

AZAS TEKNIK KIMIA 2

Penyusun:
Budhi Indrawijaya, S.T., M.Si.
Ir. Suwoto, M.T.



Jl. Surya Kencana No. 1 Pamulang
Gd. A, Ruang 212 Universitas Pamulang
Tangerang Selatan – Banten

AZAS TEKNIK KIMIA 2

Penulis:

Budhi Indrawijaya, S.T., M.Si.

Ir. Suwoto, M.T.

ISBN: **978-623-7833-10-9**

Editor:

Agustina Dyah Setyowati

Desain sampul

Ubaid Al Faruq, M.Pd.

Tata Letak

Aden, S.Si., M.Pd.

Penerbit:

UNPAM PRESS

Redaksi:

Jl. Surya Kecana No. 1

Pamulang – Tangerang Selatan

Telp. 021-7412566

Fax. 021 74709855

Email: unpampress@unpam.ac.id

Cetakan pertama, 2 Februari 2020

Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa ijin penerbit.

DATA PUBLIKASI UNPAM PRESS

| Lembaga Pengembangan Pendidikan dan Pembelajaran Universitas Pamulang

Gedung A. R. 212 Kampus 1 Universitas Pamulang

Jalan Surya Kencana Nomor 1 Pamulang Barat, Tangerang Selatan, Banten

Website: www.unpam.ac.id | Email: unpampress@unpam.ac.id

Azas Teknik Kimia 2 / Budhi Indrawijaya, S.T., M.Si., Ir. Suwoto, M.T.-1STed

ISBN. 978-623-7833-10-9

1. Azas Teknik Kimia 2 I. Budhi Indrawijaya, S.T., M.Si. II. Ir. Suwoto, M.T.

M097-02032020-01

Ketua Unpam Press: Pranoto

Koordinator Editorial dan Produksi: Ubaid Al Faruq, Ali Madinsyah

Koordinator Hak Cipta: Susanto

Koordinator Produksi dan Dokumentasi: Aden

Desain Cover: Robi Maulana

Cetakan pertama, 2 Februari 2020

Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa ijin penerbit.

MATA KULIAH
AZAS TEKNIK KIMIA 2

IDENTITAS MATA KULIAH

Program Studi	: Teknik Kimia S-1
Mata Kuliah / Kode	: Azas Teknik Kimia 2/ TKM0242
Jumlah SKS	: 2 Sks
Prasyarat	: Azas Teknik Kimia 1
Deskripsi Mata Kuliah	: Mata kuliah ini membahas tentang perhitungan neraca massa dengan beberapa aliran seperti aliran <i>recycle</i> , <i>bypass</i> , <i>purging</i> , dan konsep neraca energi serta perhitungan neraca energi, perhitungan perubahan entalpi, proses reversibel, kalor pelarutan serta grafik kelembapan dan penggunaannya.
Capaian Pembelajaran	: Setelah menyelesaikan mata kuliah ini, mahasiswa mampu melakukan perhitungan neraca massa dan neraca energi berdasarkan konsep kimia.
Penyusun	: 1. Budhi Indrawijaya, S.T., M.Si. (Ketua) 2. Ir. Suwoto, M.T. (Anggota)

Ketua Program Studi

Ketua Tim Penyusun

Ir. Wiwik Indrawati, M.Pd
NIDN. 0429036203

Budhi Indrawijaya, S.T, M.Si
NIDN. 0426057801

KATA PENGANTAR

Setiap mahasiswa Program Studi S1 Teknik Kimia diharapkan mampu melakukan perhitungan-perhitungan dalam bidang teknik kimia sehingga diperlukan pengetahuan untuk memudahkan dalam penyusunan skripsi serta masalah-masalah dalam dunia industri yang terkait didalamnya perhitungan neraca massa dan neraca energi. Oleh karena itu diberikanlah mata kuliah Azas Teknik Kimia 2 ini sebagai pelengkap pengetahuan setelah mempelajari mata kuliah Azas Teknik Kimia 1 dalam menyelesaikan persoalan neraca massa dan energi.

Modul dalam konteks ini adalah kumpulan materi suatu mata kuliah yang disusun secara sistematis sesuai urutan pertemuan serta mempertimbangkan keluasan dan kedalaman materi.(Muhidin, A., Faruq, U. A., & Aden, A.: 2018). Mata kuliah **Azas Teknik Kimia 2** mempelajari tentang neraca massa dengan aliran kompleks seperti *recycle, bypass, purging*, konsep neraca energi, perhitungan neraca energi, perhitungan perubahan entalpi, proses reversibel, kalor pelarutan serta grafik kelembapan dan penggunaannya. Buku Ajar ini disusun untuk memudahkan mahasiswa dalam mempelajari materi mata kuliah Azas Teknik Kimia 2.

Tangerang Selatan, 2 Februari 2020

Tim Penyusun

DAFTAR ISI

COVER	i
AZAS TEKNIK KIMIA 2.....	ii
DATA PUBLIKASI UNPAM PRESS.....	iii
IDENTITAS MATA KULIAH	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
PERTEMUAN 1	1
ALIRAN RECYCLE, BYPASS, PURGING.....	1
A. TUJUAN PEMBELAJARAN.....	1
B. URAIAN MATERI	1
1. Pendahuluan.....	1
2. Proses dengan aliran kompleks dijalankan pada proses kontinyu.....	2
C. SOAL LATIHAN/TUGAS	10
D. DAFTAR PUSTAKA.....	12
PERTEMUAN 2	13
GAS, UAP, CAIRAN DAN PADATAN	13
A. TUJUAN PEMBELAJARAN	13
B. URAIAN MATERI	13
1. Hukum Gas Ideal.....	13
2. Penerapan Hukum Gas Ideal	14
3. Campuran Gas Ideal dan Tekanan Gas Parsial	15
C. SOAL LATIHAN/TUGAS	21
D. DAFTAR PUSTAKA.....	23
PERTEMUAN 3	24
KEJENUHAN (SATURATION)	24
A. TUJUAN PEMBELAJARAN.....	24
B. URAIAN MATERI	24

1. Kejenuhan (Saturation)	24
2. Kejenuhan Parsial Dan Kelempertemuan	25
3. Kejenuhan relatif (relative saturation).....	25
4. Kejenuhan Molal.....	25
C. SOAL LATIHAN/TUGAS	30
D. DAFTAR PUSTAKA.....	32
PERTEMUAN 4	33
NERACA ENERGI (KONSEP DAN SATUAN)	33
A. TUJUAN PEMBELAJARAN	33
B. URAIAN MATERI	33
1. Neraca Energi (Konsep dan Satuan).....	33
2. Enam Jenis Energi	34
C. SOAL LATIHAN/TUGAS	37
D. DAFTAR PUSTAKA.....	39
PERTEMUAN 5	40
KESETIMBANGAN ENERGI UMUM.....	40
A. TUJUAN PEMBELAJARAN	40
B. URAIAN MATERI	40
C. SOAL LATIHAN/TUGAS	50
D. DAFTAR PUSTAKA.....	52
PERTEMUAN 6	53
PERHITUNGAN PERUBAHAN ENTALPI.....	53
A. TUJUAN PEMBELAJARAN	53
B. URAIAN MATERI	53
1. Perhitungan Perubahan Entalpi	53
2. Persamaan Kapasitas Kalor	54
3. Tabel Nilai Entalpi	60
C. SOAL LATIHAN/TUGAS	63
D. DAFTAR PUSTAKA.....	64
PERTEMUAN 7	65
KESETIMBANGAN ENERGIYANG MEMPERHITUNGAN REAKSI KIMIA	65
A. TUJUAN PEMBELAJARAN	65
B. URAIAN MATERI	65

C. SOAL LATIHAN/TUGAS	74
D. DAFTAR PUSTAKA.....	75
PERTEMUAN 8	77
PROSES REVERSIBEL	77
A. TUJUAN PEMBELAJARAN	77
B. URAIAN MATERI	77
C. SOAL LATIHAN/TUGAS	85
D. DAFTAR PUSTAKA.....	85
PERTEMUAN 9	86
KESETIMBANGAN ENERGI MEKANIS	87
A. TUJUAN PEMBELAJARAN	87
B. URAIAN MATERI	87
C. SOAL LATIHAN/TUGAS	93
D. DAFTAR PUSTAKA.....	94
PERTEMUAN 10.....	95
KALOR PELARUTAN DAN PENCAMPURAN	95
A. TUJUAN PEMBELAJARAN	95
B. URAIAN MATERI	95
C. SOAL LATIHAN/TUGAS	103
D. DAFTAR PUSTAKA.....	103
PERTEMUAN 11.....	104
ANALISIS DERAJAT BEBAS DALAM PROSES KEADAAN TUNAK.....	104
A. TUJUAN PEMBELAJARAN	104
B. URAIAN MATERI	104
C. SOAL LATIHAN/TUGAS	111
D. DAFTAR PUSTAKA.....	112
PERTEMUAN 12.....	113
MEMECAHKAN KESETIMBANGAN MATERI DAN ENERGI MENGGUNAKAN KODE FLOWSHEETING.....	113
A. TUJUAN PEMBELAJARAN	113
B. URAIAN MATERI	113
C. SOAL LATIHAN/TUGAS	125
D. DAFTAR PUSTAKA.....	126

PERTEMUAN 13.....	127
KESETIMBANGAN MATERI DAN ENERGI KEADAAN TIDAK TUNAK.....	127
A. TUJUAN PEMBELAJARAN.....	127
B. URAIAN MATERI	127
C. SOAL LATIHAN/TUGAS	133
D. DAFTAR PUSTAKA.....	133
PERTEMUAN 14.....	135
GRAFIK KELEMPERTEMUANAN DAN PENGGUNAANNYA	135
A. TUJUAN PEMBELAJARAN.....	135
B. URAIAN MATERI	135
C. LATIHAN SOAL / TUGAS	149
D. DAFTAR PUSTAKA.....	149
DAFTAR PUSTAKA.....	149
GLOSSARIUM.....	151

DAFTAR TABEL

Tabel 6.1	Kapasitas kalor gas ideal	57
Tabel 8.1	Efisiensi Energi.....	82
Tabel 10.1	Kalor Pelarutan HCl (25°C dan 1 atm).....	98
Tabel 12.1	Kode <i>Flowsheeting</i>	115
Tabel 12.1	Notasi.....	120
Tabel 14.1	Parameter yang Terlibat dalam Perhitungan Grafik Kelempertemuanan 136	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Diagram alir aliran kompleks.....	1
Gambar 5.1 Sistem aliran putus-putus membatasi subsistem-subsitem....	42
Gambar 5.2 Batasan Sistem	44
Gambar 6.1 Perubahan entalpi untuk unsur murni sebagai fungsi dari suhu...	55
Gambar 8.1 Proses reversibel.....	80
Gambar 8.2 Boiler berbahan bakar gas	83
Gambar 10.1 Kalor pelarutan integral HCl dalam air.....	97
Gambar 10.2 Diagram entalpi konsentrasi untuk n-heptana-n-butana	101
Gambar 10.3 Penerapan diagram enthalpi-konsentrasi.....	102
Gambar 12.1 Aliran Informasi dalam sebuah kode <i>flowsheeting</i>	117
Gambar 12.2 Modul unit operasi terstandar khas dengan simbol air....	123
Gambar 12.3 Separator uap-cairan	124
Gambar 13.1 Proses keadaan tidak tunak umum	129
Gambar 14.1 Pelempertemuan adiabatik dengan daur ulang air	140
Gambar 14.2 Psychrometric chart	142
Gambar 14.3 Semprotan air.....	146

PERTEMUAN 1

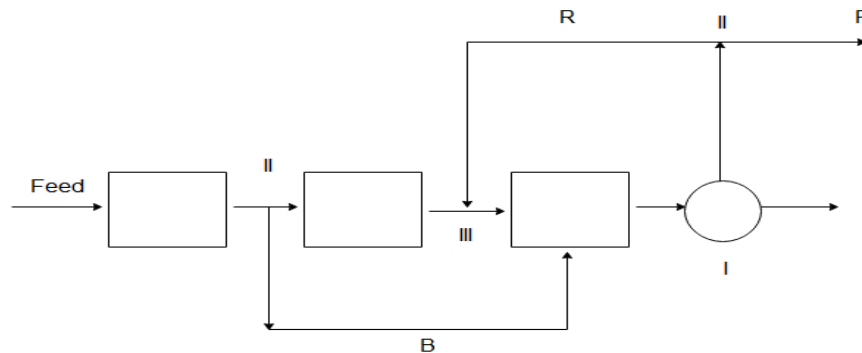
ALIRAN RECYCLE, BYPASS, PURGING

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

Pada pertemuan ini akan dijelaskan mengenai aliran kompleks. Setelah menyelesaikan perkuliahan ini mahasiswa mampu menggambar diagram alir, menjelaskan tujuan dan menghitung neraca massa yang melibatkan aliran kompleks seperti daur ulang, *bypass*, dan pembersihan.

B. URAIAN MATERI

1. Pendahuluan



Gambar 1.1. Diagram alir aliran kompleks

Pada gambar di atas dapat dilihat terdapat beberapa aliran dan alat, berikut akan dijelaskan tiap aliran dan alat yang digunakan:

- Simbol I** adalah alat yang disebut dengan **separator**: alat ini berfungsi untuk memisahkan komposisi tertentu dari suatu aliran sehingga komposisi pada aliran yang dihasilkan berbeda dengan aliran awal.
- Simbol II** adalah alat yang disebut dengan **splitter**: alat ini berfungsi untuk memisahkan aliran tetapi tanpa mengubah komposisi yang terdapat pada aliran sehingga komposisi aliran yang dihasilkan sama dengan komposisi aliran awal.
- Simbol III** adalah alat yang disebut dengan **mixer**: alat ini berfungsi untuk mencampurkan aliran.

- d. **Untuk separator** dan *splitter* bisa terdapat pada aliran yang akan di *purge*, *recycle* ataupun yang akan di *bypass*, tetapi mixer biasanya hanya terdapat pada aliran yang akan dicampur.
- e. **Aliran R** adalah aliran **Recycle (Daur ulang)**, aliran ini berfungsi untuk mengembalikan zat-zat, yang masih dibutuhkan, yang masih terdapat dalam aliran keluar untuk kembali mengalami proses.
- f. **Aliran B** adalah aliran **Bypass**, aliran ini adalah aliran yang melewati satu atau beberapa tahap proses yang langsung menuju pada proses selanjutnya.
- g. **Aliran P** adalah aliran **Purge**, aliran ini adalah aliran pembuangan untuk mengeluarkan akumulasi dari inert atau materi yang tidak diinginkan yang jika tidak dikeluarkan akan tertimbun dalam aliran *Recycle*.

Dalam neraca massa dengan reaksi kimia kita akan menemui istilah ***fraction conversion***, *fraction conversion* yang dimaksud di sini adalah banyaknya jumlah zat yang digunakan dalam suatu proses dibandingkan dengan jumlah input zat tersebut. Faktor konversi dibedakan menjadi 2 jenis yaitu :

- a. Overall Fraction Conversion (Konversi Keseluruhan)

$$\frac{\text{massa (mol) reaktan dalam fresh feed} - \text{massa (mol) reaktan dalam produk akhir}}{\text{massa (mol) reaktan dalam fresh feed}}$$

- b. Single Pass atau Once Through Conversion

$$\frac{\text{massa (mol) reaktan masukan reaktor} - \text{massa (mol) reaktan keluaran reaktor}}{\text{massa (mol) reaktan masukan reaktor}}$$

secara singkat dapat dikatakan bahwa single pass hanya menghitung konversi pada satu alat saja, sedang overall menghitung konversi dalam sistem.

Dalam industri kimia beberapa macam sistem aliran bahan dilakukan dengan tujuan antara lain:

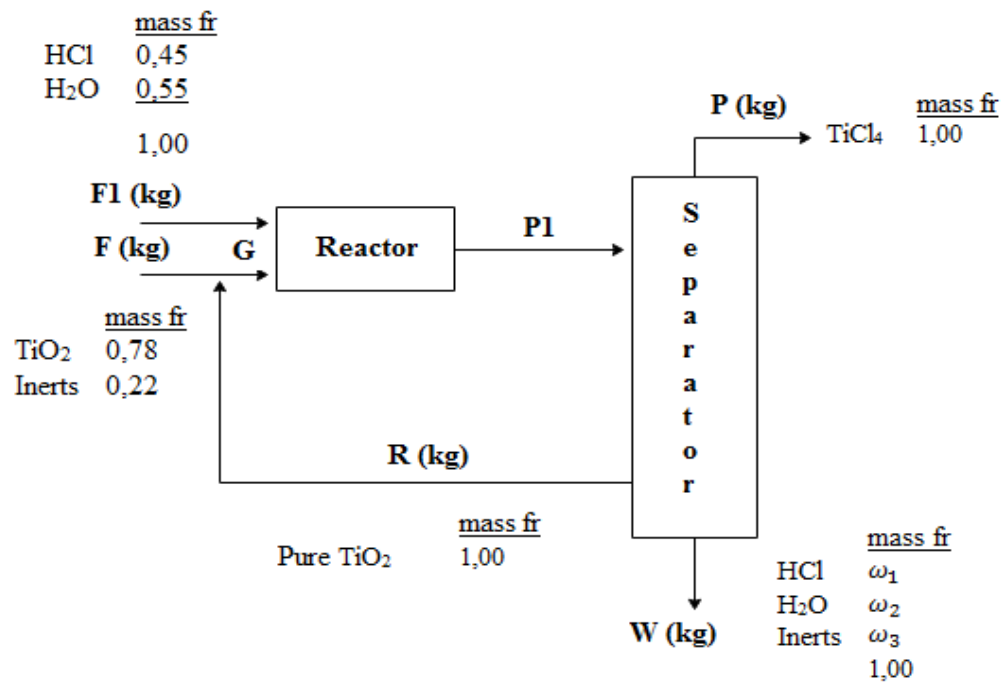
- a. Meningkatkan yield.
- b. Mempertinggi konsentrasi hasil.
- c. Menghemat energi yang dipakai/bahan kimia yang dipakai.
- d. Memperbaiki sistem pengendalian proses.

2. Proses dengan aliran kompleks dijalankan pada proses kontinyu.

Beberapa macam sistem aliran bahan yang dipakai antara lain:

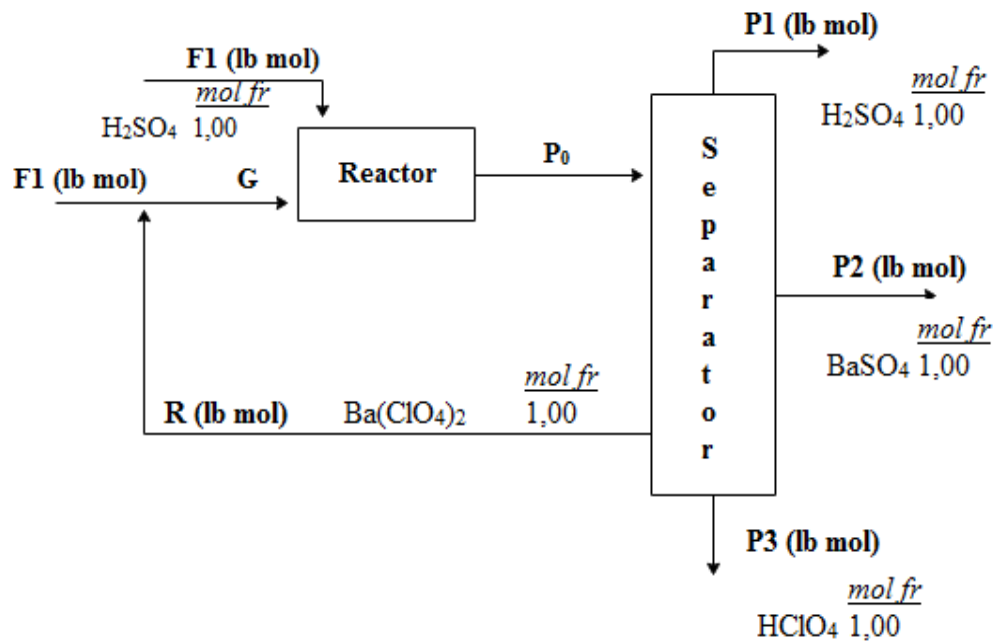
- a. ALIRAN RECYCLE

Contoh : Produksi TiCl_4 dari HCl dan TiO_2 .



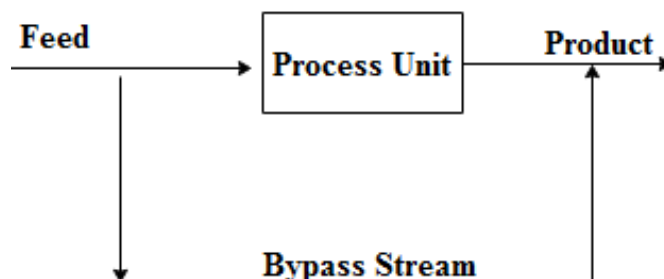
Contoh aliran *recycle* lainnya seperti yang diperlihatkan pada gambar diagram alir proses pada contoh 2 untuk proses pembentukan BaSO_4 dari senyawa H_2SO_4 dan $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$. Bahan baku H_2SO_4 dan $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$ masuk ke sebuah reaktor kemudian terjadi reaksi dan menghasilkan senyawa-senyawa yang dipisahkan pada sebuah separator untuk memisahkan H_2SO_4 , BaSO_4 , HClO_4 dan sebagian $\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2$ dikembalikan / di *recycle* (daur ulang) untu mengoptimalkan hasil. Aliran dengan symbol R menunjukkan aliran yang di daur ulang (*recycle*).

Contoh : Pembentukan BaSO_4 dari H_2SO_4 dan HClO_4



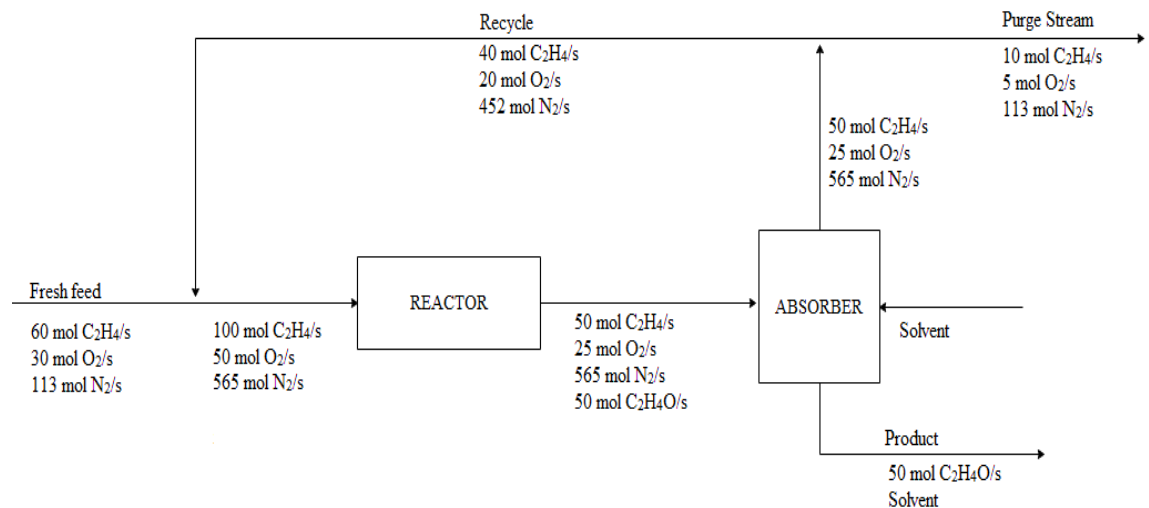
Gambar di atas menunjukkan aliran bypass dimana aliran langsung masuk ke aliran produk tanpa melewati process unit (unit-unit proses tertentu). Contoh aliran recycle lainnya seperti yang diperlihatkan pada gambar diagram alir proses pada contoh 2 untuk proses pembentukan BaSO_4 dari senyawa H_2SO_4 dan $\text{Ba(ClO}_4)_2$. Bahan baku H_2SO_4 dan $\text{Ba(ClO}_4)_2$ masuk ke sebuah reaktor kemudian terjadi reaksi dan menghasilkan senyawa-senyawa yang dipisahkan pada sebuah separator untuk memisahkan H_2SO_4 , BaSO_4 , HClO_4 dan sebagian $\text{Ba(ClO}_4)_2$ dikembalikan / di recycle (daur ulang) untuk mengoptimalkan hasil. Aliran dengan symbol R menunjukkan aliran yang di daur ulang (recycle).

b. ALIRAN BYPASS



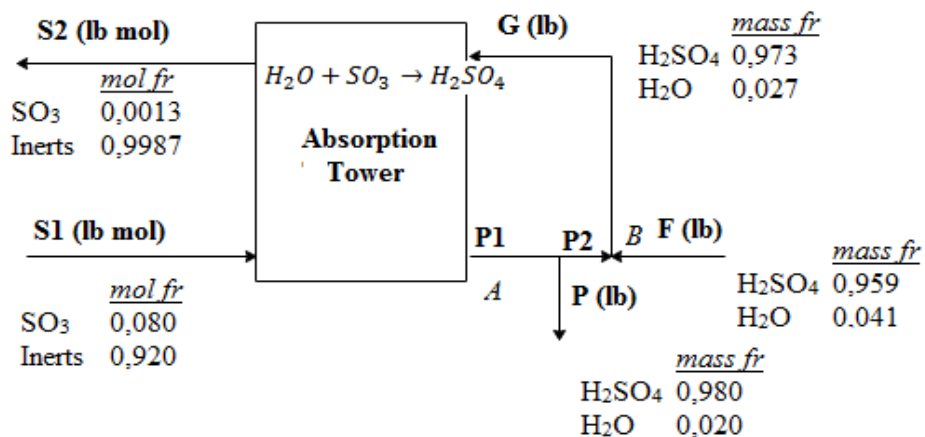
Gambar di atas menunjukkan aliran *purging* atau aliran pembuangan untuk mengeluarkan akumulasi dari inert atau materi yang tidak diinginkan seperti 10 mol C_2H_4 , 5 mol O_2 dan 113 mol N_2 yang jika tidak dikeluarkan akan tertimbun dalam aliran *Recycle* (daur ulang) dan dapat menyepertemukaan gangguan pada proses secara keseluruhan.

c. ALIRAN PURGING



Gambar di atas menunjukkan aliran *purging* atau aliran pembuangan untuk mengeluarkan akumulasi dari inert atau materi yang tidak diinginkan seperti 10 mol C_2H_4 , 5 mol O_2 dan 113 mol N_2 yang jika tidak dikeluarkan akan tertimbun dalam aliran *Recycle* (daur ulang) dan dapat menyepertemukaan gangguan pada proses secara keseluruhan.

d. ALIRAN RECYCLE DENGAN MAKE UP

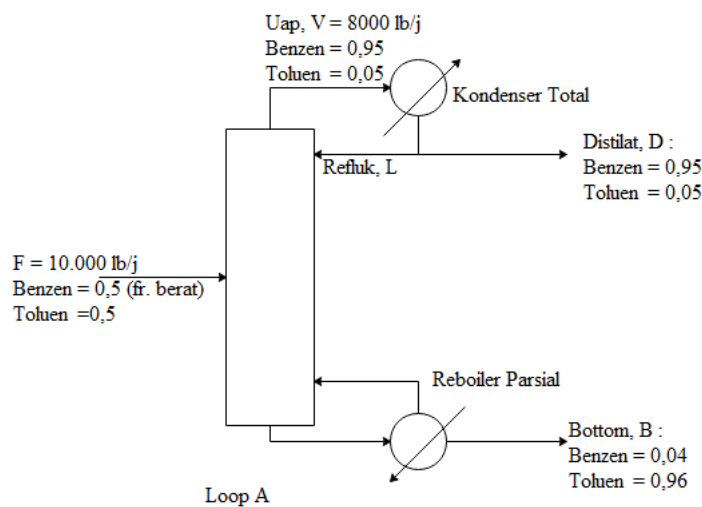


Contoh soal 1:

Kolom distilasi memisahkan 10.000 lb/jam campuran benzen dan 50% toluen. Arus uap masuk kondenser dari bagian atas menara mempunyai kecepatan 8000 lb/jam. Distilat yang diperoleh berisi 95% benzen dan hasil bawah menara berisi 96% toluen. Sejumlah distilat dikembalikan (recycle) ke bagian atas menara sebagai arus refluk. Tentukan rasio arus refluk terhadap arus Distilat.

Penyelesaian :

a. Skema diagram alir :



Catatan : Di sini digunakan kondenser total, berarti :

- Semua Uap V akan terembunkan.
- Komposisi uap = komposisi distilat

Gambar menara distilasi sederhana

Dicari : $R = L/D$

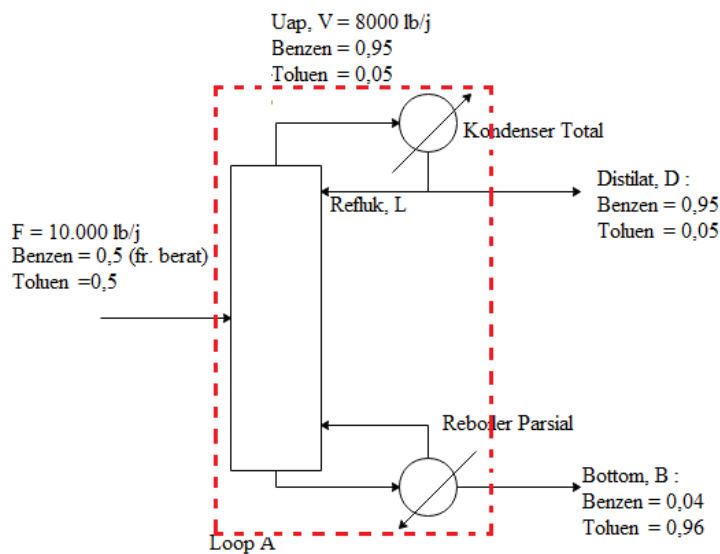
a. Penyusunan Persamaan :

NM Total di sekitar MD (loop A) :

$$\begin{array}{rcl}
 \text{Input} & = & \text{output} \\
 F & = & D + B \\
 10.000 & = & D + B \quad (1)
 \end{array}$$



Lb campuran input/jam Lb campuran output/jam



Gambar menara distilasi sederhana

NM Benzen di sekitar MD (loop A) :

Benzen input = Benzen output

$$10.000 \cdot 0,5 = D \cdot 0,95 + B \cdot 0,04 \quad (2)$$

Jika ditulis satuannya :

$$\frac{lb \text{ umpan}}{jam} \frac{lb \text{ benzen}}{lb \text{ umpan}} = \frac{lb \text{ distilat}}{jam} \frac{lb \text{ benzen}}{lb \text{ distilat}} + \frac{lb \text{ bottom}}{jam} \frac{lb \text{ benzen}}{lb \text{ bottom}}$$

Karena menyusun NM **benzen**, maka setiap suku harus mempunyai satuan yang sama, yaitu **lb benzen/jam**.

Dari persamaan (1) dan (2) nilai D dan B dapat ditentukan.

NM Total disekitar kondenser (loop B) :

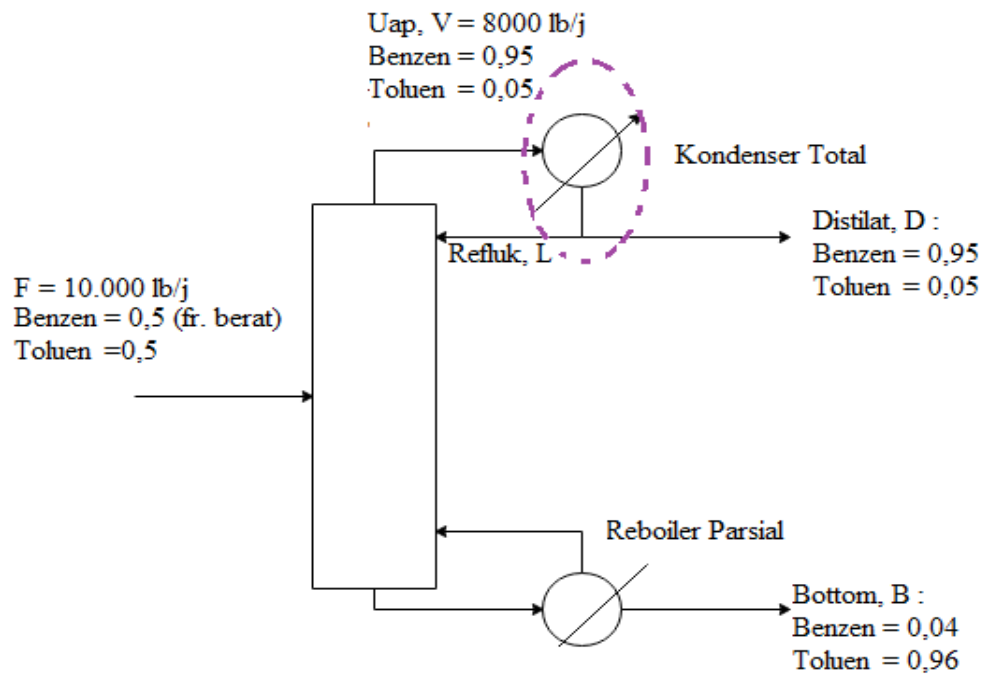
Input = Output

$$V = L + D \quad (3)$$

$$8000 = L + D$$

Nilai D disubstitusi ke pers (3),

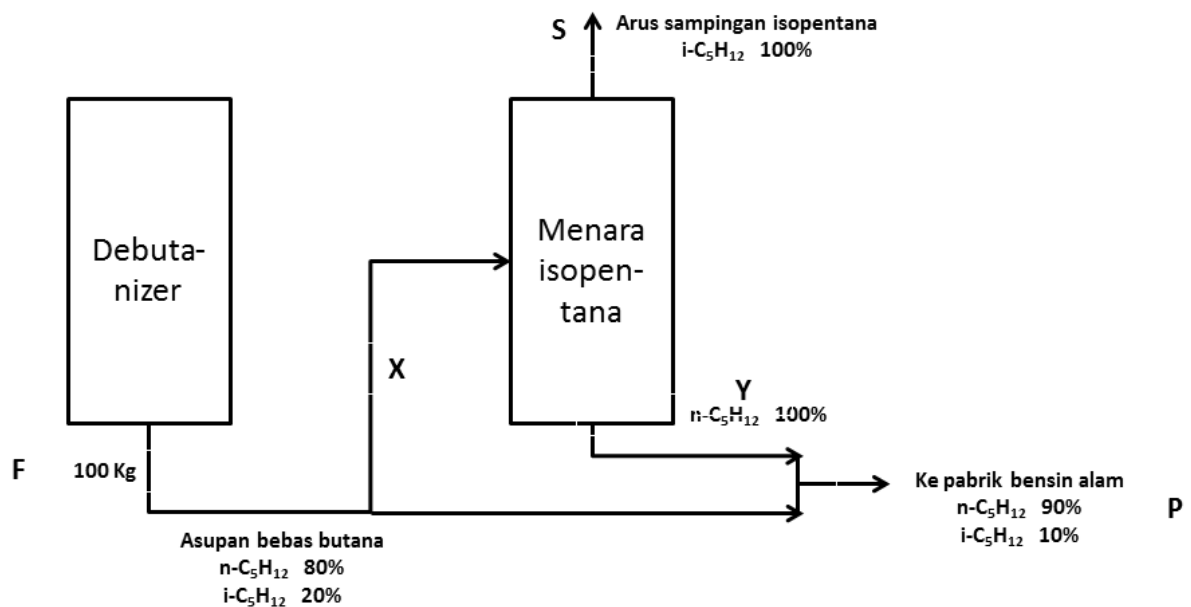
Sehingga L dapat ditentukan.



Gambar menara distilasi sederhana

Maka : Rasio (R) = $L/D = \frac{2950 \text{ kg/jam}}{5050 \text{ kg/jam}}$
 $= 0,58$

Contoh Soal 2 :



Gambar di atas adalah diagram alir bagian pembuatan *feedstock* dari pabrik yang membuat bensin alam, dimana isopentana dihilangkan dari bensin bebas butana.

Tentukan Fraksi dari bensin bebas butana (x) tersebut yang lewat melalui menara isopentana ?

Penyelesaian :

Basis : 100 kg Asupan

Neraca Massa Total :

Masuk = Keluar

100 = S + P

Neraca Massa Komponen :

Masuk = Keluar

$100 \times (0,8) = (S \times 0) + (P \times 0,9)$

Sehingga,

$$P = 100 \times \frac{0,8}{0,9} = 88,9 \text{ kg}$$

$$S = 100 - 88,9 = 11,1 \text{ kg}$$

Neraca Massa di sekitar Menara Isopentana :

Misalkan x = massa (kg) gas bebas butana yang masuk ke dalam Menara isopentana dan y adalah

massa (kg) aliran n-C₅H₁₂ yang meninggalkan menara isopentana.

Neraca massa total :

Masuk = Keluar

$$x = 11,1 + y \dots \dots \dots (1)$$

Neraca massa komponen (n-C₅) :

$$x (0,8) = y \dots \dots \dots (2)$$

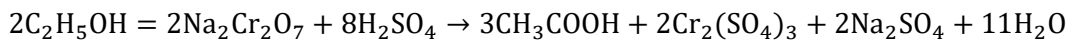
Sehingga,

Nilai x dapat ditentukan dengan menggabungkan persamaan (1) dan (2) :

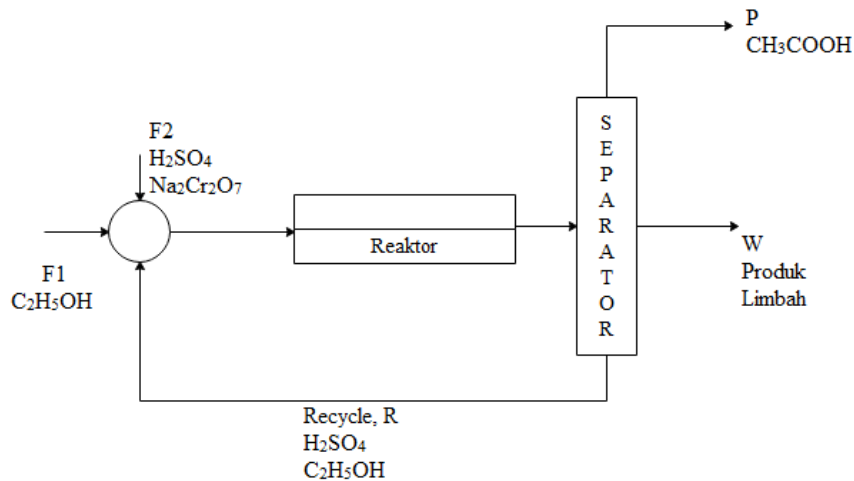
$$x = 55,5 \text{ kg}$$

C. SOAL LATIHAN/TUGAS

1. Asam asetat dapat diproduksi melalui reaksi berikut :

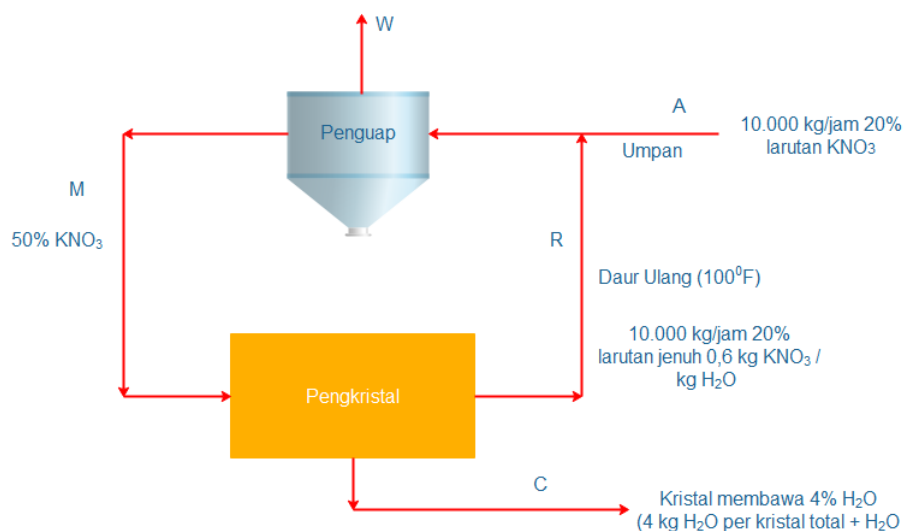


Reaksi berlangsung dalam sistem dengan recycle seperti digambarkan dalam diagram berikut :

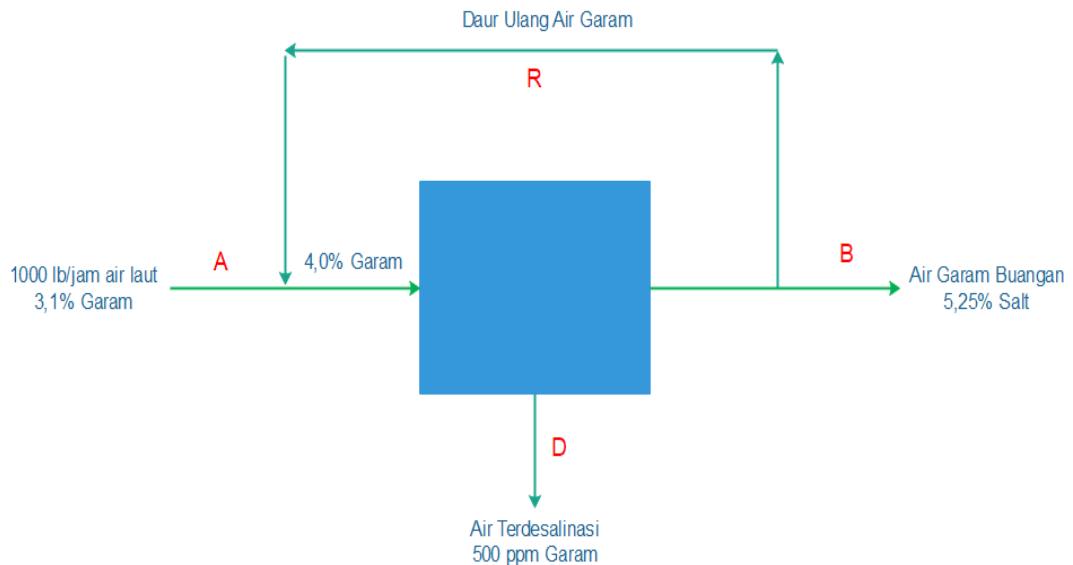


Konversi etanol *overall* sebesar 90% dicapai jika laju alir *recycle* sama dengan laju umpan segar $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Laju umpan segar H_2SO_4 dan $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ masing-masing berlebih 20% dan 10% secara stoikiometrik terhadap jumlah umpan segar $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Jika aliran recycle mengandung 94% H_2SO_4 dan sisanya $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (% dalam mol), hitunglah:

- Laju alir produk (P)
 - Laju alir dan komposisi produk limbah (W)
 - Konversi *single pass reactor* etanol
2. Berapakah kuantitas dari arus daur ulang (R) dalam kg/jam ?



3. Air laut akan dihilangkan garamnya dengan osmosa balik (*reverse osmosis*) menggunakan skema yang ditunjukkan pada gambar berikut ini. Gunakan data yang diberikan dalam gambar tersebut untuk menentukan :
- Laju penghilangan larutan garam buangan (B).
 - Laju produksi air tanpa garam (disebut air yang dapat diminum) (D).
 - Fraksi dari larutan garam yang meninggalkan sel osmosa (yang pada dasarnya bertindak sebagai separator) yang di daur ulang.



4. Suatu materi yang mengandung 71% air dan 29% padatan dimasukkan ke dalam sebuah granulator pada laju sebesar 5.250 kg/jam. Masukan tersebut dicampur terlebih dahulu (*premixed*) dalam granulator dengan produk daur ulang dari pengering yang mengikuti granulator tersebut (untuk mengurangi konsentrasi air dari materi keseluruhan dalam granulator menjadi 47% air dan 53% padatan). Produk yang meninggalkan pengering adalah 15,33% air. Dalam pengering, udara dilewatkan di atas padatan yang sedang dikeringkan. Udara yang memasuki pengering mengandung 3,2% air berdasar berat (massa), dan udara yang meninggalkan pengering mengandung 6,1% air berdasar berat (massa). Tentukan :
- Berapa rasio daur ulang ke granulator ?
 - Berapa laju alir udara ke pengering pada basis kering ?

D. DAFTAR PUSTAKA

Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.

Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.

Distantina S. 2001. Diktat Pendahuluan Neraca Massa.

PERTEMUAN 2

GAS, UAP, CAIRAN DAN PADATAN

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

Pada pertemuan ini akan dijelaskan mengenai konversi dan faktor konversi, Anda harus mampu:

1. Menulis hukum gas ideal, dan mendefinisikan semua variabel dan parameternya dan dimensi yang terkait.
2. Menghitung nilai dan satuan dari konstanta gas ideal R dalam kumpulan satuan mana pun dari kondisi standar.
3. Mengubah volume gas menjadi mol (dan massa), dan sebaliknya.
4. Memecahkan keseimbangan materi yang melibatkan gas-gas.

B. URAIAN MATERI

1. Hukum Gas Ideal

Gas ideal adalah gas imajiner yang memenuhi persamaan:

$$P V = n R T$$

Dengan :

P = tekanan

V = volume total gas

n = jumlah gas mol

R = konstanta gas ideal

T = suhu dalam Kelvin

Persamaan ini dapat diterapkan untuk komponen murni atau campuran. Sejumlah keadaan standar yang ditentukan secara sembarang atau yang dikenal dengan *standard condition* dari suhu dan tekanan ditentukan untuk mengetahui nilai R, jadi kenyataan bahwa sebuah unsur tidak berwujud gas pada 0°C dan 1 atm (dalam keadaan standar) tidaklah penting. Sebagai contoh uap air pada 0°C tidak dapat berada dalam tekanan yang lebih besar dari 0,61 kPa tanpa terjadi pengembunan.

2. Penggunaan Kondisi Standar

Contoh Soal 1 :

Hitunglah volume dalam meter kubik yang ditempati oleh 55 kg CO₂ pada kondisi standar.

Penyelesaian :

Diketahui :

Massa CO₂ = 55 kg

Berat molekul = 44 kg/kgmol

Densitas CO₂ pada kondisi standar (temperatur normal) = 1,842 kg/m³

Ditanyakan :

Volume (meter kubik)

$$\rho = m/v$$

$$v = m/\rho$$

$$\begin{aligned} \text{Volume} &= \text{massa CO}_2 / \text{Densitas CO}_2 \\ &= 55 \text{ kg} / 1,842 \text{ kg/m}^3 \\ &= 29,86 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Contoh Soal 2 :

Carilah nilai untuk konstanta gas universal R untuk kombinasi satuan berikut ini :

Untuk 1 gmol gas ideal jika :

- Tekanan dalam satuan atm.
- Volume dalam satuan cm³.
- Suhu dalam satuan K.

Penyelesaian :

Pada kondisi standar :

P = 1 atm

$\hat{v}$ = 22.415 cm³/gmol

T = 273,15 K

$$R = \frac{P \hat{v}}{T} = \frac{1 \text{ atm}}{273,15 \text{ K}} \times \frac{22,415 \text{ cm}^3}{1 \text{ gmol}}$$

$$= 81,06 \frac{(cm^3)(atm)}{(K)(gmol)}$$

3. Penerapan Hukum Gas Ideal

Hukum gas ideal dapat digunakan untuk menentukan volume, tekanan, atau suhu suatu zat dalam keadaan tertentu.

Contoh Soal 3 :

Berapakah densitas O₂ pada 27°C dan 250kPa dalam satuan SI ?

$$27^{\circ}\text{C} = 300 \text{ K}$$

$$R = 0,008314 \text{ kPa m}^3/\text{mol K}$$

$$\text{Basis} = 1 \text{ m}^3 \text{ gas O}_2$$

$$PV = nRT \Leftrightarrow \frac{V}{n} = \frac{RT}{P} \Leftrightarrow \frac{V}{\text{kg/kmol}} = \frac{RT}{P}$$

$$\frac{1 \text{ m}^3}{\text{kg}/32\text{kg/kmol}} = \frac{8,314 \text{ kPa} \frac{\text{m}^3}{\text{kmol K}} \cdot 300 \text{ K}}{250 \text{ kPa}}$$

$$\text{Massa O}_2 = 3,2 \text{ kg}$$

$$\text{Densitas O}_2 = 3,2 \text{ kg/1 m}^3$$

$$\text{Densitas O}_2 = 3,2 \text{ kg/m}^3$$

Densitas dari suatu gas (*density of a gas*) didefinisikan sebagai massa per satuan volum dan dapat dinyatakan dalam kilogram per meter kubik, lb per kaki kubik, gram per liter, atau satuan-satuan lainnya. Karena massa yang terkandung dalam satu satuan volume bervariasi dengan suhu dan tekanan, densitas selalu dianggap berada pada kondisi standar (*Standard Condition*).

Berat jenis dari suatu gas (*specific gravity of gas*) biasanya didefinisikan sebagai rasio dari densitas gas tersebut pada suhu dan tekanan yang diinginkan terhadap densitas udara (atau gas referensi yang ditentukan) pada suhu dan tekanan tertentu. Penggunaan berat jenis adakalanya mungkin membingungkan yang disepertemukaan oleh cara dengan nilai berat jenis dilaporkan dalam literatur. Anda harus sangat berhati-hati dalam menggunakan nilai literatur (referensi) berat jenis untuk memastikan bahwa kondisi suhu dan tekanan diketahui baik untuk gas yang ditanyakan dan untuk gas referensi.

Jika muncul pertanyaan : *Berapakah berat jenis propana ?*

Sebenarnya pertanyaan ini mungkin memiliki jawaban yang sama seperti pertanyaan : *Berapa banyak kelengkeng yang terdapat dalam satu ikat ?* Sayangnya, kadang-kadang seseorang mungkin menemui pertanyaan semacam ini, dan jawaban yang paling tepat adalah :

$$\text{berat jenis} = \frac{\text{densitas propana pada kondisi standar}}{\text{densitas udara pada kondisi standar}}$$

Dengan suhu dan tekanan dari propana dan udara referensi ditentukan dengan jelas.

Contoh Soal 4 :

Berapakah berat jenis N_2 pada $80^\circ F$ dan 745 mmHg dibandingkan dengan udara pada $80^\circ F$ dan 745 mmHg ?

Penyelesaian :

Pertama, anda harus memperoleh densitas dari N_2 dan udara pada kondisi suhu dan tekanannya masing-masing. Kemudian anda menghitung berat jenis dengan mengambil rasio dari densitas mereka.

Udara :

Basis : 1 ft³ udara pada $80^\circ F$ dan 745 mmHg

$$\frac{1}{28} \times \frac{492}{540} \times \frac{745}{760} \times \frac{29}{359} = 0,0721 \frac{lb}{ft^3} \text{ (pada } 80^\circ F \text{ dan } 745 \text{ mmHg)}$$

Gas N_2 :

Basis : 1 ft³ N_2 pada $80^\circ F$ dan 745 mmHg

$$\frac{1}{28} \times \frac{492}{540} \times \frac{745}{760} \times \frac{28}{359} = 0,0697 \frac{lb}{ft^3} \text{ (pada } 80^\circ F \text{ dan } 745 \text{ mmHg)}$$

$$(\text{berat jenis})_{N_2} = \frac{0,0697}{0,0721} = 0,967 \frac{lb N_2/ft^3}{lb udara/ft^3}$$

Contoh Soal 5 :

Berapakah berat jenis O_2 pada $80^\circ F$ dan 745 mmHg dibandingkan dengan udara pada $80^\circ F$ dan 745 mmHg ?

Penyelesaian :

Pertama, anda harus memperoleh densitas dari O_2 dan udara pada kondisi suhu dan tekanannya masing-masing. Kemudian anda menghitung berat jenis dengan mengambil rasio dari densitas mereka.

Udara :

Basis : 1 ft^3 udara pada $80^\circ F$ dan 745 mmHg

$$\frac{1}{29} \times \frac{492}{540} \times \frac{745}{760} \times \frac{359}{359} \times \frac{29}{29} = 0,0721 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \text{ (pada } 80^\circ F \text{ dan } 745 \text{ mmHg)}$$

Gas O_2 :

Basis : 1 ft^3 O_2 pada $80^\circ F$ dan 745 mmHg

$$\frac{1}{32} \times \frac{492}{540} \times \frac{745}{760} \times \frac{359}{359} \times \frac{32}{32} = 0,07961 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \text{ (pada } 80^\circ F \text{ dan } 745 \text{ mmHg)}$$

$$(\text{berat jenis})_{N_2} = \frac{0,07961}{0,0721} = 1,1041 \frac{\text{lb } O_2/\text{ft}^3}{\text{lb udara}/\text{ft}^3}$$

4. Campuran Gas Ideal dan Tekanan Gas Parsial

Dalam kehidupan sehari-hari, gas biasanya berada dalam suatu campuran dengan gas lain. Dalam keadaan seperti ini anda tetap dapat menggunakan hukum gas ideal. Biasanya kita menggunakan kuantitas khayalan yang disebut tekanan parsial. Tekanan parsial dari gas i didefinisikan sebagai P_i .

Jadi hukum gas idealnya menjadi :

$$P_i V_{\text{total}} = n_i R T$$

$$\text{Atau } P_i = P_{\text{total}} \times \frac{n_i}{n_{\text{total}}} = P_i \times Y_i$$

Dimana Y_i = Fraksi mol zat i

Contoh Soal 6 :

Udara di bumi terdiri dari 21% (%V) oksigen dan 79% nitrogen. Tekanan parsial oksigen 21 kPa, berapakah tekanan total udara ?

$$P_{O_2} = 21 \text{ kPa}$$

$$Y_{O_2} = 0,21$$

$$P_{\text{total}} = \frac{P_{O_2}}{Y_{O_2}} = \frac{21 \text{ kPa}}{0,21} = 100 \text{ kPa}$$

Contoh Soal 7 :

Hasil analisa Sebuah gas pipa mengandung 14,0% CO_2 , 6,0% O_2 , dan 80% N_2 . Gas tersebut berada pada 400°F dan tekanan 765,0 mmHg. Hitunglah tekanan parsial dari setiap komponen !

Penyelesaian :

Persamaan yang digunakan :

$$P_i = P_t y_i$$

Basis : 1,00 kg (atau lb) mol gas pipa

Komponen	Kg (atau lb) mol	P (mmHg)
CO_2	0,140	107,1
O_2	0,060	45,9
N_2	0,800	612,0
Total	1,000	765,0

Pada basis 1,00 mol gas pipa, fraksi mol y_i dari setiap komponen, ketika dikalikan dengan tekanan total memberikan tekanan parsial dari komponen itu.

Contoh Soal 8 :

Hasil analisa 100 lbmol gas pipa mengandung 11,0% CH_4 , 7,0% C_2H_6 , 3,0% C_3H_8 , 5,0% O_2 , dan 74% N_2 . Gas tersebut berada pada 400°F dan tekanan 780,7 mmHg. Hitunglah tekanan parsial dari setiap komponen !

Penyelesaian :

Persamaan yang digunakan :

$$P_i = P_t y_i$$

Basis : 100 lbmol gas pipa

Komponen	Fraksi Mol	P (mmHg)
CH ₄	0,110	85,877
C ₂ H ₆	0,070	54,649
C ₃ H ₈	0,030	23,421
O ₂	0,050	39,035
N ₂	0,740	577,718
Total	1,000	780,7

Pada basis 100 lbmol gas pipa, fraksi mol y dari setiap komponen, ketika dikalikan dengan tekanan total memberikan tekanan parsial dari komponen itu.

Contoh Soal 9 :

Gas pada 15°C dan 105 kPa mengalir melalui pipa tidak beraturan. Untuk menentukan laju aliran gas, CO₂ dari tangka dilewatkan ke dalam arus gas. Hasil analisa gas 1,2% CO₂ berdasar volume sebelum penambahan, dan 3,4% CO₂ berdasar volume setelah penambahan CO₂ yang meninggalkan tangki, dilewatkan melalui sebuah rotameter, dan mengalir pada laju sebesar 0,0917 m³/menit pada 7°C dan 131 kPa. Beberapa laju aliran gas yang memasuki pipa dalam meter kubik per menit ?

Penyelesaian :

Masalah ini adalah keadaan tunak tanpa reaksi.

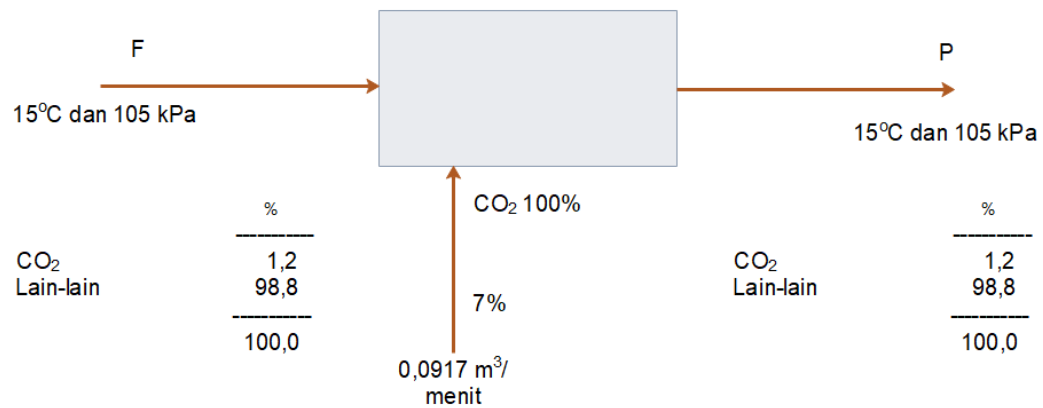
Langkah 1, 2, 3, dan 4

Asusmsikan bahwa gas yang masuk dan keluar berada pada suhu dan tekanan yang sama.

Langkah 5

Ambil sebagai basis 1 menit $\equiv$ 0,0917 m³ CO₂ pada 7°C dan 131 kPa. Analisis gas ialah dalam persen, yang sama dengan persen mol. Kita dapat mengubah 0,0917 m³ menjadi mol dan menyelesaikan soal ini dalam mol, tetapi tidak ada keharusan untuk melakukan hal ini karena kita dengan kemudahan yang sama dapat

mengubah laju alir yang diketahui menjadi 15°C dan 105 kPa, dan menyelesaikan soal ini menggunakan m³ semua data menjadi 7°C dan 131 kPa, tetapi lebih banyak perhitungan akan diperlukan daripada untuk 15°C dan 105 kPa.



$$\frac{0,0917 \text{ m}^3}{\text{menit}} \times \frac{273 + 15}{273 + 7} \times \frac{131}{106} = 0,1177 \text{ m}^3 \text{ pada } 15^\circ\text{C dan } 105 \text{ kPa}$$

Langkah 6 dan 7 :

Kita tidak mengetahui F dan P, tetapi dapat membuat dua keseimbangan komponen independen, karenanya masalah ini mempunyai satu pemecahan yang unik.

Langkah 7,8, dan 9 :

- Keseimbangan “lain” (m³ pada 15°C dan 105 kPa); F(0,988) = P(0,966)
- Keseimbangan CO₂ (m³ pada 15°C dan 105 kPa); F(0,012) + 0,1177 = P(0,034)
- Keseimbangan total (m³ pada 15°C dan 105 kPa); F + 0,1177 = P

Perhatikan bahwa kata “lain” adalah komponen penghubung. Penyelesaian dari poin a dan c memberikan :

F = 5,15 m³/menit pada 15°C dan 105 kPa.

Langkah 10 (Periksa) :

Menggunakan persamaan pada poin b :

$$F(0,012) + 0,1177 = P(0,034)$$

$$5,1 (0,012) + 0,1177 = 0,180 = 5,17 (0,998/0,966)(0,034) = 0,180$$

Persamaan tersebut diatas memeriksa sampai pada tingkat ketelitian yang memuaskan.

C. SOAL LATIHAN/TUGAS

1. Tulislah hukum gas ideal
2. Apa dimensi dari T , p , V , n dan R ?
3. Sebutkan kondisi standar untuk suatu gas dalam system satuan SI dan American Engineering !
4. Hitunglah volume dalam meter kubik yang ditempati oleh 40 kg CO_2 pada kondisi standar !
5. Carilah nilai untuk konstanta gas universal R untuk kombinasi satuan berikut ini : untuk 12,5 kg mol gas ideal jika tekanan dalam bar, volume dalam ft^3 , dan suhu dalam $^\circ\text{C}$!
6. Suatu gas yang diproduksi dengan menggasifikasi potongan-potongan kayu mempunyai analisis 7,5% CO_2 , 0,23% CH_4 , dan 2,75% N_2 . Gas tersebut memasuki ruang pembakaran pada 90°F dan tekanan sebesar 37 in Hg dan dibakar dengan 36% kelebihan udara (kering) yang berada pada 70°F dan tekanan atmosferik sebesar 31 in Hg; 11% dari CO tetap tak terbakar. Tentukan :
 - a. Berapa kaki kubik udara yang dipasok per ft kubik gas yang masuk ?
 - b. Berapa kaki kubik produk yang dihasilkan per kaki kubik gas keluaran berada pada 31 in Hg dan 410°F ?
7. Suatu gas mempunyai komposisi berikut pada 123°F dan tekanan 14,9 psia.

Komponen	% Mol
N_2	5
CH_4	73
C_2H_6	22

- a. Berapa tekanan parsial dari setiap komponen ?
 - b. Berapa fraksi volum dari setiap komponen ?
8. Dari soal nomor 7 :
 - a. Jika C_2H_6 dihilangkan, menjadi berapakah tekanan dalam wadah yang menampung gas tersebut ?
 - b. Berapakah tekanan parsial gas N_2 berikutnya ?
 - c. Berapakah juga fraksi volum tiap komponennya ?
 9. Suatu gas pipa mengandung 62% N_2 dan dicampur dengan udara. Jika campuran yang dihasilkan mengalir pada laju 237.000 ft^3/jam dan mengandung 71,5% N_2 . Berapa laju alir dari gas pipa tersebut ? (Nyatakan semua asumsi yang anda buat menyangkut suhu dan tekanan dari arus gas).

10. Sebuah tungku pembakaran dibakar dengan 1200 ft^3 per jam pada suhu 65°F dan tekanan 1 atm gas alam yang mempunyai analisis volumetric sebagai berikut:

- a. CH_4 77%
- b. C_2H_6 15%
- c. O_2 3,2 %
- d. CO_2 2,8%
- e. N_2 2%

Suhu gas pipa yang keluar ialah 810°F dan tekanannya adalah 775 mmHg absolut. Digunakan kelebihan 17% udara dan pembakaran tersebut sempurna.

Hitunglah :

- a) Volume CO_2 yang dihasilkan per jam.
- b) Volume uap H_2O yang dihasilkan per jam
- c) Volume N_2 yang dihasilkan per jam.
- d) Volume total gas pipa yang dihasilkan per jam.

D. DAFTAR PUSTAKA

Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.

Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.

PERTEMUAN 3

KEJENUHAN (SATURATION)

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

Pada pertemuan ini akan dijelaskan mengenai persamaan kimia dan stoikiometri, Anda harus mampu:

1. Mendefinisikan gas jenuh.
2. Menghitung tekanan parsial dari komponen-komponen gas jenuh ideal dengan diberikan kombinasi dari suhu, tekanan, volume dan/atau jumlah mol yang ada, atau menghitung jumlah mol uap.
3. Menentukan suhu pengembunan (titik embun) uap dalam suatu gas jenuh dengan diberikan tekanan, volume, dan/atau jumlah mol.

B. URAIAN MATERI

1. Kejenuhan (Saturation)

Kejenuhan adalah suatu keadaan setimbang daimana saat tekanan parsial dalam gas sama dengan tekanan uap cairan tersebut, dalam keadaan ini tidak ada lagi zat cair yang menguap atau gas yang mengembun. Pada saat titik jenuh tercapai kita dapat menyatakan bahwa zat tersebut berada dalam titik embun (*dew point*).

Dengan mengasumsikan bahwa sistem gas ideal berlaku pada saat jenuh maka kita dapat menuliskan hubungan tekanan (P) gas dengan tekanan (P) cairan dalam keadaan jenuh sebagai berikut :

$$\frac{P_{gas} V}{P_{cair} V} = \frac{n_{gas} RT}{n_{cair} RT}$$

Atau

$$\frac{P_{gas}}{P_{cair}} = \frac{n_{gas}}{n_{cair}} = \frac{P_{gas}}{P_{total} - P_{gas}}$$

2. Kejenuhan Parsial Dan Kelempertemuanan

Kejenuhan parsial adalah kondisi dimana uap tidak berada dalam ekuilibrium dengan fase cair, dan tekanan parsial uap lebih kecil daripada tekanan uap cairan pada suhu tertentu.

Ketika uap adalah uap air dan gas adalah udara, berlaku istilah khusus **kelempertemuanan** (*humidity*). Untuk gas atau uap lainnya digunakan istilah **kejenuhan** (*saturation*).

3. Kejenuhan relatif (relative saturation)

Kejenuhan relatif didefinisikan sebagai :

$$Rs = \frac{P_{uap}}{P_{jenuh}} \text{ Kejenuhan relatif}$$

Dengan:

P_{uap} = Tekanan parsial uap dalam campuran gas

P_{jenuh} = Tekanan parsial uap dalam campuran gas jika gas jenuh pada suhu campuran yang diberikan (yaitu tekanan uap dari komponen uap)

Untuk Ringkasnya

$$Rs = \frac{P_{uap}}{P_{jenuh}} = \frac{P_{uap} P_t}{P_{jenuh} P_t} = \frac{V_{uap}/V_t}{V_{jenuh}/V_t} = \frac{n_t}{n_{jenuh}} = \frac{massa_i}{massa_{jenuh}}$$

4. Kejenuhan Molal

Kejenuhan Molal adalah cara lain untuk menyatakan konsentration uap dalam gas adalah menggunakan rasio mol uap terhadap mol gas bebas uap:

Kejenuhan molal $\frac{n_{uap}}{n_{gas \text{ bebas uap}}}$. N = mol

Untuk suatu sistem biner dimana 1 menunjukkan uap dan 2 menunjukkan gas kering:

$$P_1 + P_2 = P_{total}$$

$$n_1 + n_2 = n_{total}$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{P_1}{P_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_{total} - n_1} = \frac{P_1}{P_{total} - P_1} = \frac{V_1}{V_{total} - V_1}$$

Kelembapan atau Humidity (H) menunjukkan massa uap cair per massa udara kering (bonedry air)

$$H = \frac{(n_{\text{uap}}) \times (M_{\text{r uap}})}{(n_{\text{gas kering}}) (M_{\text{r gas kering}})} = \frac{\text{massa}_{\text{uap}}}{\text{massa}_{\text{gas kering}}}$$

Kejenuhan (kelembaban) “ Absolut”, Presentase kejenuhan (kelembaban).

Kejenuhan “Absolut” didefinisikan sebagai rasio mol uap per mol gas bebas-uap terhadap mol uap yang akan ada per mol gas bebas uap jika campuran tersebut jenuh secara sempurna pada suhu dan tekanan total yang ada.

$$As = \text{“ Kejenuhan Absolut”} = \frac{\left[\frac{\text{mol uap}}{\text{mol gas bebas uap}} \right] \text{sebenarnya}}{\left[\frac{\text{mol uap}}{\text{mol gas bebas uap}} \right] \text{jenuh}}$$

Dengan 1 untuk uap dan 2 untuk gas bebas uap

Persen kejenuhan absolut =

$$\frac{\left(\frac{n_1}{n_2} \right) \text{sebenarnya}}{\left(\frac{n_1}{n_2} \right) \text{jenuh}} \times (100) = \frac{\left(\frac{P_1}{P_2} \right) \text{sebenarnya}}{\left(\frac{P_1}{P_2} \right) \text{jenuh}} \times (100)$$

Titik Embun. Selama gas yang jenuh secara parsial mendingin pada volume konstan, ataupun pada tekanan total konstan, gas yang tak dapat mengembun akhirnya menjadi jenuh dengan uap, dan uap tersebut mulai mengembun. Suhu pengembunan dimulai pada titik embun (dew point).

Contoh Soal 1:

Berapa jumlah minimum meter kubik udara kering pada 20°C dan 100 kPa yang diperlukan untuk menguapkan 6 kg etil alkohol jika tekanan total tetap konstan pada 100 kPa dan suhu tetap 20°C ? Asumsikan bahwa udara tersebut ditiupkan melalui alkohol untuk menguapkannya sedemikian rupa sehingga tekanan yang keluar dari campuran udara-alkohol adalah pada 100 kPa.

Penyelesaian:

Diasumsikan bahwa proses tersebut adalah isothermal (suhu tetap).

P_{alkohol} pada 20°C = 5,93 kPa

Berat molekul etil alkohol = 46,07

Volume udara minimum memerlukan campuran jenuh; kondisi apa pun yang kurang dari jenuh akan membutuhkan udara lebih.

Basis : 6 kg etil alkohol

Rasio mol etil alkohol terhadap mol udara dalam campuran gas akhir sama dengan rasio tekanan parsial dari dua unsur ini. Karena kita mengetahui mol alkohol, maka kita dapat menentukan jumlah mol udara.

$$\frac{p_{\text{alkohol}}}{p_{\text{udara}}} = \frac{n_{\text{alkohol}}}{n_{\text{udara}}}$$

dan segera setelah kita mengetahui jumlah mol udara, maka kita dapat menerapkan hukum gas ideal. Karena $P_{\text{alkohol}} = 5,93 \text{ kPa}$.

$$\frac{6 \text{ kg alkohol}}{46,07 \text{ kg alkohol}} \times \frac{1 \text{ kgmol alkohol}}{46,07 \text{ kg alkohol}} \times \frac{94,07 \text{ kgmol udara}}{5,93 \text{ kgmol alkohol}} = 2,07 \text{ kgmol udara}$$

$$V_{\text{udara}} = \frac{2,07 \text{ kgmol udara}}{1} \times \frac{8,314 \text{ (kPa)(m}^3\text{)}}{(1 \text{ kgmol})(K)} \times \frac{293 \text{ K}}{100 \text{ kPa}}$$

$$V_{\text{udara}} = 50,3 \text{ m}^3 \text{ pada } 20^\circ\text{C dan } 100 \text{ kPa}$$

Contoh Soal 2:

Kelompok penyelesaian masalah polusi lokal telah melaporkan pabrik boiler AXYB Co. sebagai pencemar udara dan telah memberikan sebagai bukti foto dari emisi berat cerobong asap selang 20 hari yang berbeda. Sebagai kepala Teknik AXYB Co., anda mengetahui bahwa pabrik anda bukan sumber polusi karena anda membakar gas alam (terutama metana) dan pabrik boiler anda beroperasi dengan benar. Atasan anda yakin bahwa kelompok penyelesaian masalah polusi telah membuat kesalahan dalam mengidentifikasi cerobong tersebut. Cerobong tersebut pasti milik perusahaan tetangga yang membakar batu bara. Apakah ia benar ? Apakah kelompok penyelesaian polusi tersebut benar ?

Penyelesaian :

Metana (CH_4) mengandung 2 kgmol H_2 per kilogram mol C, sedangkan batu bara mengandung 71 kg C per 5,6 kg H_2 dalam 100 kg batu bara. Analisis batu bara ekuivalen dengan :

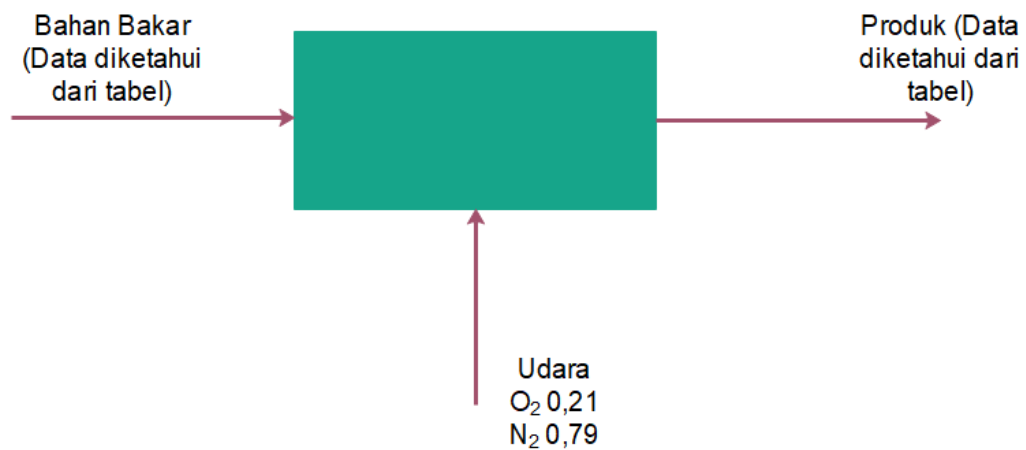
$$\frac{71 \text{ kg C}}{12 \text{ kg C}} \times \frac{1 \text{ kgmol C}}{12 \text{ kg C}} = 5,92 \text{ kgmol C}$$

$$\frac{5,6 \text{ kg H}_2}{2,016 \text{ kg H}_2} \times \frac{1 \text{ kgmol H}_2}{2,016 \text{ kg H}_2} = 2,78 \text{ kgmol H}_2$$

Atas rasio $2,78/5,92 = 0,47$ kgmol H_2 /kgmol C. Andaikan bahwa tiap bahan bakar tersebut dibakar dengan 40% kelebihan udara dan bahwa pembakarannya sempurna. Kita dapat menghitung fraksi mol uap air dalam tiap gas cerobong.

Langkah 1, 2, 3, dan 4 :

Proses ditunjukkan pada Diagram Alir Proses.



Langkah 5 :

Basis : 1 kgmol C

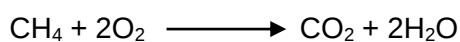
Langkah 6 dan 7 :

Masalah pembakaran adalah jenis masalah standar yang mempunyai satu pemecahan yang unik, baik aliran bahan bakar maupun udara diberikan, dan aliran produk dihitung secara langsung.

Langkah 7, 8, dan 9 :

Data dan hasil perhitungan disajikan pada tabel.

Gas Alam :



Komponen	Komposisi gas pembakaran (kgmol)				
	kgmol	CO ₂	H ₂ O	Kelebihan O ₂	N ₂
C	1,0	1,0			
H₂	2,0		2,0		
Udara				0,8	10,5
Total		1,0	2,0	0,8	10,5

O_2 yang dibutuhkan : 2
 Kelebihan O_2 : $2 (0,40) = 0,80$
 N_2 : $(2,80)(79/21) = 10,5$

Kilogram mol total gas yang dihasilkan adalah 14,3 dan fraksi mol H_2O adalah :

$$\frac{2,0}{14,3} = 0,14$$

Batu Bara :



Komponen	Komposisi gas pembakaran (kgmol)				
	kgmol	CO_2	H_2O	Kelebihan O_2	N_2
C	1,0	1,0			
H_2	0,47		0,47		
Udara				0,49	6,5
Total		1,0	0,47	0,49	6,5

O_2 yang dibutuhkan : $1 + 0,47 (1/2) = 1,24$
 Kelebihan O_2 : $(1,24) (0,40) = 0,49$
 N_2 : $(1,40)(79/21)[1 + 0,47(1/2)] = 6,5$

Kilogram mol total gas yang dihasilkan adalah 8,46 dan fraksi mol H_2O adalah :

$$\frac{0,47}{8,46} = 0,056$$

Jika tekanan barometrik, katakanlah 100 kPa, gas cerobong akan menjadi jenuh dan uap air akan mulai mengembun pada :

	Gas Alam	Batu Bara
Tekanan Parsial	$100 (0,14) = 14 \text{ kPa}$	$100 (0,056) = 5,6 \text{ kPa}$
Suhu Ekuivalen	$52,5^\circ\text{C}$	35°C

Jadi, cerobong akan mengeluarkan uap air yang mengembun pada bagian puncaknya pada suhu sekitar yang lebih tinggi untuk boiler yang membakar gas alam daripada untuk yang membakar batu bara. Sayangnya, orang kadang kala menyimpulkan bahwa semua emisi yang mereka amati adalah polusi. Gas alam dapat tampak sebagai polutan yang lebih besar dari pada minyak maupun batu bara, meskipun sebenarnya emisi tersebut hanyalah uap air. Kandungan sulfur dari batu bara dan minyak dapat dilepaskan sebagai sulfur dioksida ke atmosfer

dan kapasitas polusi dari batu bara dan minyak jauh lebih besar dari pada gas alam jika ketiganya dibakar secara tepat. Kandungan sulfur seperti yang diberikan kepada konsumen adalah sebagai berikut :

Gas alam $4 \times 10^{-4} \%$ (sebagai merkaptan yang ditambahkan); minyak bakar nomor 6, sampai 2,6 %; dan batu bara dari 0,5 sampai 5%. Lagi pula, batu bara mungkin melepaskan materi partikel ke dalam asap cerobong. Dengan mencampurkan gas cerobong dengan udara, dan dengan pencampuran konveksi di atas cerobong, fraksi mol uap air dikurangi, dan karenanya suhu pengembunan turun. Tetapi, untuk pengenceran yang ekuivalen, pabrik yang membakar batu bara akan selalu mempunyai suhu pengembunan yang lebih rendah.

C. SOAL LATIHAN/TUGAS

1. Berapa jumlah minimum meter kubik udara kering pada 20°C dan 100 kPa yang diperlukan untuk menguapkan 6 kg etil alkohol jika tekanan total tetap konstan pada 100 kPa dan suhu tetap 20°C ? Asumsikan bahwa udara tersebut ditiupkan melalui alkohol untuk menguapkannya sedemikian rupa sehingga tekanan yang keluar dari campuran udara-alkohol adalah 100 kPa.
2. Jelaskan pengertian dari “gas jenuh” ?
3. Sebuah campuran udara dan benzene mengandung 10% mol benzene pada 43°C dan tekanan 105 kPa. Pada suhu berapakah cairan pertama terbentuk ? Cairan apakah yang terbentuk ?
4. Jika suatu gas dijenuhkan dengan uap air, gambarkan keadaan uap air dan udara tersebut jika campuran tersebut :
 - a. Dipanaskan pada tekanan konstan
 - b. Didinginkan pada tekanan konstan
 - c. Dikembangkan pada temperatur konstan
 - d. Dimampatkan pada temperatur konstan
5. Sebuah kamar besar berisi N_2 kering pada 27°C dan 102,3 kPa. Air diinjeksikan ke dalam kamar tersebut. Setelah penjenuhan N_2 dengan uap air, suhu dalam kamar adalah 27°C .
 - a. Berapa tekanan di dalam kamar itu setelah penjenuhan ?
 - b. Berapa mol H_2O per mol N_2 berada dalam campuran jenuh ?
6. Tekanan uap heksana (C_6H_{14}) pada 20°C adalah 14,1 mmHg absolut. Udara kering pada suhu ini dijenuhkan dengan uap tersebut di bawah tekanan total sebesar 760 mmHg. Berapa persen kelebihan udara untuk pembakaran ?

7. Dalam pencarian fumigan baru, kloropikrin (CCl_3NO_2) telah diusulkan. Supaya efektif, konsentrasi uap kloropikrin harus 2,0% dalam udara. Cara yang termudah untuk memperoleh konsentrasi ini adalah menjenuhkan udara dengan kloropikrin dari satu wadah cairan. Asumsikan bahwa tekanan pada wadah adalah 110 kPa. Berapa suhu yang harus digunakan untuk mencapai konsentrasi 2,0% tersebut ?
Data tekanan uap :
(T, °C, tekanan uap, mmHg) : 0, 5,7; 10, 10,4; 15, 13,8; 20, 18,3; 25, 13,8; 30, 31,1
Pada suhu dan tekanan ini, berapa kg kloropikrin yang dibutuhkan untuk menjenuhkan 125 m^3 udara ?
8. Andaikan bahwa anda memasukkan sejumlah cairan ke dalam suatu volume gas kering yang berada dalam sebuah wadah yang fleksibel, dan membiarkan sistem itu mencapai ekuilibrium pada suhu dan tekanan total konstan. Akankah volume wadah tersebut naik, turun atau tetap sama dengan kondisi awal ? Andaikan bahwa wadah tersebut bervolume tetap bukannya fleksibel dan suhu di jaga konstan selama cairan menguap. Akankah tekanan dalam wadah itu naik, turun atau tetap sama ?
9. Salah satu cara bahwa pengaman masuk ke dalam spesifikasi adalah menentukan komposisi uap dalam udara yang dapat terbakar bila udara tersebut dibakar. Jika kisaran konsentrasi benzene dalam udara di mana pembakaran dapat terjadi adalah 1,9 sampai 9,2 persen. Berapa suhu yang sesuai untuk udara yang dijenuhkan dengan benzene dalam ruang uap dari sebuah tangki penyimpanan ? Tekanan total dalam ruang uap adalah 105 kPa.
10. Di sebuah perusahaan *dry cleaning*, udara kering hangat ditiupkan melalui sebuah drum berputar tempat tempat pakaian diputar sampai semua pelarut Stoddard dihilangkan. Larutan tersebut dapat diasumsikan sebagai n-oktana (C_8H_{18}) dan mempunyai tekanan uap 2,47 in Hg pada 120°F . Jika udara menjadi jenuh dengan oktana. Hitunglah :
- Pon (lb) udara yang dibutuhkan untuk menguapkan satu pon oktana ?
 - Persen oktana berdasar volume dalam gas yang meninggalkan drum itu ?
 - Ft³ udara masuk yang dibutuhkan per pon oktana. Barometer menunjukkan 29,96 in Hg ?

D. DAFTAR PUSTAKA

Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.

Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.

Reid, R.C., J.M. Prausnitz, and B.E. Poling. 1987. *Properties of Gases and Liquids*, edisi ke-4, New York : McGraw-Hill.

PERTEMUAN 4

NERACA ENERGI (KONSEP DAN SATUAN)

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

Pada pertemuan ini akan dijelaskan mengenai reaksi kimia dalam industri, Anda harus mampu:

1. Membedakan antara energi potensial, kinetik, dan internal.
2. Mengubah energi dalam satu kumpulan satuan menjadi kumpulan yang lain.

B. URAIAN MATERI

1. Neraca Energi (Konsep dan Satuan)

Untuk menggunakan kesetimbangan energi, anda harus menyatakan kesetimbangan tersebut sebagai persamaan. Setiap istilah dari kesetimbangan energi harus ditulis dalam simbol matematis sehingga anda dapat menyederhanakan persamaan tersebut dengan tepat, dan kemudian anda dapat mengerjakan perhitungan yang perlu. Satuan dari setiap unsur dalam persamaan tersebut harus konsisten seperti halnya dengan kesetimbangan massa.

a. Sistem

Sembarang massa materi atau bagian peralatan tertentu pada apa kita ingin mencurahkan perhatian kita. Suatu sistem harus didefinisikan dari sekitarnya dengan batasan sistem. Batasan sistem tidak harus bertepatan dengan dinding wadah. Sistem yang ditutup oleh batasan sehingga tidak terjadi perpindahan massa yang terjadi disebut sistem tertutup (*closed system*), atau sistem non aliran (*nonflow system*), dalam perbedaannya dengan sistem terbuka (*open system*), atau sistem aliran (*flow system*), yang membolehkan pertukaran massa. Semua massa atau peralatan di luar sistem yang didefinisikan disebut sekitar. Anda harus selalu menggambar batasan-batasan serupa dalam pemecahan masalah anda, karena langkah ini akan menetapkan dengan jelas sistem dan sekitarnya.

b. Sifat (*property*)

Karakteristik materi yang dapat diukur, seperti tekanan, volume, atau suhu, jika diukur secara langsung, seperti jenis energi tertentu. Sifat-sifat dari suatu sistem tergantung pada kondisinya pada suatu waktu tertentu.

c. Sifat ekstensif (variabel, parameter)

Sifat yang nilainya adalah jumlah dari nilai tiap subsistem yang membentuk sistem keseluruhan. Contohnya, suatu sistem gas dapat dibagi menjadi dua subsistem yang mempunyai volume atau massa yang berbeda dari sistem awalnya. Maka dari itu, massa atau volume adalah sifat ekstensif.

d. Sifat intensif (variabel, parameter)

Sifat yang nilainya tidak aditif dan tidak bervariasi dengan kuantitas materi dalam subsistem. Contohnya, suhu, tekanan, densitas, dan sebagainya tidak berubah dalam bagian-bagian sistem jika sistem tersebut dipotong menjadi setengah atau dua bagian setengahnya itu disatukan. Dua sifat bersifat independen satu sama lain jika paling tidak satu perubahan keadaan untuk sistem dapat ditemukan dimana satu sifat berubah sementara yang lainnya tetap.

e. Keadaan (*State*)

Kumpulan sifat materi yang diberikan pada suatu waktu tertentu. Keadaan dari suatu sistem tidak tergantung pada bentuk atau konfigurasi sistem tersebut tetapi hanya pada sifat-sifat intensifnya seperti suhu, tekanan, dan komposisi.

2. Enam Jenis Energi

a. Kerja (*work*)

Kerja adalah satu bentuk energi yang menunjukkan perpindahan (*transfer*) antara sistem dan sekitarnya. Kerja tidak dapat disimpan. Kerja positif jika dikerjakan pada sistem.

b. Kalor

Bagian dari aliran energi total yang mengalir menyeberangi batasan sistem yang disepertemuangkan oleh perbedaan suhu antara sistem dan sekitarnya. Kalor positif jika dipindahkan ke sistem.

c. Energi Kinetik

Energi yang dimiliki oleh suatu sistem karena kecepatannya relatif terhadap sekitarnya. Energi kinetik dapat dihitung dari hubungan :

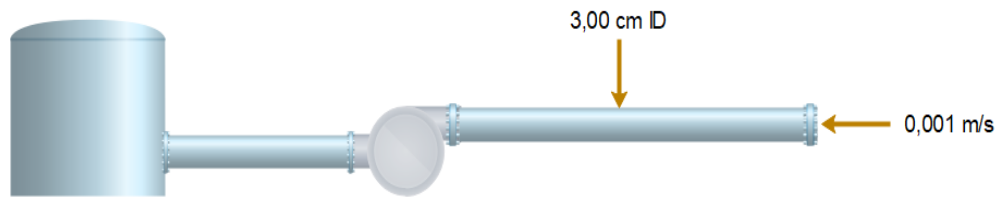
$$K = \frac{1}{2} m v^2$$

$$\hat{K} = \frac{1}{2} v^2$$

$\hat{K}$ menunjukkan energi per satuan massa dan bukan energi kinetik total.

Contoh Soal 1 :

Air dipompa dari sebuah tangki penyimpanan ke dalam pipa berdiameter dalam 3 cm pada laju 0,001 m³/s. Berapa energi kinetik spesifik dari air tersebut ?



Jawab :

Basis : 0,001 m³/s

$$r = \frac{1}{2} (3) = 1,5 \text{ cm}$$

Asumsikan : densitas air : $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

$$v = \frac{0,01 \text{ m}^3}{\text{s}} \frac{1}{\pi (1,5)^2 \text{ cm}^2} \left(\frac{100 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}} \right) = 1,415 \text{ m/s}$$

$$\hat{K} = \frac{1}{2} \frac{1,45^2}{(\text{m/s})^2} \frac{1 \text{ N}}{1 \frac{(\text{kg})(\text{m})}{\text{s}^2}} \frac{1 \text{ J}}{1 (\text{N})(\text{m})} = 1 \text{ J/kg}$$

d. Energi Potensial

Energi yang dimiliki oleh suatu sistem karena gaya badan yang didesakkan pada massanya oleh medan gravitasi atau elektromagnetik relatif terhadap permukaan referensi. Energi potensial untuk medan gravitasi dapat dihitung dari :

$$P = m g h$$

atau

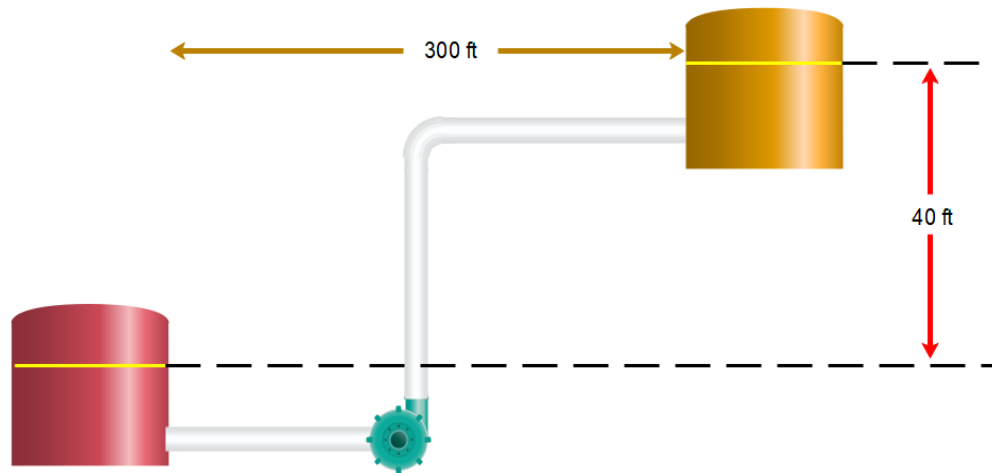
$$\hat{P} = g h$$

Untuk h adalah jarak dari permukaan referensi dan simbol (^) kembali energi potensial per satuan massa. Pengukuran h dilakukan ke pusat massa dari suatu sistem.

Contoh Soal 2 :

Air di pompa dari sebuah reservoir ke yang lainnya sejauh 300 ft, seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini. Permukaan air dalam reservoir kedua

adalah 40 ft di atas permukaan air dari reservoir pertama. Berapa kenaikan energi potensial spesifik dari air tersebut dalam Btu/lb_m ?



Penyelesaian :

Misalkan permukaan air dalam reservoir pertama adalah permukaan referensi.

Maka tingginya (h) = 40 ft.

$$P = m g h$$

$$\hat{P} = g h$$

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{32,2 \text{ ft}}{\text{s}^2} \times \frac{40 \text{ ft}}{1} \times \frac{1 \text{ Btu}}{778,2 \text{ (ft)(lb}_f\text{)}} \times \frac{32,2 \text{ (lb}_m\text{)(ft)}}{(\text{lb}_f\text{)(s}^2\text{)}} \\
 &= 0,0514 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m}
 \end{aligned}$$

e. Energi Internal (*Internal Energy*)

Pengukuran makroskopik dari energi molekuler, atomik, dan subatomik yang semuanya mengikuti kaidah konservasi makroskopik tertentu. Karena tidak ada peralatan untuk mengukur energi internal secara langsung pada skala makroskopik, energi internal harus dihitung dari variabel tertentu lainnya yang dapat diukur secara makroskopik, seperti tekanan, volume, suhu, dan komposisi.

Contoh Soal 3 :

Sebuah ujian untuk sekolah sarjana menanyakan dua pertanyaan pilihan ganda berikut ini :

1. Energi internal dari sebuah zat padat sama dengan :
 - a. Suhu absolut zat padat tersebut.
 - b. Energi kinetik total dari molekulnya.
 - c. Energi potensial total dari molekulnya.
 - d. Jumlah energi kinetik dan potensial total dari molekulnya.
2. Energi internal dari sebuah benda tergantung pada :
 - a. Suhnya saja.
 - b. Massanya saja.
 - c. Fasenya saja.
 - d. Suhu, massa dan fase.

Jawaban mana yang akan anda pilih ?

Penyelesaian :

Tak satu pun pertanyaan-pertanyaan di atas dapat dijawab dengan pilihan-pilihan yang diberikan.

Mengenai pertanyaan 1 :

Energi internal itu sendiri tidak dapat di evaluasi, hanya perubahannya yang dapat di evaluasi.

Mengenai pertanyaan 2 :

Perubahan energi internal spesifik tergantung pada suhu, fase, dan volume spesifik sementara perubahan energi internal tergantung juga pada massa.

f. Entalpi

Kombinasi dari dua variabel yang akan sering tampak dalam kesetimbangan energi :

$$H = U + pV$$

Untuk p adalah tekanan dan V adalah volume.

C. SOAL LATIHAN/TUGAS

1. Air dipompa dari satu reservoir ke reservoir lainnya sejauh 425 ft. Permukaan air dalam reservoir kedua adalah 75 ft di atas permukaan air dari reservoir pertama. Berapa kenaikan energi potensial spesifik dari air tersebut dalam Btu/lb_m ?
2. Sebuah bola dengan bobot 150 kg yang pada awalnya berada pada puncak tangga (8,5 m) dijatuhkan dan menghantam tanah. Dengan referensi terhadap tanah:
 - a. Berapa energi kinetik dan potensial awal dari bola tersebut ?
 - b. Berapa energi kinetik dan potensial akhir dari bola tersebut ?
 - c. Berapa perubahan dalam energi kinetik dan potensial untuk proses itu ?
 - d. Jika semua energi potensial awal sedemikian rupa di ubah menjadi kalor, berapa kalori yang sama dengan jumlah ini ? Berapa Btu ? Berapa Joule ?
3. Dalam meniup sebuah balon, dua jenis kerja dilakukan oleh udara dalam balon (sistem). Satu yaitu meregangkan balon $dW = \sigma dA$, untuk σ ialah tegangan permukaan dari balon tersebut. Yang lain adalah kerja untuk mendorong balik atmosfer. Jika balon itu berbentuk bola dan mengembang dengan perlahan dari diameter 1,3 meter menjadi 1,9 meter. Berapa kerja yang dilakukan dalam mendorong balik atmosfer ? Asumsi apa saja yang harus anda buat tentang T dan p ?
4. Ubahlah kuantitas berikut ini seperti ditentukan :
 - a. Laju aliran kalor 6.000 Btu/(jam)(ft²) menjadi kal/(s)(cm²).
 - b. Kapasitas kalor 2,3 Btu/(lb)(°F) menjadi kal/(g)(°C).
 - c. Konduktivitas termal 200 Btu/(jam)(ft)(°F) menjadi J/(s)(cm)(°C).
 - d. Konstanta gas, 10,73 (psia)(ft³)/(lbmol)(°R) menjadi J/(gmol)(K).
5. Masalah untuk banyak orang di Amerika adalah kelebihan berat badan yang tersimpan sebagai lemak. Banyak orang telah berusaha untuk mengambil kesempatan pada masalah ini dengan program penurunan berat badan yang tanpa hasil. Tetapi, karena energi disimpan, kesetimbangan energi menunjukkan hanya ada dua cara riil untuk menurunkan berat (selain kehilangan air) :
 - 1) Mengurangi pemasukan kalori.
 - 2) Meningkatkan pengeluaran kalori.

Dalam menjawab pertanyaan berikut, asumsikan bahwa lemak mengandung kira-kira 6.950 kkal/kg (1 kkal disebut satu “kalori dietetik” dalam nutrisi, atau umumnya hanya satu “kalori”).

- a. Jika diet normal yang mengandung 2.320 kkal/hari dikurang dengan 550 kkal/hari, berapa hari yang diperlukan untuk menghilangkan 2,5 lb lemak ?
- b. Berapa mil anda harus berlari untuk menghilangkan 2 lb lemak jika berlari pada kecepatan sedang 11 km/jam menghabiskan 42 kJ/km ?
- c. Andaikan dua pelari masing-masing berlari 10 km/hari. Satu pelari berlari pada kecepatan 5 km/jam dan pelari yang lain pada kecepatan 10 km/jam. Pelari manakah yang akan kehilangan berat lebih banyak (abaikan kehilangan air)?

D. DAFTAR PUSTAKA

- Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.
- Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.

PERTEMUAN 5

KESETIMBANGAN ENERGI UMUM

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

Pada pertemuan ini akan dijelaskan mengenai kesetimbangan energi umum, Anda harus mampu:.

1. Menulis kesetimbangan energi umum dalam kata-kata dan symbol untuk sistem terbuka dan tertutup.
2. Menerapkan kesetimbangan energi umum untuk memecahkan masalah khusus.

B. URAIAN MATERI

Konsep Pokok Kesetimbangan Energi Umum

Dalam kebanyakan masalah anda tidak harus menggunakan semua suku dari persamaan kesetimbangan energi umum karena suku-suku tertentu mungkin nol atau mungkin sangat kecil sehingga dapat diabaikan dalam perbandingan dengan suku-suku lain. Sejumlah kasus khusus dari banyak sekali kepentingan industri dapat diproduksi dari kesetimbangan energi umum dengan memasukan asumsi penyederhanaan tertentu :

1. tidak ada perpindahan massa (sistem tertutup atau *batch/closed or batch system*)

$$(m_1 = m_2 = 0) :$$

$$\Delta E = Q + W$$

2. Tidak ada akumulasi ($\Delta E = 0$), tidak ada perpindahan massa ($m_1 = m_2 = 0$)

$$Q = -W$$

3. Tidak ada akumulasi ($\Delta E = 0$), tetapi dengan aliran massa:

$$Q + W = \Delta[(\hat{H} + \hat{K} + \hat{P})m]$$

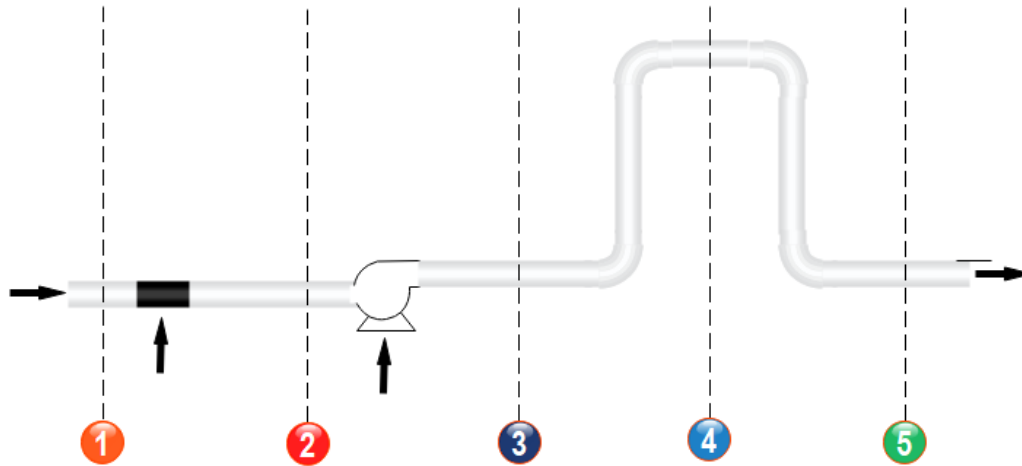
4. Tidak ada akumulasi, $Q = 0$, $W = 0$, $K = 0$, $P = 0$:

$$\Delta H = 0$$

Persamaan (4) sering disebut “kesetimbangan entalpi (*enthalpy balance*)”.

Sebagai contoh, ambilah sistem aliran yang diperlihatkan dalam Gambar 1. secara keseluruhan, antara lokasi 1 dan 5, kita akan menemukan bahwa $\Delta P = 0$. Sebenarnya, satu-satunya bagian sistem dimana ΔP akan menjadi perhatian adalah antara lokasi 4 dan beberapa lokasi lainnya. Antara 3 dan 4, ΔP mungkin

perbandingan dengan kerja yang dimasukkan oleh pompa. Antara lokasi 3 dan titik hilir yang lebih jauh, baik Q maupun W adalah nol.



Gambar 5.1. Sistem aliran putus-putus membatasi subsistem-subsite

Beberapa nama proses khusus yang berhubungan dengan masalah kesetimbangan energi penting untuk diingat:

1. Isotermal (*isothermal*) ($dT = 0$): proses suhu konstan.
2. Isobarik (*isobaric*) ($dp = 0$): proses tekanan konstan
3. Isometrik (*isometric*) atau isokorik ($dv = 0$): proses volume konstan
4. Adiabatik (*adiabatic*) ($Q = 0$): tidak ada pertukaran kalor (yaitu, sistem terinsulasi).

Jika bertanya tentang keadaan dimana sebuah proses dapat disebut adiabatik, salah satu dari yang berikut ini sangat mungkin terjadi:

- a. sistem tersebut diinsulasi
- b. Q sangat kecil dalam hubungannya dengan suku lain dalam persamaan entalpi dan mungkin diabaikan.
- c. proses terjadi dengan sangat cepat sehingga tidak ada waktu bagi kalor untuk dipindahkan

Untuk membantu anda dalam memecahkan masalah yang melibatkan kesetimbangan energi, dua langkah tambahan harus ditambahkan pada daftar periksa dalam pikiran anda untuk menganalisis masalah

1. Langkah pertama: selalu menulis kesetimbangan energi

2. langkah kedua: mengamati setiap suku dalam kesetimbangan energi umum dan menghilangkan semua suku yang nol atau dapat diabaikan.

Sekarang kita mengamati beberapa penerapan kesetimbangan energi umum, pertama sistem tertutup dan kemudian sistem terbuka.

Sistem tertutup.. untuk menjelaskan lebih lanjut suku-suku dalam kesetimbangan energi, pertimbangan sebuah sistem tertutup yang kesetimbangan energy berkurang menjadi $Q + W - \Delta E$ persamaan ini berlaku dengan yang disebut sistem pusat massa. Andaikan bahwa sistem tersebut adalah fluida dalam botol Dewar (untuk membuat $Q = 0$). Karena fluida itu tidak dapat dinding-dinding botol, $W = 0$. Selanjutnya, andaikan bahwa sebuah bola yang dilekatkan pada bagian langit-langit dalam botol Dewar tersebut dilepaskan sedemikian rupa (dengan pengeluaran energy yang dapat diabaikan), dan jatuh ke dasar botol. Perubahan apa yang terjadi dalam sistem itu? Ingat kembali bahwa $\Delta E = \Delta U + \Delta P + \Delta K$. Penjatuhan bola tersebut mengubah pusat massa fluida itu sehingga ΔP turun, karenanya ΔU dan suhu fluida naik, tidak banyak, tentu saja. Kenaikan suhu fluida tidak disepertemuangkan oleh perpindahan kalor karena Q berdasar definisi haruslah perpindahan energi melewati batasan sistem. Dengan jatuhnya bola, gravitasi tidak melakukan kerja karena batasan harus bergerak untuk terjadinya W .

CONTOH. Kesetimbangan Energi

Contoh Soal 1 :

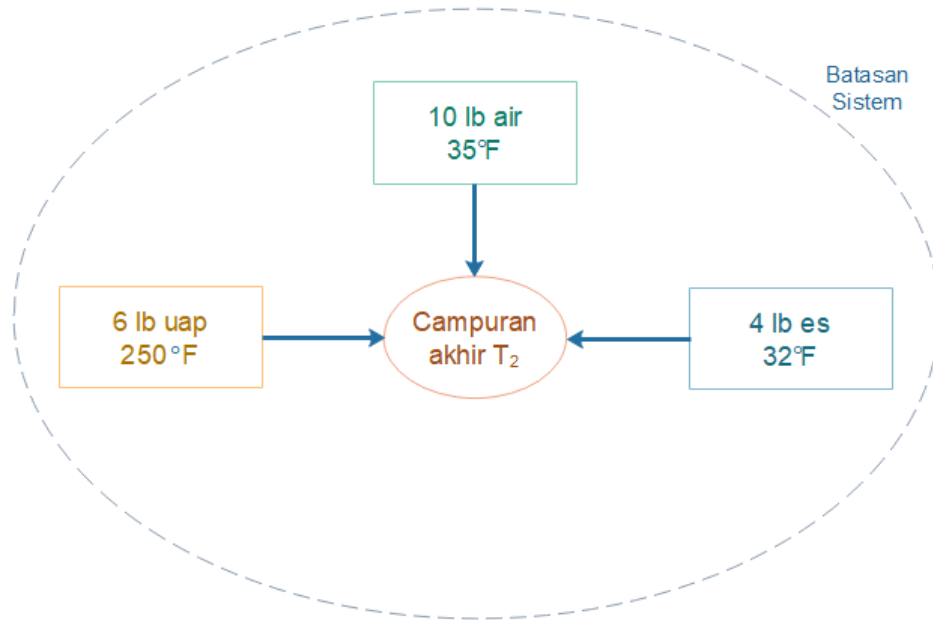
Sepuluh lb air pada 35°F dan 6,00 lb uap pada 250°F dan 20 psia dicampur bersama dalam sebuah wadah bervolume tetap. Berapa suhu akhir dari campuran tersebut? Berapa banyak uap yang mengembun? Asumsikan bahwa volume wadah konstan dengan nilai yang sama dengan volume awal dari uap dan bahwa wadah itu diinsulasi. Asumsikan proses itu ialah proses batch bukan proses aliran.

Penyelesaian :

Langkah **1,2,3 dan 4** kita dapat mengasumsikan bahwa proses batch keseluruhan terjadi dengan $Q = 0$ dan $W = 0$ jika kita dapat mendefinisikan sistem tersebut seperti dalam gambar C5.14. misalkan T_2 ialah suhu akhir. Sistem terdiri dari 20 lb H_2O dalam satu atau dua fase. ΔK dan ΔP sama dengan 0. Kesetimbangan energy berkurang menjadi $\Delta U = 0$

Sifat- sifat awal dapat diperoleh dari tabel uap. Sayangnya, jika kita menggunakan satuan American Engineering kita hanya dapat memperoleh nilai $\Delta \hat{H}$. bukannya nilai

$\Delta \hat{U}$ yang kita inginkan (dan dapat diperoleh dari tabel SI) untuk kesetimbangan energi, maka dari itu kita perlu juga mengemukakan nilai P dan $\hat{V}$.



Gambar 5.2. Batasan Sistem

Sifat-sifat yang diperlukan ialah:

	ΔH (Btu/lb)	V	p(psia)	T (°F)
Es	-143,6*	—	—	32
Air	3,02	0,0162	—	35
Uap	1168	20,81	20	250

Kita tahu bahwa $\Delta \hat{U} = \Delta \hat{H} - \Delta(p\hat{V})$ sehingga kesetimbangan energi menjadi:

$$\Delta H - \Delta(pV) = 0$$

Volume wadah ditetapkan sebesar volume awal dari uap, yaitu $(6)(20,81) = 124,86 \text{ ft}^3$, kita mengabaikan volume es dan air dalam perhitungan, karena sangat kecil.

Langkah 5 basis ialah 20 lb air pada kondisi yang diberikan.

$$\text{Basis : } \begin{cases} 4 \text{ lb es pada } 32^\circ\text{F} \\ 10 \text{ lb } H_2O \text{ pada } 35^\circ\text{F} \\ 6 \text{ lb uap pada } 250^\circ\text{F dan } 20 \text{ psia} \end{cases}$$

Langkah **6 dan 7** jika kita mengasumsikan bahwa keadaan akhir air cair dalam ekuilibrium dengan uap air asumsi untuk diperiksa, kita dapat menghitung $\Delta\hat{H}$ akhir dari 20 lb air. Kita tahu bahwa air akhir jenuh. Kondisi kedua untuk menetapkan keadaan (kualitas, suhu, dan tekanan) sistem dapat berkembang dari kesetimbangan energy, maka dari itu masalah ini mempunyai pemecahan yang unik. Tetapi, keadaan akhir harus dihitung secara tidak langsung jika akan menggunakan tabel

Langkah 7,8, dan 9

ΔH akhir ΔH awal

$$\Delta H_{T_s}^f - (6\Delta\hat{H}_{T_s}^s + 10\Delta\hat{H}_{t_w}^w + 4\Delta\hat{H}_{T_l}^l) = (pV)_{T_f}^f - 6(p\hat{V})_{T_s}^s - 10(p\hat{V}_{T_n}^n) - 4(p\hat{V}_{T_l}^l)$$

Dua suku terakhir pada ruas kanan dari persamaan (b) tidak dapat lebih dari 1 Btu dan dapat dengan diabaikan dengan aman. Pastikan untuk memeriksa asumsi ini! Jadi persamaan yang akan digunakan ialah

$$\Delta H_{T_f}^f - (pV)_{T_f}^f = (6\Delta\hat{H}_{T_s}^s + 10\Delta\hat{H}_{t_w}^w + 4\Delta\hat{H}_{T_l}^l) - 6(p\hat{V})_{T_s}^s$$

Karena perubahan fase yang terjadi dan juga ketidaklinearan kapasitas kalor sebagai fungsi suhu, tidak mungkin untuk mengganti entalpi dalam persamaan (c) dengan fungsi suhuan memperoleh persamaan aljabar linear yang mudah untuk diselesaikan. Akibatnya, strategi yang akan kita gunakan ialah pertama-tama mengasumsikan suhu dan tekanan akhir. Dan selanjutnya memeriksa asumsi itu melalui persamaan (c). Kita ingin mengapit suhu tersebut jika mungkin, dan kemudian dapat menginterpolasi untuk jawaban yang diinginkan.

Tekanan dalam wadah turun selama lebih banyak uap mengembun. Data untuk, volume spesifik uap sebagai fungsi suhu dan tekanan dapat diambil dari tabel uao untuk kondisi jenuh, dan massa uap yang tertinggal dalam fase uap pada ruas kanan dari persamaan (c) sama dengan

$$6lb \left| \frac{1168,0 \text{ Btu}}{lb} \right| + \frac{10lb}{lh} \left| \frac{3,02 \text{ Btu}}{lh} \right| + \frac{4lb}{lb} \left| \frac{-143,6 \text{ Btu}}{lb} \right| - \frac{6lb_m}{in^2} \left| \frac{20lb_f}{in^2} \right|$$

$$\left(\frac{12 \text{ in}}{1 \text{ ft}} \right)^2 \left| \frac{20,81 \text{ ft}^3}{lb_m} \right| \left| \frac{1 \text{ Btu}}{778(\text{ft})(lb_f)} \right| = 6001,6 \text{ Btu}$$

Sebagai taksiran awal, andaikan bahwa setengah dari uap awal tidak mengembun. Maka volume spesifik dari uap akhir ialah $(124,86 \text{ ft}^3/3 \text{ lb}) = 41.62 \text{ ft}^3/\text{lb}$. garis bilangan bulat terdekat dalam tabel uap dalam kolom uap jenuh untuk tekanan ialah 10 psia ($T = 193,21^\circ\text{F}$) dengan volume spesifik sebesar $38,462 \text{ ft}^3/\text{lb}$ dan $\Delta H_{\text{cair}} = 161,17 \text{ Btu/lb}$.

Mari kita gunakan data terakhir ini untuk memeriksa asumsi awal. Kita menghitung

$$S = \frac{124,86 \text{ ft}^3}{38,462 \text{ ft}^3} \left| \frac{1 \text{ lb uap}}{38,462 \text{ ft}^3} \right| = 3,246 \text{ lb uap tidak mengembun}$$

Entalpi akhir dari sistem tersebut ialah:

$$\text{Uap: } \frac{3,246 \text{ lb uap}}{3,246 \text{ lb uap}} \left| \frac{1143,3 \text{ Btu}}{3,246 \text{ lb uap}} \right| = \frac{1143,3 \text{ Btu}}{3,246}$$

$$\text{Cair: } \frac{(20-3,246) \text{ lb cairan}}{16,754 \text{ lb cairan}} \left| \frac{161,17 \text{ Btu}}{16,754 \text{ lb cairan}} \right| = \frac{2700}{16,754}$$

pV akhir dari sistem itu(dengan mengabaikan fase cair):

$$\text{Uap: } \frac{10 \text{ lb}}{144 \text{ in}^2} \left(\frac{12 \text{ in}}{1 \text{ ft}} \right)^2 \left| \frac{124,86 \text{ ft}^3}{778 \text{ (ft)}(\text{lb}_f)} \right| \left| \frac{1 \text{ Btu}}{778 \text{ (ft)}(\text{lb}_f)} \right| = 231 \text{ Btu}$$

$$6411 - 231 = 6180 \neq 6001,6$$

Taksiran awal $p = 10$ psia sedikit terlalu tinggi. Saat ini kita akan (untuk variasi) menaksir suhu kejenuhan dari $T = 180^\circ\text{F}$ (sesuai dengan $p^* = 8,566$ psia $V_{\text{uap}} = 44,55 \text{ ft}^3/\text{lb}$, $\Delta H_{\text{cair}} = 153,93 \text{ Btu/lb}$, dan $\Delta H_{\text{uap}} = 1140,5 \text{ Btu/lb}$).

Untuk taksiran kedua ini

$$S = \frac{124,86}{44,45} = 2,809 \text{ lb tidak mengembun}$$

Ulangi penggunaan persamaan (c)

$$(3306,3 + 2632,4) - 204 = 5734 \neq 6001,6$$

Kali ini taksiran tersebut terlalu rendah, tetapi kita telah mengapit jawabannya. Interpolasi linear untuk S memberikan

$$S = 2,899 + \left(\frac{6001,6 - 5734,29}{6180,28 - 5734,29} \right) (3,246 - 2,899) = 3,11$$

Maka dari itu, uap yang mengembun ialah $6 - 3,11 = 2,89$ lb, dan asumsi dalam langkah 6 dan 7 terbukti benar.

Sistem Terbuka. Kami sekarang menyajikan beberapa contoh di mana massa mengalir masuk dan keluar dari sistem.

CONTOH. Penerapan kesetimbangan energi

Contoh Soal 2 :

Air sedang dipompa dari dasar sebuah sumur berkedalaman 15 ft pada laju 200 gal/hr ke dalam sebuah tangki penyimpanan berlubang untuk menjaga permukaan air dalam tangki pada 165 ft di atas permukaan tanah. Untuk mencegah pembekuan di musim dingin sebuah pemanas kecil memasok 30.000 btu/hr ke dalam air selama perpindahannya dari sumur ke tangki penyimpanan. Kalor hilang dari sistem keseluruhan pada laju konstan sebesar 25.000 btu/hr. berapa suhu air ketika air itu memasuki tangki penyimpanan, dengan mengasumsikan bahwa air sumur berada pada 35°F ? sebuah pompa berdaya 2 hp digunakan untuk memompa air tersebut. Sekitar 55% dari tenaga kuda tersebut berubah menjadi kerja pemompaan dan sisanya dihilangkan sebagai kalor ke atmosfer

Penyelesaian :

Langkah **1, 2, 3, dan 4** misalkan sistem terdiri dari saluran masuk sumur, pipa, pompa, dan saluran keluar pada tangki penyimpanan. Asumsikan proses tersebut adalah proses aliran kedaan tunak dengan materi yang secara kontinu memasuki dan meninggalkan sistem. Lihat gambar C5.16

Langkah **5** basis : 1 hr operasi

Langkah **6 dan 7** kesetimbangan materi ialah 200 gal masuk dan 200 gal keluar dalam 1 hr. Kesetimbangan energi ialah

$$\Delta E = Q + W - \Delta[(\hat{H} + \hat{K} + \hat{P})m]$$

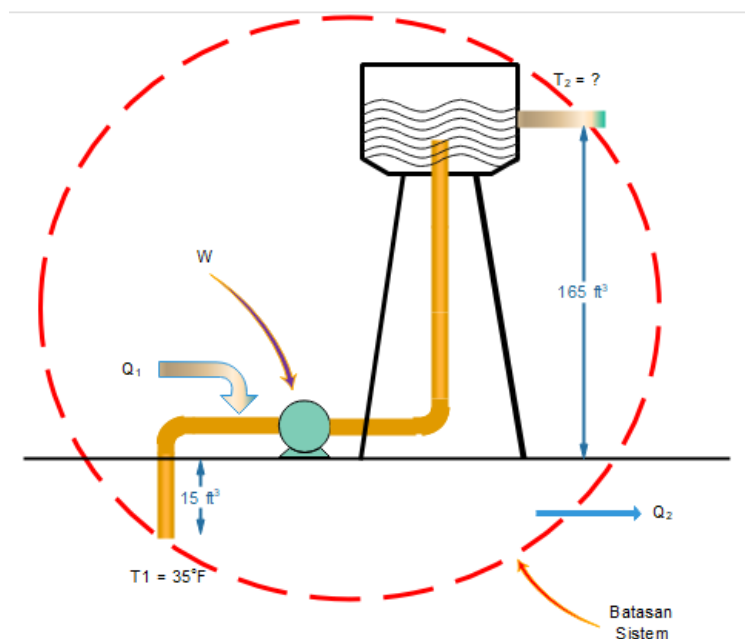
Pertama-tama kita akan menyederhanakan kesetimbangan energi tersebut :

1. Proses tersebut dalam keadaan tunak, karena $\Delta E = 0$
2. $m_1 = m_2 = m$
3. $\Delta K \cong 0$ karena kita akan mengasumsikan $v_1 = v_2 \cong 0$

$$\Delta P = m\Delta\hat{P}$$

$$\Delta P = mg\Delta h$$

$$\Delta P = 385,5 \text{ Btu}$$



Maka

$$0 = Q + W - \Delta[(\hat{H} + \hat{p})]m$$

Hanya nilai ΔH pada bagian puncak tangki yang tak diketahui, tetapi dapat dihitung, tetapi dapat dihitung dari kesetimbangan energi. Suhu dapat dipanggil dari

$$\Delta H = m\Delta\hat{H} = m \int_{T_1=35^\circ\text{F}}^{T_2} C_p dT = mC_p (T^2 - 35)$$

Jika C_p diasumsikan konstan. Maka dari itu masalah ini mempunyai satu pemecahan yang unik.

Langkah 7, 8, dan 9 massa air total yang dipompa ialah

200 gal	8,33 lb
hr	1 gal

$$= 1666 \text{ lb/hr}$$

Kalor yang dihilangkan oleh sistem itu ialah 25.000 Btu sedangkan pemanas memasok 30.000 Btu ke dalam sistem : maka dari itu pertukaran kalor lebih bersih ialah :

$$Q = 30.000 - 25.000 = 5000 \text{ Btu}$$

Laju kerja yang dikerjakan pada air oleh pompa ialah

1666 lbm	32,2 ft	180 ft		1 Btu
Btu/hr	s ²		$\frac{32,2 (ft)(lbm)}{(s^2)(lbf)}$	778 (ft)(lb _f)

ΔH dapat dihitung dari $Q + W = \Delta H + \Delta P$

$$5000 + 2800 = \Delta H + 386$$

$$\Delta H = 7414 \text{ Btu}$$

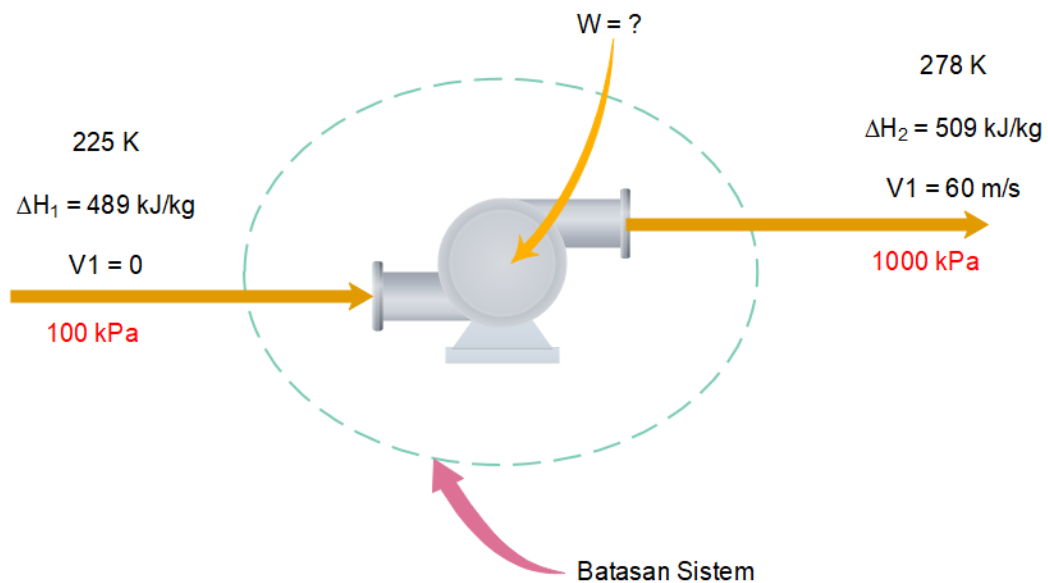
Karena kisaran suhu yang dipertimbangkan kecil, kapasitas kalor air cair boleh diasumsikan konstan dan sama dengan 1.0 Btu/(lb)(°F) untuk masalah ini. Jadi .

$$7414 = \Delta H = mC_p\Delta T = 1666 (1,0)(\Delta t)$$

$$\Delta T \cong 4,5 \text{ }^\circ\text{F} \text{ kenaikan suhu, karena itu, } T = 39,5 \text{ }^\circ\text{F}$$

Contoh soal 3 :

Udara sedang dimampatkan dari 100 kPa dan 255 K (di sini udara mempunyai entalpi sebesar 489 kJ/kg) sampai 1.000 kPa dan 278 K (di sini udara mempunyai entalpi sebesar 509 kJ/kg). Kecepatan keluar udara itu dari kompresor ialah 60 m/s. Berapa daya yang diperlukan (dalam kW) untuk kompresor tersebut jika bebannya ialah 100 kg/jam udara ?



Penyelesaian :

Langkah 1, 2, 3, dan 4 :

Gambar di atas menunjukkan kuantitas-kuantitas dari data yang diketahui. Tidak ada reaksi yang terjadi.

Proses tersebut ialah jelas proses aliran atau sistem terbuka. Mari kita mengansumsikan bahwa kecepatan masuk udara ialah nol.

Langkah 5 :

Basis : 100 kg udara = 1 jam

Langkah 6 dan 7 :

Mari kita menyederhanakan kesetimbangan energi (hanya ada satu komponen) :

$$\Delta E = Q + W - \Delta[(\hat{H} + \hat{K} + \hat{P})m]$$

- 1) Proses tersebut dalam keadaan tunak, karenanya $\Delta E = 0$
- 2) $m_1 = m_2 = m$
- 3) $\Delta \hat{P}m = 0$
- 4) $Q = 0$ menurut asumsi (Q akan sangat kecil meski jika sistem itu tidak diinsulasi)
- 5) $v_1 = 0$ (nilai tidak diketahui, tetapi akan kecil)

Hasilnya ialah :

$$W = \Delta[(\hat{H} + \hat{K})m] = \Delta H + \Delta K$$

Kita mempunyai satu persamaan dan satu yang tak diketahui, W (ΔK , dan ΔH dapat dihitung), maka dari itu masalah ini mempunyai pemecahan yang unik.

Langkah 7, 8, 9 :

$$\Delta H = \frac{(500 - 489) \text{ kJ}}{\text{kg}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1} = 2000 \text{ kJ}$$

$$\Delta K = \frac{1}{2} m (V_2^2 - V_1^2)$$

$$\frac{1}{2} \times \frac{100 \text{ kg}}{1} \times \frac{(60 \text{ m})^2}{\text{s}^2} \times \frac{1 \text{ kJ}}{\frac{1000 (\text{kg})(\text{m}^2)}{(\text{s})^2}} = 180 \text{ kJ}$$

$$W = (2.000 + 180) = 2.180 \text{ kJ}$$

Catatan :

Tanda positif menunjukkan kerja dilakukan pada udara.

Untuk mengubah menjadi daya (kerja/waktu) :

$$kW = \frac{2.180 \text{ kJ}}{1 \text{ jam}} \times \frac{1 \text{ kW}}{\frac{1 \text{ kJ}}{\text{s}}} \times \frac{1 \text{ jam}}{3600 \text{ s}} = 0,61 \text{ kW}$$

C. SOAL LATIHAN/TUGAS

- Sebuah wadah bervolume 0,25 liter yang pada mulanya terisi dengan 0,225 kg air pada tekanan 20 atm didinginkan sampai tekanan di dalam wadah menjadi 100 kPa.
 - Berapa suhu awal dan akhir ?
 - Berapa banyak kalor yang dipindahkan dari air untuk mencapai keadaan akhir?
- Andaikan anda mengisi sebuah termos terinsulasi sampai 95% volumenya dengan es dan air pada ekuilibrium dan menutupnya dengan rapat.
 - Akankah tekanan dalam termos naik, turun, atau tetap sama setelah 2 jam ? Berikan penjelasan anda !
 - Setelah 2 minggu ?
 - Untuk kasus di mana setelah pengisian dan penutupan, termos di kocok kuat-kuat, apa yang akan terjadi pada tekanannya ?
- Dalam suatu percobaan tabung getar, gas (udara) di tahan pada suhu ruang pada 15 atm dalam volume 0,350 ft³ oleh segel logam. Ketika segel pecah, udara mengalir dengan cepat mengisi tabung kosong tersebut, yang mempunyai volume 20 ft³. Tabung tersebut di insulasi. Dalam percobaan tersebut :

- a. Berapa kerja yang dilakukan oleh udara ?
 - b. Berapa kalor yang dipindahkan ke udara ?
 - c. Berapa perubahan energi internal dari udara tersebut ?
 - d. Berapa suhu akhir udara setelah 3 menit ?
 - e. Berapa tekanan akhir udara ?
4. Dalam sebuah kilang minyak, kondensor di atur untuk mendinginkan 1.350 lb/jam benzene yang masuk pada 1 atm, 200°F, dan keluar pada 171°F. Asumsikan kehilangan kalor ke sekitar dapat diabaikan. Berapa lb air pendingin yang dibutuhkan per jam jika air pendingin masuk pada 80°F dan keluar pada 100°F ?
5. Oksigen cair disimpan dalam tangki penyimpanan bervolume 15.000 L. Ketika diisi, tangki itu berisi 13.700 L cairan yang berada dalam ekuilibrium dengan uapnya pada tekanan 1 atm. Berapa :
- a. Suhu ?
 - b. Massa ?
 - c. Kuantitas oksigen dalam tangki ?
- Katup pelepasan tekanan dari tangki penyimpanan ditetapkan pada 2,5 atm. Jika kalor bocor ke dalam tangki oksigen pada laju $5,0 \times 10^6$ J/jam.
- d. Kapan katup pelepasan tekanan akan terbuka ?
 - e. Berapa suhu dalam tangki penyimpanan saat itu ?

Data :

Pada 1 atm, jenuh :

$$\hat{V}_1 = 0,0281 \text{ L/gmol}$$

$$\hat{V}_s = \text{L/gmol}$$

$$\Delta H = -133,5 \text{ J/g}$$

Pada 2,5 atm, jenuh :

$$\Delta H = -116,6 \text{ J/g}$$

D. DAFTAR PUSTAKA

Distantina S. 2001. Diktat Pendahuluan Neraca Massa.

Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.

Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.

PERTEMUAN 6

PERHITUNGAN PERUBAHAN ENTALPI

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

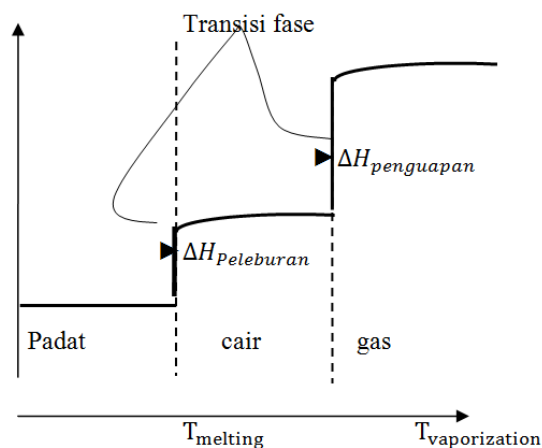
Pada pertemuan ini akan dijelaskan mengenai konsep kesetimbangan materi (neraca massa), Anda harus mampu:

1. Menghitung perubahan entalpi (dan energy internal) dari persamaan kapasitas kalor, grafik dan gambar, tabel dan *database* komputer dengan diberikan keadaan materi awal dan akhir.
2. Mengetahui dengan pasti keadaan referensi untuk nilai entalpi dalam sumber data.

B. URAIAN MATERI

1. Perhitungan Perubahan Entalpi

Dalam bagian ini kami menjelaskan bagaimana mencari dan/atau menghitung perubahan entalpi (dan energi internal) untuk dimasukkan ke dalam kesetimbangan energi.



Gambar 6.1. Perubahan entalpi untuk unsur murni sebagai fungsi dari suhu.

Garis vertikal “perubahan laten” yang terjadi selama transisi fase. Perubahan entalpi untuk transisi fase diistilahkan kalor peleburan atau *heat of fusion* (untuk pelelehan) dan kalor penguapan atau *heat of vaporization* (untuk penguapan). Kata *heat* telah terbawa sendiri dengan kebiasaan konotasi yang sangat tua karena perubahan entalpi harus dihitung dari data percobaan yang sering memerlukan percobaan yang melibatkan perpindahan kalor. Entalpi peleburan dan penguapan adalah istilah yang tepat tetapi tidak digunakan secara luas. Kalor

pengembunan (*heat of condensation*) adalah negatif dari kalor penguapan, dan kalor penyubliman (*heat of sublimation*) adalah perubahan entalpi dari padat langsung ke uap.

Entalpi dapat juga ditaksir (*estimated*) dengan metode yang digeneralisasi berdasarkan pada teori keadaan yang berhubungan atau kontribusi ikatan aditif, tetapi kita tidak akan mendiskusikan metode-metode ini.

2. Persamaan Kapasitas Kalor

Persamaan menunjukkan bahwa entalpi untuk suatu unsure dalam fase tunggal (***tidak untuk transisi fase***) dapat dihitung menggunakan kapasitas kalor (*heat capacity*).

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT$$

Untuk memberi arti fisis pada kapasitas kalor, anda dapat memikirkan C_p sebagai yang mewakili jumlah energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu suatu unsure sebesar 1 derajat, energi yang mungkin diberikan oleh perpindahan kalor dalam proses khusus tertentu, tetapi dapat juga diberikan dengan cara lain. Kita akan mendiskusikan C_p karena C_v tidak sering digunakan. Apa satuan dari kapasitas kalor? Dari definisi kapasitas kalor, anda dapat melihat bahwa satuannya adalah (energi)/(perubahan suhu) (massa/mol), karena itu istilah “kalor spesifik” (kapasitas) kadang-kadang digunakan untuk kapasitas kalor. Satuan yang umumnya ditemukan dalam praktek teknik adalah (kita menghilangkan simbol Δ untuk suhu).

$$\frac{\text{kJ}}{(\text{kg mol})(\text{K})} \quad \frac{\text{Btu}}{(\text{lb mol})(\text{F})}$$

Atau nilai yang ekuivalen persatuan massa.

Kapasitas kalor bervariasi dengan suhu untuk padatan, cairan dan gas real, tetapi adalah fungsi kontinu dari suhu hanya dalam wilayah diantara transisi fase. Maka dari itu, tidak mungkin untuk memperoleh persamaan kapasitas kalor untuk suatu unsure yang akan berubah dari suhu nol absolute sampai kesuhu yang diinginkan. apa yang dikerjakan oleh sarjana teknik adalah menentukan dengan

percobaan kapasitas kalor diantara suhu-suhu yang pada suhu-suhu ini transisi fase terjadi, mencocokkan data dengan suatu persamaan dan kemudian menentukan persamaan kapasitas kalor yang baru untuk kisaran suhu berikutnya diantara transisi fase yang berturut-turut. Untuk gas monoatomik ideal, kapasitas kalor pada tekanan konstan meskipun suhu bervariasi.

Untuk campuran gas ideal, kapasitas kalor (per mol) campuran adalah rata-rata berbobot mol dari kapasitas kalor komponen-komponennya.

$$C_{P \text{ rata-rata}} = \sum_{i=1}^n x_i C_{pi}$$

Untuk campuran nonideal, khususnya cairan anda harus merujuk pada data percobaan atau beberapa teknik penafsiran yang terdaftar dalam literature. Kebanyakan persamaan untuk kapasitas kalor padatan, cairan dan gas dalam empiris. Kita biasanya menyatakan kapasitas kalor pada tekanan konstan C_p sebagai fungsi suhu dalam suatu deret pangkat dengan konstanta a,b,c dan seterusnya. Contohnya:

$$C_p = a + bT + CT^2$$

Tabel 6.1. Kapasitas kalor gas ideal

Kapasitas kalor perkiraan * C_p		
	Suhu tinggi (derajat bebas translasional, rotasional dan virasional) Jenis molekul	Suhu ruang (derajat bebas translasional, rotasional saja)
Monoatomik	$\frac{5}{2}$	$\frac{5}{2}R$
Poliatomik, linear	$(3n - \frac{3}{2})R$	$\frac{7}{2}R$
Poliatomik, nonlinear	$(3n - 2)R$	$4R$

*n: jumlah atom permolekul, R: konstanta gas yang didefinisikan

Contoh Soal 1. Persamaan kapasitas kalor

a. Persamaan kapasitas kalor untuk CO_2 ialah

$$C_p = 2,675 \times 42,27 T - 10^{-2} T^2$$

Dengan C_p dinyatakan dalam $J/(kg \text{ mol})(\Delta K)$. Ubahlah persamaan ini menjadisuatu bentuk sehingga kapasitas kalor akan dinyatakan pada seluruh kisaran suhu dalam $Btu/(lb \text{ mol})(^\circ F)$ dengan T dalam $^\circ F$

Jawaban :

Mengubah persamaan kapsitas kalor dari sekumpulan satuan ke yang lainnya hanyalah masalah konversi satuan. Setiap suku dalam kapasitas kalorbharus mempunyai satuan yang sama dengan ruas kiri persamaan tersebut. Untuk menghindari kebingungan dalam konversi anda harus ingat untuk membedakan antara simbol suhu yang menunjukkan suhu dan simbol suhu meskipun simbol yang sama sering digunakan untuk tiap konsep. Dalam konversi dibawah ini kita akan membedakan antara suhu dan perbedaan suhu untuk kejelasan. Pertama-tama, kalian tiap ruas dari persamaan yang diberikan untuk C_p dengan faktor konversi yang sesuai untuk mengubah $J/(kg \text{ mol})(\Delta K)$ menjadi $Btu/(lb \text{ mol})(\Delta ^\circ F)$. Kalian ruas kiri dengan faktor dalam kurung persegi.

$$\frac{C_p J}{(kg \text{ mol})(\Delta K)} \times \left[\frac{1 \text{ Btu}}{1055 J} \frac{1 \Delta K}{1,8 \Delta ^\circ R} \frac{1 \Delta ^\circ R}{1 \Delta ^\circ K} \frac{0,5436 \text{ kg}}{1 \text{ lb}} \right] \rightarrow C_p \frac{Btu}{(lb \text{ mol})(\Delta ^\circ F)}$$

Dan kalikan ruas kanan dengan kumpulan faktor konversi yang sama. Selanjutnya, disubstitusikan hubungan antara suhu dalam K dan suhu dalam $^\circ F$

$$T_K = \frac{T_{\circ R}}{1,8} = \frac{T_{\circ F} + 460}{1,8}$$

Ke dalam persamaan yang diketahui untuk C_p di tempat munculnya T_K Akhirnya, kerjakan operasi matematika yang ditunjukkan dan gabungkan kuantitas-kuantitas itu untuk memperoleh

$$C_p = 8,702 \times 10^{-3} + 4,66 \times 10^{-6} T - 1,053 \times 10^{-9} T^2 {}^\circ F$$

Contoh Soal 2. Perhitungan $\Delta \hat{H}$ untuk campuran gas menggunakan persamaan kapasitas kalor

- a. Konversi buangan padat menjadi gas yang tidak berbahaya dapat dikerjakan dalam tempat pembakaran sampah dalam cara yang dapat diterima oleh lingkungan . tetapi gas buangan yang kalor sering harus lakukan atau diencerkan dengan udara. Studi kelayakan ekonomi menunjukkan bahwa sampah padat perkotaan dapat dibakar menjadi gas dengan komposisi berikut (pada basis kering). $\text{CO}_2 = 9,2\%$, $\text{CO} = 1,5\%$, $\text{O}_2 = 7,3\%$, $\text{N}_2 = 82,0\%$, $100,0\%$ Berapa perbedaan entalpi untuk gas ini per lb mol antara bagian atas dan bawah cerobong jika suhu pada bagian bawah cerobong adalah 500°F dan suhu pada bagian atasnya 200°F ? Abaikan uap air dalam gas tersebut. Anda dapat mengabaikan efek energi apapun yang dihasilkan dari pencampuran komponen-komponen gas.

Jawaban :

Persamaan kapasitas kalor ialah

$$[T \text{ dalam } ^\circ\text{F}, C_p = \text{Btu}/(\text{lb mol})(^\circ\text{F})]$$

$$\text{N}_2 : C_p = 6,895 + 0,7624 \times 10^{-3}T - 0,7009 \times 10^{-7}T^2$$

$$\text{O}_2 : C_p = 7,104 + 0,7851 \times 10^{-3}T - 0,5528 \times 10^{-7}T^2$$

$$\text{CO}_2 : C_p = 8,448 + 5,757 \times 10^{-3}T - 21,59 \times 10^{-7}T^2 + 3,059 \times 10^{-10}T^3$$

$$\text{CO} : C_p = 6,865 + 0,8024 \times 10^{-3}T - 0,7367 \times 10^{-7}T^2$$

Basis : 1,00 lb mol gas

Dengan mengalikan persamaan-persamaan di atas dengan masing-masing fraksi mol dari tiap komponen dan menjumlahkan semuanya bersama-sama, anda dapat menghemat waktu dalam pengintegralan, tetapi persamaan-persamaan tersebut dapat diintegrasikan secara terpisah, khususnya jika anda menggunakan computer untuk menghitung ΔH dalam disk 2 yang dapat diminta.

$$\text{N}_2 = 0,82(6,895 + 0,7624 \times 10^{-3}T - 0,7009 \times 10^{-7}T^2)$$

$$\text{O}_2 = 0,073(7,104 + 0,7851 \times 10^{-3}T - 0,5528 \times 10^{-7}T^2)$$

$$\text{CO}_2 = 0,092(8,448 + 5,757 \times 10^{-3}T - 21,59 \times 10^{-7}T^2 + 3,059 \times 10^{-10}T^3)$$

$$\text{CO} = 0,015(6,865 + 0,8024 \times 10^{-3}T - 0,7367 \times 10^{-7}T^2)$$

$$\begin{aligned}
 C_{Pbersih} &= 7,053 + 1,2242 + 10^{-3}T - 2,6124 \times 10^{-7}T^2 + 0,2814 \times 10^{-10}T^3 \\
 \Delta H &= \int_{550}^{200} (7,053 + 1,2242 + 10^{-3}T - 2,6124 \times 10^{-7}T^2 + 0,2814 \times 10^{-10}T^3) dT \\
 &= 7,053 \left[(200) - (550) + \frac{1,2242 \times 10^{-3}}{2} (200)^2 - (550)^2 \right] \\
 &= \frac{2,6124 \times 10^{-7}}{3} [(200)^3 - (550)^3] + \frac{0,2814 \times 10^{-10}}{4} [(200)^4 - (550)^4] \\
 &= -2468,6 - 160,7 + 13,8 - 0,633 = -2616 \text{ Btu/lb mol gas}
 \end{aligned}$$

3. Tabel Nilai Entalpi

Tabel dapat mencakup kisaran sifat-sifat fisis secara akurat jauh di atas kisaran yang dapat diterapkan untuk suatu persamaan unggul. Karena sifat-sifat yang paling umum diukur adalah suhu dan tekanan, table entalpi (dan energi internal) untuk senyawa murni biasanya diatur dalam kolom dan baris, dengan T dan P sebagai variable independen. Jika interval antara data-data tabel cukup dekat, interpolasi linear antara data-data tersebut cukup akurat.

Sekarang kami akan menguraikan dua jenis tabel yang akan digunakan dalam pertemuan ini, kumpulan pertama adalah tabel-tabel entalpi untuk gas pada 1 atm, yang dapat ditemukan dalam Lampiran D nilai entalpi tersebut adalah untuk fase gas saja. Tabel uap menunjukkan tabel jenis kedua, yaitu tabel yang memasukkan entalpi perubahan fase bersama dengan entalpi untuk fase tunggal (*steam table*). Ingat bahwa nilai entalpi adalah relative terhadap suatu keadaan referensi. Anda dapat menghitung perbedaan entalpi dari dua kumpulan kondisi seperti yang ditunjukkan dalam contoh berikut.

CONTOH. Perhitungan Entalpi suatu Gas dengan Menggunakan Nilai-nilai Entalpi pada Tabel

- a. Hitung perubahan entalpi 1 kg mol gas N_2 yang dipanaskan pada tekanan konstan 100 kPa dari 18°C ke 1100°C .

Jawaban :

Karena 100 kPa pada dasarnya 1 atm, tabel pada Lampiran D buku *basic principle and calculation in chemical engineering* dapat dipakai untuk menghitung perubahan entalpi.

Pada 1100°C (1373 K) : $\Delta H = 34.715 \text{ kJ/kg mol}$ (dengan interpolasi)

Pada 18°C (291 K) : $\Delta H = 524 \text{ kJ/kg mol}$

Basis : 1 kg N₂

$$\Delta H = 34.715 - 524 = 34.191 \text{ kJ/kg mol}$$

Untuk mempergunakan tabel uap pertama-tama anda harus menempatkan wilayah dari sifat fisis yang diminati tabel tersebut disusun sehingga sifat-sifat kejenuhan didaftar dalam dua cara:

- 1) Tekanan kejenuhan diberikan pada interval yang sama untuk mempermudah interpolasi.
- 2) suhu kejenuhan diberikan pada interval yang sama untuk alasan yang sama.

Anda dapat menemukan wilayah tempat terletaknya keadaan khusus dengan merujuk pada salah satu dari dua tabel untuk sifat-sifat kejenuhan tersebut. Jika pada T atau P yang diberikan, sifat intensif spesifik yang diberikan terletak di luar kisaran sifat yang ada untuk cairan jenuh, uap jenuh, atau campurannya, maka keadaan tersebut pasti berada dalam wilayah *superheated* atau *subcooled*. Contohnya, lihat pada kutipan ringkas dari tabel uap dalam satuan SI berikut ini (dari Lampiran C.2 buku *basic principle and calculation in chemical engineering*):

Volume spesifik (m ³ /kg)					Entalpi (kJ/kg)		
P _{jenuh} (kPa)	T _{jenuh} (°C)	V _l	V _{lg}	V _g	h _l	h _{lg}	h _g
101,325	100,0	0,001043	1,672	1,673	419,5	2256,0	2675,6
200,0	120,0	0,001061	0,8846	0,8857	504,7	2201,5	2706,2

Untuk tiap tekanan kejenuhan, suhu kejenuhan yang sesuai (titik didih) diberikan bersama dengan nilai volume spesifik dan entalpi untuk cairan jenuh maupun uap jenuh. Nilai volume dan entalpi dalam kolom yang ditunjukkan oleh subskrip *lg* adalah perbedaan antara nilai dalam keadaan uap jenuh dan cairan jenuh.

CONTOH. Penggunaan Tabel Uap

- a. Uap didinginkan dari 640°F dan 92 psia sampai 480°F dan 52 psia. Berapa ΔH dalam Btu/lb?

Jawaban :

Gunakan tabel untuk satuan American Engineering dalam Lampiran C.1. Anda harus menggunakan interpolasi ganda untuk mendapatkan entalpi spesifik ΔH , relative terhadap referensi untuk tabel tersebut. Nilai ΔH pertama-tama diinterpolasi antara tekanan-tekanan pada suhu yang ditetapkan, dan kemudian antara suhu-suhu pada tekanan yang ditetapkan (diinterpolasi).

T (°F)			T (°F)			
p (psia)	600	700	p	600	640	700
90	1328,7	1378,1	92	1328,6		1378,0
95	1328,4	1377,8			1348,4	
p (psia)	400	500	p	450	480	500
50	1258,7	1282,6	52	1258,4		1282,4
55	1258,2	1282,2			1272,8	

Catat bahwa nilai tabel uap memasukkan efek tekanan pada ΔH juga suhu.

Contoh interpolasi yang diperlukan pada 600°F ialah $\frac{2}{3}(1328,7 - 1328,4) = 0,2$

Pada p = 92 psia dan T = 600°F, $\Delta H = 1328,7 - 0,12 = 1328,6$ Perubahan entalpi yang diminta ialah $\Delta H = 1272,8 - 1348,4 = -75,6$ Btu/lb.

CONTOH. Penggunaan Tabel Uap Jika Terlibat Perubahan Fase

- a. Empat kilogram air pada 27°C dan 200 kPa dikalorkan pada tekanan konstan sampai volume air menjadi 1000 kali nilai awalnya. Berapa suhu akhir dari air itu?

Jawaban :

Efek tekanan pada volume air cair dapat diabaikan (untuk memeriksa lihatlah pada tabel sifat-sifat air cair), maka dari itu volume spesifik awal adalah volume spesifik air cair jenuh pada 300 K, atau 0,001004 m³/kg. volume spesifik akhir ialah 0,001004(1000) = 1,004 m³/kg Pada 200 kPa, menggunakan interpolasi antara 400 dan 450 K mencakup kisaran volume spesifik 1,004

$$m^3/kg, \text{ kita menemukan } T \text{ dengan menyelesaikan } 0,9024 \frac{m^3}{kg} + \frac{(1,025-0,9024)m^3/kg}{(450-400) K}$$

$$(T - 400) K = 1,004 \frac{m^3}{kg} \quad T = 400 + 41 = 441 K$$

4. Penyajian Grafik Data Entalpi

Anda sering mendengar ungkapan: Sebuah gambar bernilai ribuan kata. Sesuatu yang serupa mungkin dapat dikatakan untuk grafik dua-dimensi, yaitu bahwa anda dapat memperoleh gagasan yang sangat baik tentang karakteristik entalpi dan sifat-sifat lain dari suatu unsure dalam semua wilayah yang diminati melalui sebuah grafik. Meski keakuratan dari pembacaan nilai-nilai dari sebuah grafik mungkin terbatas (tergantung pada skala dari grafik tersebut), penunjukkan aneka macam proses pada suatu grafik memungkinkan anda untuk memvisualisasi dan menganalisis apa yang sedang terjadi. Grafik adalah metode yang sederhana dan cepat untuk memperoleh data untuk menghitung perubahan entalpi. Sejumlah sumber grafik terdaftar dalam referensi pada bagian akhir pertemuan ini. Lampiran J berisi grafik untuk toluene dan karbon dioksida.

Grafik digambar dengan aneka macam koordinat, seperti p versus H , p versus V , atau p versus T . karena grafik hanya mempunyai dua dimensi, koordinat-koordinat tersebut hanya dapat mewakili dua variable. Variable lain yang dimulai harus diplotkan sebagai garis nilai konstan sepanjang muka grafik. Ingat kembali, contohnya, bahwa dalam diagram CO_2 , garis suhu konstan diperlihatkan sebagai parameter. Demikian pula, pada grafik dengan tekanan dan entalpi sebagai sumbu, garis volume spesifik konstan.

Berapa banyak sifat yang harus ditentukan untuk gas komponen tunggal untuk menetapkan dengan pasti keadaan gas tersebut? Jika anda menentukan dua sifat intensif untuk suatu gas murni, anda akan memastikan bahwa semua sifat intensif lainnya akan mempunyai nilai yang pasti, dan dua sifat intensif mana pun dapat dipilih dengan bebas. Karena suatu keadaan khusus untuk suatu gas dapat ditentukan dengan dua sifat independen mana pun, grafik dua-dimensi dapat dipandang sebagai cara yang bergua untuk menyajikan banyak kombinasi sifat-sifat fisis.

CONTOH. Penggunaan Grafik Tekanan-Entalpi untuk Butana

- Hitunglah perubahan ΔH , ΔV , dan ΔT untuk lb uap jenuh n-butana berubah dari 2 atm menjadi 20 atm (jenuh).

Jawaban :

	ΔH (Btu/lb)	ΔV (ft ³ /lb)	ΔT (°F)
Uap jenuh pada 2 atm	179	3,00	72
Uap jenuh pada 20 atm	233	0,30	239

$$\Delta H = 233 - 179 = 54 \text{ Btu/lb}$$

$$\Delta V = 3,00 - 0,30 = 2,70 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

$$\Delta T = 239 - 72 = 167^\circ\text{F}$$

KETERANGAN TAMBAHAN

Persamaan Clapeyron adalah hubungan termodinamika yang pasti antara kemiringan kurva tekanan-uap kalor molar penguapan dan variable-variabel lain yang terdaftar di bawah ini:

$$\frac{dp^*}{dT} = \frac{\Delta H_v}{T (V_g - V_l)} \quad (6.1)$$

Untuk

p^* = tekanan uap

T = suhu absolute

ΔH_v = kalor molar penguapan pada T

V_i = volume molar gas atau cairan seperti yang ditunjukkan oleh subskrip g atau l . Kumpulan satuan konsisten yang manapun dapat digunakan.

Persamaan (5.18) dapat digunakan untuk menghitung ΔH_v dan memeriksa konsistensi internal data jika fungsi untuk tekanan uap dari suatu unsur diketahui sehingga anda dapat mengevaluasi dp^*/dT . Jika anda mengasumsikan bahwa : (a) V_l dapat diabaikan dalam perbandingannya dengan V_g . (b) Hukum gas ideal dapat diterapkan untuk uap: $V_g = RT/p^*$. Maka

$$\frac{dp^*}{dT} = \frac{\Delta H_v dT}{RT^2} \quad (5.19)$$

Jika anda mengasumsikan lebih lanjut bahwa ΔH_v konstan pada kisaran suhu yang diminati, pengintegralan Persamaan (5.19) menghasilkan persamaan Clausius-Clapeyron

$$\log_{10} \frac{p_1^*}{p_2^*} = \frac{\Delta H_v}{2,303 R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (5.20)$$

Dua persamaan yang dapat digunakan untuk memperkirakan nilai ΔH_v ialah

Persamaan Chen. Persamaan yang menghasilkan nilai ΔH_v (dalam kJ/g mol) sampai 2% adalah *persamaan chen*:

$$\Delta H_v = \frac{T_b[0,033(T_b / T_c)] + 0,0297 \log_{10} p_c - 0,0327}{1,07 - T_b / T_c}$$

Untuk T_b ialah titik didih normal dari cairan dalam K, dan p_c adalah tekanan kritis dalam atmosfer. Perkiraan menggunakan entalpi penguapan pada titik didih normal. Sebagai contoh, Watson² menemukan secara empiris bahwa

$$\Delta H_v = \frac{T_b[0,033(T_b / T_c)] + 0,0297 \log_{10} p_c - 0,0327}{1,07 - T_b / T_c}$$

Untuk ΔH_{v_2} = kalor penguapan dari suatu cairan murni pada T_2

ΔH_{v_1} = kalor penguapan dari cairan yang sama pada T_1

C. SOAL LATIHAN/TUGAS

1. Berapa perubahan entalpi yang dibutuhkan untuk mengubah 3 lb air dari 32°F, 60 psia menjadi steam pada 1 atm, 300°F
2. Berapa perubahan entalpi yang dibutuhkan untuk mengubah campuran 1 lb air steam dengan kualitas steam 60% menjadi kualitas 80% jika suhu campuran tersebut adalah 300°F
3. Hitung $\Delta\hat{H}$ untuk 1 gram mol gas NO_2 dimana suhunya berubah dari 300 K menjadi 1000 K.

D. DAFTAR PUSTAKA

- Distantina S. 2001. Diktat Pendahuluan Neraca Massa.
- Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.
- Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.

PERTEMUAN 7

KESETIMBANGAN ENERGI YANG MEMPERHITUNGKAN REAKSI KIMIA

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

Pada pertemuan ini akan dijelaskan mengenai kesetimbangan energi yang memperhitungkan reaksi kimia, Anda harus mampu:

1. Menerapkan kesetimbangan energi (dan kesetimbangan materi) umum pada proses-proses yang melibatkan reaksi.
2. Menghitung suhu reaksi adiabatik.
3. Menghitung kalor pembentukan dari data percobaan untuk perubahan entalpi (termasuk perubahan fase) dari sebuah proses dengan terjadinya reaksi.

B. URAIAN MATERI

1. Informasi Dasar yang Diperlukan untuk Mengakomodasi Reaksi dalam Perhitungan

Untuk memperhitungkan perubahan yang disepertemuankan oleh suatu reaksi dalam kesetimbangan energi yang kita masukkan dalam tiap satuan konstituen suatu kuantitas tambahan yang disebut kalor (sebenarnya entalpi) pembentukan standar (standar heat of formation $\Delta \hat{H}_f^\circ$, kuantitas yang didiskusikan dalam rincian di bawah ini. (*Superskrip*^o menunjukkan “keadaan standar” dan of subskrip f menunjukkan “pembentukan /formation”). Jadi, untuk kasus spesies tunggal A tanpa efek tekanan apapun pada entalpi dan dengan menghilangkan perubahan fase, perubahan entalpi spesifik dari keadaan standar (referensi) diberikan oleh

$$\Delta \hat{H}_A = \Delta \hat{H}_{fA}^\circ + \int_{T_{ref}}^T C_{pA} dT' \quad (1)$$

Untuk beberapa spesies, kita akan mempunyai dalam suatu arus

$$\Delta H_{campuran} = \sum_{i=1}^S n_i \Delta \hat{H}_{fi}^\circ + \sum_{i=1}^S \int_{T_{ref}}^T n_i C_{pi} dT \quad (2)$$

Keterangan :

i = Menunjukkan setiap spesies

n_i = Jumlah mol spesies i

s = Jumlah total spesies

Jika terjadi perubahan fase, sebuah suku tambahan untuk entalpi perubahan fase harus ditambahkan pada ruas kanan persamaan (1) untuk memberikan entalpi total (total enthalpy) unsur A :

$$\Delta \hat{H}_A = \Delta \hat{H}_{fA}^\circ + (\hat{H}_{Tp} - \hat{H}_{ref}^\circ)$$

Untuk $(\hat{H}_{Tp} - \hat{H}_{ref}^\circ)$ mencakup baik “kalor sensible” maupun perubahan fase.

Jika suatu campuran masuk dan keluar dari suatu sistem tanpa terjadi reaksi, kita akan menemukan bahwa spesies yang sama masuk dan keluar sehingga perubahan entalpi tidak akan berbeda dengan modifikasi yang diuraikan di atas dengan apa yang kita telah gunakan sebelumnya, karena suku yang memperhitungkan kalor pembentukan dalam kesetimbangan energy dalam masukan dan keluaran akan dicoret. Contohnya, untuk kasus dua spesies dalam sistem aliran, entalpi keluaran akan menjadi :

$$\Delta H_{keluaran} = n_3 \Delta \hat{H}_{f3}^\circ + n_4 \Delta \hat{H}_{f4}^\circ + \int_{T_{ref}}^{T_{keluar}} (n_3 C_{p3} + n_4 C_{p4}) dT$$

dan entalpi sensible akan menjadi :

$$\Delta H_{masuk} = n_1 \hat{H}_{f1}^\circ + n_2 \Delta \hat{H}_{f2}^\circ + \int_{T_{ref}}^{T_{masuk}} (n_1 C_{p1} + n_2 C_{p2}) dT$$

Tanpa reaksi, amati bahwa $\Delta H_{keluaran} - \Delta H_{masuk}$ hanya akan melibatkan suku kalor sensible yang telah kami uraikan sebelumnya ; suku yang terkait dengan kalor pembentukan akan tepat sama dalam masukan dan keluaran dalam arus, dan akan dicoret.

Tetapi, jika terjadi suatu reaksi, kuantitas yang masuk dan keluar akan berbeda, suhu masuk dan keluar mungkin berbeda, dan suku-suku yang

melibatkan kalor pembentukan tidak akan dicoret. Contohnya, andaikan bahwa spesies 1 dan 2 memasuki sistem, bereaksi, dan spesies 3 dan 4 keluar. Maka:

$$\Delta H_{keluar} - \Delta H_{masuk} = (n_3 \Delta \hat{H}_{f3}^{\circ} + n_4 \Delta \hat{H}_{f4}^{\circ} - (n_1 \Delta \hat{H}_{f1}^{\circ} + n_2 \Delta \hat{H}_{f2}^{\circ})) + \int_{T_{ref}}^{T_{masuk}} (n_3 C_{p3} + n_4 C_{p4}) dT - \int_{T_{ref}}^{T_{masuk}} (n_1 C_{p1} + n_2 C_{p2}) dT \quad (3)$$

$\pm$ entalpi yang berkaitan dengan perubahan fase

Dalam kasus khusus proses aliran keadaan tunak (akumulasi nol) yang disini reaktan dan produk keluar pada keadaan standar (25°C dan 1 atm), dan kuantitas steikiometrik reaktan masuk dan bereaksi secara sempurna, suku kalor sensible ialah nol, dan kesetimbangan energy berkurang menjadi $Q = \Delta H$ dengan:

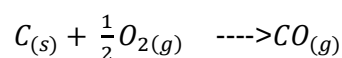
$$\Delta H = \left(\sum_{produk} n_i \Delta \hat{H}_{fi}^{\circ} \right) = \Delta H_{rxn}^{\circ}$$

Untuk ΔH_{rxn}° ialah symbol yang digunakan untuk apa yang disebut kalor reaksi pada keadaan standar (heat of reaction at the standard state), atau kadang-kadang kalor reaksi standar (standard heat of reaction). Ingat bahwa “kalor reaksi” sebenarnya ialah perubahan entalpi dan tidak ekivalen dengan perpindahan kalor.

Terdapat beberapa konvensi tertentu berkenaan dengan menghitung perubahan entalpi yang menyertai reaksi kimia :

- Reaktan ditunjukkan pada ruas kiri persamaan kimia, dan produk ditunjukkan pada ruas kanan
- Kondisi fase, suhu dan tekanan harus ditentukan kecuali jika dua yang terakhir adalah kondisi standar.
- Kecuali jika jumlah materi yang bereaksi dinyatakan, diasumsikan bahwa kuantitas yang bereaksi ialah jumlah stoikiometri yang ditunjukkan dalam persamaan kimia.

Kalor pembentukan standar (“kalor pembentukan” atau standard heat of formation (heat of formation), $\Delta \hat{H}_f^{\circ}$ adalah entalpi khusus untuk pembentukan 1 mol senyawa dari elemen konstituennya, contohnya,



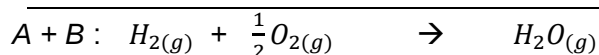
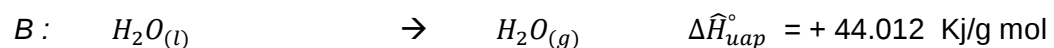
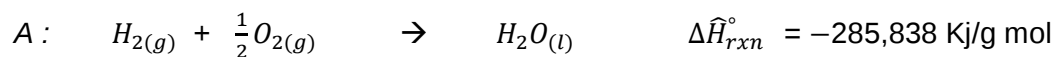
Dalam keadaan standa. Reaktan awal dan produk akhir harus berada pada 25°C dan 1 atm. Reaksi tersebut tidak harus mewakili reaksi sesungguhnya yang akan berjalan pada suhu konstan, tetapi dapat berupa proses khayalan untuk pembentukan suatu senyawa dari elemen-elemennya. Dengan mendefinisikan kalor pembentukan bernilai nol dalam keadaan standar untuk setiap elemen, adalah mungkin untuk merancang suatu sistem yang menyatakan kalor pembentukan untuk semua senyawa pada 25°C dan 1 atm.

Contoh soal :

- 1) Jika kalor pembentukan standar untuk $H_2O_{(g)}$ ialah -285,838 Kj/mol pada 25°C dan 1 atm, berapa kalor pembentukan standar untuk $H_2O_{(g)}$?

Jawaban :

$$\Delta \hat{H}_{rxn}^{\circ} = \sum \Delta \hat{H}_f^{\circ} \text{ produk} - \sum \Delta \hat{H}_f^{\circ} \text{ reaktan}$$



$$\Delta \hat{H}_{rxn}^{\circ} A + \Delta \hat{H}_{uap}^{\circ} = \Delta \hat{H}_{rxn}^{\circ} H_2O_{(g)} = \Delta \hat{H}_f^{\circ} H_2O = -241,826 \text{ Kj/g mol}$$

Latihan soal :

- a. Hitunglah $\Delta \hat{H}_{rxn}^{\circ}$ untuk reaksi berikut dari 4 g mol NH_3 :

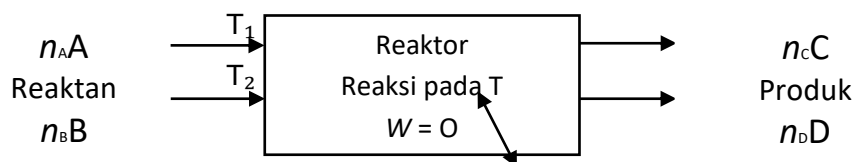


- b. Gasifikasi batu bara terdiri dari perubahan kimia dari batu bara padat menjadi gas. Nilai pemanasan batu bara berbeda-beda. Tetapi semakin tinggi nilai pemanasan, semakin tinggi gas yang dihasilkan (yanga pada dasarnya ialah metana, karbon monoksida, hydrogen dan lain-lain). Batu bara berikut ini mempunyai nilai pemanasan yang dilaporkan sebesar 29,770 Kj/Kg seperti yang diterima. Dengan mengasumsikan bahwa nilai ini ialah nilai pemanasan kotor, hitunglah nilai pemanasan bersih.

Komponen	Persen
C	71,0

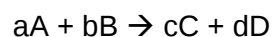
Komponen	Persen
H_2	5,6
N_2	1,6
S bersih	2,7
Abu	6,1
O_2	13,0
Total	100,0

2. Kestimbangan Energi yang Memperhitungkan Reaksi Kimia



Gambar 3. Proses dengan reaksi

Pikirkan proses yang digambarkan dalam Gambar 3. yang untuk itu reaksinya adalah :



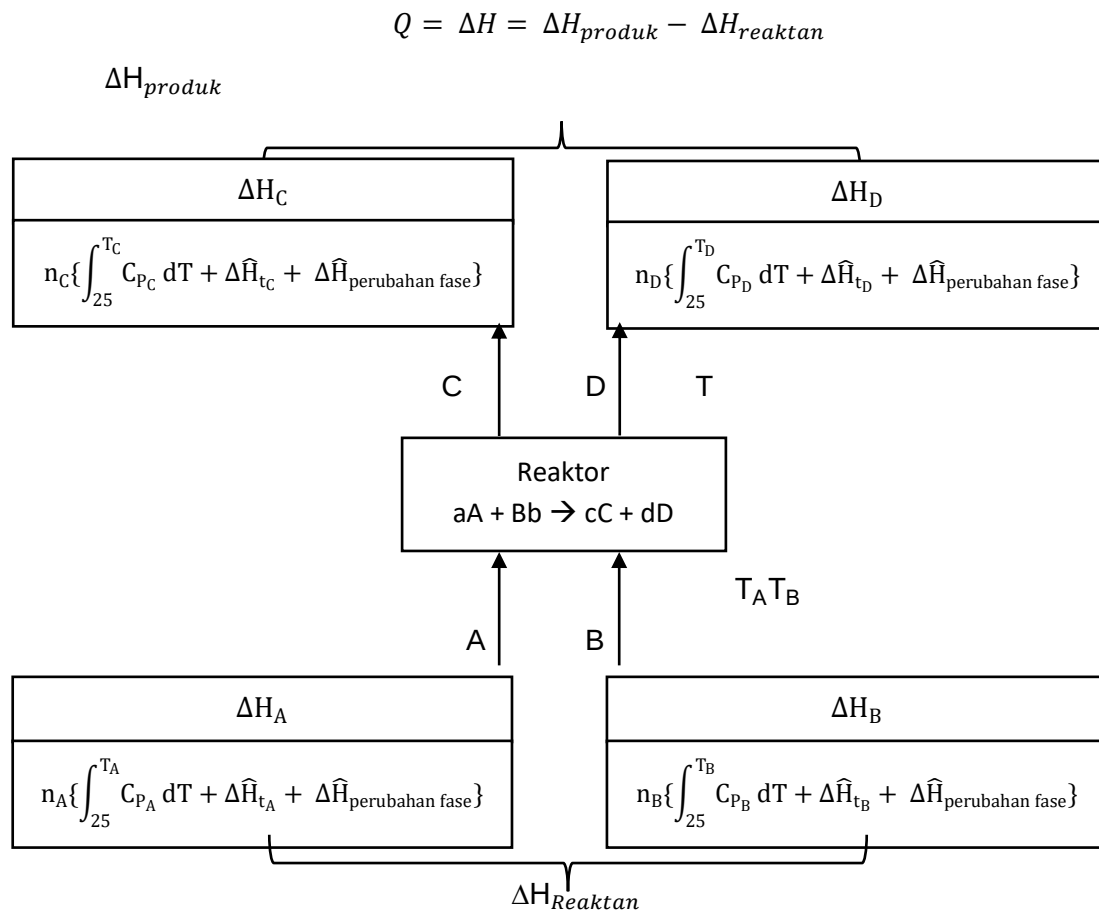
Jumlah nonstoikiometrik dari reaktan dan produk, masing-masing memasuki dan meninggalkan sistem tersebut pada suhu yang berbeda.

Entalpi dari tiap arus yang masuk dan keluar dihitung relatif terhadap keadaan referensi yang dipilih, dan meliputi :

- Kalor pembentukan standar dari komponen-komponennya
- Kalor sensible dari komponen-komponen tersebut
- Perubahan fase dari komponen-komponen tersebut.

Karena entalpi ialah fungsi keadaan, anda dapat memilih lintasan apapun yang anda inginkan untuk melaksanakan perhitungan perubahan entalpi keseluruhan dalam suatu proses selama anda mulai dan berhenti masing-masing pada keadaan awal dan akhir yang ditentukan.

Gambar aliran informasi untuk perhitungan dalam kestimbangan energi dengan mengasumsikan proses keadaan tunak ($\Delta E = 0$), tidak ada perubahan energi kinetik atau potensial, dan $W = 0$. Kestimbangan energi umum berkurang menjadi :



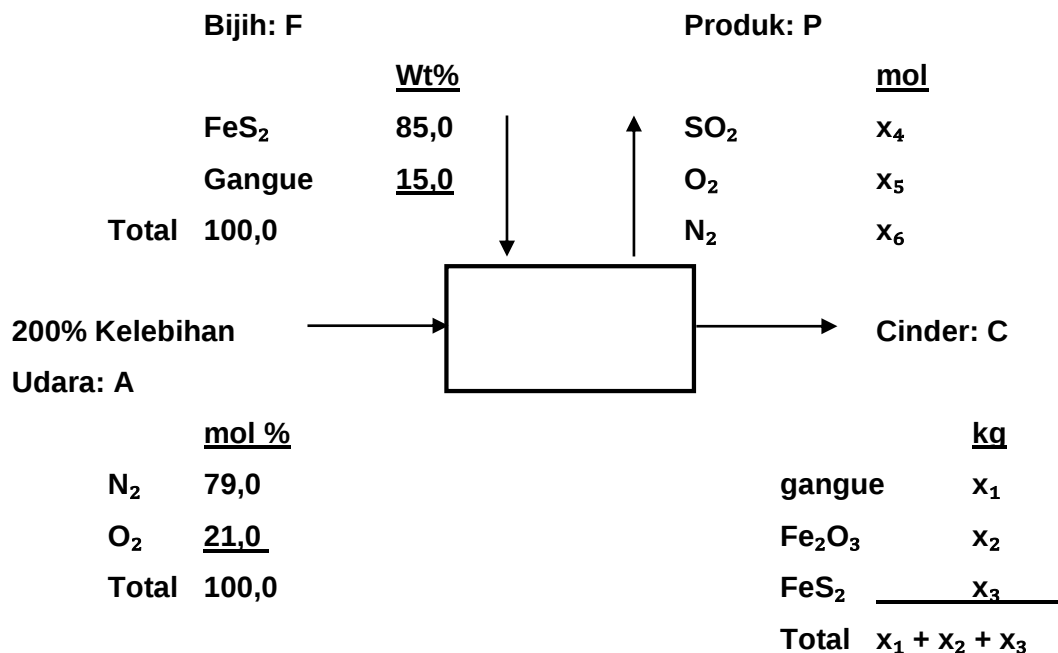
Gambar 7.2. Diagram alir informasi yang menunjukkan bagaimana menghitung entalpi dari komponen yang masuk dan meninggalkan reaktor.

Mungkin cara yang termudah untuk menghitung perubahan entalpi yang diperlukan ialah menggunakan data entalpi yang diperoleh secara langsung dari tabel yang dipublikasikan atau rumus yang dipublikasikan. Jangan lupa memperhitungkan perubahan fase, jika perubahan tersebut terjadi, dalam perhitungan entalpi jika perubahan fase tidak dimasukkan dalam $\Delta \hat{H}_f^\circ$ dan dalam tabel.

Contoh soal :

Suatu bijih besi pyrite yang mengandung 85,0% FeS_2 dan 15,0% *gangue* (kotoran inert, batu dan lain-lain) dibakar dengan sejumlah udara yang sama dengan 100% kelebihan udara menurut reaksi : $4\text{FeS}_2 + 11\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{SO}_2$ untuk menghasilkan SO_2 . Semua *gangue* plus Fe_2O_3 berakhir dalam produk buangan padat (cinder), yang beranalisis 4,0% FeS . Tentukan perpindahan kalor per kilogram bijih untuk menjaga arus produk pada 25°C jika arus yang masuk berada pada 25°C .

Jawaban :



Kesetimbangan materi untuk masalah ini harus dikerjakan sebelum menentukan perpindahan kalor yang sama dengan kalor reaksi standar. Proses ini ialah proses keadaan tunak dengan reaksi; sistemnya ialah reaktor.

Langkah 1, 2, 3 dan 4 proses ini ialah sistem keadaan tunak terbuka. Anda **menghitung** kelebihan udara berdasarkan pada reaksi yang dinyatakan seakan-akan semua FeS_2 bereaksi menjadi Fe_2O_3 meskipun sejumlah FeS_2 tidak bereaksi. Berat molekul ialah $\text{Fe}(55,85)$, $\text{Fe}_2\text{O}_3(159,70)$ dan $\text{FeS}_2(120,0)$.

Langkah 5

Basis: 100 kg bijih pyrite

Langkah 6 dan 7 ada enam yang tak diketahui (termasuk N_2 dalam P) dan dapat ditulis lima **kesetimbangan** unsur; fraksi massa FeS_2 diberikan, maka dari itu masalah kesetimbangan materi ini mempunyai sebuah pemecahan yang unik. Kita akan menggunakan lima kesetimbangan unsur O, N, S, *gaunge* dan Fe plus informasi tentang FeS_2 untuk menghitung mol SO_2 , O_2 dan N_2 dalam produk gas dan kg *gaunge*, Fe_2O_3 dan FeS_2 dalam *cinder*.

Langkah **4 (lanjutan)** Kelebihan udara ialah :

$$\text{Mol } FeS_2 = \frac{85,0}{120,0} = 0,7083 \text{ kg mol}$$

$$O_2 \text{ yang dibutuhkan} = 0,7083(11/4) = 1,9479 \text{ kg mol}$$

$$\text{Kelebihan } O_2 = 1,9479(2,00) = \underline{3,8958}$$

$$\text{Total } O_2 \text{ masuk} = 5,8437 \text{ kg mol}$$

$$\text{Total } N_2 \text{ masuk} = 5,8437(79/1) = 21,983 \text{ kg mol}$$

Kesetimbangan massa unsur ialah :

	<u>Masuk</u>	<u>Keluar</u>
Gaunge (kg) :	15,0	$= x_1$
N_2 (kg mol) :	21,983	$= x_6$
S (kg mol) :	$2(85,0/120,0)$	$= x_4 + (x_3/120,0)(2)$
Fe (kg mol) :	$1(85,0/120,0)$	$= (x_2/159,70)2 + (x_3/120,0)(1)$
O_2 (kg mol) :	5,8437	$= x_4 + x_2 + (x_2/159,70)(1,5)$

Juga,
$$\frac{x_3}{x_1 + x_2 + x_3} = 0,04$$

Penyelesaian untuk persamaan-persamaan ini ialah :

<u>P Masuk</u>	<u>C Masuk</u>
$SO_2 = 1,368 \text{ kg mol}$	Gaunge = 15,0 kg
$O_2 = 3,938$	$Fe_2O_3 = 54,63 \rightarrow 0,342 \text{ kg mol}$
$N_2 = 21,983$	$FeS_2 = 2,90 \rightarrow 0,0242 \text{ kg mol}$

Selanjutnya kita menggunakan kesetimbangan energi untuk menentukan perpindahan kalor. Kesetimbangan energi umum berkurang menjadi ($\Delta E = 0$, $\Delta P = 0$, $\Delta K = 0$, $W = 0$) $Q = \Delta H$. Karena semua reaktan dan produk berada pada $25^\circ C$

dan 1 atm dengan akibat bahwa semua suku “kalor sensibel” dalam Persamaan (2) menjadi nol, dan :

$$Q = \sum_{produk} n_i \Delta \hat{H}_i^\circ - \sum_{reaktan} n_i \Delta \hat{H}_i^\circ$$

Komp.	Produk			Reaktan		
	$10^{-3} \times \Delta \hat{H}_f^\circ$ g mol	$n_i \Delta \hat{H}_f^\circ$ (Kj/g mol)	$10^{-3} \times \Delta \hat{H}_f^\circ$ (Kj)	$10^{-3} \times \Delta \hat{H}_f^\circ$ g mol	$n_i \Delta \hat{H}_f^\circ$ (kJ/g mol)	$n_i \Delta \hat{H}_f^\circ$ (kJ)
FeS ₂	0,0242	-177,9	-4,305	0,7083	-177,9	-126,007
Fe ₂ O ₃		0,342	-822,156		0	-822,156
N ₂	21,9983	0	0	21,983	0	0
O ₂	3,938	0	0	5,8437	0	0
SO ₂	1,368	<u>-296,90</u>	-406,159		0	-296,90
<u>0</u>						<u>—</u>
Total		-691,641				-126,007

$$Q = [-691,641 - (-126,007)](10^3) = -565,634 \times 10^3 \text{ kJ/100 kg bijih}$$

atau

$$Q = -5,656 \times 10^3 \text{ kJ/kg bijih}$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa kalor dikeluarkan dari proses tersebut.

Istilah khusus yang disebut **suhu reaksi adiabatik (nyala)** (*adiabatic reaction (flame) temperature*) didefinisikan sebagai suhu yang diperoleh didalam proses ketika (a) reaksi dilakukan dibawah kondisi adiabatik, yaitu tidak ada pertukaran kalor antara wadah tempat reaksi tersebut berlangsung dan sekitarnya; dan (2) ketika tidak ada efek lain, seperti efek elektris, kerja, ionisasi, pembentukan radikal bebas dan sebagainya. Kita mengasumsikan bahwa produk keluar pada suhu reaksi dan jadi, jika anda mengetahui suhu produk tersebut, anda secara otomatis mengetahui suhu reaksi.

Dalam perhitungan suhu nyala untuk reaksi pembakaran, suhu reaksi adiabatik *mengasumsikan pembakaran sempurna*. Pertimbangan ekuilibrium mungkin memerintahkan kurang dari pembakaran sempurna untuk kasus sebenarnya. Contohnya, suhu nyala adiabatik untuk pembakaran CH₄ dengan udara teoretis telah dihitung sebesar 2010°C, membiarkan terjadinya pembakaran

tak sempurna, suhu tersebut akan menjadi 1920°C . Suhu sebenarnya ketika diukur ialah 1885°C .

Suhu reaksi adiabatik menunjukkan batas suhu tertinggi dari suatu proses. Kita tidak dapat mengerjakan dengan lebih baik, tetapi tentu saja suhu sebenarnya mungkin lebih kecil. Suhu reaksi adiabatik membantu kita memilih jenis-jenis materi yang harus ditentukan untuk peralatan tempat reaksi terjadi. Pembakaran kimia dengan udara menghasilkan gas pada suhu maksimum sebesar 2500 K, yang dapat ditingkatkan sampai 3000 K dengan penggunaan oksigen dan oksidan yang lebih luar biasa dan bahkan nilai ini dapat ditingkatkan lebih tinggi lagi meskipun masalah penanganan dan pengamanannya sulit. Penggunaan gas kalor seperti itu terdapat pada pembuatan materi baru, *micromachining*, mengelas menggunakan sinar laser dan pembangkit listrik langsung menggunakan gas terionisasi sebagai fluida penggerak.

Jika tabel bukannya persamaan kapasitas kalor digunakan untuk menghitung "kalor sensibel" dari berbagai arus yang memasuki dan meninggalkan reaktor, perhitungan akan melibatkan coba-coba. Keseimbangan energi keadaan tunak dengan $Q = 0$ berkurang menjadi hanya $\Delta H = 0$. Untuk mencari suhu keluaran dengan $\Delta H = 0$, jika tabel digunakan sebagai sumber untuk nilai $\Delta \hat{H}$, prosedur yang paling sederhana ialah :

- Mengasumsikan sederet nilai T yang dipilih untuk mengapit $0(+ \text{ dan } -)$ untuk jumlah entalpi produk minus reaktan, dan
- Segera setelah pengapit diperoleh, menginterpolasi dalam pengapit tersebut untuk mendapatkan nilai T yang diinginkan ketika $\Delta H = 0$.

Jika persamaan kapasitas kalor diintegrasikan, keseimbangan energi berkurang menjadi pemecahan persamaan kubik atau kuadratik dalam suhu keluaran.

C. SOAL LATIHAN/TUGAS

- Karbon monoksida pada 50°F dibakar secara sempurna pada tekanan 2 atm dengan 50% kelebihan udara yang berada pada 1000°F . Produk pembakaran tersebut meninggalkan ruang pembakaran pada 800°F . Hitunglah kalor yang dikeluarkan dari kamar pembakaran dinyatakan sebagai Btu per lb CO yang masuk.

2. Hitunglah suhu nyala teoritis untuk gas CO yang dibakar pada tekanan konstan dengan 100% kelebihan udara, jika reaktan masuk pada 100°C dan satu atm.

D. DAFTAR PUSTAKA

Distantina S. 2001. Diktat Pendahuluan Neraca Massa.

Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.

Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.

PERTEMUAN 8

PROSES REVERSIBEL

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

Pada pertemuan ini akan dijelaskan mengenai proses reversibel, Anda harus mampu:

1. Mendefinisikan proses reversibel.
2. Mendefinisikan suatu proses sebagai proses reversibel atau ireversibel dengan memberikan deskripsi proses tersebut.
3. Mendefinisikan efisiensi dan menerapkan konsepnya untuk menghitung kerja proses ireversibel.

B. URAIAN MATERI

1. Proses Reversibel

Proses reversibel (*reversible*) atau kuasi-statik (*quasi static*) adalah suatu proses ideal hipotesis yang jarang terjadi dalam praktek. Lalu, mengapa kita memikirkannya ? Alasannya ialah bahwa perhitungan untuk perubahan energi dapat dibuat untuk proses ideal (*ideal process*), dan kemudian efisiensi dapat digunakan untuk mengubah kerja atau perubahan energi ideal menjadi kerja atau perubahan energi yang sebenarnya. Suatu proses pada ekuilibrium yang mengalami gaya eksternal diferensial (seperti suhu atau tekanan tinggi) sehingga terjadi perubahan diferensial disebut proses reversibel. Sistem tersebut akan melalui keadaan nonekuilibrium, tetapi hanya dengan deviasi yang sangat kecil dari ekuilibrium jika gaya pendorongnya sangat kecil. Kebanyakan proses industri memperlihatkan perpindahan kalor pada perbedaan suhu yang terbatas pencampuran unsur unsur yang berbeda, tahanan listrik, perubahan yang mendadak dalam fase, perpindahan masa yang di bawah perbedaan konsentrasi yang terbatas, perkembangan bebas, gesekan pipa, dan kenonidealan mekanis, kimia dan termal, maka dari itu dianggap ireversibel (*irreversible*). Proses ireversibel selalu melibatkan degradasi potensi proses tersebut untuk melakukan kerja, yaitu, tidak akan menghasilkan jumlah kerja maksimum yang akan mungkin dihasilkan melalui proses reversibel (jika proses seperti itu dapat terjadi).

Sebagai contoh untuk proses reversibel dan ireversibel, amati gas dalam silinder yang digambarkan dalam gambar 5.13. Selama proses pengembangan

piston bergerak sepanjang jarak x dan volume gas yang terkurung dalam piston naik dan v_1 sampai v_2 . Dua gaya bekerja pada piston; satu ialah gaya yang didesakkan oleh gas tersebut, sama dengan tekanan kali luas permukaan piston, yang dan lainnya ialah gaya pada batang dan kepala piston dari luar. Jika gaya pers atuan luas yang didesakkan oleh gas sama dengan gaya (F) per satuan luas (A) yang disekkan oleh kepala piston, tidak ada yang terjadi. jika F/A lebih besar daripada tekanan gas, gas akan dimampatkan, sementara jika F/A lebih kecil daripada gaya gas, gas tersebut akan mengembang.

Dalam pengembangan reversibel, tak ada energi gas yang tersedia untuk melakukan kerja hilang karena gesekan (*friction*) antara kepala silinder dan dinding silinder, atau karena turbulensi dalam gas yang disepertemuankan pergerakan gas yang cepat, atau oleh macam-macam efek viskositas yang menyertai pengembangan tersebut, atau seperti temuan isinya jika proses tersebut ideal, kerja reversibel (ideal) yang dikerjakan oleh gas terhadap piston yang dapat dihitung dari

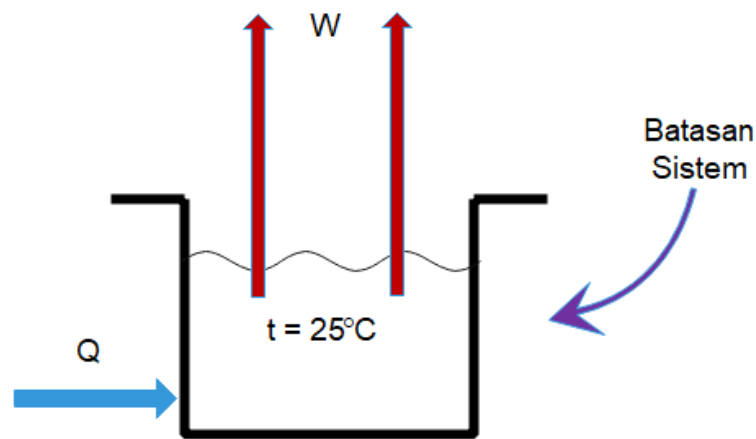
$$w_{rev} = - \int_{v_1}^{v_2} p \, dV$$

Jika proses tersebut tak ideal seperti kasus pada umumnya, kerja yang sebenarnya dilakukan akan menjadi lebih kecil. Proses pengembangan mungkin sedikit memanaskan dinding silinder, contohnya jika ada pergesekan. Contoh menggambarkan perhitungan kerja reversibel contoh dibawah ini menggambarkan satu proses real yang tidak harus reversibel.

Contoh. Penguapan

Berapa kerja yang dilakukan oleh 1 liter air ketika air tersebut menguap dari sebuah bejana terbuka pada 25°C dan tekanan atmosferik 100 kPa ?

Jawaban



Gambar 8.1. Proses Reversibel

Langkah 1,2,3, dan 4 sistem untuk soal ini ialah air prosesnya ialah proses batch. Apakah air melakukan kerja saat menguap ? Pasti! Air itu melakukan kerja terhadap atmosfer. Selanjutnya, proses yang digambarkan dalam gambar disamping adalah proses reversibel karna penguapan terjadi pada suhu dan tekanan konstan, dan kondisi dalam atmosfer tepat diatas bagian bejana yang terbuka dapat terbuka dapat dianggap berada dalam ekulibrium dengan permukaan air. Tekanan atmosferiknya ialah 100 kPa . Basisnya 1 L aircair pada 25°C. Volume spesifik air pada 100 kPa adalah 1.694 m³/kg H₂O

Langkah 5 Basis: 1 L air (cair)

Langkah 6 Keseimbangan energi umum

$$\Delta E = Q + W - \Delta[(\hat{H} + \hat{K} + \hat{P})_{in}]$$

Tidak akan berguna dalam memecahkan masalah ni karena Q tidak diketahui. Tetapi, bayangkan bahwa sebuah kantong yang dapat dikembangkan diatas permukaan bejana yang terbuka sehingga sistem tersebut bmenjadi sistem tertutup. Karena kondisi reversibel yang ditetapkan untuk masalah ini, kerja ialah

$$W = - \int_{v_1}^{v_2} p \, dV = -p \, \Delta V$$

Yang menunjukkan kerja reversibel yang dilakukannya oleh air dalam mendorong baik atmosfer.

Langkah 7,8,dan 9

$$W = \frac{-100 \times 10^3 \text{ Pa} \left[\frac{1,694 \text{ m}^3}{\text{kg}} \left| \frac{1 \text{ kg} - 1 \text{ L}}{1 \text{ L}} \right| \frac{10^3}{1 \text{ Pa}} \right] \frac{1 \text{ (N)(m}^{-2})}{1 \text{ (N)(m)}}}{1 \text{ J}}$$

Dengan mengetahui konsep proses ideal (reversibel) dan mengetahui kerja dalam proses sebenarnya, kita dapat mendefinisikan mekanis dengan dua cara

$$\text{Efisiensi} = \eta_2 = \frac{\text{masukan kerja yang sebenarnya untuk proses tersebut}}{\text{masukan kerja untuk suatu proses reversibel}}$$

Bergantung pada apakah kerja dilakukan oleh sistem atau kerja sedang dilakukan pada sistem.

Jenis efisiensi lainnya memperhitungkan keluaran energi yang berguna saja dibagi dengan masukan energi total :

$$\text{Efisiensi} = \eta_3 = \frac{\text{energi keluar yang berguna}}{\text{energi masuk}}$$

Setiap contoh asumsikan bahwa konversi bahan bakar dalam sebuah pabrik daya menghasilkan 88 kJ dalam produk uap per 100 kJ energi yang tersedia dari batu bara yang dibakar. Juga asumsikan bahwa konversi energi dalam uap menjadi energi mekanis ialah 43%, dan konversi dari energi mekanis menjadi listrik 97% efisien, efisiensi keseluruhan adalah $(0,88)(0,43)(0,97)=0,37$, yang berarti bahwa dua pertiga energi awal dibuang sebagai kalor ke lingkungan. Definisi ini memberikan suatu cara yang baik untuk membandingkan kinerja proses untuk konservasi energi (tetapi bukan satu satunya cara).

CONTOH. Penggunaan Efisiensi

Hitunglah kerja reversibel yang digunakan untuk memampatkan 5 ft³ gas ideal yang awalnya berada pada 100°F dari 1 sampai 10 atm dalam sebuah silinder adiabatik. Gas ini mempunyai persamaan keadaan $pV^{1,43} = \text{konstanta}$. Kemudian hitunglah kerja sebenarnya yang diperlukan jika efisiensi proses tersebut 80%.

Jawaban

Langkah 1, 2, 3, dan 4 Gambar 5.13 menunjukkan jenis alat untuk pemampatan. Volume akhir ialah

$$V_2 = V_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/1,40} = 5 \left(\frac{1}{10} \right)^{1/1,40} = 0,965 \text{ ft}^3$$

Langkah 5 Basisnya ialah 5 ft³ pada 100°F dan 1 atm.

Langkah 6-9

$$\begin{aligned} w_{rev} &= - \int_{v_1=5}^{v_2=0,965} p \, dV = - \int_{v_1}^{v_2} p_1 d \left(\frac{V_1}{V} \right)^{1,40} dV = -p_1 V_1^{1,4} \int_{V_2}^{V_1} V^{-1,40} dV \\ &= - \frac{p_1 V_1^{1,40}}{1-1,40} (V_2^{-0,40} - V_1^{-0,40}) = - \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1-1,40} \\ &= \frac{[(10)(0,965) - (10)(5)](\text{ft}^3)(\text{atm})}{0,40} \quad \left| \quad \frac{1,987 \text{ Btu}}{0,7302(\text{ft}^3)(\text{atm})} \right. \\ &= 31,63 \text{ btu} \end{aligned}$$

Tanda positif berarti kerja dilakukan pada sistem tersebut.

kerja sebenarnya yang dibutuhkan ialah

$$\frac{31,63}{0,8} = 39,5 \text{ Btu}$$

Tabel 8.1. Efisiensi Energi

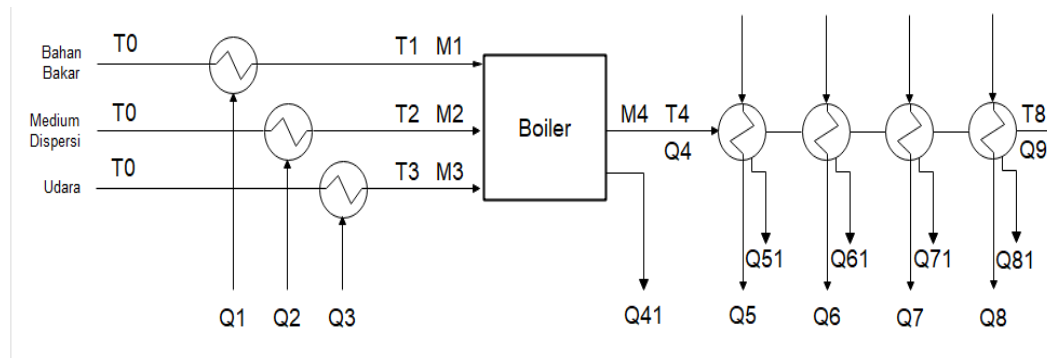
Alat	Efisiensi
Lampu pijar	4-5
Mesin mobil bahan bakar bensin	25-26
Mesin turbin pesawat terbang	36-37
Mesin diesel	37-38
Motor listrik kecil	62-63
Baterai penyimpan	72-73
Tungku gas rumahan	84-85

CONTOH. Perhitungan Efisiensi Pabrik

Analisa penggunaan energi dilakukan dalam semua pabrik. Contoh ini menggunakan data dari M. Fehr. “An Auditor’s View of Furnace efficiency,” dalam *Hydrocarbon Processing*, Nov. 1998, hlm 93. Rincian lebih jauh tentang

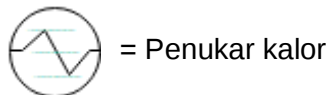
peralatan proses dan pemeriksaan energi dapat ditemukan dalam artikel tersebut.

Gambar C5.28 menggambarkan boiler berbahan bakar gas. Data dihitung yang dari pengukuran pada



Gambar 8.2. Boiler Berbahan Bakar Gas

Keterangan gambar :



M = Aliran Massa

Q = Aliran Kalor

T = Temperatur

Pemanasan adalah (semua dalam kJ per m pada SC bahan bakar gas)

LHV bahan bakar: 36,654

Q4: 32,114

Q1: 16

Q41: 6,988

Q2: 0

Q8: 1,948

Q3: 2,43

Q9: 2,643

Perhitungan dari pengukuran memberikan nilai untuk penjumlahan Q_5 lainnya:

$$Q_5 + Q_6 + Q_7 = 9,092$$

$$Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_{51} + Q_{61} + Q_{71} = 27,119$$

$$Q_8 + Q_{81} = 2,352$$

Dari perhitungan perpindahan kalor ini beberapa efisiensi dapat ditentukan untuk menguji kinerja pabrik:

a. Efisiensi kotor

$$\frac{LVH+Q1+Q2+Q3-Q9}{LVH} = \frac{36,654+16+0+2,432-2,643}{36,654} = 0,995$$

b. EFESIENSI Termal

$$\frac{Q5+Q6+Q7+Q8}{LVH+Q1+Q2+Q3} = \frac{9,092 + 1,948}{36.654+16+0+2,432} = 0,282$$

c. EFESIENSI Pembakaran

$$\frac{Q4}{Q4+Q41} = \frac{32,114}{32,114+6,988} = 0,821$$

Dalam beberapa proses, seperti kolon distilasi atau reaktor, perpindahan kalor dan perubahan entalpi adalah komponen energi yang penting dalam kesetimbangan energi. Kerja, energi potensial, dan energi kinetik adalah nol atau benar benar nolor tetapi, yang penting, untuk proses proses ini, kesetimbangan energi yang hanya menangani bentuk mekanis dari energi menjadi alat yang berguna.

Keseimbangan energi mengenal aneka macam golongan energi tanpa menanyakan sampai bagaimana “kegunaan” dari tiap bentuk energi untuk manusia. Pengalaman kami dengan proses proses mesin dan tennal menunjukkan bahwa beberapa jenis energi tidak dapat diubah sama sekali menjadi jenis yang lain, bahwa energi dalam satu keadaan tidak dapat diubah ke keadaan lain tanpa penambahan kerja atau kalor ekstra. Contohnya, energi internal tidak dapat diubah sama sekali menjadi kerja mekanis. Untuk memperhitungkan keterbatasan pada penggunaan ini, hukum termodinamika kedua akhirnya dikembangkan sebagai prinsip umum.

Salah satu konsekuensi dari hukum termodinamika kedua ini ialah bahwa dua kategori energi dari “kualitas” yang berbeda dapat “diandaikan”

- a. Yang disebut bentuk mekanis (mechanical) dari energi, seperti energi kinetik, energi potensial, dan kerja, yang dapat diubah dengan sempurna oleh mesin iséal (reversibel) dari suatu bentuk ke bentuk lain dalam golongan tersebut.
- b. Bentuk energi yang lain, seperti energi dan kalor yang tidak dapat diubah dengan sangat bebas.

Tentu saja, dalam proses real dengan terjadinya gesekan, efek viskositas, pencampuran komponen, dan fenomena pembuangan yang mencegah konversi sempurna dari satu bentuk energi mekanis ke yang lainnya, kelonggaran harus dibuat dalam membuat keseimbangan pada energi mekanis untuk “kehilangan” dalam kualitas ini.

Keseimbangan pada energi mekanis dapat ditulis pada basis mikroskopik untuk volume elemental dengan mengambil produk skalar dari kecepatan lokal dan persamaan pergerakannya. Setelah pengintegralan pada volume keseluruhan dari sistem ini keseimbangan energi mekanis (*mechanical energy balance*) keadaan lunak untuk suatu sistem dengan pertukaran massa dengan sekitarnya menjadi, pada basis persatuan massa.

$$\Delta(\hat{K} + \hat{P}) + \int_{p_1}^{p_2} \hat{V} dp - \hat{W} + \hat{E}_y = 0$$

Untuk $\hat{K}$ dan $\hat{P}$, berhubungan dengan massa yang masuk dengan keluar dari sistem, dan $\hat{E}_y$ menunjukkan kehilangan energi mekanis yaitu konversi irreversibel oleh *fluida mengalir* dari energi mekanis menjadi energi internal, suatu istilah yang harus, dalam setiap proses individu, dievaluasi dengan percobaan (atau, seperti yang terjadi dalam praktik, dengan penggunaan hasil percobaan yang sudah ada untuk proses yang serupa). Keseimbangan energi mekanis paling baik diterapkan untuk perhitungan aliran-fluida ketika suku energi kinetik dan potensial dan kerja berkepanjangan, dan kehilangan karena gesekan dapat dievaluasi dari buku pegangan dengan bantuan *faktor gesekan* (*friction factors*) atau *koefisien orifice* (*orifice coefficients*).

Sekarang mari kita lihat dua penerapan khas dari keseimbangan energi mekanis.

CONTOH. Perhitungan Kerja Reversibel untu Proses Alir

Kita akan mengulang jawaban untuk contoh kecuali bahwa dalam masalah ini proses akan menjadi terbuka dalam *steady state*

Jawaban

Langkah 1, 2, 3, dan 4 Gambar 5.29 menunjukkan sistem dan data. Mol gas ialah

$$n_1 = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{1 \text{ atm} \quad 5 \text{ ft}^3}{560^\circ\text{K} \quad 0,7302(\text{ft}^3)(\text{at})} \frac{1 (\text{lb mol})(^\circ\text{R})}{1} = 0,0122 \text{ lb}$$

C. SOAL LATIHAN/TUGAS

1. Proses mana yang akan menghasilkan lebih banyak kerja : (a) pengembangan gas yang ditahan oleh sebuah piston terhadap tekanan konstan, atau (b) pengembangan reversibel gas yang di tahan oleh sebuah piston ? Berikan penjelasan anda !
2. Apa perbedaan antara energi termal dan mekanis ?
3. Hitunglah kerja per menit yang dibutuhkan untuk memompa 1 lb air per menit dari 100 psia dan 80°F ke 1000 pasia dan 100°F. Arus keluar berada 10 ft di atas arus masuk.
4. Air di pompa dari sebuah reservoir penyimpanan yang sangat besar pada laju 2000 gal/menit. Tentukan daya minimum (yaitu daya untuk proses reversibel) yang diperlukan oleh pompa tersebut dalam tenaga kuda (hp) jika di ketahui tinggi cairan dalam reservoir terhadap aliran keluar pada bagian bawah reservoir 10 ft, lebar pipa keluaran reservoir 2 ft, lebar pipa keluaran pompa 1 ft, ketinggian pompa dengan tempat air yang dipindahkan 40 ft dan tekanan pada aliran air yang dipompakan pada ketinggian 40 ft sebesar 20 psig ?

D. DAFTAR PUSTAKA

Distantina S. 2001. Diktat Pendahuluan Neraca Massa.

Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.

Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.

PERTEMUAN 9

KESETIMBANGAN ENERGI MEKANIS

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

Pada pertemuan ini akan dijelaskan mengenai kesetimbangan energi mekanis, Anda harus mampu menulis kesetimbangan energi mekanis keadaan tunak untuk suatu sistem terbuka dan menerapkannya pada suatu masalah.

B. URAIAN MATERI

1. Kesetimbangan Energi Mekanis

Kesetimbangan energi adalah mengenai aneka macam golongan energi tanpa menanyakan sampai bagaimana “kegunaan” dari tiap bentuk energi untuk manusia. Pengalaman kami dengan proses-proses mesin dan termal menunjukkan bahwa beberapa jenis energi tidak dapat diubah sama sekali menjadi jenis yang lain, dan bahwa energi dalam satu keadaan lain tanpa menambahkan kerja atau kalor ekstra. Contohnya, energi internal tidak dapat diubah sama sekali menjadi kerja mekanis. Untuk memperhitungkan keterbatasan pada penggunaan ini, hukum termodinamika kedua akhirnya dikembangkan sebagai prinsip umum.

Salah satu konsekuensi dari hukum termodinamika kedua ini ialah bahwa dua energi dari “kualitas” yang berbeda sapat “diandalkan”

- a. Yang disebut *mekanis(mechanical)* dari energi, seperti energi kinetik, energi potensial, dan kerja, yang dapat diubah dengan sempurna oleh mesin *ideal* (revisibel) dari satu bentuk ke bentuk lain dalam golongan tersebut.
- b. Bentuk energi yang lain, seperti energi dan kalor yang tidak dapat diubah dengan secara bebas.

Tentu saja, dalam proses real dengan terjadinya gesekan, efek viskositas, pencampuran komponen, dan fenomena pembuangan yang mencegah konversi sempurna dari satu bentuk energi mekanis ke yang lainnya, kelonggaran harus dibuat dalam membuat kesetimbangan pada energi mekanis untuk “kehilangan” dalam kualitas ini.

Kesetimbangan energi pada energi mekanis dapat ditulis pada basis mikroskopik untuk volume elemental dengan mengambil produk skalar dari kecepatan lokal dan persamaan pergerakan. Setelah pengintegralan pada volume

keseluruhan dari sistem ini *kesetimbangan energi mekanis* (mechanical energy balance) *keadaan tunak untuk suatu sistem dengan pertukaran massa dengan sekitarnya* menjadi, pada basis per satuan massa.

$$\Delta(\hat{K} + \hat{P}) + \int_{p_1}^{p_2} \hat{V} dp - \hat{W} + \hat{E}_v = 0$$

Untuk $\hat{K}$ dan $\hat{P}$ berhubungan dengan massa yang masuk dan keluar dari sistem, dan $\hat{E}_v$ menunjukkan kehilangan energi mekanis, yaitu konversi ereversibel ole *fluida mengair* dari energi internal, suatu istilah yang harus dalam setiap proses individu, dievaluasi dengan percobaan (atau, yang sering terjadi dalam praktik dengan penggunaan hasil percobaan yang sudah ada untuk proses yang serupa). Persamaan di atas kadang-kadang disebut ***persamaan Bernoulli*** (*bernoulli equation*), khususnya untuk proses reversible untuk $\hat{E}_v = 0$.

Contoh Soal

- a. Hitunglah kerja revisibel yang digunakan untuk memampatkan 5 ft³ gas ideal yang awalnya berada pada 100°F dari 1 sampai 10 atm dalam sebuah silinder adiabatik. Gas ini mempunyai persamaan keadaan $pV^{1,40} = konstanta$. Kemudian hitunglah kerja sebenarnya yang diperlukan jika efisiensi proses tersebut 80%.

Jawaban:

Langkah 1, 2, 3, dan 4 volume akhir ialah

$$V_2 = V_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/1,40} = 5 \left(\frac{1}{10} \right)^{1/1,40} = 0,965 \text{ ft}^3$$

Langkah 5 Basisnya ialah 5 ft³ pada 100°F dan 1 atm.

Langkah 6 – 9

$$\begin{aligned}
 W_{rev} &= - \int_{V_1=5}^{V_2=0,965} P \, dv = - \int_{V_1}^{V_2} P_1 \left(\frac{V_1}{V} \right)^{1,40} dV = -P_1 V_1^{1,4} \int_{V_1}^{V_2} V^{-1,40} dV \\
 &= - \frac{P_1 V_1^{1,4}}{1 - 1,40} (V_2^{-0,40} - V_1^{-0,40}) = - \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - 1,40} \\
 &= \frac{[(10)(0,965) - (1)(5)](ft^3)(atm) \times 1,987 \, Btu}{0,40 \times 0,7302 (ft^3)(atm)} = 31,63 \, Btu
 \end{aligned}$$

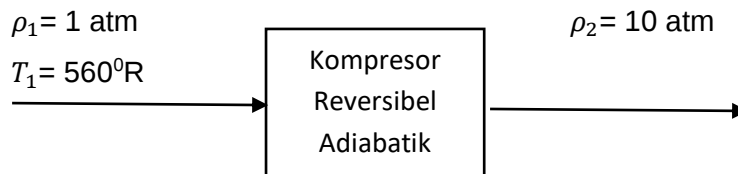
Tanda positif berarti bahwa kerja dilakukan pada sistem tersebut.

Kerja sebenarnya yang dibutuhkan ialah:

$$\frac{31,63}{0,8} = 39,5 \, Btu$$

- b. Kita akan mengulang jawaban diatas tetapi masalah dalam masalah ini proses akan menjadi sistem terbuka dalam *steady state*

Jawaban:



Langkah 1, 2, 3, dan 4 Gambar di atas menunjukkan sistem dan data. Mol gas ialah

$$n_1 = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{1 \, atm \times 5 \, ft^3 \times 1 (lb \, mol)(^{\circ}R)}{560^{\circ}R \times 0,07302 (ft^3)(atm)} = 0,0112 \, lb \, mol$$

Langkah 5

Basis: 0,012 lb mol

Langkah 3, 6, 7, 8, dan 9 Kesetimbangan energi mekanis (per satuan massa, atau mol, di sini untuk komponen tunggal)

$$\Delta(\hat{K} + \hat{P}) + \int_{p_1}^{p_2} \hat{V} \, dp - \hat{W} + \hat{E}_v = 0$$

Dapat disederhanakan

$$\Delta \hat{K} = 0$$

$$\Delta \hat{P} = 0$$

$$\hat{E}_v = 0 (\text{assumed reversible})$$

Sehingga,

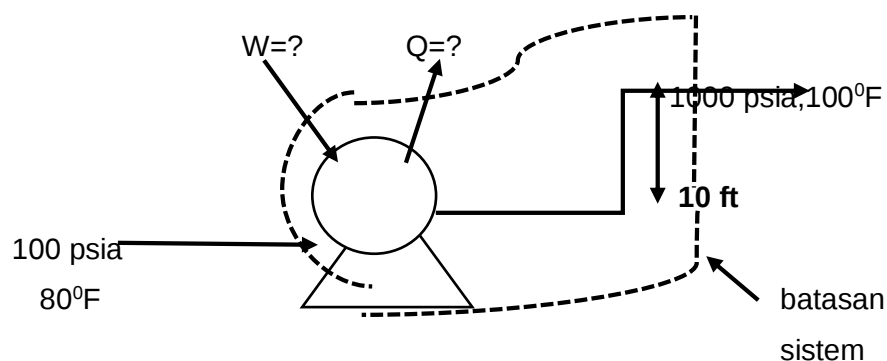
$$\hat{W}_{rev} = \int_{p_1}^{p_2} \hat{V} dp = \int_{p_1}^{p_2} \hat{V}_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{1,40}} dp = \hat{V}_1 p_1^{0,714} [(p_2^{0,286} - p_1^{0,286})]$$

$$\begin{aligned} \hat{W}_{rev} &= n_1 ; \hat{W}_{rev} = n_1 \left(\frac{V_1}{n_1} \right) p_1^{0,714} [3,50(p_2^{0,286} - p_1^{0,286})] \\ &= (5)(1)^{0,714} (3,50) [(10)^{0,286} - 1^{0,286}] (ft^3)(atm) \left(\frac{1,987 \text{ Btu}}{0,7302 (ft^3)(atm)} \right) \\ &= 44,3 \text{ Btu} \end{aligned}$$

Kerja sebenarnya yang diperlukan untuk dilakukan pada sistem tersebut ialah

$$\frac{44,3}{0,8} = 55,4 \text{ Btu}$$

- c. Hitunglah kerja per min yang dibutuhkan untuk memompa 1 lb air per min dari 100 psia dan 80°F ke 1000 psia dan 100°F. Arus keluar berada 10 ft di atas arus masuk.



Jawaban:

Langkah 1, 2, 3, dan 4

Sistem yang diperlihatkan gambar di atas ialah proses keadaan tunak

Langkah 4 dan 7 kesetimbangan energi mekanis umum ialah

$$\Delta(\hat{K} + \hat{P}) + \int_{p_1}^{p_2} \hat{V} dp - \hat{W} + \hat{E}_v = 0 \dots\dots\dots(a)$$

Kita akan mengasumsikan bahwa $\Delta \hat{K}$ insignifikan, dan juga sebelumnya mengasumsikan bahwa proses tersebut ireversibel sehingga $E_v = 0$ dan pompa itu 100% efisien. (Setelah itu kita akan memikirkan apa yang akan kita lakukan jika proses tersebut tidak ireversibe.) Persamaan (a) berkurang menjadi

$$\widehat{W} = \int_{p_1}^{p_2} \widehat{v} \, dp + \Delta \widehat{P} \dots\dots\dots (b)$$

Langkah 5

Basis: 1 min operasi = 1 lb H₂O

Langkah 6 dan 8 Dari tabel uap, volume spesifik air cair ialah $0,01607 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ pada 80°F dan $0,01613 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ pada 100°F . Untuk tujuan praktis semata, air dianggap tidak dapat dimampatkan dan volume spesifik dapat diambil sebesar $0,0161 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$. Kita mempunyai hanya satu yang tak diketahui dalam persamaan (b): $(\hat{W})$.

Langkah 9

$$\Delta \hat{P} = \frac{1 \text{ lb}_m}{10 \text{ ft}} \cdot \frac{32,2 \text{ ft}}{\text{S}^2} \cdot \frac{1 \text{ Btu}}{778(\text{ft})(\text{lb}_f)} = 0,0129$$

$$1 \text{ lb}_m \int_{100}^{100} 0,0161 \, dp = 1 \text{ lb}_m \cdot 0,0161 \text{ ft}^3 \cdot \frac{(1000-100)(\text{lb}_f)}{\text{lb}_m \cdot \text{in.}^2 \cdot 1 \text{ ft}} \cdot \left(\frac{12 \text{ in.}^2}{788(\text{ft})(\text{lb}_f)} \right) 1 \text{ Btu}$$

$$= 2,68 \text{ Btu}$$

$$\hat{W} = 2,68 + 0,0129 = 2,69 \frac{Btu}{lb_m}$$

Nilai yang kira-kira sama dapat dihitung menggunakan Persamaan (5.130) jika $\hat{Q} = \hat{K} = 0$, karena perubahan entalpi untuk proses reversibel untuk 1 lb air yang berubah dari 100 psia dan 100°F menjadi 1000 psia ialah 2,70 Btu. Buatlah perhitungannya sendiri. Tetapi, biasanya tidak ada data entalpi untuk

cairan selain air, atau tidak mempunyai keakuratan yang memadai untuk dikatakan valid, hal ini memaksa sarjana teknik untuk melihat pada kesetimbangan energi mekanis.

Sekarang kita mungkin menanyakan tentang tujuan pembelian motor-pompa, katakanlah tentang kerja apa yang akan dilakukan untuk proses real sebagai pengganti proses reversibel khayal yang diasumsikan di atas. Pertama-tama, anda akan perlu mengetahui efisiensi dari kombinasi pompa dan motor sehingga masukan sebenarnya dari sekitar (hubungan listrik) ke sistem yang akan diketahui. Kedua, kehilangan karena gesekan dalam pipa, katup, dan sambungan harus ditaksir sehingga suku $\hat{E}_v$ dapat dimasukkan kembali ke dalam persamaan (a). Andaikan, untuk tujuan ilustrasi, bahwa $\hat{E}_v$ ditaksir sebesar dari buku pegangan yang sesuai, 320 (ft)(lb_f/lb_m) dan efisiensi motor-pompa ialah 60% (berdasarkan pada 100% efisiensi untuk motor-pompa reversibel). Maka ,

$$\hat{E}_v = \frac{320(\text{ft})(\text{lb}_f) \times 1 \text{ Btu}}{1 (\text{lb}_m) \times 778(\text{ft})(\text{lb}_f)} = 0,41 \text{ Btu/lb}_m$$

$$\hat{W} = 2,66 + 0,013 + 0,14 = 3,10 \text{ Btu/lb}_m$$

Ingat bahwa tanda positif menunjukkan bahwa kerja dilakukan pada sistem tersebut. Motor pompa itu harus mempunyai kapasitas

$$\frac{3,10 \text{ Btu} \times 1 \times 1 \text{ min} \times 1,415 \text{ hp}}{1 \text{ min} \times 0,60 \times 60 \text{ s} \times 1 \text{ Btu/s}} = 0,122 \text{ hp}$$

C. SOAL LATIHAN/TUGAS

1. Carilah Q, W, ΔE, dan ΔH untuk pemampatan reversibel dari 3 mol gas ideal dari volume 100 dm³ menjadi 2,4 dm³ pada T konstan 300°K.
2. Air pompa dari sebuah reservoir penyimpanan yang sangat besar seperti yang diperlihatkan gambar di bawah. Pada laju 2000 gal/min. tentukan daya minimum (yaitu daya untuk proses reversibel) yang diperlukan oleh pompa tersebut dalam tenaga kuda (hp)

D. DAFTAR PUSTAKA

Distantina S. 2001. Diktat Neraca Massa.

Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.

Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.

PERTEMUAN 10

KALOR PELARUTAN DAN PENCAMPURAN

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

Pada pertemuan ini akan dijelaskan mengenai kalor pelarutan dan pencampuran, Anda harus mampu:

1. Membedakan antara larutan ideal dan larutan real.
2. Menghitung kalor pencampuran atau kalor pemisahan pada kondisi standar dengan diberikannya mol materi-materi yang membentuk campuran tersebut.
3. Menghitung integral kalor pelarutan standar.

B. URAIAN MATERI

1. Kalor Pelarutan dan Pencampuran

Jika suatu arus terdiri dari beberapa komponen, sifat total dari arus itu adalah jumlah dari sifat-sifat komponen individunya yang dibobotkan dengan tepat. Untuk **larutan ideal** (*ideal solutions*) seperti itu, kita dapat menulis, contohnya untuk kapasitas kalor campuran ideal:

$$C_{p \text{ campuran}} = x_A C_{pA} + x_B C_{pB} + x_C C_{pC} + \dots$$

atau, untuk entalpi,

$$\Delta \hat{H}_{\text{campuran}} = x_A \Delta \hat{H}_A + x_B \Delta \hat{H}_B + x_C \Delta \hat{H}_C + \dots$$

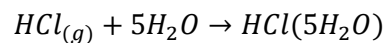
Campuran gas ialah contoh yang baik dari larutan ideal. Tetapi, untuk campuran cair kita sering menemukan bahwa kalor diserap atau dipancarkan dari sistem pada saat pencampuran komponen-komponennya. Larutan seperti ini akan disebut **larutan "real."** Per mol terlarut

$$\Delta H^{\circ}_{\text{larutan akhir}} - \Delta H^{\circ}_{\text{komponen awal}} = \Delta H^{\circ}_{\text{pencampuran}}$$

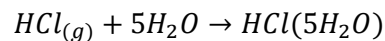
Kalor pencampuran (*heat of mixing*) spesifik ($\Delta H^{\circ}_{\text{pencampuran}}$) (yaitu, perubahan entalpi pada pencampuran per satuan massa) harus ditentukan

dengan percobaan, tetapi dapat dipanggil kembali dari tabulasi percobaan (yang dimuluskan), segera setelah data seperti itu tersedia. Jenis perubahan energi ini diberi nama formal **kalor pelarutan** (*heat of solution*) ketika satu unsur larut dalam yang lainnya, dan ada juga negatif dari kalor larutan, **kalor pemisahan** (*heat of dissolution*), untuk suatu unsur yang terpisah dari suatu larutan. Sebagai contoh, tabulasi data untuk kalor pelarutan HCl tampak pada Tabel 3 dalam energi *per mol terlarut* untuk kuantitas pelarut yang ditambahkan secara berurutan pada terlarut; gram mol menunjukkan gram mol terlarut. Kalor pelarutan agak mirip dengan kalor reaksi di mana perubahan energi terjadi karena perbedaan dalam gaya tarik-menarik antara molekul-molekul pelarut dan terlarut. Tentu saja, perubahan energi ini jauh lebih kecil daripada energi yang kita temukan menyertai pemecahan dan penggabungan ikatan-ikatan kimia. Kalor pelarutan ditangani dengan mudah dengan cara yang sama seperti kalor reaksi dalam kesetimbangan energi.

Proses pelarutan dapat ditunjukkan oleh persamaan seperti berikut ini:



Atau

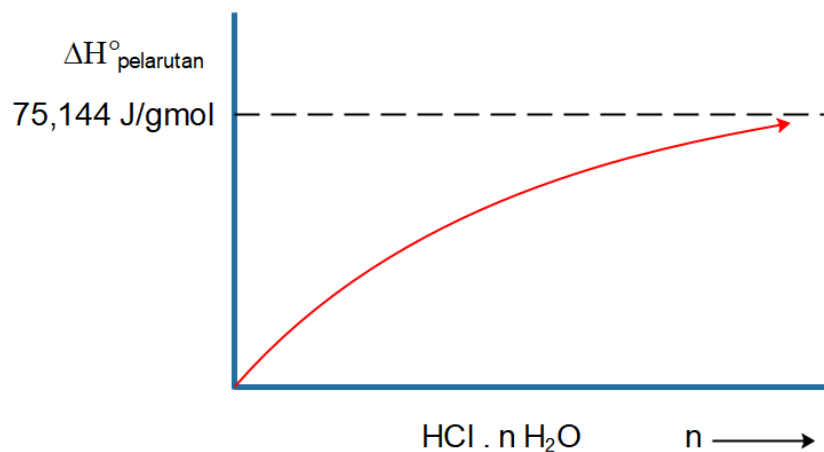


$$\Delta H^\circ_{\text{pelarutan}} = -\frac{64,047J}{g} \text{mol } HCl_{(g)}$$

Pernyataan HCl(5H₂O) berarti bahwa 1 mol HCl telah dilarutkan dalam 5 mol air, dan perubahan entalpi untuk proses itu ialah -64,047 J/g HCl, Tabel 3 menunjukkan kalor pelarutan untuk aneka jumlah mol air kumulatif yang ditambahkan pada 1 mol HCl.

Kalor pelarutan integral standar (*standard integral heat of solution*) ialah $\Delta H^\circ_{\text{pelarutan}}$ kumulatif seperti yang ditunjukkan dalam kolom di sebelah kolom terakhir Tabel 5.4 untuk jumlah molekul air yang ditunjukkan. Selama kenaikan jumlah air yang berturut-turut ditambahkan pada mol HCl, kalor pelarutan integral meningkat, tetapi perubahan entalpi bertahap menurun seperti yang ditunjukkan

dalam kolom 3. Baik reaktan maupun produk harus berada pada kondisi standar. Kalor pemisahan adalah negatif dari nilai-nilai ini. Kalor pelarutan standar diplotkan dalam Gambar 5 dan dapat melihat bahwa nilai asimtotik dihampiri selama larutan tersebut menjadi semakin encer. Pada pengenceran yang tak terhingga nilai ini disebut **Kalor pelarutan integral pada pengenceran tak terhingga** dan ialah -75,144 J/g mol HCl. Dalam lampiran H terdapat tabel lain yang menyajikan data kalor pelarutan integral standar dan kalor pembentukan untuk larutan. Karena perubahan energi untuk kalor pelarutan adalah fungsi titik, dapat dengan mudah melihat dua konsentrasi HCl mana pun dan mencari perubahan energi yang dijumpai oleh penambahan dan pengurangan air.



Gambar 10.1. Kalor Pelarutan integral HCl dalam air

Contohnya, jika mencampurkan 1 mol HCl . 15H₂O dan 1 mol HCl . 5 H₂O memperoleh 2 mol HCl . 10 mol H₂O, perubahan entalpi total pada 25°C ialah

$$\begin{aligned}\Delta H^{\circ} &= [2(-69,4860)] - [(-70,989) + 1(-64,047)] \\ &= -3936 \text{ J}\end{aligned}$$

Maka harus mengeluarkan 3936 J untuk menjaga suhu campuran akhir pada suhu 25°C.

Tabel 10.1. Kalor Pelarutan HCl (25°C dan 1 atm)

Komponen	Mol H ₂ O total yang ditambahkan ke 1 mol HCl	$-\Delta H^\circ$ untuk tiap langkah kenaikan 1 (J/gmol HCl) = $-\Delta H^\circ_{\text{pengenceran}}$	Kalor pelarutan integral; kumulatif - ΔH° (J/gmol HCl)	Kalor pembentukan $-\Delta H_f^\circ$ (J/gmol HCl)
HCl _(g)	0			92.311
HCl.1H ₂ O _(aq)	1	26.225	26.225	118.536
HCl.2H ₂ O _(aq)	2	22.593	48.818	141.129
HCl.3H ₂ O _(aq)	3	8.033	56.851	149.161
HCl.4H ₂ O _(aq)	4	4.351	61.202	153.513
HCl.5H ₂ O _(aq)	5	2.845	64.047	156.358
HCl.8H ₂ O _(aq)	8	4.184	68.231	160.542
HCl.10H ₂ O _(aq)	10	1.255	69.486	161.797
HCl.15H ₂ O _(aq)	15	1.503	70.989	163.300
HCl.25H ₂ O _(aq)	25	1.276	72.265	164.576
HCl.50H ₂ O _(aq)	50	1.013	73.278	165.589
HCl.100H ₂ O _(aq)	100	569	73.847	166.158
HCl.200H ₂ O _(aq)	200	356	74.203	166.514
HCl.500H ₂ O _(aq)	500	318	74.521	166.832
HCl.1000H ₂ O _(aq)	1000	163	74.684	166.995
HCl.50000H ₂ O _(aq)	50000	146	75.077	167.388
HCl. ∞ H ₂ O _(aq)		67	75.144	167.455

Untuk menghitung kalor pembentukan standar dari suatu terlarut dalam larutan, melakukan sebagai berikut. Berapa kalor pembentukan standar dari 1 g mol HCl dalam 5 g mol H₂O? Proses pelarutan dalam cara yang identik untuk reaksi kimia:

			J/gmol	
$\frac{1}{2} \text{H}_{2(g)} + \frac{1}{2} \text{Cl}_{2(g)}$	$= \text{HCl}_{(g)}$	A:	ΔH_f°	$= -92.311$
$\text{HCl}_{(g)} + 5\text{H}_2\text{O}$	$= \text{HCl}(5\text{H}_2\text{O})$	B:	$\Delta H_{\text{soln}}^\circ$	$= -64.047$
$\frac{1}{2} \text{H}_{2(g)} + \frac{1}{2} \text{Cl}_{2(g)} + 5\text{H}_2\text{O}$	$= \text{HCl}(5\text{H}_2\text{O})$	A+B	ΔH_f°	$= -156.358$

Kalor pembentukan H_2O sendiri tidak masuk dalam perhitungan. Kalor pembentukan HCl dalam larutan encer tak terhingga ialah

$$\Delta H_f^\circ = -92.311 - 75.144 = -167.455 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} \text{mol}$$

Kalor pelarutan jenis lain yang kadang-kadang ditemui ialah kalor pelarutan molal parsial. Satu hal khusus yang penting menyangkut pembentukan air dalam reaksi kimia. Ketika air ikut dalam suatu reaksi kimia dalam larutan sebagai reaktan atau produk suatu reaksi, harus menggunakan nilai-nilai kalor pembentukan dari air terlarut seperti yang diperlihatkan dalam kolom terakhir dari Tabel 5.4.

Contoh Soal Penerapan Data Kalor Pelarutan Asam klorida adalah bahan kimia industri yang penting. Untuk membuat larutannya dalam air *grade* komersial (dikenal sebagai *asam muriatik*), $\text{HCl}_{(g)}$ murni diabsorpsi dalam air dalam sebuah absorber tantalum dalam proses kontinu. Berapa kalor yang harus dikeluarkan dari absorber tersebut per 100 kg produk jika $\text{HCl}_{(g)}$ kalor pada 120°C dimasukkan ke dalam air dalam absorber seperti yang ditunjukkan dalam Gambar? air masukan dapat diasumsikan berada pada 25°C , dan produk keluaran $\text{HCl}_{(aq)}$ ialah 25% HCl (berdasar berat) pada 35°C .

Jawaban

Langkah 1, 2, 3, dan 4 kita perlu memperoleh data entalpi per mol HCl . Maka dari itu, pertama-tama kita akan mengubah produk menjadi mol HCl dan mol H_2O

Komponen	Kg	Berat molekul	kg mol	Fraksi mol
HCl	25	36,37	0,685	0,141
H_2O	75	18,02	4,163	0,859
Total	100		4,848	1,000

Rasio mol H_2O terhadap HCl ialah $4,163/0,685=6,077$.

Langkah 5 Sistem tersebut ialah HCl dan air (tidak termasuk air pendingin)

Basis : 10 kg produk

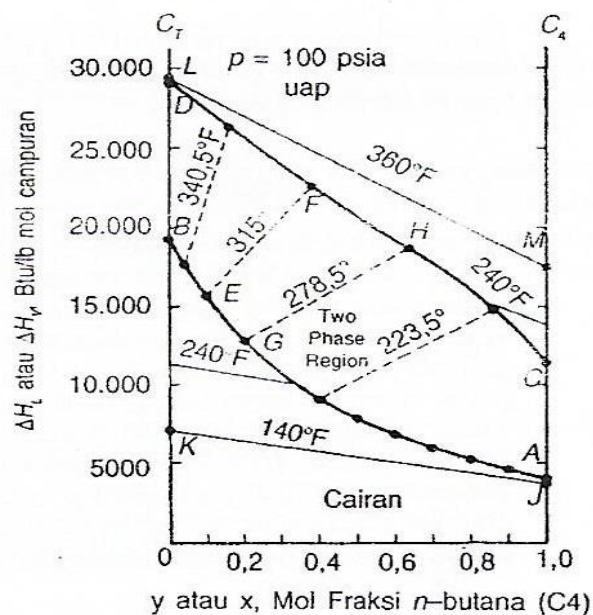
Suhu ref : 25°C

Langkah 6 dan 7 kesetimbangan energi berukuran menjadi $Q = \Delta H$, dan baik entalpi awal maupun akhir dari semua arus diketahui atau dapat dihitung secara langsung. Kg dan mol HCl masuk dan keluar, dan air masuk dan keluar, telah dihitung di atas.

Langkah 3(lanjutan). Nilai entalpi untuk arus-arus tersebut ialah [C_p untuk HCl(g) dari Tabel E.1; C_p untuk produk kira-kira 2,7 J/(g)(°C); ΔH_f° untuk HCl (6,077 H_2O) = -157.753 J/g mol HCl];

Arus	g mol	$\Delta \hat{H}_f^\circ (\frac{\text{J}}{\text{g mol}})$	$T^\circ\text{C}$	$\Delta \hat{H}^\circ (\frac{\text{J}}{\text{g mol}})$	$\Delta H(\text{J})$
Asupan H_2O	4,163	-	25	0	0
HCl(g)	0,685	-92.311	120	$\int_{25}^{120} C_p dT = 2747$	-61.351
HCl(aq)	4,848	-157.753	35	$\int_{25}^{35} C_p dT = 27$	-707.243

Nilai negatif Q berarti kalor dikeluarkan dari sistem tersebut. Cara mudah untuk menunjukkan data entalpi untuk larutan biner adalah melalui **diagram entalpi-konsentrasi** (*enthalpy-concentration diagram*). Diagram entalpi-konsentrasi (H-x) adalah plot entalpi spesifik versus konsentrasi (biasanya fraksi berat atau mol) dengan suhu sebagai parameter. Gambar 6 menggambarkan satu plot seperti itu. Jika tersedia, 8 plot seperti itu berguna dalam pembuatan perhitungan gabungan Kesetimbangan materi dan energi dalam distilasi, kristalisasi, dan semua jenis masalah pencampuran dan pemisahan. Anda akan menemukan beberapa contoh grafik entalpi-kesetimbangan.



Gambar 10.2. Diagram entalpi-konsentrasi untuk n-butana-n-heptana pada 100 psia.

Kurva DFHC ialah uap jenuh; kurva BEGA ialah cairan jenuh. Garis putus-putus ialah garis penghubung ekuilibrium yang menghubungkan y dan x pada suhu yang sama.

Soal Penerapan Diagram Entalpi-Konsentrasi

Enam ratus lb 10% NaOH per hr pada 200°F ditambahkan pada 400lb/hr 50% NaOH pada titik didihnya dalam sebuah bejana terinsulasi. Hitunglah yang berikut ini :

- Suhu akhir larutan keluar
- Konsentrasi akhir larutan keluar
- Lb air yang diuapkan per hr selama proses tersebut

Jawaban

Gunakan tabel uap dan diagram entalpi-konsentrasi NaOH-H₂O dalam Lampiran 1 sebagai sumber data anda. (Kondisi referensi untuk grafik yang terakhir ialah $\Delta H = 0$ pada 32°F untuk air cair dan $\Delta H = 0$ untuk larutan NaOH encer tak terhingga, dengan kaustik murni mempunyai entalpi pada 68°F sebesar 455 Btu/lb di atas data ini). Perlakukan proses ini sebagai proses aliran. Kestimbangan energi berkurang menjadi $\Delta H = 0$.

Basis : 1000 lb larutan akhir = 1 hr

Kita dapat menuliskan kestimbangan materi berikut :

Komponen	Larutan 10%	+	Larutan 50%	=	Larutan akhir	%berat
NaOH	60		200		260	26
H ₂ O	540		200		740	74
Total	600		400		1000	100

Data entapi:

$\Delta \hat{H} \left(\frac{Btu}{lb} \right)$	Larutan 10%	Larutan 50%
	152	290

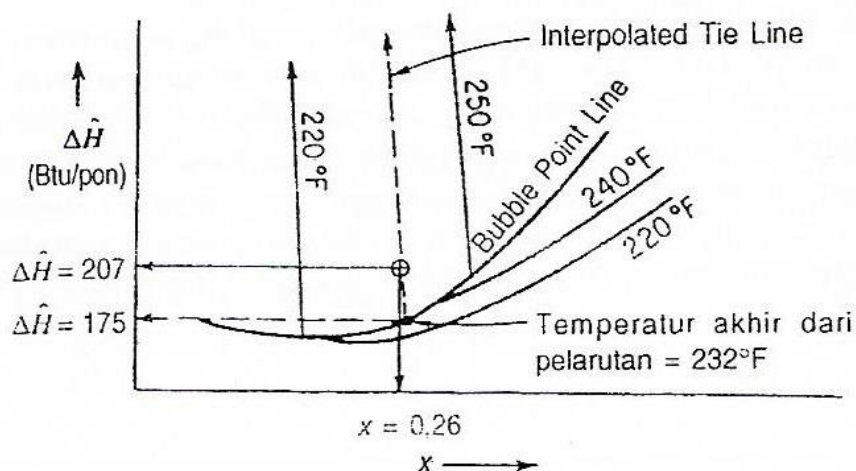
Kesetimbangan energinya ialah

Larutan 10%	+	Larutan 50%	=	Larutan akhir
500(152)		400(290)		ΔH
91.200		116.000		207.200

Entalpi larutan 50% pada titik didhnya diambil dari titik gelembung pada $\omega = 0,50$.

Entalpi per lb larutan akhir ialah :

$$\frac{207.200}{1000 \text{ lb}} = 207 \text{ Btu/lb}$$



Gambar 10.3. Penerapan diagram enthalpi-konsentrasi

Pada grafik entalpi-konsentrasi untuk NaOH-H₂O, untuk larutan 26% NaOH dengan entalpi 207 Btu/lb, hanya campuran dua-fase dari (1) uap H₂O jenuh dan (2) larutan NaOH-H₂O pada titik didih. Untuk mendapatkan fraksi uap H₂O, kita harus membuat kesetimbangan energi (entalpi) tambahan. Dengan interpolasi, gambarlah garis penghubung melalui titik $x = 0,26$, $H = 207$ (Buatlah paralel dengan garis penghubung 220°F dan 250°F), suhu akhir tampak dari Gambar sebesar 232°F, entalpi cairan pada titik gelembung kira-kira 175 Btu/lb. Entalpi uap

air jenuh (tanpa NaOH dalam fase uap tersebut) dari tabel uap pada 232°F ialah 1158 Btu/lb. Misalkan x = lb H₂O yang diuapkan.

Basis : 1000 lb larutan akhir $x(1158) + (1000 - x)175 = 1000(207,2)$

$x = 32.6$ H₂O yang diuapkan/hr

C. SOAL LATIHAN/TUGAS

Lima ratus kg 15% NaOH per hr pada 150°F ditambahkan pada 250lb/hr 45% NaOH pada titik didihnya dalam sebuah bejana terinsulasi. Hitunglah yang berikut ini :

1. Suhu akhir larutan keluar
2. Konsentrasi akhir larutan keluar
3. lb air yang diuapkan per hr selama proses tersebut

D. DAFTAR PUSTAKA

Distantina S. 2001. Diktat Neraca Massa.

Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.

Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.

PERTEMUAN 11

ANALISIS DERAJAT BEBAS DALAM PROSES KEADAAN TUNAK

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

Pada pertemuan ini akan dijelaskan mengenai Analisis Derajat Bebas Dalam Proses Keadaan Tunak, Anda harus mampu:

1. Mengidentifikasi nama dan jumlah variabel dalam arus yang memasuki dan meninggalkan suatu unit pemrosesan dan variabel yang berhubungan dengan unit itu sendiri.
2. Menentukan jumlah persamaan independen untuk tiap unit pemrosesan.
3. Menghitung jumlah derajat bebas.

B. URAIAN MATERI

1. Analisis Derajat Bebas Dalam Proses Keadaan Tunak

Suatu aspek paling penting dari masalah gabungan kesetimbangan materi dan energy ialah bagaimana memastikan bahwa persamaan proses atau kumpulan modul tertentu (*determinate*), yaitu mempunyai paling tidak satu penyelesaian, dan mudah-mudahan tidak lebih dari satu proses. Pertanyaannya ialah : Berapa banyak variable yang tak diketahui, dan maka dari itu harus ditentukan nilainya dalam suatu masalah? **Jumlah derajat bebas** (*numbers o degrees of freedom*) ialah banyaknya variable dalam satu kumpulan persamaan independen yang nilainya harus ditentukan sehingga persamaan-persamaan tersebut dapat diselesaikan.

Misalkan N_d = jumlah derajat bebas, N_v = jumlah variable, N_r = jumlah persamaan (restriksi, kendala). Maka untuk N_r persamaan independen secara umum

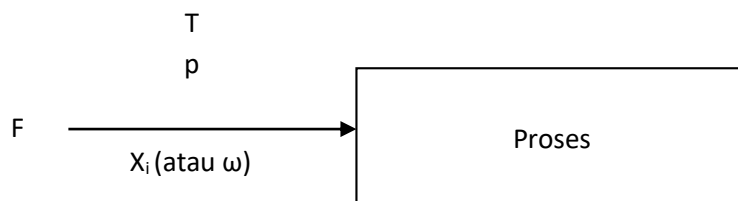
$$N_d = N_v - N_r$$

Dan kita menyimpulkan bahwa variable $N_v - N_r$ harus ditentukan sepanjang persamaan N_r masih independen. Anda tidak harus menuliskan persamaan-persamaan tersebut selama analisis tetapi hanya mengindetifikasikannya saja. Tak ada bedanya apakah persamaan-persamaan itu linear atau nonlinear.

Analisis suatu proses mengasumsikan bahwa proses tersebut adalah proses aliran keadaan lunak seperti yang biasanya diasumsikan dalam perancangan. Jika operasi atau control diminati, anda akan mendasarkan analisis pada proses keadaan tidak tunak dimana suku akumulasi akan diperhitungkan.

Baik variable intensif maupun ekstensif dimasukkan kedalam analisis ini, berbeda dengan derajat bebas diperoleh dari penerapan kaidah yang memperoleh variable intensif saja. Jenis variable apa yang harus anda perhitungkan? Yang khas adalah

- Suhu
- Tekanan
- Laju aliran massa (mol) tiap komponen dalam suatu arus, atau konsentrasi tiap komponen plus laju aliran total
- Entalpi spesifik
- Laju aliran panas, kerja (dalam kesetimbangan energy)
- Rasio daur ulang



Beberapa variabel dapat disubstitusikan untuk yang lain, seperti suhu untuk entalpi spesifik, dan aliran arus untuk rasio daur ulang.

Amati arus aliran dalam gambar diatas. Ada 2 model untuk menentukan jumlah variable yang berhubungan dengan suatu arus proses (**variable arus**) atau (**stream variable**). (kita mengasumsikan arus tersebut ialah fase tunggal dimana tak ada reaksi yang terjadi; dengan lebih dari satu fase, tiap fase akan diperlukan sebagai arus yang terpisah) :

Menggunakan laju aliran mol (atau massa)

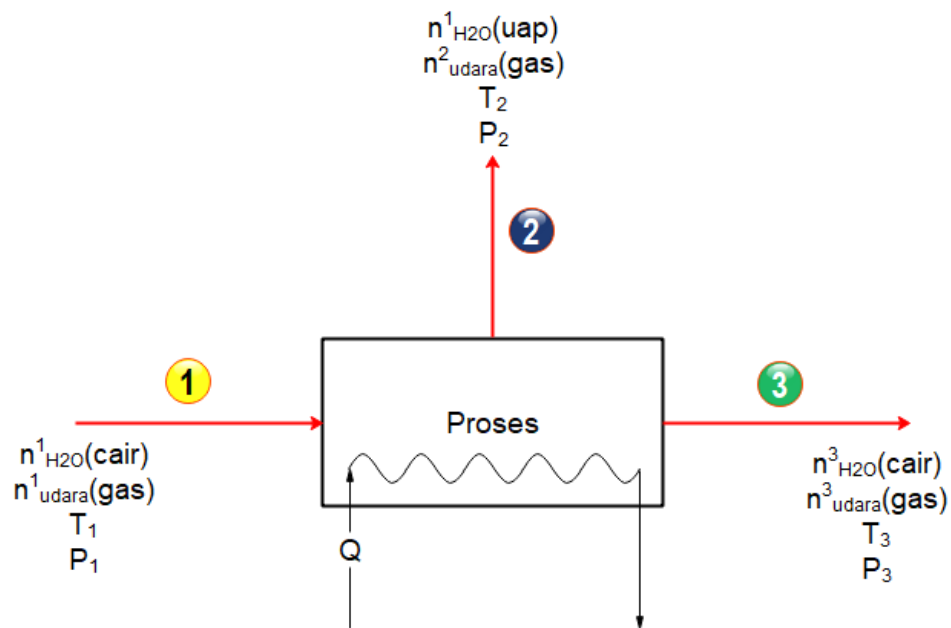
<u>No.</u>	
Suhu (T)	1
Tekanan (P)	1
Laju aliran komponen (n_i atau m_i)	N_{sp}
Total	$N_{sp} + 2$

Menggunakan laju aliran mol (atau massa)

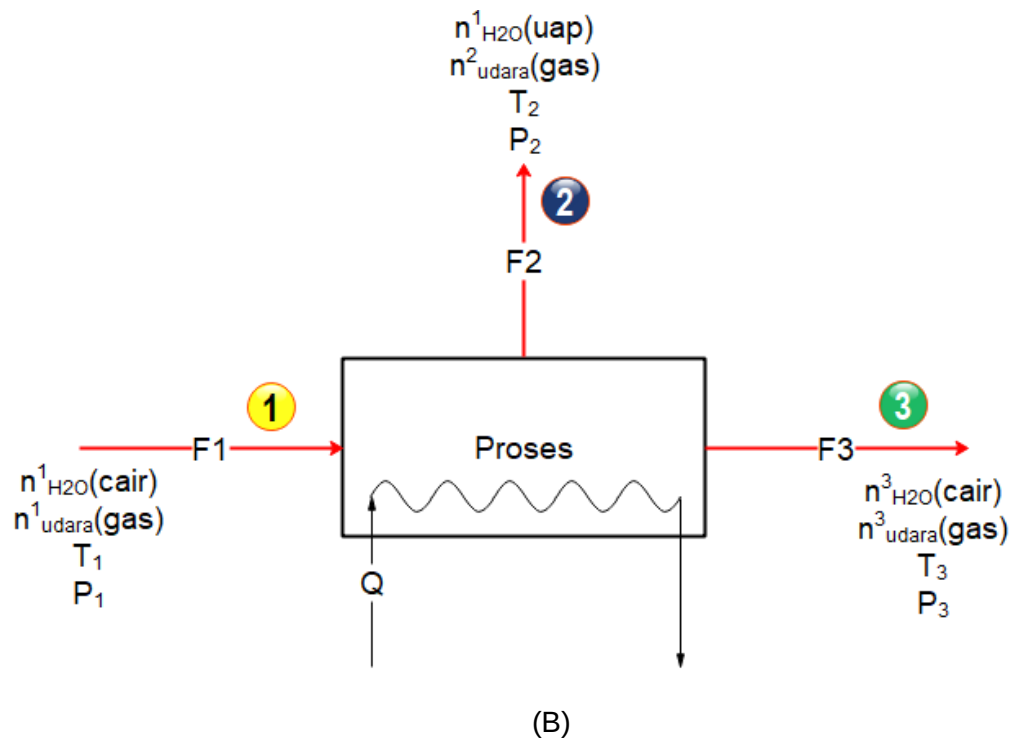
<u>No.</u>	
Suhu (T)	1
Tekanan (P)	1
Komposisi (x_i atau w_i)	$N_{sp} - 1$
Laju aliran total	1
Total	$N_{sp} + 2$

Untuk N_{sp} ialah jumlah **komponen (spesies)** (*component/species*) dalam arus tersebut. Hitunglah untuk jumlah komposisi ialah $N_{sp} - 1$ dan bukan N_{sp} karena adanya kendala implicit bahwa jumlah fraksi mol (atau massa) sama dengan 1.

Jadi, kita dapat menyimpulkan bahwa jumlah variable N_v yang diperlukan untuk kondisi arus secara lengkap diberikan oleh gambar berikut:



(A)



Gambar. 8. Sebuah proses sederhana dengan 3 arus dimana (A) aliran arus dinyatakan sebagai laju aliran mol; dan (B) aliran total dan komposisi spesies diberikan dalam fraksi mol.

$$N_v = N_{sp} + 2$$

Anda harus ingat bahwa dalam system biner, contohnya, dengan satu komponen arus besarnya nol. Untuk kekonsistenan arus akan menghitung $N_{sp} = 2$ dengan satu komponen yang mempunyai nilai nol diperlakukan sebagai kendala.

Kendala (persamaan) macam apa yang terlibat dalam analisis derajat bebas? Biasanya

- Kesetimbangan materi independen untuk tiap spesies (kesetimbangan total dapat disubstitusikan untuk satu kesetimbangan spesies)
- Kesetimbangan energy.
- Hubungan ekuilibria fase, yaitu persamaan yang memberikan komposisi antara satu spesies yang ada dalam dua atau lebih) fase.

- d. Hubungan ekuilibrium kimia. Jumlah dari persamaan seperti itu sama dengan jumlah minimum hubungan stokiometrik independen (lihat lampiran L) yang dapat menunjukkan spesies yang ada dalam suatu fase tunggal.
- e. Hubungan implicit, seperti bahwa konsentrasi spesies adalah mol dalam suatu arus.
- f. Hubungan eksplisit, seperti bahwa suatu fraksi tertentu dari suatu arus mengembun.

Untuk menggambarkan analisis untuk derajat bebas. Amati gambar 8 yang menunjukkan sebuah proses isothermal keadaan lunak sederhana, proses isobaric yang melibatkan tiga arus plus perpindahan panas. Hitungan variabel dan keadaan ialah

Variabel :

$$(N_{sp} + 2) \times 3 = 12$$

$$Q = 1$$

$$\text{Total} = 13$$

Kendala :

$$\text{Keseimbangan materi} = 2$$

$$\text{Keseimbangan energy} = 1$$

$$\text{Ekuilibrium fase untuk H}_2\text{O} = 1$$

$$T \text{ sama dalam semua arus} = 2$$

$$(T_1 = T_2 = T_3) \text{ 2 persamaan independen}$$

$$p \text{ sama dalam semua arus} = 2$$

$$(p_1 = p_2 = p_3) \text{ 2 persamaan independen}$$

$$\text{Total} = 8$$

Derajat bebas :

$$13 - 8 = 5$$

Apakah anda memperhatikan bahwa kita menghitung N_{sp} keseimbangan materi satu kah saja? Mengapa? Mari kita lihat sebagai keseimbangan :

$$\text{Komponen 1} = Zx_{1Z} = P_1x_{1P1} + P_2x_{1P2}$$

$$\text{Komponen 2} = Zx_{2Z} = P_1x_{2P1} + P_2x_{2P2}$$

dan sebagainya

Jika $x_{1Z} = x_{1P1} = x_{1P2}$ dan hal yang sama benar untuk x_2 dan sebagainya. Hanya ada satu materi independen.

Apakah anda mengerti hitungan yang dihasilkan dari pembuatan komposisi sama dalam Z, P_v dan P_2 ? Tulislah pernyataan untuk tiap komponen : $x_{iZ} = x_{iP1} = x_{iP2}$. tiap kumpulan menunjukkan $2N_{sp}$ kendala. Tetapi anda tidak dapat menentukan tiap x_i dalam arus, hanya $N_{sp} - 1$ dari mereka ingatkah anda mengapa?

- a. Untuk membuat masalah tersebut tentu kita akan menentukan nilai variable keputusan berikut ini :

Laju aliran Z	1
Komposisi Z	$N_{sp} - 1$
T_Z	1
P_Z	1
Rasio pemisahan $a = P_1/P_2$	1
Jumlah derajat bebas total	$N_{sp} + 3$

- b. **Mixer** (Gambar C6.1b) : untuk proses ini kita mengasumsikan bahwa $W = 0$ tetapi Q tidak.

Jumlah variable total (3 arus + Q)	$3(N_{sp} + 2) + 1$
Jumlah kendala kesamaan independen	
Keseimbangan materi	N_{sp}
Keseimbangan energy	1

$$\begin{aligned}\text{Jumlah derajat bebas total} &= 3(N_{sp} + 2) + 1 - (N_{sp} + 1) \\ &= 2 N_{sp} + 6\end{aligned}$$

- c. **Penuka kalor** (Gambar C6.1c): untuk proses ini kita mengasumsikan bahwa $W = 0$ (tetapi Q tidak).

Jumlah variable total	
$N_v = 4(N_{sp} + 2) + 1 =$	$4N_{sp} + 9$

Jumlah kendala kesamaan independen

Kesetimbangan materi (arus 1 dan 2)

2

Kesetimbangan energy

1

Komposisi arus masuk dan keluar sama

$2(N_{sp} - 1)$

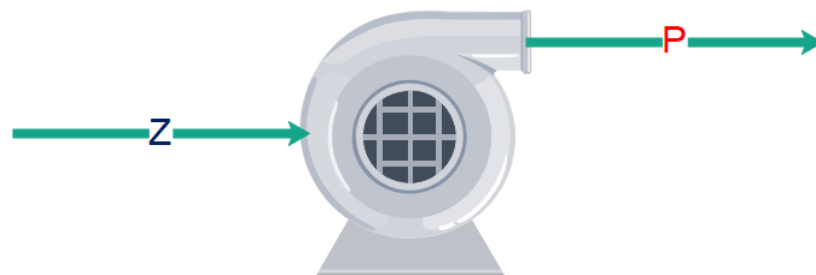
$2 N_{sp} + 1$

Jumlah derajat bebas total =

$2 N_{sp} + 8$

Kita mungkin menentukan empat suhu, empat tekanan $2(N_{sp} - 1)$ komposisi dalam Z_1 dan Z_2 , dan Z_1 dan Z_2 sendiri untuk menghabiskan $2N_{sp} + 8$ derajat bebas.

d. **Pompa** : disini $Q = 0$ tetapi W tidak: $N_p = 0$



Jumlah variabel total

$N_v = 4(N_{sp} + 2) + 1 =$

$2N_{sp} + 5$

Jumlah kendala kesamaan independen

Kesetimbangan materi

1

Kesetimbangan energy

$N_{sp} - 1$

Komposisi arus masuk dan keluar sama

Kesetimbangan energi

1

$N_{sp} + 1$

Jumlah derajat bebas total =

$N_{sp} + 4$

e. **Tangki (tahap)** tercampur dengan baik dua-fase pada ekuilibrium (Gambar C6.1e) (L. fase cair, V, fase uap) : disini $W = 0$. Meskipun ada dua fase (V_1 dan L_1) pada ekuilibrium didalam system tersebut, arus yang masuk dan keluar adalah arus fase tunggal. Yang kami maksud dengan ekuilibrium ialah bahwa

kedua fase berbeda pada suhu dan tekanan yang sama dan bahwa kedua fase berada pada suhu dan tekanan yang menghubungkan komposisi dalam satu fase dengan komposisi dalam fase yang lain untuk tiap komponen.

Jumlah variable total (4 arus + Q) $4(N_{sp} + 2) + 1$

Jumlah kendala kesamaan independen

Kesetimbangan materi N_{sp}

Kesetimbangan energi 1

Hubungan komposisi pada ekuilibrium N_{sp}

Suhu arus V_1 dan L_1 dalam dua fase tersebut sama 1

Tekanan arus V_1 dan L_1 dalam dua fase tersebut sama 1

$$\text{Jumlah derajat bebas total} = 4(N_{sp} + 2) + 1 - 2 N_{sp} - 3 = 2N_{sp} + 6$$

Secara umum anda dapat menentukan variable berikut ini untuk membuat : masalah tersebut tentu :

Arus masukan L_2 $N_{sp} + 2$

Arus masukan V_0 $N_{sp} + 2$

Tekanan 1

Q 1

Total $2N_{sp} + 6$

Pilihan-pilihan lain tentu saja mungkin, tetapi pilihan-pilihan seperti itu harus membiarkan kendala kesamaan independen.

Spesifikasi kolom awal

(4 dalam F, 2 dalam P_1 dan 1 dalam P_2 plus T....

Total untuk N_1

Jumlah derajat bebas $N.. 18-17 =$ 17

1

Catat bahwa hanya empat faktor yang dapat dispesifikasi dalam arus F, yaitu laju F itu sendiri dan tiga ω . Satu dari ω tersebut redundan. Satu variable lagi

harus dispesifikasi untuk proses tersebut, tetapi variable yang tidak akan mengurangi jumlah persamaan independen dan restriksi yang telah dihitung.

Anda dapat menghitung derajat bebas untuk gabungan proses-proses yang sama atau berbeda dengan penggabungan yang tepat dari derajat bebas masing-masing proses. Dalam menambahkan derajat bebas satuan-satuan, anda harus menghilangkan hitungan double baik untuk variable atau kendala, dan mengambil perhitungan yang tepat untuk arus-arus penghubungan yang karakteristiknya sering ditetapkan hanya dengan implikasi.

Amati mixer-separator dalam gambar 6.3 untuk mixer pertimbangkan sebagai unit terpisah, dari contoh 6.1b, $N_d = 2N_{sp} + 6$. Untuk separator, unit ekuilibrium :

$N_v = 3(N_{sp} + 2) + 1 =$	$3N_{sp} + 7$	
N_r :		
Kesetimbangan materi	N_{sp}	
Hubungan ekuilibrium N_{sp}		
Kesimpulan energy	1	
$T_z = T_{p1} = T_{p2}$	2	
$P_z = P_{p1} = P_{p2}$	2	$2N_{sp} + 5$

$$N_d = (3 N_{sp} + 7) - (2N_{sp} + 5) = N_{sp} + 2$$

Jumlah dari mixer dan separator ialah $3N_{sp} + 8$

Kita harus mengurangi variable redundan dan menambahkan restriksi redundan sebagai berikut

Variable redundan

Hilangkan 1 Q	1
Hilangkan 1 Z	$N_{sp} + 2$

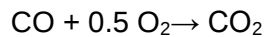
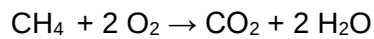
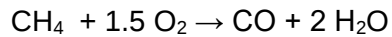
Kendala redundan

1 kesetimbangan energy	1
------------------------	---

$$\text{Maka } N_d = (3N_{sp} + 8) - (N_{sp} + 3) + 1 = 2N_{sp} + 6$$

C. SOAL LATIHAN/TUGAS

1. Mengapa ada $N_{sp} + 2$ variabel yang berhubungan dengan tiap arus ?
2. Variabel lain apa dalam suatu proses yang mungkin harus dimasukkan dalam perhitungan variabel untuk suatu arus untuk ditambahkan pada $(N_{sp} + 2)$?
3. Metana terbakar dalam sebuah tungkur dengan 10% kelebihan udara, tetapi tidak dengan sempurna, sehingga ada sejumlah CO dalam tungkur tersebut, tetapi tidak ada CH_4 . Reaksianya adalah :



Kerjakan analisis derajat bebas untuk masalah pembakaran ini?

D. DAFTAR PUSTAKA

Distantina S. 2001. Diktat Neraca Massa.

Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.

Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.

PERTEMUAN 12

MEMECAHKAN KESETIMBANGAN MATERI DAN ENERGI MENGUNAKAN KODE FLOWSHEETING

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

Pada pertemuan ini akan dijelaskan mengenai kesetimbangan materi dan energi menggunakan kode *flowsheeting*, Anda harus mampu:

1. Mengerti perbedaan antara *flowsheeting* berdasar persamaan dan berdasar modul.
2. Menguraikan bagaimana kesetimbangan materi dan energi dikerjakan baik dalam kode *flowsheeting* berdasar persamaan maupun modul.

B. URAIAN MATERI

1. Kesetimbangan materi dan energi menggunakan kode *flowsheeting*

Penggabungan unit-unit dari sudut pandang pembuatan kesetimbangan materi. Karena lebih banyak dan lebih banyak unit yang dihubungkan bersama dalam sebuah pabrik. Program seperti itu dapat juga, pada saat yang sama, menentukan ukuran peralatan dan saluran pipa, mengevaluasi biaya dan mengoptimalkan kinerja. Sebuah lembar alir (*flowsheet*) pabrik mencerminkan jaringan kerja arus dan kinerja peralatan yang berlaku untuk semua jenis kendala.

Pemecahan kesetimbangan materi dan energi proses keadaan tunak yang sesuai ditunjuk sebagai *flowsheeting*, dan kode komputer yang digunakan dalam pemecahan dikenal sebagai paket atau kode *flowsheeting*. Masalah yang penting dalam *flowsheeting* tanpa optimasi yang terkait ialah memecahkan (memenuhi) sekumpulan besar persamaan linear dan nonlinear sampai derajat ketelitian yang dapat diterima, biasanya dengan prosedur iteratif. Tabel 4 mendaftar beberapa kode komersial untuk menjalankan *flowsheeting*. Unit-unit proses individu yang membuat lembar alir untuk suatu proses ditunjukkan dalam bentuk modul (*building blocks*) atau sebagai kumpulan persamaan. Derajat rincian yang lebih besar, lebih diperlukan dalam proses *flowsheeting* ketika kode tersebut digunakan untuk memecahkan masalah operasi pabrik daripada dalam pengerjaan rancangan awal pabrik tersebut.

Gambar 9 menggambarkan ciri-ciri pokok dari paket *flowsheeting*. Kode harus memudahkan perpindahan informasi antara peralatan dan arus, mempunyai akses ke database yang dapat dipercaya, dan cukup fleksibel untuk mengakomodasi spesifikasi peralatan yang diberikan oleh pengguna untuk menambah perpustakaan program yang melengkapi kode tersebut. Dasar untuk semua kode *flowsheeting* adalah perhitungan kesetimbangan massa dan energy untuk proses keseluruhan. Masukkan yang sah untuk fase perhitungan materi dan energy untuk lembar alir harus didefinisikan dalam rincian yang cukup untuk menentukan semua arus menengah (*intermediate*) dan produk dan variable kinerja unit untuk semua unit.

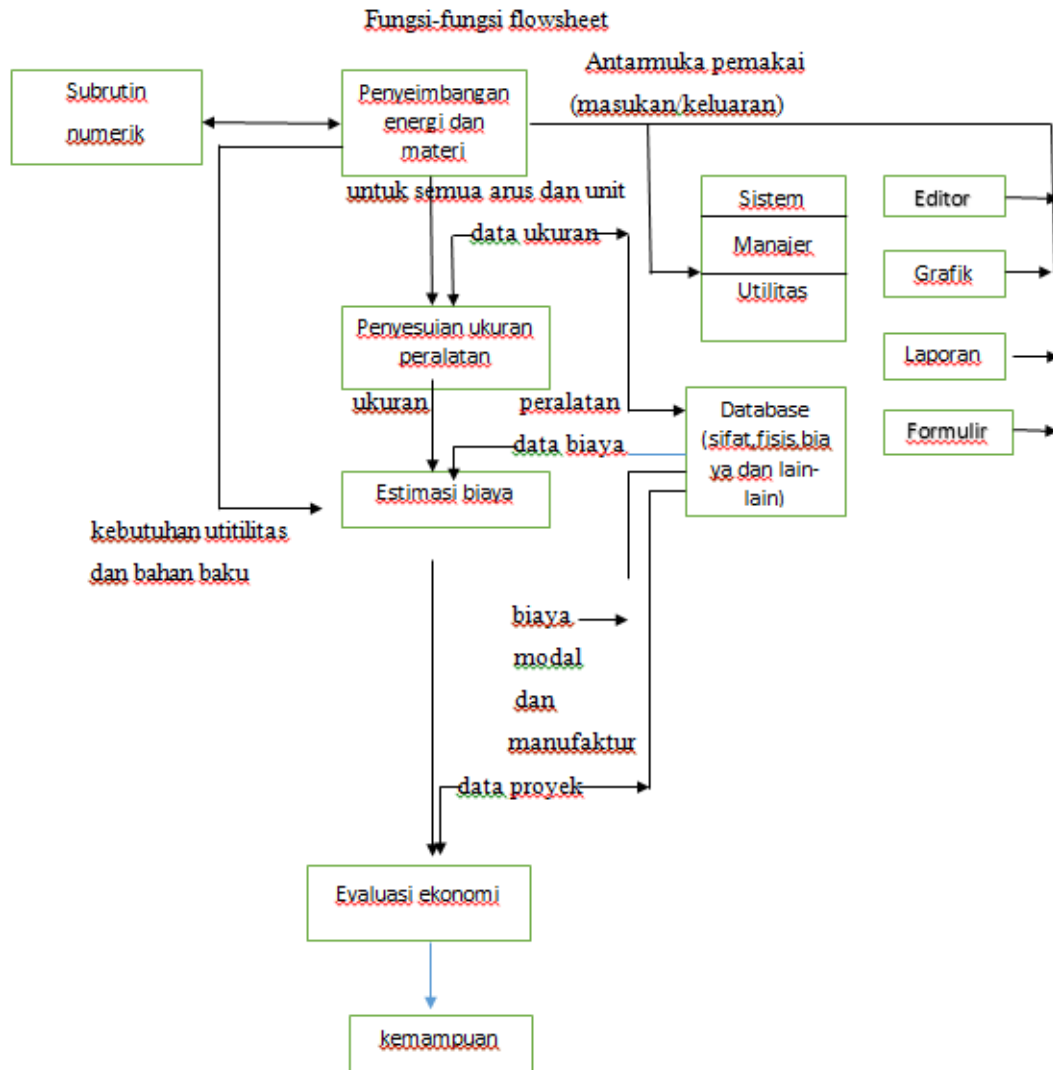
Tabel 12.1. Kode *Flowsheeting*

Nama	Sumber
ASPENPLUS	Aspen Technology Corp, Cambridge, MA
CHEMCAD	Chemstation, Houston, TX
DESIGN/2000	Chem Share, Houston, TX
HYSIM	
HYSYS	Hyprotech, Calgary, Alberta
PROCESS	
PRO/II	Simulation Sciences, Fullerton, CA
SPEEDUP	Aspen Technology Corp, Cambridge, MA

Pabrik proses terisi arus daur ulang dan putaran control, dan pemecahan untuk sifat-sifat arus tersebut memerlukan perhitungan iteratif. Jadi, metode numeric yang efisien untuk konvergensi harus digunakan. Data sifat-sifat fisis dan termodinamika yang sesuai harus dipanggil dari database. Harus ada program master yang menghubungkan semua *building blocks*, data sifat fisis, perhitungan termodinamika, subrutin, dan subrutin numeric, dan juga mengawasi aliran informasi. Dua ekstrem ditemui dalam perangkat lunak *flowsheeting*. Pada satu ekstrem kumpulan persamaan (dan ketaksamaan) keseluruhan yang mewakili proses ditulis, termasuk kesetimbangan materi dan energy, hubungan arus, dan hubungan yang mewakili fungsi peralatan. Penggambaran ini dikenal sebagai metode berorientasi persamaan (*equation oriented method*). Persamaan-persamaan tersebut dapat dipecahkan dalam cara berurutan analog dengan penggambaran modul yang diuraikan dibawah ini atau secara simultan dengan metode Newton (atau ekivalennya), atau dengan menggunakan teknik matriks jarang untuk mengurangi luas manipulasi matriks, referensi dapat dibaca pada bagian akhir pertemuan ini.

Pada ekstrem yang lain, proses dapat ditunjukkan dengan sekumpulan modul (metode modular/*modular method*). Persamaan-persamaan berikut dapat dipecahkan dalam cara berurutan analog dengan penggambaran modul yang diuraikan di bawah ini atau secara simultan dengan metode Newton (atau ekuivalennya), atau dengan menggunakan teknik matriks jarang untuk mengurangi luas manipulasi matriks, referensi dapat dibaca pada bagian akhir pertemuan ini.

Pada ekstrem yang lain, proses dapat ditunjukkan dengan sekumpulan modul (metode modular/*modular method*) yang persamaan (dan informasi lain) nya menunjukkan tiap subsistem atau potongan peralatan dikumpulkan bersama dan diberi kode sehingga modul tersebut dapat digunakan secara terpisah dari bagian lain lembar alir tersebut dan maka dari itu mudah “dibawa” dari satu lembar alir ke yang lainnya atau dapat digunakan secara berulang-ulang dalam lembar alir tertentu. Tiap modul berisi ukuran peralatan, hubungan kesetimbangan materi dan energy, laju aliran komponen, dan kondisi suhu, tekanan dan fase dari tiap arus yang masuk dan meninggalkan peralatan fisis yang diwakili oleh modul tersebut. Nilai tertentu dari parameter dan variabel ini menentukan biaya modal dan operasi untuk unit-unit tersebut.



Gambar 12.1. Aliran Informasi dalam sebuah kode *flowsheeting*

Unit-unit tersebut. Tentu saja, saling keterkaitan yang dibuat untuk modul tersebut harus sedemikian rupa sehingga informasi mengenai arus, komposisi, laju aliran, koefisien, dan sebagainya dapat dipindahkan dari modul ke modul, dengan kata lain, modul terdiri dari sekumpulan *build-ing blocks* yang dapat disusun dalam cara yang umum untuk mewakili proses apa saja.

Selain dua eksteem itu, gabungan persamaan dan modul juga dapat digunakan. Persamaan-persamaan dapat disatukan menjadi modul, dan modul dapat diwakili oleh persamaan dasar atau oleh polinom yang sesuai dengan informasi masukan-keluaran. Dalam praktek sekarang ini, kode berdasar modul unggul karena dalam sejarahnya kode ini adalah yang pertama dikembangkan dan diperbaiki dengan berjalannya waktu.

Penggabungan kode flowsheeting antara lain berfokus pada bagaimana persamaan atau modul dipecahkan. Satu cara ialah memecahkan secara berurutan dan yang lainnya memecahkan secara simultan. Program dan/atau pengguna harus memilih variabel keputusan untuk daur ulang dan memberikan taksiran nilai arus tertentu untuk memastikan bahwa konvergensi perhitungan terjadi, khususnya dalam proses dengan banyak arus daur ulang.

Penggolongan ketiga dari kode flowsheeting ialah apakah kode tersebut memecahkan masalah keadaan tunak atau dinamik.

Kita akan membahas flowsheeting berdasarkan persamaan terlebih dahulu karena *flowsheeting* ini lebih dekat ke teknik-teknik yang digunakan sampai saat ini, dan kemudian beralih ke pemikiran tentang flowsheeting berdasar modul.

Kumpulan persamaan linear dan/atau nonlinear dapat diselesaikan secara simultan menggunakan kode komputer. Tetapi kode *flowsheeting* berdasar persamaan mempunyai beberapa keuntungan yang data sifat fisis yang diperlukan untuk koefisien dalam persamaan dikirimkan secara transparan dari database pada waktu yang tepat dalam urutan perhitungan.

Kode apapun yang digunakan untuk memecahkan masalah kesetimbangan materi dan energi, anda harus memberikan informasi masukkan tertentu kepada kode tersebut dalam format yang dapat diterima. Semua kode *flowsheeting* mengharuskan bahwa anda mengubah informasi dalam lembar alir menjadi lembar alir informasi yang baru atau sesuatu yang ekuivalen. Dalam lembar alir informasi, anda menggunakan nama model matematis (subrutin untuk flowsheeting berdasar modul) yang akan digunakan untuk perhitungan sebagai pengganti nama unit proses.

Segera setelah lembar alir informasi tersusun, determinasi topologi proses menjadi mudah, yaitu anda dapat segera menulis berkaitan arus di antara modul-modul subrutin) yang harus dimasukkan dalam kumpulan dan masukkan. Matriks dari hubungan arus (matriks proses/*process matrix*) ialah (tanda negatif menunjukkan arus keluar).

Arus yang terkait				
	1	-2		
	2	-3		
3	8	-4	-13	
4	7	11	9	-5
	5	-6		
	6	-8	-7	
	10	-11	-12	
	9	-10		

Kesetimbangan massa (atau kesetimbangan mol tanpa reaksi) total

$$\sum_{i=1}^{NI} F_i = \sum_{i=NI+1}^{NT} F_i$$

Kesetimbangan energi

$$\sum_{i=1}^{NI} F_i H_i + Q_n - W_{1,n} = \sum_{i=NI+1}^{NT} F_i H_i$$

Distribusi ekuilibrium uap-cair

$y_j K_j x_j$ untuk $j = 1, 2, \dots, NC$

Koefisien penguapan ekuilibrium

$K_j = K(T_P, P_P, \bar{W}_i)$ $j = 1, 2$, untuk $\dots, NC$

Kesetimbangan mol total (tanpa reaksi)

$$\sum_{i=1}^{NI} F_i + \sum_{l=1}^{NR} R_l \left[\sum_{j=1}^{NC} V_{j,l} \right] = \sum_{i=NI+1}^{NT} F_i$$

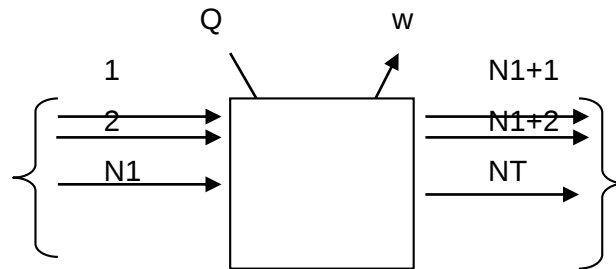
Persamaan saling keterkaitan adalah aliran kesetimbangan materi dan energy antara model subsistem persamaan untuk model seperti pencampuran, reaksi, pertukaran panas, dan sebagainya, harus juga didaftar sehingga dapat dimasukkan ke dalam kode komputer yang digunakan untuk memecahkan persamaan tersebut.

Kode berdasar persamaan dapat dirumuskan untuk melihat kendala ketaksamaan bersama dengan persamaannya, kendala yang demikian mungkin berbentuk $a_1x_1 + a_2x_2 + \dots \leq b$, dan mungkin timbul dari factor-faktor seperti:

- Kondisi yang ditentukan dalam melinierkan persamaan non linear.
- Batasan proses untuk suhu, tekanan, konsentrasi.
- Persyaratan bahwa variabel harus berada dalam urutan tertentu.
- Persyaratan bahwa variabel harus positif atau bilangan bulat.

Tabel 12.2. Notasi

a_{jk}	Jumlah atom dari elemen kimia ke-k dalam komponen ke-j
F_i	Laju aliran total ke-i
H_i	Entalpi relative ke-i
K_j	Koefisien penguapan komponen ke-j
NC	Jumlah komponen kimia (senyawa)
NE	Jumlah elemen kimia
N1	Jumlah arus materi yang masuk
NR	Jumlah reaksi kimia
NT	Jumlah arus materi total
P_j	Tekanan arus ke-i
Q_n	Perpindahan panas untuk unit proses ke-n
R_i	Pernyataan reaksi untuk reaksi kimia ke-i
T_i	Pernyataan reaksi untuk reaksi kimia ke-i
V_{j1}	Suhu arus ke-i
w_{ij}	Koefisien stoikiometrik komponen ke-j dalam reaksi kimia ke-i
W_i	Komponen fraksional massa atau mol komponen ke-j dalam arus ke-i
W_{in}	Komposisi rata-rata dalam arus ke-i
x_j	Kerja untuk unit proses ke-n
y_j	Fraksi mol komponen j dalam cairan
	Fraksi mol komponen j dalam uap



Kesetimbangan massa (kesetimbangan mol tanpa reaksi) total

$$\sum_{i=1}^{N1} F_i = \sum_{i=N1+1}^{NT} F_i$$

Kesetimbangan energy

$$\sum_{i=1}^{N1} F_i H_i + Qa - Wza = \sum_{i=N1+1}^{NT} F_i H_i$$

Distribusi ekuilibrium uap-cair

$$y_j = K_j x_j \text{ untuk } j = 1, 2, \dots, NC$$

Koefisien penguapan ekuilibrium

$$K_j = K(T_i P_i W_i) \text{ } j = 1, 2, \text{ untuk } \dots, NC$$

Kesetimbangan mol total (tanpa reaksi)

$$\sum_{i=1}^{NT} F_i + \sum_{i=1}^{NR} R_i \left[\sum_{j=1}^{NC} V_{j,l} \right] = \sum_{i=N1+1}^{N1} F_i$$

Kesetimbangan mol komponen (tanpa reaksi)

$$\sum_{i=1}^{N1} F_i W_{i,j} + \sum_{i=1}^{NR} V_{i,l} R_i = \sum_{i=N1+1}^{NT} F_i W_{i,j} \text{ untuk } j = 1, 2, \dots, NC$$

Kesetimbangan atom

$$\sum_{i=1}^{N1} F_i \left[\sum_{j=1}^{N1} W_{i,j a j,k} \right] = \sum_{j=1}^{NT} F_j \left[\sum_{i=1}^{N1} W_{i,j a j,k} \right] \text{ untuk } k = 1, 2, \dots, NE$$

Kesetimbangan energy mekanis

$$\sum_{i=1}^{N1} (K_i + P_i) + \sum_{i=1}^{N1} \int_{F_{1,i}}^{P_{2,i}} V_i dp_i = \sum_{i=N1+1}^N (K_i + P_i) + \sum_{i=N1+1}^{NT} \int_{F_{1,i}}^{P_{2,i}} V_i dp_i + W_{s,n} + E_{v,N}$$

Kesetimbangan massa atau mol komponen (tanpa reaksi)

$$\sum_{i=1}^{N1} F_i w_{i,j} = \sum_{i=N1+1}^{NT} F_i w_{i,j}$$

Penjumlahan fraksi mol atau massa

$$\sum_{i=N1+1}^{NT} w_{ij=1,0} \text{ untuk } i=1,2,\dots,N1$$

Fungsi sifat fisis

$$H_{i=H}^{VL}(T_p T_p W_i) i = 1, 2, \dots, N1$$

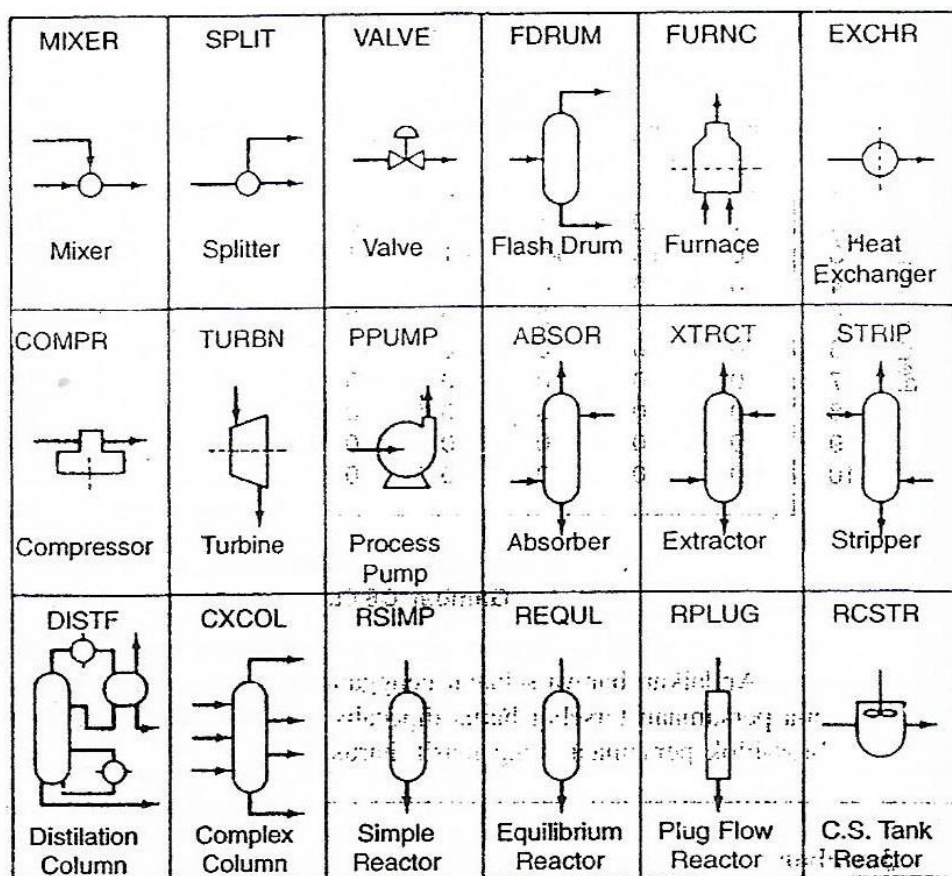
$$S_i = S_{VL}(T_p P_p W_i)$$

2. Flowsheeting berdasarkan modul

Metode flowsheeting modular berurutan (*sequential modular*) ialah metode yang paling umum ditemukan dalam paket computer. Terdapat satu modul untuk tiap unit proses dalam lembar alir informasi. Dengan diberikan nilai dari tiap komposisi arus masukan, laju aliran, suhu, tekanan, entalpi, dan parameter peralatan, modul tersebut menghitung sifat-sifat arus keluarannya. Arus keluaran

untuk satu modul arus masukan untuk modul lainnya dimana perhitungan berjalan sampai kesetimbangan materi dan energy dipecahkan untuk proses keseluruhan.

Konsep pokok dari modularitas dalam paket flowsheeting untuk rancangan dan analisis ialah menunjukkan operasi peralatan atau unit dengan subrutin computer yang mudah “dibawa”. Yang kami maksud dengan mudah “dibawa” ialah subrutin seperti itu dapat dipasang sebagai sebuah elemen dari sekelompok besar subrutin dan menunjukkan dengan baik jenis peralatan tertentu dalam suatu proses.

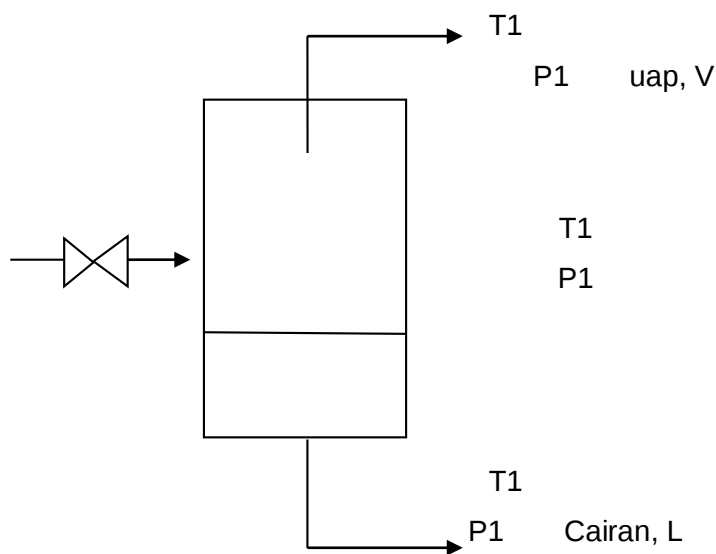


Gambar 12.2 Modul Unit Operasi Terstandar Khas Dengan Simbol Alir

Gambar 12.2. menunjukkan modul unit operasi terstandar khas bersama dengan symbol lembar alirnya, modul lain menangani pengukuran peralatan dan taksiran biaya, mengerjakan perhitungan numeric, menangani perhitungan daur ulang. Diuraikan dengan lebih terperinci dibawah ini, optimisasi, dan berlaku sebagai pengontrol (eksekutif) untuk kumpulan modul keseluruhan sehingga modul-modul tersebut berfungsi dalam urutan yang tepat. Secara internal, modul mengevaluasi S6 yang pada gilirannya tergantung pada model separator, yang pada gilirannya tergantung pada modul tersebut. Pembagian akan

mengidentifikasi kumpulan modul yang harus dipecahkan secara simultan itu *maximal cyclical subsystem* atau jaringan yang tak dapat diperkecil lagi (*irreducible nets*).

Untuk melakukan pemecahan berurutan untuk sekumpulan modul, anda harus merobek arus-arus tertentu. Perobekan (*Tearing*) dalam hubungannya dengan flowsheeting modul melibatkan pelepasan dari saling keterkaitan di antara modul-modul sehingga aliran informasi yang berurutan dapat terjadi. Perobekan dibutuhkan karena adanya putaran informasi yang dibuat oleh arus daur ulang. Perobekan memberikan taksiran awal untuk nilai dari beberapa yang tak diketahui (variabel robekan), biasanya tetapi tidak harus arus daur ulang, dan kemudian menghitung nilai variabel robekan dari modul tersebut. Nilai yang dihitung ini membentuk taksiran baru dan seterusnya sampai, perbedaan antara nilai taksiran dan hitungan cukup kecil. Penyarangan (*nesting*) perhitungan menentukan arus robekan yang mana yang akan menjadi konvergen secara simultan dan dalam urutan mana kumpulan arus robekan tersebut akan menjadi konvergen.



Gambar 12.3. Separator uap-cairan

Gambar 10 menggambarkan separator uap-cairan ekuilibrium yang menunjukkan hubungan antara gabungan persamaan materi dan ekuilibrium.

$$\sum_{j=1}^C \frac{z_j (1-K_j)}{1-(V/F) + VK_j/F} = 0$$

Untuk z ialah fraksi mol spesies j dari komponen C dalam aliran masukan, $K_j = y/x_j$ adalah koefisien ekuilibrium uap-cairan fungsi dari suhu dan laju aliran arus

dicatat dalam gambar tersebut. Untuk system pendidihan sempit, anda dapat menafsir V/F , y_p dan x_p dan menggunakan persamaan 6.3 untuk perhitungan K_j dan kemudian suhunya. Pola ini bekerja dengan baik karena T terletak dalam kisaran yang sempit. Untuk materi pendidihan lebar, pola ini tidak konvergen dengan baik. Lebih baik menghitung V/F untuk persamaan 6.3 dengan menaksir T , y dan x , karena V/F terletak dalam kisaran yang sempit bahkan untuk perubahan yang besar dalam T . biasanya rutin laju konvergensi untuk kode tersebut terdiri dari modul separator yang variabelnya dihubungkan dengan modul yang lain melalui variabel robekan.

Contoh soal

Variabel										Variabel Antar muka						
	y1 1	y1 2	y1 3	y1 4	y1 5	y1 6	y1 7	y1 8	y1 9	y2 0	y2 1	y2 2	y 1	y 2	y 3	y 4
1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+ 1	0	0	0
2	+1	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	+1	+1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+ 1	0	0
5	0	0	0	0	0	+1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	+1	0	+1	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0	0	-1	0
1 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1

Matriks insiden

Andaikan sebagai pengganti pemecahan persamaan simultan, diinginkan persamaan berurutan. Dalam urutan apa persamaan tersebut harus dipecahkan? Bagi persamaan itu sehingga pemecahan berurutan dapat dilakukan. Satuan blok-blok persamaan yang masih harus dipecahkan secara simultan.

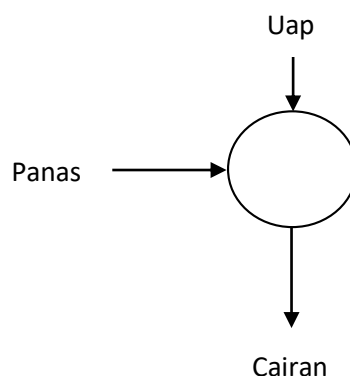
Jawaban

Tidak perlu memecahkan 10 persamaan itu secara simultan. Sistem persamaan itu dapat dipecahkan menjadi subsistem-subsistem berderajat lebih rendah, beberapa diantaranya dapat terdiri dari persamaan-persamaan individu atau kelompok persamaan kecil. Kelompok-kelompok ini berhubungan dengan yang disebut kumpulan persamaan yang tidak dapat diperkecil lagi. Dengan inspeksi dapat menetapkan urutan presedensi.

Langkah	Persaman subsistem
1	1
2	4
3	5
4	9
5	10
6	2
7	3
8	6, 7, dan 8 secara simultan

C. SOAL LATIHAN/TUGAS

1. Apa yang dimaksud dengan *flowsheeting* ? dan apa manfaatnya ? Jelaskan pendapat anda !
2. Buatlah *flowsheet* untuk produksi kertas dan polistirena sebagai bahan untuk cangkir plastik serta masukkan semua faktor kualitatif dan kuantitatif, baik yang positif maupun yang negatif untuk produksi dari bahan mentah dasar sampai produk akhir. Tunjukkan kesetimbangan materi dan energi yang diperlukan, dan jika mungkin kumpulkan data sehingga kesetimbangan tersebut dapat dipecahkan. Ringkaslah penggunaan materi dan energi dalam pembuatan satu buah cangkir.
3. Tentukan jumlah derajat bebas untuk kondensor yang ditunjukkan oleh gambar berikut ini :



D. DAFTAR PUSTAKA

Distantina S. 2001. Diktat Neraca Massa.

Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.

Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.

PERTEMUAN 13

KESETIMBANGAN MATERI DAN ENERGI KEADAAN TIDAK TUNAK

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

Pada pertemuan ini akan dijelaskan mengenai kesetimbangan materi dan energi keadaan tidak tunak, Anda harus mampu:

1. Menulis kesetimbangan materi dan energi keadaan tidak tunak makroskopik dalam kata-kata dan simbol.
2. Mengerti masalah yang dinyatakan dalam kata-kata dan menterjemahkannya ke dalam persamaan-persamaan diferensial.
3. Menyelesaikan persamaan diferensial kesetimbangan materi dan energi biasa yang sederhana dengan diberikannya kondisi awal.

B. URAIAN MATERI

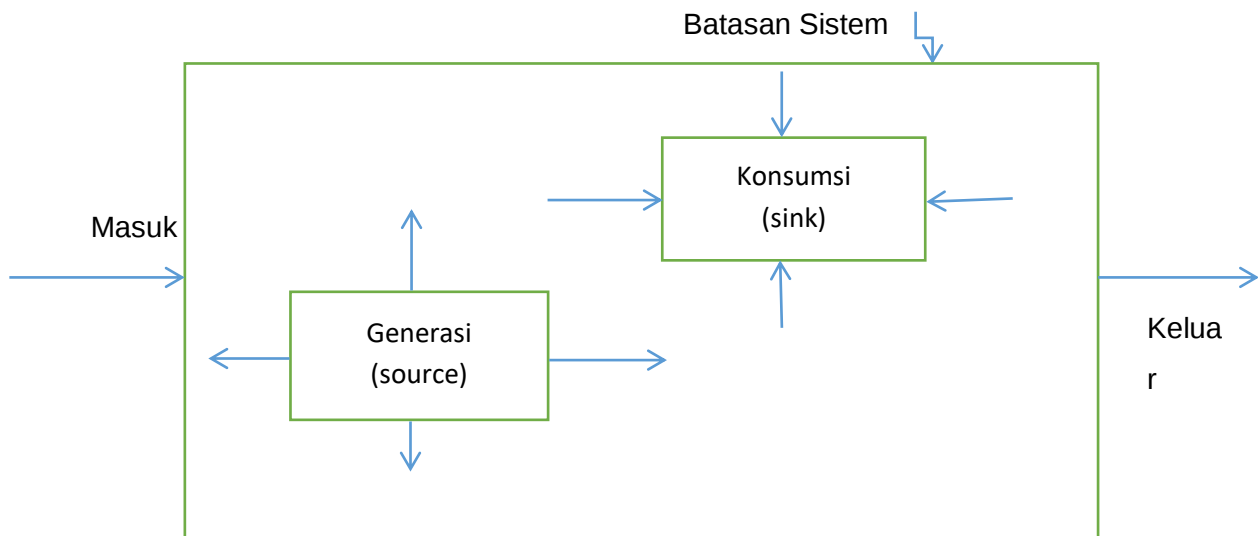
1. Kesetimbangan materi dan energi keadaan tidak tunak

Keadaan tidak tunak (*unsteady state*) dengan nilai keadaan (variable dependen) sebagai fungsi waktu adalah yang diperhatikan. Keadaan tidak tunak menunjukkan kepada proses-proses dimana kuantitas atau kondisi operasi dalam sistem tersebut berubah dengan waktu. Keadaan tidak tunak lebih rumit daripada keadaan tunak, dan umumnya masalah-masalah yang melibatkan proses keadaan tidak tunak agak lebih sulit untuk dirumuskan dan dipecahkan daripada yang melibatkan proses keadaan tunak. Kesetimbangan makroskopik mengabaikan semua rincian didalam sebuah sistem dan maka dari itu menghasilkan sebuah kesetimbangan tentang sistem keseluruhan. Waktu merupakan variabel independen sedangkan variable dependen merupakan konsentrasi dan suhu bukan merupakan fungsi posisi tetapi menunjukkan seluruh volume sistem tersebut.

Untuk membantu dalam penerjemahan persamaan

{akumulasi atau penipisan didalam sistem} =

{ transpor kedalam sistem melalui batasan sistem} – {transpor keluar dari sistem melalui batasan sistem} + {generasi didalam sistem} – {konsumsi didalam sistem}



Gambar 13.1. Proses keadaan tidak tunak umum dengan transpor masuk dan keluar dan generasi dan konsumsi internal.

Interval waktu yang sangat kecil Δt . Selama waktu naik dari t ke $t + \Delta t$. Maka, dengan menggunakan kesetimbangan massa komponen sebagai contoh, akumulasi akan menjadi massa A dalam sistem pada $t + \Delta t$ dikurangi massa A dalam sistem pada waktu t .

$$\text{Akumulasi} = \rho_A V|_{t+\Delta t} - \rho_A V|_t$$

Untuk ρ_A = massa komponen A per satuan volume

V = volume sistem

Dan simbol $|_t$ berarti bahwa kuantitas yang mendahului garis vertikal tersebut dievaluasi pada waktu t , atau waktu $t + \Delta t$ atau pada permukaan S_1 , atau pada permukaan S_2 . Karena kasus tersebut mungkin seperti yang ditunjukkan oleh subkrip, catat bahwa dimensi bersih dari suku akumulasi adalah massa A .

Transpor melalui permukaan terdefinisi S_1 dan S_2 yang luasnya diketahui dan transpor menyebrangi batasan sistem melalui permukaan lain (tak terdefinisi). Transport bersih A kedalam (melalui S_1) dan keluar dari (melalui S_2) sistem melalui permukaan terdefinisi dapat ditulis sebagai berikut :

$$\text{Aliran bersih menyebrangi batasan melalui } S_1 \text{ dan } S_2 = \rho_A v S \Delta t|_{S_1} - \rho_A v S \Delta t|_{S_2}$$

Untuk v = kecepatan fluida dalam saluran dari potongan melintang S .

S = luas potongan lintang terdefinisi tegak lurus terhadap aliran materi .

Dimensi bersih dari suku transpor tersebut ialah massa A . Jenis transpor lain yang menyebrangi batasan sistem dapat ditunjukkan oleh :

$$\text{Aliran residu bersih menyebrangi batasan} = \dot{w}_A \Delta t$$

Untuk $\dot{w}_A$ ialah laju aliran massa komponen A melalui batasan sistem selain permukaan terdefinisi S_1 dan S_2 . Suku generasi konsumsi bersih akan didefinisikan tergantung pada reaksi kimia r_A :

$$\text{Generasi konsumsi bersih} = \dot{r}_A \Delta t$$

Untuk $\dot{r}$ ialah laju bersih generasi-konsumsi komponen A oleh reaksi kimia .

Kesetimbangan materi spesies untuk spesies A :

$$\rho_A V|_{t+\Delta t} - \rho_A V|_t = \rho_A v S \Delta t|_{S_1} - \rho_A v S \Delta t|_{S_2} + \dot{w}_A \Delta t + \dot{r}_A \Delta t \quad (1)$$

akumulasi transpor melalui batasan terdefinisi transpor melalui batasan lain generasi atau konsumsi.

kesetimbangan materi total :

$$\rho V|_{t+\Delta t} - \rho V|_t = \rho v S \Delta t|_{S_1} - \rho v S \Delta t|_{S_2} + \dot{w} \Delta t \quad (2)$$

akumulasi transpor melalui batasan transpor terdefinisi melalui batasan lain

$$E|_{t+\Delta t} - E|_t = \left(\hat{H} + \frac{V^2}{2} + gh \right) \dot{m} \Delta t|_{S_1} - \left(\hat{H} + \frac{V^2}{2} + gh \right) \dot{m} \Delta t|_{S_2} \quad (3)$$

Akumulasi transpor melalui batasan terdefinisi

$$+ \dot{Q} \Delta t + \dot{W} \Delta t + \dot{B} \Delta t$$

Kalor kerja transpor melalui batasan lain

Untuk $\dot{B}$ = laju perpindahan energi yang menyertai $\dot{Q}$

$\dot{m}$ = laju perpindahan masing masing massa melalui perpindahan S_1 masuk dan S_2 keluar.

$\dot{Q}$ = laju perpindahan kalor ke sistem

$\dot{W}$ = laju kerja yang dilakukan sistem

$\dot{m}$ = laju aliran massa total melalui batasan sistem selain melalui permukaan terdefinisi s_1 dan s_2

Jika masing-masing pers, (1) dibagi dengan Δt kita memperoleh

$$\frac{\rho_A V|_{t+\Delta t} - \rho_A V|_t}{\Delta t} = \rho_A vS|_{s1} - \rho_A vS|_{s2} + \dot{W}A + \dot{r}A \quad (4)$$

Ketika $\Delta t \rightarrow 0$, kita mendapatkan persamaan diferensial

$$\frac{d(\rho_A V)}{dt} = -\Delta(\rho_A vS) + \dot{w}A + \dot{r}A \quad (5)$$

Dan secara analog kesetimbangan massa total dan kesetimbangan energi berturut-turut ialah

$$\frac{d(\rho_A V)}{dt} = -\Delta(\rho_A vS) + \dot{w}$$

$$\frac{d(E)}{dt} = \dot{Q} + \dot{B} + \dot{w} - \Delta \left[\left(\hat{H} + \frac{V^2}{2} + gh \right) \dot{m} \right] \quad (6)$$

Hubungan antara kesetimbangan energi yang diberikan oleh pers (6) , yang mempunyai satuan energi per satuan waktu , dan kesetimbangan energi yang mempunyai satuan energi. Pengintegralan pers (6) terhadap waktu, dinyatakan secara formal sebagai berikut :

$$E_{t2} - E_{t1} = \int_{t1}^{t2} \{ \dot{Q} + \dot{B} + \dot{w} - \Delta [(\hat{H} + \dot{K} + \dot{P})\dot{m}] \} dt \quad (7)$$

Jika kita cukup banyak asumsi – asumsi (yang masuk akal) dan bekerja dengan masalah yang sederhana , kita dapat menggabungkan atau menghilangkan cukup banyak suku dari persamaan-persamaan tersebut untuk dapat mengintegralkannya dan mengembangkan jawaban analitis. Jika

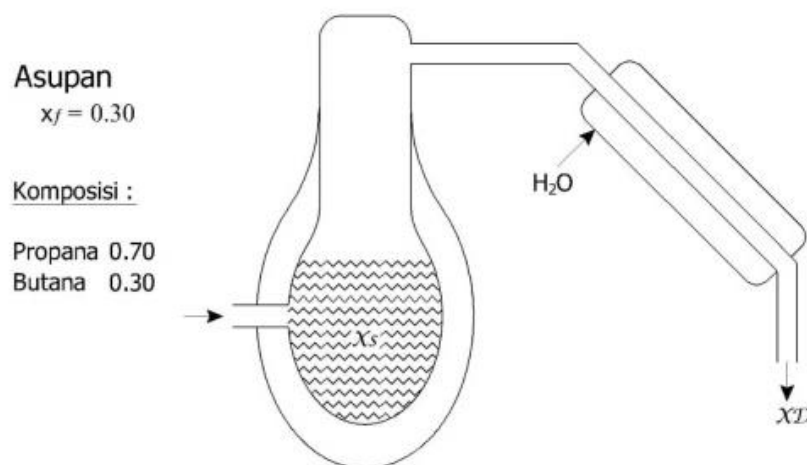
pemecahan analitis tidak memungkinkan , maka kode komputer dapat digunakan untuk mendapatkan pemecahan numerik untuk suatu kasus tertentu.

Untuk menyelesaikan perumusan masalah , anda harus melibatkan beberapa nilai yang diketahui dari variable dependen (atau turunannya) pada suatu waktu tertentu , biasanya kondisi awal (*initial condition*).

2. Contoh Kesetimbangan materi dalam batch

- a. Sebuah alat penyuling kecil sedang memisahkan propana dan butana pada suhu 135°C, dan pada mulanya berisi 10 kg mol campuran yang komposisinya ialah $x = 0,30$ (x =fraksi mol butana). Campuran tambahan ($x_f = 0,30$) dimasukkan pada laju 5 kg mol/hr . jika volume total cairan dalam penyuling tersebut konstan , dan konsentrasi uap dari penyuling (x_D) dihubungkan dengan x_s sebagai berikut :

$$x_D = \frac{x_s}{1+x_s}$$



Berapa waktu yang diperlukan untuk mengubah nilai x_s dari 0,3 menjadi 0,4 ? berapa nilai keadaan tunak x_s dalam penyuling tersebut (yaitu, ketika x_s menjadi konstan)? lihat gambar di atas !!

Jawaban :

Karena butana dan propana membentuk larutan ideal , kita tidak perlu memikirkan tentang perubahan volume pada pencampuran atau pemisahan hanya kesetimbangan materi yang diperlukan untuk menjawab pertanyaan yang diajukan. Jika t variable independen , dan x_s variabel dependen kita dapat mengatakan bahwa :

Kesetimbangan butana (C_4) masukan ke penyuling ialah:

5 mol asupan	0,30 mol C_4
min	mol diembunkan

Keluaran dari penyuling sama dengan keluaran yang diembunkan

5 mol diembunkan	x_D mol C_4
min	mol diembunkan

Akumulasinya ialah :

$$\frac{10 dx_s}{dt}$$

dt

Maka persamaan tidak tunak kita adalah :

Akumulasi masuk keluar

$$\frac{dx_s}{dt} = 0,15 - 0,5 x_D \quad (b)$$

substitusi persamaan untuk x_D dari pers (a) dalam pers (b)

$$\frac{dX_s}{dt} = 0,15 - \frac{X_s}{1+X_s} (0,5) \quad (c)$$

Pengintegralan pers (c) antara limit-limit berikut :

$$\begin{aligned} \text{Pada } t = 0 \quad X_s &= 0,30 \\ &= \theta \quad X_s = 0,40 \end{aligned}$$

$$\int_{0,30}^{0,40} \frac{dX_s}{0,15 - [0,5X_s(1+X_s)]} = \int_0^\theta dt = 0$$

$$\int_{0,30}^{0,40} \frac{(1+Xs)dXs}{0,15-0,35 Xs} = \theta = \left[-\frac{Xs}{0,35} - \frac{1}{(0,35)} \ln (0,15 - 0,35 Xs) \right]_{0,30}^{0,40}$$

Memberikan $\theta = 5,85$ hr

Jika anda hanya mempunyai data percobaan untuk XD sebagai fungsi Xs sebagai pengganti persamaan yang diberikan anda dapat selalu mengintegrasikan persamaan tersebut secara numerik .

Nilai keadaan tunak Xs ditetapkan pada waktu yang tak terhingga atau sebagai alternatif, ketika akumulasinya nol pada waktu itu,

$$0,15 = \frac{0,5 Xs}{1+Xs}$$

atau

$$Xs = 0,428$$

Nilai Xs tidak akan pernah lebih besar daripada 0,428 untuk kondisi yang diberikan .

C. SOAL LATIHAN/TUGAS

1. Dalam sebuah reaktor sejumlah kecil hasil samping yang tak diinginkan terbentuk secara kontinyu pada laju 0,5 lb/jam ketika reaktor tersebut berisi inventaris tetap sebanyak 10.000 lb materi. Arus masukan ke reaktor mengandung sangat sedikit hasil samping (40 ppm), dan arus cairan buangan (*effluent*) ialah 1400 lb/jam. Jika pada saat permulaan reaktor tersebut berisi 5000 ppm hasil samping. Berapa konsentrasinya dalam ppm setelah 10 hari ?
2. Inhibitor kimia harus ditambahkan ke air dalam sebuah boiler untuk mencegah korosi dan kerak air. Konsentrasi inhibitor harus dipertahankan antara 40 dan 30 ppm. Sistem boiler tersebut selalu berisi 100.000 kg air dan laju peniupan (pembersihan) ialah 15.000 kg/jam. Air pembersih tidak berisi inhibitor. Pada awalnya 2,8 kg inhibitor ditambahkan ke air dan setelah itu 2,1 kg ditambahkan secara periodik. Berapa waktu interval maksimum (setelah 2,8 kg tersebut) sampai penambahan inhibitor yang pertama ?

D. DAFTAR PUSTAKA

Distantina S. 2001. Diktat Neraca Massa.

Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.

Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.

PERTEMUAN 14

GRAFIK KELEMPERTEMUANAN DAN PENGGUNAANNYA

A. TUJUAN PEMBELAJARAN

Pada pertemuan ini akan dijelaskan mengenai grafik kelembapan dan penggunaannya, Anda harus mampu:

1. Mendefinisikan kelembapan, kalor lempertemuan, volume lempertemuan, suhu bola kering, suhu bola basah, grafik kelembapan, volume basah dan garis pendingin adiabatik.
2. Menggunakan grafik kelembapan untuk menentukan sifat-sifat udara basah, dan untuk menghitung perubahan entalpi dan memecahkan masalah pemanasan dan pendinginan yang melibatkan udara basah.

B. URAIAN MATERI

1. Grafik Kelembapan dan Penggunaannya

Dalam bagian ini menerapkan kesetimbangan materi dan energi simultan untuk memecahkan masalah yang melibatkan pelempertemuanan, pendinginan udara, pendiginan air dan sejenisnya.

Kelempertemuanan (*humidity*) H ialah masa (lb atau kg) udara sangat kering (*bone-dry air*).

$$H = \frac{18p_{H_2O}}{29(p_1 - p_{H_2O})} = \frac{18n_{H_2O}}{29(n_t - n_{H_2O})}$$

Tabel 14.1. Parameter yang Terlibat dalam Perhitungan Grafik
Kelempertemuanan

Simbol	Arti	Nilai SI	Nilai American Engineering
$C_{P\ udara}$	Kapasitas kalor udara	1,00 / Kj (kg) (K)	0,24/ (lb) ($^{\circ}$ F)
$C_{P\ uap\ H_2O}$	Kapasitas kalor uap air	1,88 / Kj (kg) (K)	0,45 BTU/ (lb) ($^{\circ}$ F)
$\Delta H_{Penguapan}$	Kalor penguapan air spesifik pada 0 $^{\circ}$ C (32 $^{\circ}$ F)	42 kJ/Kg	1076 Btu/ lb
ΔH_{udara}		Entalpi spesifik udara	
$\Delta H_{Uap\ H_2O}$		Entalpi spesifik uap air	

Kuantitas lain yang terlibat dalam pembuatan grafik kelembapan adalah:

- a. **Kalor lempertemuan** (*humid heat*) ialah kapasitas campuran udara- uap air yang dinyatakan pada *basis 1 lb atau 1 kg udara sangat kering*. Jadi kalor lempertemuan C_s ialah:

$$C_s = C_{P\text{ udara}} + (C_{P\text{ uap}} H_2 O) \quad (5.31)$$

Untuk semua kapasitar kalor adalah per massa dan bukan per mol. Dengan menggasumsikan bahwa kapasitas kalor udara dan uap air konstan dibawah kisaran sempit kondisi yang dialami untuk perhitungan pendinginan udara dn pelempertemuanan, dapat menulis dalm satuan American Engineering

$$C_s = 0,240 + 0,45 (H) \quad \text{Btu/ (}^{\circ}\text{F) (lb udara kering)} \quad (5.32)$$

Atau dalam SI

$$C'S = 1,00 + 1,88 (H) \text{Kj/ (K) (kg udara kering)} \quad (5.32a)$$

- b. **Volume lembap** (*humid volum*) ialah volume 1 lb atau kg udara kering plus uap air dalam udara. Dalam system American Engineering.

$$V = \frac{359 \text{ ft}^3}{1 \text{ lb mol}} \frac{1 \text{ lb mol udara}}{29 \text{ lb udara}} \frac{T_F + 460}{32 + 460} + \frac{359 \text{ ft}^3}{1 \text{ lb mol}} \frac{1 \text{ lb mol udara } H_2O}{18 \text{ lb } H_2O} \frac{T_{of} + 460}{32 + 460} \quad (5.33)$$

$$= (0,73 T^{\circ}\text{F} + 336) \left(\frac{1}{29} + \frac{H}{18} \right)$$

Dimana V dalam ft^3 / lb udara kering. Dalam system SI,

$$V = \frac{22,4 \text{ m}^3}{1 \text{ kg mol}} \frac{1 \text{ kg mol udara}}{29 \text{ kg air}} \frac{T_k}{273}$$

$$\frac{22,4 \text{ m}^3}{1 \text{ lb mol}} \frac{1 \text{ kg mol H}_2\text{O}}{18 \text{ kg H}_2\text{O}} \frac{TK}{273} \frac{H \text{ lb H}_2\text{O}}{\text{kg air}}$$

(5.33a)

$$= 283 \times 10^{-3} T_K + 4,56 \times 10^{-3} H$$

Untuk $V \text{ m}^3/\text{kg}$ udara kering

- c. **Suhu bola kering** (*dry bulb temperature*) (T_{DB}) ialah suhu biasa yang sudah selalu Anda gunakan untuk gas dalam $^{\circ}\text{F}$ atau $^{\circ}\text{C}$ (atau $^{\circ}\text{R}$ atau K)
- d. **Suhu bola basah** (*wet bulb temperature*) (T_{WB}) ialah suhu ini berhubungan dengan penguapan air (atau cairan lain, jika perhatian kita bukan dengan kelembapan tetapi dengan kejenuhan) dari sekitar bola (bulb) thermometer merkuri biasa. Andaikan anda menaruh sebuah bumbu, atau kaian katun berpori pada bola (bulb) merkuri dari sebuah thermometer dan membasahi sumbu itu. Selanjutnya anda (a) memutar thermometer tersebut dalam udara seperti dalam udara seperti dalam Gambar 5.16 (alat ini disebut psikrometer sling ketika thermometer bola – basah dan termometr bola kering dipasang bersama), atau (b) memasng sebuah kipas angin untuk meniup bola tersebut dengan cepat pada $1000 \text{ ft}^3/\text{min}$ atau lebih. Apa yang terjadi pada suhu yang dicatat oleh thermometer bola basah tersebut?

Selama air dari sumbu menguap, sumbu tersebut mendingin dan terus mendingin sampai laju energi yang dipindahkan kesumbu oleh udara yang ditiupkan padanya sama dengan laju kehilangan energy yang disepertemuankan oleh penguapan air dari sumbu. Kita mengatakan bahwa suhu bola thermometer dengan sumbu basah pada ekuilibrium ialah suhu bola basah itu. (tentu saja, jika air terus menguap, air itu akhirnya akan habis, dan suhu sumbu akan naik.) suhu ekuilibrium untuk proses yang diuraikan diatas akan terletak pada kurva kelembapan relatif 100% (kurva udara jenuh).

Andaikan kita membuat sebuah grafik dimana sumbu vertical ialah kelembapan dan sumbu horizontal ialah suhu bola kering. Kita ingin memplotkan suhu thermometer tersebut selama suhunya berubah untuk mencapai T_{WB} . Garis inilah yang disebut **garis bola basah** (*wet bulb line*)

Persaman untuk garis bola basah didasarkan pada sejumlah asumsi asumsi ini berada ini berada diluar raung lingkup buku ini. Namun, gagasan tentang suhu

boala bash ini berdasarkan ekuilibrium antara laju perpindahan energy kebola thermometer tersebut dan laju penguapan air. laju proses adalah topic yang belum didiskusikan. Gagasan dasarnya adalah bahwa sejumlah besar udara dibuat berkontak dengan sedikit air, dan bahwa penguapan air itu tidak mengubah suhu dan kelembapan udara tersebut. Hanya suhu air yang berubah. Persamaan garis boala basah adalah kesetimbangan energi.

$$h_c (T - T_{WB}) = K_g \Delta H_{penguapan} (\Delta H_{WB} - H)$$

Perpindahan kalor ke air perpindahan kalor dari air

Untuk: h = koefisien perpindahan kalor untuk konveksi ke bola

T = suhu udara bersih

K = koefisien perpindahan massa

$\Delta H_{penguapan}$ = kalor laten penguapan

H = Kelembapan udara basah

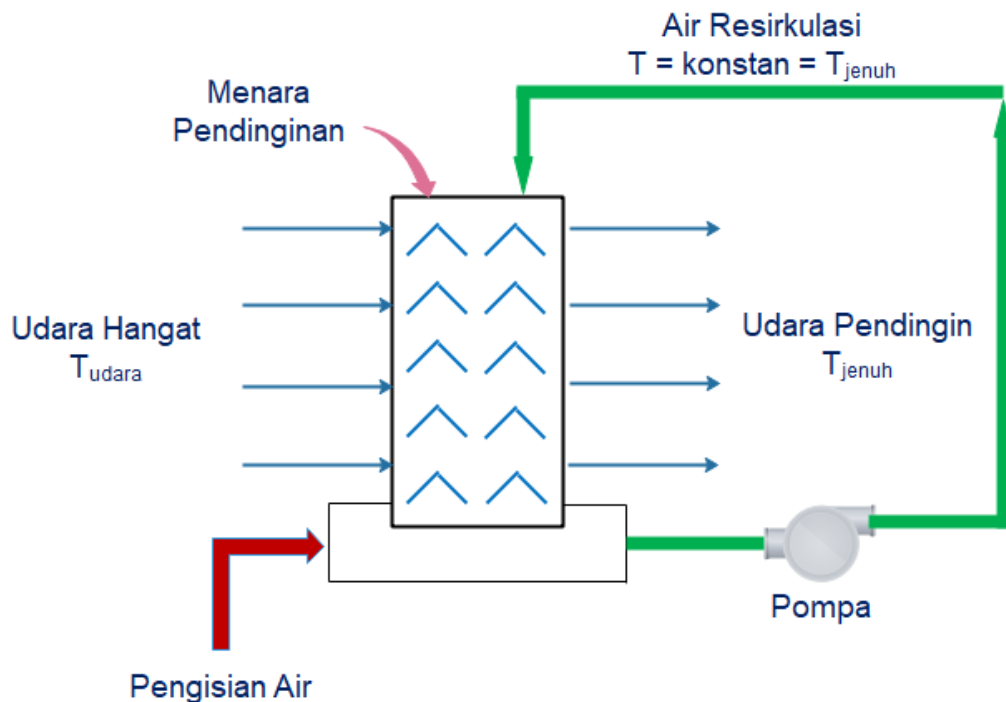
Selanjutnya kita dapat membuntuk rasio

$$\frac{H_{WB} - H}{T_{WB} - T} = - \frac{h_c}{(K_g) \Delta H_{penguapan}} \quad (14.1)$$

Untuk mendapatkan kemiringan garis bola basah. Untuk air saja, kebetulan bahwa $h_c/K_g = C_s$ (yaitu, nilai numeriknya kira-kira 0,15) yang memberikan kemiringan garis bola basah.

$$\frac{H_{WB} - H}{T_{WB} - T} = - \frac{C_s}{\Delta H_{penguapan}} \quad (14.2)$$

Proses jenis lain yang penting terjadi ketika pendinginan atau pelembapan adiabatik (*adiabatic cooling or humidification*) terjadi antara udara dan air yang didaur ulang seperti yang digambarkan dalam Gambar 5.18. Dalam proses ini udara didinginkan dan dilempertemuangkan (kandungan airnya meningkat) sedangkan hanya sedikit dari air yang disirkulasi tersebut diupakan. Pada *ekuilibrium*, dan *steady state*, suhu udara sama dengan suhu air, dan udara yang keluar jenuh pad suhu ini. Dengan membuat kesetimbangan energy keseluruhan di sekitar proses tersebut ($Q = 0$), kita dapat memperoleh persamaan untuk pendingin adiabatik udara.



Gambar 14.1. Pelempertemuanan Adiabatik Dengan Daur Ulang Air

Persamaan ini, jika diplotkan pada grafik kelembapan, menghasilkan apa yang disebut sebagai garis pendinginan adiabatik,. Kita mengambil suhu ekuilibrium air, T_s , sebagai suhu referensi bukannya 0°C atau 32°F . Apakah anda mengerti mengapa? Kita mengabaikan sejumlah kecil air tmbahn atau mengasumsikan bahwa air tersebut masuk pada T_s . Kesetimbangan energinya ialah:

$$T_{udara} = \frac{\Delta H_{penguapan\ H_2O\ pada\ T_s} + (H_s - H_{udara})}{C_p\ udara + C_p\ H_2O\ uap + H_{udara}} \quad (14.3)$$

Yang meruoakan persamaan untuk pendinginan adiabatic

Perhatikan bahwa persamaan ini dapat ditulis sbb:

$$\frac{H_s - H}{T_s - T_{udara}} = - \frac{C_s}{\Delta H_{penguapan\ T_s}} \quad (14.4)$$

Bandingkn persamaan (5.38) dengan persamaan (5.36) dapatkh anda menyimpulkan bahwa persamaan proses bola basah, untuk air saja, pada dasarnya sama dengan persamaan pendinginan adibatik.

Tentu saja! Kita mempunyai ciri yang menarik bahwa dua proses dapat ditunjukkan oleh kumpulan garis yang sama. Untuk diskusi terperinci tentang

keunikan dari kebetulan ini, lihatlah referensi pada bagian akhir pertemuan ini. Untuk kebanyakan kebanyakan unsure selain air, dua persamaan tersebut akan memiliki kemiringan yang berbeda.

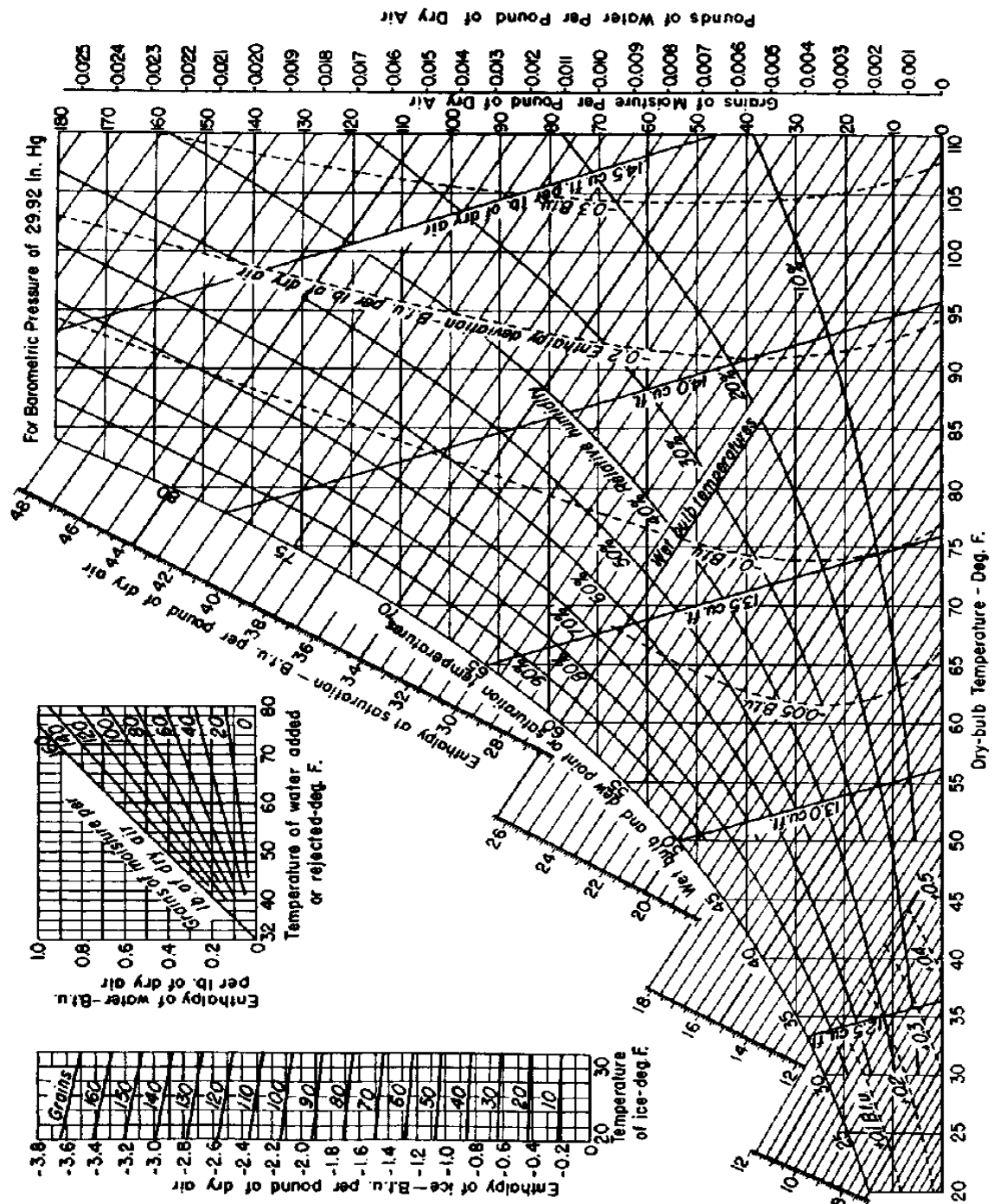
Sekarang karena anda telah mempunyai gagasan tentang aneka ciri yang digambarkan pd diagram kelembapan (garfik psikometrik)/ *humidity chart* (*psychometric chart*), mari kita lihat grafik itu sendiri (gambar 5.19). cara ini tak lebih daripada cara grafis untuk membantu dalam pembuatn kesetimbangan materi dan energy dalam campuran uap air udara. Kerangkanya terdiri dari kumpulan koordinat kelembapan (ϕ) suhu (TDB) bersama dengan parameter-parameter (garis-garis) tambahan:

- Kelembapan relatif konstan yang ditunjukkan dalam persen
- Volume basah, (volume lempertemuan) / *moist volume* (*humid volume*) konstan
- Garis pendinginan adiabatic, yang sama (hanya untuk uap air) dengan garis bola basah atau psikometrik
- Kurva kelembapan relatif 100% (identik dengan kelembapan absolute 100%) (yaitu kurva udara jenuh)

Dengan dua nilai yang diketahui, and adapat menunjuk dengan tepat kondisi kelembapan udara pada grafik tersebut dan mentukan semua nilai yang terkait lainnya.

Jauh kesebelah kiri dari garis kelembapan relatif 100% anda akan mengamati skala yang menunjukkan entalpi per massa udara kering dari campuran udara jenuh uap air. Penyesuaian entalpi untuk udara yang kurang dari jenuh ditunjukkan pada grafik itu sendiri oleh sederet kurva. Entalpi udara basah, dalam energy/ massa udara kering, adalah:

$$\Delta H = \Delta H_{Udara} + \Delta H_{H_2O_{Uap}}(H)$$



Gambar 14.2. Psychrometric Chart

Kita harus menyatakan dalam hal ini bahwa kondisi referensi untuk grafik kelembapan adalah air pada 32 F ($^{\circ}\text{C}$) dan 1 atm (bukan tekanan uap H_2O), dan 0°F dan 1 atm untuk dara. Grafik tersebut sesuai hanya untuk penggunaan pada kondisi atmosferik konstan, dan harus dimodifikasi jika tekanan berbeda secara signifikan dari 1 atm. Jika anda menginginkan anda dapat menghitung nilai entalpi yang ditunjukkan dalam grafik tersebut secara langsung dari table-table yang mendaftar entalpi udara dan uap air, atau anda dapat menghitung entalpi dengan keakuratan yang memadai dari persamaan berikut:

Kalor dari penguapan air
Pada T ref

$$\Delta H = C_{p\ udara} (T - T_{ref})_{udara} + H[\Delta H_{pengupuan} + C_{p\ udara} (T - T_{ref})_{water}]$$

Entalpi untuk udara entalpi untuk uap air (14.5)

Dalam satuan American Engineering, persamaan (5.40)

$$\Delta H = 0,250 T^0_{0F+} + H (10610 + 0,45 T^0_{0F}) \quad (14.6)$$

Karena $C_s = 0,240 + 0,45 H$ dan $T_{WB} = T_s$

Garis pendinginan adiabatik adalah garis entalpi yang hampir konstan untuk campuran udara air yang masuk, dan anda dapat menggunakannya begitu saja tanpa kesalahan yang besar. Tetapi, jika anda ingin mengkoreksi nilai entalpi jenuh untuk deviasi yang ada untuk campuran udara uap air yang kurang jenuh, anda dapat menggunakan garis deviasi entalpi yang tampak pada grafik tersebut dan dapat digunakan seperti yang digambarkan dalam contoh dibawah ini. Proses yang bukan merupakan proses bola basah atau adiabatik dengan air yang diresirkulasi dapat ditangani dengan kesetimbangan materi dan energi, dengan mengambil data dasar untuk perhitungan dari grafik kelembapa. Jika ada kenaikan atau penurunan dalam kadar air udara dalam kesetimbangan energi untuk proses tersebut untuk membuatnya lebih tepat.

Ada tabel sifat yang diperhatikan dalam grafik kelembapan jika dibutuhkan keakuratan yang lebih tinggi dari pada yang dapat diperoleh melalui grafik, dan

program komputer dalam Disk 1 yang dapat diminta dari penerbit dapat digunakan untuk memanggil data psikometrik.

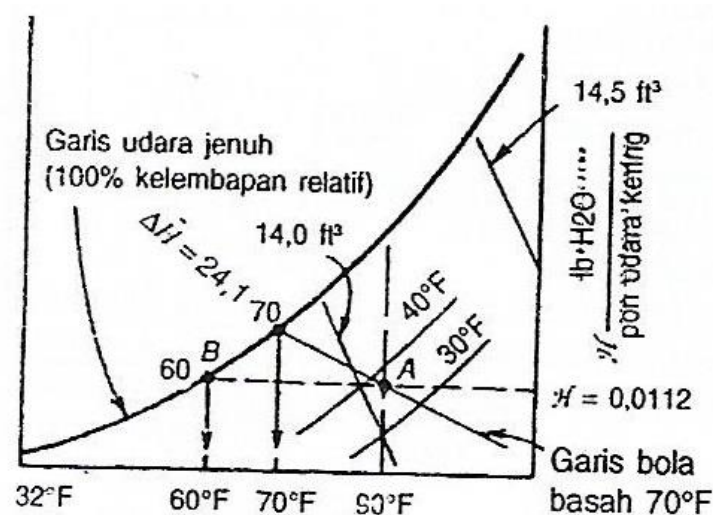
Meskipun kita akan mendiskusikan grafik kelembapan secara khusus, grafik dapat dibuat untuk campuran dari dua unsur apapun dalam fase uap, seperti CCl_4 dan udara atau aseton dan nitrogen, jika semua nilai konstanta fisis untuk air dan udara diganti dengan nilai-nilai untuk gas dan uap yang diinginkan.

2. CONTOH SOAL

Contoh. Sifat-sifat Udara Basah Dari Grafik Kelembapan

Sebutkan semua sifat yang dapat anda temukan pada grafik kelembapan dalam satuan American Engineering untuk udara basa pada suhu bola kering 90°F dan pada suhu bola basa 70°F.

Jawaban



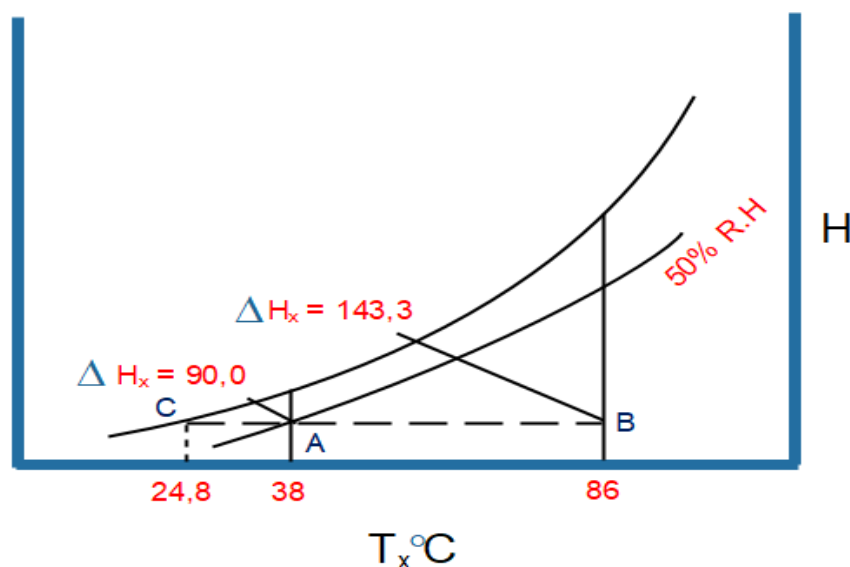
Sebuah diagram akan membantu menjelaskan macam-macam sifat yang diperoleh dari grafik kelembapan. Lihat gambar C5.33. Anda dapat menemukan lokasi titik A untuk 90°F DB (bola kering) dan 70°F. Garis bola basah ini dapat ditempatkan dengan mencari sepanjang garis kelembapan 100% sampai sampai suhu kejenuhan 70°F tercapai, atau dengan cara lain, dengan menjalankan garis vertikal ke atas pada 70°F sampai memotong garis kelembapan 100%. Dari suhu bola basah 70°F itu, ikuti garis pendinginan adiabatik (yang sama dengan garis suhu bola basah pada grafik kelembapan) ke kanan sampai memotong garis 90°F DB. Sekarang karena titik A telah ditetapkan, anda dapat membaca sifat-sifat udara basah yang lain dari grafik itu.

- Titik embun. Ketika udara pada A didinginkan pada tekanan konstan (dan sebenarnya pada kelembapan konstan), udara bersih tersebut akhirnya mencapai suhu yang pada suhu ini air mulai mengembun. Hal ini di tunjukan oleh garis horizontal. Garis kelembapan konstan, pada grafik kelembapan. Dan titik embun ditempatkan pada B, atau kira-kira 60°F.
- Kelembapan relatif. Dengan menginterpolasi antara garis H 40% dan H 30% anda dapat menemukan bahwa titik A berada pada kira-kira H 37%.
- Kelembapan (H). Anda dapat membaca kelembapan dari ordinat sebelah kanan sebagai 0,0112 lb H₂O/lb udara kering.
- Volume Lempertemuan. Dengan interpolasi lagi antara garis 14,0 ft³ dan 14,5 ft³, anda dapat menemukan volume lembap sebesar 14,097 ft³/lb udara kering.
- entalpi. Nilai entalpi untuk udara jenuh dengan suhu bola basah 70°F ialah $\Delta H = 34,1$ Btu/lb udara kering (nilai yang lebih akurat dapat diperoleh psikometrik jika diperlukan). Deviasi entalpi (tidak diperlihatkan dalam Gambar C5.33 sebagai penggantinya lihat gambar 5.19a) untuk udara yang kurang dari jenuh adalah kira-kira $-0,2 = 33,9$ Btu/lb udara kering.

Contoh 5.34 Pemanasan Pada Kelembapan Konstan

Udara basah pada 38°C dan H 48% dikalorkan dalam tungku sampai 86°C. Berapa kalor yang harus ditambahkan per-meter kubik udara basah awal. Dan berapa titik embun akhir udara tersebut?

Jawaban



Seperti yang ditunjukkan dalam gambar di atas, proses berjalan dari titik A ke titik B pada garis horizontal kelembapan konstan. Kondisi awal ditetapkan pada $T_{DB} = 38^{\circ}\text{C}$ dan H 48%. Titik B ditetapkan dengan perpotongan dari garis horizontal dari A dan garis vertikal dari 86°C . Titik embun tidak berubah dalam proses ini dan ditempatkan pada C pada $24,8^{\circ}\text{C}$.

Nilai entalpi adalah sebagai berikut (semua dalam kJ/kg udara kering):

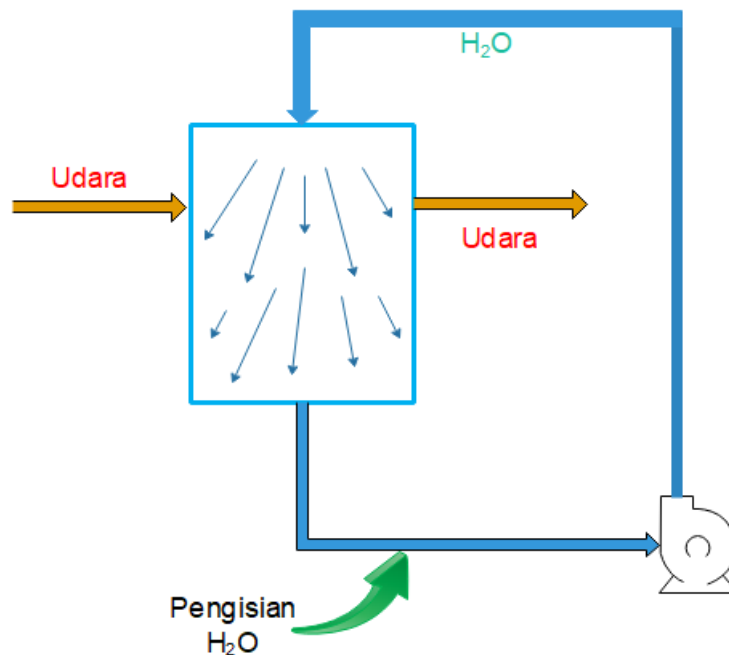
Titik	ΔH_{jenuh}	OH	$\Delta H_{\text{sebenarnya}}$
A	90,0	-0,5	89,5
B	143,3	-3,3	140,0

Juga pada A volume udara basah ialah $0,91 \text{ m}^3/\text{kg}$ udara kering. Maka dari itu, kalor yang ditambahkan ialah ($Q = \Delta H$) $140,0 - 89,5 = 50,5 \text{ kJ/kg}$ udara kering.

$$= \frac{50,5 \text{ kJ}}{\text{kg udara kering}} \times \frac{1 \text{ kg udara kering}}{0,91 \text{ m}^3}$$

$$= 55,5 \text{ kJ/m}^3 \text{ udara basah awal}$$

Contoh. Pendingin dan Pelembapan



Gambar 14.3. Semprotan Air

Salah satu cara untuk menambahkan kadar air pada udara ialah dengan melewatkannya melalui semprotan air atau pencucu air. Lihat Gambar di atas. Biasanya, air yang digunakan diresirkulasi bukan dibuang. Maka, dalam keadaan lunak, air berada pada suhu kejenuhan adiabatik, yang sama dengan suhu bola basah. Udara dan air cukup lama, udara tersebut akan berada pada suhu bola basah juga. Tetapi, kita akan mengasumsikan bahwa pencuci tersebut cukup kecil sehingga udara tidak mencapai suhu bola basah; sebaliknya, berlaku berikut ini:

	$T_{DB} (^{\circ}C)$	$T_{WB} (^{\circ}C)$
Udara masuk:	40	22
Udara keluar:	27	

Jawaban

Proses keseluruhan diasumsikan adiabatik, dan seperti yang ditunjukkan dalam gambar di atas, terjadi antara titik A dan B sepanjang garis pendingin adiabatik. Suhu bola basah tetap pada 22°C. Nilai kelembapan ialah

$$H = \frac{kg \text{ H}_2\text{O}}{kg \text{ udara kering}}$$

$$B = 0,0145$$

$$A = 0,0093$$

$$\text{Perbedaan} : 0,0052 \times \frac{kg \text{ H}_2\text{O}}{kg \text{ udara kering}} \text{ yang ditambahkan}$$

Contoh. Kombinasi Keseimbangan Materi dan energi untuk Menara Pendingin

Anda diminta untuk merancang ulang menara pendingin air yang mempunyai sebuah blower dengan kapasitas $8,30 \times 10^6 \text{ ft}^3/\text{hr}$ udara basah (pada 80°F dan suhu bola basah 65°F). Udara buangan keluar pada 95°F dan bola basah 90°F. Berapa banyak air yang dapat didinginkan dalam lb/hr jika air yang akan didinginkan tidak didaur ulang, masuk menara pada 120°F, dan meninggalkan menara pada 90°F?

Jawaban

Data entalpi, kelembapan, dan volume lempertemuan untuk udara yang diambil dari grafik kelembapan adalah sebagai berikut :

	A	B
$H \left(\frac{lb \ H_2O}{lb \ udara \ kering} \right)$	0,0098	0,0297
$H \left(\frac{grain \ H_2O}{lb \ udara \ kering} \right)$	69	208
$H \left(\frac{Btu}{lb \ udara \ kering} \right)$	$30,05 - 0,12 = 29,93$	$55,93 - 0,10 = 55,83$
$H \left(\frac{ft^3}{lb \ udara \ kering} \right)$	13,82	14,65

Laju pengeluaran air pendingin dapat diperoleh dari kesetimbangan energi di sekeliling proses.

Basis : $8,30 \times 10^6 \text{ ft}^3/\text{hr}$ udara basah

$$\left(\frac{8,3 \times 10^6 \text{ ft}^3}{\text{hr}} \right) \frac{1 \text{ lb udara kering}}{13,82 \text{ ft}} = 6,00 \times 10^5 \text{ lb udara kering/hr}$$

Entalpi relatif untuk arus air yang masuk ialah (suhu referensi 32°F dan 1 atm)

$$\Delta H = C_p H_2O \Delta T = 88 \text{ Btu/lb } H_2O$$

Dan untuk arus keluar ialah 58 Btu/lb H_2O . Nilai dari tabel uap pada 120°F untuk air cair ialah 87,92 Btu/lb H_2O , sedikit berbeda karena data ini menunjukkan air pada tekanan uapnya. Data yang dapat digunakan sebagai pengganti 32°F untuk air cair. Contohnya, jika anda memilih 90°F. Satu arus air tidak harus diperhitungkan karena entalpi relatifnya akan bernilai nol.

Kehilangan air ke udara ialah

$$0,0297 - 0,0098 \text{ lb } H_2O/\text{lb udara kering}$$

- a. Kesetimbangan materi untuk arus air : misalkan $W = \text{lb } H_2O$ yang masuk menara dalam arus air/lb udara kering. Maka
- $W - 0,0199 = \text{lb } H_2O$ yang meninggalkan menara dalam arus air/lb udara kering

- b. Keseimbangan energi (keseimbangan entalpi) disekeliling proses keseluruhan:

Udara dan air dalam udara masuk :

$$\frac{29,93 \text{ Btu}}{\text{lb udara kering}} \times 6,00 \cdot 10^5 \text{ lb udara kering}$$

Arus air masuk :

$$\frac{88 \text{ Btu}}{\text{lb H}_2\text{O}} \times \frac{W \text{ lb H}_2\text{O}}{\text{lb udara kering}} \times 6,00 \cdot 10^5 \text{ lb udara kering}$$

Udara dan air dalam udara yang pergi :

$$\frac{55,83 \text{ Btu}}{\text{lb udara kering}} \times 6,00 \cdot 10^5 \text{ lb udara kering}$$

Arus air masuk :

$$\frac{88 \text{ Btu}}{\text{lb H}_2\text{O}} \times \frac{W \text{ lb H}_2\text{O}}{\text{lb udara kering}} \times 6,00 \cdot 10^5 \text{ lb udara kering}$$

$$29,93 + 88W = 55,83 + 58(W - 0,0199)$$

$$W = 0,825 \text{ lb H}_2\text{O}/\text{lb udara kering}$$

$$W - 0,0199 = 0,805 \text{ lb H}_2\text{O}/\text{lb udara kering}$$

Total air menara yang tertinggal adalah

$$\left(\frac{0,805 \text{ lb H}_2\text{O}}{\text{lb udara kering}} \right) \frac{6,00 \times 10^5 \text{ lb udara kering}}{\text{hr}} = 4,83 \times 10^5 \text{ lb/hr}$$

C. LATIHAN SOAL / TUGAS

1. Udara musim gugur di padang pasir Amerika barat daya pada siang hari biasanya kalor sedang dan kering. Jika suhu bola kering 27°C dan suhu bola basah 17°C diukur untuk udara pada siang hari :
 - a. Berapa titik embunnya?
 - b. Berapa persen kelembapannya?
 - c. Berapa persen kelembapan relatifnya?
 - d. Berapa titik embun dari udara awal?
2. Pasokan udara untuk sebuah pengeringan mempunyai suhu bola kering 32°C dan suhu bola basah $25,5^{\circ}\text{C}$. Udara itu dikalorkan sampai 90°C oleh kumparan dan ditiupkan kedalam pengering tersebut. Dalam pengering itu, udara mendingin sepanjang garis pendinginan adiabatik selama udara tersebut menyerap air dari materi yang didehidrasi dan meninggalkan pengering tersebut dalam keadaan jenuh sepenuhnya.

D. DAFTAR PUSTAKA

- Distantina S. 2001. Diktat Neraca Massa.
- Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.
- Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.

DAFTAR PUSTAKA

- Distantina S. 2001. Diktat Pendahuluan Neraca Massa.
- Eva, Bayu, Sisil. 2003. Diktat Neraca Massa dan Energi.
- Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.
- Muhidin, A., Faruq, U. A., & Aden, A. (2018). Booklet RPS & Modul: Manual dan Prosedur Penyusunan dan Penerbitan Modul Kuliah Universitas Pamulang.

GLOSSARIUM

Kalor lempertemuan (*humid heat*) ialah kapasitas campuran udara- uap air yang dinyatakan pada *basis 1 lb atau 1 kg udara sangat kering*.

Suhu bola basah (*wet bulb temperature*) (T_{DB}) ialah suhu ini berhubungan dengan penguapan air (atau cairan lain, jika perhatia kita bukan dengan kelembapan tetapi dengan kejenuhan) dari sekitar bola (*bulb*) thermometer merkuri biasa.

Suhu bola kering (*dry bulb temperature*) (T_{DB}) ialah suhu biasa yang sudah selalu Anda gunakan untuk gas dalam $^{\circ}\text{F}$ atau $^{\circ}\text{C}$ (atau $^{\circ}\text{R}$ atau K).

Volume lembap (*humid volume*) ialah volume 1 lb atau kg udara kering plus uap air dalam udara.

RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS)

Program Studi	: S-1 Teknik Kimia	Mata Kuliah/Kode	: Azas Teknik Kimia 2 / TKM0242
Prasyarat	: Azas Teknik Kimia 1	Sks	: 2 Sks
Semester	: 3	Kurikulum	: KKNi
Deskripsi Mata Kuliah	: Mata kuliah ini adalah mata kuliah wajib S-1 Teknik Kimia membahas tentang neraca massa dengan aliran kompleks seperti <i>recycle</i> , <i>bypass</i> , <i>purging</i> , konsep neraca energi, perhitungan neraca energi, perhitungan perubahan entalpi, proses reversibel, kalor pelarutan serta grafik kelembapan dan penggunaannya.		
		Capaian Pembelajaran	: Setelah menyelesaikan mata kuliah ini mahasiswa mampu menghitung neraca massa dengan aliran kompleks dan neraca energi secara tepat berdasarkan hukum kekekalan massa dan energi.

Penyusun : 1. Budhi Indrawijaya, S.T, M.Si (Ketua)
 2. Ir. Suwoto, M.T (Anggota 1)
 3. Dr. Ir. Ahmad Wibisana, M.T (Anggota 2)

PERTEMUAN KE-	KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN	BAHAN KAJIAN (MATERI AJAR)	METODE PEMBELAJARAN	PENGALAMAN BELAJAR MAHASISWA	KRITERIA PENILAIAN	BOBOT NILAI
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	Mampu menggambar diagram alir, menjelaskan tujuan dan menghitung neraca massa yang melibatkan aliran kompleks seperti daur ulang, <i>bypass</i> , dan pembersihan.	Aliran <i>Recycle</i> , <i>Bypass</i> dan <i>Purging</i>	Diskusi dan Simulasi	Menggambar diagram alir dan menghitung neraca massa aliran kompleks	Ketepatan dalam menggambar sesuai urutan dan menghitung secara tepat.	7%

PERTEMUAN KE-	KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN	BAHAN KAJIAN (MATERI AJAR)	METODE PEMBELAJARAN	PENGALAMAN BELAJAR MAHASISWA	KRITERIA PENILAIAN	BOBOT NILAI
2	Mampu menulis hukum gas ideal, dan mendefinisikan semua variabel dan parameternya dan dimensi yang terkait ; Menghitung nilai dan satuan dari konstanta gas ideal R dalam kumpulan satuan mana pun dari kondisi standar ; Mengubah volume gas menjadi mol (dan massa), dan sebaliknya ; Memecahkan keseimbangan materi yang melibatkan gas-gas.	Gas, uap, cairan dan padatan	Penjelasan Diskusi Kelas	Latihan 1	Ketepatan dalam memberikan jawaban	7%
3	Mampu Mendefinisikan gas jenuh ; Menghitung tekanan parsial dari komponen-komponen gas jenuh ideal dengan diberikan kombinasi dari suhu, tekanan, volume dan/atau jumlah mol yang ada, atau menghitung jumlah mol uap ; Menentukan suhu pengembunan (titik embun) uap dalam suatu gas jenuh dengan diberikan tekanan, volume, dan/atau jumlah mol.	Kejenuhan (Saturation)	Penjelasan Diskusi Kelas	Latihan 2	Ketepatan dalam memberikan jawaban	7%
4	Mampu Membedakan antara energi potensial, kinetik, dan internal ; Mengubah energi dalam satu kumpulan satuan menjadi kumpulan yang lain.	Neraca Energi (Konsep dan Satuan)	Penjelasan Diskusi Kelas	Latihan 3	Ketepatan dalam memberikan jawaban	7%

PERTEMUAN KE-	KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN	BAHAN KAJIAN (MATERI AJAR)	METODE PEMBELAJARAN	PENGALAMAN BELAJAR MAHASISWA	KRITERIA PENILAIAN	BOBOT NILAI
5	Mampu Menulis kesetimbangan energi umum dalam kata-kata dan symbol untuk sistem terbuka dan tertutup ; Menerapkan kesetimbangan energi umum untuk memecahkan masalah khusus.	Kesetimbangan Energi Umum	Penjelasan Diskusi Kelas	Latihan 4	Ketepatan dalam memberikan jawaban	8%
6	Mampu Menghitung perubahan entalpi (dan energy internal) dari persamaan kapasitas kalor, grafik dan gambar, tabel dan database computer dengan diberikan keadaan materi awal dan akhir ; Mengetahui dengan pasti keadaan referensi untuk nilai entalpi dalam sumber data.	Perhitungan perubahan entalpi	Penjelasan Diskusi Kelas	Tugas 2	Ketepatan dalam memberikan jawaban	8%
7	Mampu Menerapkan kesetimbangan energi (dan kesetimbangan materi) umum pada proses-proses yang melibatkan reaksi ; Menghitung suhu reaksi adiabatik ; Menghitung kalor pembentukan dari data percobaan untuk perubahan entalpi (termasuk perubahan fase) dari sebuah proses dengan terjadinya reaksi.	Kesetimbangan energi yang memperhitungkan reaksi kimia	Penjelasan Diskusi Kelas	Tugas 3	Ketepatan dalam memberikan jawaban	7%
UTS						

PERTEMUAN KE-	KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN	BAHAN KAJIAN (MATERI AJAR)	METODE PEMBELAJARAN	PENGALAMAN BELAJAR MAHASISWA	KRITERIA PENILAIAN	BOBOT NILAI
8	Mampu Mendefinisikan proses reversibel ; Mendefinisikan suatu proses sebagai proses reversibel atau ireversibel dengan memberikan deskripsi proses tersebut ; Mendefinisikan efisiensi dan menerapkan konsepnya untuk menghitung kerja proses ireversibel.	Proses Reversibel	Penjelasan Diskusi Kelas	Latihan 5	Ketepatan dalam memberikan jawaban	7%
9	Mampu menulis kesetimbangan energi mekanis keadaan tunak untuk suatu sistem terbuka dan menerapkannya pada suatu masalah.	Kesetimbangan energi mekanis	Penjelasan Diskusi Kelas	Latihan 6	Ketepatan dalam memberikan jawaban	7%
10	Mampu Membedakan antara larutan ideal dan larutan real ; Menghitung kalor pencampuran atau kalor pemisahan pada kondisi standar dengan diberikannya mol materi-materi yang membentuk campuran tersebut ; Menghitung integral kalor pelarutan standar.	Kalor pelarutan dan pencampuran	Penjelasan Diskusi Kelas	Latihan 7	Ketepatan dalam memberikan jawaban	7%
11	Mampu Mengidentifikasi nama dan jumlah variabel dalam arus yang memasuki dan meninggalkan suatu unit pemrosesan dan variabel yang berhubungan dengan unit itu sendiri; Menentukan jumlah persamaan independen untuk tiap unit pemrosesan;	Analisis derajat bebas dalam proses keadaan tunak	Penjelasan Diskusi Kelas	Latihan 8	Ketepatan dalam memberikan jawaban	7%

PERTEMUAN KE-	KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN	BAHAN KAJIAN (MATERI AJAR)	METODE PEMBELAJARAN	PENGALAMAN BELAJAR MAHASISWA	KRITERIA PENILAIAN	BOBOT NILAI
	Menghitung jumlah derajat bebas.					
12	Mampu Mengerti perbedaan antara flowsheeting berdasar persamaan dan berdasar modul; Menguraikan bagaimana kesetimbangan materi dan energi dikerjakan baik dalam kode flowsheeting berdasar persamaan maupun modul.	Memecahkan kesetimbangan materi dan energi menggunakan kode <i>flowsheeting</i>	Penjelasan Diskusi Kelas	Latihan 9	Ketepatan dalam memberikan jawaban	7%
13	Mampu Menulis kesetimbangan materi dan energi keadaan tidak tunak makroskopik dalam kata-kata dan simbol; Mengerti masalah yang dinyatakan dalam kata-kata dan menterjemahkannya ke dalam persamaan-persamaan diferensial; Menyelesaikan persamaan diferensial kesetimbangan materi dan energi biasa yang sederhana dengan diberikannya kondisi awal.	Kesetimbangan materi dan energi keadaan tidak tunak	Penjelasan Diskusi Kelas	Latihan 10	Ketepatan dalam memberikan jawaban	7%
14.	Mampu Mendefinisikan kelembapan, kalor lembab, volume lembab, suhu bola kering, suhu bola basah, grafik kelembaban, volume basah dan garis pendingin adiabatik; Menggunakan grafik kelembaban untuk menentukan sifat-sifat udara basah, dan untuk	Grafik kelembaban dan penggunaannya	Penjelasan Diskusi Kelas	Latihan 11	Ketepatan dalam memberikan jawaban	7%

PERTEMUAN KE-	KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN	BAHAN KAJIAN (MATERI AJAR)	METODE PEMBELAJARAN	PENGALAMAN BELAJAR MAHASISWA	KRITERIA PENILAIAN	BOBOT NILAI
	menghitung perubahan entalpi dan memecahkan masalah pemanasan dan pendinginan yang melibatkan udara basah.					
UAS						

Referensi:

1. American National Metric Council. 1977. *Metric Guide for Educational Materials*. Washington DC: ANMC.
2. Bhatt, B.I., dan S.M. Vora. 1976. *Stoichiometry*, edisi kedua. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
3. Clausen, C.A., dan G. Mattson. 1979. *Principles of Industrial Chemistry*. New York: Wiley.
4. Distantina S. 2001. Diktat Pendahuluan Neraca Massa.
5. Eva, Bayu, Sisil. 2003. *Diktat Neraca Massa dan Energi*.
6. Felder, R.M., dan R.W. Rousseau. 1986. *Elementary Principles of Chemical Processes*. Edisi kedua, New York: Wiley.
7. Himmelblau, D. 1996. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th edition, Prentice-Hall.
8. Husain, A. 1986. *Chemical Process Simulation*. New Delhi: Halstead (Wiley).
9. Horvath, A.D. 1986. *Conversion Tables of Units in Science and Engineering*. New York: Elsevier.
10. Massey, B.S. 1986. *Measures in Science and Engineering*. New York: Halsted Press.
11. Reklaitis, G.V. 1983. *Introduction to Material and Energy Balances*. New York: Wiley.

Ketua Program Studi Teknik Kimia

Tangerang Selatan, 13 Januari 2018

Ketua Tim Teaching Mata Kuliah Azas Teknik Kimia 2

Ir. Wiwik Indrawati, M. Pd

NIDN. 0429036203

Budhi Indrawijaya, S.T., M.Si

NIDN. 0426057801