

Prinsip Dasar Perpindahan Massa dalam OTK (UO)



— BEBERAPA DEFINISI DAN PENGERTIAN —

Setijo Bismo

PerMas – 2015

DEFINISI DAN PENGETAHUAN TENTANG

Perpindahan Massa dalam Operasi Teknik Kimia

Apa itu “Operasi Teknik Kimia” (*Unit Operation*)?

Suatu proses tertentu yang khas dengannya seorang insinyur teknik kimia dapat bekerja untuk memproduksi dan atau mengkonversi suatu bahan (baku) dengan nilai tertentu menjadi bahan (jadi) atau produk yang diinginkan dengan nilai tambah yang lebih tinggi dan atau lebih bernilai dari bahan (baku) sebelumnya.

Contoh: produksi bensin dari minyak mentah, produksi LNG dari gas bumi, produksi ammonia dari gas alam dan udara, produksi urea dari ammonia, dll.

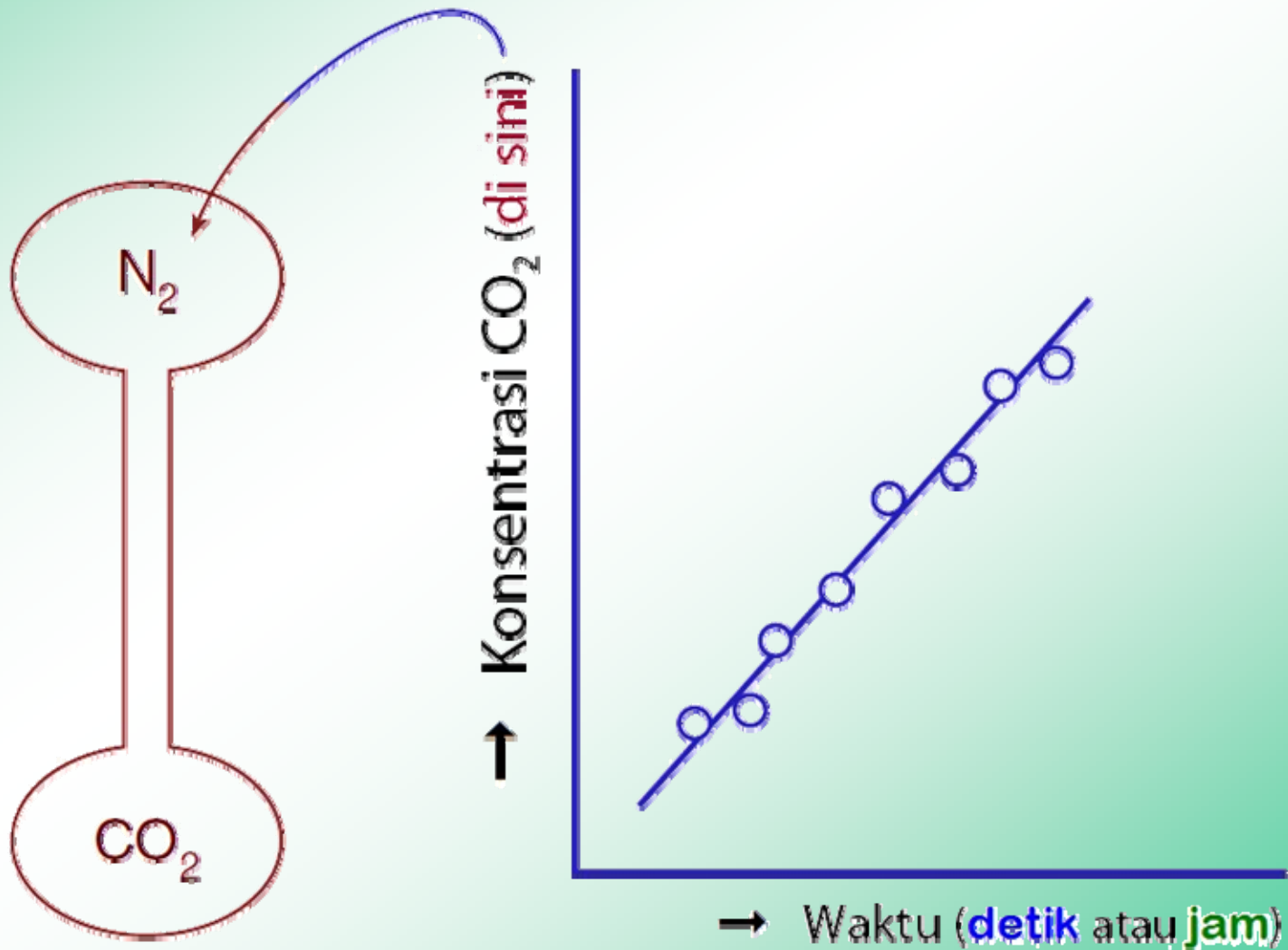
Apa beda “Perpindahan Massa” dan “Operasi Teknik Kimia”?

Keduanya sama, karena keduanya selalu melibatkan “sekuens” perubahan-perubahan fisika (*physical change*) dan atau diikuti dengan reaksi kimia (*chemical reaction*) bersamanya.

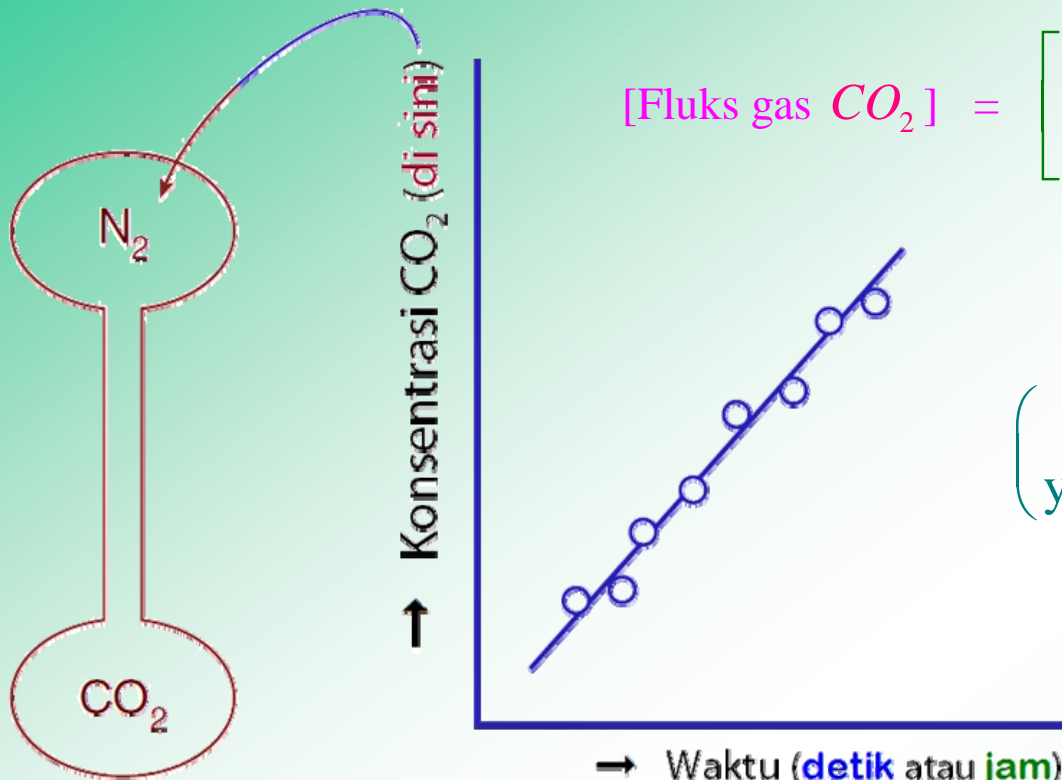
Contoh: dalam suatu OTK selalu melibatkan “perpindahan massa” (dan “reaksi kimia”), yaitu perubahan dan atau perpindahan secara fisika (dan kimiawi) dimulai dari masukan sampai keluarannya.

MODEL PENDEKATAN BERDASARKAN SIFAT FISIKA:

Pendekatan Perpindahan Massa secara Difusi



Persamaan Perpindahan Massa Difusional:



$$[\text{Fluks gas } CO_2] = \left[\frac{(\text{jumlah gas } CO_2 \text{ dipindahkan})}{(\text{waktu}) \cdot (\text{luas permukaan perpindahan})} \right]$$

$$\left(\text{Massa } CO_2 \text{ yang dipindahkan} \right) \propto \left(\text{Luas permukaan perpindahan } CO_2 \right)$$

(Definisi umum yang mengabaikan pengaruh spesifik alat)

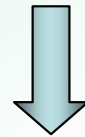
Jika, Fluks sebanding dengan konsentrasi:

$$[\text{Fluks gas } CO_2] = k \left(\begin{array}{c} \text{Beda konsentrasi} \\ CO_{2,awal} \text{ dan } CO_{2,aakhir} \end{array} \right)$$

k adalah Koefisien Perpindahan Massa

□ Fluks yang sebanding dengan konsentrasi:

$$[\text{Fluks gas } CO_2] = k \left(\begin{array}{c} \text{Beda konsentrasi} \\ CO_{2,awal} \text{ dan } CO_{2,aakhir} \end{array} \right)$$



□ Dapat dinyatakan sebagai fungsi dari panjang pipa kapiler (Hukum Fick):

$$\text{Fluks gas } CO_2 = \mathcal{D} \left(\frac{\text{Beda konsentrasi } CO_{2,awal} \text{ dan } CO_{2,aakhir}}{\text{panjang pipa kapiler}} \right)$$

\mathcal{D} adalah Koefisien Difusi

□ Persamaan terakhir analogi dengan Hukum Ohm:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Fluks Elektron} \\ \text{atau Densitas Arus} \end{array} \right) = \left(\frac{1}{\text{resistivitas}} \right) \cdot \left(\frac{\text{Beda POTENSIAL LISTRIK}}{\text{jarak}} \right)$$

← Kebalikan resistivitas analogi dari koefisien difusi \mathcal{D}

$$\text{Fluks gas } CO_2 = \mathcal{D} \left(\frac{\text{Beda konsentrasi } CO_{2,awal} \text{ dan } CO_{2,akhir}}{\text{panjang pipa kapiler}} \right)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{Fluks Elektron} \\ \text{atau Densitas Arus} \end{array} \right) = \left(\frac{1}{\text{resistivitas}} \right) \cdot \left(\frac{\text{Beda POTENSIAL LISTRIK}}{\text{jarak}} \right)$$

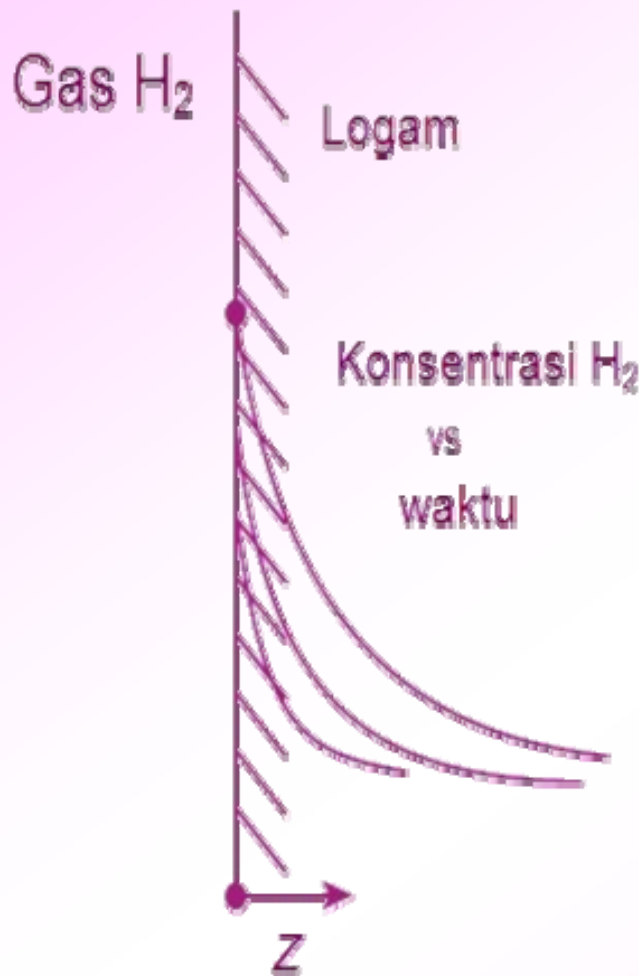
Kedua persamaan di atas adalah ANALOGI

Baik persamaan yang menggunakan Koefisien PERPINDAHAN MASSA ataupun Koefisien Difusi (D) tidak selalu dapat "berhasil" digunakan. Hal ini karena adanya "berbagai asumsi yang digunakan" dalam pengembangan kedua persamaan tersebut.

Sebagai contoh, FLUKS mungkin juga TIDAK SEBANDING dengan PERBEDAAN KONSENTRASI bila pipa kapilernya sangat tipis (halus) atau kedua gas mengalami reaksi. Demikian juga Hukum OHM, tidak selamanya dapat diterapkan untuk TEGANGAN SANGAT TINGGI.

Namun, kasus-kasus terakhir adalah PENGECUALIAN. Karena, dalam banyak hal, kedua persamaan difusi tersebut dapat diaplikasikan secara memadai.

Peristiwa Perpindahan: Difusi H₂ pada permukaan logam



Analisis sebagai "Perpindahan Massa":

$$\text{Fluks} = k \cdot \Delta(\text{konsentrasi})$$

k bukanlah konstanta, terutama karena bervariasi terhadap waktu, namun dianggap tetap terhadap jarak.

Analisis sebagai "Difusi":

$$\text{Fluks} = -\mathcal{D} \frac{\partial}{\partial z}(\text{konsentrasi})$$

\mathcal{D} suatu konstanta, variasi terhadap Waktu dan jarak dapat diprediksi.

Analisis Peristiwa Perpindahan: Model DIFUSI

Model difusi gas H₂ yang dijelaskan selama ini, memiliki asumsi sebagai berikut:

$$\left(\begin{array}{c} \text{fluks} \\ \text{hidrogen} \end{array} \right) = \mathcal{D} \cdot \frac{\left(\begin{array}{c} \text{konsentrasi} \\ \text{hidrogen pada } z=0 \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{konsentrasi} \\ \text{hidrogen pada } z=\ell \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{c} \text{ketebalan pada } z=0 \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{ketebalan pada } z=0 \end{array} \right)}$$

atau, secara simbolik dapat juga dituliskan:

$$(j_1) = \mathcal{D} \cdot \frac{(c_1)_{z=0} - (c_1)_{z=\ell}}{(\ell) - (0)}$$

indeks angka "1" menyatakan spesi yang berdifusi, tebal ℓ adalah jarak lintasan difusi

Jika tebal ℓ merupakan jarak / lintasan difusi yang sangat tipis, maka :

$$(j_1) = \mathcal{D} \cdot \lim_{\ell \rightarrow 0} \frac{c_1|_{z=z} - c_1|_{z=z+\ell}}{z|_{z+\ell} - z|_z} = -\mathcal{D} \cdot \frac{dc_1}{dz}$$

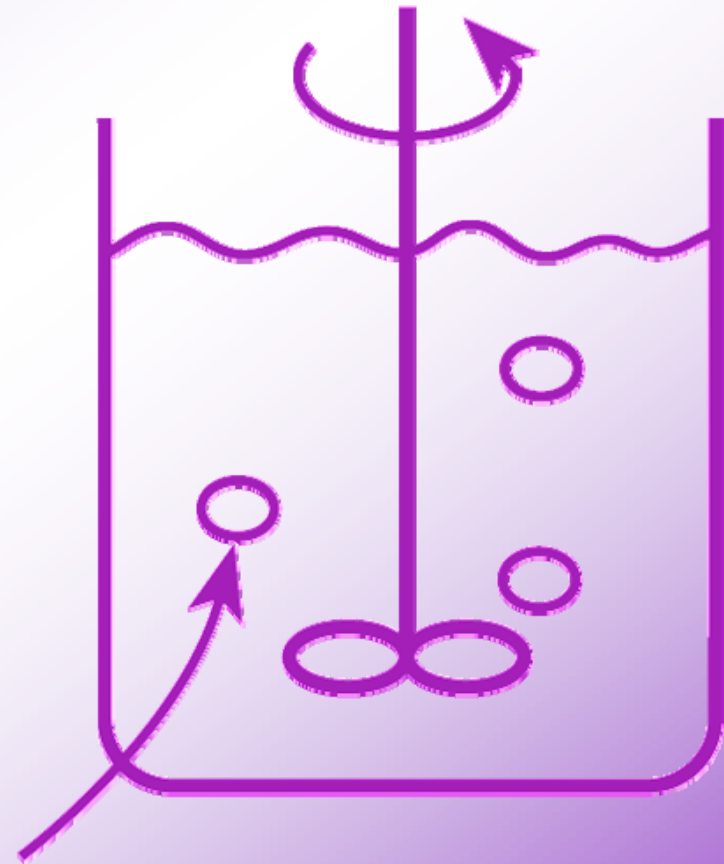
Analisis Peristiwa Perpindahan: Pelarutan Obat

Padatan OBAT dilarutkan dalam air menggunakan pengaduk sampai waktu tertentu

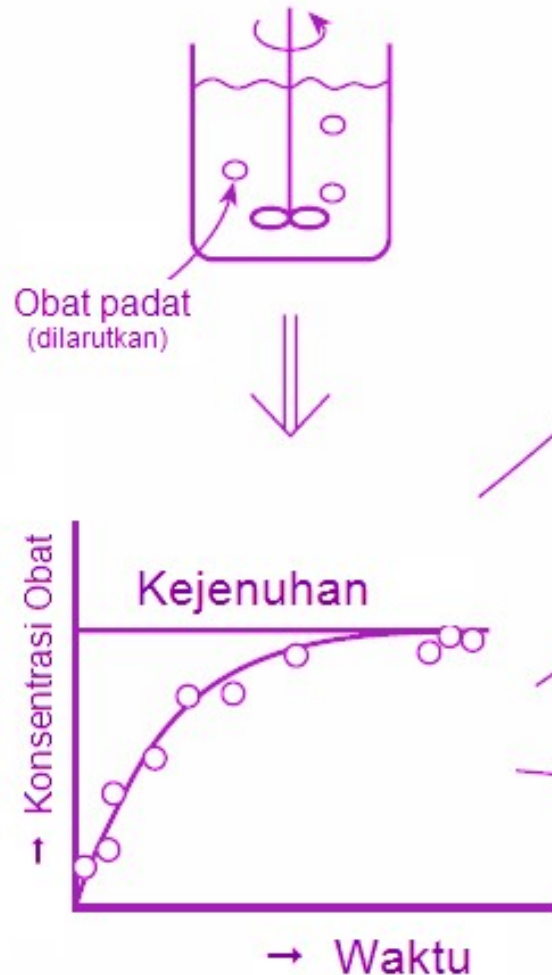
$$\left(\begin{array}{c} \text{akumulasi} \\ \text{OBAT} \\ \text{dalam larutan} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{laju total} \\ \text{pelarutan} \end{array} \right)$$

$$V \frac{dc_1}{dt} = A j_1 \\ = A k [c_1(\text{sat}) - c_1]$$

Obat padat
(dilarutkan)



Analisis Peristiwa Perpindahan: Model Pelarutan Obat



Analisis sebagai "Perpindahan Massa":

$$\frac{dc_1}{dt} = \kappa [c_1(\text{sat}) - c_1]$$

κ adalah konstanta laju reaksi, untuk reaksi "fiktif"

Analisis sebagai "Perpindahan Massa":

$$V \frac{dc_1}{dt} = kA [c_1(\text{sat}) - c_1]$$

k bervariasi terhadap pengadukan
Catatan: $kA/V = \kappa$

Analisis sebagai "Difusi":

$$V \frac{dc_1}{dt} = \frac{D}{l} A [c_1(\text{sat}) - c_1]$$

l bervariasi terhadap pengadukan dan terhadap D .
Catatan: $D/l = k$

Some Examples (#1)

#1. Ammonia, the major material for fertilizer, is made by reacting nitrogen and hydrogen under pressure. The product gas can be washed with water to dissolve the ammonia and separate it from other unreacted gases. How can you correlate the dissolution rate of ammonia during washing?

Solution:

The easiest way is to use mass transfer coefficients. If you use diffusion coefficients, you must somehow specify the distance across which diffusion occurs. This distance is unknown unless the detailed flows of gases and the water are known; they rarely are...(?!?!)

Some Examples (#2)

#2. Reactions in porous catalysts. Many industrial reactions use catalysts containing small amounts of noble metals dispersed in a porous inert material like silica. The reactions on such a catalyst are sometimes slower in large pellets than in small ones. This is because the reagents take longer to diffuse into the pellet than they do to react. How should you model this effect?

Solution:

You should use diffusion coefficients to describe the simultaneous diffusion and reaction in the pores in the catalyst. You should not use mass transfer coefficients because you cannot easily include the effect of reaction.

Some Examples (#3)

#3. Corrosion of marble. Industrial pollutants in urban areas like Venice cause significant corrosion of marble statues. You want to study how these pollutants penetrate marble. Which diffusion model should you use?

Solution:

The model using diffusion coefficients is the only one that will allow you to predict pollutant concentration versus position in the marble. The model using mass transfer coefficients will only correlate how much pollutant enters the statue, not what happens to the pollutant.

Some Examples (#4)

#4. Protein size in solution. We are studying a variety of proteins that you hope to purify and use as food supplements. We have to characterize the size of the proteins in solution. How can we use diffusion to do this?

Solution:

Our aim is determining the molecular size of the protein molecules. We are not interested in the protein mass transfer except as a route to these molecular properties. As a result, we should measure the protein's diffusion coefficient, not its mass transfer coefficient. The protein's diffusion coefficient will turn out to be proportional to its radius in solution.

Some Examples (#5)

- #5. Facilitated transport across membranes Some membranes contain a mobile carrier, a reactive species that reacts with diffusing solutes, facilitating their transport across the membrane. Such membranes can be used to concentrate copper ions from industrial waste and to remove carbon dioxide from coal gas. Diffusion across these membranes does not vary linearly with the concentration difference across them. The diffusion can be highly selective, but it is often easily poisoned. Should this diffusion be described with mass transfer coefficients or with diffusion coefficients?

Solution:

This system includes not only diffusion but also chemical reaction. Diffusion and reaction couple in a nonlinear way to give the unusual behavior observed. Understanding such behavior will certainly require the more fundamental model of diffusion coefficients.

Some Examples (#6)

#6. **Flavor retention.** When food products are spray-dried, they lose a lot of flavor. However, they lose less than would be expected on the basis of the relative vapor pressures of water and the flavor compounds. The reason apparently is that the drying food often forms a tight gellike skin across which diffusion of the flavor compounds is inhibited. What diffusion model should you use to study this effect?

Solution:

Because spray-drying is a complex, industrial-scale process, it is usually modeled using mass transfer coefficients. However, in this case you are interested in the inhibition of diffusion. Such inhibition will involve the sizes of pores in the food and of molecules of the flavor compounds. Thus you should use the more basic diffusion model, which includes these molecular factors

Some Examples (#7)

- #7. Scale-up of wet scrubbers You want to use a wet scrubber to remove sulfur oxides from the flue gas of a large power plant. A wet scrubber is essentially a large piece of pipe set on its end and filled with inert ceramic material. You pump the flue gas up from the bottom of the pipe and pour a lime slurry down from the top. In the scrubber, there are various reactions, such as:



The lime reacts with the sulfur oxides to make an insoluble precipitate, which is discarded. You have been studying a small unit and want to use these results to predict the behavior of a larger unit. Such an increase in size is called a scale-up. Should you make these predictions using a model based on diffusion or mass transfer coefficients?

Solution:

This situation is complex because of the chemical reactions and the irregular flows within the scrubber. Your first try at correlating your data should be a model based on mass transfer coefficients. Should these correlations prove unreliable, you may be forced to use the more difficult diffusion model.

Gas Treating in Many Industrial Process

Process	Gases to be removed	Common targets (% Acid gas)
Ammonia manufacture	CO ₂ , NH ₃ , H ₂ S	< 10 ppm CO ₂
Coal gas:		
High Btu gas	CO ₂ , H ₂ S, COS	500 ppm CO ₂ ; 0.01 ppm H ₂ S
Low Btu gas	H ₂ S	100 ppm H ₂ S
Ethylene manufacture	H ₂ S, CO ₂	< 1 ppm H ₂ S, 1 ppm CO ₂
Flue gas desulfurization	SO ₂	90% removal
Hydrogen manufacture	CO ₂	< 0.1% CO ₂
Natural gas upgrading	H ₂ S, CO ₂ , N ₂ , RSH	< 4 ppm H ₂ S; < 1% CO ₂
Oil desulfurization	H ₂ S	100 ppm H ₂ S
Refinery desulfurization	CO ₂ , H ₂ S, COS	10 ppm H ₂ S
Syn gas for chemicals feedstock	CO ₂ , H ₂ S	< 500 ppm CO ₂ ; < 0.01 ppm H ₂ S

Cairan (Pelarut) yang digunakan: ABSORBEN

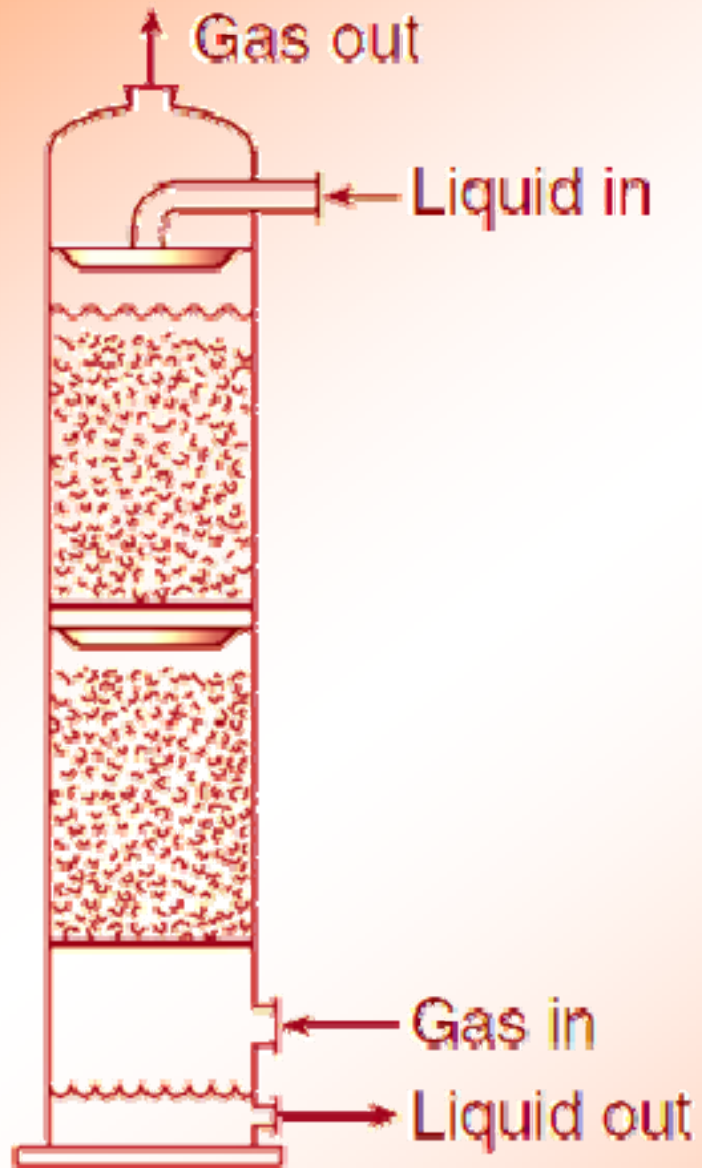
Syarat:

1. Tidak mudah menguap
2. Tidak korosif
3. Tidak beracun
4. Tidak eksplosif
5. Tidak pekat → afinitas rendah
6. Tidak reaktif permanen → kesetimbangan

Perlu diingat:

1. Jika komponen gas yang diabsorpsi (absorptif/absorbat) bersifat ASAM (CO_2 , H_2S , SO_x , NO_x , dlsb), maka dipilih pelarut (ABSORBEN) yang bersifat BASA ($\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$, MEA, DEA, MDEA, dll).
2. Jika sebaliknya, absorbat bersifat BASA (NH_3), maka dipilih pelarut ASAM (HCl, Asam Sitrat, dll).

Peraltan Absorpsi: Menara ABSORBER



Packing (Isian) Menara



Raschig ring



Berl saddle



Intalox saddle



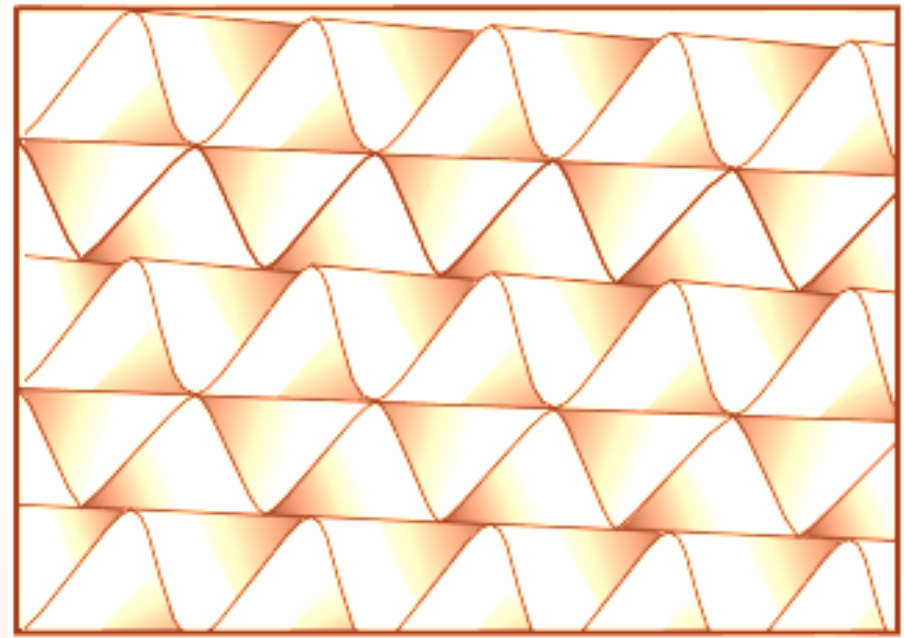
Pall ring



Hy-Pak ring



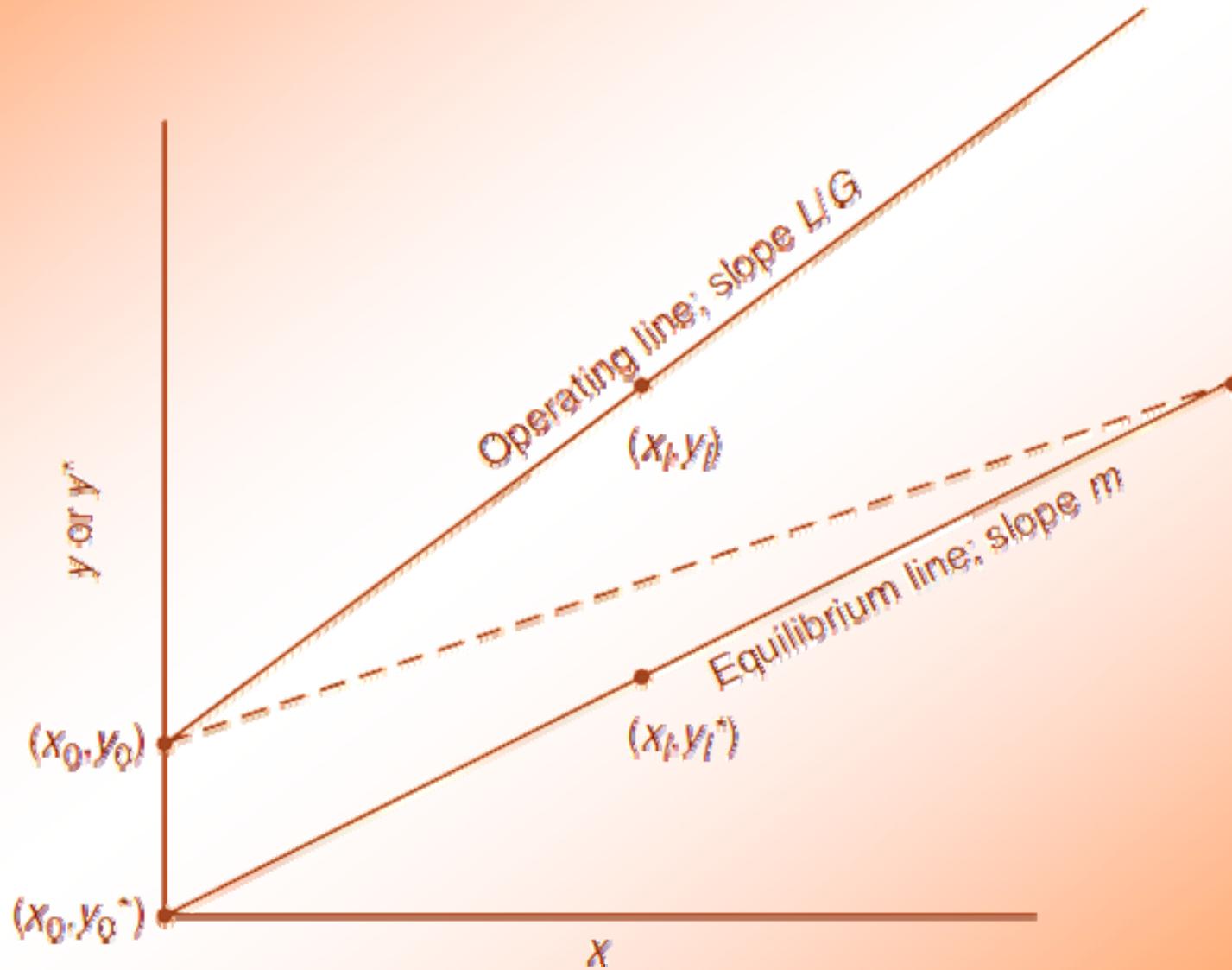
Nutter ring



Terstruktur

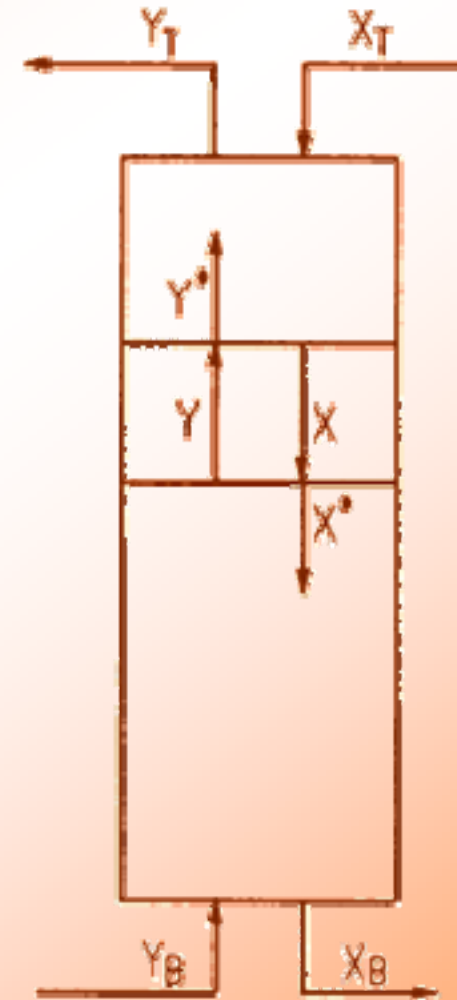
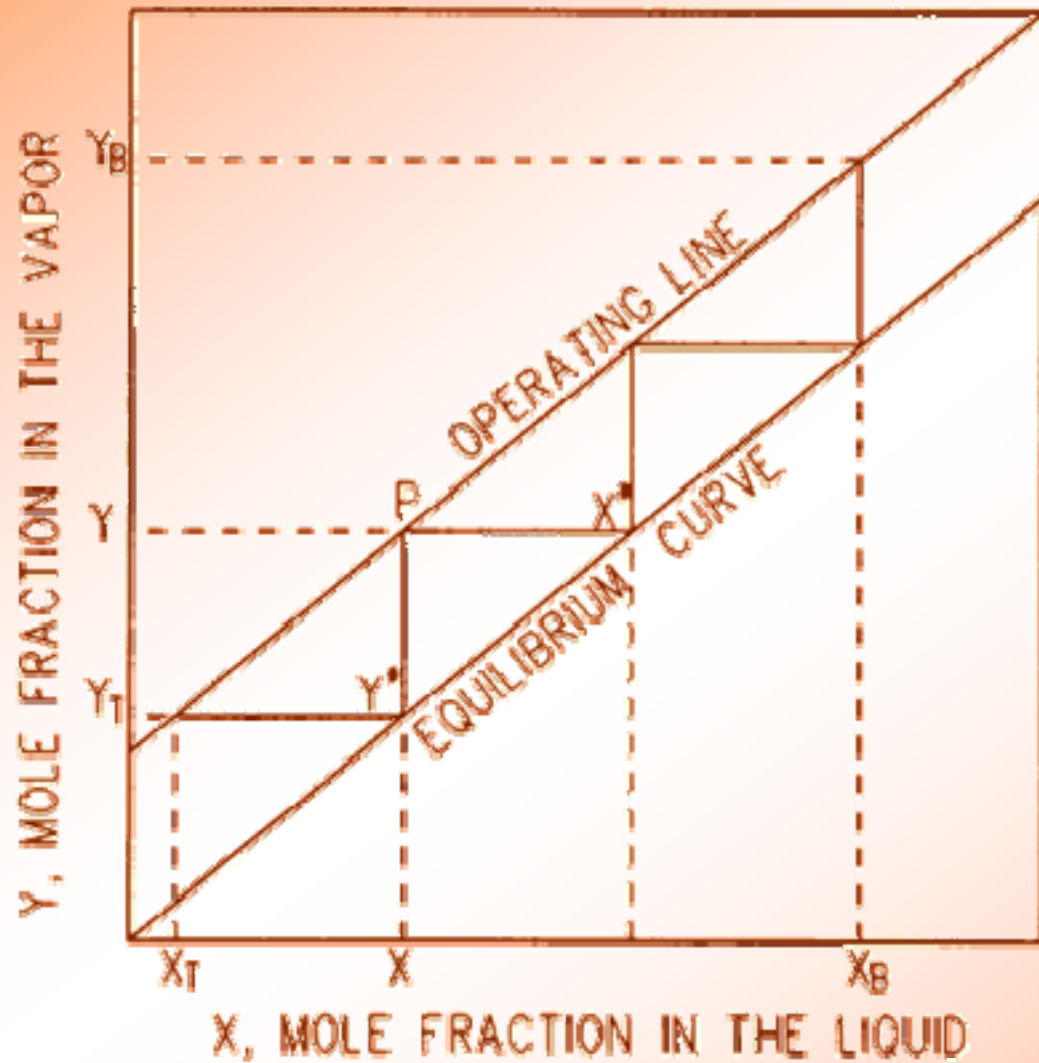
Konvensional

REPRESENTASI: Solusi dengan Metode Grafis



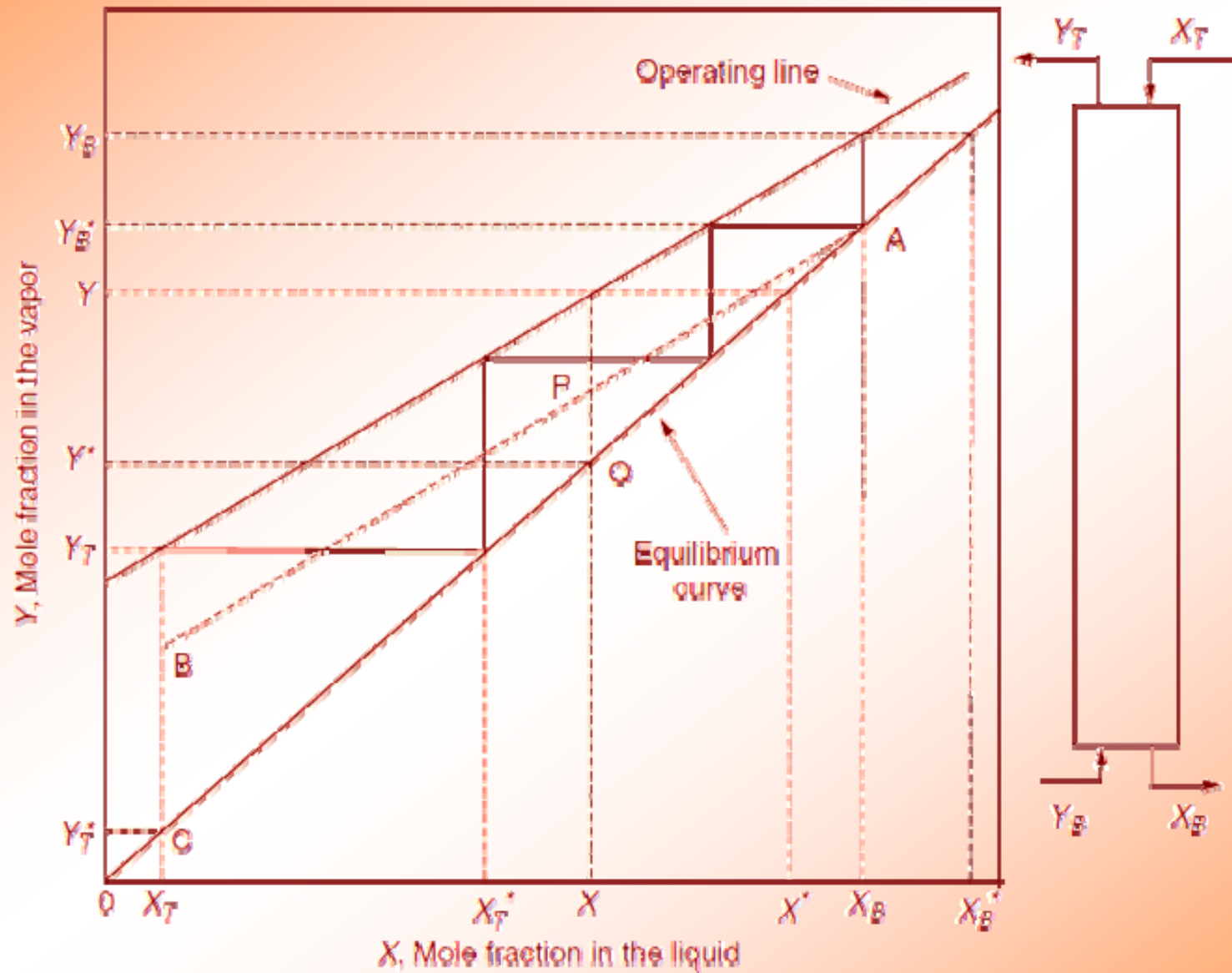
$(y - y^*)$, the driving force for absorption

REPRESENTASI: Operasi Absorpsi Sederhana



$(y - y^*)$, the driving force for absorption

REPRESENTASI: Kurva Absorpsi untuk Larutan Encer



$(y - y^*)$, the driving force for absorption

TUJUAN/ARGET: Luaran Operasi Absorpsi dari kuliah ini?

1. Bagaimana dengan pemilihan atau penentuan “spesifikasi” pelarut (absorben)?
2. Bagaimana menghitung konsentrasi/fraksi gas dan cairan dalam operasi absorpsi?
3. Bagaimana memilih operasi absorpsi: kondisi kesetimbangan atau hukum laju? ➔ Apakah **Hukum Henry** berlaku?
4. Bagaimana menghitung “Jumlah Tahap” dan atau “Jumlah Talam” dalam Kolom Absorpsi?
5. Bagaimana caranya untuk “Kolom Packing” (Kolom Isian)?
6. Bagaimana caranya untuk “Kolom Talam” (Tray Column)?
7. Bagaimana menentukan GEOMETRI menara ABSORPSI?
8. Apakah ada “analogi” antara ABSORPSI dan STRIPPING (Desorpsi)?



Klasifikasi/Pembagian:

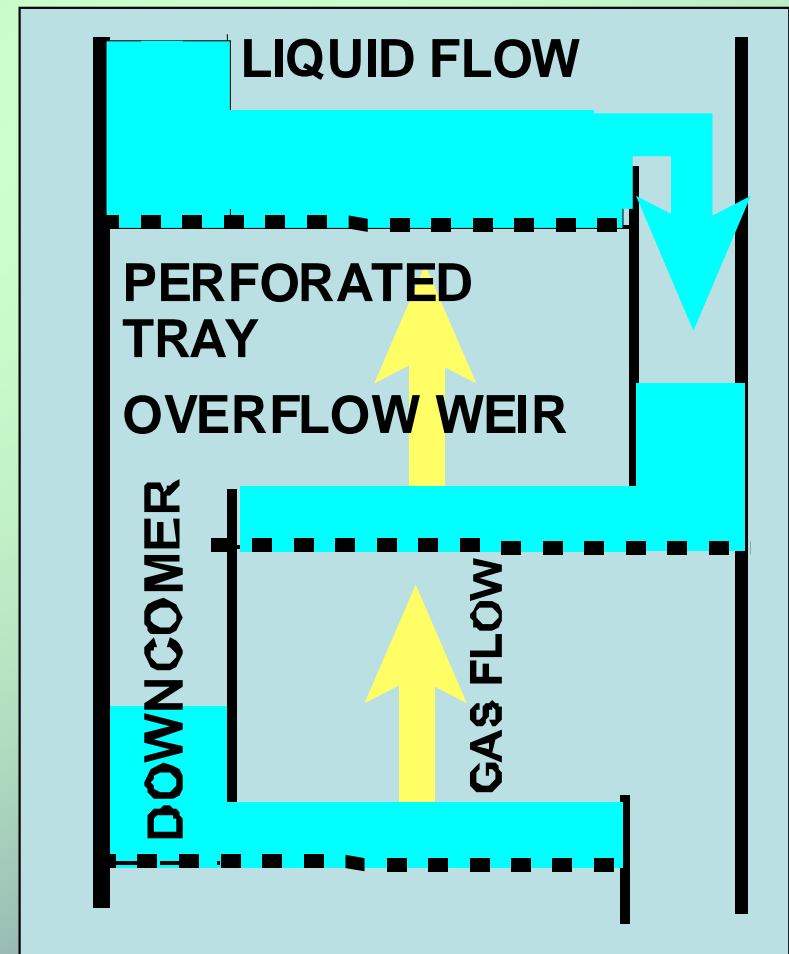
Jenis Kolom ABSORPSI

Beberapa Model Kolom Absorpsi

A. Kolom Talam (*Tray-type Plate Columns*)

- Pengontakan Gas (**Absorbat**) dan Cairan (**Absorben**) secara COUNTERCURRENT
- Pengontakan terjadi **dalam cairan (absorben)** di atas talam
 - Cairan mengalir “sejajar” atau PARALEL dengan talam
 - Gas mengalir tegak-lurus terhadap talam

Konfigurasi Kolom Talam:



Rancangan Talam (*Tray*)

A. Talam Berlubang (Sieve Tray, Perforated Tray)



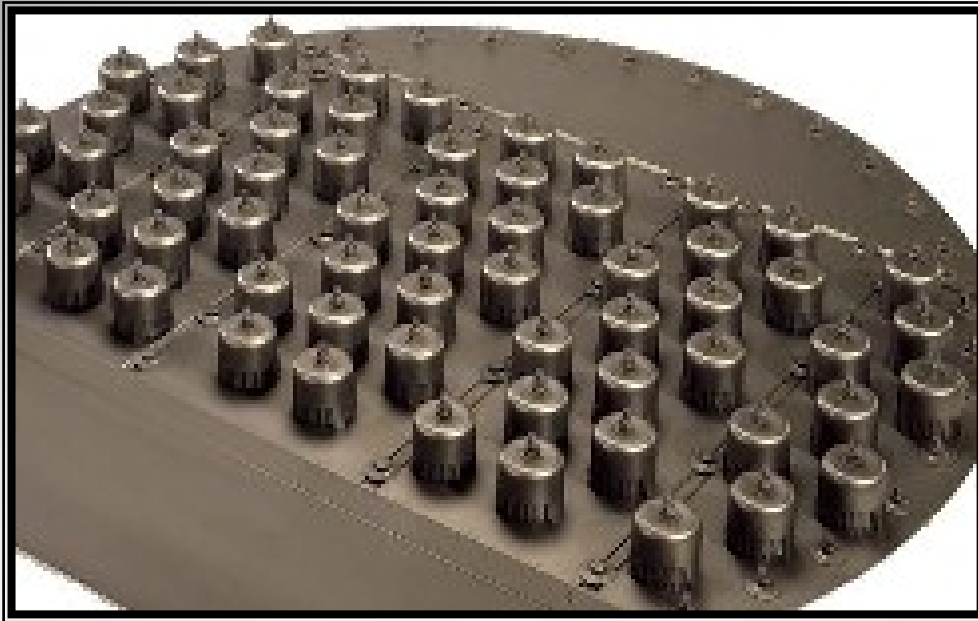
Perancangan Talam

B. Talam Katup (Valve Tray)



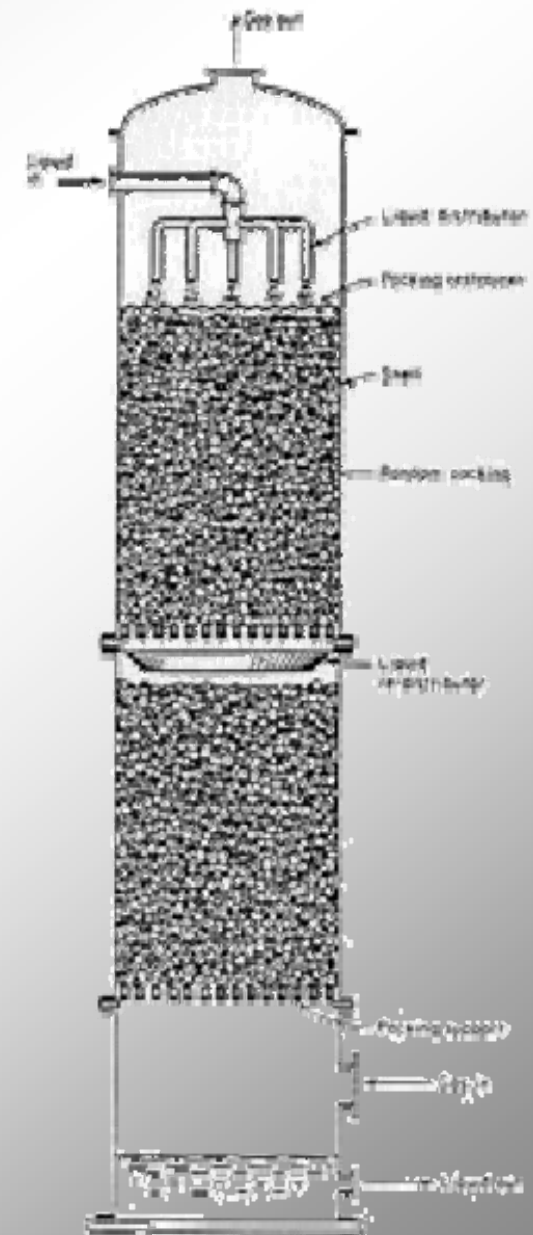
Perancangan Talam

C. Talam "Bubble Cap" (Bubble Cap Tray)



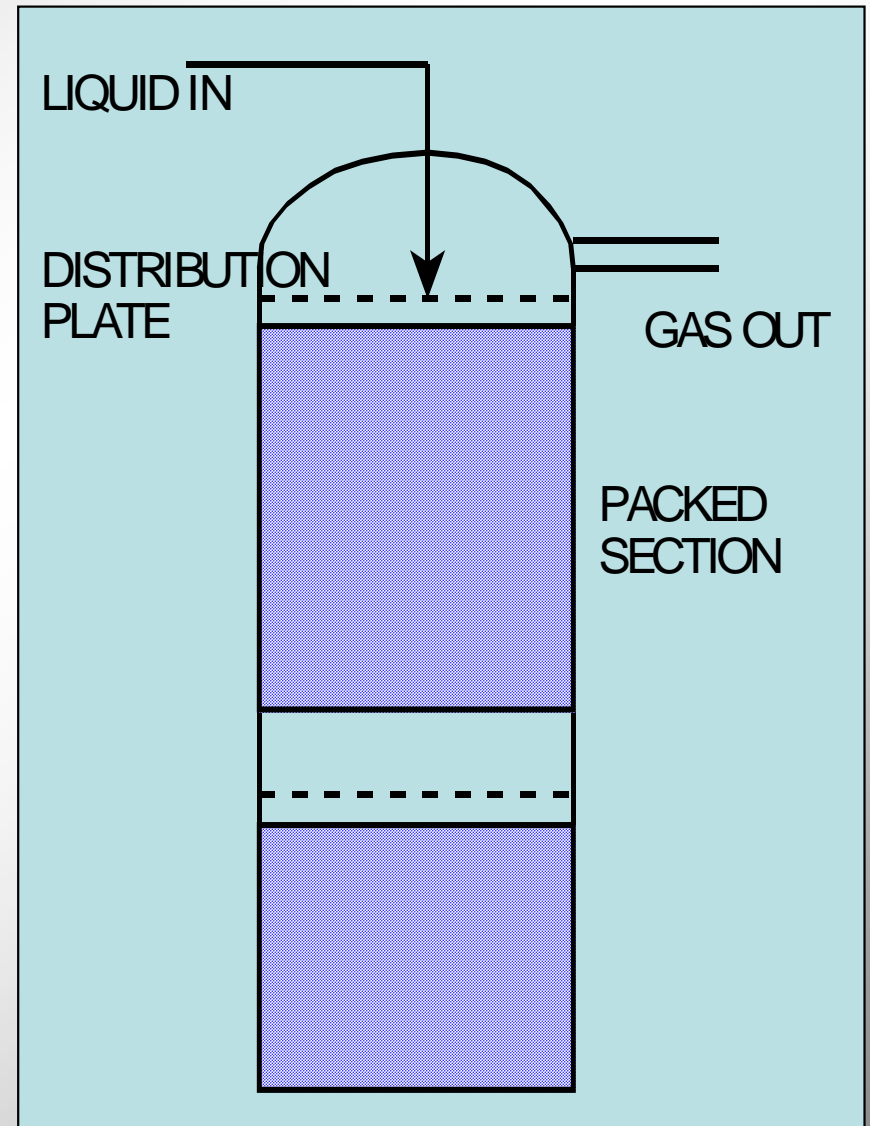
B. Kolom Isian (*Packed Columns*)

- Aliran COUNTERCURRENT antara GAS dan CAIRAN (Absorben)
- Pengontakan pada “antarmuka” (*interface*) CAIRAN/GAS pada PACKING
- CAIRAN mengalir pada permukaan PACKING dengan pola umum menuruni kolom
- GAS mengalir mengalir di “celah-celah” (ruang kosong) dalam UNGGUN ISIAN (*packing*) dengan pola aliran menaiki kolom
- Jenis PACKING:
 - Acak (*random*)
 - Terstruktur (*structured*)



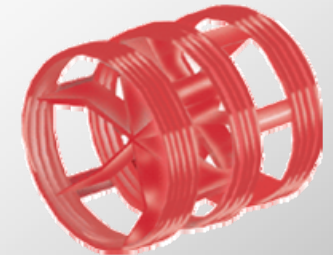
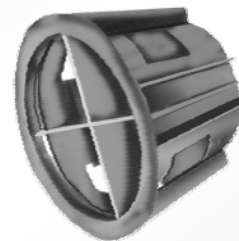
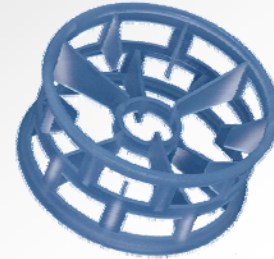
UNGGUN *Packing*

- Dipasang dalam formasi “penampang unggun”
- Zona (Pelat) Distribusi berada di antara 2 penampang unggun
- Aliran “relatif” menentukan HIDRODINAMIKA Kolom
- Kasus Pembatas:
 - Genangan (FLOODING)
 - Desisan (WEEPING)



Beberapa Rancangan *RANDOM PACKING*

- BENTUK:
 - RINGS
 - SADDLES
 - Lainnya
- MATERIAL:
 - LOGAM
 - KERAMIK
 - PLASTIK



SPESIFIKASI UNGGUN *Random PACKING*

- DIAMETER NOMINAL
- FRAKSI KOSONG (*void fraction*)
- BERAT RUAH (*bulk weight*)



Raschig Ring



FLEXIRING® Packing						High Performance		
Nominal Size		5/8	1	1 1/2	2	3 1/2	2	4
Void Fraction	%	87	92	91	93	95	93	96
Bulk Weight*	kg/m ³	95	71	70	60	43	60	36
	lb/ft ³	5.9	4.4	4.3	3.8	2.7	3.8	2.2

*for polypropylene with standard material thickness

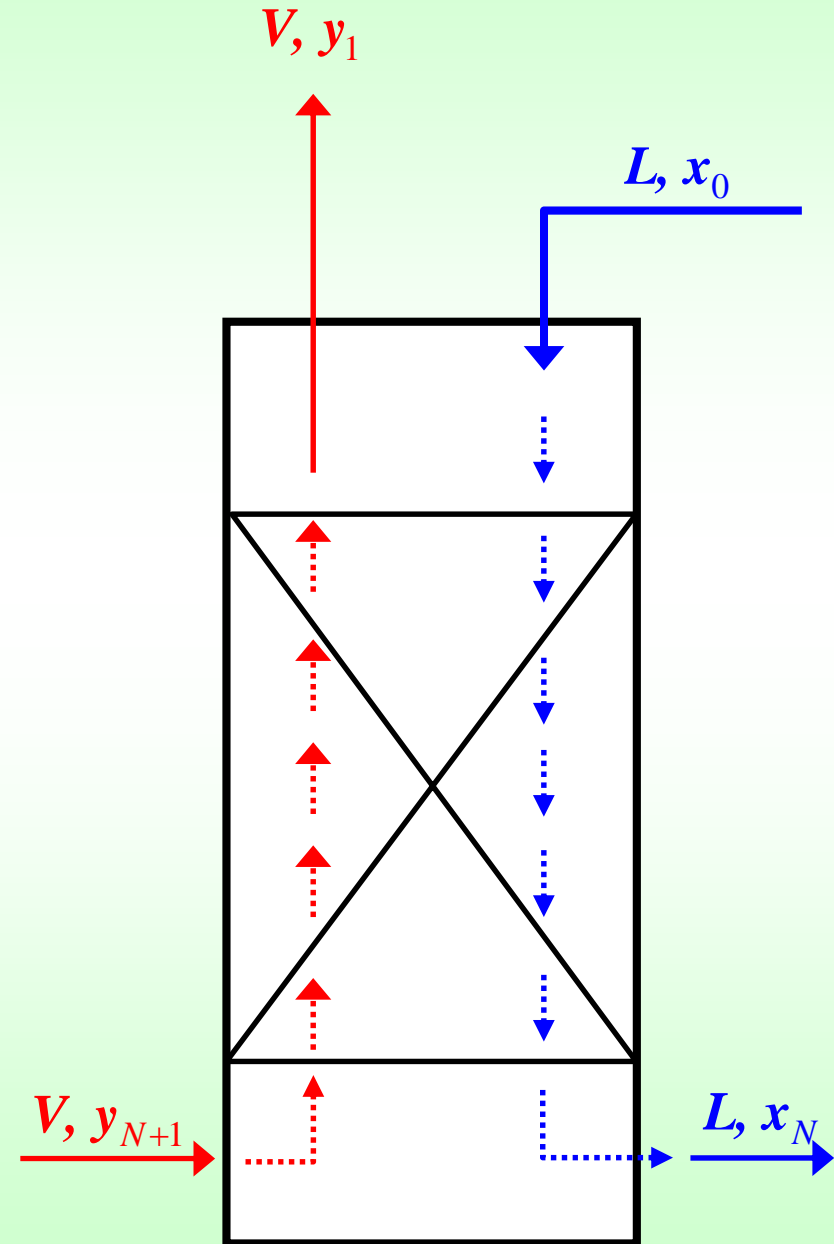
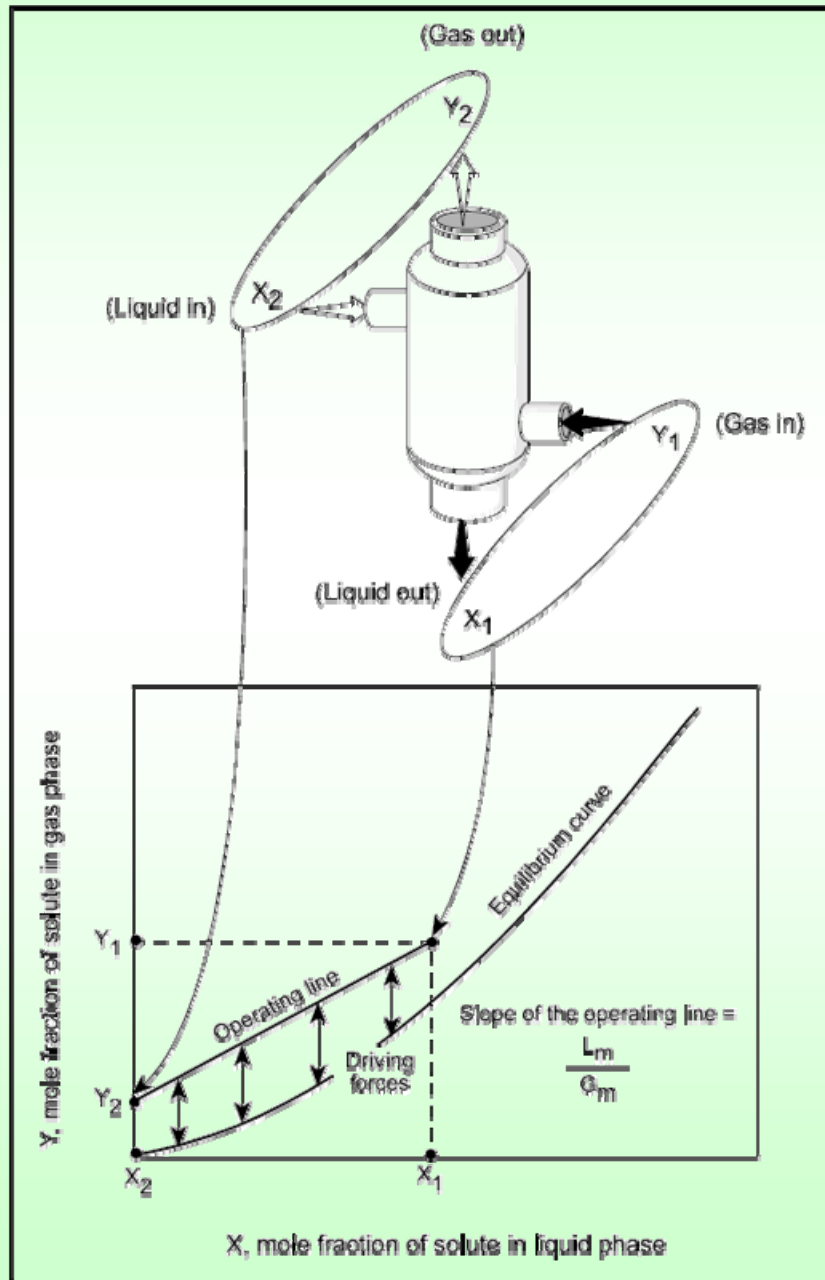


Contoh Soal #1: Keberlakuan Hukum Henry?

== (AKHIR KULIAH 2) ==

Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA.
DTK – FTUI
Selasa, 27 Oktober 2015

Skematisasi Operasi Absorpsi



Aplikasi dan Hitungan untuk Kolom Talam

CONTOH: Soal #1...

CONTOH: Soal #1

Pada tabel di bawah ini diberikan data kelarutan gas SO_2 dalam air murni pada suhu 303 K (30 °C) dan tekanan udara 101,3 kPa (760 mmHg atau setara dengan 760 Torr).

Tabel 1. Data kesetimbangan SO_2 dalam H_2O

C_{SO_2} (g SO_2 per 100 g H_2O)	P_{SO_2} (tekanan parsial SO_2)	y (fraksi mol SO_2 dalam gas)	x (fraksi mol SO_2 dalam cairan)
0,5	6 kPa (42 Torr)		
1,0	11,6 kPa (85 Torr)		
1,5	18,3 kPa (129 Torr)		
2,0	24,3 kPa (176 Torr)		
2,5	30,0 kPa (224 Torr)		
3,0	36,4 kPa (273 Torr)		

Dari sistem larutan $SO_2 - H_2O$ seperti di atas, maka:

- Hitunglah y dan x !
- Plot diagram kesetimbangan yang terbentuk !
- Tentukan atau perkirakan apakah Hukum Henry dapat berlaku !

CONTOH: Soal #1

Jawaban:

Sistematika jawaban soal ini diberikan dalam beberapa tahap (langkah) yang diharapkan dapat mempermudah para mahasiswa untuk mempelajari dan memahaminya.

Dalam tahapan 1 dan 2 di bawah ini, dilakukan konversi data untuk konsentrasi dari SO_2 dalam air (H_2O) dan tekanan parsial dari SO_2 dalam H_2O ke dalam fraksi molar.

Tahap 1: menghitung fraksi mole dari SO_2 dalam fasa gas, y , dengan cara membagi tekanan parsial gas SO_2 dengan tekanan total dari sistem.

$$y = \frac{P_{SO_2}}{P_T}$$
$$y = \frac{6 \text{ kPa}}{101,3 \text{ kPa}}$$
$$= 0,06$$

Harga-harga fraksi mole dari SO_2 dalam fasa gas (y) tersebut di atas kemudian akan disusun dalam suatu tabel, di halaman selanjutnya...

CONTOH: Soal #1

Tahap 2: menghitung fraksi mole dari absorbat SO_2 dalam fasa cair, x , dengan cara membagi jumlah mole SO_2 yang terlarut dalam larutan air (H_2O) dengan jumlah mole total dari cairan sistem.

$$x = \frac{\text{jumlah mole } SO_2 \text{ dalam larutan}}{\text{jumlah mole } SO_2 \text{ dalam larutan} + \text{jumlah mole } H_2O}$$

dalam hal ini:

$$\text{jumlah mole } SO_2 \text{ dalam larutan} = \frac{C_{SO_2}}{64 \text{ g } SO_2} \text{ per } 100 \text{ g } H_2O$$

$$\text{jumlah mole } H_2O \text{ sebagai pelarut} = \frac{100 \text{ g } H_2O \text{ sebagai pelarut}}{18 \text{ g } H_2O \text{ per mole}}$$

maka

$$x = \frac{C_{SO_2}/64}{C_{SO_2}/64 + 5,55}$$

$$= \frac{0,5/64}{0,5/64 + 5,55}$$

$$= 0,0014$$

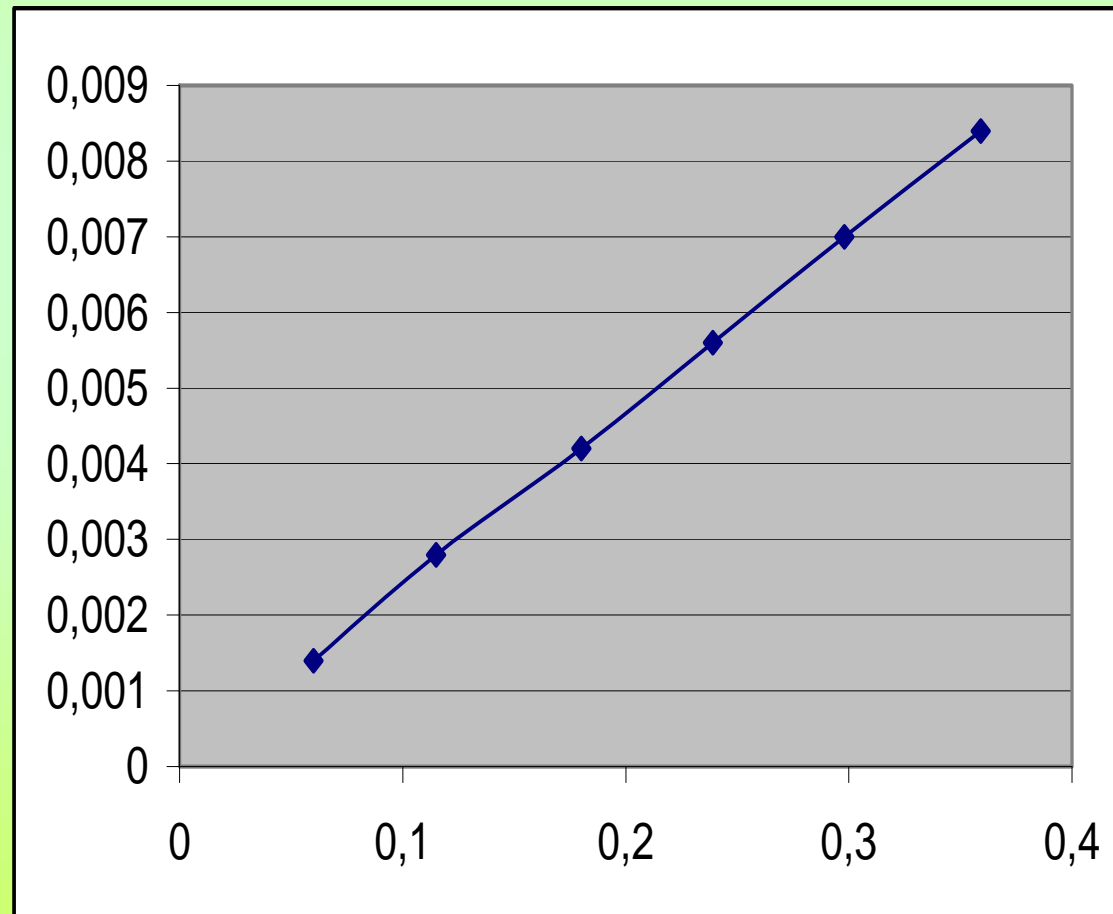
CONTOH: Soal #1

Harga-harga fraksi mole dari SO_2 (sebagai absorbat) dalam fasa cair (x) tersebut disusun juga dalam tabel jawaban seperti di bawah ini.

Tabel 2. Hasil perhitungan data kesetimbangan untuk y dan x			
$C_{SO_2} = \frac{g SO_2}{100 g H_2O}$	P_{SO_2} (kPa)	$y = \frac{P_{SO_2}}{101,3}$	$x = \frac{C_{SO_2}/64}{C_{SO_2}/64 + 5,55}$
0,5	6,0	0,060	0,0014
1,0	11,6	0,115	0,0028
1,5	18,3	0,180	0,0042
2,0	24,3	0,239	0,0056
2,5	30,0	0,298	0,0070
3,0	36,4	0,359	0,0084

CONTOH: Soal #1

Tahap ③: Mengalurkan (*plotting*) harga-harga fraksi mole SO_2 dalam fasa gas (= y) terhadap fraksi mole SO_2 yang terlarut dalam fasa cair (= x), yang hasilnya dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



CONTOH: Soal #1 (bagian akhir)

Hasil pengaluran (plotting) y vs x seperti di atas, ternyata memberikan suatu garis (yang mendekati atau hampir) lurus, yang berarti bahwa Hukum HENRY dapat diterapkan dalam sistem ini.

Kelandaian kurva (*slope*) di atas dapat dihitung sbb:

$$\text{slope} = m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{0,239 - 0,180}{0,0056 - 0,0042} = 42,7$$

Periksalah, apakah harga '*slope*' di atas adalah 'konstan' untuk setiap titik ?

Terima Kasih

Sampai Jumpa Minggu Depan...!!!

Diffusion Mass Transfer in Fluid System – Cambridge Series in Chemi. Eng.