

KESETIMBANGAN ENERGI

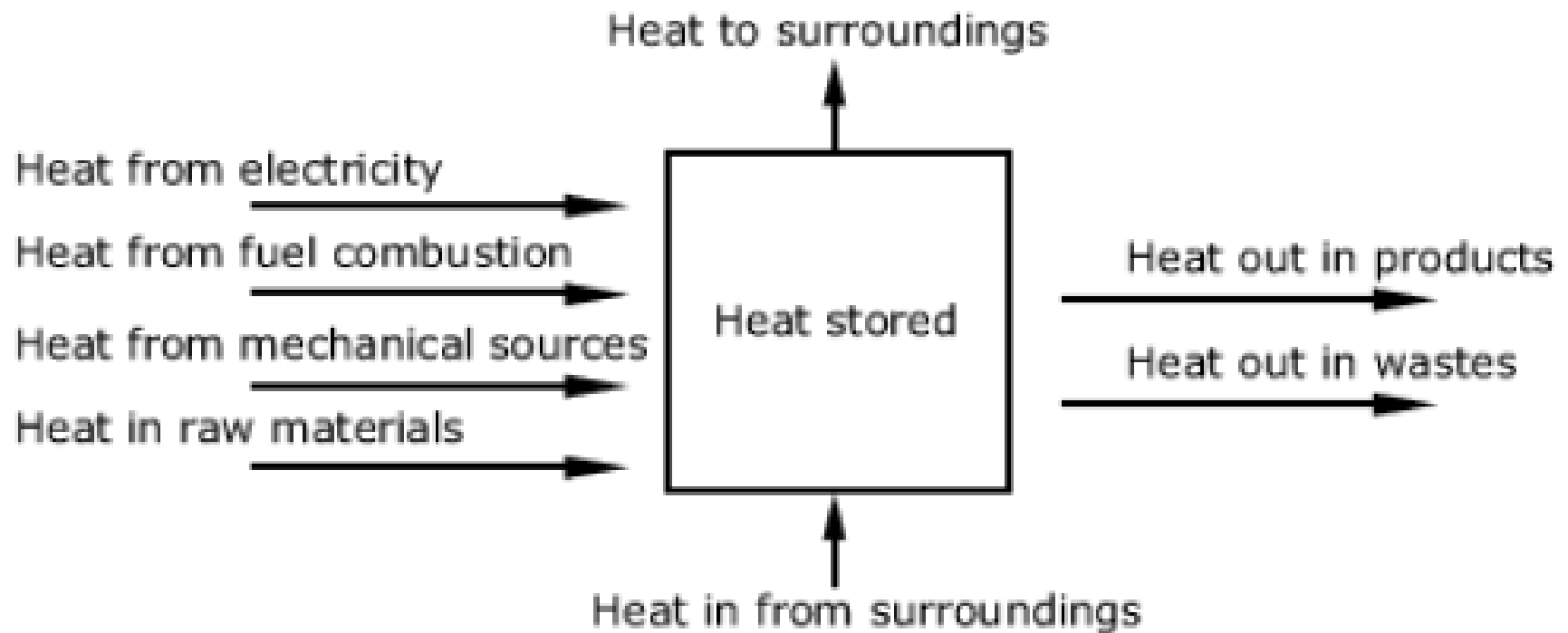
- Landasan: Hukum I Termodinamika

Energi total masuk sistem - Energi total keluar sistem = Perubahan energi total pada sistem

$$E_{\text{in}} - E_{\text{out}} = \Delta E_{\text{system}}$$

$$\dot{E}_{\text{in}} - \dot{E}_{\text{out}} = \Delta \dot{E}_{\text{system}}$$

per unit waktu (laju energi, J/s)



Heat balance

Keseimbangan Energi untuk Sistem Tertutup

- Interaksi antara sistem dengan sekeliling → perpindahan panas & perbedaan bentuk kerja
- Laju pindah panas, q (J/s atau watts (W)).
- Energi termal, Q ,
- Kapasitas panas c .

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} cdT$$

- Jika perpindahan energi berlangsung
- Pada kondisi tekanan konstan,

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} c_p dT$$

- c_p kapasitas panas spesifik pada tekanan konstan, J/(kg K).
- Pada kondisi volume konstan,

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} c_v dT$$

- c_v kapasitas panas spesifik pada volume konstan, J/(kg K).

Panas Spesifik (c_p)

- Jumlah panas dari satu satuan perubahan suhu dari satu satuan massa
- Berbeda-beda tergantung komposisi bahan

- Contoh: Persamaan Siebel

Above freezing:

$$c_{avg} = 1674,72 F + 837,36 SNF + 4186,8 M$$

Below freezing:

$$c_{avg} = 1674,72 F + 837,36 SNF + 2093,4 M$$

M = fraksi massa air

SNF = fraksi massa padatan non lemak

F = fraksi massa lemak

Soal 1

- Tentukan panas spesifik dengan persamaan Siebel dari sari buah dengan jumlah padatan 45%.

K E R J A (*WORK*)

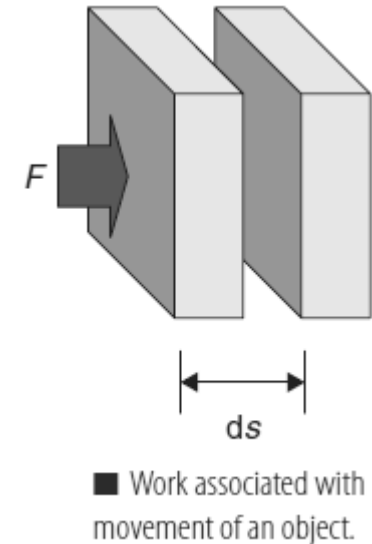
- Semua interaksi antara sistem dengan lingkungannya, yang bukan merupakan hasil dari perbedaan suhu.

$$dW = - F.ds$$

- Total Kerja memindahkan objek dari lokasi 1 ke 2

$$W_{1-2} = - \int_1^2 F.ds = F(s_1 - s_2)$$

Tentang KERJA; baca lebih lanjut di Singh & Heldman hal. 47 – 51



- Perubahan total energi pada sistem tertutup = panas yang ditambahkan ke sistem – kerja yang dilakukan sistem

$$\Delta E = Q - W$$

$$\Delta E_i + \Delta E_{KE} + \Delta E_{PE} = Q - W \quad \dots(a)$$

- Dalam konteks ekspansi gas dalam silinder,

$$W = \int PdV - \Delta E_{KE} - \Delta E_{PE} - E_f$$

$$W + E_f = \int PdV - \Delta E_{KE} - \Delta E_{PE} \quad \dots(b)$$

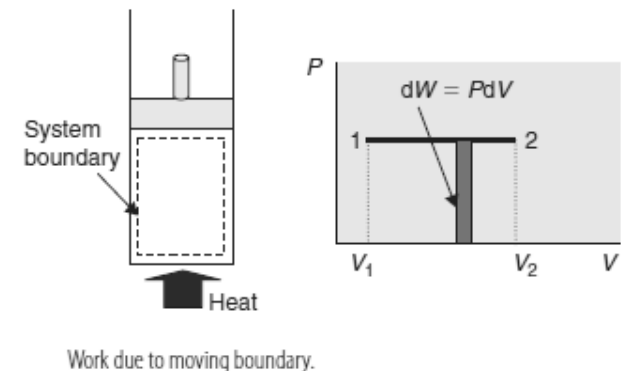
- Eliminasi persamaan (a) & (b)

$$\Delta E_i = Q + E_f - \int PdV \quad \dots(c)$$

dimana

$$d(PV) = PdV + VdP$$

$$\Delta PV = \int PdV + \int VdP$$



$$\int P dV = \Delta PV - \int V dP \quad \dots(d)$$

Substitusi pers. (d) ke (c)

$$\Delta E_i + \Delta PV = Q + E_f + \int V dP \quad \dots(e)$$

Δ untuk $E_i \rightarrow$ energi akhir – awal; Δ untuk yg lain
 \rightarrow keluar – masuk; penjabaran persamaan (e),

$$E_{i,2} - E_{i,1} + P_2 V_2 - P_1 V_1 = Q + E_f + \int V dP$$

$$(E_{i,2} + P_2 V_2) - (E_{i,1} + P_1 V_1) = Q + E_f + \int V dP$$

$E_i + PV$ didefinisikan sebagai entalpi, H

$$H_2 - H_1 = Q + E_f + \int V dP$$

- Pada proses pemanasan dengan tekanan konstan \rightarrow tidak ada hambatan (friksi = nol),

$$H_2 - H_1 = Q$$

$$\Delta H = Q$$

- Perubahan entalpi biasa disebut **heat content** .
- ΔH suatu sistem dapat ditentukan dengan mengukur perubahan heat content, Q , asalkan proses berlangsung pada tekanan konstan.

Pemanasan sensibel pada tekanan konstan

- Panas sensibel → panas yang diperlukan untuk mengubah suhu suatu bahan
- Peningkatan suhu dari T_1 ke T_2 ,

$$\Delta H = H_2 - H_1 = Q = m \int_{T_1}^{T_2} c_p T$$

$$\Delta H = mc_p(T_2 - T_1)$$

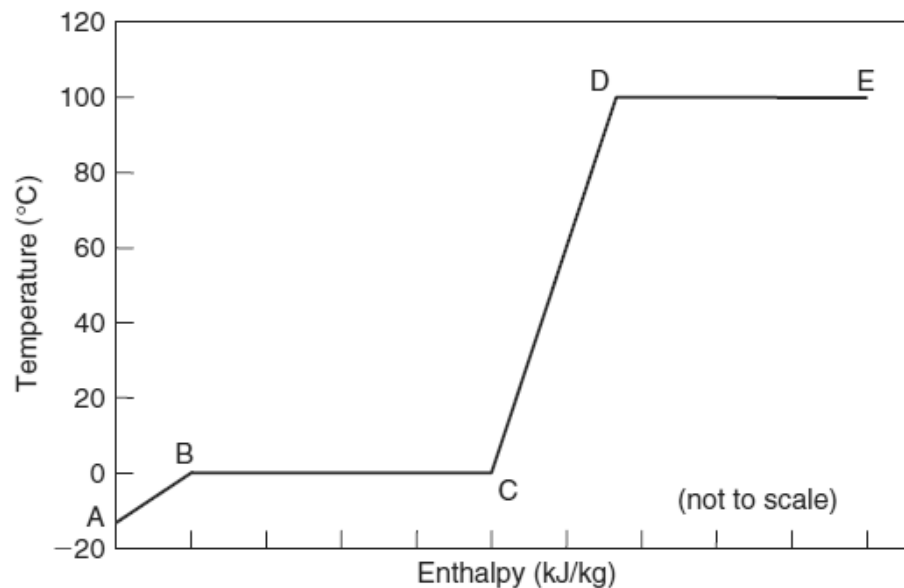
- c_p : kapasitas panas (J/[kg C]), m : massa, T : suhu

Pemanasan pada tekanan konstan melibatkan perubahan fase

- Suhu konstan, panas laten ditambahkan atau diambil.
- Panas laten → panas yang diperlukan untuk mengubah bentuk fisik (suhu tetap) (m. L)
- Panas laten fusi air pada 0C: 333,2 kJ/kg.
- Panas laten vaporisasi air bervariasi tergantung suhu & tekanan
- Pada 100C: 2257,06 kJ/kg.

Soal 2

- Lima kg es bersuhu -10°C dipanaskan hingga mencair pada 0°C ; panas ditambahkan untuk menguapkan air. Uap jenuh keluar pada 100°C . Hitung perbedaan entalpi proses. Diketahui:



■ A plot of temperature versus enthalpy for melting of ice and vaporization of water.

Panas spesifik:

- es $2,05 \text{ kJ}/(\text{kg K})$,
- air $4,182 \text{ kJ}/(\text{kg K})$,

Panas laten:

- fusi pada 0°C : $333,2 \text{ kJ}/\text{kg}$,
- penguapan pada 100°C : $2257,06 \text{ kJ}/\text{kg}$.

Soal 3

- Berapa panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu 4 kg daging panggang yang mengandung 15% protein, 20% lemak dan 65% air dari suhu 4,5°C menjadi 70°C ? Nyatakan dalam Joule dan dalam Btu (1 Btu = 1055 J)

Keseimbangan Energi untuk Sistem Terbuka

- Perpindahan massa, energi, & kerja
- Perpindahan massa bisa membawa energi ke- atau dari-sistem → perlu diperhitungkan adanya perubahan energi pada sistem akibat aliran massa
- Kerja → Kerja alir (**flow work**).
- Luas area melintang A , tekanan fluida P , gaya untuk menekan melewati pembatas sistem

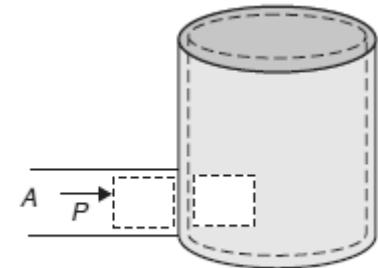
$$F = PA$$

- Penekanan dilakukan pada jarak L ,

$$W_{\text{mass flow}} = FL = PAL = PV$$

$$E = E_i + E_{KE} + E_{PE} + PV$$

$$E = E_i + \frac{mu^2}{2} + mgz + PV$$



Movement of a liquid volume.

Keseimbangan Energi untuk Sistem Aliran *Steady*

- Sistem pada *steady state*,
- Sifat-sifat (*properties*) -nya tidak berubah seiring waktu.
- Tidak ada perubahan energi pada sistem seiring waktu.

$$\dot{E}_{\text{in}} = \dot{E}_{\text{out}} = \Delta\dot{E}_{\text{system}} = 0$$

$$\dot{E}_{\text{in}} = \dot{E}_{\text{out}}$$

Keseimbangan Energi Total

$$Q_{in} + W_{in} + \sum_{j=1}^p m_i \left(E'_{i,j} + \frac{u_j^2}{2} + gz_j + P_j V'_j \right) = Q_{out} + W_{out} + \sum_{e=1}^q m_e \left(E'_{i,e} + \frac{u_e^2}{2} + gz_e + P_e V'_e \right)$$

E' : energi internal per satuan massa; V' : volume spesifik

Untuk sistem dengan p aliran masuk; q aliran keluar

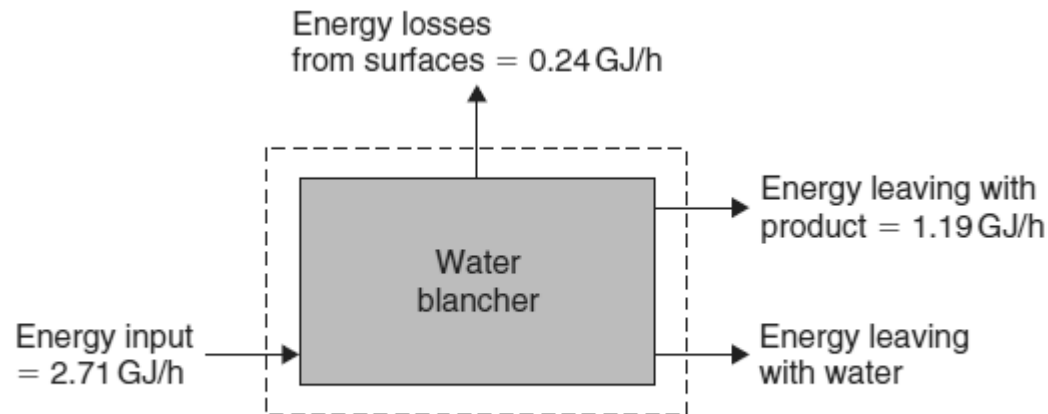
- Jika hanya satu aliran masuk & keluar pada sistem,

$$Q_m = \left(\frac{u_2^2}{2} + gz_2 + \frac{P_2}{\rho_2} \right) - \left(\frac{u_1^2}{2} + gz_1 + \frac{P_1}{\rho_1} \right) + E'_{i,2} - E'_{i,1} + W_m$$

- Q_m & W_m : perpindahan panas & kerja per satuan massa.
- Volume spesifik V diganti $1/\rho$.

Soal 4

- Blanching kacang; laju alir massa produk 860 kg/jam. Energi yang dikonsumsi dalam proses blanching 1,19 GJ/jam. Energi hilang karena insulasi yang buruk sebesar 0,24 GJ/jam. Total energi masuk ke *blancher* 2,71 GJ/jam, Hitung:
 - a. Energi untuk memanaskan kembali (*reheat*) air.
 - b. Persentase energi pada masing-masing aliran.



■ A schematic of a water blancher.

Soal 5

- Pengupasan kentang secara semi-kontinyu menggunakan steam. Laju pasokan steam 4 kg per 100 kg kentang non-kupas. Suhu kentang 17C, suhu kentang kupas keluar sistem 35C. Suhu aliran limbah 60C. Hitung jumlah limbah dan kentang kupas

Panas spesifik:

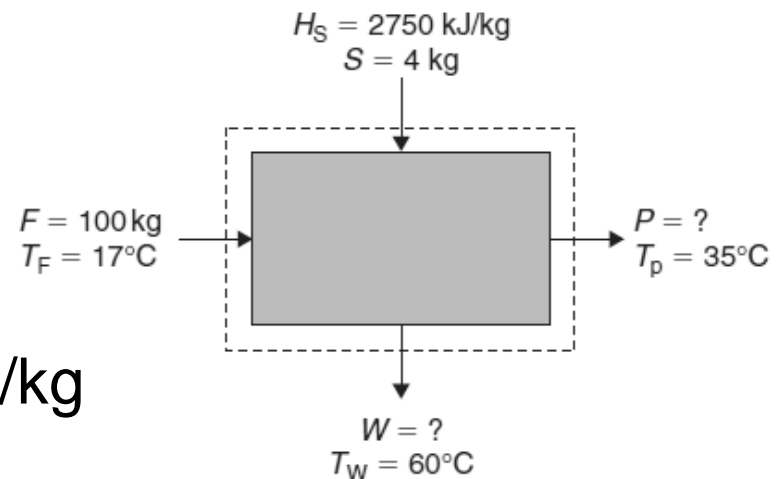
kentang non-kupas 3,7

limbah 4,2

kentang kupas 3,5 kJ/(kg K).

Heat content dari steam 2750 kJ/kg

(asumsi **suhu reference** 0C),



■ A block diagram showing various streams

T-reference digunakan sebagai acuan suhu mula-mula dari suatu kondisi material

Soal 6

- Sebuah mesin pengering memerlukan bahan bakar gas sebanyak $4 \text{ m}^3/\text{jam}$ dengan nilai kalori 800 kJ/mol . Kapasitas mesin tersebut adalah 60 kg bahan basah, dengan menurunkan kadar air dari 55% menjadi 10% .

Perkirakan efisiensi termal keseluruhan dengan hanya memperhitungkan panas laten.

(Asumsi gas STP $1 \text{ mol} = 22,4 \text{ liter}$; panas laten penguapan = 2257 kJ/kg)

Soal 7

- 1000 kaleng sup (@ 60 g dengan isi 0,45 kg sup) disterilisasi dlm autoklaf pada suhu 100C. Setelah itu dilakukan pendinginan hingga 40C dengan aliran air (masuk 15C, keluar 35C). Berapa banyak air pendingin yang dibutuhkan?
- Panas spesifik sup = 4,1 kJ/ (kg. °C)
- Panas spesifik kaleng = 0,5 kJ/ (kg. °C)
- Panas spesifik air = 4,186 kJ/ (kg. °C)
- Asumsi : kandungan panas dalam dinding autoklaf > 40C = $1,6 \cdot 10^4$ kJ; tidak ada kehilangan panas melalui dinding
- Suhu reference = 40C

Soal 8

- Dilakukan pembekuan 10.000 roti (@ 0,75 kg) dari suhu awal 18°C menjadi -18°C. Kebutuhan panas maksimum untuk pembekuan adalah dua kali lipat kebutuhan rata-rata, hitung kebutuhan maksimum ini jika waktu pembekuan selama 6 jam. Diketahui entalpi/temperature untuk roti k.air 36% $H_{18.3^{\circ}\text{C}} = 210,36 \text{ kJ kg}^{-1}$, $H_{-17.3^{\circ}\text{C}} = 65.35 \text{ kJ kg}^{-1}$.

$T^{\circ}\text{C}$	=	-20.6	-17.8	15.6	18.3
$H \text{ kJ kg}^{-1}$	=	55.88	65.35	203.4	210.4

