

Operasi Pemisahan Bertingkat

Mass Transfer in Unit Operation

Introduction

- **Apa itu Operasi Pemisahan Bertingkat?** Operasi pemisahan bertingkat adalah teknik pemisahan campuran menjadi komponen-komponennya melalui serangkaian tahap kontak berurutan (equilibrium stages) antara dua fasa (cair–uap atau cair–cair).
- Proses ini memanfaatkan prinsip *counter-current flow* dimana fasa uap naik berlawanan arah dengan fasa cair turun
- Dengan demikian, setiap “tingkat” (misalnya piringan tray di kolom distilasi atau tahap ekstraksi) berfungsi seperti *bejana flash* mini yang menyelaraskan kesetimbangan antar-fasa
- Intinya, setiap tahap membuat komponen lebih volatil menaik (fraksi ringan) atau lebih berat turun (fraksi berat), sehingga kemurnian produk terus meningkat tahap demi tahap

Introduction

- Misalnya, dalam **kolom distilasi**, campuran dipanaskan hingga komponen yang paling mudah menguap naik, sementara komponennya terkondensasi di setiap pelat (tray). Sistem bertingkat ini biasa disebut *multiple equilibrium stages*, di mana setiap tray berperilaku seperti unit pemisahan yang serupa

Mengapa Digunakan di Industri?

- **Distilasi:** Digunakan di kilang minyak dan petrokimia untuk memecah minyak mentah menjadi bensin, diesel, naphta, dll., berdasarkan perbedaan titik didih.
<https://www.youtube.com/watch?v=vD0kbdIS6kE&pp=ygUWY3J1ZGUgb2lsIGRpC3RpbGxhdGlvbg%3D%3D>
- **Absorpsi gas:** Untuk menangkap polutan atau komponen berbahaya dari aliran gas (misalnya CO₂ di-sorpsi oleh larutan NaOH), kolom absorpsi counter-current menyerap gas ke dalam cairan pelarut.
<https://youtu.be/449NRHEUIgs?si=5WMvGGIUQUeJH2ny>
- **Ekstraksi cair-cair:** Memisahkan pelarut yang tidak mudah larut (misalnya mengekstrak senyawa organik dengan pelarut organik) di industri farmasi, makanan atau kimia halus. Operasi bertingkat diperlukan saat titik didih komponen terlalu mirip untuk dipisahkan hanya dengan distilasi.

Operasi Pemisahan Fasa

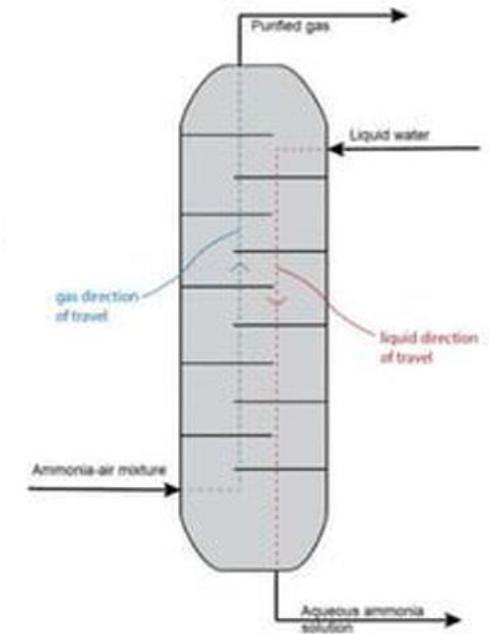
- Dalam operasi pemisahan fasa (misalnya destilasi, absorpsi, stripping), terdapat dua pendekatan pemodelan utama: **Metode Kesetimbangan (Equilibrium Stage Method)** dan **Metode Perpindahan Massa (Rate-Based Method)**.
- Metode kesetimbangan menganggap bahwa pada setiap tingkat diskrit (tray) alirannya mencapai *kesetimbangan fasa uap-cair*, sehingga komposisi uap dan cair keluar tray sudah sesuai dengan hubungan VLE (equilibrium)
- Sebaliknya, metode perpindahan massa tidak mengasumsikan keseimbangan total pada tiap tingkat; ia menghitung laju *transfer massa antarfasa* berdasarkan resistansi (lapisan film) di antara fasa uap dan cair

Prinsip Dasar Pemisahan Bertahap (Stagewise Equilibrium)

- Setiap tahapan dianggap mencapai keseimbangan fasa (uap-cair atau cair-cair) secara termodinamika.
- Artinya, uap yang masuk dan cairan yang berkontak di satu tray keluar dengan komposisi yang seimbang (uap dalam titik **embun**, cairan dalam **titik didih**).
- Hasilnya, sebagian uap mengembun dan sebagian cairan menguap setiap kali ada kontak.
- Proses ini berulang pada setiap tingkat. Semakin banyak tray atau tahap dalam kolom, semakin tinggi pemisahan yang dicapai, sehingga produk akhir bisa sangat murni

Definisi Metode Kesetimbangan

- Metode kesetimbangan (stage equilibrium) menyederhanakan kolom menjadi serangkaian tahap teoritis. Diasumsikan bahwa setiap tahap (tray atau bagian padatan terisi) beroperasi pada keseimbangan termodinamik, yaitu tekanan, suhu, dan potensi kimia fasa uap dan cair pada tahap itu
- Dengan demikian, komposisi uap keluar adalah fungsi langsung dari komposisi cair masuk melalui konstanta kesetimbangan (K-value). Model ini hanya memerlukan data **equilibrium** (K-value) dan entalpi tiap komponen
- Kelebihan utama metode ini adalah kesederhanaan dan kebutuhan data minimal; tidak diperlukan informasi **detail tentang geometri** ataupun **koefisien perpindahan**
- Dalam praktiknya, desain kolom destilasi menggunakan metode kesetimbangan, misalnya dengan **diagram McCabe–Thiele** untuk kolom dua komponen atau perhitungan jumlah *plate teoritis* pada kolom absorpsi/stripping.
- Sebagai catatan, ketika menggunakan model ini untuk kolom nyata, faktor efisiensi (Murphree untuk tray, HETP untuk kolom terisi) sering ditambahkan untuk mengoreksi penyimpangan dari kondisi ideal.

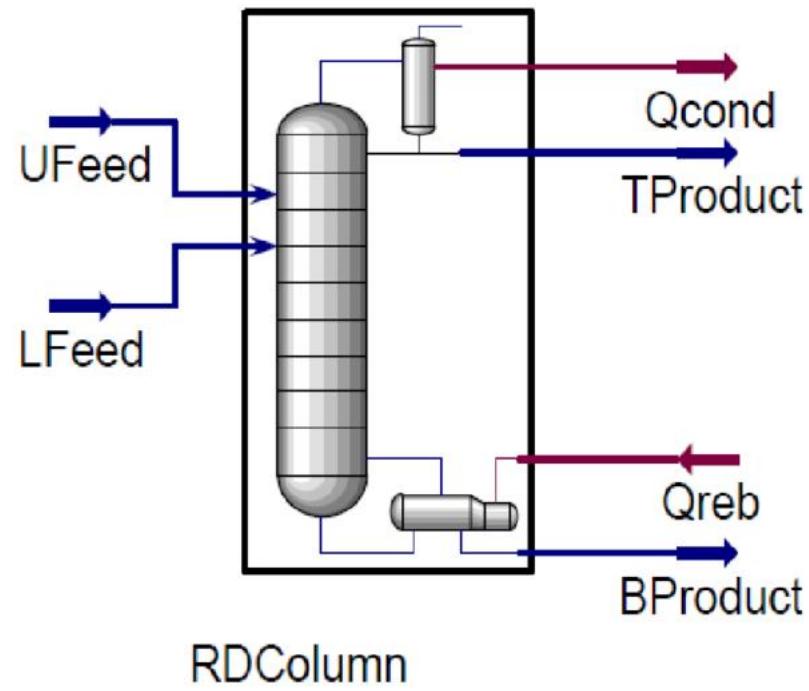


Simplified absorption column
[Picture](#) by Jocelynskim - [CC BY-SA 4.0](#)
remixed by Kati Jordan

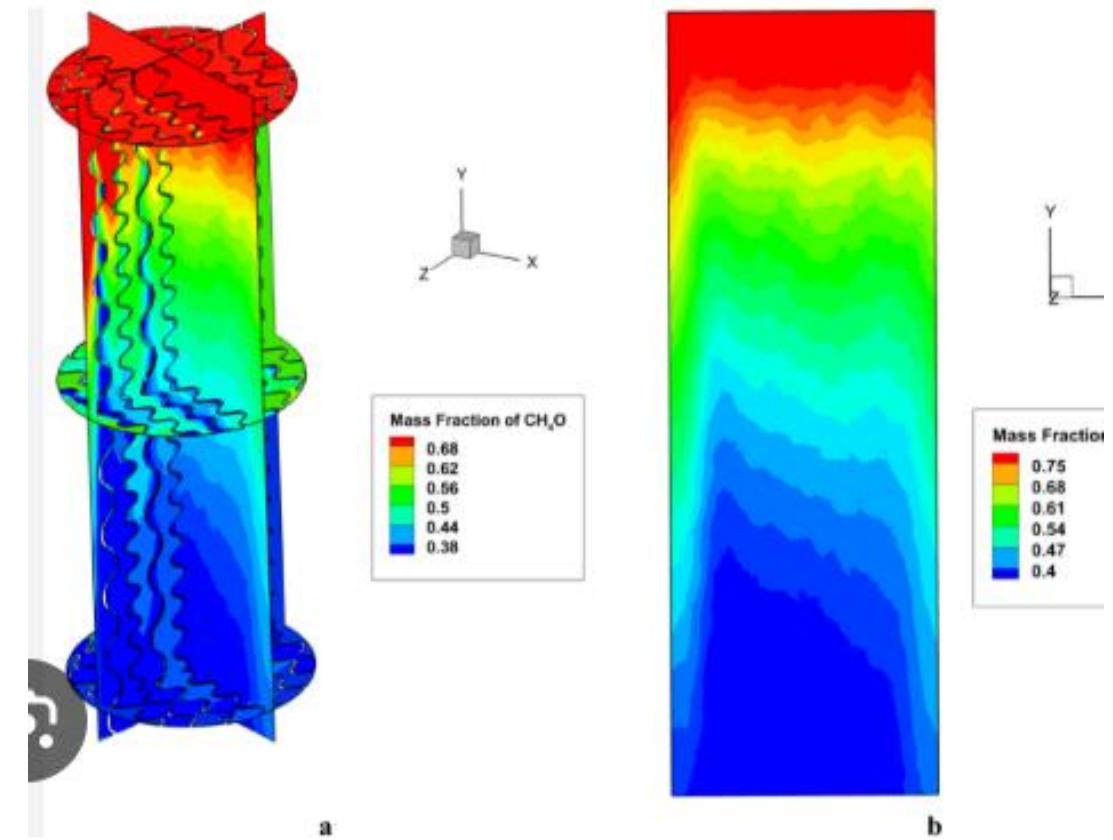
Definisi Metode Perpindahan Massa

- Metode perpindahan massa (rate-based) memodelkan kontak uap-cair secara kontinu dengan mempertimbangkan **laju transfer zat** dari satu fasa ke fasa lain.
- Berbeda dengan pendekatan diskrit, metode ini menganggap **hanya antarmuka yang mencapai kondisi VLE (kesetimbangan uap cair)**, sedangkan perpindahan massa dihabiskan oleh resistansi film gas dan film cair.
- Dengan kata lain, komponen berpindah secara bertahap menuruni gradien konsentrasi di dalam lapisan tipis antara fluida.
- Model ini menggunakan persamaan diferensial laju perpindahan (berbasis teori dua-film) yang melibatkan koefisien perpindahan massa, luas antarmuka efektif, dan parameter hidrodinamik lain.
- Pendekatan ini lebih rumit karena memerlukan data tambahan seperti koefisien difusi, viskositas, dan karakteristik geometri kolom (misalnya S/V pada packing).
- Namun, metode ini mampu memprediksi profil konsentrasi, suhu, dan performa kolom dengan akurasi tinggi karena menangkap efek kinetik kontak fasa.

Kriteria	Metode Kesetimbangan (Stage)	Metode Perpindahan Massa (Rate-Based)
Prinsip Dasar	Pemodelan <i>tahap ber-tahap</i> : setiap tray dianggap mencapai ekuilibrium uap-cair.	Pemodelan <i>kontinu</i> : transfer massa dihitung melalui lapisan film antarfasa, VLE hanya di antarmuka.
Asumsi Utama	Kesetimbangan sempurna di tiap tahap; tidak ada reaksi atau entrainment.	Aliran plug, keberadaan dua film statis di antarmuka; proses adiabatik (jika berlaku).
Data/Parameter Masukan	Hanya K-values (ekuilibrium) dan entalpi; (efisiensi stage/HETP untuk koreksi praktis).	Koefisien perpindahan massa gas/cair, luas antarmuka efektif (packing), difusivitas, viskositas, dll (data hidrodinamik).
Kompleksitas & Hitung	Sederhana, persamaan linier per tahap (MESH eqns). Cepat dikalkulasi.	Kompleks, memerlukan penyelesaian ODE/PDE laju (MERSHQ eqns). Komputasi lebih berat.
Akurasi	Model ideal (teoretik): menghasilkan <i>limit termodinamik</i> . Memerlukan efisiensi empiris untuk kesesuaian data nyata.	Lebih akurat menangkap kondisi nyata karena memasukkan kinetika transfer. Cocok untuk prediksi detail profil kolom.
Keuntungan	Input minimal, metode matang dan teruji; baik untuk desain konseptual dan optimasi.	Akurasi tinggi; dapat memprediksi performa kolom secara rinci (profil suhu, konsentrasi, pressure drop, dll).
Keterbatasan	Asumsi ideal sering kali tidak terpenuhi, perlu efisiensi (Murphree/HETP) untuk hasil realistik. Tidak memuat efek hidrodinamik secara eksplisit.	Memerlukan banyak parameter empiris dan kalkulasi intensif. Sensitif terhadap ketepatan korelasi perpindahan massa.



Metode Kesetimbangan (Stage)



Metode Perpindahan Massa (Rate-Based)

Mekanisme Dasar Perpindahan Massa

- Dalam perpindahan massa antarfase terdapat tiga fase utama: gas, cair, dan padat. Setiap pasangan fase dapat berinteraksi secara berbeda. Secara sederhana, terdapat enam kombinasi unik antarfase (tanpa mempertimbangkan arah): Gas–Gas, Gas–Cair, Gas–Padat, Cair–Cair, Cair–Padat, dan Padat–Padat.
- Tabel berikut merangkum kombinasi fase (baris → kolom) dan proses contohnya:

	Gas	Cair	Padat
Gas	Gas–Gas	Gas–Cair(mis. distilasi, absorpsi)	Gas–Padat(mis. adsorpsi, sublimasi)
Cair	Cair–Gas(mis. kondensasi)	Cair–Cair	Cair–Padat(mis. ekstraksi padat-cair, kristalisasi)
Padat	Padat–Gas(mis. desublimasi)	Padat–Cair(mis. pelepasan zat larut)	Padat–Padat

Mekanisme Kontak Dua Fase Tidak Larut (Immiscible Contact)

- Mekanisme ini terjadi ketika dua fase dengan kelarutan minimal saling kontak langsung.
- Contohnya adalah proses gas-cair (misalnya absorpsi CO_2 ke air) dan cair-cair (seperti ekstraksi larutan dengan pelarut organik).
- Pada mekanisme immiscible, zat berpindah melalui antarmuka fase melalui difusi; misalnya, gas yang larut dalam cairan akan berdifusi menembus film fluida gas menuju antarmuka, lalu melintasi film cair ke dalam interior cairan.
- Salah satu contoh tipikal adalah pemisahan aseton dari air dengan CCl_4 : setelah dikocok dan diam, sebagian besar aseton terikat oleh lapisan CCl_4 dan terpisah dari air.
- Prinsipnya, perbedaan konsentrasi antarfase menjadi pendorong (driving force) perpindahan massa hingga tercapai keseimbangan larutan antarmuka.

Kontak Tidak Langsung Fase Larut (Indirect Contact, Miscible).

- Ada mekanisme langsung, fase-fase yang saling larut dicampur dan kemudian dipisahkan melalui perubahan kondisi (biasanya panas).
- Contohnya adalah **distilasi fraksionasi** dan **kristalisasi fraksionasi**: keduanya menghasilkan dua fase baru (uap-cair atau padat-cair) dengan menggunakan pemanasan atau pendinginan.
- Misalnya, dalam distilasi uap sebagian, campuran acetic acid-air dipanaskan sehingga terbentuk uap dan sisa cairan dengan komposisi berbeda.
- Contoh lain adalah pemisahan air-ethanol: campuran dipanaskan, sebagian larutannya menguap, lalu didinginkan untuk mendapatkan hasil terpisah.
- Operasi jenis ini dianggap **langsung** karena hanya mengubah panas, tanpa menambahkan agen luar, untuk memicu pemisahan. Produk fase yang dihasilkan sudah dalam kondisi terpisah saat keluar, sehingga lebih disukai bila komponen tahan panas.

Fenomena Permukaan

- Mekanisme ini memanfaatkan sifat pada antarmuka/permukaan. Adsorpsi merupakan contohnya: molekul gas atau zat terlarut menempel pada permukaan padatan, membentuk lapisan tipis hingga mencapai keseimbangan.
- Prinsip serupa digunakan dalam **membran semipermeabel**, di mana membran bertindak sebagai permukaan selektif (semacam barier) yang hanya membiarkan komponen tertentu lewat berdasarkan ukuran atau muatan.
- Selain itu, fenomena seperti tegangan permukaan dan kapilaritas dapat memisahkan komponen, misalnya pembentukan gelembung udara untuk mengonsentrasi zat terlarut di permukaan cairan. Secara garis besar, proses permukaan tidak mengandalkan perbedaan fase murni, melainkan perbedaan afinitas atau interaksi di permukaan sebagai pendorong perpindahan massa.

Tabel Kombinasi Fase (Gas, Cair, Padat)

- Kombinasi interaksi antar tiga fase utama dapat dirangkum sebagai berikut (contoh proses ditunjukkan di beberapa sel):

Fase Kontak	Gas	Cair	Padat
Gas	Gas–Gas	Gas–Cair(distilasi, absorpsi)	Gas–Padat(adsorpsi, sublimasi)
Cair	Cair–Gas(kondensasi)	Cair–Cair	Cair–Padat(ekstraksi padat-cair, kristalisasi)
Padat	Padat–Gas(desublimasi)	Padat–Cair(pelepasan zat larut)	Padat–Padat

- **Contoh Mekanisme:** Sebagai ilustrasi, proses *absorpsi gas CO₂ dalam larutan amina* melibatkan kontak langsung gas-cair immiscible, di mana CO₂ berdifusi ke cairan dan bereaksi. Sedangkan *distilasi vakum* merupakan kontak langsung antara cairan etanol-air: campuran dipanaskan dan uap etanol terpisah dari air karena perbedaan titik didih. Untuk fenomena permukaan, *adsorpsi uap pada karbon aktif* menangkap uap pelarut pada permukaannya.

Konsep Dasar Perpindahan Massa Antar Fasa

- Perpindahan massa antar fasa terjadi ketika suatu komponen berpindah dari satu fasa ke fasa lain (misalnya gas→cair) akibat **perbedaan konsentrasi atau fugasitas** sebagai gaya pendorong.
- Pada **sistem satu fasa** (misalnya difusi dalam cairan atau gas homogen) perpindahan massa terjadi dalam satu medium tanpa antarmuka khusus, mengikuti hukum Fick.
- Sebaliknya, pada **sistem dua fasa** (misalnya gas–cair) terdapat antarmuka yang memisahkan dua media.
- Keberadaan antarmuka ini menambah kompleksitas: konsentrasi zat di kedua sisi antarmuka hampir tidak pernah sama, sehingga selain perpindahan ke/dari antarmuka terjadi pula proses antar muka.
- Proses perpindahan massa antar fasa dapat dijelaskan melalui beberapa teori, misalnya teori **film tunggal** dan **film ganda**.

Konsep Dasar Perpindahan Massa Antar Fasa

- **Film tunggal (single-film):** Hanya salah satu fasa memberikan tahanan dominan (biasanya fasa lebih lambat, misal cairan)
Artinya, fluks massa dihitung berdasarkan gradien konsentrasi satu fasa saja.
- **Film ganda (two-film):** Kedua fasa memiliki lapisan film resistif.
Transfer massa melibatkan tiga tahap (lihat bagian Teori Dua Film).

Kesetimbangan Fasa Gas–Cair (Amonia–Air)

- Kesetimbangan fasa gas–cair terjadi apabila fraksi mol komponen A di gas dan cair memenuhi hukum termodinamika (misal Raoult dan Dalton atau hukum Henry). Sebagai contoh, untuk sistem amonia–air ideal dapat digunakan rumus:

$$x_A P_S = y_A P$$

di mana x_A fraksi mol A di cairan, y_A fraksi mol di gas, P_S tekanan uap jenuh pada suhu T, dan P tekanan total. Hubungan ini menurunkan **kurva distribusi kesetimbangan** (diagram y_A vs x_A). Pada konsentrasi rendah (larutan encer) hukum Henry berlaku $P_A = H x_A$, (sehingga kesetimbangan linier:

$$y_A = m x_A, \text{ dengan } m = \frac{H}{P}$$

di mana m adalah kemiringan kurva kesetimbangan (konstanta proporsional). Kurva kesetimbangan ini digambarkan pada diagram $y-x$ (fraksi mol gas vs cair) dan menjadi acuan untuk merancang proses absorpsi.

Difusi Antar Fasa Kondisi Steady State

- Pada kondisi steady state dalam kolom absorpsi (gas mengalir berlawanan cairan), fluks molar N_A jumlah mol A berpindah per satuan luas per waktu konstan sepanjang kolom. Model sederhana menggunakan hukum Fick pada tiap film. Misalnya, fluks massa dari gas ke antarmuka dapat dituliskan:

$$N_A = k_y (y_A - y_A^*)$$

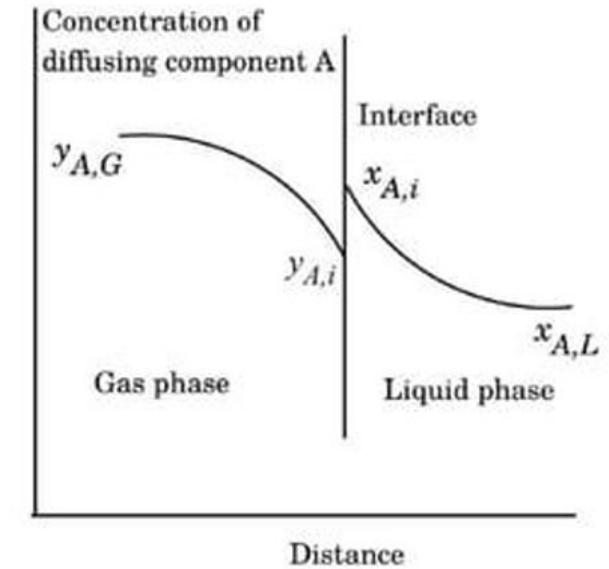
- di mana k_y adalah koefisien film fasa gas, y_A fraksi mol A di gas jauh dari antarmuka, dan y_A^* fraksi mol A di gas pada antarmuka (kesetimbangan). Demikian pula untuk fasa cair:

$$N_A = k_x (x_A^* - x_A),$$

- dengan k_x koefisien film fase cair, dan x_A^* fraksi mol A di cairan pada antarmuka (kesetimbangan).
- Pada ilustrasi **kolom absorpsi** (pakared/aliran kontra), gas membawa senyawa terlarut (misal NH_3) naik ke atas sementara pelarut (air) mengalir turun, sehingga terjadi kontak antarmuka panjang. Kolom biasanya dianalisis pada steady state. Fluks N_A dihitung sama pada setiap ketinggian karena kestabilan kondisi.

Teori Film Dua Tahanan (Two-Film Theory)

- Teori film dua tahanan memisahkan perpindahan massa antar fasa menjadi **tiga tahap** paralel:
- **(i) Difusi dalam film fasa I (gas):** Zat terlarut bergerak dari badan utama fasa gas menuju antarmuka. Resistan film gas menyebabkan fluks $N_A = k_y(C_{Ag} - C_{Ai})$.
- **(ii) Perpindahan antarmuka (kesetimbangan):** Pada batas antarmuka terjadi pertukaran molekul tanpa tahanan (diasumsikan langsung kesetimbangan dinamis); nilai konsentrasi gas C_{Ai} dan cair C'_{Ai} di antarmuka memenuhi hubungan kesetimbangan (misal Henry).
- **(iii) Difusi dalam film fasa II (cair):** Amonia yang sudah masuk antarmuka berdifusi ke dalam badan utama cairan. Fluks $N_A = k_x(C'_{Ai} - C_{Ac})$.



Koefisien Perpindahan Massa Lokal dan Keseluruhan

- **Koefisien lokal (film):** Koefisien k_y dan k_x masing-masing mendefinisikan fluks terhadap perbedaan konsentrasi di setiap fase.
- Misalnya, $N_A = k_y(y_A - y_A^*)$ untuk fasa gas, atau $N_A = k_x(x_A^* - x_A)$ untuk fasa cair.
- **Koefisien total (keseluruhan):** Jika salah satu film sulit diukur atau peka, sering digunakan koefisien keseluruhan K_y atau K_x berdasarkan **seluruh gaya pendorong di satu fase**. Berdasarkan definisi:
 - $N_A = K_y (y_A - y_A^*)$ atau $N_A = K_x (x_A^* - x_A)$,
 - dimana K_y mengaitkan kecepatan perpindahan massa dengan perbedaan fraksi mol gas, dan K_x dengan perbedaan fraksi mol
 - Contoh, jika kita menggunakan pendekatan fasa gas sebagai basis:
 - $N_A = K_y (y_{A,gas} - y_A^*)$, $N_A = K_x (x_A^* - x_{A,cair})$,

Hubungan antara Koefisien Perpindahan Massa dan Kurva Kesetimbangan

- Dengan asumsi linearitas kesetimbangan ($y_A = mx_A$ pada konsentrasi rendah), terdapat hubungan matematis antara koefisien film dan koefisien keseluruhan. Misalnya, dengan substitusi hubungan $y_A^* = mx_A^*$ ke dalam persamaan fluks, diperoleh:
- $\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}, \frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_x} + \frac{1}{m k_y}$.
- Dari sini dapat diturunkan formula eksplisit:
- $K_y = \frac{k_y k_x}{k_x + m k_y}, K_x = \frac{m k_y k_x}{k_x + m k_y}$.
- Grafik dari hubungan ini (misalnya plot $1/K_y$ vs $1/k_y$ atau m vs K) akan menunjukkan bahwa $K_y < k_y$ dan $K_x < k_x$ karena tahanan rangkap.
- Koefisien keseluruhan ini menunjukkan efek gabungan resistansi kedua fasa pada fluks. Hubungan rumus di atas menghubungkan kurva kesetimbangan (melalui m) dengan laju perpindahan massa

Operasi Pemisahan dalam Perpindahan Massa

- **Tujuan Utama.** Operasi perpindahan massa bertujuan memisahkan suatu campuran menjadi dua atau lebih produk berdasarkan perbedaan komposisi. Proses-proses ini memanfaatkan perbedaan sifat fisik komponen, seperti titik didih, kelarutan, dan afinitas permukaan, sehingga laju perpindahan massa antar fase menjadi berbeda. Pada banyak proses kimia, tahap pemisahan diperlukan untuk menghasilkan produk bernilai atau menghilangkan komponen tak diinginkan.

Operasi Pemisahan dalam Perpindahan Massa

- **Distilasi.** Distilasi memisahkan campuran cair dengan memanfaatkan perbedaan volatilitas (titik didih) komponennya. Campuran dipanaskan sehingga terbentuk uap; komponen dengan titik didih lebih rendah cenderung menguap lebih dahulu. Uap ini dikondensasikan untuk memperoleh komponen yang lebih murni. Misalnya, *distilasi fraksional* memisahkan alkohol dan air berdasarkan perbedaan titik didihnya.

<https://www.youtube.com/watch?v=gYnGgre83CI>

- Prinsipnya adalah transfer massa dua arah: komponen volatil berpindah ke fase uap, sedangkan komponen kurang volatil kembali ke fase cair hingga tercapai kesetimbangan

Operasi Pemisahan dalam Perpindahan Massa

- **Absorpsi Gas.** Absorpsi melibatkan kontak antara gas dan cairan solvent: satu atau beberapa komponen gas (solute) terlarut ke dalam cairan (absorben) hingga mencapai kesetimbangan larutan-gas. Contoh klasiknya adalah penyerapan CO_2 dari gas alam ke dalam larutan air atau amina. Dalam proses ini gas dibiarkan melewati kolom berisi cairan, sehingga solut berpindah ke fase cair melalui difusi ke antarmuka.
- Prinsip dasarnya adalah transfer massa unidirectional (searah) karena hanya zat terlarut dari gas ke cair yang diinginkan.

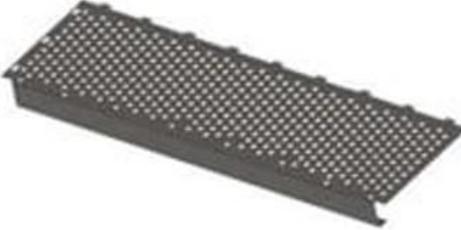
Operasi Pemisahan dalam Perpindahan Massa

- **Ekstraksi Cair-Cair (Liquid-Liquid Extraction).** Proses ini memisahkan solut dari satu cairan pembawa dengan menggunakan pelarut cair kedua yang **tidak saling larut**. Dua cairan ini (diluen dan solvent) heterogen dan membentuk dua fase setelah pencampuran. Zat terlarut yang ingin diambil berpindah dari fase asli ke pelarut karena perbedaan kecenderungan kelarutan (koefisien distribusi).
- Contohnya, ekstraksi aseton dari air menggunakan karbon tetraklorida: setelah diaduk dalam corong pisah, sebagian besar aseton berpindah ke lapisan CCl_4 , terpisah dari air.
- Pemilihan pelarut penting untuk memastikan perbedaan kelarutan maksimal.

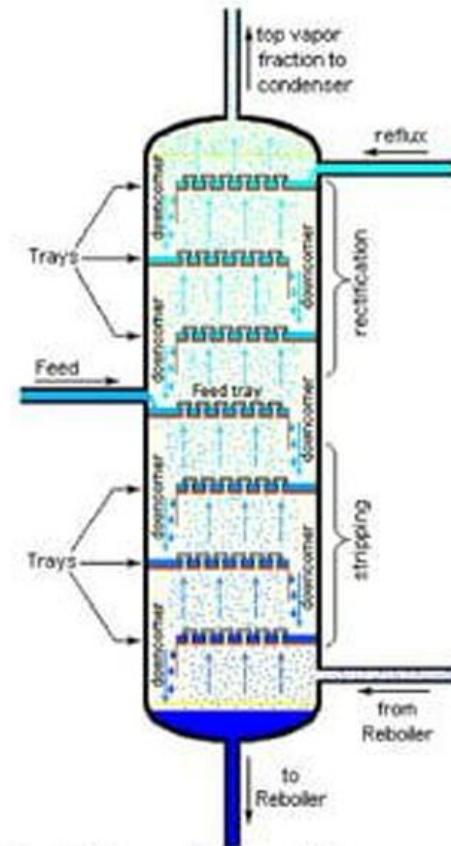
Mekanisme Perpindahan Massa di Jenis-Jenis Kolom Distilasi

- **Kolom Tray (Plate Column)** – Memiliki lempeng horizontal (tray/baki) bertumpuk, masing-masing menyerupai *mini-kolom*. Uap dari bawah dipaksa melewati cairan di atas setiap tray. Terdapat beberapa jenis tray:
 - *Bubble-cap tray*: Setiap lubang pada tray ditutup cerobong (riser) berpenutup (cap) yang memaksa uap turun ke cairan, kemudian dikeluarkan di bawah tutup sehingga menggelembung melalui cairan.
 - *Valve tray*: Perforasi pada tray ditutup dengan penutup kecil (valve) yang dapat terangkat oleh aliran uap. Uap yang mengangkat tutup menciptakan aliran horizontal ke dalam cairan, meningkatkan pencampuran.
 - *Sieve tray*: Lempeng logam polos dengan lubang berlubang, dimana uap mengalir lurus ke atas melalui cairan di tray. Ukuran dan jumlah lubang ditentukan desain agar distribusi uap merata.

Kolom Tray (Plate Column)

Bubble-cap trays	Sieve trays	Valve trays
		

- The oldest type of tray
- Bubble cap consists of the cap and the riser. The riser acts as a vapour passage.
- Bubble-caps are arranged on a plate.
- There are many modifications of these on the market and also other types.



Distillation column with trays.
Picture: CC BY-SA 2.5

Mekanisme Perpindahan Massa di Jenis-Jenis Kolom Distilasi

- **Kolom Kemasan (Packed Column)** – Kolom diisi dengan material pengisi (packing) alih-alih tray.
- Packing bisa berupa *random packing* (dilemparkan secara acak) atau *structured packing* (susunan geometris teratur)
- Contoh random packing meliputi Raschig ring, Pall ring, Berl saddles, Intalox saddles, dll.
- Structured packing biasanya berupa lembaran logam atau plastik berlubang yang dilipat membentuk gelung dengan struktur terbuka.
- Tipe khusus *grid packing* (bentuk kisi terbuka) digunakan untuk aliran gas sangat besar, misalnya pada menara pendingin.

Mekanisme Perpindahan Massa di Jenis-Jenis Kolom Distilasi

- Packing dirancang agar cairan membasahi permukaannya membentuk lapisan film tipis. Gas naik melalui ruang kosong packing lalu bersentuhan dengan lapisan film ini.
- **Transfer massa terjadi melalui difusi molekuler di kedua sisi film (dua-film theory):** molekul uap berdifusi ke dalam film cair (atau sebaliknya) sebelum bercampur ke bulk phase.
- Keunggulan utama kolom kemasan adalah *kontak kontinu* antara gas dan cair sepanjang kolom, menghasilkan transfer massa konstan, serta pressure drop relatif rendah dibanding tray.
- Structured packing menawarkan luas permukaan lebih tinggi dan HETP (Height Equivalent to a Theoretical Plate) rendah (<0,5 m), sehingga efisiensi pemisahan lebih besar (walau biaya material lebih tinggi).
- Random packing lebih murah dan mudah tersedia, tetapi HETP sedikit lebih tinggi. Secara keseluruhan, kolom packed cocok untuk aliran cair rendah, distilasi vakum, **atau peralatan kecil (diameter <0,6 m)**.

Kolom Kemasan (Packed Column)

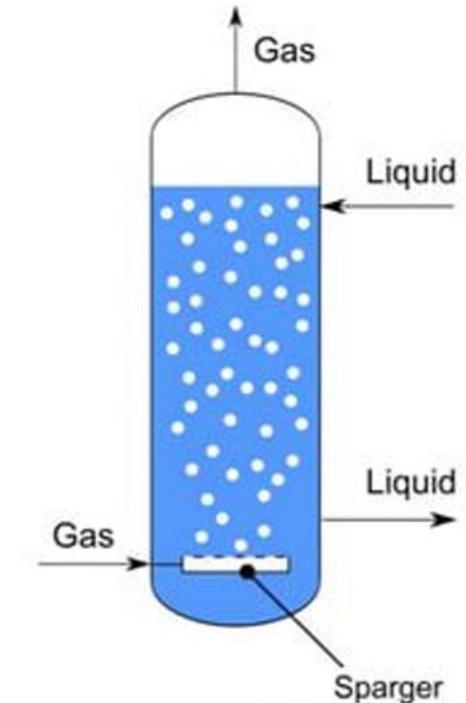
- Packing materials can be made of plastics, ceramic, metals or carbon. Different materials are suitable for different process conditions.



Packed column.
[\(Sulzer\)](#)

Kolom Gelembung (Bubble Column)

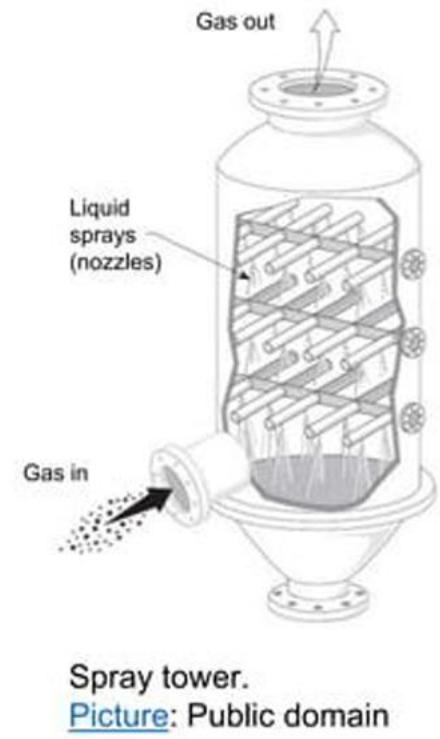
- **Kolom Gelembung (Bubble Column)** – Kolom tanpa tray atau packing internal, di mana gas ditebarkan melalui cairan sebagai gelembung dari dasar (melalui sparger). Gas terdispersi ke dalam cairan kontinyu membentuk banyak gelembung kecil.
- Luas permukaan antarmuka gas–cair jadi sangat besar. Perpindahan massa terjadi saat gelembung terbentuk dan ketika gelembung naik ke permukaan.
- Pada bubble column, kontak gas–liquid bersifat *kontinu* karena dua fase bergerak bersama secara kontinyu.
- Desain sederhana ini sering digunakan sebagai absorber, fermentor, atau reaktor biokimiawi, karena intensitas kontak tinggi tanpa komponen mekanis internal. Kolom gelembung menghasilkan turbulensi yang memecah gelembung, meningkatkan difusi di sekitar gelembung.
- Kelebihannya mencakup kesederhanaan konstruksi dan luas kontak besar; kekurangannya, transfer panas lebih sulit dikontrol dan kinerja dapat dipengaruhi oleh kecepatan naik gelembung.



Bubble column. Picture:
Daniele Pugliesi [CC BY-SA 3.0](#)

Kolom Semprot (Spray Column)

- Kolom di mana cairan disemprotkan (atomisasi) ke aliran uap dari atas atau samping kolom. Umumnya berupa tabung besar yang dilalui gas (misalnya dari bawah ke atas), sementara cairan dimasukkan lewat nozzle di bagian atas (atau sebaliknya). Prosesnya bersifat *kontak diferensial simultan* (kontinu) antara gas dan tetesan cairan.
- Tetesan cairan yang tersebar sangat kecil menciptakan luas permukaan ekstra untuk perpindahan massa. Contoh aplikasi spray column antara lain humidifier, menara pencuci (scrubber), dan spray dryer.
- Dalam spray dryer, misalnya, larutan disemprot melekat pada aliran udara panas sehingga segera menguap (difusi uap dari droplet). Mass transfer di kolom semprot terjadi terutama melalui difusi dari gas ke tetesan (atau sebaliknya) saat droplet melewati gas, dengan kontak gas–liquid kontinyu seperti pada kolom kemasan.
- Kelebihan kolom semprot adalah desain sederhana dan pengoperasian relatif mudah; kelemahannya, efisiensi pemisahan lebih rendah dibanding tray/packed karena kontak fasa relatif singkat dan bercampur kurang merata.



Spray tower.
[Picture](#): Public domain

Jenis Kolom	Jenis Kontak	Internal/Kontak	Keterangan
Kolom Tray (plat)	Bertahap (<i>staged</i>)	Bubble-cap, Sieve, Valve	Tiap tray sebagai satu tahap pemisahan; kontak gas-cair sangat intensif. Presure drop tinggi; cocok untuk aliran besar dan tekanan operasi tinggi.
Kolom Kemasan (packed)	Kontinu	Random (ring, saddle), Structured (wire mesh), Grid	Gas naik membasahi permukaan kemasan, membentuk film cair. Transfer massa kontinu lewat dua-film. Presure drop rendah, efisiensi tinggi (terutama structured), cocok untuk distilasi vakum/dia kecil.
Bubble Column	Kontinu	– (tanpa pengisi)	Gas diteruskan dari bawah membentuk gelembung dalam cairan. Luas kontak besar, konstruksi sederhana. Biasanya untuk absorber/fermentor.
Spray Column	Kontinu (diferensial)	Nozzle penyemprot	Cairan diatomisasi, bercampur dengan gas secara bersamaan. Desain sederhana; kontak gas-cair berlangsung cepat, efisiensi lebih rendah dibanding tray/packed.

Kesimpulan

- Pada model perhitungan kesetimbangan stage, perpindahan massa tetap terjadi secara fisik, tetapi diasumsikan sudah selesai (**steady-state equilibrium**) di setiap tray — sedangkan model **differential (atau film theory)** menghitung laju perpindahan massa yang sesungguhnya.
- Pada *packed tower*, tidak ada tray (tahap diskrit), melainkan kontak **kontinu** antara dua fase (gas dan cair) yang mengalir berlawanan arah. Karena itu, kita tidak bisa memakai asumsi “tahap kesetimbangan sempurna”, melainkan perlu **menghitung laju perpindahan massa secara nyata**