

# Pemilihan Alur Reaksi dan Reaktor

## Lec. 10-11

# PEMILIHAN REAKTOR

Perancangan Proses diawali dengan:

- Pemilihan Reaktor merupakan keputusan terpenting dalam rancangan keseluruhan.
- Rancangan reaktor menentukan keekonomian dari keseluruhan rancangan dan mendasari dampak lingkungan dari suatu proses.
- Produk reaktor diinginkan produk samping tak diinginkan → menyebabkan dampak lingkungan.
- Hampir semua proses menggunakan katalis, pemilihan katalis selektif, menentukan: kondisi operasi dalam sistem.

Pemilihan alur reaksi dan reaktor, keputusan didasarkan :

- Tipe reaktor.
- Konsentrasi.
- Temperatur.
- Tekanan.
- Fasa reaksi.
- Katalis.

# Alur Reaksi

Yang dipilih adalah:

- Alur reaksi dengan bahan baku termurah dan menghasilkan produk samping minimal.
- Alur reaksi dengan produk samping tak diinginkan dan menyebabkan permasalahan lingkungan harus dihindari.
- Neraca komersial dengan harga bahan baku murah/tidak menentu.
- Safety
- Kebutuhan energi
- Keputusan dapat dibuat berdasarkan *Economic Potential* (EP) suatu proses

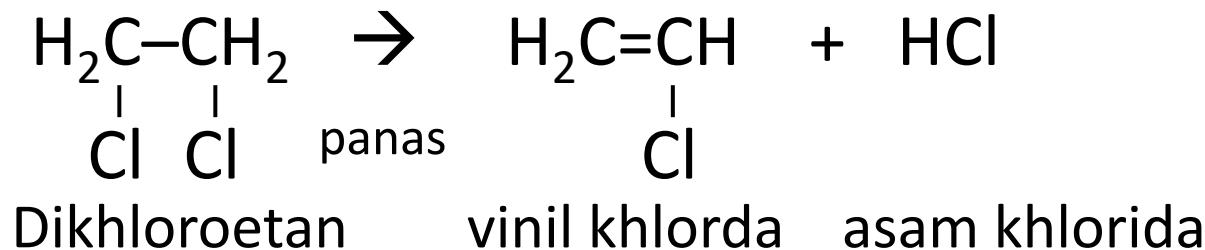
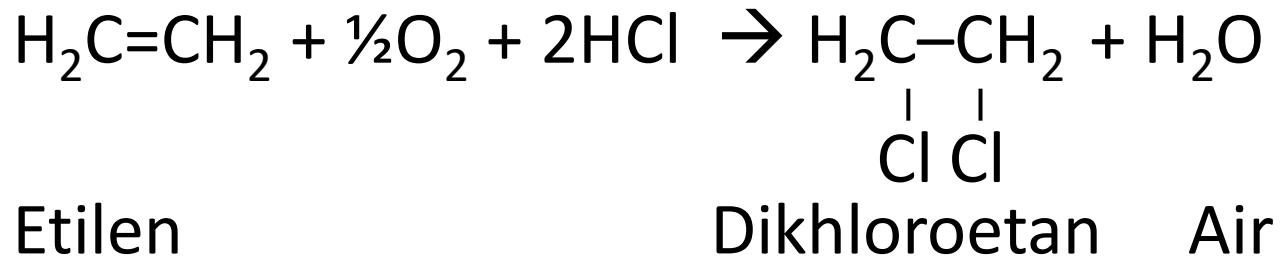
$EP = \text{nilai produk} - \text{biaya bahan baku}$

# Contoh Pemilihan Alur Reaksi Pembuatan Vinil Khlorida

- Alur 1:  $\text{HC}\equiv\text{CH} + \text{HCl} \rightarrow \text{H}_2\text{C}=\text{CHCl}$   
 Asetilen asam khlorida vinil khlorida
- Alur 2:  $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2 + \text{Cl}_2 \rightarrow \begin{matrix} \text{H}_2\text{C}-\text{CH}_2 \\ | \\ \text{Cl} \end{matrix}$   
 Etilen Khlor Dikhloroetan  
 $\begin{matrix} \text{H}_2\text{C}-\text{CH}_2 \\ | \\ \text{Cl} \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} \text{H}_2\text{C}=\text{CH} \\ | \\ \text{Cl} \end{matrix} + \text{HCl}$   
 Dikhloroetan panas vinil khlorida asam khlorida

# Contoh Pemilihan Alur Reaksi Pembuatan Vinil Klorida

- Alur 3:



Alur Reaksi mana yang paling baik di pandang dari biaya bahan mentah serta harga produk utama dan ikutan? (dengan melihat tabel harga bahan mentah dan produk di bawah ini)

<b>Zat kimia</b>	<b>B.M., g/mol</b>	<b>Harga, \$/kg</b>
Asetilen	26	0,94
Etilen	28	0,53
Hidrogen khlorida	36	0,35
Khlor	71	0,21
Vinil khlorida	62	0,42

Oksigen (➔ udara) dan air dapat dianggap berharga nihil (gratis).

$$EP = (\text{harga produk}) - (\text{harga bahan-bahan mentah})$$

**Alur 1 :**

- $EP = (62 \times 0,42) - (26 \times 0,94 + 36 \times 0,35)$   
 $= \underline{\$11,0/(\text{kmol vinil klorida produk})}.$

**Alur 2 :**

- $EP = (62 \times 0,42 + 36 \times 0,35) - (28 \times 0,53 + 71 \times 0,21)$   
 $= \underline{\$8,89/(\text{kmol vinil klorida produk})},$

tetapi jika produk ikutan HCl ternyata tak dapat dijual :

$$EP = (62 \times 0,42) - (28 \times 0,53 + 71 \times 0,21)$$
$$= \underline{\$3,71/(\text{kmol vinil klorida produk})}.$$

**Alur 3 :**

- $EP = (62 \times 0,42) - (28 \times 0,53 + 36 \times 0,35)$   
 $= \underline{\$1,40/(\text{kmol vinil klorida})}.$

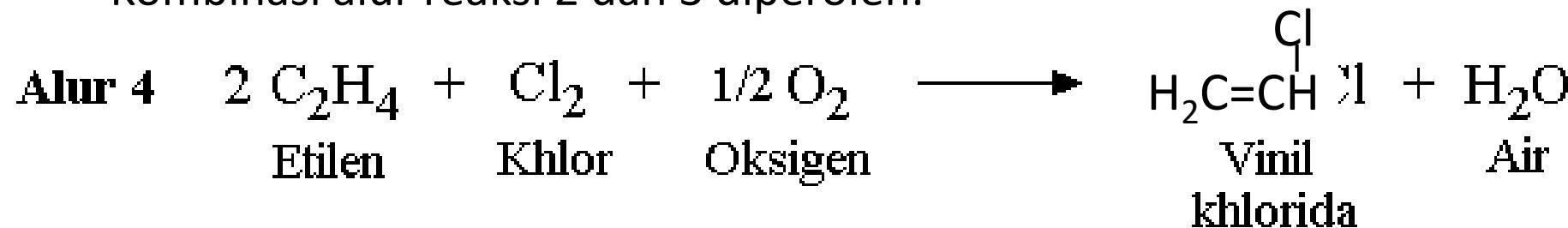
## Hasil Alur Reaksi 1, 2 & 3

- Alur reaksi 2 menunjukkan potensial ekonomi positif, jika produk samping HCl dapat terjual.
- Pemilihan proses lebih didasarkan pada etilen dari pada asetilen (mahal) dan khlor dari pada HCl (mahal).
- Sumber khlor dari elektrolisis garam dapur (lebih menguntungkan).

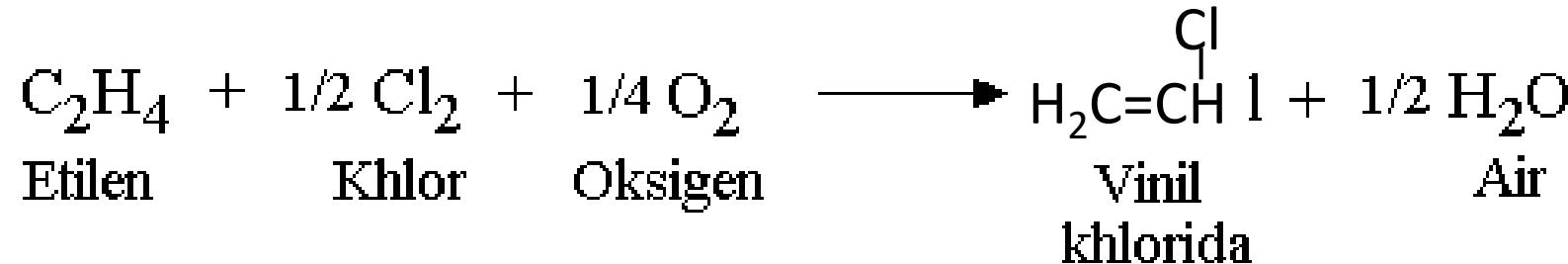
Catatan: Produk samping lebih baik tidak diproduksi.

# Alur Komersial VCM

- Kombinasi alur reaksi 2 dan 3 diperoleh:



atau :



- EP =  $(62 \times 0,42) - (28 \times 0,53 + \frac{1}{2} \times 71 \times 0,21)$   
=  $\$3,75 \text{ kmol}^{-1}$  produk vinil klorida
- Produk ikutan hanya air, relatif sangat mudah dibuang; tak ada produk samping/ikutan lain yang harus terjual.

## Lima Tipe Sistem Reaksi:

1. Reaksi Tunggal
2. Reaksi Komplek/Banyak, Paralel dengan Produk Samping
3. Reaksi Komplek/Banyak, Seri dengan Produk Samping
4. Campuran Seri dan Paralel dengan Produk Samping
5. Reaksi Polimerisasi

# Reaksi Tunggal

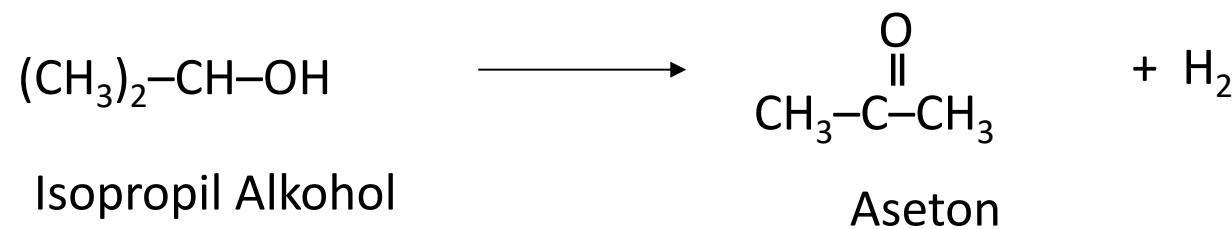
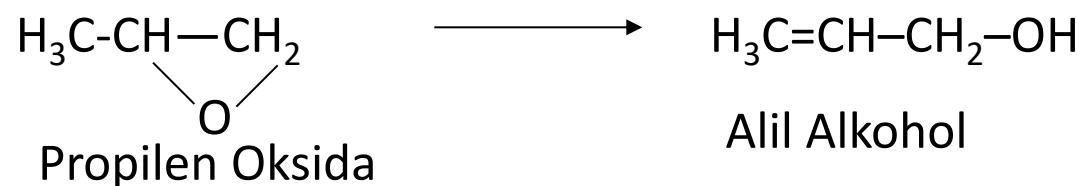
UMPAN → PRODUK

UMPAN → PRODUK + PRODUK SAMPING

UMPAN(1) + UMPAN(2) → PRODUK

Catatan: Hampir semua sistem reaksi melibatkan reaksi banyak

Contoh:



# Reaksi Komplek/Banyak, Paralel dengan Produk Samping

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK + PRODUK SAMPING(1)

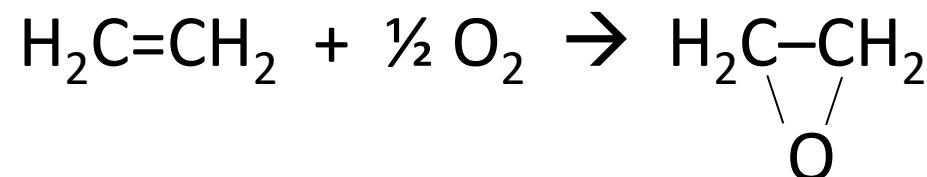
UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING(2)

+ PRODUK SAMPING(3)

UMPAN(1) + UMPAN(2)  $\rightarrow$  PRODUK

UMPAN(1) + UMPAN(2)  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING

# Contoh Reaksi Komplek/Banyak, Paralel dengan Produk Samping



etilen oksida



# Reaksi Komplek/Banyak, Seri dengan Produk Samping

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK

PRODUK  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK + PRODUK SAMPING(1)

PRODUK  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING(2)

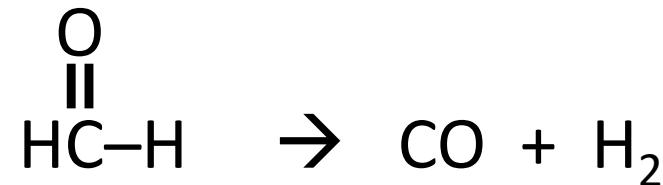
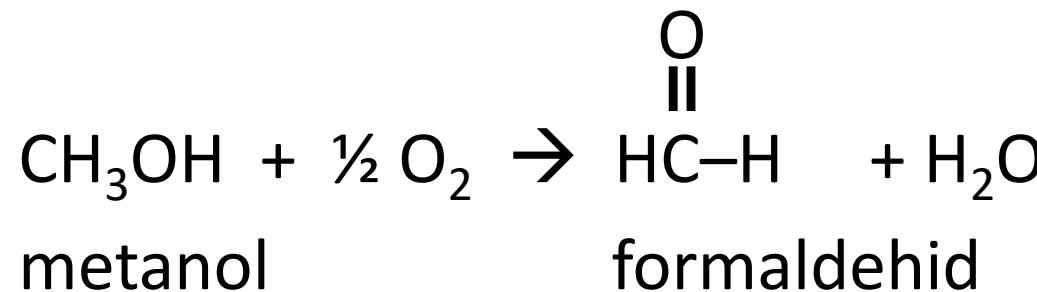
+ PRODUK SAMPING(3)

UMPAN(1) + UMPAN(2)  $\rightarrow$  PRODUK

PRODUK  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING(1)

+ PRODUK SAMPING(2)

# Contoh Reaksi Kompleks/Banyak, Seri dengan Produk Samping



# Campuran Seri dan Paralel dengan Produk Samping

UMPAN → PRODUK

UMPAN → PRODUK SAMPING

PRODUK → PRODUK SAMPING

UMPAN → PRODUK

2 UMPAN → PRODUK SAMPING(1)

PRODUK → PRODUK SAMPING(2)

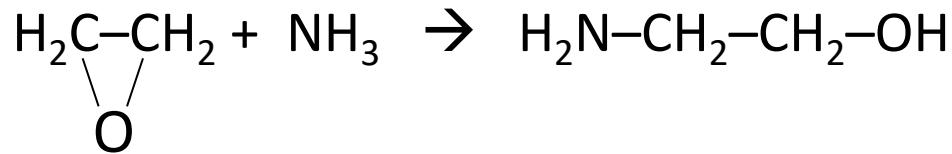
UMPAN(1) + UMPAN(2) → PRODUK

UMPAN(1) + UMPAN(2) → PRODUK SAMPING(1)

PRODUK → PRODUK SAMPING(2)

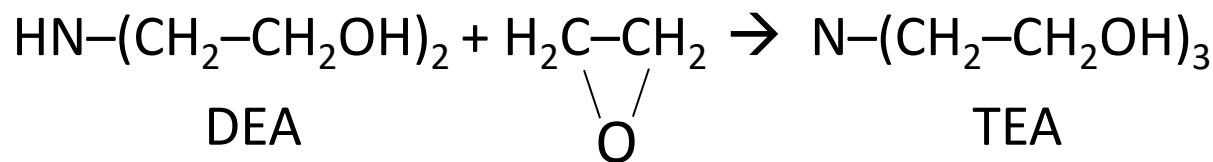
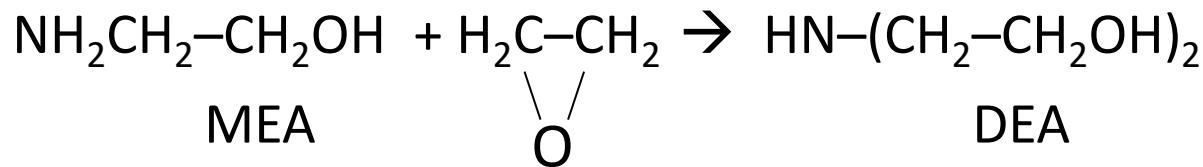
+ PRODUK SAMPING(3)

# Contoh Campuran Reaksi Seri dan Paralel dalam Produksi Etanolamin



Etilen oksida

Mono EA (MEA)



Etilen oksida mengalami reaksi paralel, MEA mengalami reaksi seri menjadi DEA dan TEA.

# Reaksi Polimerisasi

Dua tipe reaksi:

1. Polimerisasi dengan Terminasi
2. Polimerisasi tidak dengan Terminasi

Contoh:

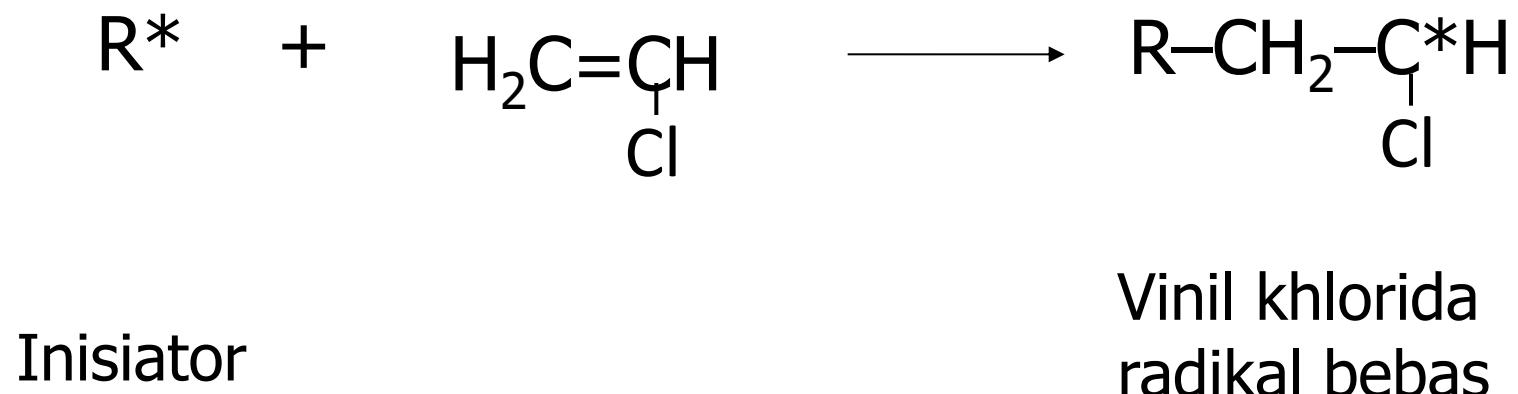
1. Polimerisasi Radikal Bebas (Free Radical Polymerization)  
Peroksida (radikal bebas) → Inisiator membentuk radikal bebas  $\text{CH}_3^*$  atau  $\text{OH}^*$
2. Polimerisasi vinil klorida

# Polimerisasi Vinil Khlorida

1. Tahap Inisiasi  
pembentukan radikal bebas
2. Tahap Propagasi  
pertumbuhan struktur molekul dengan BM  
tinggi ( $> 80.000$ )
3. Tahap Terminasi  
oleh penggabungan 2 radikal

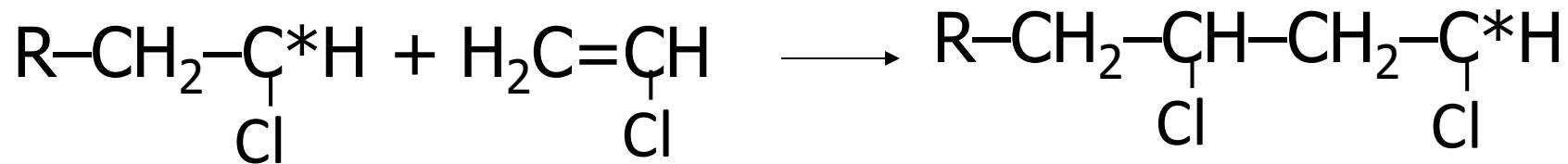
# Polimerisasi Vinil Khlorida

- Tahap Inisiasi



# Polimerisasi Vinil Klorida

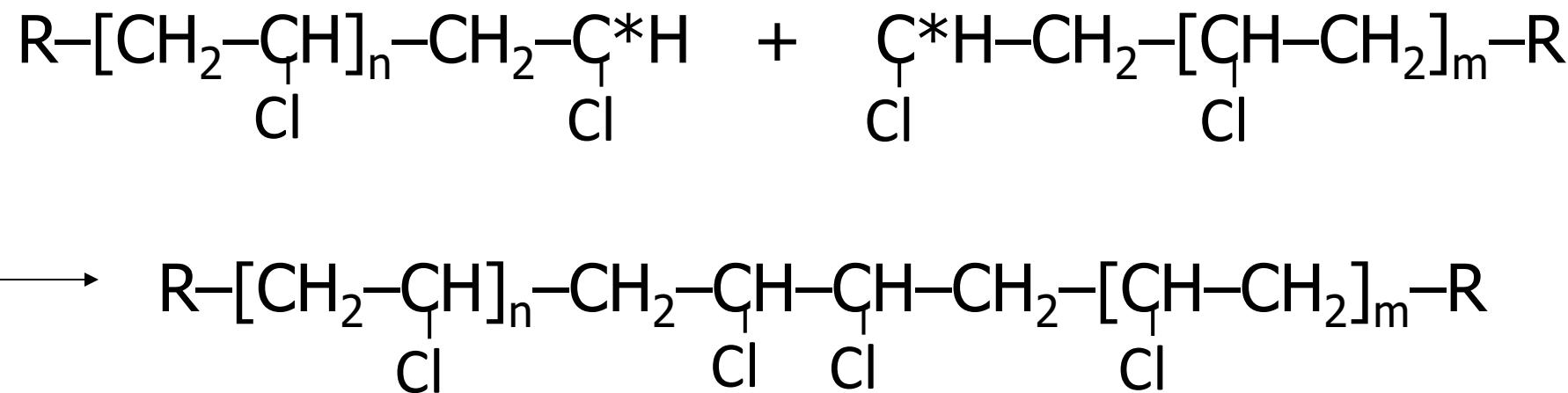
- Tahap Propagasi



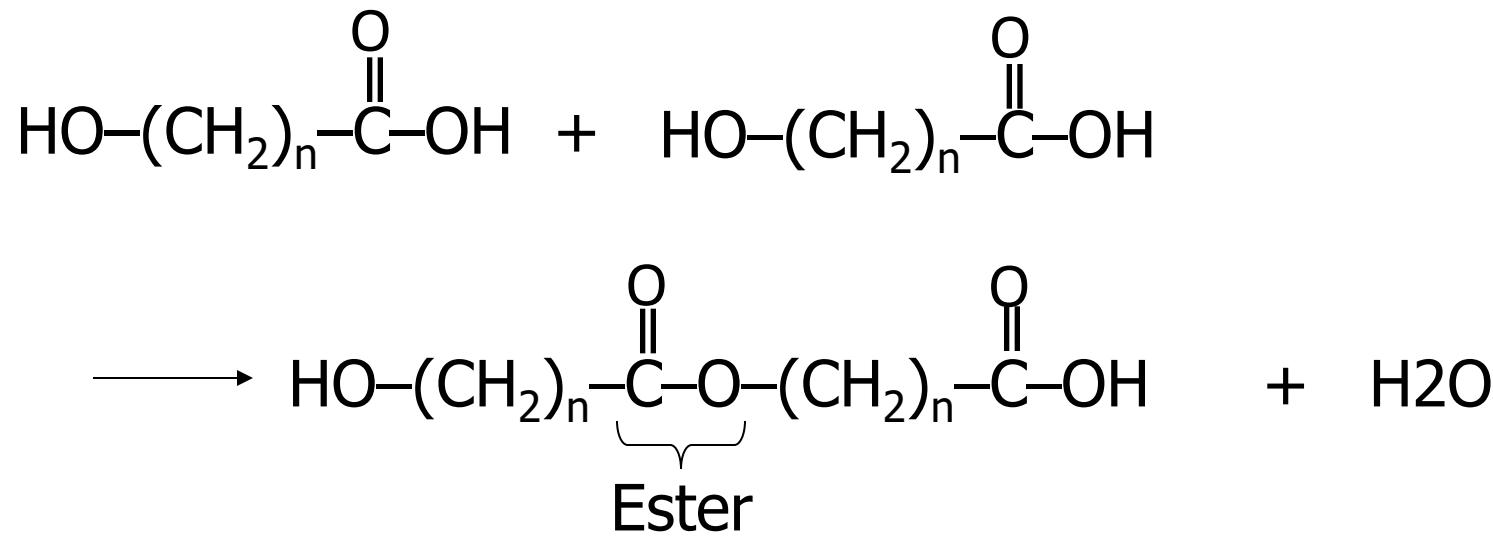
Dan seterusnya membentuk struktur molekul yang diinginkan dengan BM tinggi (> 80.000)

# Polimerisasi Vinil Klorida

- Tahap Terminasi  
Penggabungan 2 radikal bebas



# Contoh Polimerisasi Tanpa Tahap Terminasi



Polimer tumbuh oleh reaksi esterifikasi dengan mengeluarkan air, tanpa terminasi

# KINERJA REAKTOR

Ukuran kinerja reaktor:

- Reaktor polimerisasi yang terpenting Distribusi BM. Distribusi BM menentukan sifat mekanik polimer
- Untuk reaktor lain, ada 3 parameter penting:
  - Konversi
  - Selektivitas
  - Yield (Perolehan)

# Ukuran Kinerja Reaktor

$$\text{konversi} = \frac{(\text{reaktan yang terkonsumsi dalam reaktor})}{(\text{reaktan yang diumpulkan ke reaktor})}$$

$$\text{selektifitas} = \frac{(\text{produk utama yang terbentuk})}{(\text{reaktan yang terkonsumsi dalam reaktor})} \times \text{faktor stoikiometri}$$

$$\text{yield} = \frac{(\text{produk utama yang terbentuk})}{(\text{reaktan yang diumpulkan ke reaktor})} \times \text{faktor stoikiometri}$$

$$\text{faktor stoikiometri} = \frac{(\text{mol stoikiometri reaktan})}{(\text{mol stoikiometri produk})}$$

# KINERJA REAKTOR

Ukuran kinerja reaktor:

- Untuk reaksi kesetimbangan, konversi maksimum yang dicapai adalah konversi kesetimbangan  $< 1,0$ 
  - Menetapkan reaktor mol ratio
  - Temperatur dan tekanan
  - Menetapkan konversi kesetimbangan
- Yield (perolehan) keseluruhan proses merupakan parameter yang sangat penting yang menjelaskan kinerja seluruh plant
- Selektivitas maksimum diinginkan untuk memilih konversi reaktor

# Produk Samping

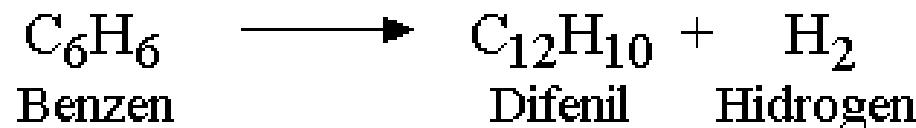
Produk Samping yang tak diinginkan :

- Dapat diubah menjadi produk berguna / bahan baku
- Menyebabkan biaya bahan baku yang terbuang
- Biaya disposal ke lingkungan

## Contoh 6. Perhitungan konversi, perolehan dan selektifitas pembuatan benzen via hidrodealkilasi toluen



Reaksi samping :



Komponen	Hidrogen	Metan	Benzen	Toluen	Difenil
$F_{i,in}$ , kmol/jam	1858	804	13	372	0
$F_{i,out}$ , kmol/jam	1583	1083	282	93	4

$\$$  laju alir komponen  $i$  dalam umpan reaktor       $\&$  laju alir komponen  $i$  dalam keluaran reaktor

- Berapa nilai-nilai konversi tiap reaktan serta perolehan dan selektifitas benzen terhadap toluen maupun hidrogen ?.

## Solusi

- konversi toluen =  $(372 - 93)/372 = 0,75.$
- Selektifitas benzen terhadap toluen  
=  $(282 - 13)/(372 - 93) = 0,96.$
- Perolehan benzen terhadap toluen  
=  $(282 - 13)/372 = 0,72.$

- konversi hidrogen =  $(1858 - 1583)/1858 = 0,15.$
- Selektifitas benzen terhadap hidrogen  
=  $(282 - 13)/(1858 - 1583) = 0,98.$
- Yield/Perolehan benzen terhadap hidrogen  
=  $(282 - 13)/1858 = 0,14.$

# Model Reaktor Ideal

## 1. Model Batch Ideal

Reaktan dimasukkan, diaduk sempurna, waktu reaksi tertentu, produk dikeluarkan.

- Konsentrasi berubah dengan waktu
- Pengadukan sempurna menghasilkan komposisi dan temperatur merata setiap saat

## 2. Model Tercampur sempurna kontinyu/sinambung (*Continuous Well-Stirred Model*)

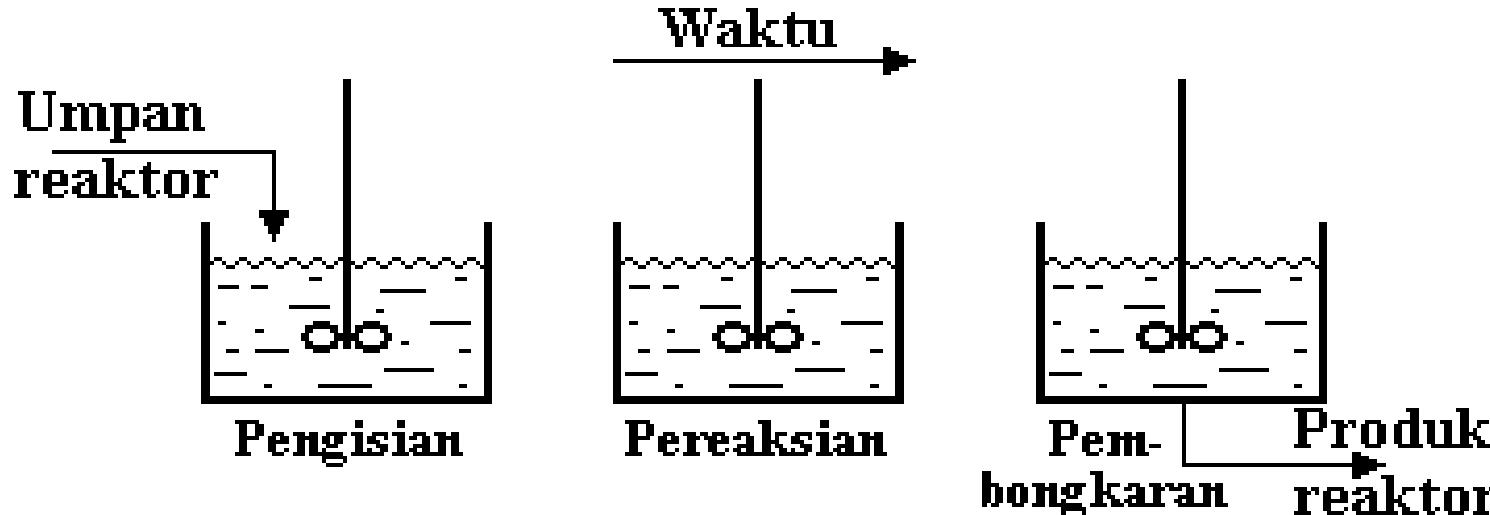
Umpar/Produk masuk/keluar reaktor secara kontinyu, reaktan tercampur sempurna, komposisi dan temperatur merata dalam reaktor

# Model Reaktor Ideal

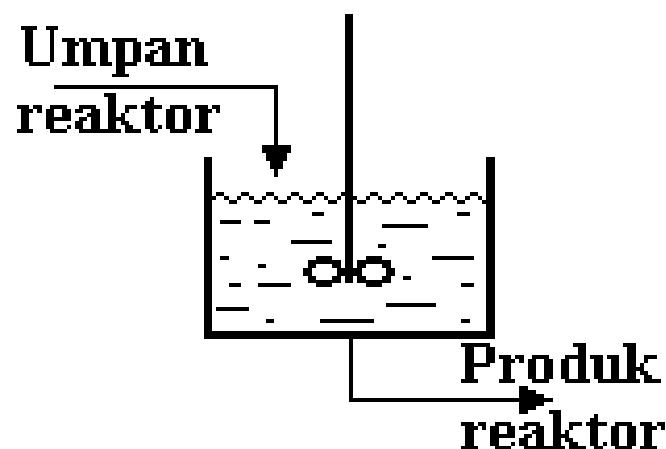
## 3. Model Aliran Sumbat (*Plug Flow Reactor*)

- Asumsi pencampuran sempurna sepanjang arah aliran
- Waktu tinggal dalam reaktor batch ideal sama dengan reaktor aliran sumbat
- Pendekatan operasi reaktor aliran sumbat dapat dengan seri reaktor kontinyu teraduk sempurna
- Semakin banyak jumlah reaktor dalam seri, semakin mendekati reaktor aliran sumbat

# Model reaktor untuk Perancangan Reaktor

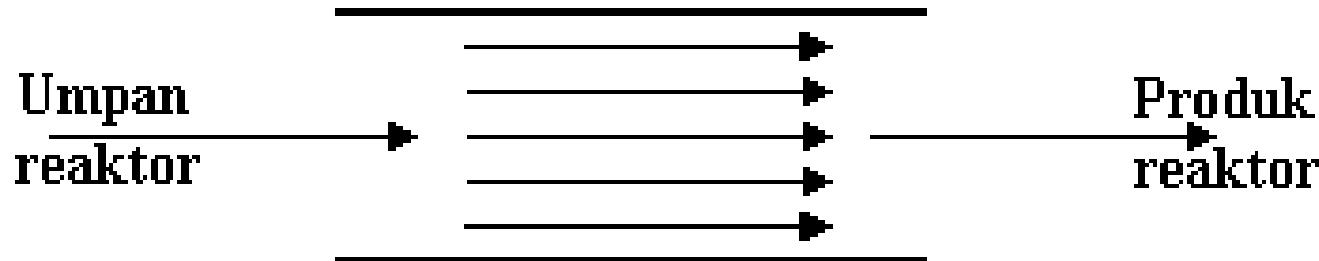


(a). model tangki ideal (tercampur sempurna) partaian.

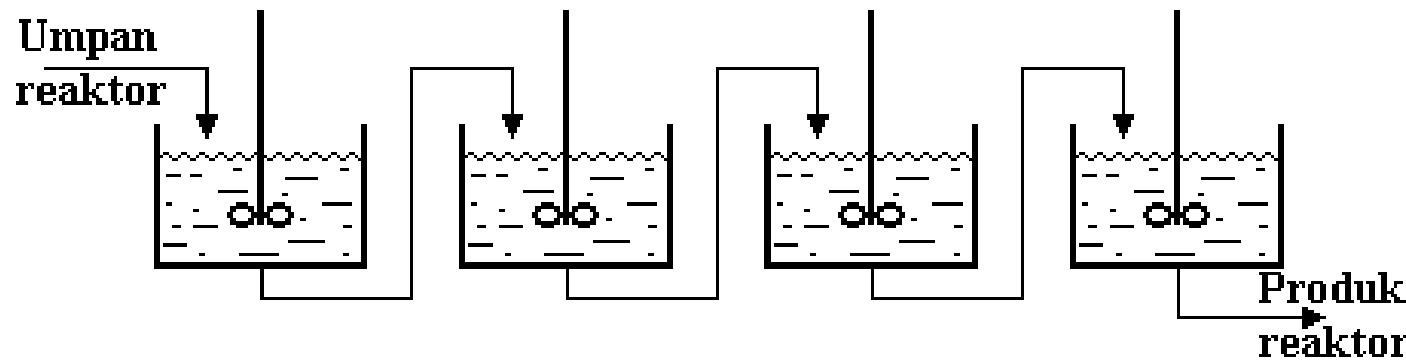


(b). model tangki ideal sinambung.

# Model reaktor untuk Perancangan Reaktor



(c). model pipa ideal (aliran sumbat).



(d) Rangkaian reaktor tangki berpengaduk kontinu akan mendekati plug flow

# Reaktor untuk Reaksi Tunggal

**UMPAN → PRODUK**     $r = kC_{\text{umpan}}^a$

- Laju reaksi tinggi ditentukan konsentrasi tinggi dari umpan
- Reaktor kontinyu teraduk sempurna
  - Umpan masuk reaktor diencerkan oleh produk
  - Laju reaksi dalam reaktor kontinyu lebih rendah dibanding reaktor batch dan reaktor aliran sumbat
  - Reaktor kontinyu memerlukan volume lebih besar dari reaktor batch dan aliran sumbat
- Untuk reaksi tunggal dipilih reaktor batch/aliran sumbat

# SELEKTIVITAS MAKSIMUM

## 1. Reaksi tunggal

Minimum reaktor kapital cost:

- Volum reaktor minimum
- Peningkatan konversi reaktor → ukuran dan biaya reaktor meningkat
- Perlu pertimbangan bagian-bagian lain dalam flowsheet

# Pengesetan awal konversi reaktor

- Reaksi tunggal Irreversible  $\pm$  95%.
- Reaksi tunggal Reversible 95% dari konversi kesetimbangan.
- Untuk reaktor batch harus diambil keputusan berdasarkan waktu yang diperlukan untuk mencapai konversi siklus waktu batch.

# Reaksi Komplek, Paralel dengan Produk Samping (1 umpan)

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK

$$r_1 = k_1 \cdot C_{UMPAN}^{a_1}$$

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING

$$r_2 = k_2 \cdot C_{UMPAN}^{a_2}$$

$r_1, r_2$  = laju reaksi primer dan sekunder

$k_1, k_2$  = konstanta laju reaksi 1 dan 2

$C_{UMPAN}$  = konsentrasi molar umpan

$a_1, a_2$  = orde reaksi primer dan sekunder

# Reaksi Komplek, Paralel dengan Produk Samping (1 umpan) (lanjutan)

Rasio yang diminimasi:

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_2}{k_1} \cdot C_{UMPAN}^{a_2 - a_1}$$

- Selektivitas maksimum pada rasio  $r_2/r_1$  minimum
- Konversi tinggi cenderung menurunkan umpan
- $a_2 > a_1$  Selektifitas naik dengan naiknya konversi yang sesuai adalah reaktor ‘tangki ideal kontinu’
- $a_2 < a_1$  Selektifitas turun dengan naiknya konversi yang sesuai adalah reaktor ‘batch/partai’ atau ‘plug flow/pipa’

# Reaksi Komplek, Paralel dengan Produk Samping (1 umpan) (lanjutan)

- Untuk  $a_2 > a_1$  konversi reaktor ditetapkan 95%.  
Reaksi reversible 95% dari konversi kesetimbangan
- Untuk  $a_2 < a_1$  : sulit !!  
Dilakukan dengan ditetapkan (diduga) konversi 50%.  
Untuk kesetimbangan (reversible) 50% dari konversi  
kesetimbangan

# Reaksi Komplek, Paralel dengan Produk Samping (1 umpan) (lanjutan)

Secara Umum:

- Jika reaksi yang menghasilkan produk mempunyai orde reaksi lebih tinggi dibanding reaksi produk samping, pilih reaktor batch/aliran sumbat (plug flow)
- Jika reaksi yang menghasilkan produk mempunyai orde reaksi lebih rendah dari reaksi produk samping, dipilih reaktor kontinyu teraduk sempurna

# Reaksi Komplek, Paralel dengan Produk Samping (2 umpan)

UMPAN1 + UMPAN2  $\rightarrow$  PRODUK

$$r_1 = k_1 \cdot C_{UMPAN_1}^{a_1} \cdot C_{UMPAN_2}^{b_1}$$

UMPAN1 + UMPAN2  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING

$$r_2 = k_2 \cdot C_{UMPAN_1}^{a_2} \cdot C_{UMPAN_2}^{b_2}$$

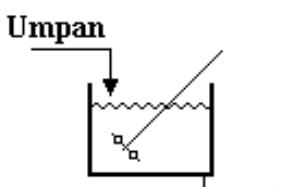
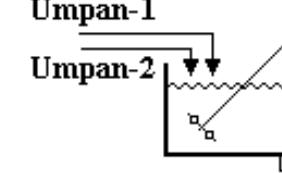
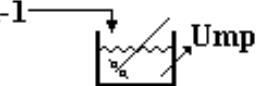
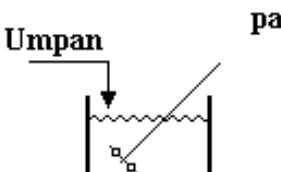
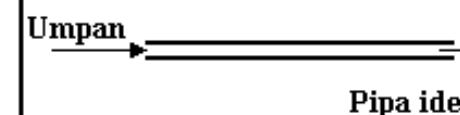
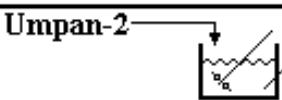
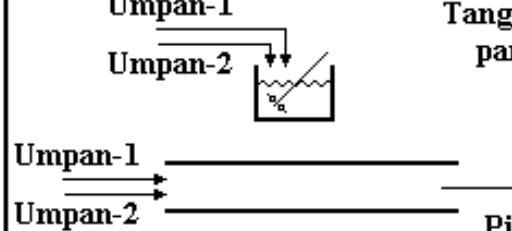
Rasio yang diminimasi:

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_2}{k_1} \cdot C_{UMPAN_1}^{a_2 - a_1} \cdot C_{UMPAN_2}^{b_2 - b_1}$$

# Reaksi Komplek, Paralel dengan Produk Samping (2 umpan) (lanjutan)

- Pilihan reaktornya adalah:
  - Menjaga  $C_{UMPAN1}$  dan  $C_{UMPAN2}$  tetap rendah  $\rightarrow$  reaktor tangki ideal kontinu
  - Menjaga  $C_{UMPAN1}$  dan  $C_{UMPAN2}$  tetap tinggi  $\rightarrow$  reaktor batch (partaian) atau reaktor plug flow(pipa)
  - Menjaga  $C$  satu umpan tinggi dengan umpan lain rendah  $\rightarrow$  memasukkan satu umpan pada saat reaksi berjalan

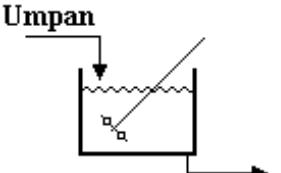
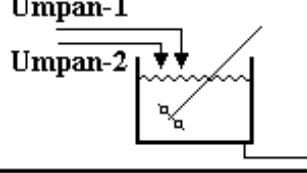
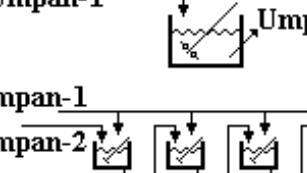
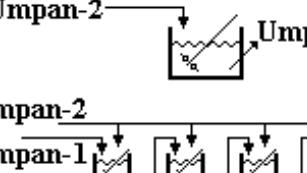
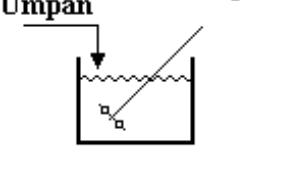
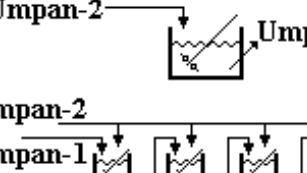
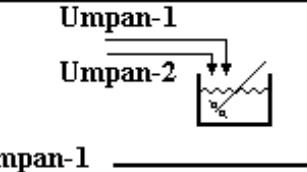
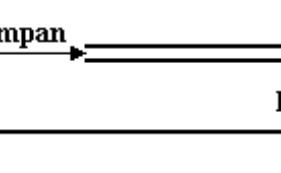
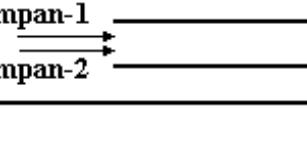
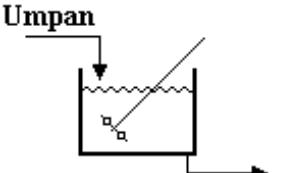
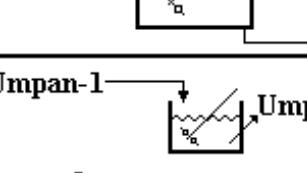
# Pilihan reaktor untuk sistem reaksi paralel

Sistem Reaksi	Umpan $\rightarrow$ Produk Umpan $\rightarrow$ Produk samping	Umpan-1 + Umpan-2 $\rightarrow$ Produk Umpan-1 + Umpan-2 $\rightarrow$ Produk samping
Persamaan laju reaksi	$r_1 = k_1 C_{\text{umpan}}^{a_1}$ $r_2 = k_2 C_{\text{umpan}}^{a_2}$	$r_1 = k_1 C_{\text{umpan-1}}^{a_1} C_{\text{umpan-2}}^{b_1}$ $r_2 = k_2 C_{\text{umpan-1}}^{a_2} C_{\text{umpan-2}}^{b_2}$
Nisbah yang harus diminimalkan	$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_2}{k_1} C_{\text{umpan}}^{a_2 - a_1}$	$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_2}{k_1} C_{\text{umpan-1}}^{a_2 - a_1} C_{\text{umpan-2}}^{b_2 - b_1}$
$a_2 > a_1$		$b_2 > b_1$  $b_2 < b_1$  
$a_1 > a_2$	 	$b_2 > b_1$  $b_2 < b_1$ 

## Pilihan reaktor untuk sistem reaksi paralel

Sistem Reaksi	Umpan $\longrightarrow$ Produk Umpan $\longrightarrow$ Produk samping	Umpan-1 + Umpan-2 $\longrightarrow$ Produk Umpan-1 + Umpan-2 $\longrightarrow$ Produk samping
Persamaan laju reaksi	$r_1 = k_1 C_{\text{umpan}}^{a_1}$ $r_2 = k_2 C_{\text{umpan}}^{a_2}$	$r_1 = k_1 C_{\text{umpan-1}}^{a_1} C_{\text{umpan-2}}^{b_1}$ $r_2 = k_2 C_{\text{umpan-1}}^{a_2} C_{\text{umpan-2}}^{b_2}$
Nisbah yang harus diminimalkan	$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_2}{k_1} C_{\text{umpan}}^{a_2 - a_1}$	$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_2}{k_1} C_{\text{umpan-1}}^{a_2 - a_1} C_{\text{umpan-2}}^{b_2 - b_1}$

# Pilihan reaktor untuk sistem reaksi paralel

Sistem Reaksi	Umpan $\rightarrow$ Produk Umpan $\rightarrow$ Produk samping	Umpan-1 + Umpan-2 $\rightarrow$ Produk Umpan-1 + Umpan-2 $\rightarrow$ Produk samping
Persamaan laju reaksi	$r_1 = k_1 C_{\text{umpan}}^{a_1}$ $r_2 = k_2 C_{\text{umpan}}^{a_2}$	$r_1 = k_1 C_{\text{umpan-1}}^{a_1} C_{\text{umpan-2}}^{b_1}$ $r_2 = k_2 C_{\text{umpan-1}}^{a_2} C_{\text{umpan-2}}^{b_2}$
Nisbah yang harus diminimalkan	$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_2}{k_1} C_{\text{umpan}}^{a_2 - a_1}$	$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_2}{k_1} C_{\text{umpan-1}}^{a_2 - a_1} C_{\text{umpan-2}}^{b_2 - b_1}$
$a_2 > a_1$		$b_2 > b_1$  $b_2 < b_1$  
		$b_2 > b_1$  $b_2 < b_1$ 
$a_1 > a_2$		
		

# SELEKTIVITAS

## 2. Reaksi banyak (multireaksi)

pertimbangan:

- Reaksi paralel menghasilkan produk samping
- Biaya bahan baku hilang menentukan faktor ekonomi proses
- Reaksi paralel/seri/seri-paralel pencapaian selektivitas maksimum dengan meminimalkan produk samping
- Kondisi reaktor → efek kinetika/kesetimbangan dalam reaksi primer dan sekunder yang cenderung membentuk produk yang diinginkan → meningkatkan selektivitas
- Prediksi awal pada reaktor yang berpengaruh pada konversi yang signifikan pada selektivitas

# Reaksi Komplek, Seri dengan Produk Samping

UMPAN → PRODUK

$$r_1 = k_1 \cdot C_{UMPAN}^{a_1}$$

PRODUK → PRODUK SAMPING  $r_2 = k_2 \cdot C_{PRODUK}^{a_2}$

- Reaktor batch(partai) atau plug flow (pipa) digunakan untuk reaksi komplek yang seri dengan produk samping ini

# Reaksi Komplek, Seri dengan Produk Samping

(lanjutan)

- Untuk konversi reaktor tertentu, umpan harus memiliki waktu tinggal yang sesuai dalam reaktor
- Dalam reaktor kontinyu teraduk sempurna umpan dapat langsung keluar setelah masuk reaktor atau dalam periода tertentu
- Produk dapat tinggal dalam perioda tertentu atau langsung keluar
- Model reaktor kontinyu diperkirakan memberikan selektivitas rendah dibanding plug flow dan reaktor batch untuk konversi tertentu
- Dipilih reaktor batch/plug flow untuk reaksi banyak dalam seri

# Reaksi Komplek, Seri dengan Produk Samping

(lanjutan)

- Ditetapkan konversi 50% untuk reaksi irreversible atau 50% dari konversi maksimum untuk reaksi reversible
- Reaksi banyak oleh adanya :
  - Pengotor dalam umpan (harus minimum)
  - Pengotor tidak mengganggu reaksi namun menambah pemurnian umpan
- Penetapan untuk konversi reaktor dengan selektivitas maksimal  
→ Pilihan utama adalah tipe reaktor

# Reaksi Campuran paralel dan Seri dengan Produk Samping

UMPAN → PRODUK

$$r_1 = k_1 \cdot C_{UMPAN}^{a_1}$$

UMPAN → PRODUK SAMPING

$$r_2 = k_2 \cdot C_{UMPAN}^{a_2}$$

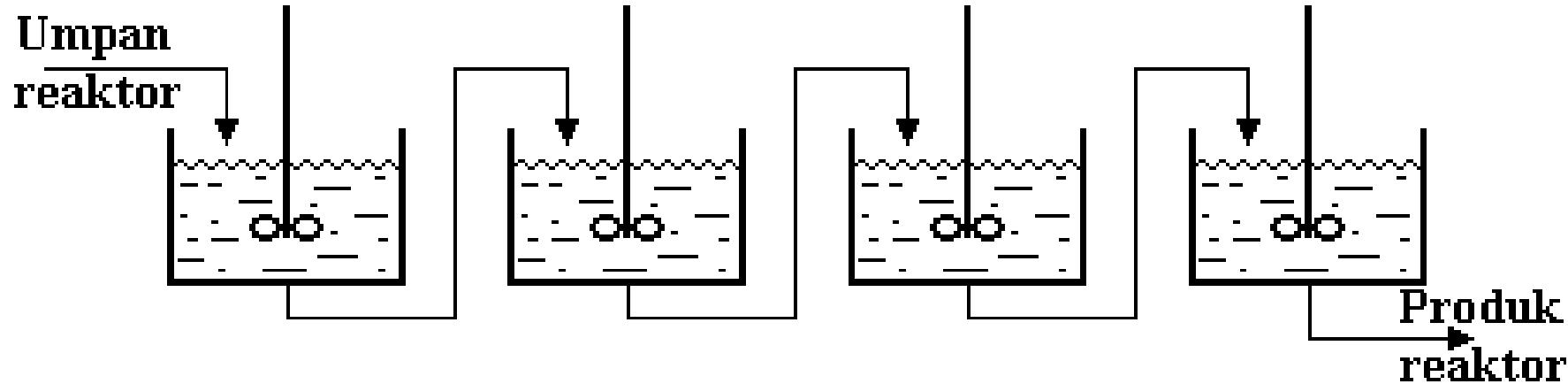
PRODUK → PRODUK SAMPING

$$r_3 = k_3 \cdot C_{PRODUK}^{a_3}$$

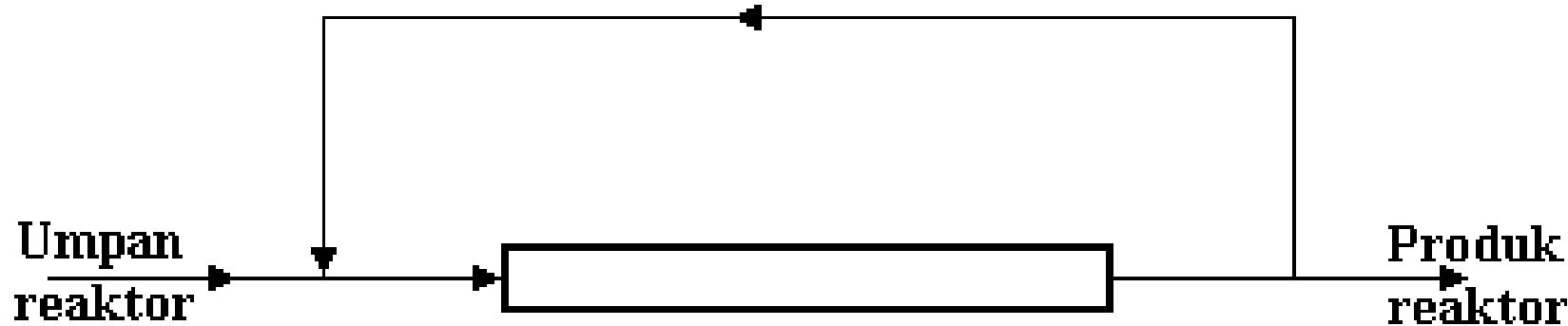
# Reaksi Campuran paralel dan Seri dengan Produk Samping

- Untuk selektivitas tinggi
  - $a_1 > a_2$ , dipilih reaktor batch/plug flow
  - $a_1 < a_2$ , dipilih reaktor kontinyu
- Reaksi seri dengan produk samping memilih reaktor plug flow
- Gabungan plug flow reaktor dengan reaktor kontinyu dipilih untuk selektivitas keseluruhan terbaik
- Kombinasi seri reaktor plug flow dengan reaktor kontinyu diberikan dalam gambar c dan d slide berikut

## Pilihan reaktor untuk reaksi campuran paralel dan seri

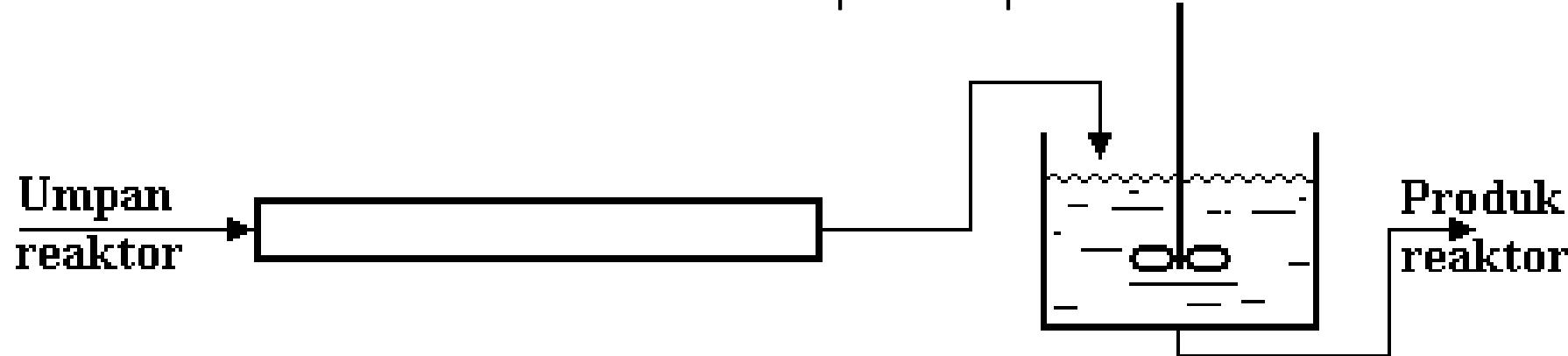


**(a) Rangkaian reaktor tangki berpengaduk kontinu**

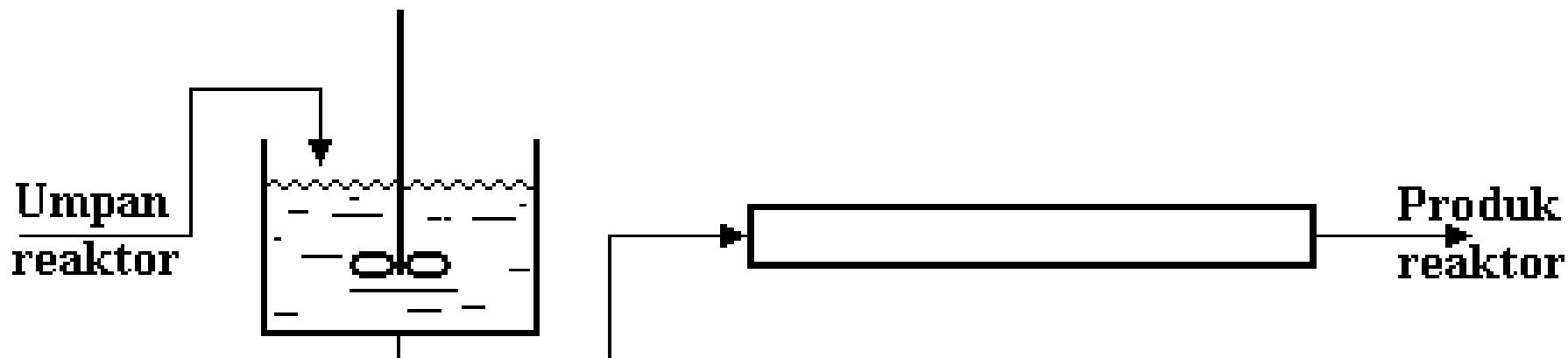


**(b) Plug flow reaktor dengan daur ulang**

Pilihan reaktor untuk reaksi campuran paralel dan seri



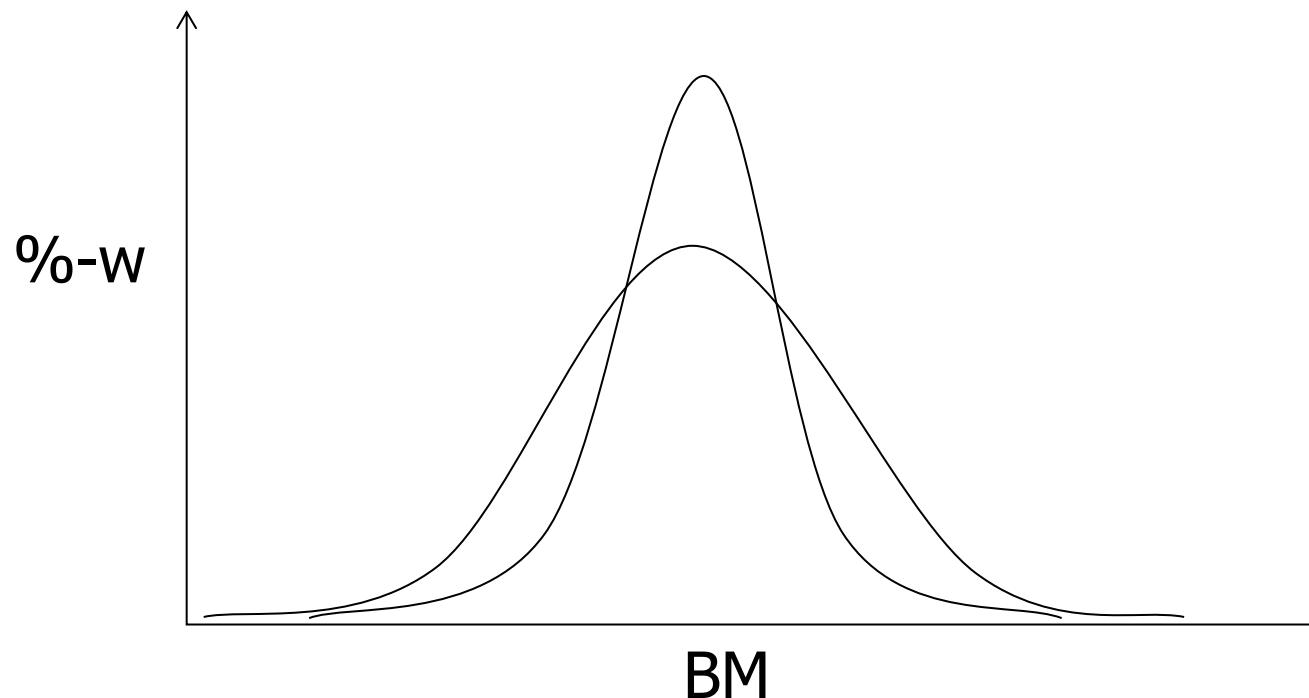
(c) Plug flow reaktor diikuti reaktor tangki ideal



(d) Reaktor tangki ideal diikuti plug flow reaktor

# Reaksi Polimerisasi

- Polimer dikarakterisasi oleh distribusi BM
- Pemilihan reaktor untuk mendapatkan distribusi BM sempit



# Reaksi Polimerisasi

- Dalam reaktor batch dan plug flow semua molekul mempunyai waktu tinggal sama, tanpa pengaruh terminasi semua tumbuh mendekati panjang rantai yang sama, menghasilkan distribusi BM sempit
- Dalam reaktor kontinyu, distribusi BM lebar karena terjadi distribusi waktu tinggal

# Reaksi Polimerisasi

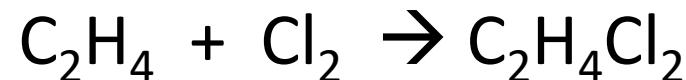
- Proses terminasi dipengaruhi oleh konsentrasi radikal bebas, yang sebanding dengan konsentrasi monomer
- Untuk reaktor batch dan plug flow konsentrasi radikal bebas dan monomer menurun, hal ini akan membentuk panjang rantai dengan waktu tinggal yang lebih lama, akan menyebabkan terbentuknya distribusi BM lebar
- Reaktor kontinyu menjaga konsentrasi yang lebih merata dari monomer maka terjadi laju terminasi rantai yang konstan. Hasilnya distribusi BM sempit

# Konsentrasi dalam Reaktor

- Pengaruh konsentrasi dalam reaktor perlu dipertimbangkan
- Jika lebih dari 2 reaktan dalam reaktor, diperlukan ekses salah satu reaktan
- Kadang diperlukan material “inert” ke dalam reaktor
- Kadang diperlukan daur ulang produk yang tak diinginkan

# Reaksi Tunggal Irreversibel

contoh



- Ekses salah satu reaktan dapat mendorong ke arah konversi total
- Ekses etilen digunakan untuk mengkonversi total khlor

# Reaksi Tunggal Reversibel

## Penerapan Prinsip Le Chatelier's

- Rasio Umpan, konversi dapat dinaikkan dengan ekses salah satu umpan
- Konsentrasi Inert, material inert misalnya: pelarut atau gas
- Pengambilan Produk selama Reaksi Berlangsung

# Konsentrasi Inert dalam reaksi reversible

a. jumlah mol umpan < produk,

Penambahan inert  $\rightarrow$  konversi kesetimbangan naik

reaksi : $\text{UMPAN} \leftrightarrow \text{PRODUK1} + \text{PRODUK2}$

b. jumlah mol umpan > produk,

penurunan inert  $\rightarrow$  konversi kesetimbangan naik

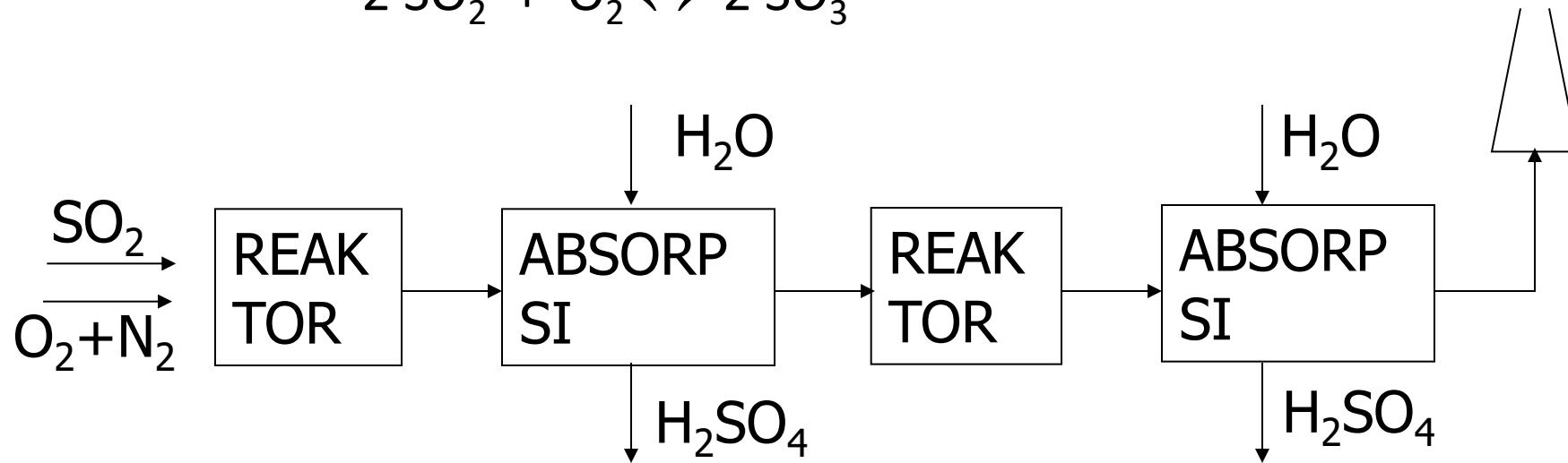
reaksi : $\text{UMPAN1} + \text{UMPAN2} \leftrightarrow \text{PRODUK}$

c. jumlah mol umpan = produk,

Konsentrasi inert tidak berpengaruh terhadap konversi

# Pengambilan Produk Selama Reaksi

Contoh: Reaksi dan pemisahan dalam pembuatan asam sulfat



SO<sub>3</sub> dipisahkan secara absorpsi, yang menyebabkan kesetimbangan bergeser ke kanan dan terjadi konversi tinggi

# Reaksi Paralel menghasilkan Produk Samping

- Untuk selektivitas maksimum diperlukan minimasi persamaan

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_2}{k_1} \cdot C_{UMPAN_1}^{a_2 - a_1} \cdot C_{UMPAN_2}^{b_2 - b_1}$$

- Untuk minimasi  $r_2/r_1$  dapat digunakan ekses umpan1 atau umpan2
  - Jika  $(a_2 - a_1) > (b_2 - b_1)$ , digunakan ekses umpan2
  - Jika  $(a_2 - a_1) < (b_2 - b_1)$ , digunakan ekses umpan1

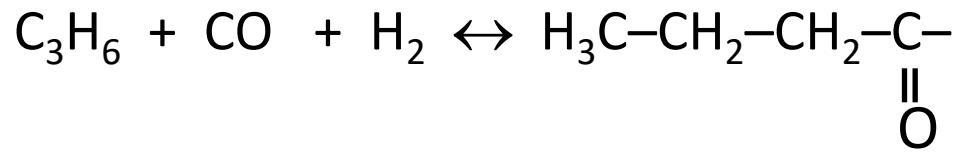
# Reaksi Paralel menghasilkan Produk Samping

- Untuk reaksi berikut

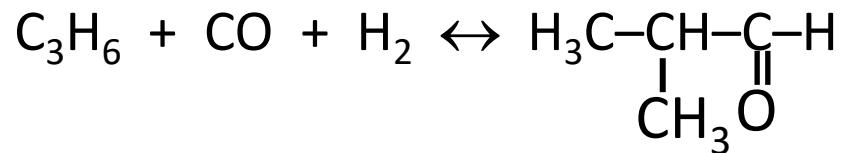


Jika ada inert, maka penurunan konsentrasi inert akan menurunkan produk samping

- Contoh: reaksi OXO untuk produksi C4-alkohol



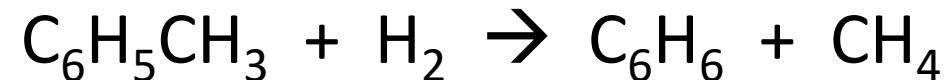
n-butyraldehid



iso-butyraldehid

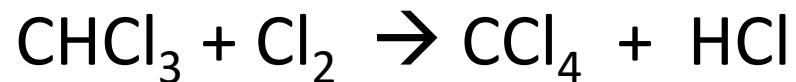
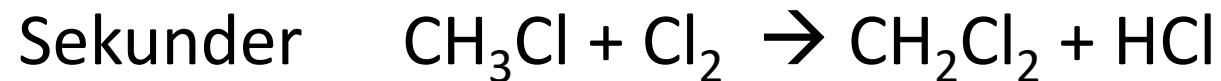
n-isomer lebih berharga, daur ulang isomer dapat menekan pembentukannya

# Reaksi Seri menghasilkan Produk Samping



- Ekses  $\text{H}_2$  yang besar ( $\text{H}_2/\text{toluene}$ ) = 5/1
- Ekses  $\text{H}_2$  mendorong reaksi primer
- Menghambat reaksi sekunder, karena mengurangi konsentrasi produk benzen dan menggeser reaksi sekunder ke kiri

# Reaksi Paralel dan Seri menghasilkan Produk Samping



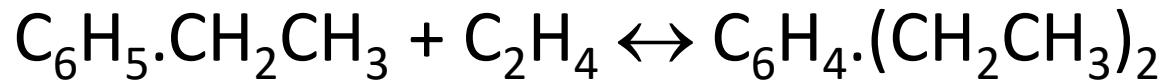
Reaksi sekunder seri terhadap klorometan, tetapi paralel terhadap  $\text{Cl}_2$

# Reaksi Paralel dan Seri menghasilkan Produk Samping

- Ekses besar Metan (10:1)  $\text{CH}_4/\text{Cl}_2$  digunakan untuk menekan kehilangan selektivitas
- Pengaruh metan:
  - Hanya terlibat pada reaksi primer ekses metan mendorong reaksi primer
  - Pengenceran produk khlorometan akan menghambat reaksi sekunder

# Reaksi Paralel dan Seri menghasilkan Produk Samping

- Contoh: Produksi etil benzen dari benzen dan etilen



Dietilbenzen (DEB) didaur ulang ke reaktor untuk menghambat pembentukan polietilbenzen

# Temperatur Reaktor

## 1. Reaksi Tunggal

### a. Reaksi Endotermik

Prinsip Le Chatelier's:

- T tinggi meningkatkan konversi
- Meningkatkan laju reaksi
- Menurunkan volume reaktor

Dipilih T tinggi dengan pertimbangan keamanan bahan konstruksi dan katalis

# Temperatur Reaktor

## 1. Reaksi Tunggal

### b. Reaksi Eksotermik

- Reaksi Irreversible

Dipilih  $T$  setinggi mungkin dengan pertimbangan bahan konstruksi, umur katalis, faktor keamanan (safety) untuk memperkecil ukuran reaktor

- Reaksi Reversible

$T$  rendah mengurangi laju reaksi, menaikkan volume reaktor

# Temperatur Reaktor

## 1. Reaksi Tunggal

Catatan untuk Reaksi Eksotermik:

- Pada awal reaksi dipilih  $T$  tinggi sampai dicapai reaksi kesetimbangan
- Dapat meningkatkan laju reaksi
- Setelah kesetimbangan temperatur diturunkan untuk mencapai konversi maksimum
- Untuk reaksi reversible, reaksi eksotermik, temperatur ideal menurun dengan kenaikan konversi

# Temperatur Reaktor

## 2. Reaksi Banyak

- Keberhasilan reaksi primer berdampak positif karena mengecilkan volume reaktor. Hal ini dapat dipergunakan untuk reaksi banyak, dimana keberhasilannya adalah selektivitas maksimum

Catatan:  $k_1, k_2$  bertambah oleh temperatur

- Jika  $k_1$  bertambah lebih cepat dari  $k_2$ , operasi dipilih pada  $T$  tinggi (perlu pertimbangan bahan konstruksi → safety!!)
- Jika  $k_2$  bertambah lebih cepat dari  $k_1$ , operasi pada  $T$  rendah (perlu pertimbangan capital cost pada  $T$  rendah memperbesar reaktor, meskipun selektivitas meningkat!!)
- Pertimbangan ekonomi adalah penurunan produk samping, namun biaya kapital meningkat

# Kontrol Temperatur

Pilihan pada reaktor adiabatik karena murah dan disain sederhana.

Namun jika tidak memungkinkan oleh kenaikan temperatur reaksi eksotermik dapat dipilih beberapa cara:

- a. Perpindahan panas tak langsung, perpindahan panas internal atau eksternal
- b. Cold Shot/Hot shot
  - injeksi umpan segar dingin (cold fresh feed) langsung ke reaktor pada titik antara (intermediate) disebut cold shot, untuk reaksi eksotermik
  - Untuk reaksi endotermik, umpan segar dipanaskan terlebih dahulu dan dimasukan pada titik antara (pra pemanasan)

# Kontrol Temperatur

- c. Pembawa panas (Heat Carrier), Laju alir massa ( $\text{kg.s}^{-1}$ ) Specific Heat Capacity ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Bahan inert dapat ditambahkan bersama umpan reaktor untuk menambah laju alir kapasitas panas (Heat Capacity), yaitu: Laju alir masa produk ( $\text{kg.s}^{-1}$ ) dan Kapasitas panas jenis ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), dan menurunkan kenaikan temperatur untuk reaksi eksotermik, atau menurunkan temperatur jatuh (temperatur fall) untuk reaksi endotermik. Pembawa panas bila mungkin harus dari salah satu fluida proses

# Kontrol Temperatur

Keluaran reaktor perlu pendinginan cepat (quench)

Contoh: produk gas dari reaktor perlu pendinginan cepat, dapat dilakukan dengan dicampur cairan yang menguap ( $\lambda$ =latent heat). Penguapan cairan diperoleh dari pendinginan cepat gas. Cairan dapat didaur ulang atau air (inert).

Pendinginan cepat diperlukan untuk:

- Mencegah ekses pembentukan produk samping
- Produk reaktor sangat panas bersifat korosif, perlu bahan konstruksi khusus (mahal)
- Ekses pengotoran (fouling) dalam penukar panas konvensional

# Tekanan Reaktor

## 1. Reaksi Tunggal

- a. Untuk reaksi fasa gas, bila jumlah mol berkurang, dapat menurunkan volume
  - Untuk volume reaktor tetap, maka tekanan turun selama reaktan dikonversi menjadi produk. Kenaikan tekanan berakibat komposisi campuran gas bergeser ke arah volume lebih kecil
  - Jika reaksi melibatkan penurunan jumlah mol, tekanan dipilih setinggi mungkin dengan pertimbangan kompresor, konstruksi mekanik lebih kuat, faktor keselamatan (Biaya mahal)

# Tekanan Reaktor

## 1. Reaksi Tunggal

b. Untuk reaksi dengan jumlah mol hasil reaksi bertambah penurunan tekanan meningkatkan konversi reaktor pada tekanan rendah, laju reaksi menurun, sehingga memperbesar volume reaktor.

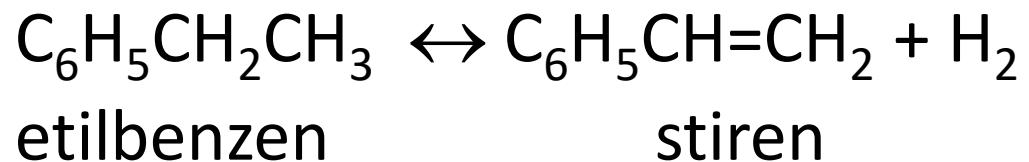
Solusi: pada awal reaksi tekanan tinggi sampai mencapai kesetimbangan, tekanan diturunkan untuk memperbesar konversi

# Tekanan Reaktor

## 1. Reaksi Tunggal

Penurunan tekanan dapat dilakukan dengan penambahan inert (Kukus)

Contoh: reaksi endotermik dengan penambahan mol



Konversi tinggi pada T tinggi dan P rendah. Penurunan P dengan kukus lewat jenuh (superheated steam) sebagai pengencer (diluent),  $P < 1\text{ atm}$ . Kukus berfungsi mensuplai panas untuk reaksi dan sebagai diluent

# Tekanan Reaktor

## 1. Reaksi Banyak Menghasilkan Produk samping

- Perlu pemilihan tekanan untuk mengurangi Laju reaksi sekunder
- Peningkatan selektivitas perlu perubahan tekanan sistem atau memasukan diluent

### Catatan:

- Untuk reaksi fasa cair, pengaruh tekanan pada selektivitas dan volume reaktor kurang berarti
- Lebih dipilih mencegah penguapan produk
- Penguapan cairan dalam reaktor, dikondensasi dan dikembalikan ke reaktor (untuk membuang panas)
- Membiarakan penguapan salah satu komponen dalam reaksi reversible untuk menaikan konversi maksimum

# FASA REAKTOR

UMPAN → PRODUK

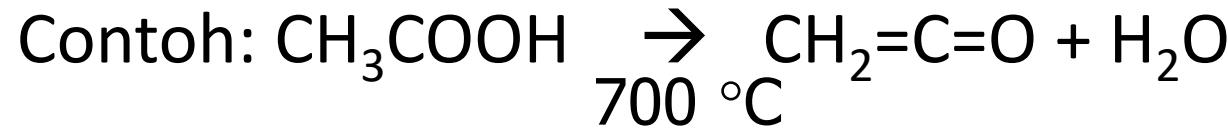
$$r = k \cdot C_{UMPAN}^a$$

- $C_{UMPAN}$  tinggi dalam fasa cair dapat dijaga dibandingkan gas
- Pemilihan temperatur, tekanan, dan fasa reaktor akan menentukan pengaruh kesetimbangan dan selektivitas operasi fasa cair lebih dipilih

# KATALIS

## 1. Katalis Homogen

Reaksi fasa uap/cair



Katalis homogen: trietyl phosphat umumnya katalis heterogen lebih dipilih.

Catatan: katalis homogen susah dipisahkan, susah didaur ulang. Kehilangan katalis adalah biaya material

# KATALIS

## 1. Katalis Heterogen (padat)

Dalam katalis heterogen:

- Reaktan berdifusi ke permukaan katalis dan diadsorpsi pada permukaan, terjadi reaksi
- Produk didesorpsi setelah reaksi

Katalis padat dapat berbentuk:

- Material katalis curah
- Katalis disupport, dimana material katalis aktif didispersi ke permukaan suatu padatan berpori

Contoh: reaksi katalitik fasa gas untuk produksi: metanol, amonia, asam sulfat, asam nitrat

# KATALIS

## 1. Katalis Heterogen (padat)

catatan:

- Efektif luas katalis sangat penting
- Reaksi terjadi pada permukaan katalis melalui adsorpsi dan desorpsi
- Bila ada gangguan permukaan akan berpengaruh pada laju katalis
- Katalis industri disupport pada material berpori yang menghasilkan luas permukaan aktif lebih besar/satuan volume reaktor
- Laju reaksi merupakan fungsi: Konsentrasi reaktan, temperatur dan tekanan

# KATALIS

## 1. Katalis Heterogen (padat)

- Difusi penghambat laju reaksi pada rentang temperatur
- Pengaruh konsentrasi dan temperatur adalah karakteristik difusi
  - a. Kontrol reaksi permukaan
  - b. Kontrol difusi

# KATALIS

## 1. Katalis Heterogen (padat)

- Katalis disangga pada material berpori (porous) yang menghasilkan permukaan aktif lebih besar per satuan volume reaktor
- Laju reaksi merupakan fungsi: Konsentrasi reaktan, temperatur dan tekanan
- Difusi penghambat laju reaksi (dalam rentang temperatur)
- Temperatur dan konsentrasi berpengaruh pada difusi

# KATALIS

## 1. Katalis Heterogen (padat)

Pengontrol laju reaksi berkatalis heterogen:

a. Kontrol reaksi permukaan

Jika reaksi permukaan pengontrol laju, konsentrasi reaktan dalam pelet dan aliran gas adalah sama

b. Kontrol difusi

Jika hambatan difusi melalui film gas mengelilingi partikel mengontrol reaksi, maka konsentrasi reaktor pada permukaan katalis lebih rendah dari aliran gas.

# KATALIS

## Contoh kontrol Difusi

Contoh persamaan:

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK

UMPAN  $\rightarrow$  PROD SAMPING

$$r_1 = k_1 \cdot C_{UMPAN}^{a_1}$$

$$r_2 = k_2 \cdot C_{UMPAN}^{a_2}$$

Catatan:

- Menurunkan konsentrasi umpan menghasilkan orde reaksi rendah
- Operasi dibawah kondisi kontrol difusi menaikan selektivitas
- Untuk reaksi dengan orde lebih tinggi sebaliknya !!

# DEGRADASI KATALIS

Kehilangan kinerja katalis terjadi disebabkan oleh:

a. Kehilangan secara fisik (katalis homogen)

- Memerlukan pemisahan
- Katalis heterogen dalam reaktor terfluidisasi terjadi atrisi partikel menyebabkan partikel katalis pecah, partikel-partikel kecil hilang

b. Endapan/deposit pada permukaan

Pembentukan deposit pada permukaan katalis padat menyebabkan hambatan fisik pada reaktan yang bereaksi.

Catatan: deposit karbon pada katalis → katalis dapat diregenerasi dengan oksidasi udara pada temperatur tinggi

# DEGRADASI KATALIS

## c. Sintering

Pada reaksi fasa gas temperatur tinggi, katalis padat dapat terjadi sintering material penyangga katalis.

Sintering: terjadi “molecular rearrangement” yang terbentuk di bawah titik leleh bahan yang mengakibatkan reduksi luas permukaan efektif katalis.

Bisa terjadi “hot spot” pada unggul katalis

## d. Teracuni (Poisoning)

Racun katalis, dapat bereaksi kimia dengan katalis membentuk ikatan kimia kuat dengan katalis. Reaksi tersebut mendegradasi katalis dan menurunkan keaktifan.

Racun umumnya pengotor dalam bahan baku/produk korosi

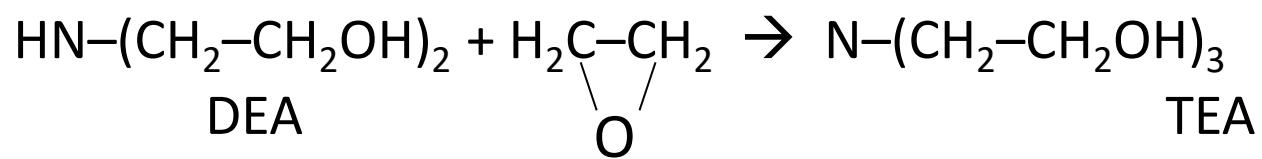
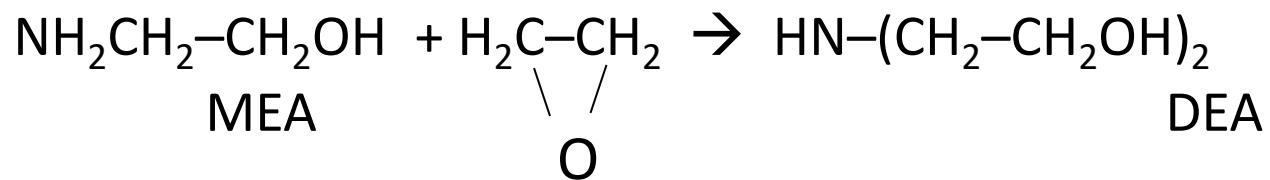
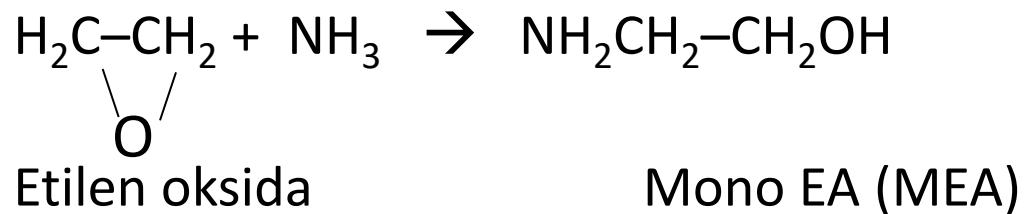
# DEGRADASI KATALIS

## e. Perubahan kimia

- Katalis tidak boleh mengalami perubahan kimia.
- Dalam praktek: katalis secara lambat mengalami perubahan kimia dan menurunkan aktivitas.

Catatan: laju hilang kemampuan katalis atau degradasi sangat mempengaruhi rancangan. Jika terjadi degradasi cepat, katalis perlu diregenerasi/diganti, yang berakibat kenaikan biaya dan menyebabkan masalah lingkungan!!!

# Contoh Produksi MonoEtanolAmin



Catatan:

- DEA dan TEA lebih berbahaya. Dipilih reaktor batch ideal/plug flow.
- Kontrol waktu tinggal dalam reaktor
- Waktu tinggal lama akan terbentuk DEA dan TEA

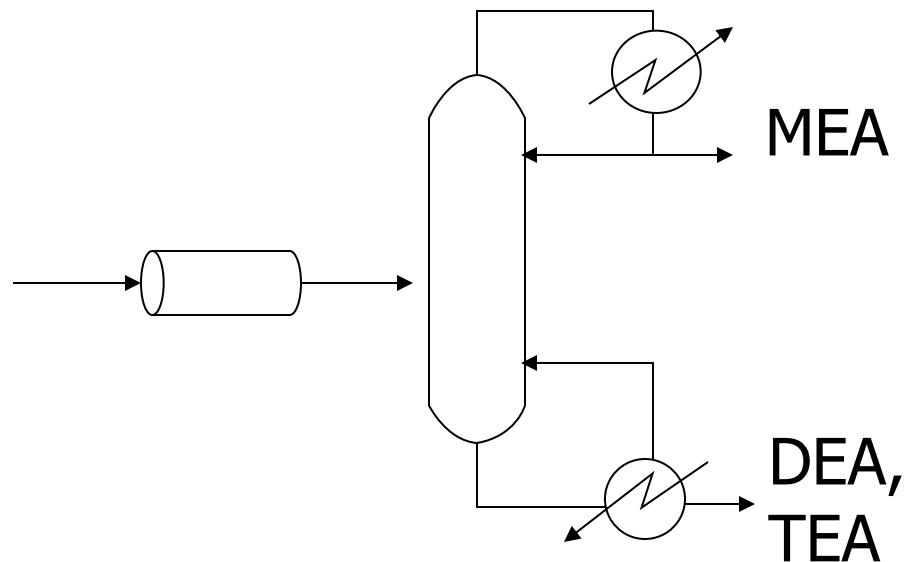
# Contoh Produksi MonoEtanolAmin

Laju reaksi:

$$r_1 = k_1 \cdot C_{EO}^{a_1} \cdot C_{NH_3}^{b_1}$$

- Ekses NH<sub>3</sub> berpengaruh meningkatkan C<sub>NH<sub>3</sub></sub>, akibatnya C<sub>EO</sub> turun dan menurunkan laju reaksi kedua dan ketiga
- Dalam praktek rasio NH<sub>3</sub>/EO = 10:1 , Yield 75% MEA, 21% DEA, 4% TEA
- Jika reaksi equimolar: Yield 12% MEA, 23% DEA, 65% TEA
- Dipilih Plug Flow reaktor dengan pemisahan produk secara distilasi

# Contoh Produksi MonoEtanolAmin



Tabel NBP Komponen

Komponen	NBP (K)
Amonia	240
EO	284
MEA	444
DEA	542
TEA	609

# Reaktor dalam Praktek

Pertimbangan dalam praktek suatu pilihan reaktor faktor-faktor yang signifikan diluar: temperatur, konsentrasi dan waktu tinggal

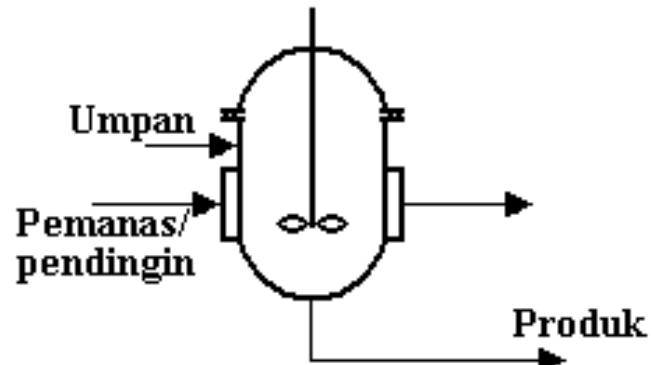
1. Reaktor Tangki berpengaduk, untuk reaksi yang melibatkan cairan
  - Reaksi homogen fasa cair
  - Reaksi heterogen gas-cair
  - Reaksi heterogen cair-cair
  - Reaksi heterogen padat-cair
  - Reaksi heterogen gas-padat-cair

# Reaktor dalam Praktek

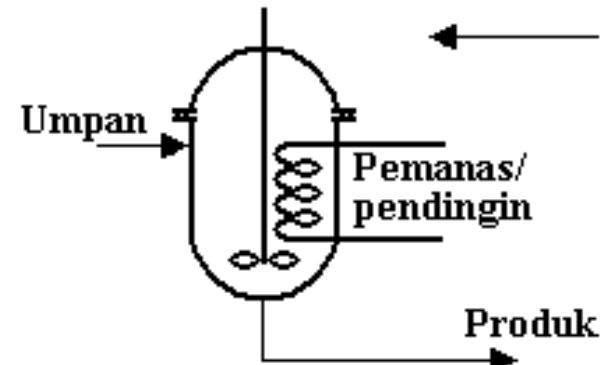
## 1. Reaktor Tangki berpengaduk

- Reaktor tangki berpengaduk dapat dioperasikan secara: batch, semibatch dan kontinyu
- Operasi batch dapat fleksibel untuk berbagai jenis produk dalam 1 peralatan
- Biaya pekerja tinggi
- Operasi kontinyu dapat dikontrol langsung secara otomatis, biaya pekerja lebih rendah
- Konsistensi lebih tinggi

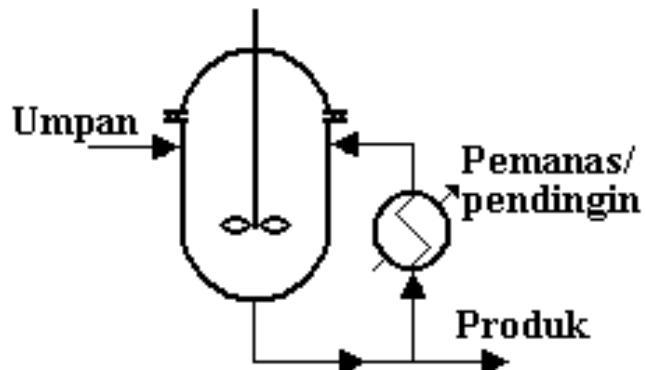
# Transfer Panas dari dan ke tangki berpengaduk



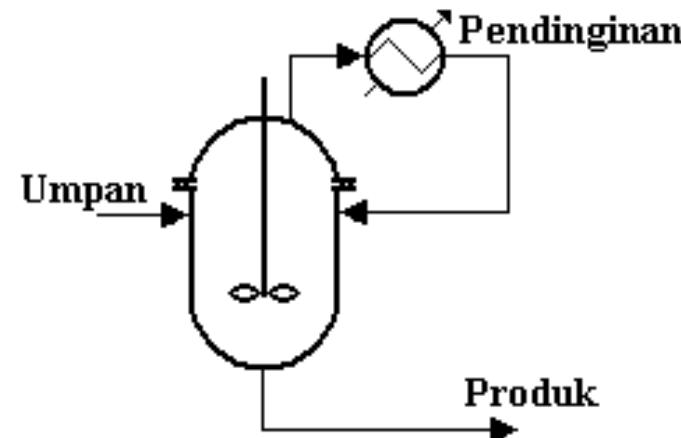
(a). melalui jaket eksternal.



(b). melalui kumparan internal.



(c). melalui penukar kalor eksternal.



(d). melalui refluks.

# Reaktor dalam Praktek

## 2. Reaktor Buluh (Tubular Reaktor)

### 2. Reaktor Buluh (Tubular Reaktor)

- Karakteristik reaktor buluh mendekati reaktor aliran sumbat.
- Reaktor tipe tersebut dapat mengontrol waktu tinggal secara hati-hati. Khususnya untuk reaksi banyak yang berlangsung seri

Catatan: Reaktor Buluh memiliki rasio luas permukaan/volume tinggi, menguntungkan:

- Bila diperlukan perpindahan panas lebih tinggi
- Mendekati kondisi isotermal
- Dapat untuk reaksi dengan tekanan tinggi
- Tidak dapat dipergunakan untuk reaksi multifasa

# Reaktor dalam Praktek

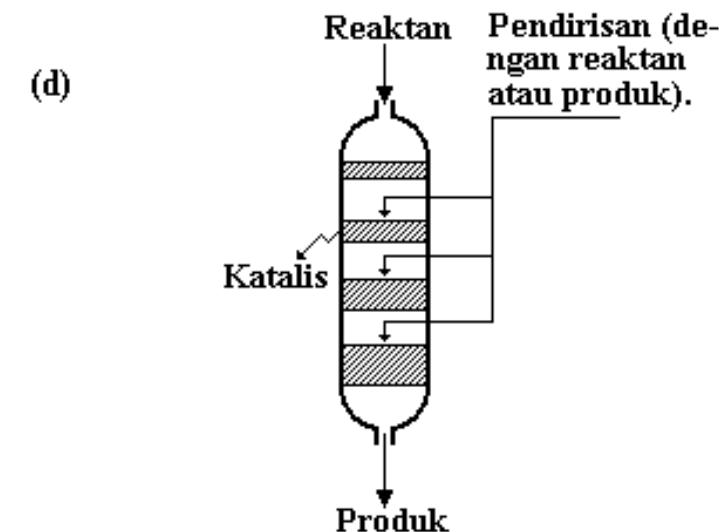
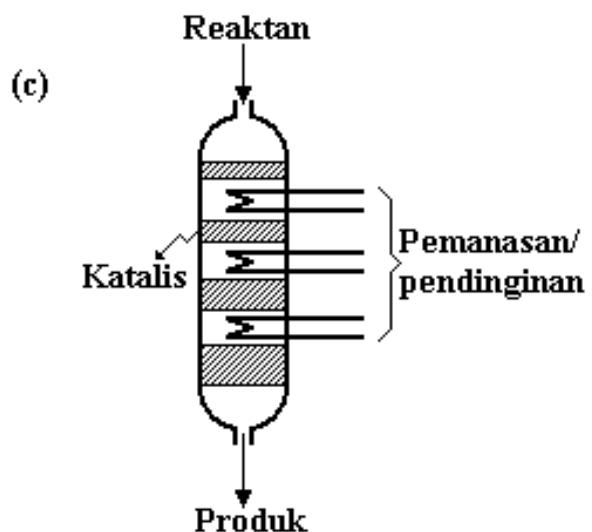
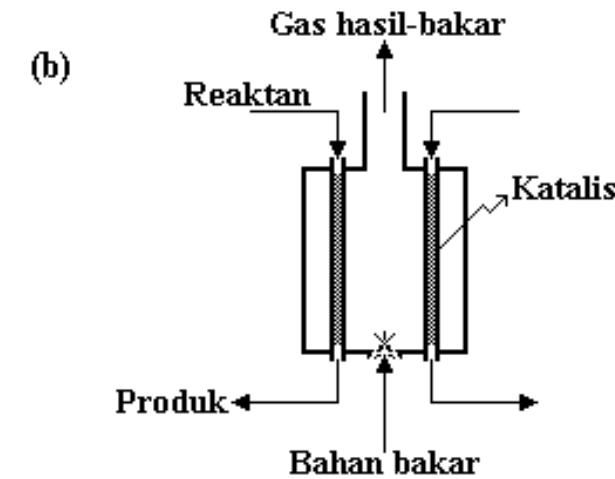
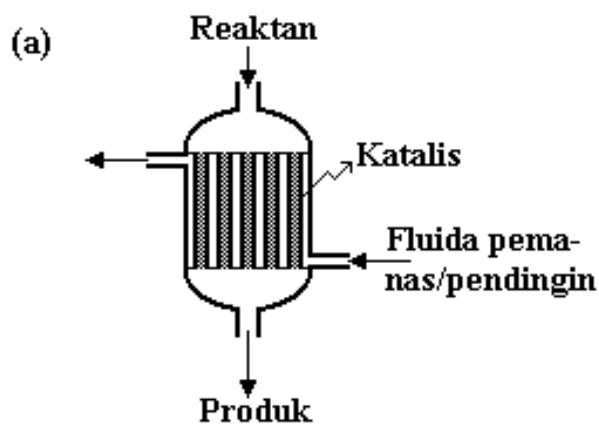
## 3. Reaktor Katalitik Unggun Tetap

### 3. Reaktor Katalitik Unggun Tetap

Empat kemungkinan penyusunan Reaktor Unggun Tetap :

- a. Bentuk seperti penukar panas shell and tube, dimana buluh berisi katalis
- b. Pipa tahan temperatur tinggi dalam furnace (tanur)
- c. Reaktor seri unggun adiabatik dengan pendingin/pemanas intermediate untuk mengontrol T
- d. Menggunakan injeksi langsung fluida untuk heat transfer (*cold-shot cooling*)

# Reaktor Katalitik Unggun Tetap (4 kemungkinan)



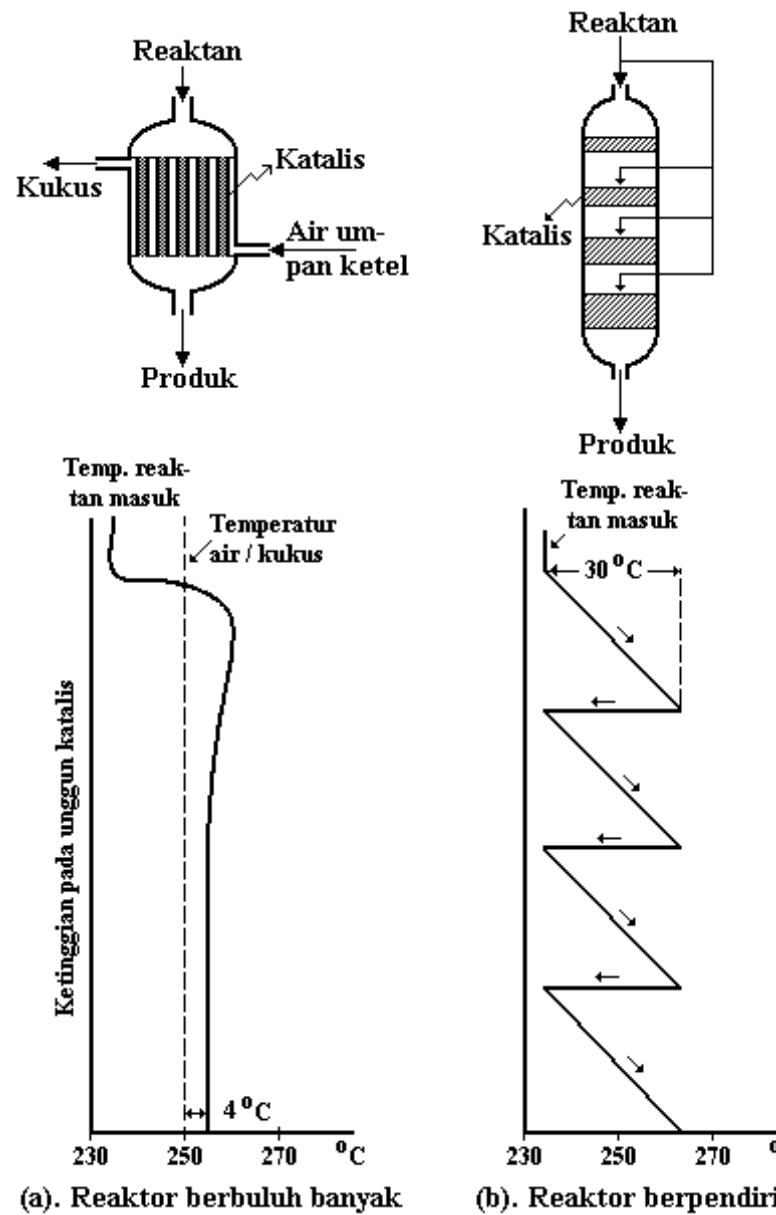
Contoh: Produksi Metanol dari Syngas ( $H_2$ , CO &  $CO_2$ ) katalis copper based dalam Reaktor buluh unggul tetap



Gambar a: Tipe reaktor cangkang buluh (shell&tube) yang menghasilkan kukus dalam cangkang. Profil T relatif merata (smooth) dalam reaktor

Gambar b: Reaktor menggunakan pendingin “Cold-Shot” untuk mencegah “over heating” yang mengakibatkan umur katalis pendek

## 2 alternatif rancangan reaktor untuk produksi metanol



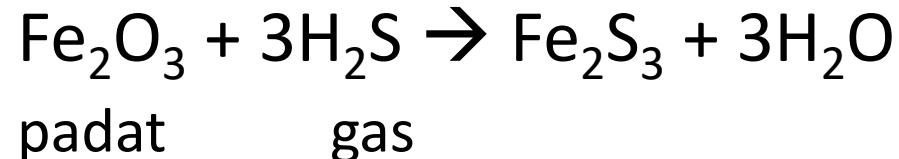
# Reaktor dalam Praktek

## 4. Reaktor Unggun Tetap tanpa Katalis

### 4. Reaktor Unggun Tetap tanpa Katalis

Contoh: reaksi gas/padat

Penghilangan H<sub>2</sub>S dalam gas bakar dengan reaksi Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Regenerasi Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan udara:



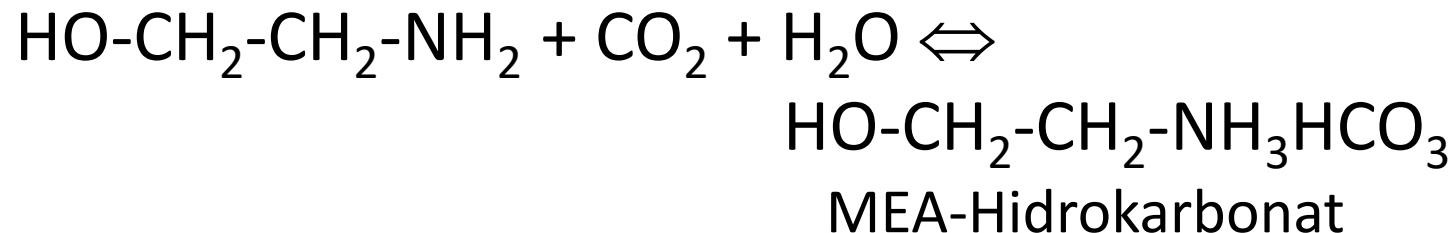
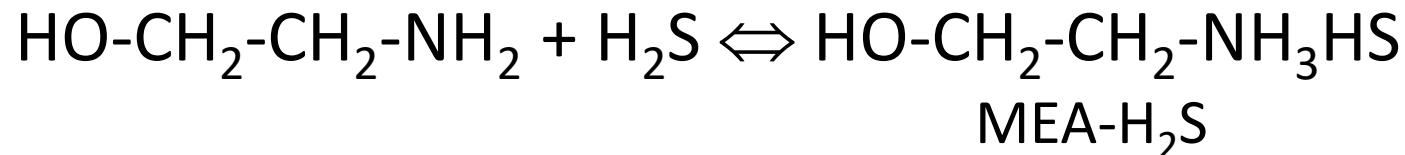
Digunakan 2 unggun tetap reaktor secara paralel, satu reaksi yang lain regenerasi

# Reaktor dalam Praktek

## 4. Reaktor Unggun Tetap tanpa Katalis

Contoh: reaksi gas/cair

H<sub>2</sub>S dan CO<sub>2</sub> dalam gas alam dihilangkan dengan absorpsi MEA dalam absorber



- Gas-gas dikeluarkan dari larutan MEA dalam stripper, gas diproses lanjut.
- MEA didaur ulang ke absorber

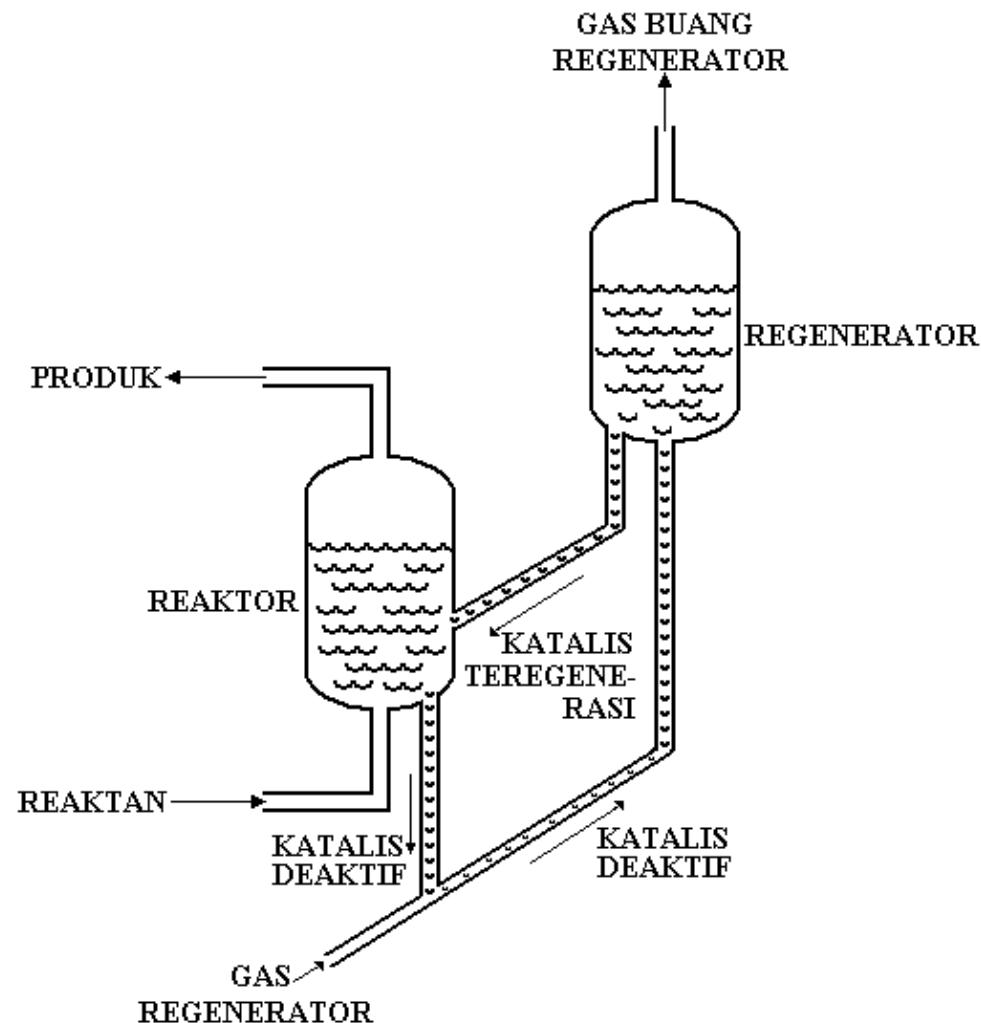
# Reaktor dalam Praktek

## 5. Reaktor Katalitik Unggun Tetap Terfluidisasi

(Fluidized-Bed Catalytic Reactor)

- Kinerja reaktor unggun terfluidisasi berada diantara model reaktor batch dan reaktor aliran sumbat
- Gambar slide berikut: perengkahan katalitik dalam pengolahan minyak bumi

Reaktor unggun terfluidakan memungkinkan katalis padat secara kontinu diregenerasi



# Reaktor dalam Praktek

## 6. Reaktor Unggun Terfluidisasi Non-Katalitik

### 6. Reaktor Unggun Terfluidisasi Non-Katalitik

Contoh: Pembakaran batu kapur



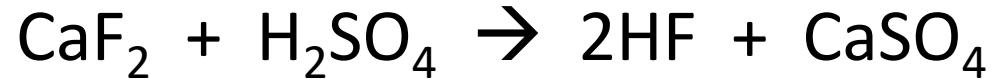
- Reaksi pada temperatur tinggi. Partikel terfluidisasi oleh aliran udara dan bahan bakar yang diumpulkan ke ungun dan terbakar

# Reaktor dalam Praktek

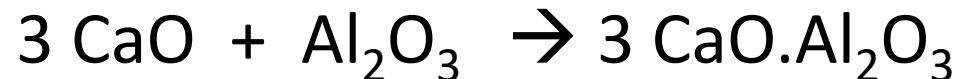
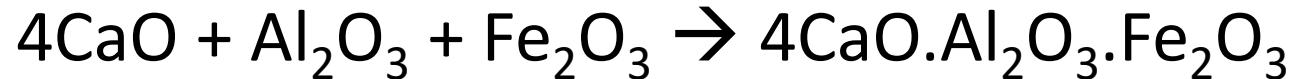
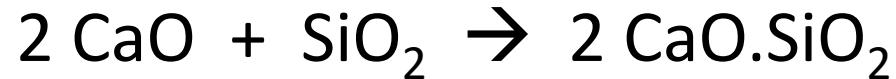
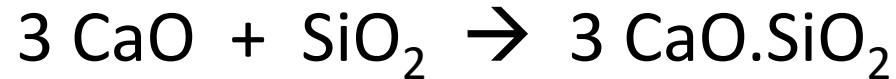
## 7. Tanur (Kiln)

- Reaksi padatan, pasta dan slurry material dapat dilaksanakan dalam tanur
- Tanur Putar: mendekati reaktor pipa sumbat
- Reaktor dilapisi bata tahan api (refractory), karena reaksi menggunakan api langsung.

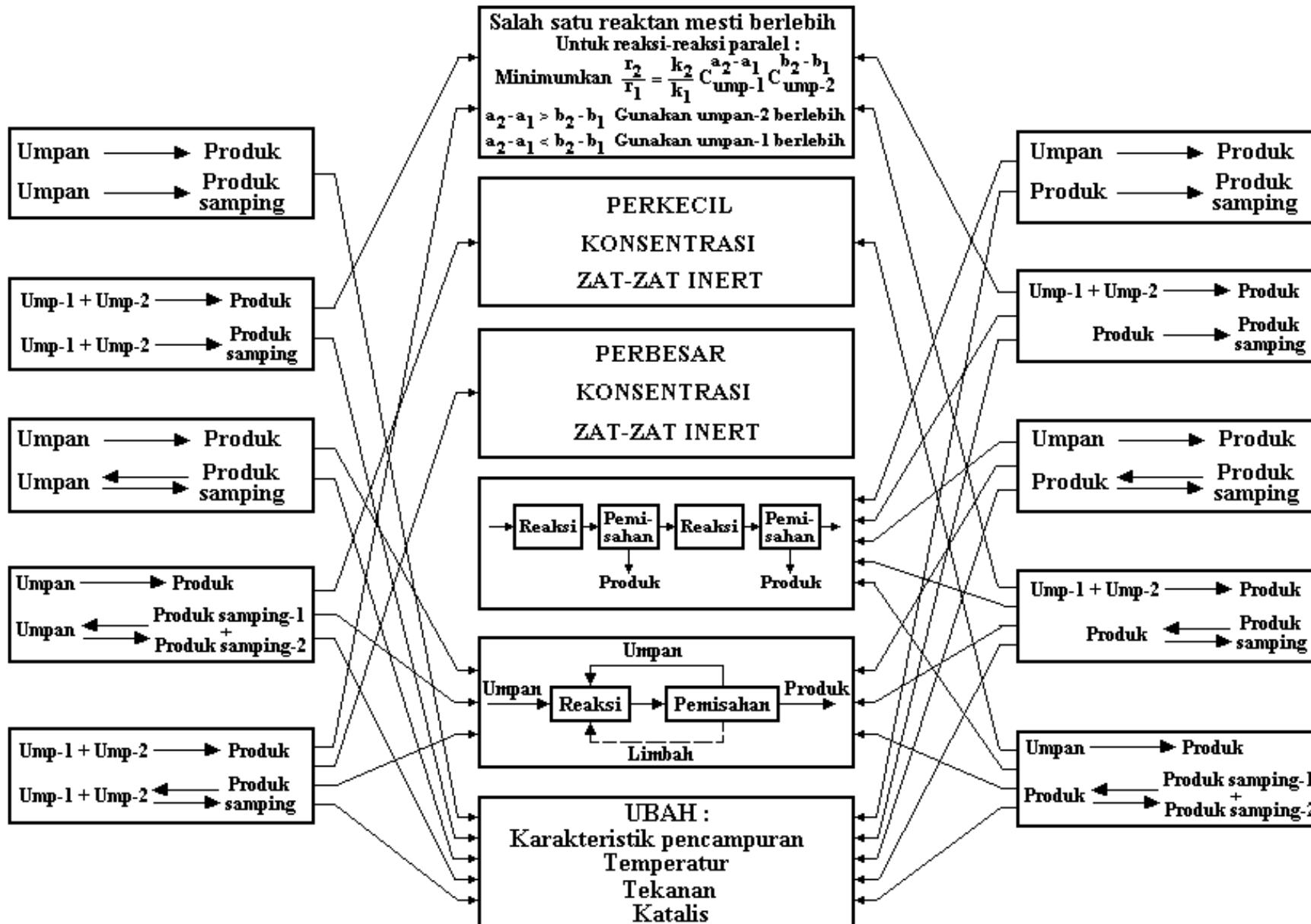
# Contoh Produksi HF



Contoh pembentukan semen



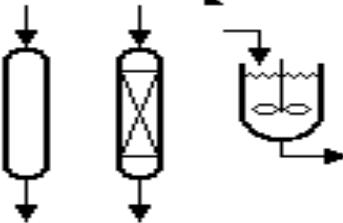
# Pemilihan reaktor untuk memaksimalkan selektifitas produk pada reaksi kompleks dengan by produk



# Pemilihan transfer panas dalam reaktor

Apakah Operasi Adiabatik  
dapat dilakukan ?.

Ya



Tidak

Apakah Perpindahan Kalor  
Tak Langsung Layak Dilakukan ?.

Ya

Butuh Temperatur Tinggi  
atau Fluks Kalor Besar ?.

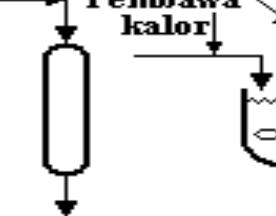
Ya



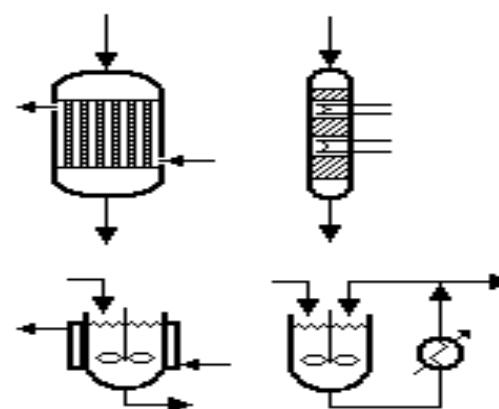
Tidak

Pembawa  
kalor

Pembawa  
kalor



Tidak



TERIMAKASIH