efisiensi termal siklus daya terbalikkan bila keduanya beroperasi dengan dua reservoir termal yang sama.



R: siklus reversible, I: siklus irreversible

A: siklus ada 2: R dan I

B: Ganti arah energi di R (menjadi refrigerasi)

Semua sama kecuali arah Q_H , Q_C dan W_R

C: Tinjau R + I dan Reservoir Panas

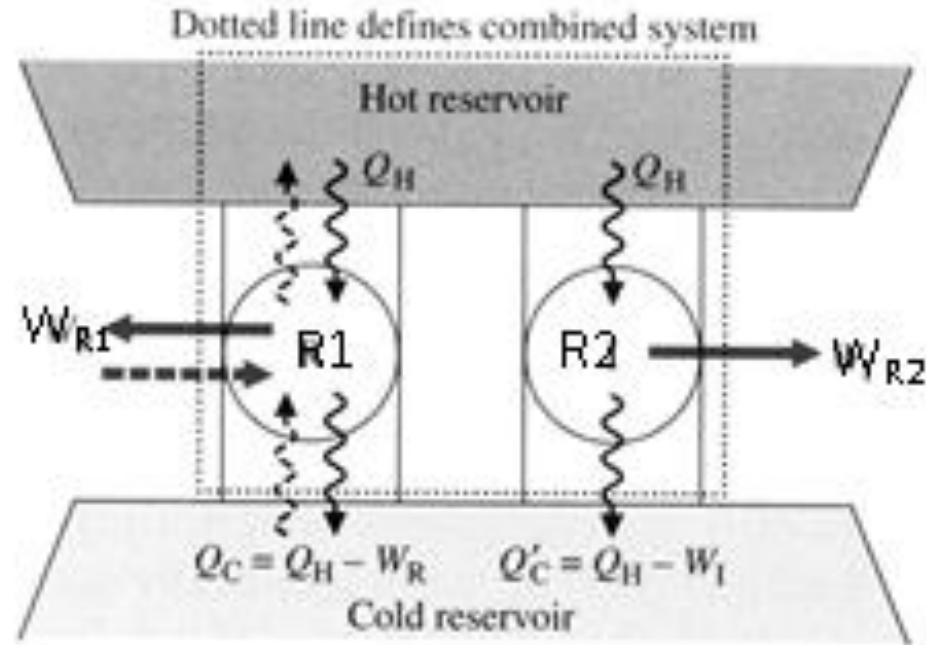
Bila ini harus jalan, $W_{siklus} < 0$, atau: $W_I - W_R < 0$

Bagi dengan Q_H : $W_I/Q_H - W_R/Q_H < 0$

Atau: $\eta_I < \eta_R$ terbukti

TEOREMA CARNOT

Korolari 2:
Semua siklus daya terbalikkan antara dua reservoir termal yang sama akan memberikan efisiensi termal yang sama.



A: Siklus: 2 R: R_1 dan R_2

B: Balik arah-arrah di R_1

C: Tinjau sistem: $R_1 + R_2 + \text{Reservoir Panas}$

$W_{\text{siklus}} = 0$ (terbalikkan)

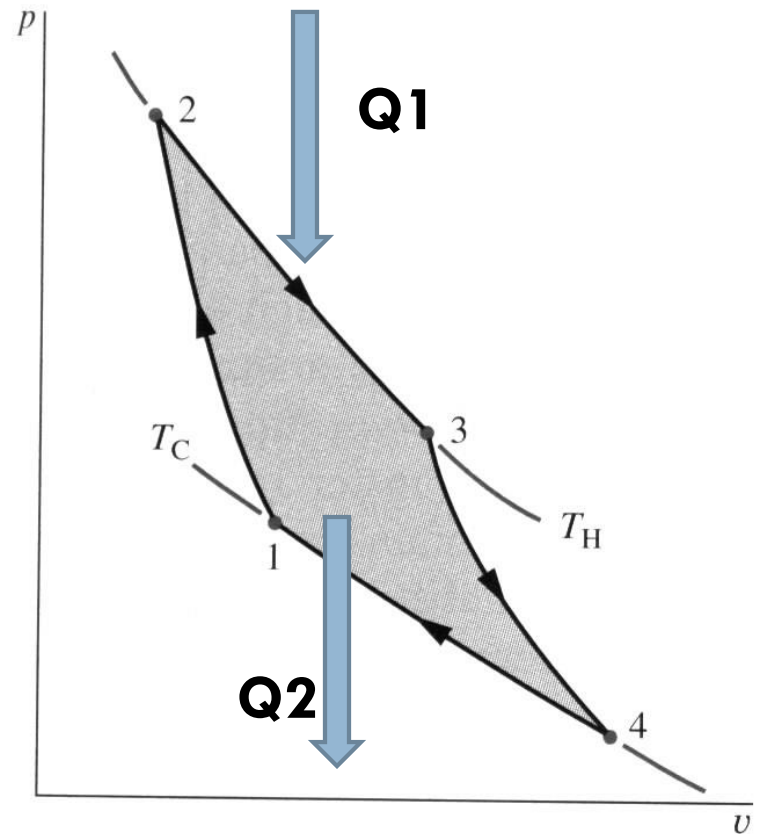
Atau: $W_{R2} - W_{R1} = 0$

Bagi dengan Q_H : $W_{R2}/Q_H - W_{R1}/Q_H = 0$

Atau: $\eta_{R1} = \eta_{R2} \dots$ terbukti

Siklus Carnot pada Gas Sempurna

- Zat melakukan proses siklis yg terdiri dari 2 isoterm dan 2 adiabatik
- Dimulai dari a kembali ke a:
 - Ekspansi isotermal dari 2 ke 3 pada suhu T_1 , panas Q_1 masuk dan usaha dilakukan oleh sistem
 - Ekspansi adiabatik dari 3 ke 4, suhu turun menjadi T_2 dan usaha dilakukan oleh sistem
 - Pemampatan isotermal pd suhu T_2 dari 4 ke 1. Panas Q_2 keluar dari sistem dan usaha dilakukan thp sistem
 - Pemampatan adiabatik dari 1 ke 2, suhu naik menjadi T_1 dan usaha dilakukan thp sistem



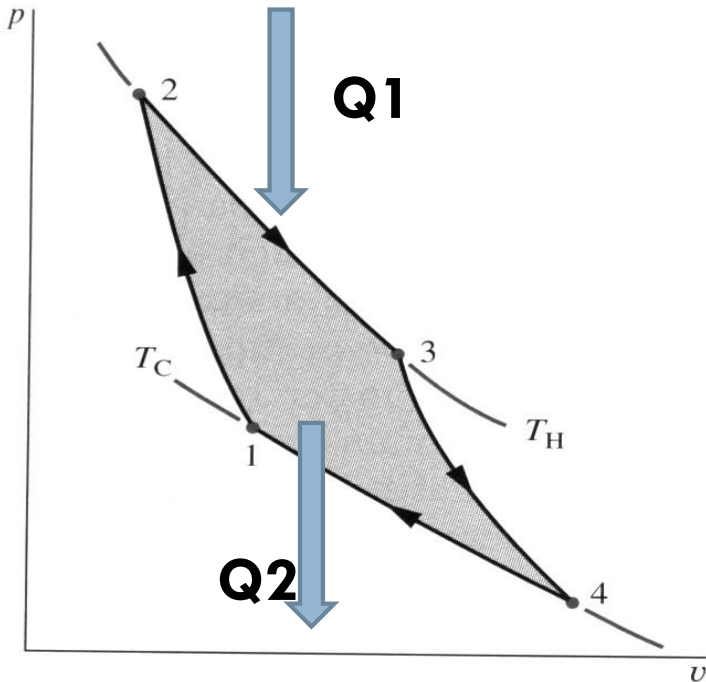
Persamaan step Isothermal

For the isothermal steps $b \rightarrow c$ and $d \rightarrow a$, Eq. (3.27) yields:

$$|Q_H| = RT_H \ln \frac{V_c}{V_b} \quad \text{and} \quad |Q_C| = RT_C \ln \frac{V_d}{V_a}$$

Therefore,

$$\frac{|Q_H|}{|Q_C|} = \frac{T_H \ln(V_c/V_b)}{T_C \ln(V_d/V_a)}$$



Persamaan Step Adiabatik

For an adiabatic process Eq. (3.22) with $dQ = 0$ becomes,

$$-\frac{C_V}{R} \frac{dT}{T} = \frac{dV}{V}$$

For step $a \rightarrow b$ and $c \rightarrow d$, integration gives:

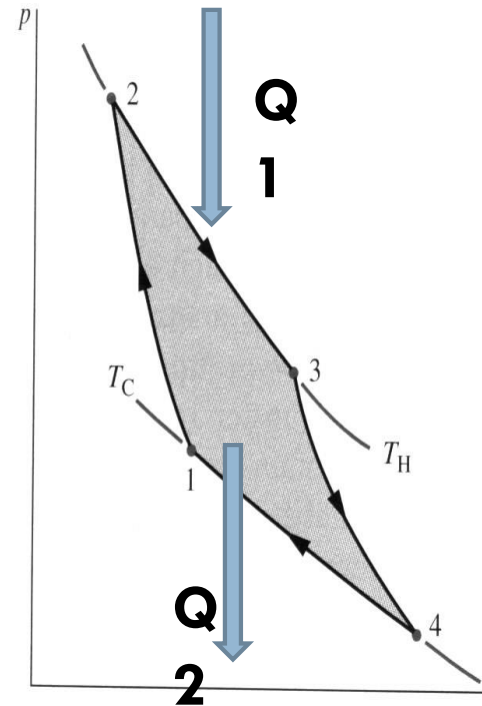
$$\int_{T_C}^{T_H} \frac{C_V}{R} \frac{dT}{T} = \ln \frac{V_a}{V_b} \quad \text{and} \quad \int_{T_C}^{T_H} \frac{C_V}{R} \frac{dT}{T} = \ln \frac{V_d}{V_c}$$

Because the left sides of these two equations are the same,

$$\ln \frac{V_a}{V_b} = \ln \frac{V_d}{V_c} \quad \text{or} \quad \ln \frac{V_c}{V_b} = \ln \frac{V_d}{V_a}$$

Efisiensi Carnot pada Gas Sempurna

$$\boxed{\frac{|Q_H|}{|Q_C|} = \frac{T_H}{T_C}} \quad \rightarrow \quad \boxed{\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} = 1 - \frac{T_C}{T_H}}$$



Contoh Soal (Van Ness Page 166)

- A Central Power plant, rated at 800,000 kW, generates steam at 585 K and discards heat to a river 295 K. If the thermal efficiency of the plants is 70% of the maximum possible value, how much heat is discarded to the river at rated power?

Lanjt..

□ Diketahui:

□ $W = 800.000 \text{ Kw}$

□ $T_c = 295 \text{ K}$

□ $T_h = 585 \text{ K}$

□ $\eta = 70\%$ Diketahui:

□ Ditanya: $Q_c = \dots?$

□ Jawab:

□ $\eta_{\max} = 1 - \frac{295}{585} = 0,4957$

□ $\eta = (0,7)(0,4957)$
 $= 0,3470$

□ $Q_c = \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right) (W)$
 $= \left(\frac{1-0,347}{0,347} \right) (800.000)$
 $= 1.505.500 \text{ Kw}$

This heat rate of 1.505.500 kJ/s would cause temperature rise of several °C in modest river.

5.4. ENTROPI

$$\frac{|Q_H|}{T_H} = \frac{|Q_C|}{T_C} \quad (5.7)$$

Jika jumlah panas mengacu pada fluida kerja, maka Q_H bernilai positif dan Q_C bernilai negatif, sehingga:

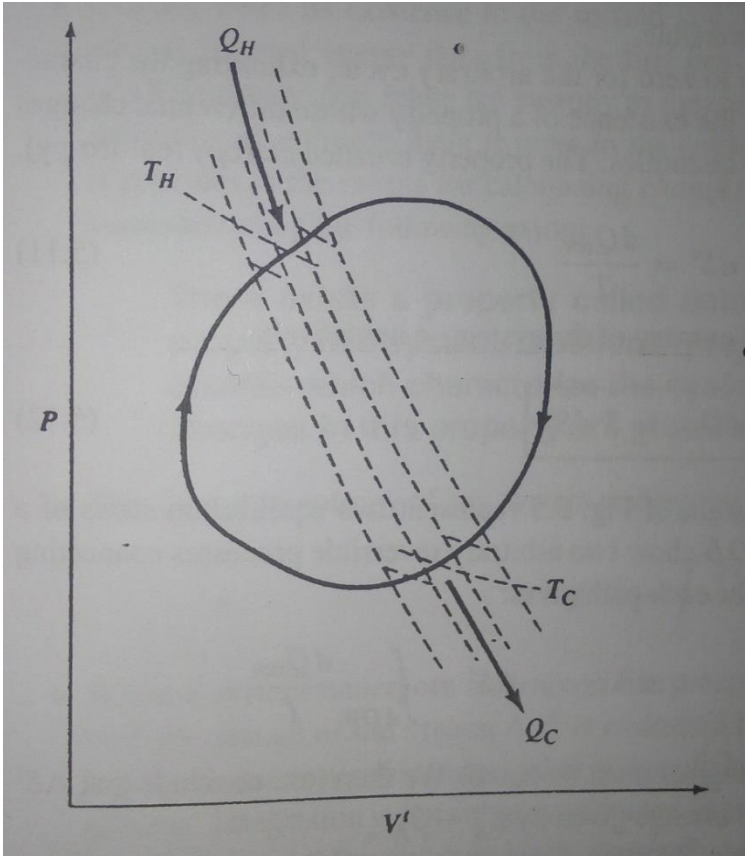
$$\frac{Q_H}{T_H} = \frac{-Q_C}{T_C}$$

$$\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} = 0 \quad (5.9)$$

5.4. Entropi

- Maka untuk sebuah siklus mesin carnot, nilai Q/T yang terasosiasikan dengan absorpsi dan rejeksi panas oleh fluida kerja berjumlah nol.
- Fluida kerja pada suatu mesin siklis akan kembali ke keadaan awalnya, sifat-sifat seperti temperatur, tekanan, dan energi dalam akan kembali ke nilai awalnya
- Maka untuk mesin carnot (dari persamaan 5.9), terkesan adanya suatu properti dimana perubahannya diberikan oleh nilai Q/T

5.4. Entropi



Gambar disamping menunjukkan sebuah siklus reversible sembarang yang dilalui sebuah fluida sembarang. Bagi area tertutup dengan beberapa kurva adiabatik yang berdekatan. Hubungkan garis adiabatik yang berdampingan dengan garis isothermal. Semakin dekat jarak garis adiabatik, maka aproksimasi garis isothermal akan semakin mendekati garis siklus sembarang.

Saat garis adiabatik ini sangat berdekatan, maka langkah isothermal menjadi infinitesimal sehingga Q_H dan Q_C menjadi dQ_H dan dQ_C

$$\frac{dQ_H}{T_H} + \frac{dQ_C}{T_C} = 0$$

Pada persamaan ini, T_H dan T_C , temperature absolut fluida kerja mesin carnot, juga merupakan temperature yang dilalui fluida kerja pada siklus sembarang disamping. Penjumlahan dQ/T akan menghasilkan integral:

$$\oint \frac{dQ_{rev}}{T} = 0 \quad (5.10)$$

Dimana lingkaran pada lambang integral melambangkan integrasi terhadap siklus sembarang, dan rev menandakan bahwa siklus reversible.

5.4. Entropi

- Maka jumlah dQ_{rev}/T sama dengan nol memperlihatkan karakteristik dari sebuah property.
- Maka dapat disimpulkan adanya sebuah property dimana perubahan differensialnya diberikan oleh jumlah ini.
- Properti ini kemudian disebut dengan entropi, dengan perubahan diferensialnya adalah:

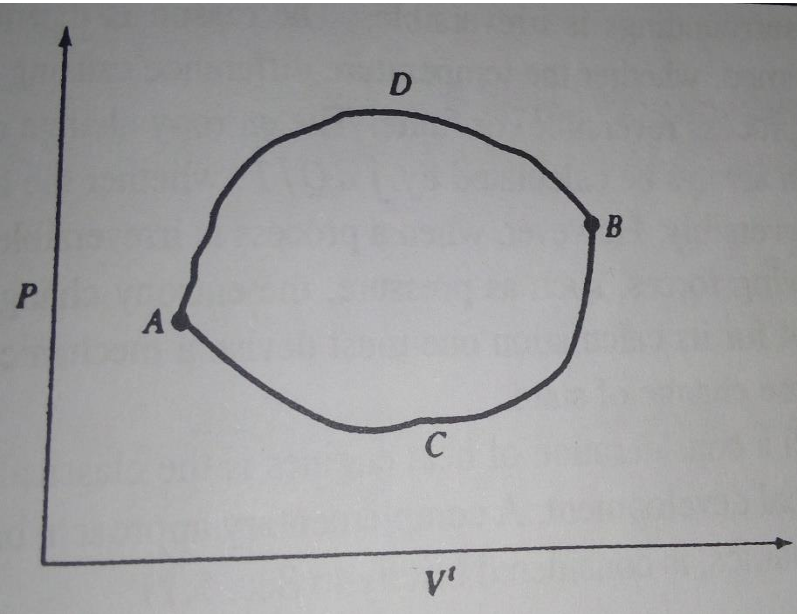
$$dS^t = \frac{dQ_{rev}}{T} \quad (5.11)$$

Dimana S^t merupakan total entropi sistem.

Atau,

$$\boxed{dQ_{rev} = TdS^t} \quad (5.12)$$

5.4. Entropi



Titik A dan B pada gambar di samping merepresentasikan dua keadaan keseimbangan dari sebuah fluida tertentu, dan jalur ACB dan ADB menunjukkan dua proses reversible sembarang yang menghubungkan kedua titik ini. Integrasi persamaan 5.11 untuk tiap jalur akan menghasilkan:

$$\Delta S^t = \int_{ACB} \frac{dQ_{rev}}{T} \quad \text{dan} \quad \Delta S^t = \int_{ADB} \frac{dQ_{rev}}{T}$$

Dimana menurut persamaan 5.10, kedua integral ini bernilai sama. Sehingga dapat disimpulkan perubahan entropi tidak tergantung dari jalur dan perubahan property dapat dinyatakan dengan:

$$\Delta S^t = S_B^t - S_A^t$$

Jika sebuah proses reversible dan adiabatik, maka $dQ_{rev}=0$; maka menurut persamaan 5.11, $dS^t=0$. Maka entropi sistem konstan pada proses adiabatik reversible, proses ini disebut dengan proses isentropik.

5.4. Entropi

Summary

- Adanya sebuah property yang disebut dengan entropi S , yang merupakan property intrinsik sebuah sistem, berhubungan fungsional dengan koordinat terukur yang mengkarakterisasi sistem.
- Perubahan entropi sistem apapun yang menjalani proses reversible dengan batas tertentu ialah:

$$\Delta S^t = \int \frac{dQ_{rev}}{T} \quad (5.13)$$

- Saat sebuah sistem menjalani proses irreversible antara dua keadaan keseimbangan, perubahan entropi sistem ΔS^t dievaluasi dengan mengaplikasikan persamaan 5.13 terhadap proses reversible sembarang yang dipilih yang menghasilkan perubahan keadaan sama seperti proses aktual. Karena entropi merupakan fungsi keadaan, perubahan entropi proses reversible dan irreversible identik.

5.5. Perubahan Entropi Gas Ideal

Untuk satu mol atau satu unit massa fluida yang menjalani proses reversible mekanikal pada sistem tertutup, hukum pertama termodinamika menjadi:

$$dU = dQ_{rev} - PdV$$

Diferensiasi persamaan entalpi $H = U + PV$ menghasilkan:

$$dH = dU + PdV + VdP$$

Eliminasi dU :

$$dH = dQ_{rev} - PdV + PdV + VdP$$

Atau:

$$dQ_{rev} = dH - VdP$$

Untuk gas ideal, $dH = C_p^{ig} dT$ dan $V = RT/P$. Substitusi, kemudian bagi dengan T :

$$\frac{dQ_{rev}}{T} = C_p^{ig} \frac{dT}{T} - R \frac{dP}{P}$$

5.5. Perubahan Entropi Gas Ideal

- Substitusi persamaan tadi ke pers 5.11, maka:

$$dS = C_p^{ig} \frac{dT}{T} - R \frac{dP}{P} \quad \text{atau} \quad \frac{dS}{R} = \frac{C_p^{ig}}{R} \frac{dT}{T} - \frac{dP}{P}$$

- Dimana S adalah entropi molar gas ideal. Integrasi dari keadaan awal T_0 dan P_0 ke keadaan akhir T dan P memberikan:

$$\frac{\Delta S}{R} = \int_{T_0}^T \frac{C_p^{ig}}{R} \frac{dT}{T} - \ln \frac{P}{P_0} \quad (5.14)$$

- Jika C_p konstan, maka persamaan menjadi:

$$\frac{\Delta S}{R} = \frac{C_p^{ig}}{R} \ln \frac{T}{T_0} - \ln \frac{P}{P_0} \quad (5.18)$$

5.6. Pernyataan Matematika Hukum II

- Jika terdapat dua sumber panas, satu pada temperature T_H dan satu pada temperature lebih kecil T_C , maka panas Q akan ditransfer dari sumber yang lebih panas ke sumber yang lebih dingin. Perubahan entropi di masing-masing sumber ialah:

$$\Delta S_H = \frac{-Q_H}{T_H} \quad \text{dan} \quad \Delta S_C = \frac{Q_C}{T_C}$$

- Maka jumlah kedua entropi ini:

$$\Delta S_{total} = \Delta S_H + \Delta S_C$$

$$\Delta S_{total} = \frac{-Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C}$$

5.6. Pernyataan Matematika Hukum II

Contoh:

A 40-kg steel casting ($C_p = 0.5 \text{ kJ/kg.K}$) at a temperature of 450°C is quenched in 150 kg of oil ($C_p = 2.5 \text{ kJ/kg.K}$) at 25°C . If there are no heat losses, what is the change in entropy of (a) the casting, (b) the oil, and (c) both considered together?

Jawab:

Temperature akhir oli dan baja dihitung dengan asas black:

$$(40)(0.5)(T - 450) + (150)(2.5)(T - 25) = 0$$

Menghasilkan temperatur akhir $T = 46.52^\circ\text{C}$

(a) Perubahan entropi baja

$$\begin{aligned}\Delta S_B &= m \int \frac{C_p dT}{T} = m C_p \ln \frac{T_2}{T_1} \\ &= (40)(0.5) \ln \frac{273.15 + 46.52}{273.15 + 450} = -16.33 \text{ kJ/K}\end{aligned}$$

5.6. Pernyataan Matematika Hukum II

(b) Perubahan entropi oli

$$\begin{aligned}\Delta S_O &= m \int \frac{C_p dT}{T} = m C_p \ln \frac{T_2}{T_1} \\ &= (150)(2.5) \ln \frac{273.15 + 46.52}{273.15 + 25} = 26.13 \text{ kJ/K}\end{aligned}$$

(c) Perubahan entropi total

$$\Delta S_{total} = \Delta S_B + \Delta S_O$$

$$\Delta S_{total} = -16.33 + 26.13 = 9.80 \text{ kJ/K}$$

5.7. Neraca Entropi Sistem Terbuka

Perubahan entropi net pada aliran	+	Perubahan entropi volume kontrol	+	Perubahan entropi lingkungan	=	Total pembentukan entropi
-----------------------------------	---	----------------------------------	---	------------------------------	---	---------------------------

$$\Delta(S\dot{m})_{fs} + \frac{d(mS)_{cv}}{dt} + \frac{dS_{surr}^t}{dt} = \dot{S}_G \geq 0$$

Jika perubahan entropi lingkungan dinyatakan dalam laju pelepasan panas, maka:

$$\Delta(S\dot{m})_{fs} + \frac{d(mS)_{cv}}{dt} - \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_{\sigma,j}} = \dot{S}_G \geq 0 \quad (5.21)$$

5.7. Neraca Entropi Sistem Terbuka

Pada proses aliran *steady-state*, massa dan entropi fluida di volume control konstan, maka $d(mS)_{cv}/dt = 0$. Pers 5.21 akan menjadi:

$$\Delta(S\dot{m})_{fs} - \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_{\sigma,j}} = \dot{S}_G \geq 0 \quad (5.22)$$

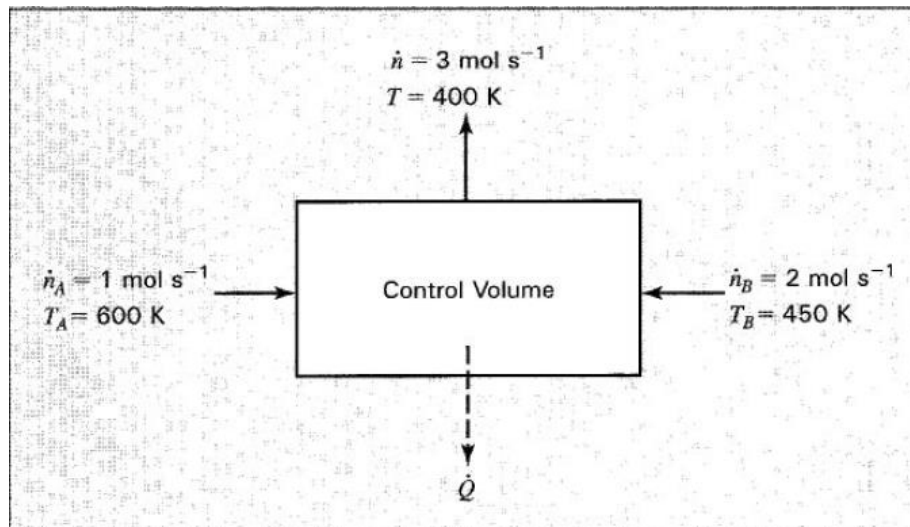
Jika hanya ada satu pintu masuk dan satu pintu keluar dengan laju alir massa yang sama untuk setiap aliran, maka persamaan akan menjadi:

$$\Delta S - \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_{\sigma,j}} = \dot{S}_G \geq 0 \quad (5.23)$$

5.7. Neraca Entropi Sistem Terbuka

Contoh:

In a *steady-state process*, 1mol/s of air at 600K and 1atm is continuously mixed with 2mol/s of air at 450K and 1atm. The product stream is at 400K and 1atm. A schematic representation is shown in Fig. 5.7. Determine the rate of heat transfer and the rate of entropy generation for the process. Assume that air is an ideal gas with $C_p = (7/2)R$, that the surroundings are at 300K, and that kinetic and potential energy changes are negligible.



5.7. Neraca Entropi Sistem Terbuka

- Jawab:

$$\dot{Q} = \dot{n}H - \dot{n}_A H_A - \dot{n}_B H_B = \dot{n}_A (H - H_A) + \dot{n}_B (H - H_B)$$

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \dot{n}_A C_P (T - T_A) + \dot{n}_B C_P (T - T_B) \\ &= C_P [\dot{n}_A (T - T_A) + \dot{n}_B (T - T_B)]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \left(\frac{7}{2}\right) (8.314) [(1)(400 - 600) + (2)(400 - 450)] \\ &= -8729.7 \text{ J/s}\end{aligned}$$

5.7. Neraca Entropi Sistem Terbuka

$$\dot{S}_G = \dot{n}S - \dot{n}_A S_A - \dot{n}_B S_B - \frac{\dot{Q}}{T_\sigma} = \dot{n}_A(S - S_A) + \dot{n}_B(S - S_B) - \frac{\dot{Q}}{T_\sigma}$$

$$\begin{aligned}\dot{S}_G &= \dot{n}_A C_P \ln \frac{T}{T_A} + \dot{n}_B C_P \ln \frac{T}{T_B} - \frac{\dot{Q}}{T_\sigma} \\ &= C_P (\dot{n}_A \ln \frac{T}{T_A} + \dot{n}_B \ln \frac{T}{T_B}) - \frac{\dot{Q}}{T_\sigma}\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\dot{S}_G &= \left(\frac{7}{2}\right) (8.314) \left[(1) \ln \frac{400}{600} + (2) \ln \frac{400}{450} \right] - \frac{-8729.7}{300} \\ &= 10446 J/Ks\end{aligned}$$

5.8. Perhitungan Kerja Ideal

$$\dot{W}_{ideal} = \Delta(H\dot{m})_{fs} - T_{\sigma}\Delta(S\dot{m})_{fs}^{(5.25)}$$

Untuk kasus satu aliran mengalir melalui volume control, maka pers 5.25 dapat dinyatakan sebagai laju atau saat dibagi dengan $\dot{m}$ dalam basis jumlah unit cairan mengalir melalui volume control. Maka,

(5.27)

$$W_{ideal} = \Delta(H) - T_{\sigma}\Delta(S)$$

5.8. Perhitungan Kerja Ideal

- Jika $\dot{W}_{ideal}$ positif, maka merupakan kerja minimum yang dibutuhkan, dan lebih kecil dari $\dot{W}_s$ (kerja nyata). Pada kasus ini, efisiensi termodinamika η_t didefinisikan sebagai rasio kerja ideal terhadap kerja nyata:

$$\eta_t(\text{kerja yang dibutuhkan}) = \frac{\dot{W}_{ideal}}{\dot{W}_s}$$

- Jika $\dot{W}_{ideal}$ negative, maka merupakan kerja maksimum yang dihasilkan, dan lebih besar dari $\dot{W}_s$. Pada kasus ini, efisiensi termodinamika didefinisikan sebagai rasio kerja nyata terhadap kerja ideal:

$$\eta_t(\text{kerja yang dihasilkan}) = \frac{\dot{W}_s}{\dot{W}_{ideal}}$$

5.9. Kerja Hilang

- Kerja yang terbuang akibat dari *irreversibilities* proses disebut dengan kerja hilang, W_{lost} , dan didefinisikan sebagai perbedaan antara kerja nyata dan kerja ideal:

$$W_{lost} = W_s - W_{ideal} \quad (5.30)$$

- Jika dinyatakan dalam laju,

$$\dot{W}_{lost} = T_\sigma \Delta(S\dot{m})_{fs} - \dot{Q} \quad (5.32)$$

- Untuk satu temperature lingkungan, kembali ke pers 5.22,

$$\dot{S}_G = \Delta(S\dot{m})_{fs} - \frac{\dot{Q}}{T_\sigma} \quad (5.33)$$

$$T_\sigma \dot{S}_G = T_\sigma \Delta(S\dot{m})_{fs} - \dot{Q}$$

- Maka,

$$\dot{W}_{lost} = T_\sigma \dot{S}_G \quad (5.34)$$

5.9. Kerja Hilang

Untuk kasus hanya ada satu aliran mengalir melalui volume kontrol, persamaan menjadi,

$$W_{lost} = T_{\sigma} \Delta S - Q \quad (5.36)$$

Dan

$$S_G = \Delta S - \frac{Q}{T_{\sigma}} \quad (5.38)$$

Persamaan 5.36 dan 5.38 digabungkan menjadi: ^(5.39)

$$W_{lost} = T_{\sigma} S_G$$