

BAB 2

Pengenalan Neraca Energi pada Proses Tanpa Reaksi

Konsep Hukum Kekekalan Energi

Total energi pada sistem dan lingkungan tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan.

2.1 Neraca Energi untuk Sistem Tertutup dan *Unsteady-state*

Neraca massa makroskopik untuk sistem tertutup dan *unsteady-state*

(Akumulasi massa di dalam sistem) = (massa yang masuk) - (massa yang keluar)

$$\Delta m_{sistem} = m_{masuk} - m_{keluar}$$

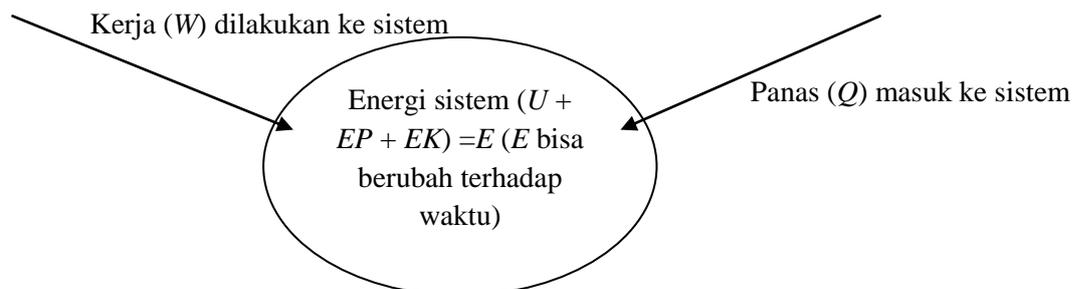
(2.1)

Secara analogi, neraca energi makroskopik untuk sistem tertutup, *Unsteady-state* dapat dituliskan

(Akumulasi energi di dalam sistem) = (energi yang masuk) - (energi yang keluar)

$$\Delta(U + EP + EK)_{sistem} = \Delta E = Q + W$$

(2.2)

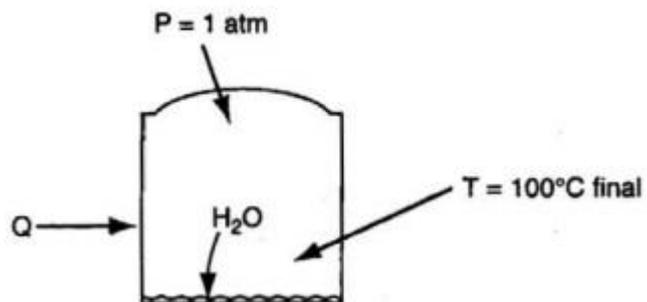


Gambar 2.1 Sistem tertutup, *unsteady-state* dengan panas (Q) dan kerja (W).

Contoh 2.1. Aplikasi neraca energi sistem tertutup

Alkaloid merupakan senyawa kimia yang mengandung nitrogen yang dapat diproduksi oleh sel tumbuhan. Pada sebuah penelitian, tangki tertutup seperti ditunjukkan pada gambar C2.1, silinder tersebut mempunyai volume $1,673 \text{ m}^3$ diisi dengan air yang mengandung dua alkaloid, ajmalisin, dan serpentin. Suhu larutan $10 \text{ }^\circ\text{C}$, untuk mendapatkan alkaloid kering maka air sebanyak 1 kg di dalam tangki akan diuapkan. Asumsi properti air dapat digunakan untuk menggantikan properti larutan.

Berapa banyak panas yang harus ditransfer ke tangki jika 1 kg *saturated liquid water* pada $10 \text{ }^\circ\text{C}$ teruapkan secara sempurna dengan kondisi akhir $100 \text{ }^\circ\text{C}$ pada 1 atm



Gambar C2.1

Penyelesaian :

Data yang ditampilkan dapat digunakan untuk mencari properti lain di *steam table*

Data kondisi awal, $p = 1 \text{ atm}$, $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, dan $\hat{U} = 35 \text{ kJ/kg}$, data kondisi akhir, $p = 1 \text{ atm}$, $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, dan $\hat{U} = 2506 \text{ kJ/kg}$

Sistem tertutup. *Unsteady state* sehingga dapat menggunakan pers. 2.1

$$\Delta(U + EP + EK)_{\text{sistem}} = \Delta E = Q + W$$

$\Delta EK = 0$, karena air dalam keadaan diam

$\Delta EP = 0$, karena air dibagian tengah berubah sangat kecil

Tidak terdapat kerja ($W = 0$)

Basis : 1 kg H₂O terevaporasi

$$Q = \Delta U = m\Delta\hat{U} = m(\hat{U}_2 - \hat{U}_1)$$

$$Q = \frac{1 \text{ kg H}_2\text{O} (2506.0 - 35) \text{ kJ}}{\text{kg}} = 2471 \text{ kJ}$$

Soal !

1. Sistem tertutup terdiri dari 3 stage dengan nilai transfer panas masing-masing $Q_1 = +10 \text{ kJ}$, $Q_2 = +30 \text{ kJ}$, dan $Q_3 = -5 \text{ kJ}$. Pada stage pertama $\Delta E = +20 \text{ kJ}$, dan pada stage ketiga $\Delta E = -20 \text{ kJ}$. Berapa kerja di stage kedua, dan berapa besar kerja keluar untuk ketiga stage?
2. Tangki tertutup mengandung 20 lb air, jika 200 Btu ditambahkan ke dalam air, berapa perubahan energi internal di dalam air?
3. Air panas pada suhu 140 °F secara tiba-tiba dicampur dengan air dingin 50 °F menghasilkan air bersuhu 110 °F. Berapa rasio air panas dengan air dengan? (Gunakan *steam table*)

2.2 Neraca Energi untuk Sistem Tertutup dan *Steady-state*

Steady state berarti akumulasi di dalam sistem = 0

Aliran Q dan W konstan

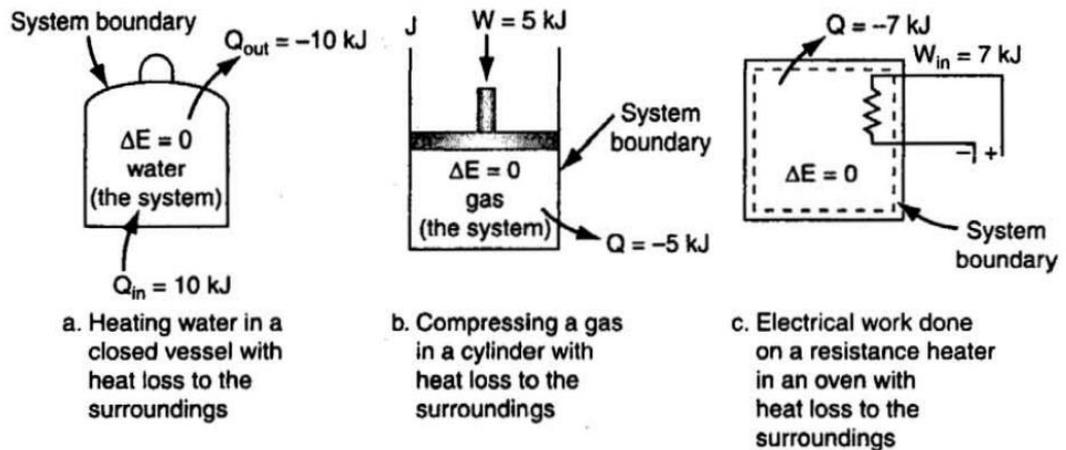
Dalam sistem $\Delta EK = 0$, $\Delta EP = 0$, $\Delta U = 0$, $\Delta E = 0$

$$\text{Sehingga } Q + W = 0 \quad (2.3)$$

Persamaan 2.3 disusun ulang menjadi

$$W = -Q$$

Hal tersebut berarti semua kerja yang dilakukan pada sistem tertutup, *steady-state* akan ditransfer keluar sebagai panas ($-Q$). Akan tetapi tidak terjadi sebaliknya, Q tidak selalu dengan kerja yang dilakukan oleh sistem ($-W$)



Gambar 2.2 Contoh sistem tertutup, *steady-state* dan termasuk perubahan energy

Keterangan gambar :

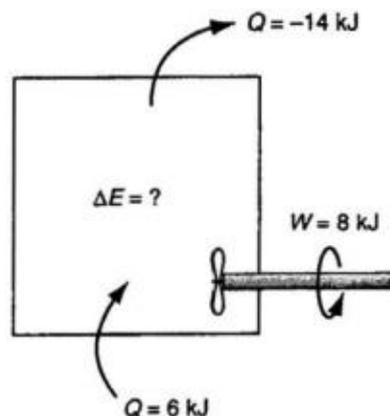
Gambar a : $W = 0$ sehingga $Q = 0$

Gambar b : $W = 5 \text{ kJ}$ sehingga $Q = -5 \text{ kJ}$

Gambar c : $W = 7 \text{ kJ}$ sehingga $Q = -7 \text{ kJ}$

Sehingga dapat disimpulkan bahwa, untuk sistem tertutup, *steady-state* maka persamaan neraca energi adalah persamaan 2.3.

Soal ! Perhatikan gambar S2.1, berapa nilai ΔE ?



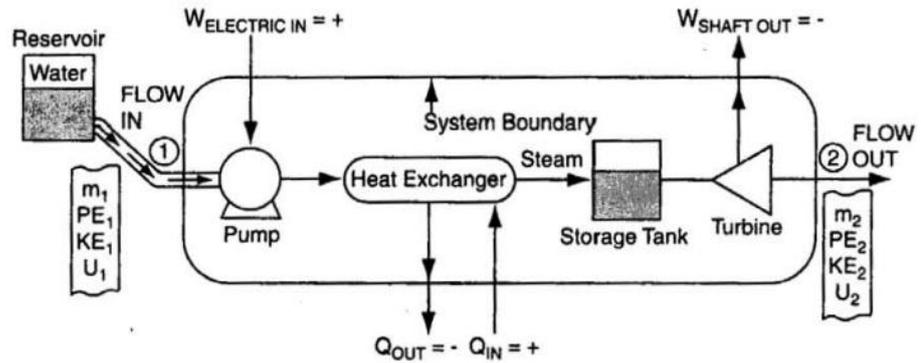
Gambar S2.1

2.3 Neraca Energi untuk Sistem Terbuka dan *Unsteady-state*

Pada sistem terbuka dan *unsteady-state*, akumulasi pada $\Delta E = 0$ pada neraca energi tidak sama dengan 0 karena :

1. Massa di dalam sistem berubah
2. Energi per unit massa di dalam sistem berubah

Kedua-duanya (no 1 dan 2) terjadi



Gambar 2.3 Sistem terbuka dan *unsteady-state*.

Pada gambar 2.3, sistem digambarkan di dalam batas (*boundary*), nomor 1 menunjukkan aliran massa masuk sistem sedangkan nomor 2 menunjukkan aliran massa keluar. Hal yang diperhatikan adalah tidak memperhatikan detail sistem tetapi hanya transfer energi yang masuk ke dalam sistem dan keluar dari sistem.

Neraca energi secara umum :

Akumulasi pada sistem dari t_1 ke t_2 :

$$\Delta E = m_{t_2}(\hat{U} + \hat{EK} + \hat{EP})_{t_2} - m_{t_1}(\hat{U} + \hat{EK} + \hat{EP})_{t_1} \quad (2.4)$$

Transfer energi masuk sistem dari dari t_1 ke t_2 :

$$(\hat{U}_1 + \hat{EK}_1 + \hat{EP}_1)m_1 \quad (2.5)$$

Transfer energi keluar sistem dari dari t_1 ke t_2 :

$$(\hat{U}_2 + \hat{EK}_2 + \hat{EP}_2)m_2 \quad (2.6)$$

Net transfer energi oleh transfer panas masuk dan keluar sistem dari t_1 ke t_2 : Q

Net transfer energi oleh kemiringan, mekanik, kerja elektrik masuk dan keluar sistem dari t_1 ke t_2 : W

Net transfer energi oleh kerja dalam rangka memasukkan dan mengeluarkan massa dari t_1 ke t_2 :

$$p_1 \hat{V}_1 m_1 - p_2 \hat{V}_2 m_2 \quad (2.7)$$

$p_1 \hat{V}_1$ dan $p_2 \hat{V}_2$ disebut kerja pV /energi tekanan/kerja aliran/kerja energi merupakan kerja yang dilakukan oleh lingkungan untuk memasukkan massa suatu bahan ke dalam sistem pada batas nomor 1 di gambar 2.3 dan kerja yang dilakukan oleh sistem kepada lingkungan sebagai satuan massa yang meninggalkan sistem ditunjukkan nomor 2 gambar 2.3.

Maka kerja per unit massa :

$$\hat{W}_1 = \int_0^{\hat{V}_1} p_1 d\hat{V} = p_1(\hat{V}_1 - 0) = p_1 \hat{V}_1 \quad (2.8)$$

Dimana \hat{V} adalah volume per unit massa, maka kerja pada aliran keluar adalah

$$\hat{W}_2 = -p_2 \hat{V}_2 \quad (2.9)$$

Penggabungan persamaan-persamaan di atas menjadi persamaan neraca energi sebagai berikut

$$\Delta E = (\hat{U}_1 + \hat{EK}_1 + \hat{EP}_1)m_1 - (\hat{U}_2 + \hat{EK}_2 + \hat{EP}_2)m_2 + Q + W + p_1 \hat{V}_1 m_1 - p_2 \hat{V}_2 m_2 \quad (2.10)$$

Jika $p_1 \hat{V}_1 m_1 = \hat{U}_2 m_1$ dan $p_2 \hat{V}_2 m_2 = \hat{U}_2 m_2$, maka

$$\Delta E = \left[(\hat{U}_1 + p_1 \hat{V}_1) + \hat{EK}_1 + \hat{EP}_1 \right] m_1 - \left[(\hat{U}_2 + p_2 \hat{V}_2) + \hat{EK}_2 + \hat{EP}_2 \right] m_2 + Q + W \quad (2.11)$$

Memasukkan $\hat{H} = \hat{U} + p\hat{V}$ ke pers. 2.11 sehingga diperoleh

$$\Delta E = (\hat{H}_1 + \hat{EK}_1 + \hat{EP}_1)m_1 - (\hat{H}_2 + \hat{EK}_2 + \hat{EP}_2)m_2 + Q + W \quad (2.12)$$

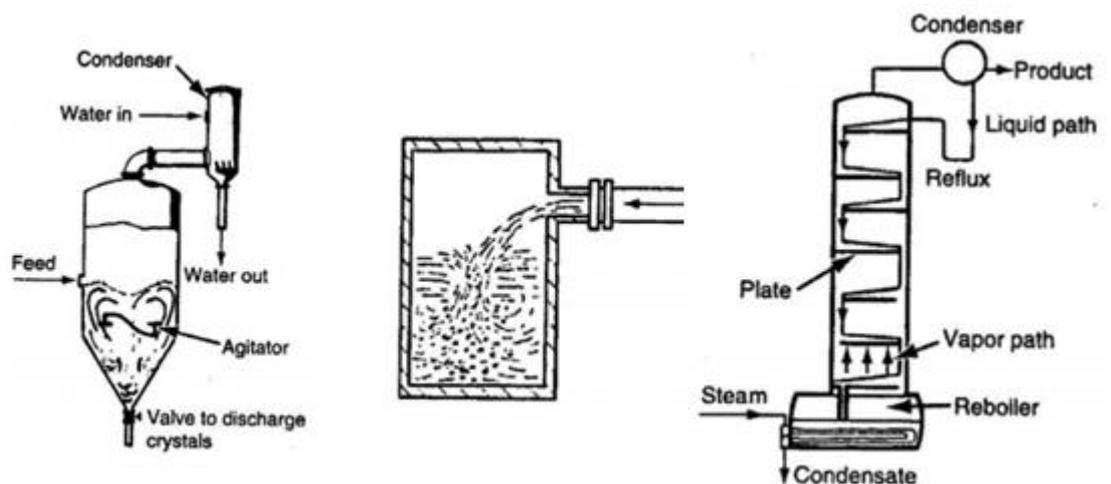
Penulisan sederhana neraca energi untuk memudahkan dalam mengingat ditunjukkan persamaan 2.13

$$\Delta E = E_{t2} - E_{t1} = Q + W - \Delta(H + EK + EP) \quad (2.13)$$

Dimana $\Delta E = E_{t2} - E_{t1} = (U + EK + EP)_t$ adalah keadaan di dalam sistem pada waktu t

Tanda Δ merupakan tanda yang berarti perbedaan, dalam persamaan di atas mempunyai dua arti yaitu :

- $\Delta E, \Delta$ berarti akhir dikurangi awal (waktu)
- $\Delta(H + EK + EP), \Delta$ berarti keluar sistem dikurangi masuk sistem



- a. Kristaliser b. Pengisian tangki c. *Batch distillation*
dengan air

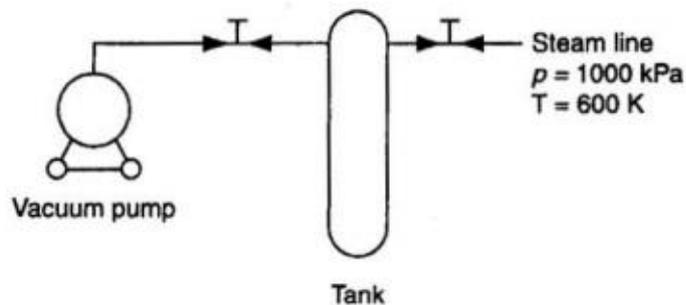
Gambar 2.4 Contoh sistem terbuka dan *unsteady-state*

Contoh 2.2 Penggunaan neraca energi umum untuk analisis sistem terbuka dan *unsteady-state*

Tangki yang keras terisolasi sempurna dihubungkan ke 2 valve. Hanya satu *valve* yang menuju aliran *steam* dimana kondisi *steam* pada $P = 1000 \text{ kPa}$ dan $T = 600 \text{ K}$, sedangkan *valve* yang lain menuju ke pompa vakum. Kedua *valve* awalnya dalam keadaan tertutup. Kemudian *valve* yang mengarah ke pompa vakum dibuka, lalu tangki dikosongkan, setelah itu *valve* kembali ditutup. Berikutnya *valve* menuju ke aliran *steam* dibuka sehingga *steam* masuk dengan pelan ke dalam tangki yang telah dikosongkan sampai tekanan di dalam tangki sama dengan tekanan pada aliran *steam*. Hitung suhu akhir *steam* di dalam tangki.

Penyelesaian :

Gambar sistem



Gambar C.2.2

Pertama, menentukan bahwa tangki sebagai sistem, sistem terbuka dan *unsteady-state* (massa di dalam sistem bertambah)

Basis 1 kg

Properti *steam* pada $P = 1000$ kPa dan $T = 600$ K adalah $\hat{U} = 2837.73$ kJ/kg,

$\hat{H} = 3109.44$ kJ/kg, dan $\hat{V} = 0.271$ m³/kg

Menuliskan persamaan umum neraca energi sesuai pers. 2.13

$$\Delta E = E_{t2} - E_{t1} = Q + W - \Delta(H + EK + EP) \quad (a)$$

Asumsi untuk menyederhanakan persamaan :

1. Tidak terjadi perubahan di dalam sistem untuk EP dan EK, sehingga $\Delta E = \Delta U$
2. Tidak ada kerja yang dilakukan dari atau ke sistem karena tangki keras sehingga $W = 0$
3. Tidak ada panas yang ditransfer dari atau ke sistem karena tangki terisolasi sempurna sehingga $Q = 0$
4. ΔEK dan ΔEP untuk *steam* yang masuk = 0
5. Tidak ada aliran keluar sistem sehingga $H_{\text{keluar}} = 0$
6. Pada awalnya tidak ada massa di dalam sistem sehingga $U_{t1} = 0$

Sehingga persamaan (a) menjadi $U_{t2} - 0 = -(H_{\text{keluar}} - H_{\text{masuk}})$ atau

$$\Delta U = U_{t2} = m_{\text{masuk}} \hat{U}_{t2} = -H_{\text{masuk}} = -m_{\text{masuk}} \hat{H}_{\text{masuk}} \quad (b)$$

Untuk mengetahui suhu akhir di dalam tangki, maka minimal harus diketahui 2 properti. Pada persoalan disebutkan satu keadaan dimana tekanannya sama dengan tekanan di *steam* yaitu 1000 kPa

Maka properti yang lain yang dapat dicari bukan T maupun \hat{V} tetapi \hat{U}_{t2} karena

$$\hat{U}_{t2} = \hat{H}_{\text{masuk}} = 3109.44 \text{ kJ/kg}$$

Sehingga dengan interpolasi di *steam table* dengan $p = 1000$ kPa diperoleh nilai $T = 764$ K.

Jika terdapat lebih dari satu aliran masuk dan keluar, maka persamaan umum neraca energi yang digunakan adalah

$$\Delta E = E_{t2} - E_{t1} = \sum_{\substack{\text{aliran masuk} \\ i=1}}^M m_i (\hat{H}_i + \hat{EK}_i + \hat{EP}_i) - \sum_{\substack{\text{aliran keluar} \\ i=1}}^N m_o (\hat{H}_o + \hat{EK}_o + \hat{EP}_o) + Q + W \quad (2.14)$$

Dimana $E_t = (U + EK + EP)_t$ adalah keadaan di dalam sistem

M = nomor aliran masuk

N = nomor aliran keluar

i = aliran masuk

o = aliran keluar

Soal !

- Sederhanakan persamaan umum neraca energi (pers.2.13) untuk keadaan sebagai berikut :
 - Tidak ada bagian yang berpindah pada sistem
 - Suhu di dalam sistem sama dengan suhu di lingkungan
 - Kecepatan fluida masuk ke sistem sama dengan kecepatan fluida keluar sistem
 - Fluida keluar sistem dengan kecepatan yang cukup sehingga keluaran dapat mencapai 3 meter
- Tangki di stasiun mengandung udara 100 kPa dan 300 K diisi udara dengan kompresor dengan tekanan 300 kPa dan suhu 400 K ke dalam tangki. Setelah 1 kg udara dipompakan ke dalam tangki, tekanan di dalam tangki mencapai 300 kPa dan suhu 400 K. Berapa banyak panas yang ditambahkan atau dibuang dari tangki selama pengisian
Data properti udara :

P dan T	\hat{H} (kJ/kg)	\hat{U} (kJ/kg)	\hat{V} (kJ/kg)
100 kPa dan 300 K	459.85	337.75	0.8497
300 kPa dan 400 K	560.51	445.61	0.3830

2.4 Neraca Energi untuk Sistem Terbuka dan *Steady-state*

Kebanyakan proses *refining* dan industri kimia merupakan sistem terbuka dan *steady-state* karena proses produksi sistem kontinu untuk menghasilkan produk dalam jumlah besar lebih menguntungkan secara ekonomi.

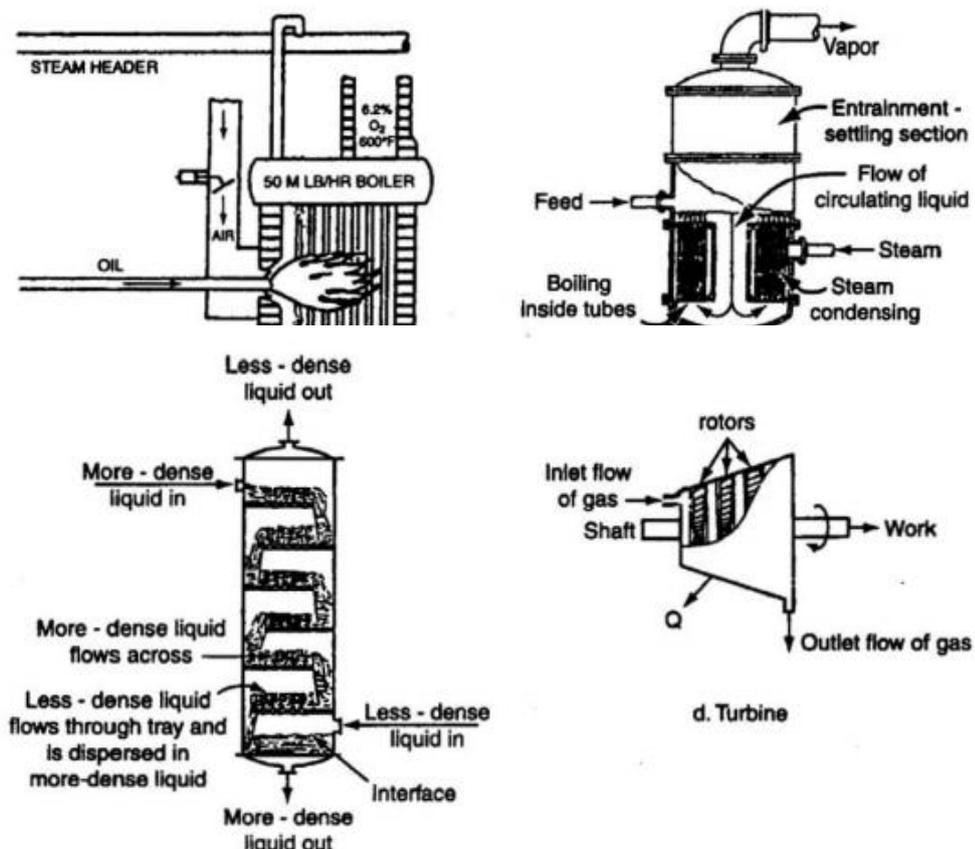
Steady state, $\Delta E = 0$ sehingga persamaan 2.13 menjadi

$$Q + W = \Delta(H + EP + EK) \quad (2.15)$$

ΔEP dan ΔEK bisa diabaikan karena istilah energi pada neraca energi pada kebanyakan proses terbuka didominasi Q , W , dan ΔH sedangkan ΔEP dan ΔEK jarang digunakan.

Sehingga persamaan **paling umum** untuk sistem terbuka dan *unsteady-state* adalah

$$Q + W = \Delta H \quad (2.16)$$

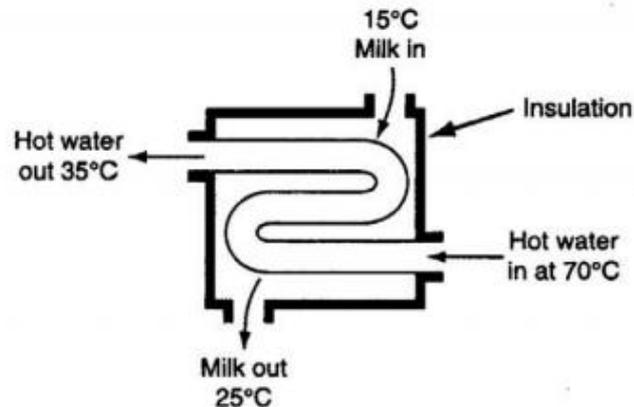


Gambar 2.5 Contoh sistem terbuka dan *steady-state*

Contoh 2.3 Aplikasi neraca energi pada sistem terbuka dan *steady-state* yaitu penukar panas (*heat exchanger*)

Susu (sifat dasar seperti air) dipanaskan dari 15 °C menjadi 25 °C dengan air panas suhu 70 °C dan menjadi 35 °C seperti gambar di bawah ini. Asumsi apa yang dapat Anda ambil untuk menyederhanakan persamaan 2.15 dan berapa rate aliran air dalam kg/menit per kg/ menit susu?

Penyelesaian :



Gambar C2.3

Menetapkan susu plus air di dalam tangki sebagai sistem.

Asumsi untuk persamaan 2.15 :

1. ΔEP dan ΔEK bernilai 0
2. $Q = 0$
3. $W = 0$

Sehingga persamaan 2.15 menjadi $\Delta H = 0$

(a)

Properti air

$T (^{\circ}\text{C})$	$\hat{\Delta H}$ (kJ/kg)
15	62.01
25	103.86
35	146.69
70	293.10

Basis = 1 menit atau berarti 1 kg susu, maka

$$\frac{H_{keluar}}{\left[(1) \hat{H}_{susu, 25^{\circ}\text{C}} + (m) \hat{H}_{susu, 35^{\circ}\text{C}} \right]} - \frac{H_{masuk}}{\left[(1) \hat{H}_{susu, 25^{\circ}\text{C}} + (m) \hat{H}_{susu, 70^{\circ}\text{C}} \right]} = 0$$

(b)

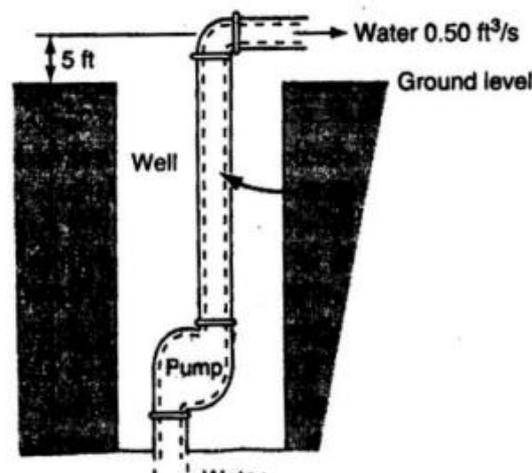
$$[103.86 + (m) 146.69] - [62.01 + (m) 293.10] = 0$$

$$m = \frac{41.85}{146.41} = (0.29 \text{ kg air panas/menit}) / (\text{kg susu/menit})$$

Contoh 2.4 Perhitungan Power untuk Memompa Air pada Sistem Terbuka dan *Steady-state*

Air dipompa dari sumur dengan kedalaman 20 ft di bawah permukaan tanah seperti ditunjukkan pada gambar C2.4. Air keluar dengan rate 0.50 ft³ menuju pipa yang berada di atas permukaan tanah. Asumsikan bahwa tidak terjadi transfer panas yang terjadi dari air selama mengalir. Hitung kerja elektrik yang diperlukan untuk memompa jika efisiensi 100% serta friksi di dalam pipa dan pompa diabaikan.

Penyelesaian :



Gambar C2.4

Sistem : pipa sepanjang dari sumur hingga ke keluaran pipa (5 ft di atas permukaan tanah)

Asumsi :

- 1) $Q = 0$ (Asumsi yang diutarakan di soal)
- 2) $\Delta EK \cong 0$ (Perubahan energi kinetik diabaikan)
- 3) Suhu air di dalam sumur sama dengan suhu air saat keluar (suhu 50 °F)

Maka persamaan 2.15 dapat di susun ulang menjadi

$$W = \Delta EP = mg(h_{out} - h_{in})$$

Basis laju alir massa dalam 1 detik (pada suhu 50 °F) :

$$\frac{0.50 \text{ ft}^3}{s} \left| \frac{62.4 \text{ lb}_m}{\text{ft}^3} \right. = 31.3 \text{ lb}_m \text{ air/detik}$$

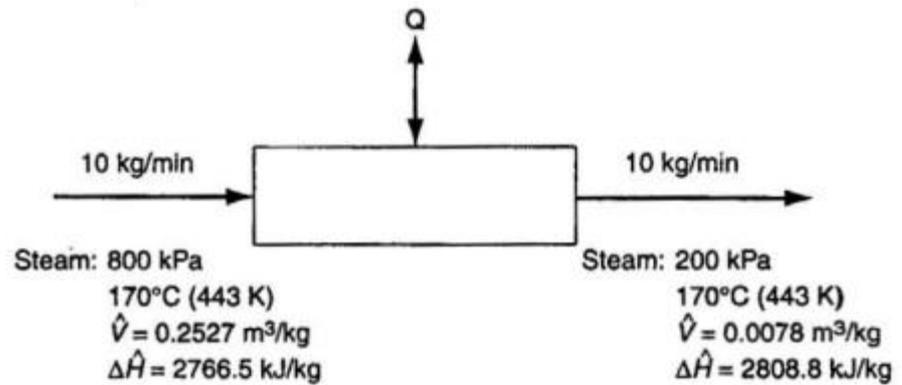
$$\begin{aligned} W &= PE_{out} - PE_{in} \\ &= \frac{31.3 \text{ lb}_m H_2O}{s} \left| \frac{32.2 \text{ ft}}{s^2} \right| \frac{25 \text{ ft}}{25 \text{ ft}} \left| \frac{(s^2)(\text{lb}_f)}{32.2 (\text{ft})(\text{lb}_m)} \right| \frac{1.055 (\text{kW})(s^2)}{778.2 (\text{ft})(\text{lb}_f)} = 1.06 \text{ kW} (1.42 \text{ hp}) \end{aligned}$$

Soal !

1. Boiler mengkonversi air menjadi *steam* dengan mengalirkan air melalui tube yang dipanaskan dengan gas panas atau liquid lain. Tekanan dan laju alir air di dalam tube dimaintain dengan menggunakan regulator. Pada

sistem boiler, sederhanakan persamaan umum neraca energi semaksimal mungkin dengan mempertimbangkan asumsi-asumsi yang digunakan.

2. Hitung Q untuk sistem pada gambar S2.1 di bawah ini



Gambar S2.1

3. Turbin uap berkapasitas 13 MW beroperasi dalam kondisi *steady state* menggunakan 20 kg/s uap. Kondisi *inlet* uap adalah tekanan 3000 kPa dan suhu 450 °C. Kondisi *outlet* 500 kPa, *saturated vapor*. Kecepatan uap masuk sebesar 250 m/s dan kecepatan uap keluar adalah 40 m/s. Berapa transfer panas dalam kW untuk turben sebagai sistem?