

Diktat Neraca Energi

Jurusan Teknik Kimia Untirta

Sri Agustina, ST., MT., ME., PhD

Agustus 2021

Mata Kuliah Neraca Massa dan Energi

HALAMAN PENGESAHAN

PENULISAN BUKU AJAR

Judul Buku Ajar : Diktat Neraca Energi

Kode>Nama Rumpun Ilmu : Teknik Kimia

Penulis

Nama Lengkap : Sri Agustina, ST., MT., ME., PhD

NIDN : 0014087904

Jabatan Fungsional : Lektor

Program Studi : Teknik Kimia

Nomor HP : 085939353088

Alamat surel (e-mail) : sriagustina@untirta.ac.id

Cilegon, Agustus 2021

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Kimia



Dr. Jayanudin, ST., M. Eng
NIP. 197808112005011003

Penulis



Sri Agustina, ST., MT., ME., PhD
NIP. 197908142003122003

Menyetujui,
Dekan Fakultas Teknik



Prof. Dr. -Ing. H. Asep Ridwan, ST., MT., IPM
NIP. 197603022003121003

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke Allah SWT, atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga buku ajar untuk mata kuliah Neraca Massa dan Energi ini dapat diselesaikan.

Buku ini dibuat dengan tujuan untuk memberi pengetahuan dan informasi mengenai dasar-dasar dan konsep mengenai neraca energi dalam sistem proses kimia, mulai dari tahap penyusunan model matematis hingga aplikasinya. Selain itu, buku ini dipersiapkan untuk menunjang sarana pembelajaran mahasiswa, sebagai langkah awal terciptanya kesuksesan proses belajar mengajar di lingkungan dalam dan luar kampus. Semoga buku ini dapat memberi pemahaman yang baik kepada para pembaca, mengenai Neraca Energi.

Akhir kata penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penulisan buku ini. Kritik dan saran sangat kami harapkan untuk perbaikan buku ini di masa yang akan datang.

Cilegon, Agustus 2021

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
PENULISAN BUKU AJAR.....	i
KATA PENGANTAR	ii
BAB I	1
ENERGI DAN NERACA ENERGI.....	1
BAB II.....	20
NERACA ENERGI PADA PROSES NON REAKTIF.....	20
BAB III	35
NERACA ENERGI PADA PROSES REAKTIF	35
SOAL LATIHAN.....	43
DAFTAR PUSTAKA	47

BAB I

ENERGI DAN NERACA ENERGI

1.1 BENTUK-BENTUK ENERGI : HUKUM I TERMODINAMIKA

Energi total pada suatu sistem terdiri dari 3 komponen, yaitu :

1. Energi kinetik, adalah energi yang berhubungan dengan pergerakan sistem terhadap suatu acuan tertentu (biasanya adalah permukaan bumi).
2. Energi potensial, adalah energi yang berhubungan dengan posisi sistem terhadap permukaan referensi.
3. Energi dalam, adalah energi yang berhubungan dengan pergerakan relatif molekul terhadap pusat massa sistem, dan pengukuran makroskopik dari energi atomik dan sub atomik.

Pada suatu sistem tertutup, saat proses berlangsung tidak terjadi perpindahan massa melalui batas sistem. Energi dapat dipindahkan antara sistem dan sekitarnya melalui 2 cara yaitu :

1. Sebagai panas, atau energi yang mengalir sebagai hasil dari perbedaan temperatur antara sistem dan lingkungannya. Arah aliran panas selalu dari temperatur tinggi ke temperatur rendah. Panas didefinisikan positif bila dipindahkan dari lingkungan ke sistem.
2. Sebagai kerja, atau energi yang mengalir sebagai respon dari daya penggerak selain perbedaan temperatur. Sama dengan panas, kerja didefinisikan positif jika dikerjakan pada sistem.

Pada prinsipnya perhitungan neraca energi merupakan pernyataan hukum konservasi energi, yaitu bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Hukum ini disebut juga sebagai hukum I termodinamika. Secara umum hukum I ini menyatakan bahwa laju energi (kinetik + potensial + internal) masuk ke dalam sistem melalui aliran masuk, ditambah energi yang masuk sebagai panas dan kerja dikurangi laju energi keluar sistem melalui aliran keluar sama dengan laju energi akumulasi sistem (akumulasi = input – output).

1.2 ENERGI KINETIK DAN POTENSIAL

Energi kinetik adalah energi yang dimiliki suatu sistem karena kecepatannya relatif terhadap sekitarnya. Dinyatakan dalam persamaan :

$$E_k = \frac{mv^2}{2g_c} \quad (1)$$

Energi potensial adalah energi yang dimiliki oleh sistem karena gaya yang didesakkan pada massaya oleh medan gravitasi relatif terhadap permukaan referensi. Dinyatakan dalam persamaan :

$$E_p = m \frac{g}{g_c} z \quad (2)$$

g_c adalah faktor konversi yang nilainya :

$$g_c \equiv 1 \frac{kg \cdot m/s^2}{N} = 1 \frac{g \cdot cm/s^2}{dyne} = 32.174 \frac{lb_m \cdot ft/s^2}{lb_f}$$

Contoh soal :

1.2-1 Air mengalir masuk ke unit proses melalui pipa dengan ID 2 cm, pada kecepatan $2 \text{ m}^3/\text{jam}$. Hitung E_k untuk aliran tersebut dalam J/det.

Penyelesaian :

Kecepatan linear air :

$$v = \left(2 \frac{\text{m}^3}{\text{jam}}\right) \times \left(100^2 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^2}\right) \times \left(\frac{1}{\pi(1) \text{ cm}^2}\right) \times \left(\frac{1 \text{ jam}}{3600 \text{ detik}}\right) = 1.77 \text{ m/detik}$$

$$\text{Laju alir massa : } m = (2 \text{ m}^3/\text{jam}) \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times \left(\frac{1 \text{ jam}}{3600 \text{ detik}}\right) = 0.556 \text{ kg/det}$$

Dari persamaan (1) :

$$\begin{aligned} E_k &= \left(\frac{(0.556 \text{ kg/det})}{2}\right) \times \left(\frac{(1.77)^2 \text{ m}^2}{\text{s}^2}\right) \times \left(\frac{1 \text{ N}}{\text{kg} \cdot \text{m/det}^2}\right) = 0.870 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{det}} \\ &= 0.870 \text{ J/det} \end{aligned}$$

1.2-2 Minyak mentah dipompakan pada kecepatan 15 kg/det dari kedalaman 220 m ke tangki penyimpanan dengan ketinggian 20 m diatas permukaan tanah. Hitung laju kenaikan energi potensial.

Penyelesaian :

$$\Delta z = z_{\text{akhir}} - z_{\text{awal}} = 240 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \Delta E_p &= m \frac{g}{gc} \Delta z = (15 \text{ kg/det}) \times (9.81 \text{ N/kg}) \times 240 \text{ m} = 35300 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{det}} \\ &= 35300 \text{ J/s} \end{aligned}$$

1.3 NERACA ENERGI PADA SISTEM TERTUTUP

Pada sistem tertutup, tidak terjadi transfer massa antar batas sistem selama proses berlangsung. Sistem proses *batch* termasuk sistem tertutup, sedangkan sistem proses *semibatch* dan kontinu termasuk kepada sistem terbuka.

Persamaan neraca umum dinyatakan sebagai :

$$\text{Akumulasi} = \text{input} - \text{output} \quad (3)$$

Akumulasi merupakan selisih nilai komponen akhir dikurangi nilai komponen awal.

Sehingga untuk neraca energi, persamaan akan menjadi :

$$\begin{aligned} \text{Energi akhir sistem} - \text{energi awal sistem} &= \text{jumlah energi yang} & (4) \\ &\text{dipindahkan ke sistem} \\ &(\text{in} - \text{out}) \end{aligned}$$

Dimana,

$$\text{Energi awal sistem} = U_i + E_{ki} + E_{pi}$$

$$\text{Energi akhir sistem} = U_f + E_{kf} + E_{pf}$$

$$\text{Energi yang dipindahkan} = Q + W$$

Persamaan (3) menjadi :

$$(U_f - U_i) + (E_{kf} - E_{ki}) + (E_{pf} - E_{pi}) = Q + W \quad (5)$$

Atau

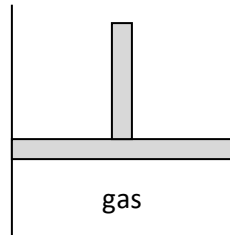
$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W \quad (6)$$

Beberapa asumsi yang digunakan untuk perhitungan neraca energi pada sistem tertutup :

1. Energi dalam sistem tergantung pada komposisi kimia, agregasi keadaan, dan temperatur material sistem. Bersifat independent terhadap tekanan untuk gas ideal, hampir sama untuk komponen cairan dan padatan. Bila tidak terdapat perubahan pada temperatur, fasa atau komposisi kimia pada proses, maka $\Delta U \approx 0$.
2. Jika sistem dan lingkungan berada pada level temperatur yang sama, maka $Q = 0$ (sistem adiabatik).
3. Jika tidak ada perpindahan sistem secara keseluruhan, maka $W = 0$.
4. Jika terjadi perubahan energi potensial, dimana terjadi perubahan posisi ketinggian sistem terhadap permukaan referensi, maka nilai ΔE_p harus dimasukkan ke dalam perhitungan neraca energi.

Contoh soal :

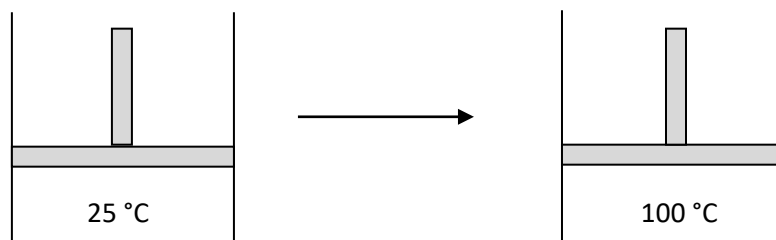
1.3-1 Suatu gas terdapat dalam silinder tertutup dengan piston yang dapat bergerak.



Suhu awal gas adalah 25 °C.

Silinder kemudian diletakkan pada air mendidih dengan posisi piston tetap. Panas sebesar 2 *kcal* diabsorpsi oleh gas, hingga mencapai kesetimbangan pada suhu 100 °C (dan tekanan yang lebih tinggi). Piston kemudian dilepaskan, dan gas melakukan kerja sebesar 100 J untuk memindahkan piston pada posisi yang baru. Temperatur akhir gas adalah 100 °C. Hitung neraca energi untuk tiap proses yang terjadi pada gas dalam silinder tersebut, dengan mengabaikan perubahan energi potensial dan asumsi gas ideal.

Penyelesaian :



Proses I :

Dari pers. (6) : $\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W$

- $\Delta E_k = 0$ (sistem tetap)
- $\Delta E_p = 0$ (tidak terjadi perpindahan secara vertikal)

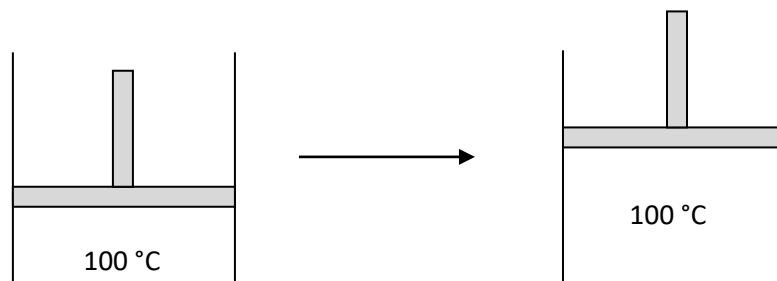
- $W = 0$ (batasan sistem tetap)

$$\rightarrow \Delta U = Q$$

$$Q = 2 \text{ kcal}$$

$$\Delta U = (2 \text{ kcal}) \times (10^3 \text{ cal/kcal}) \times \left(\frac{1 \text{ J}}{0.23901 \text{ cal}} \right) = 8368 \text{ J}$$

Proses II :



$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W$$

- $\Delta E_k = 0$ (sistem tetap pada awal dan akhir proses)
- $\Delta E_p = 0$ (asumsi diabaikan)
- $\Delta U = 0$ (nilai U tergantung pada T untuk gas ideal, dan T tidak berubah)

$$\rightarrow 0 = Q + W$$

$$W = -100 \text{ J}$$

$$\text{Maka, } Q = 100 \text{ J}$$

1.4 NERACA ENERGI PADA SISTEM TERBUKA (*STEADY STATE*)

Sistem terbuka didefinisikan sebagai sistem dimana terjadi aliran keluar-masuk sistem selama suatu proses berlangsung.

a. *Flow work* dan *shaft work*

Kerja total pada sistem oleh lingkungan dinyatakan dalam persamaan :

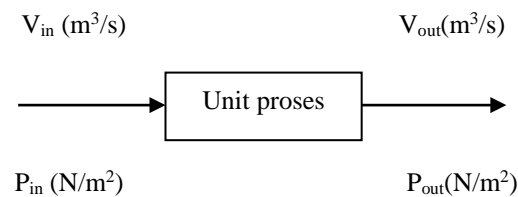
$$W = W_s + W_f \quad (7)$$

Dimana :

$W_s = \textit{shaft work}$, atau kerja yang dilakukan pada fluida proses oleh gerak variabel sistem

$W_f = \textit{flow work}$, atau kerja yang dilakukan pada fluida proses masuk ke sistem dikurangi masuk ke sistem dikurangi kerja fluida proses keluar sistem

Pada suatu sistem proses :



Fluida pada tekanan P_{in} (N/m^2) mengalir ke dalam pipa dengan kecepatan volumetrik V_{in} (m^3/s) dan keluar pipa pada tekanan P_{out} (N/m^2) dan kecepatan V_{out} (m^3/s). Fluida mengalir ke dalam pipa dengan kerja sebesar :

$$W_{in} (\text{N.m/s}) = P_{in} (\text{N/m}^2) \cdot V_{in} (\text{m}^3/\text{s}) \quad (8)$$

Sementara besar kerja yang keluar sistem pipa bersama fluida :

$$W_{out} = P_{out} \cdot V_{out} \quad (9)$$

Total kerja (*flow work*) pada sistem :

$$W_f = P_{in} \cdot V_{in} - P_{out} \cdot V_{out} \quad (10)$$

b. Sifat Spesifik : entalpi

Sifat ekstensif (*extensive property*) : sifat yang nilainya bergantung pada jumlah atau kuantitas variabel sistem. Contohnya massa, volum.

Sifat intensif (*intensive property*) : sifat yang nilainya tidak bergantung pada jumlah atau kuantitas variabel sistem. Contohnya tekanan, temperatur, densitas.

Sifat spesifik suatu variabel sistem merupakan suatu sifat intensif yang diperoleh berdasarkan nilai atau kuantitas ekstensif variabel dibagi jumlah total (laju alir) variabel.

Misalkan : volum suatu cairan 200 cm³ dan massa cairan 200 g. Maka volum spesifik fluida adalah 1 cm³/g.

Simbol $\hat{}$ biasanya digunakan untuk menuliskan notasi sifat spesifik variabel sistem.

Entalpi spesifik merupakan sifat variabel sistem yang terdapat pada persamaan neraca energi untuk sistem terbuka.

Dinyatakan dalam persamaan :

$$\hat{H} = \hat{U} + P\hat{V} \quad (11)$$

Dimana,

P = tekanan total sistem

\hat{U} = energi dalam spesifik

\hat{V} = volum spesifik

Contoh soal

1.4-1 Energi dalam spesifik helium pada 300 K dan 1 atm adalah 3800 J/mol, dan volume molar spesifiknya adalah 24.63 liter/mol. Hitung entalpi spesifik helium pada kondisi tersebut, dan entalpi yang dibawa oleh aliran helium yang laju molarnya 250 kmol/jam.

Penyelesaian :

$$\hat{H} = \hat{U} + P\hat{V} = 3800 \frac{J}{mol} + (1 \text{ atm})(24.63 \text{ liter/mol})$$

Untuk mengkonversi satuan ke dalam *joules*, maka diperlukan faktor konversi (J/liter.atm). Dari konstanta gas ideal,

$$0.08206 \text{ liter.atm/mol.K} = 8.314 \text{ J/mol.K}$$

Bila sisi kanan dibagi sisi kiri :

$$\frac{8.314 \frac{J}{mol.K}}{0.08206 \text{ liter} \cdot \frac{atm}{mol.K}} = 101.3 \frac{J}{\text{liter}} \cdot atm$$

Maka,

$$\hat{H} = 3800 \frac{J}{mol} + \left(\frac{24.63 \text{ liter.atm}}{mol} \times \frac{101.3 \text{ J}}{\text{liter.atm}} \right) = 6295 \text{ J/mol}$$

Bila $n = 250 \text{ kmol/jam}$,

$$H = n \cdot \hat{H} = (250 \text{ kmol/jam}) \times (10^3 \text{ mol/kmol}) \times (6295 \text{ J/mol}) = 1.57 \times 10^9 \text{ J/jam}$$

c. Perhitungan Neraca Energi

Hukum I termodinamika untuk sistem tertutup pada kondisi tunak dinyatakan sebagai,

$$\mathbf{Input = Output}$$

“**Input**” menyatakan jumlah energi total yang masuk ke sistem dan laju energi yang dipindahkan dalam bentuk panas dan kerja. Sedangkan “**output**” menyatakan jumlah energi total yang keluar dari sistem.

Dalam bentuk persamaan dinyatakan sebagai :

$$Q + W + \sum_{stream}^{input} E_j = \sum_{stream}^{output} E_j \quad (12)$$

$$\sum_{stream}^{output} E_j - \sum_{stream}^{input} E_j = Q + W \quad (13)$$

Jika : m_j , E_{kj} , E_{pj} , dan U_j adalah laju alir massa, energi kinetik, energi potensial, dan energi dalam komponen j sistem, maka :

$$E_j = U_j + E_{kj} + E_{pj} \quad (14)$$

$U_j = m_j \hat{U}$ $E_{kj} = m_j v_j^2 / 2g_c$ $E_{pj} = m_j \left(\frac{g}{g_c} \right) z_j$

$$E_j = m_j \left(\hat{U}_j + \frac{v_j^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z_j \right) \quad (15)$$

Total kerja pada sistem : $W = W_s + W_f$

Jika V_j adalah laju volumetrik dan P_j adalah tekanan aliran, maka :

$$W_f = \sum_{stream}^{input} P_j V_j - \sum_{stream}^{output} P_j V_j \quad (16)$$

$V_j = m_j \hat{V}_j$

$$W = W_s + \sum_{stream}^{input} m_j P_j V_j - \sum_{stream}^{output} m_j P_j V_j \quad (17)$$

Substitusi nilai E_j dan W :

$$\sum_{stream}^{output} m_j \left[\hat{U}_j + (P_j \hat{V}_j) + \frac{v_j^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z_j \right] - \sum_{stream}^{input} m_j \left[\hat{U}_j + (P_j \hat{V}_j) + \frac{v_j^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z_j \right] = Q + W_s$$

Jika $\hat{H}_j = \hat{U}_j + (P_j \hat{V}_j)$:

$$\sum_{stream}^{output} m_j \left(\hat{H}_j + \frac{v_j^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z_j \right) - \sum_{stream}^{input} m_j \left(\hat{H}_j + \frac{v_j^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c} z_j \right) = Q + W_s \quad (18)$$

Disederhanakan :

$$\sum_{stream}^{output} m_j \hat{H}_j - \sum_{stream}^{input} m_j \hat{H}_j = \Delta H \quad (19)$$

$$\sum_{stream}^{output} m_j \frac{v_j^2}{2g_c} - \sum_{stream}^{input} m_j \frac{v_j^2}{2g_c} = \Delta E_k \quad (20)$$

$$\sum_{stream}^{output} m_j \left(\frac{g}{g_c} z_j \right) - \sum_{stream}^{input} m_j \left(\frac{g}{g_c} z_j \right) = \Delta E_p \quad (21)$$

$$\boxed{\Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W} \quad (22)$$

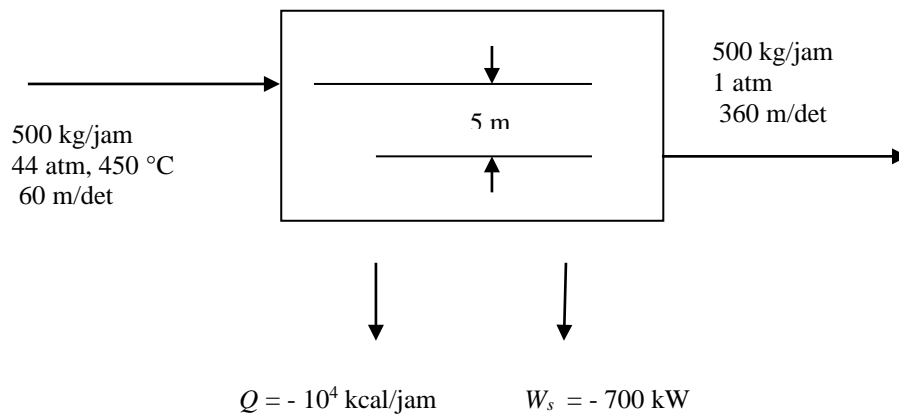
Jika pada suatu proses hanya terdapat satu aliran masuk dan satu aliran keluar, serta tidak terdapat akumulasi massa total sistem ($n_{in} = n_{out} = n$), ΔH akan dinyatakan sebagai :

$$\Delta H = n(\hat{H}_{out} - \hat{H}_{in}) = n\Delta\hat{H} \quad (23)$$

Contoh soal

1.4-2 Lima ratus kg per jam *steam* menggerakkan sebuah turbin. *Steam* mengalir ke turbin pada tekanan 44 atm dan temperatur 450 °C pada kecepatan linear 60 m/detik dan keluar pada titik 5 m dibawah titik masuk dengan kondisi tekanan atmosferik serta kecepatan 360 m/detik. Turbin menghasilkan *shaft work* sebesar 700 kW. Panas yang hilang dari turbin diperkirakan sebesar 10^4 kcal/jam. Hitung perubahan entalpi spesifik pada proses tersebut.

Penyelesaian :



Dari pers. (22)

$$\Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W$$

Untuk menentukan ΔH maka dikonversi terlebih dahulu tiap variabel ke bentuk kW (kJ/detik), dengan menggunakan faktor konversi, dimana $m = (500/3600) = 0.139$ kg/detik.

$$\Delta E_k = \frac{m}{2g_c} (v_2^2 - v_1^2) = \left(\frac{0.139 \text{ kg/det}}{2} \right) \times \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg.m/det}} \right) \times \left(\frac{(360^2 - 60^2) \text{ m}^2}{\text{s}^2} \right) \\ \times \left(\frac{1 \text{ W}}{1 \text{ N.m/det}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ kW}}{10^3 \text{ W}} \right) = 8.75 \text{ kW}$$

$$\Delta E_p = \frac{mg}{g_c} (z_2 - z_1) \\ = (0.139 \text{ kg/det}) \times (9.81 \text{ N/kg}) \times (-5 \text{ m}) \times \left(\frac{1 \text{ kW}}{10^3 \text{ N.m/det}} \right) \\ = -6.81 \times 10^{-3} \text{ kW}$$

$$Q = (-10^4 \text{ kcal/jam}) \times \left(\frac{1 \text{ J}}{0.239 \times 10^{-3} \text{ kcal}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ jam}}{3600 \text{ det}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ kW}}{10^3 \text{ J/det}} \right) = -11.6 \text{ kW}$$

$$W_s = -700 \text{ kW}$$

$$\Delta H = Q + W_s - \Delta E_k - \Delta E_p = -720 \text{ kW}$$

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

$$\hat{H}_2 - \hat{H}_1 = \frac{\Delta H}{m} = \frac{-720 \text{ kW}}{0.139 \text{ kg/detik}} = -5180 \text{ kJ/kg}$$

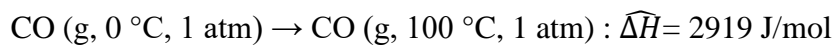
1.5 TABEL DATA TERMODINAMIKA

A. Kondisi referensi dan sifat keadaan

Dalam suatu proses, tidak dapat ditentukan nilai absolut \hat{U} untuk suatu material proses. Namun dapat dihitung perubahan \hat{U} terkait dengan perubahan spesifik kondisi proses (temperatur, tekanan, dan fasa). Hal ini dapat dilakukan dengan mengetahui jumlah massa, m , material yang mengalami perubahan kondisi proses spesifik dalam perhitungan neraca energi kecuali ΔU (misalnya perubahan energi potensial, kinetik,

kerja, dan panas). Bila $\Delta \hat{U}$ dapat ditentukan, maka nilai $\Delta \hat{H}$ dapat dihitung sebagai $\hat{U} + P\hat{V}$.

Cara yang biasa digunakan untuk mengukur perubahan pada \hat{U} atau \hat{H} adalah dengan memilih temperatur, tekanan dan kondisi awal sebagai kondisi referensi, dan kemudian mengurutkan perubahan $\Delta \hat{U}$ dan $\Delta \hat{H}$ dari kondisi awal ke kondisi selanjutnya. Sebagai contoh, perubahan entalpi untuk karbon monoksida dari kondisi referensi 0 °C dan 1 atm ke kondisi terukur lainnya adalah :



Karena \hat{H} tidak dapat ditentukan secara absolut, maka untuk memudahkan kita tetapkan nilai $\hat{H}_0 = 0$ untuk kondisi referensi, maka $\Delta \hat{H}_1 = \hat{H}_1 - 0 = \hat{H}_1$, $\Delta \hat{H}_2 = \hat{H}_2$, dan seterusnya.

Dari hasil perhitungan ini dapat disimpulkan bahwa \hat{U} dan \hat{H} merupakan sifat keadaan, yaitu sifat dari suatu komponen sistem yang nilainya tergantung hanya pada kondisi sistem (temperatur, tekanan, fasa, dan komposisi material sistem), tidak pada bagaimana sistem tersebut mencapai kondisi akhirnya.

Contoh soal

1.5–1 Data dibawah ini merupakan tabel data untuk uap jenuh metil klorida.

Kondisi	T (°F)	P (psia)	\hat{V} (ft ³ /lbm)	\hat{H} (Btu/lbm)
Cair	- 40	6.878	0.01553	0.000
Uap	0	18.90	4.969	196.23
Uap	50	51.99	1.920	202.28

1. Kondisi referensi mana yang kita gunakan untuk menghitung entalpi metil klorida tersebut ?

2. Hitung $\Delta\hat{H}$ dan $\Delta\hat{U}$ untuk proses saturasi metil klorida dari 50 °F ke 0 °F.

Penyelesaian :

1. Cairan pada – 40 °F dan 6.878 psia (kondisi pada saat $\hat{H} = 0$).
2. $\Delta\hat{H} = \hat{H}(0^\circ\text{F}) - \hat{H}(50^\circ\text{F}) = (196.23 - 202.28) = -6.05 \text{ Btu/lbm}$

$$\begin{aligned}\Delta\hat{U} &= \Delta\hat{H} - \Delta P\hat{V} = \Delta\hat{H} - (P_{akhir}\hat{V}_{akhir} - P_{awal}\hat{V}_{awal}) \\ &= -6.05 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}} - \left[(18.90)(4.969) - (51.99)(1.920) \text{ft}^3 \cdot \frac{\text{psia}}{\text{lbm}} \times \frac{1.987 \text{ Btu}}{10.73 \text{ft}^3 \cdot \text{psia}} \right] \\ &= -4.96 \text{ Btu/lbm}\end{aligned}$$

B. Tabel steam/kukus

Selama puluhan tahun, kumpulan sifat fisik air termuat dalam tabel steam/kukus (steam tables) dan telah dijadikan referensi standar bagi para ahli teknik kimia dan mesin yang khususnya mempelajari mengenai perputaran steam pada proses pembangkitan energi listrik.

Contoh soal

1-5.2 Steam superkritik pada 10 bar (absolut) dan 190 C masuk ke dalam turbin dengan kecepatan $m = 2000 \text{ kg/jam}$. Turbin beroperasi pada kondisi adiabatik, dan keluarannya berupa steam jenuh bertekanan 1 bar. Hitung kerja yang dihasilkan turbin dalam satuan kilowatt, dengan mengabaikan perubahan energi kinetik dan potensial.

Penyelesaian :

Neraca energi pada sistem terbuka (steady state) adalah :

$$W_s = \Delta H = m(\hat{H}_{out} - \hat{H}_{in})$$

Steam masuk :

Dari tabel B.6 terlihat bahwa steam pada tekanan 10 bar tersaturasi pada temperatur 180 C. Maka temperatur masuk steam adalah $180\text{ C} + 190\text{ C} = 370\text{ C}$. Interpolasi dengan menggunakan tabel yang sama,

$$\hat{H}_{in}(10\text{ bar}, 370\text{ }^{\circ}\text{C}) = 3201\text{ kJ/kg}$$

Steam keluar :

Baik dari tabel B.5 dan B.6, dapat dilihat bahwa entalpi steam jenuh pada 1 bar adalah

$$\hat{H}_{out}(1\text{ bar}, \text{jenuh}) = 2675\text{ kJ/kg}$$

Neraca energi :

$$W_s = \Delta H = \left(2000 \frac{\text{kg}}{\text{jam}}\right) \times \frac{(2675-3201)\text{kJ}}{\text{kg}} \times \frac{1\text{jam}}{3600\text{ detik}} = -292 \frac{\text{kJ}}{\text{detik}} = -292\text{ kW}$$

Dapat disimpulkan bahwa turbin menghasilkan kerja sebesar 292 kW ke lingkungannya.

1.6 LANGKAH-LANGKAH PERHITUNGAN NERACA ENERGI

Untuk dapat menyelesaikan perhitungan neraca energi seefisien mungkin, langkah pertama yang harus dilakukan adalah dengan menyusun diagram alir proses. Penyusunan diagram alir proses tersebut harus dilengkapi dengan penulisan label aliran yang berisi semua informasi komponen proses tiap aliran (masuk dan keluar), baik jumlah maupun kondisinya. Hal ini diperlukan untuk dapat menghitung entalpi spesifik dari material sistem yang terlibat dalam proses tersebut.

Contoh soal :

1.6-1 Neraca energi pada proses satu komponen

Dua aliran air dicampurkan untuk dijadikan sebagai umpan masuk ke boiler. Data proses yang diketahui adalah sebagai berikut :

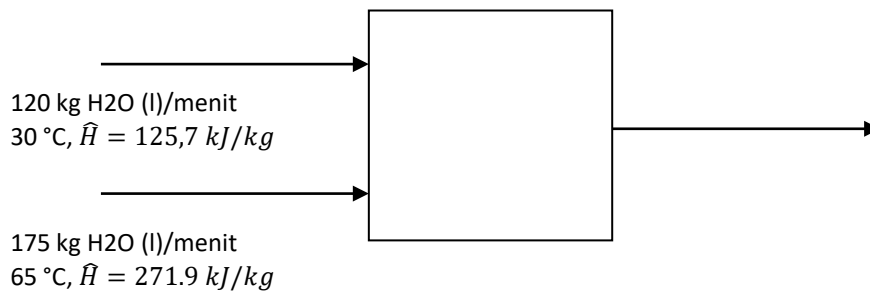
Aliran masuk 1 : 120 kg/menit @ 30 C

Aliran masuk 2 : 175 kg/menit @ 65 C

Tekanan boiler : 17 bar (absolut)

Keluaran steam dari boiler melalui pipa dengan ID 6 cm. Hitung panas masuk yang dibutuhkan boiler dalam kJ/menit jika steam keluaran tersebut berupa steam jenuh pada tekanan boiler. Abaikan energi kinetik dalam aliran cairan masuk.

Penyelesaian :



BAB II

NERACA ENERGI PADA PROSES NON REAKTIF

2.1 SIFAT KEADAAN DAN TAHAPAN HIPOTESIS PROSES

Proses non reaktif merupakan proses yang tidak melibatkan terjadinya aksi-reaksi antara komponen-komponen proses. Pada proses ini, perhitungan neraca energi sangat tergantung pada sifat keadaan dari sistem proses itu sendiri. Sifat keadaan yang dimaksud dapat berupa :

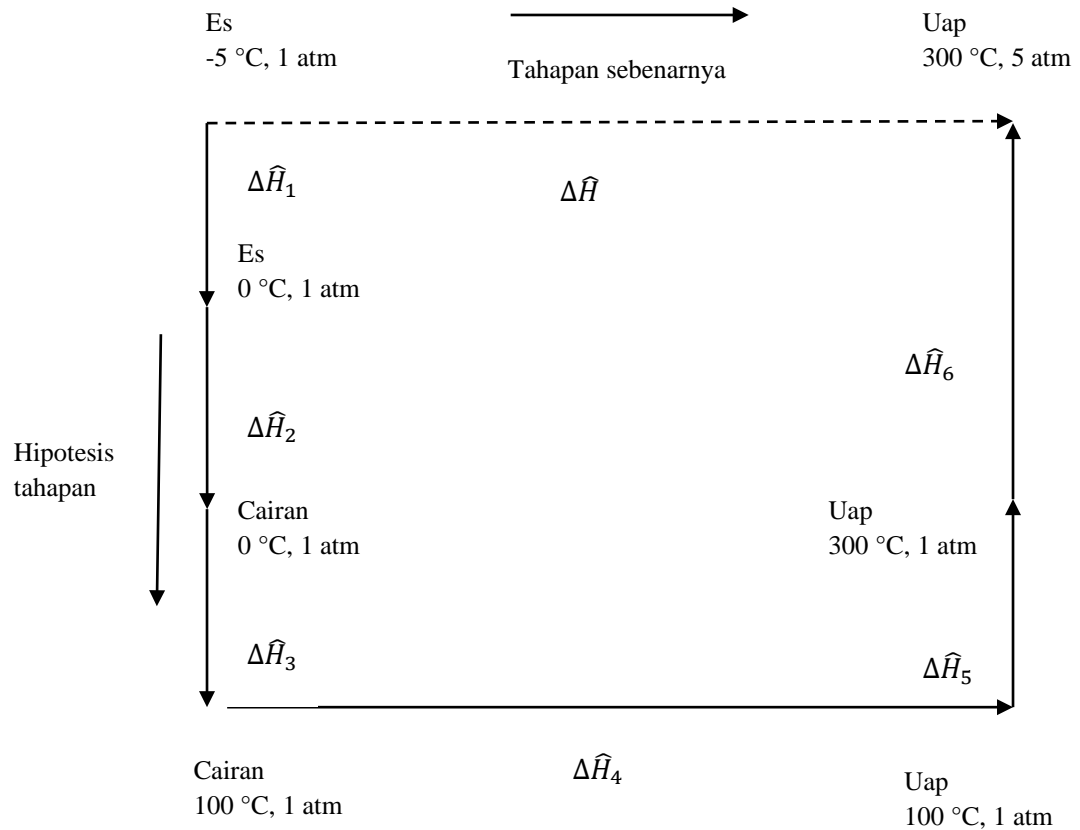
1. Perubahan tekanan pada temperatur konstan.
2. Perubahan temperatur pada tekanan konstan.
3. Perubahan fasa pada temperatur dan tekanan konstan.
4. Pencampuran atau pemisahan komponen sistem pada temperaur dan tekanan konstan.

Pada beberapa proses tertentu terjadi perubahan kondisi proses dari awal hingga akhir. Maka perhitungan neraca energi dibutuhkan perhitungan untuk tiap perubahan kondisi proses tersebut atau tahapan proses yang terjadi. Tahapan proses merupakan tahapan perubahan sifat keadaan mulai dari awal proses hingga ke akhir proses. Perhitungan untuk tiap tahapan proses ini dilakukan dengan melakukan hipotesis kondisi sistem pada saat tahapan proses itu berlangsung.

Sebagai contoh adalah perhitungan ΔH untuk proses konversi es pada $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan tekanan 1 atm menjadi steam dengan suhu $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan tekanan 5 atm. Hipotesis tahapan proses dilakukan untuk tiap perubahan kondisi dan fasa proses, termasuk juga perhitungan ΔH . Sedangkan untuk keseluruhan proses ,

$$\Delta H = \sum_{i=1}^6 \Delta H_i \quad (24)$$

Tahapan hipotesis proses konversi es menjadi steam dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.1 Hipotesis tahapan proses

Masalah yang melibatkan neraca energi dapat dipandang sebagai perluasan sistem persamaan neraca massa dengan tambahan satu persamaan neraca energi dan beberapa variabel energi. Sebuah masalah neraca energi dalam suatu unit proses terdiri dari:

- a. variabel-variabel alur alir (*stream variables*): laju alir, komposisi, temperatur, tekanan, entalpi
- b. variabel-variabel unit (*unit variables*): panas dan kerja akibat interaksi unit yang bersangkutan dengan lingkungan
- c. persamaan-persamaan neraca massa
- d. satu persamaan neraca energi yang sering ditulis dalam bentuk neraca entalpi
- e. *problem specifications*: data laju alir, komposisi, temperatur, entalpi dan lain-lain, serta dasar perhitungan.

Penyajian neraca energi dibagi dalam bahasan yang untuk sistem tanpa reaksi dalam bab ini dan yang dengan reaksi disajikan dalam selanjutnya. Sejauh kemungkinan penyederhanaan atas ketergantungan entalpi terhadap temperatur dan tekanan, masalah-masalah yang dibahas dalam bab ini diusahakan tidak melibatkan penyelesaian sistem persamaan non-linier yang rumit. Karena masalah dalam pabrik proses kimia umumnya mencakup **sistem terbuka dengan aliran**, maka pokok-pokok bahasan dalam diktat ini ditekankan pada neraca energi dalam sistem pemroses dengan aliran.

2.2 PERUBAHAN TEKANAN PADA TEMPERATUR KONSTAN

Berdasarkan beberapa percobaan yang telah dilakukan disimpulkan bahwa pada material padat dan cair, perubahan tekanan memiliki pengaruh yang sangat kecil terhadap energi dalam, sebagaimana volume spesifik. Jika pada material padat atau cair terjadi perubahan tekanan namun temperatur tetap konstan, maka dapat dinyatakan bahwa $\Delta\hat{U} \approx 0$ dan $\Delta\hat{H}(= \Delta\hat{U} + \Delta P\hat{V}) \approx \hat{V}\Delta P$.

Sedangkan untuk gas ideal, baik \hat{U} dan \hat{H} tidak dipengaruhi oleh nilai tekanan. Maka selain gas-gas yang berada di dekat atau diatas tekanan kritisnya, diasumsikan bahwa $\Delta\hat{U} \approx 0$ dan $\Delta\hat{H} \approx 0$.

2.3 PERUBAHAN PADA TEMPERATUR

a. Panas sensibel dan kapasitas panas

Panas sensibel merupakan sejumlah panas yang harus dipindahkan untuk menaikkan atau menurunkan temperatur suatu material atau campurannya. Kuantitas panas yang dibutuhkan untuk menghasilkan perubahan temperatur dalam suatu sistem dapat dinyatakan sebagai bentuk hukum pertama termodinamika :

$$Q = \Delta U \text{ (sistem tertutup)} \quad (25)$$

$$Q = \Delta H \text{ (sistem terbuka)} \quad (26)$$

b. Kapasitas panas

Terjadinya perubahan temperatur T_1 menjadi T_2 menyebabkan terjadinya juga perubahan energi dalam spesifik. Pada $\Delta T \rightarrow 0$, rasio $\Delta\hat{U}/\Delta T$ mencapai nilai tertentu, yang dinyatakan sebagai kapasitas panas pada volume konstan.

Dinyatakan sebagai C_v :

$$C_v(T) = \left\{ \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta\hat{U}}{\Delta T} \right\} = \frac{d\hat{U}}{dT} \quad (27)$$

C_v merupakan fungsi temperatur.

Perubahan \hat{U} untuk menaikkan temperatur dari T ke $T + dT$ pada volume konstan :

$$d\hat{U} = C_v(T).dT \quad (28)$$

$$\Delta\hat{U} = \int_{T_1}^{T_2} C_v(T).dT \quad (29)$$

Validitas persamaan diatas untuk material sistem :

Gas ideal : tepat / sempurna

Padat atau liquid : pendekatan yang baik

Gas nyata : valid hanya jika \hat{V} konstan

Sistem pada kondisi volume konstan ini juga dinyatakan sebagai sistem tertutup, karena tidak adanya perubahan kuantitas material komponen sistem selama proses berlangsung.

Kapasitas panas pada kondisi tekanan konstan dinyatakan sebagai C_p :

$$C_p(T) = \left\{ \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta\hat{H}}{\Delta T} \right\} = \frac{d\hat{H}}{dT} \quad (30)$$

Perubahan \hat{H} untuk perubahan temperatur pada tekanan konstan :

$$d\hat{H} = C_p(T).dT \quad (31)$$

$$\Delta\hat{H} = \int_{T_1}^{T_2} C_p(T).dT \quad (32)$$

Validitas persamaan diatas untuk material sistem :

Gas ideal : tepat / sempurna

Gas nyata : tepat hanya jika P konstan

Sedangkan untuk material padat atau liquid :

$$\Delta\hat{H} = V\Delta P + \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) \cdot dT \quad (33)$$

Sistem dengan kondisi tekanan konstan ini disebut juga sebagai sistem terbuka, karena adanya perubahan kuantitas material komponen sistem selama proses berlangsung.

Hubungan antara Cv dan Cp

Untuk material liquid dan padat :

$$C_p \approx C_v \quad (34)$$

Untuk gas ideal :

$$C_p = C_v + R \quad (35)$$

R adalah konstanta gas ideal.

Contoh soal

2.3-1 Dengan asumsi gas ideal, hitung panas yang harus dipindahkan untuk tiap kasus berikut ini.

1. Nitrogen dengan kecepatan aliran 100 mol/menit dipanaskan dari 20 °C menjadi 100 °C.
2. 5 liter nitrogen dalam sebuah tabung dengan tekanan awal 3 bar didinginkan dari 90 °C menjadi 30 °C.

Penyelesaian :

3. Neraca energi untuk sistem terbuka, $Q = \Delta H$ (perubahan energi kinetik diabaikan).

Dari tabel B.2 (lampiran), kapasitas panas nitrogen pada tekanan konstan, $C_p(\text{J/mol} \cdot ^\circ\text{C})$:

$$29.00 + (0.2199 \times 10^{-2}T) + (0.5723 \times 10^{-5}T^2) - (2.871 \times 10^{-9}T^3)$$

T dalam $^\circ\text{C}$.

Dari pers.(32) :

$$\Delta\hat{H} = \int_{20}^{100} C_p(T)dT$$

$$\Delta\hat{H} \left(\frac{\text{J}}{\text{mol}} \right) = \left[29.00T + \left(0.2199 \times 10^{-2} \frac{T^2}{2} \right) + \left(0.5723 \times 10^{-5} \frac{T^3}{3} \right) - \left(2.871 \times 10^{-9} \frac{T^4}{4} \right) \right]_{20}^{100}$$

$$= 2320 + 10.6 + 1.9 - 0.07 = 2332 \text{ J/mol}$$

$$Q = \Delta H = n \times \Delta\hat{H} = \left(100 \frac{\text{mol}}{\text{men}} \right) \times 2332 \frac{\text{J}}{\text{mol}} = 2.332 \times 10^5 \text{ J/men}$$

4. Neraca energi untuk sistem tertutup, $Q = \Delta U$

Kapasitas panas pada volume konstan C_v didapatkan dengan menggunakan pers. (35) :

$$C_v = C_p - R$$

$$R = \left(8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right) \times \left(\frac{1\text{K}}{1^\circ\text{C}} \right)$$

$$C_v = 20.69 + 0.2199 \times 10^{-2}T + 0.5723 \times 10^{-5}T^2 - 2.871 \times 10^{-9}T^3$$

Hitung $\Delta\hat{U}$

$$\Delta\hat{U} = \int_{90}^{30} C_v(T)dT$$

$$\Delta \hat{U} = \left[\begin{array}{l} 20.69T + 0.2199 \times 10^{-2} \frac{T^2}{2} + 0.5723 \times 10^{-5} \frac{T^3}{3} \\ -2.871 \times 10^{-9} \frac{T^4}{4} \end{array} \right] \begin{array}{l} 30 \\ 90 \end{array}$$

$$= -1241 - 7.92 - 1.34 + 0.05 = -1.250 \times 10^3 \text{ J/mol}$$

Hitung n :

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(3 \text{ bar})(5 \text{ liter})}{(0.08314 \text{ liter} \cdot \frac{\text{bar}}{\text{mol} \cdot \text{K}})(363 \text{ K})} = 0.497 \text{ mol}$$

Hitung Q :

$$Q = \Delta U = n\Delta \hat{U} = (0.497 \text{ mol}) \times (-1.250 \times \frac{10^3 \text{ J}}{\text{mol}}) = -621 \text{ J}$$

c. Kapasitas panas rata-rata

Jika terjadi perubahan entalpi spesifik material dari T_1 menjadi T_2 adalah

$\hat{H}_2 - \hat{H}_1$, maka kapasitas panas rata-rata, \bar{C}_p , dinyatakan sebagai :

$$\bar{C}_p = \frac{\hat{H}_2 - \hat{H}_1}{T_2 - T_1} \quad (36)$$

Substitusi nilai $\hat{H}_2 - \hat{H}_1$, maka :

$$\bar{C}_p(T_1 \rightarrow T_2) = \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_p(T) \cdot dT}{T_2 - T_1} \quad (37)$$

Disederhanakan :

$$\Delta \hat{H} = \bar{C}_p \Delta T \quad (38)$$

Bila dalam suatu perhitungan neraca energi, digunakan suatu temperatur

referensi, maka persamaan untuk menghitung $\Delta \hat{H}$ pada perubahan temperatur

T_1 dan T_2 :

$$\begin{aligned}\Delta\hat{H}(T_1 \rightarrow T_2) &= \hat{H}(T_2) - \hat{H}(T_1) & (39) \\ &= (\bar{C}_p)_{T_2}(T_2 - T_{ref}) - (\bar{C}_p)_{T_1}(T_1 - T_{ref})\end{aligned}$$

d. Kapasitas panas campuran

Kapasitas panas untuk campuran diturunkan dari aturan atau hukum **Kopp**, yang awalnya digunakan untuk material padat atau cair pada temperatur yang mendekati 20 °C.

Dinyatakan dalam persamaan :

$$C_{pm}(T) = \sum_{\text{semua komponen campuran}} y_i C_{pi}(T) \quad (40)$$

Dimana :

C_{pm} = kapasitas panas campuran

y_i = fraksi mol atau massa komponen i

C_{pi} = kapasitas panas komponen i

Contoh soal

2.3-2 Hitung panas yang dibutuhkan untuk memanaskan aliran yang terdiri dari 60 % C₂H₆ dan 40 % C₃H₈ (berat volum), dari 0 °C menjadi 400 °C.

Penyelesaian :

Persamaan kapasitas panas untuk etana dan propana diambil dari tabel B.2.

Substitusi ke pers.(40) :

$$\begin{aligned}
C_{pm} \text{ (J/mol.}^\circ\text{C)} &= 0.6(49.37 + 13.92 \times 10^{-2} T - 5.816 \times 10^{-5} T^2 + 7.280 \times 10^{-9} T^3) \\
&+ 0.4(68.03 + 22.59 \times 10^{-2} T - 13.11 \times 10^{-5} T^2 + 31.71 \times 10^{-9} T^3) \\
&= 56.83 + 17.39 \times 10^{-2} T - 8.734 \times 10^{-5} T^2 + 17.05 \times 10^{-9} T^3
\end{aligned}$$

$$\Delta \hat{H} = \int_0^{400} C_{pm} dT = 34890 \text{ J/mol}$$

Jika perubahan energi potensial dan kinetik diabaikan, neraca energi menjadi :

$$Q = \Delta H = n\Delta \hat{H} = (150 \text{ mol/jam})(34890 \text{ J/mol}) = 5.23 \times 10^6 \text{ J/jam}$$

2.4 NERACA ENERGI PADA SISTEM SATU FASA

Perhitungan neraca energi pada sistem ini sama dengan perhitungan neraca energi pada sistem terbuka. Dimana pada persamaan yang digunakan terdapat suku laju alir dan perubahan entalpi spesifik dalam sistem. Dinyatakan dalam persamaan :

$$Q \left(\frac{\text{kJ}}{\text{jam}} \right) = \Delta H = \sum n_{out} \hat{H}_{out} - \sum n_{in} \hat{H}_{in} \quad (41)$$

2.5 NERACA ENERGI PADA OPERASI DENGAN PERUBAHAN FASA

Perubahan fasa seperti pencairan dan penguapan biasanya diikuti dengan perubahan besar pada energi dalam dan entalpi.

- a. Panas laten

Panas laten adalah perubahan entalpi yang terjadi akibat transisi jumlah material komponen (massa atau mol) dari satu fasa ke fasa yang lain, pada kondisi temperatur dan tekanan konstan.

Panas laten untuk 3 perubahan fasa yang diketahui adalah sebagai berikut :

1. Panas laten penguapan : $\Delta\hat{H}_v$ = panas yang dibutuhkan untuk menguapkan sejumlah cairan pada T dan P konstan.
2. Panas laten pencairan : $\Delta\hat{H}_m$ = panas yang dibutuhkan untuk mencairkan sejumlah padatan pada T dan P konstan.
3. Panas laten penyubliman : $\Delta\hat{H}_s$ = panas yang dibutuhkan untuk menguapkan sejumlah padatan pada T dan P konstan.

b. Perhitungan panas laten

Formula sederhana yang digunakan untuk menentukan panas penguapan standard ($\Delta\hat{H}_v$ pada titik didih normal) adalah hukum **Trouton** :

$$\Delta\hat{H}_v \left(\frac{kJ}{mol} \right) \approx 0.088T_b(K) \rightarrow \text{cairan non polar} \quad (42)$$

$$\approx 0.109T_b(K) \rightarrow \text{air, alkohol dengan berat molekul ringan}$$

T_b adalah titik didih normal cairan.

Hukum trouton memberikan akurasi sekitar 30 % dalam menentukan $\Delta\hat{H}_v$.

Formula lain dengan tingkat akurasi 2 % adalah persamaan Chen, yaitu :

$$\Delta\hat{H}_v \left(\frac{kJ}{mol} \right) = \frac{T_b [0.0331(T_b/T_c) - 0.0327 + 0.0297 \log_{10} P_c]}{1.07 - (T_b/T_c)} \quad (43)$$

T_b dan T_c adalah titik didih normal dan temperatur kritis dalam K , dan P_c adalah tekanan kritis dalam atm.

Formula untuk menentukan panas pencairan standard adalah :

$$\begin{aligned}\Delta\hat{H}_m\left(\frac{kJ}{mol}\right) &\approx 0.0092 T_m \text{ (K)} \rightarrow \text{elemen logam} \\ &\approx 0.025 T_m \text{ (K)} \rightarrow \text{komponen anorganik} \\ &\approx 0.050 T_m \text{ (K)} \rightarrow \text{komponen organik}\end{aligned}\tag{44}$$

Sedangkan untuk menentukan panas penguapan pada kondisi T_2 bila diketahui T_1 adalah korelasi **Watson** :

$$\Delta\hat{H}_v(T_2) = \Delta\hat{H}_v(T_1) \left(\frac{T_c - T_2}{T_c - T_1}\right)^{0.38}\tag{45}$$

Dimana T_c adalah temperatur kritis.

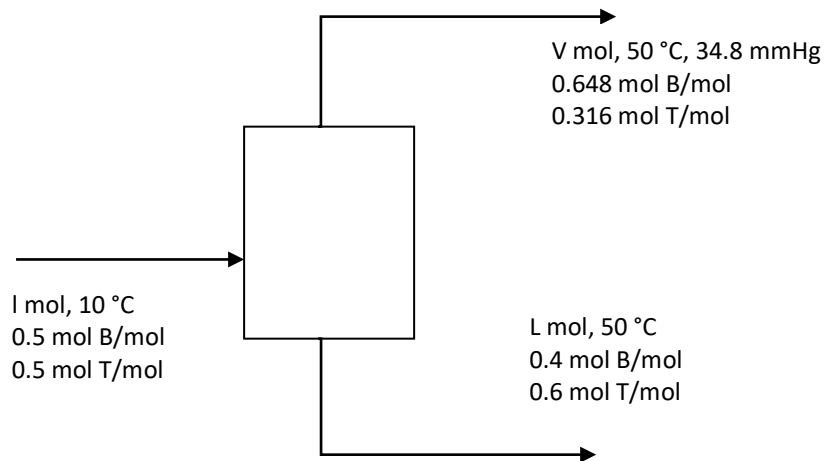
c. Perhitungan neraca energi pada operasi dengan perubahan fasa

Perhitungan neraca energi pada proses dimana suatu komponen terdiri dari 2 fasa, maka terlebih dahulu harus ditetapkan kondisi referensinya (kondisi awal), dengan cara menspesifikasi fasa dan temperaturnya. Kemudian hitung entalpi spesifik komponen pada tiap aliran proses yang berkaitan dengan kondisi tersebut.

Contoh soal

2.5-1 Suatu cairan *equimolar* yang terdiri dari campuran benzen (B) dan toluen (T) pada 10 °C masuk secara kontinu ke dalam *vessel*. Cairan kemudian dipanaskan hingga temperatur 50 °C. Aliran keluaran *vessel* terdiri dari 40 % mol cairan B dan 68.4% mol uap B. Berapa banyak panas yang harus dipindahkan ke dalam campuran tersebut per mol umpan ?

Penyelesaian :



Basis : 1 mol umpan

Neraca massa keseluruhan : $1.00 = V + L$

Neraca massa benzen : $0.5 = 0.684 V + 0.4 L$

$V = 0.352 \text{ mol}$, $L = 0.648 \text{ mol}$

Neraca energi : $Q = \Delta H$

Benzen (cair, 1, 50 °C) : $\Delta \hat{H} = \int_{10}^{50} (Cp)_{benzen} dT = 5332 \text{ J/mol}$

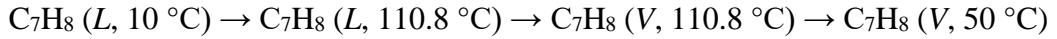
Toluen (cair, 1, 50 °C) : $\Delta \hat{H} = \int_{10}^{50} (Cp)_{toluen} dT = 6340 \text{ J/mol}$

Benzen (uap, V, 50 °C) :

$C_6H_6 (L, 10 \text{ °C}) \rightarrow C_6H_6 (L, 80.26 \text{ °C}) \rightarrow C_6H_6 (V, 80.26 \text{ °C}) \rightarrow C_6H_6 (V, 50 \text{ °C})$

$$\Delta \hat{H} = \int_{10}^{80.26} (Cp)_{benzen} dT + \Delta \hat{H}_v(80.26 \text{ °C}) + \int_{80.26}^{50} (Cp)_{benzen} dT = 37520 \text{ J/mol}$$

Toluen (uap, V, 50 °C) :



$$\Delta\hat{H} = \int_{10}^{110.8} (Cp)_{toluen} dT + \Delta\hat{H}_v(110.8^\circ\text{C}) + \int_{110.8}^{50} (Cp)_{toluen} dT = 42930\text{ J/mol}$$

Tabel entalpi untuk proses diatas :

Referensi : B(l, 10 °C), T(l, 10 °C)

komponen	n_{in}	\hat{H}_{in}	n_{out}	\hat{H}_{out}	
B(L)	0.5	0	0.259	5332	n (mol)
T(L)	0.5	0	0.389	6340	
B(V)			0.241	37520	\hat{H} (J/mol)
T(V)			0.111	42930	

$$\text{Neraca energi : } Q = \Delta H = \sum n_{out}\hat{H}_{out} - \sum n_{in}\hat{H}_{in} = 17660\text{ J}$$

2.6 NERACA ENERGI PADA PROSES PENCAMPURAN DAN PELARUTAN

Pada proses pencampuran dan pelarutan perhitungan neraca energi dilakukan dengan memperhitungkan perubahan entalpi yang terjadi selama proses berlangsung.

Panas pelarutan adalah perubahan entalpi yang terjadi akibat melarutnya 1 mol komponen terlarut (*solute*), gas atau padat, didalam n mol larutan pelarut (*solvent*) pada temperatur konstan. Panas pencampuran memiliki definisi yang sama dengan panas pelarutan, dimana proses yang terjadi biasanya adalah tercampurnya 2 larutan.

Dasar perhitungan yang digunakan sama untuk neraca energi sistem terbuka, yaitu :

$$Q \left(\frac{\text{kJ}}{\text{jam}} \right) = \Delta H = \sum n_{out} \hat{H}_{out} - \sum n_{in} \hat{H}_{in} \quad (46)$$

Sedangkan secara umum, entalpi larutan yang mengandung n mol H₂O per-mol komponen terlarut dinyatakan dalam persamaan :

$$\hat{H}_{ref:solute \text{ dan pelarut murni @25}^\circ\text{C}} = \Delta \hat{H}_s(n) \quad (47)$$

$$\hat{H}_{ref:pelarut \text{ murni dan larutan tak hingga @25}^\circ\text{C}} = \Delta \hat{H}_s(n) - \Delta \hat{H}_s(\infty) \quad (48)$$

BAB III

NERACA ENERGI PADA PROSES REAKTIF

3.1 PANAS REAKSI

Panas reaksi atau entalpi reaksi $\Delta\hat{H}_r(T, P)$ adalah beda $H_{produk} - H_{reaktan}$ untuk reaksi yang memenuhi syarat berikut :

- a. Nilai stoikiometri reaktan tetap, dan reaksi berlangsung sempurna.
- b. Reaktan masuk pada kondisi temperatur dan tekanan tetap, sementara produk keluar pada temperatur dan tekanan yang sama.

Jika pada suatu reaksi v_a adalah koefisien stoikiometri reaktan atau produk reaksi A, dan n_A mol A dikonsumsi pada saat $T = T_o$, maka perubahan entalpi total adalah :

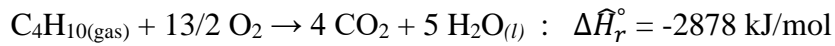
$$\Delta H = \frac{\Delta\hat{H}_r(T_o)}{v_A} n_A \quad (49)$$

Beberapa definisi dan sifat panas reaksi dapat disimpulkan sebagai berikut :

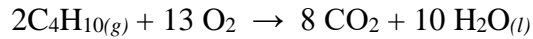
1. Panas reaksi standard $\Delta\hat{H}_r^\circ$ adalah panas reaksi ketika reaktan dan produk berada pada temperatur dan tekanan referensi, biasanya pada 25 °C dan 1 atm.
2. Jika $\Delta\hat{H}_r(T)$ negatif, maka reaksi dikatakan sebagai reaksi eksotermis, sedangkan jika positif dikatakan sebagai reaksi endotermis pada temperatur T .
3. Pada tekanan rendah dan moderat, $\Delta\hat{H}_r$ tidak dipengaruhi tekanan.
4. Nilai panas reaksi tergantung pada bagaimana persamaan stoikiometri dituliskan.
5. Nilai panas reaksi tergantung pada sifat material reaktan dan produk (gas, cair, atau padat).

Contoh soal

3.1-1 Panas reaksi standard untuk proses pembakaran gas n-butana adalah



a. Berapa panas reaksi standard untuk reaksi berikut :



b. Jika 40 mol CO₂ diproduksi, hitung perubahan entalpi antara reaktan dan produk pada temperatur 25 °C.

Penyelesaian :

a. $\Delta \hat{H}_r^\circ = 2(-2878 \text{ kJ/mol}) = -5756 \text{ kJ/mol}$

b. $\Delta H = \frac{-2878 \text{ kJ}}{4 \text{ mol CO}_2} \times 40 \text{ mol CO}_2 = -28780 \text{ kJ}$

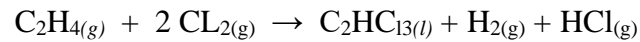
Jika reaksi berlangsung dalam suatu reaktor tertutup pada volum konstan, panas yang dilepaskan atau diserap didefinisikan melalui perubahan energi dalam antara reaktan dan produk. Energi dalam reaksi $\Delta \hat{U}_r$ adalah beda $U_{\text{produk}} - U_{\text{reaktan}}$ jika reaktan bereaksi secara sempurna pada temperatur T .

Energi dalam reaksi dinyatakan dalam persamaan :

$$\Delta \hat{U}_r (T) = \Delta \hat{H}_r (T) - RT(\sum_{\text{produk gas}} \nu_i - \sum_{\text{reaktan gas}} \nu_i) \quad (50)$$

Contoh soal

3.1-2 Panas reaksi standard pada reaksi



Adalah $\Delta\hat{H}_r$ (25 °C) = -420.8 kJ/mol. Hitung $\Delta\hat{U}_r$ untuk reaksi tersebut.

Penyelesaian :

Persamaan stoikiometri

$$\sum v_i(\text{gas produk}) = 1 + 1 = 2$$

$$\sum v_i(\text{gas reaktan}) = 1 + 2 = 3$$

Dari pers.(50) : $\Delta\hat{U}_r = \Delta\hat{H}_r - RT(2 - 3) = \left(420.8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) -$

$$\left(8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \cdot \text{K}\right) (298)(-1) = -418.3 \text{ kJ/mol}$$

3.2 PENGUKURAN DAN PERHITUNGAN PANAS REAKSI : HUKUM HESS

Jika suatu reaksi tidak dapat langsung dihitung atau ditentukan nilai panas reaksinya, maka perhitungan panas reaksi dapat dilakukan dengan cara menjumlahkan atau mengurangi suatu reaksi-reaksi lain, yang pada akhirnya menghasilkan produk yang sama dengan reaksi tersebut. Prosedur perhitungan ini disebut juga sebagai hukum *Hess*.

Contohnya, bila terdapat reaksi :

1. $C + O_2 \rightarrow CO_2 : \Delta\hat{H}_r^{\circ 1} = -393.51 \text{ kJ/mol}$
2. $CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2 : \Delta\hat{H}_r^{\circ 2} = -282.99 \text{ kJ/mol}$
3. $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO : \Delta\hat{H}_r^{\circ 3} = ?$

Karena \hat{H} adalah fungsi keadaan,

$$\Delta\hat{H}_r^{\circ 3} = \Delta\hat{H}_r^{\circ 1} + (-\Delta\hat{H}_r^{\circ 2}) = -393.51 - 282.99 = -110.52 \text{ kJ/mol}$$

Contoh soal

3.2-1 Panas pembakaran standard untuk reaksi berikut diperoleh dari hasil percobaan.

1. $C_2H_6 + 7/2 O_2 \rightarrow 2 CO_2 + 3 H_2O : \Delta\hat{H}_r^{\circ 1} = -1559.8 \text{ kJ/mol}$
2. $C + O_2 \rightarrow CO_2 : \Delta\hat{H}_r^{\circ 2} = -393.5 \text{ kJ/mol}$
3. $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O : \Delta\hat{H}_r^{\circ 3} = -285.8 \text{ kJ/mol}$

Gunakan hukum *Hess* dan panas reaksi yang diketahui untuk menentukan panas reaksi standard untuk reaksi :

4. $2 C + 3 H_2 \rightarrow C_2H_6 : \Delta\hat{H}_r^{\circ 4} = ?$

Penyelesaian :

Nyatakan bahwa : (4) = 2 x (2) + 3 x (3) - (1)

Berdasarkan hukum *Hess*,

$$\Delta\hat{H}_r^{\circ 4} = 2\Delta\hat{H}_r^{\circ 2} + 3\Delta\hat{H}_r^{\circ 3} - \Delta\hat{H}_r^{\circ 1} = -84.6 \text{ kJ/mol}$$

3.3 REAKSI PEMBENTUKAN DAN PANAS PEMBENTUKAN

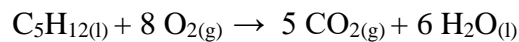
Reaksi pembentukan suatu senyawa adalah reaksi yang membentuk suatu senyawa dari persenyawaan atom-atomnya. Panas yang terlibat dalam reaksi ini disebut sebagai panas pembentukan standard, $\Delta\hat{H}_f^\circ$

Panas reaksi ditentukan dengan menggunakan persamaan :

$$\Delta\hat{H}_r^\circ = \sum_{\text{produk}} \nu_i(\Delta\hat{H}_f^\circ)_i - \sum_{\text{reaktan}} \nu_i(\Delta\hat{H}_f^\circ)_i \quad (51)$$

Contoh soal

3.3-1 Tentukan panas reaksi pembakaran n-pentana cair, dengan asumsi bahwa $\text{H}_2\text{O} (l)$ adalah produk pembakaran.



Penyelesaian :

Dari pers.(51),

$$\Delta\hat{H}_r^\circ = 5(\Delta\hat{H}_f^\circ)_{\text{CO}_2(g)} + 6(\Delta\hat{H}_f^\circ)_{\text{H}_2\text{O}(l)} - (\Delta\hat{H}_f^\circ)_{\text{C}_5\text{H}_{12}(l)} = -3509 \text{ kJ/mol}$$

Nilai panas pembentukan standard dapat dilihat di tabel B.1 lampiran.

3.4 PANAS PEMBAKARAN

Panas pembakaran standard $\Delta\hat{H}_c^\circ$ suatu komponen adalah panas dari reaksi suatu senyawa dengan oksigen, yang pada akhir reaksi akan menghasilkan produk tertentu.

Perhitungan panas reaksi dinyatakan dalam persamaan :

$$\Delta\hat{H}_r^\circ = \sum_{\text{reaktan}} \nu_i(\Delta\hat{H}_c^\circ)_i - \sum_{\text{produk}} \nu_i(\Delta\hat{H}_c^\circ)_i \quad (52)$$

Contoh soal

3.4-1 Hitung panas pembakaran dari reaksi dehidrogenasi etana berikut,



Penyelesaian :

Dari tabel B.1 lampiran, $(\Delta\hat{H}_c^\circ)_{\text{C}_2\text{H}_6} = -1559.9 \text{ kJ/mol}$

$$(\Delta\hat{H}_c^\circ)_{\text{C}_2\text{H}_4} = -1411.0 \text{ kJ/mol}$$

$$(\Delta\hat{H}_c^\circ)_{\text{H}_2} = -285.84 \text{ kJ/mol}$$

Dari pers. (52) :

$$\Delta\hat{H}_r^\circ = (\Delta\hat{H}_c^\circ)_{\text{C}_2\text{H}_6} - (\Delta\hat{H}_c^\circ)_{\text{C}_2\text{H}_4} - (\Delta\hat{H}_c^\circ)_{\text{H}_2} = 136.9 \text{ kJ/mol}$$

3.5 PERHITUNGAN NERACA ENERGI PADA PROSES REAKTIF

Beberapa pendekatan bentuk formula neraca energi digunakan untuk memudahkan perhitungan perubahan energi yang terjadi pada proses dimana terdapat reaksi kimia antar komponen sistem. Biasanya pendekatan yang digunakan adalah kondisi referensi untuk perhitungan entalpi. Kondisi referensi ini biasanya pada temperatur 25 °C, walau pada beberapa perhitungan tidak selalu harus berada pada temperatur tersebut.

Berikut ini adalah 2 kondisi referensi yang umum digunakan dan langkah-langkah perhitungan ΔH .

1. Kondisi referensi : senyawa reaktan dan produk pada T_0 dimana $\Delta\hat{H}_r^\circ$ diketahui, dan senyawa non reaktif berada pada temperatur ruang.

Pada kondisi ini perhitungan ΔH dinyatakan dalam persamaan :

$$\Delta H = \frac{n_{AR}\Delta\hat{H}_r^\circ}{v_A} + \sum_{outlet} n_i\hat{H}_i - \sum_{inlet} n_i\hat{H}_i \quad (53)$$

Dimana,

A = senyawa reaktan atau produk

n_{AR} = mol A yang terbentuk atau dikonsumsi pada proses

v_A = koefisien stoikiometri A

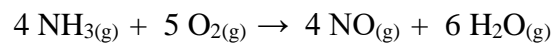
2. Kondisi referensi : senyawa yang merupakan elemen reaktan dan produk berada pada temperatur 25 °C dan senyawa nonreaktif lain berada pada temperatur ruang proses.

Pada proses ini, perubahan entalpi *overall* adalah :

$$\Delta H = \sum_{outlet} n_i\hat{H}_i - \sum_{inlet} n_i\hat{H}_i \quad (54)$$

Contoh soal

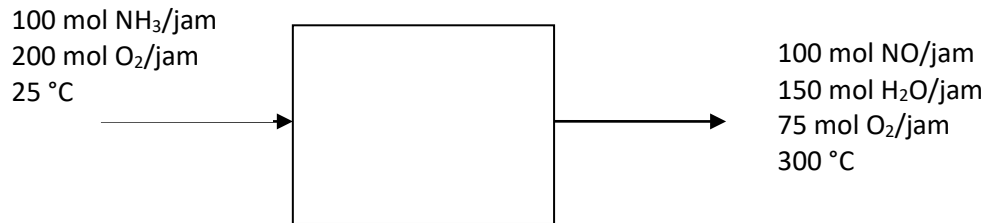
3.5-1 Panas reaksi standard pada 25 °C dan 1 atm untuk reaksi oksidasi amonia



Adalah $\Delta\hat{H}_r^\circ = -904.6$ kJ/mol. 100 mol NH_3 /jam dan 200 mol O_2 /jam pada 25 °C mengalir ke dalam reaktor hingga amonia habis dikonsumsi. Aliran produk keluar sebagai gas pada 300 °C. Hitung panas yang dipindahkan ke atau dari reaktor, dengan asumsi tekanan operasi mendekati 1 atm.

Penyelesaian :

Basis : laju umpan



Hitung entalpi

$$\begin{aligned} \text{O}_2(\text{g}, 300 \text{ }^\circ\text{C}) : \hat{H} &= C_p(300 \text{ }^\circ\text{C})[300 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C}] = (30.80 \text{ J/mol} \cdot \text{ }^\circ\text{C})(275 \text{ }^\circ\text{C}) \\ &= 8.470 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

NO(g, 300 °C) :

$$\begin{aligned} \hat{H} &= \int_{25 \text{ }^\circ\text{C}}^{300 \text{ }^\circ\text{C}} (C_p) dT \\ &= \int_{25 \text{ }^\circ\text{C}}^{300 \text{ }^\circ\text{C}} (29.50 + 0.8188 \times 10^{-2}T - 0.2925 \times 10^{-5}T^2 + 0.3652 \times 10^{-9}T^3) dT \\ &= 8.453 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O}(\text{g}, 300 \text{ }^\circ\text{C}) : \hat{H} &= C_p(300 \text{ }^\circ\text{C})[300 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C}] = (34.80 \text{ J/mol} \cdot \text{ }^\circ\text{C})(275 \text{ }^\circ\text{C}) \\ &= 9.570 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

Hitung ΔH

100 mol NH₃/jam dikonsumsi selama proses,

$$\Delta H = \frac{100 \text{ mol NH}_3}{\text{jam}} \times \frac{-904.6 \text{ kJ}}{4 \text{ mol NH}_3} + \sum_{\text{outlet}} n_i \hat{H}_i - \sum_{\text{inlet}} n_i \hat{H}_i = -19700 \text{ kJ/jam}$$

Neraca energi

Dengan mengabaikan perubahan energi kinetik,

$$Q = \Delta H = -19700 \text{ kJ/jam}$$

SOAL LATIHAN

1. Aliran MCR setelah kompresi didinginkan dalam *heat exchanger* dari keadaan masuk dengan temperatur $T_1 = 65\text{ }^\circ\text{C}$ menjadi $T_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$. Komposisi (disederhanakan) dan data kapasitas panas gas disajikan di samping ini. Pendinginan dilakukan dengan air laut yang mengalami kenaikan temperatur dari 30 menjadi 38 $^\circ\text{C}$.

Kapasitas panas air laut dianggap 4,2 kJ/(kg.K). Tentukan kebutuhan air pendingin (kg) untuk setiap kmol MCR. *Soal ini merupakan contoh penggunaan basis hitungan.*

komponen	komposisi,	Cp konstan
	fraksi mol	J/(mol.K)
nitrogen	5%	29,236
metan	40%	35,918
etan	45%	53,122
propan	10%	72,193

2. Sebuah penukar panas bertugas untuk mendinginkan aliran MCR dengan media pendingin propan. MCR dan propan dianggap hanya mengalami perubahan entalpi sensibel akibat perubahan temperatur; tidak ada perubahan fasa. Laju alir MCR 100 mol/detik dan laju alir propan 30 mol/detik. Temperatur propan masuk $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan keluar $17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jika temperatur MCR masuk $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, berapakah temperatur keluarannya. Komposisi dan kondisi aliran-aliran dan data termodinamika disajikan dalam tabel berikut ini.

		aliran panas		aliran dingin	
		melepas panas		menyerap panas	
		masuk	keluar	masuk	keluar
laju alir, mol/detik		100	100	25	25
fasa		gas	gas	gas	gas
temperatur, $^{\circ}\text{C}$		30	???	-3	17
komponen	C_p J/(mol.K)	komposisi			
nitrogen	29,236	5%	5%	-	-
metana	35,918	40%	40%	-	-
etana	53,122	45%	45%	-	-
propana	72,193	10%	10%	100%	100%

3. Uap dari puncak suatu kolom distilasi dikondensasi sampai di bawah titik embun. Komposisi uap tersebut adalah 60%-mol etan dan 40%-mol propan. Uap tersebut masuk kondensor pada titik embunnya 10 °C (pada suatu tekanan tertentu) dan kondensat keluar pada temperatur 5 °C. Tentukan panas yang harus dikeluarkan untuk kondensasi 200 mol/detik. Data termodinamika disajikan dalam tabel di bawah ini.

	C _p uap, J/(mol.K)	C _p cairan, J/(mol.K)	panas penguapan λ, J/mol
n-butan	75,4	133,7	4872
propan	72,2	106,4	9240

4. WHB (*waste heat boiler*) memanfaatkan panas sensibel suatu gas untuk memproduksi *steam*. Panas sensibel tersebut diperoleh dari gas cerobong turbin-gas dengan penurunan temperatur dari 450 menjadi 150 °C (lihat diagram alir di halaman berikut). Komposisi gas cerobong adalah: 78%-mol N₂, 12% CO₂ dan 10% H₂O (berupa gas). WHB tersebut memproduksi *superheated steam* pada kondisi 10 bar dan 200 °C. Air umpan boiler masuk pada temperatur 75 °C tekanan 10 bar. Produksi *steam* ini disertai pembuangan (*blow down*) sebagian isi boiler. Jumlah *blow down* adalah 5% laju produksi *steam*. Hitunglah produksi *steam* dari setiap 100 kmol gas cerobong. Gunakan tabel *steam* dan data C_p_{rata2} di lampiran.

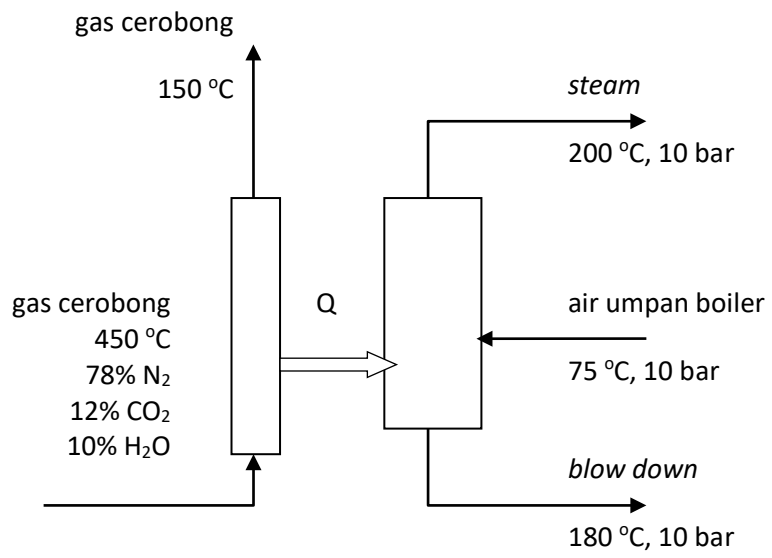


Diagram WHB

DAFTAR PUSTAKA

1. Felder, R.M, Rousseau, 1986, ' *Elementary Principle of Chemical Processes* ', 2nd Edition, John Wiley & Sons.
2. Himmelblau, D.M., 2000, '*Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering* ', 6th Edition, Prentice Hall.