

# 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.

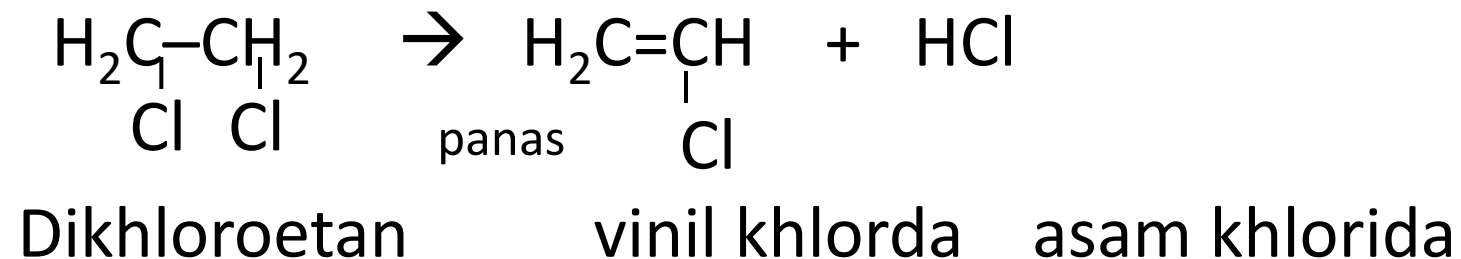
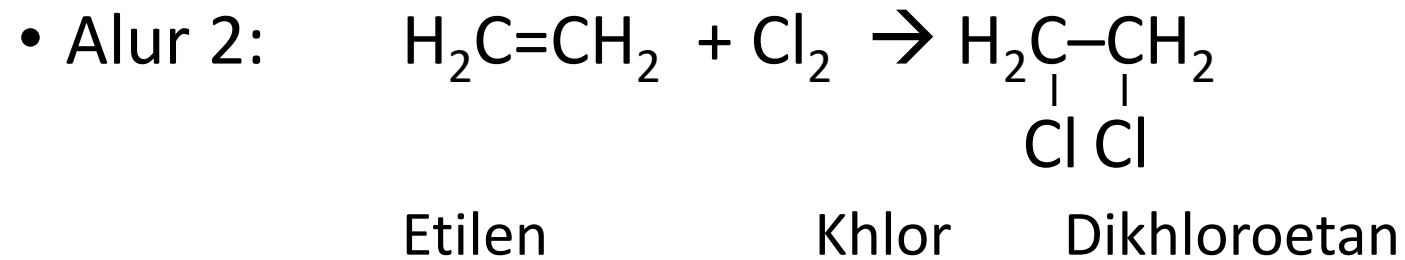
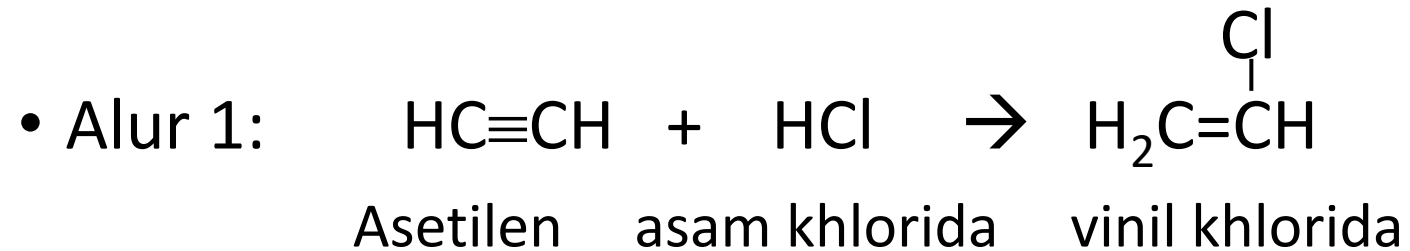
# Alur Reaksi

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

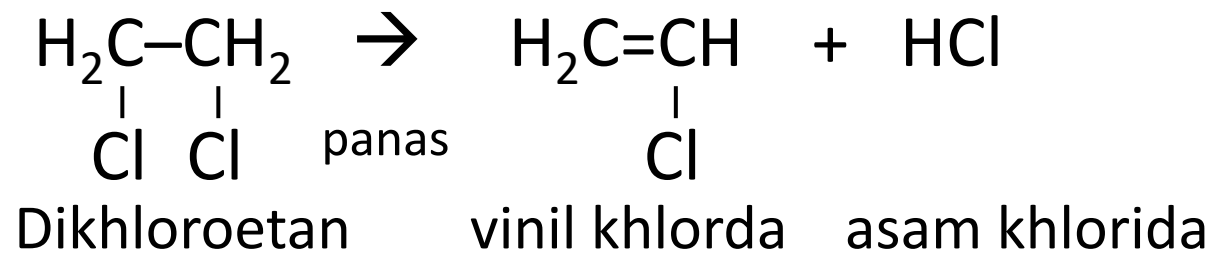
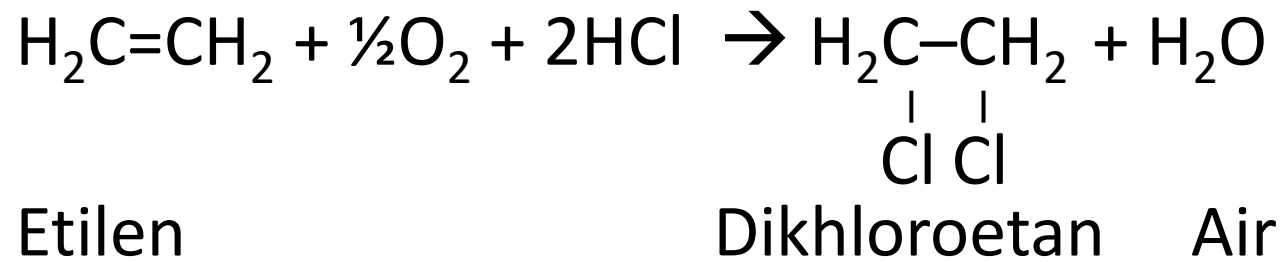
$$EP = \text{nilai produk} - \text{biaya bahan baku}$$

# Contoh Pemilihan Alur Reaksi Pembuatan Vinil Khlorda



# Contoh Pemilihan Alur Reaksi Pembuatan Vinil Khlorida

- 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 klorida	36	0,35
Khlor	71	0,21
Vinil klorida	62	0,42

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

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

**Alur 1 :**

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

**Alur 2 :**

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

tetapi jika produk ikutan HCl ternyata tak dapat dijual :

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

**Alur 3 :**

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



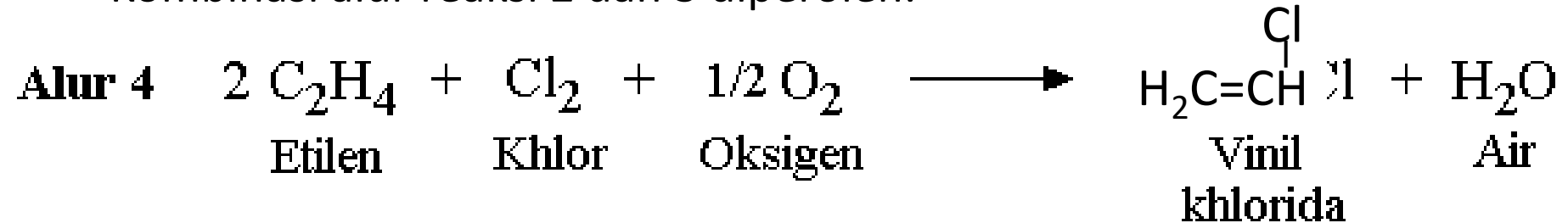
## Hasil Alur Reaksi 1, 2 & 3

- 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).

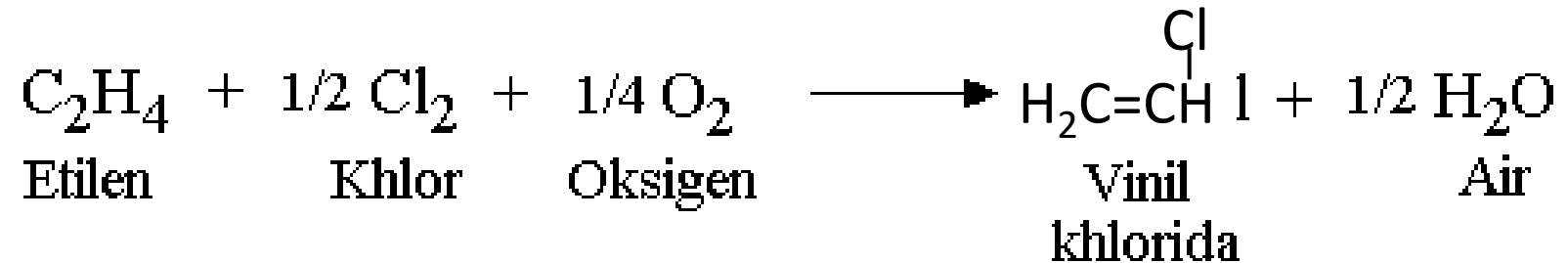
Catatan: Produk samping lebih baik tidak diproduksi.

# Alur Komersial VCM

- Kombinasi alur reaksi 2 dan 3 diperoleh:



atau :



- $$\begin{aligned} \text{EP} &= (62 \times 0,42) - (28 \times 0,53 + \frac{1}{2} \times 71 \times 0,21) \\ &= \underline{\$3,75 \text{ kmol}^{-1} \text{ produk vinil klorida}} \end{aligned}$$
- 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

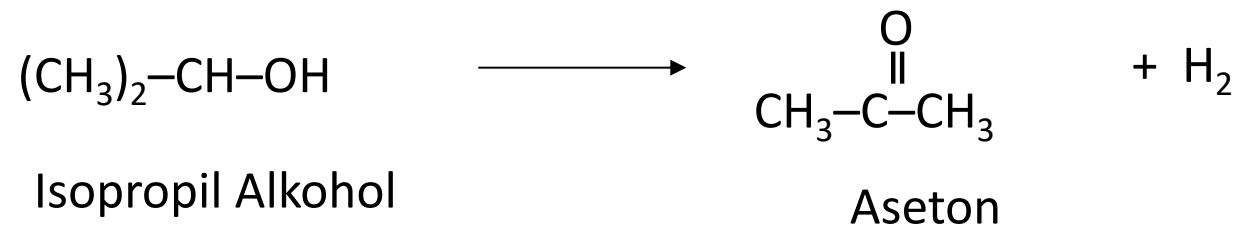
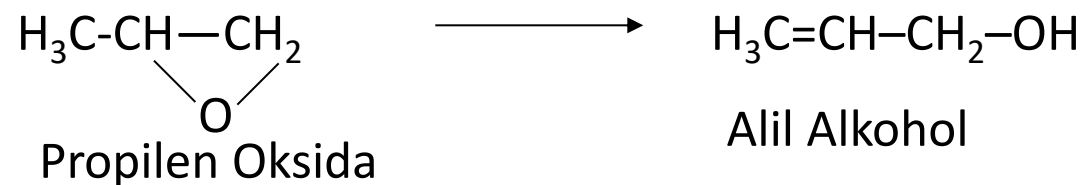
UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK + PRODUK SAMPING

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

Catatan: Hampir semua sistem reaksi melibatkan reaksi banyak

Contoh:



# Reaksi Komplek/Banyak, Paralel dengan Produk Sampling

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING

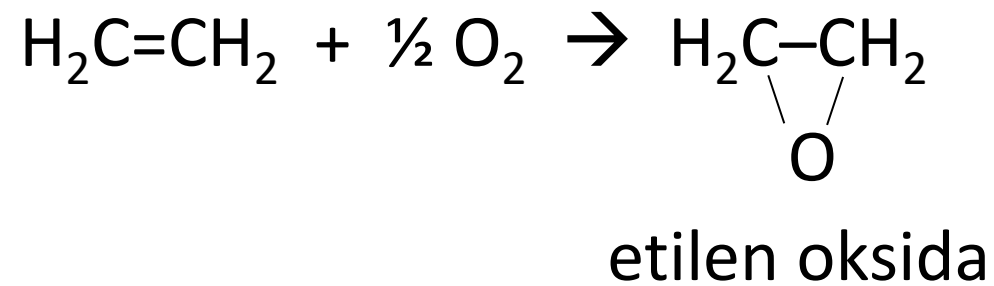
UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK + PRODUK SAMPING(1)

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 Sampling



# Reaksi Komplek/Banyak, Seri dengan Produk Samping

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK

PRODUK  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING

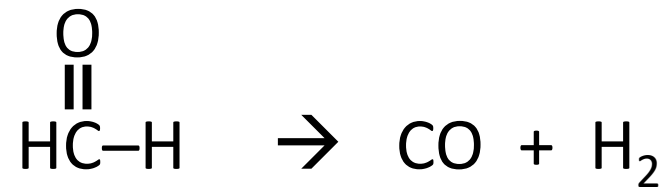
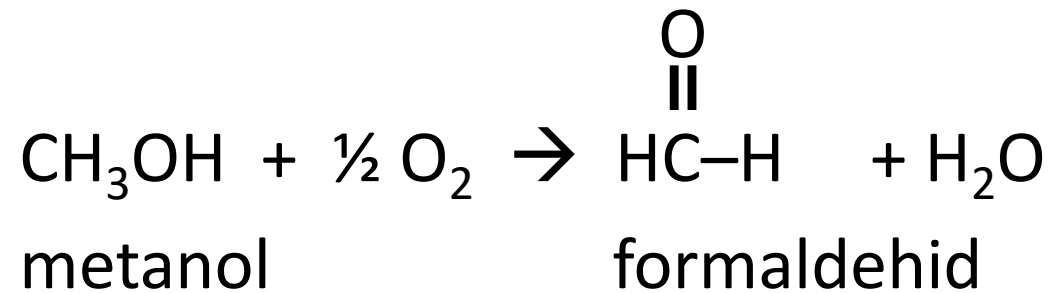
UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK + PRODUK SAMPING(1)

PRODUK  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING(2)  
+ PRODUK SAMPING(3)

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

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

## Contoh Reaksi Komplek/Banyak, Seri dengan Produk Samping





# Campuran Seri dan Paralel dengan Produk Samping

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING

PRODUK  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK

2 UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING(1)

PRODUK  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING(2)

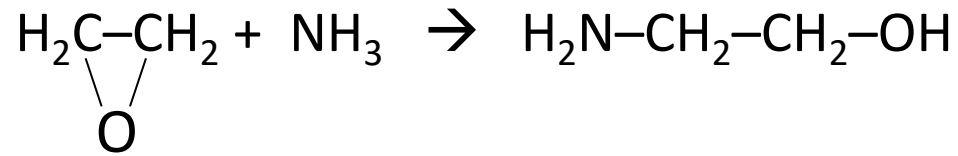
UMPAN(1) + UMPAN(2)  $\rightarrow$  PRODUK

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

PRODUK  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING(2)

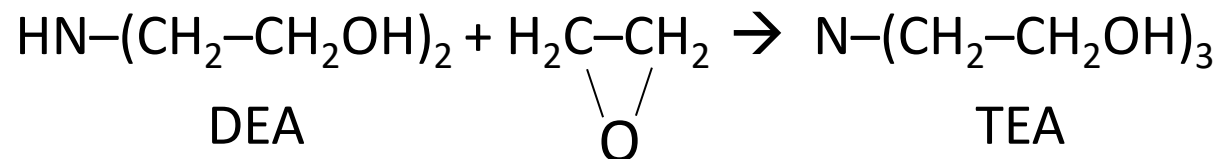
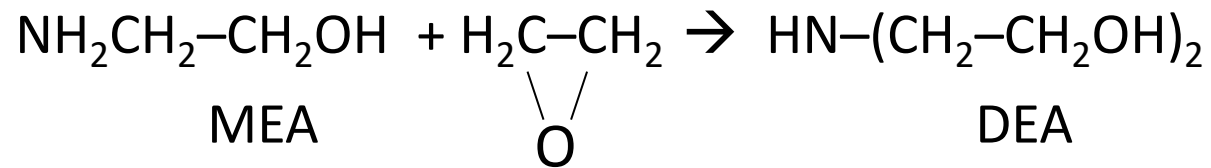
+ PRODUK SAMPING(3)

# 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:

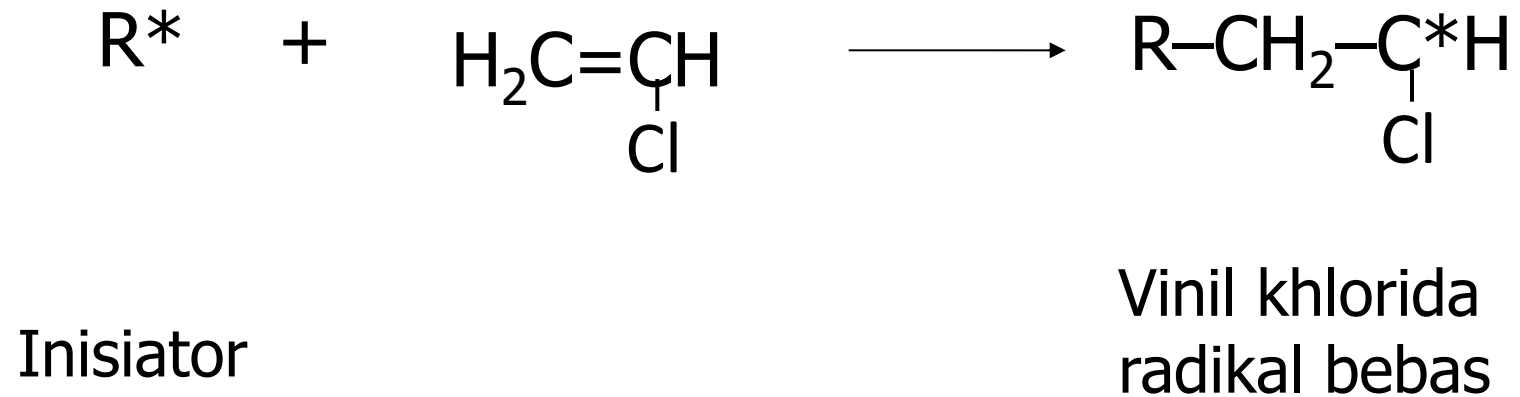
1. Polimerisasi Radikal Bebas (Free Radical Polymerization)  
Peroksida (radikal bebas)  $\rightarrow$  Inisiator membentuk radikal bebas  $\text{CH}_3^*$  atau  $\text{OH}^*$
2. Polimerisasi vinil khlorida

# 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

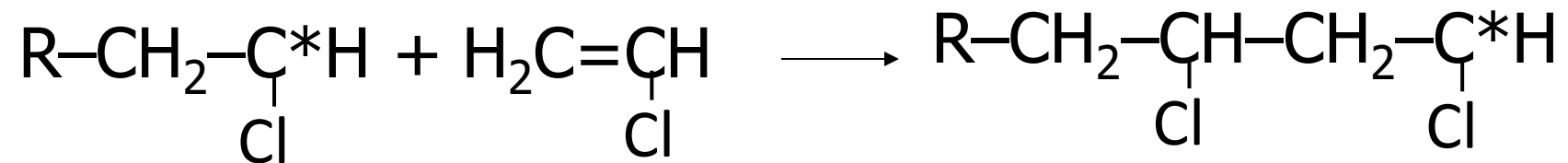
# Polimerisasi Vinil Klorida

- Tahap Inisiasi



# Polimerisasi Vinil Khlorida

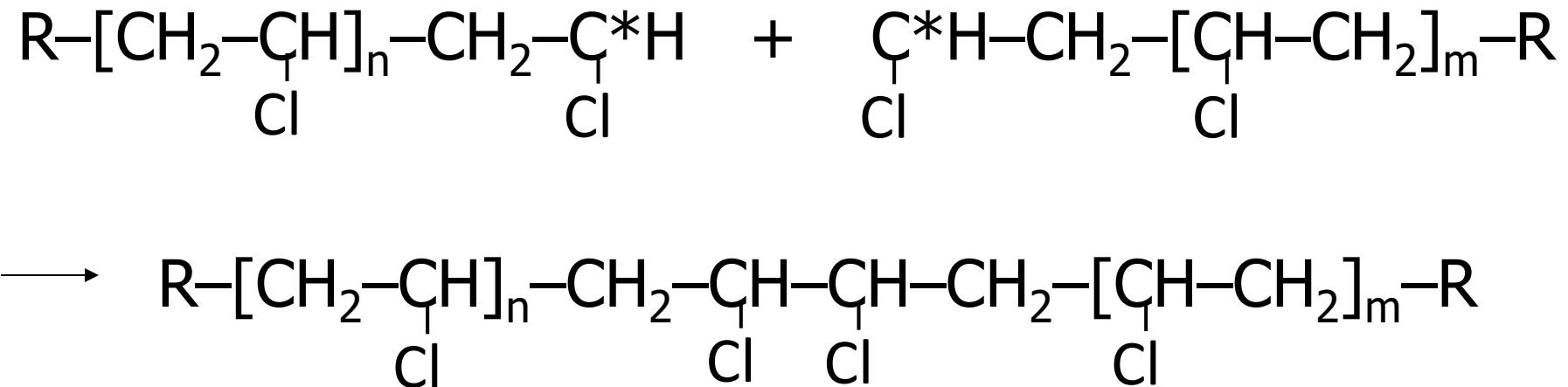
- Tahap Propagasi



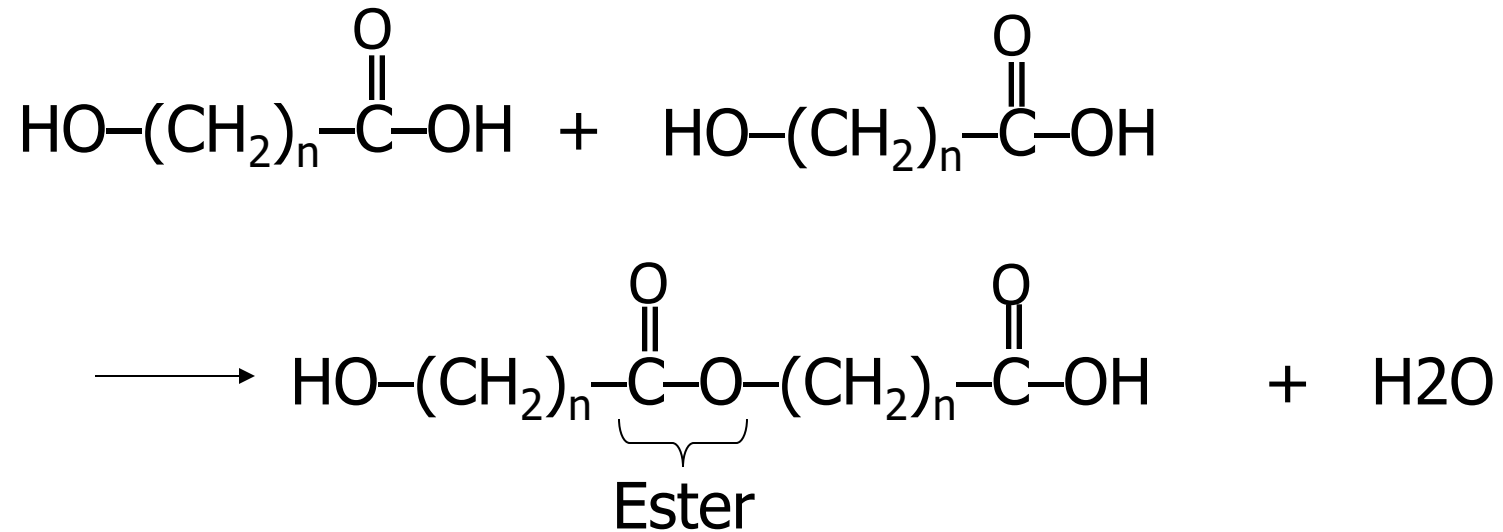
Dan seterusnya membentuk struktur molekul yang diinginkan dengan BM tinggi (> 80.000)

# Polimerisasi Vinil Khlorida

- 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

$$\text{konversi} = \frac{(\text{reaktan yang dikonsumsi dalam reaktor})}{(\text{reaktan yang diumpankan ke reaktor})}$$

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

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

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

# 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

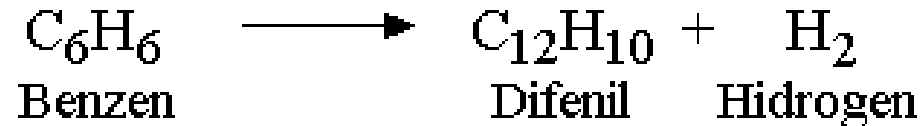
Produk Samping yang tak diinginkan :

- 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 hidradealkilasi toluen



Reaksi samping :



Komponen	Hidrogen	Metan	Benzen	Toluen	Difenil
$F_{i,\text{in}}^{\$}$ , kmol/jam	1858	804	13	372	0
$F_{i,\text{out}}^{\&}$ , 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 kontinu/sinambung (*Continuous Well-Stirred Model*)

Umpan/Produk masuk/keluar reaktor secara kontinu, reaktan tercampur sempurna, komposisi dan temperatur merata dalam reaktor

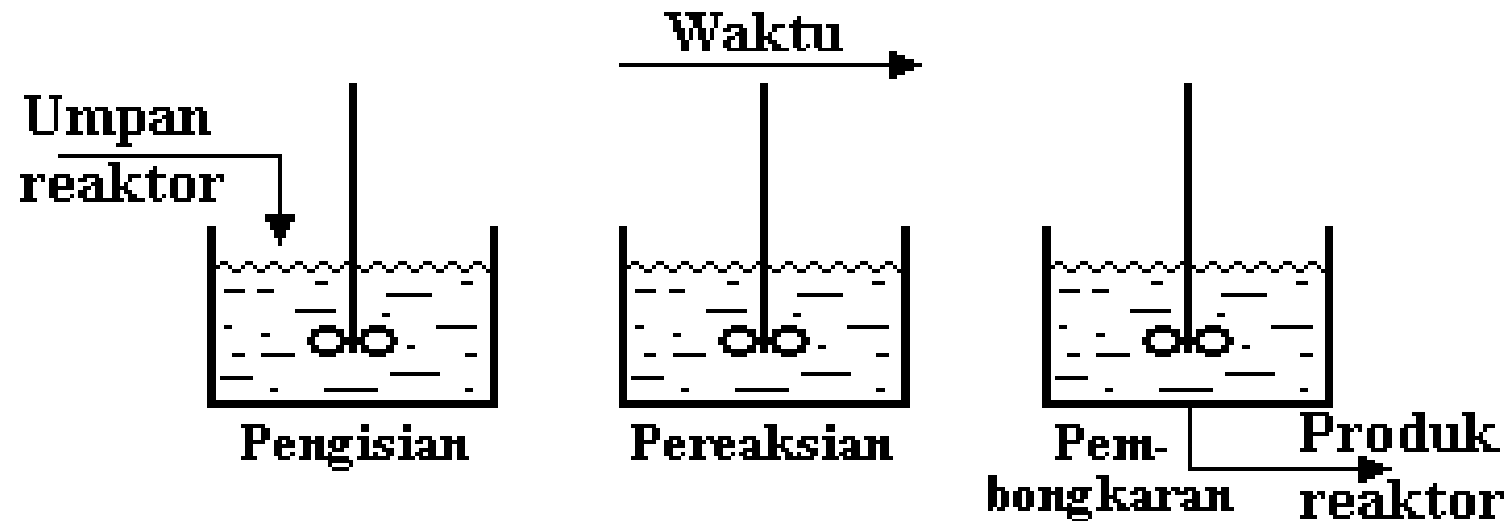
# Model Reaktor Ideal

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

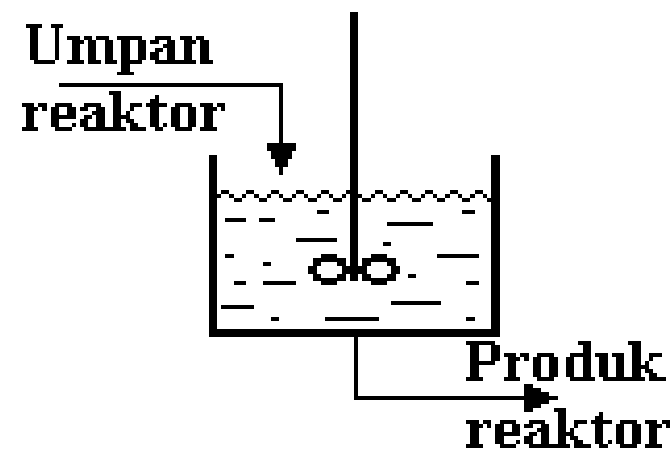
- Asumsi pencampuran sempurna sepanjang arah aliran
- Waktu tinggal dalam reaktor batch ideal sama dengan reaktor aliran sumbat
- Pendekatan operasi reaktor aliran sumbat dapat dengan seri reaktor kontinyu teraduk sempurna
- Semakin banyak jumlah reaktor dalam seri, semakin mendekati reaktor aliran sumbat



# Model reaktor untuk Perancangan Reaktor



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

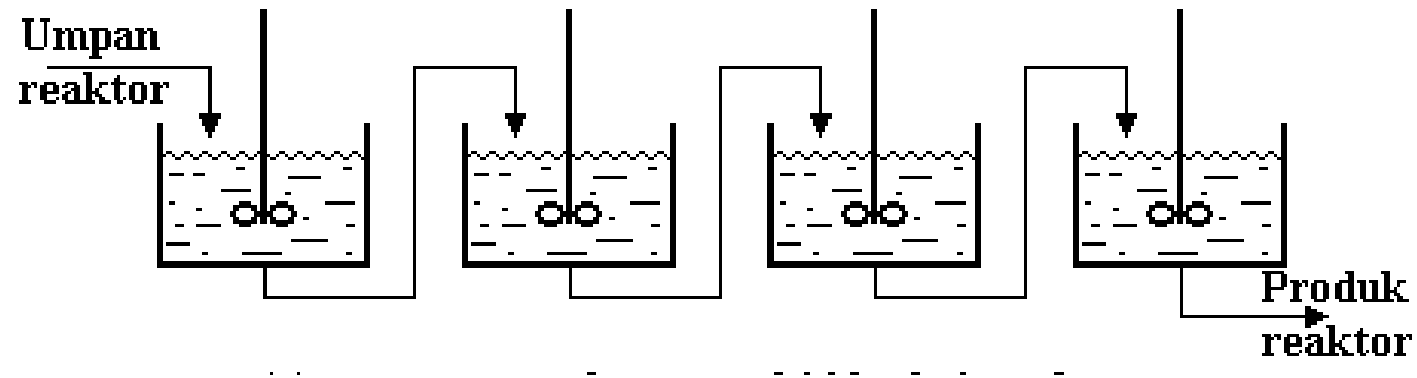


(b). model tangki ideal sinambung.

# 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



- Laju reaksi tinggi ditentukan konsentrasi tinggi dari umpan
- Reaktor kontinu teraduk sempurna
  - Umpan masuk reaktor diencerkan oleh produk
  - Laju reaksi dalam reaktor kontinu lebih rendah dibanding reaktor batch dan reaktor aliran sumbat
  - Reaktor kontinu 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/partaian’ 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 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)



$$r_1 = k_1 \cdot C_{\text{UMPAN}_1}^{a_1} \cdot C_{\text{UMPAN}_2}^{b_1}$$



$$r_2 = k_2 \cdot C_{\text{UMPAN}_1}^{a_2} \cdot C_{\text{UMPAN}_2}^{b_2}$$

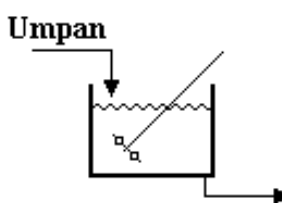
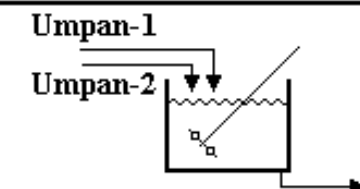
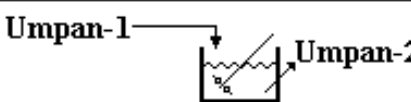
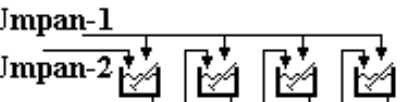
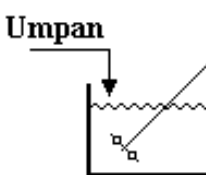
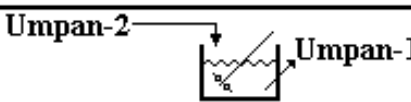
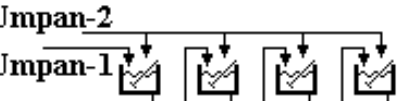
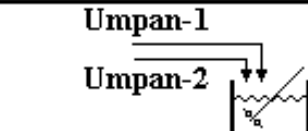
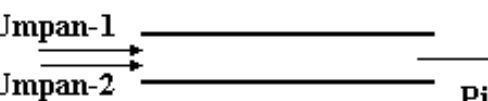
Rasio yang diminimasi:

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_2}{k_1} \cdot C_{\text{UMPAN}_1}^{a_2 - a_1} \cdot C_{\text{UMPAN}_2}^{b_2 - b_1}$$

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

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

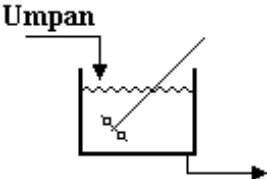
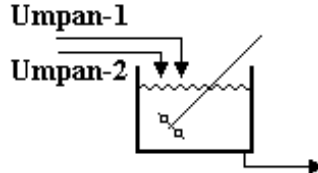
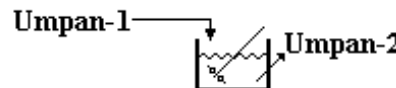
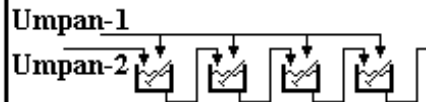
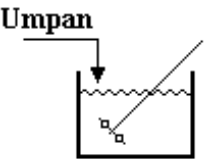
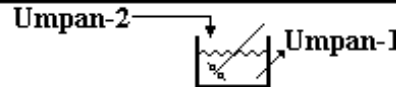
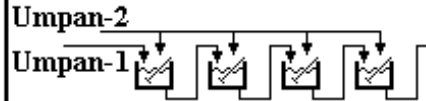
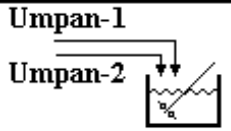
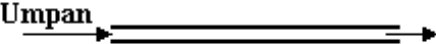
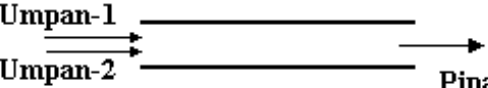
# Pilihan reaktor untuk sistem reaksi paralel

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	$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_2}{k_1} C_{\text{umpan}}^{a_2 - a_1}$	$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_2}{k_1} C_{\text{umpan-1}}^{a_2 - a_1} C_{\text{umpan-2}}^{b_2 - b_1}$
$a_2 > a_1$		$b_2 > b_1$  Tangki ideal sinambung
		$b_2 < b_1$  Semi Partaian  Semi Pipa ideal
$a_1 > a_2$	 Tangki ideal partaian	$b_2 > b_1$  Semi Partaian  Semi Pipa ideal
		$b_2 < b_1$  Tangki ideal partaian  Pipa ideal

## Pilihan reaktor untuk sistem reaksi paralel

Sistem Reaksi	<p>Umpan <math>\longrightarrow</math> Produk</p> <p>Umpan <math>\longrightarrow</math> Produk samping</p>	<p>Umpan-1 + Umpan-2 <math>\longrightarrow</math> Produk</p> <p>Umpan-1 + Umpan-2 <math>\longrightarrow</math> Produk samping</p>
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 $\longrightarrow$ 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	$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_2}{k_1} C_{\text{umpan}}^{a_2 - a_1}$	$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_2}{k_1} C_{\text{umpan-1}}^{a_2 - a_1} C_{\text{umpan-2}}^{b_2 - b_1}$
$a_2 > a_1$		$b_2 > b_1$ 
		$b_2 < b_1$  
$a_1 > a_2$		$b_2 > b_1$  
		$b_2 < b_1$ 
		

# 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 Sampling



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



# Reaksi Komplek, Seri dengan Produk Sampling

(lanjutan)

- Untuk konversi reaktor tertentu, umpan harus memiliki waktu tinggal yang sesuai dalam reaktor
- Dalam reaktor kontinu teraduk sempurna umpan dapat langsung keluar setelah masuk reaktor atau dalam perioda tertentu
- Produk dapat tinggal dalam perioda tertentu atau langsung keluar
- Model reaktor kontinu 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 Sampling

(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 Sampling

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK

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

UMPAN  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING

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

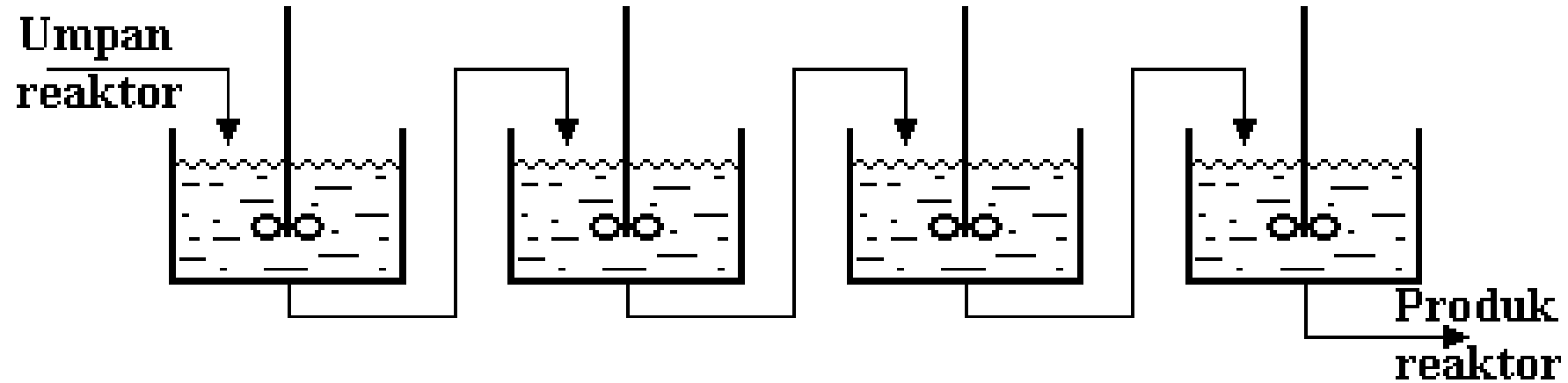
PRODUK  $\rightarrow$  PRODUK SAMPING

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

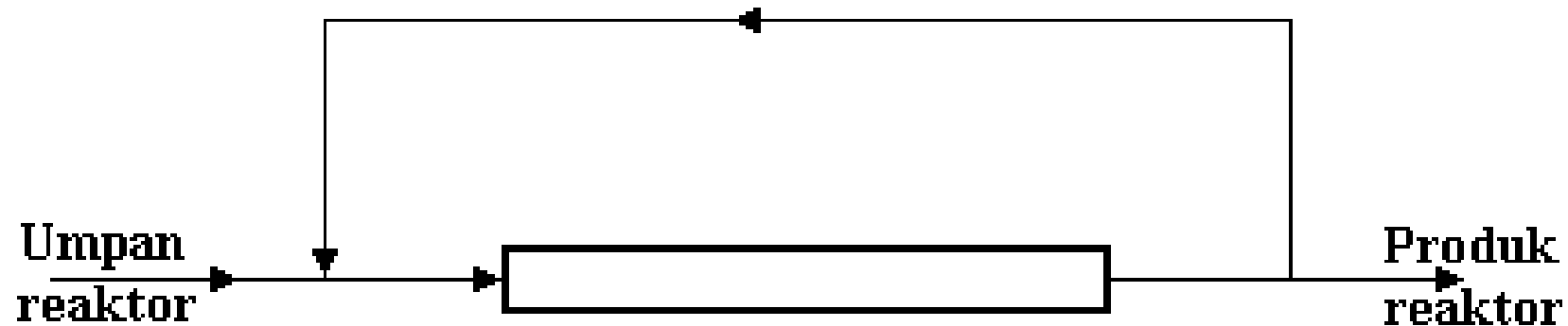
# Reaksi Campuran paralel dan Seri dengan Produk Sampling

- Untuk selektivitas tinggi
  - $a_1 > a_2$ , dipilih reaktor batch/plug flow
  - $a_1 < a_2$ , dipilih reaktor kontinyu
- Reaksi seri dengan produk sampling 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

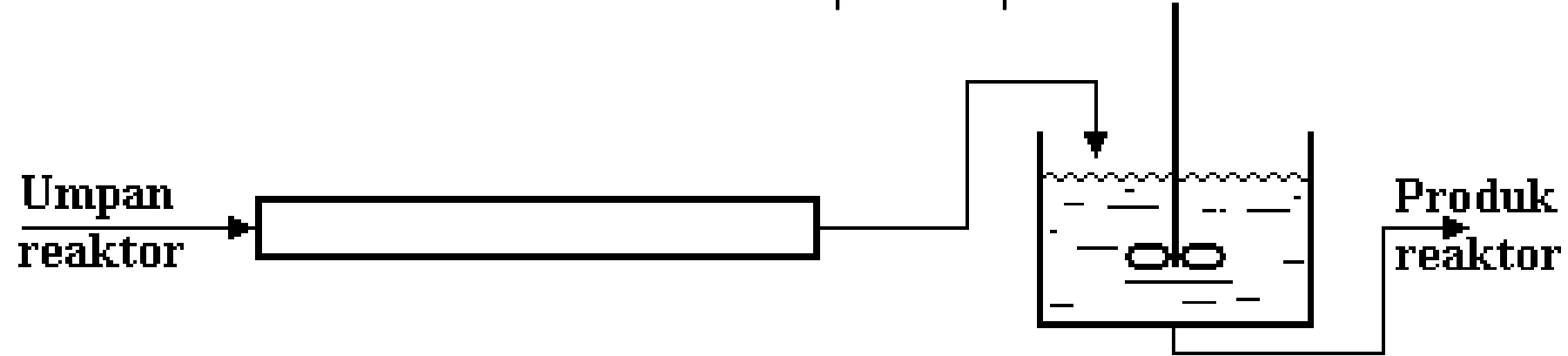


**(a) Rangkaian reaktor tangki berpengaduk kontinu**

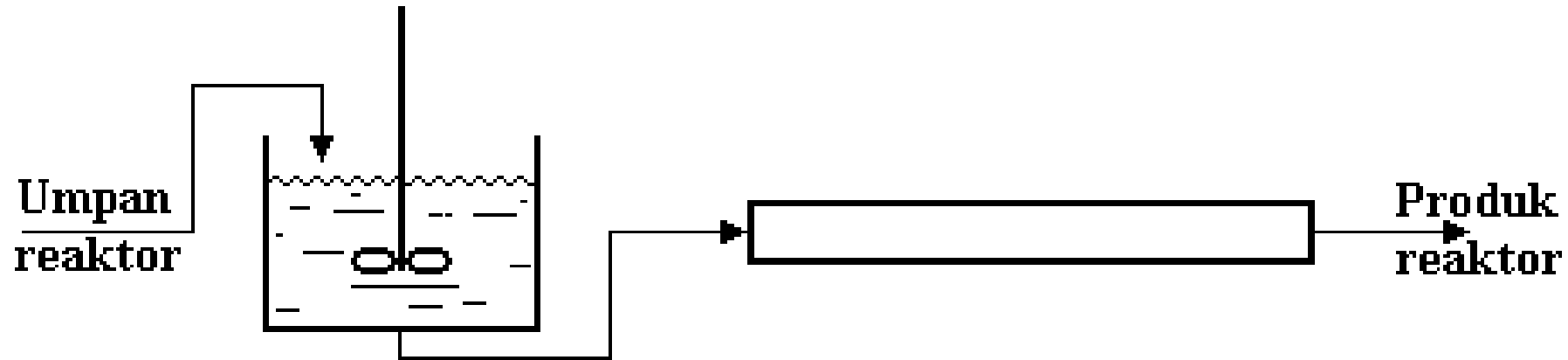


**(b) Plug flow reaktor dengan daur ulang**

Pilihan reaktor untuk reaksi campuran paralel dan seri



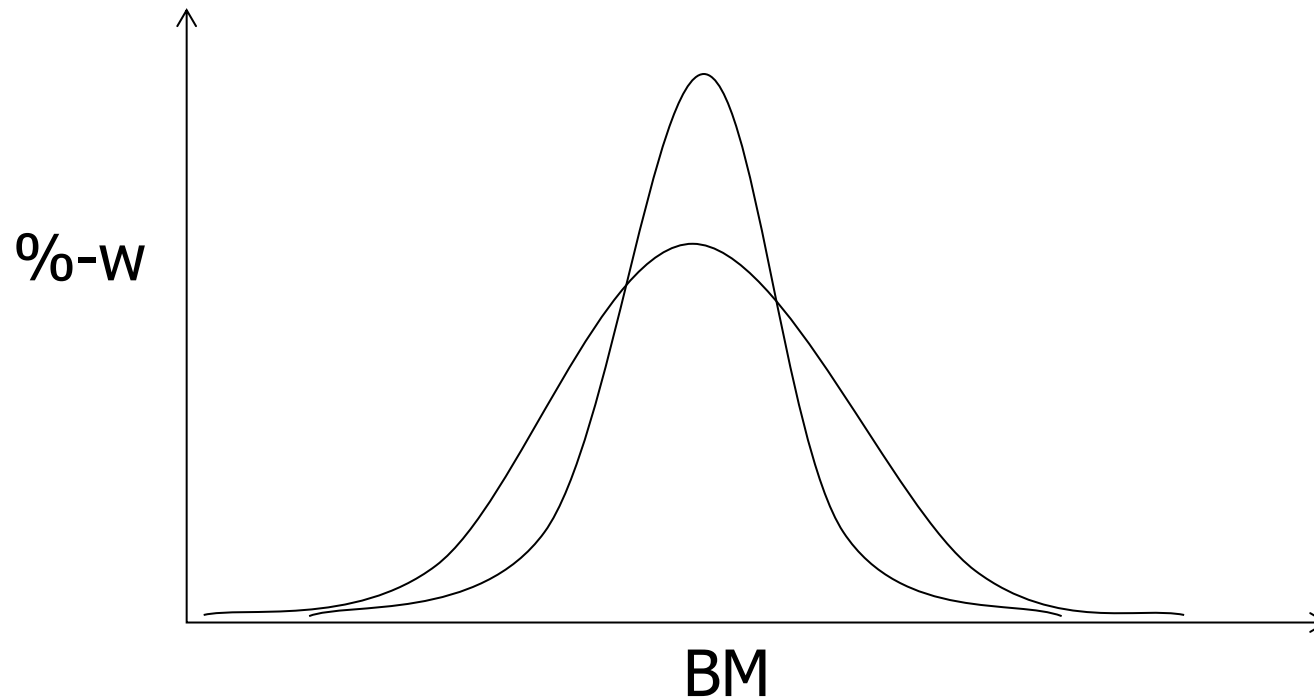
**(c) Plug flow reaktor diikuti reaktor tangki ideal**



**(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

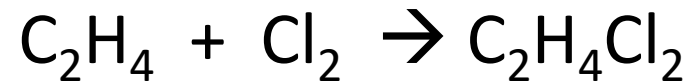
- Proses terminasi dipengaruhi oleh konsentrasi radikal bebas, yang sebanding dengan konsentrasi monomer
- Untuk reaktor batch dan plug flow konsentrasi radikal bebas dan monomer menurun, hal ini akan membentuk panjang rantai dengan waktu tinggal yang lebih lama, akan menyebabkan terbentuknya distribusi 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 eksekusi 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 eksekusi 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

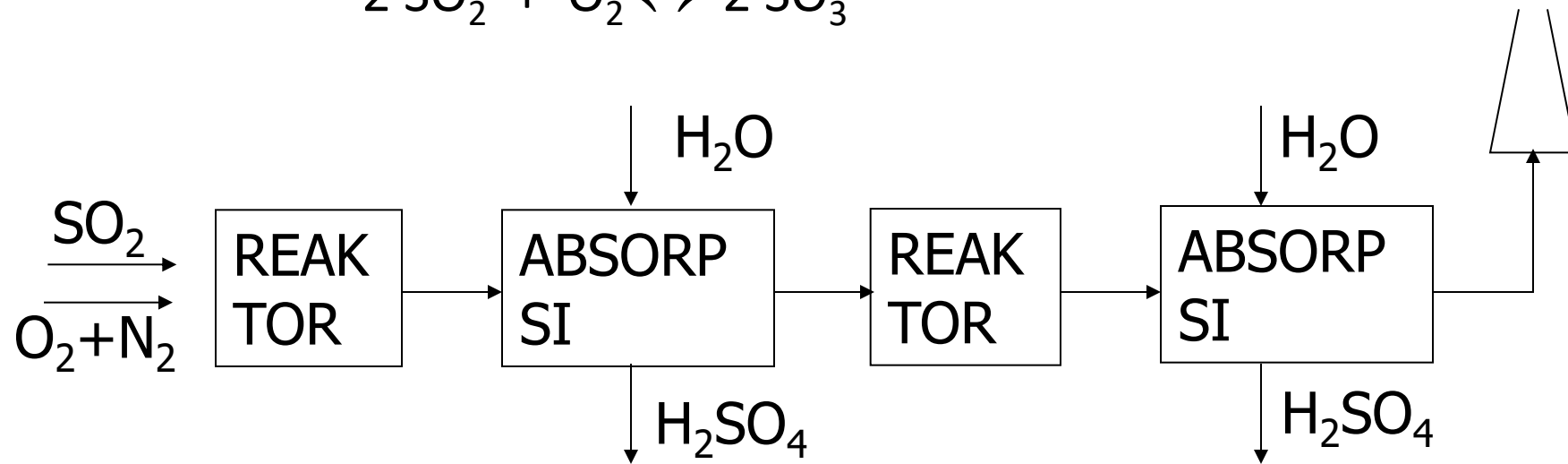
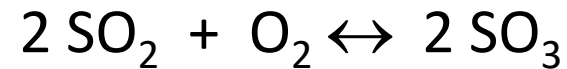
reaksi :  $\text{UMPAN1} + \text{UMPAN2} \leftrightarrow \text{PRODUK}$

c. jumlah mol umpan = produk,

Konsentrasi inert tidak berpengaruh terhadap konversi

# Pengambilan Produk Selama Reaksi

Contoh: Reaksi dan pemisahan dalam pembuatan asam sulfat



$\text{SO}_3$  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 eksekusi umpan1 atau umpan2
  - Jika  $(a_2-a_1) > (b_2-b_1)$ , digunakan eksekusi umpan2
  - Jika  $(a_2-a_1) < (b_2-b_1)$ , digunakan eksekusi umpan1

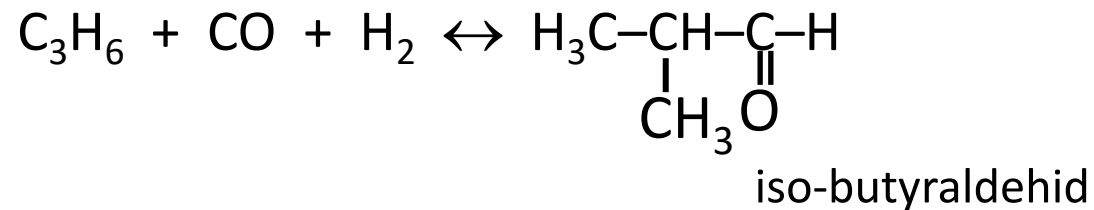
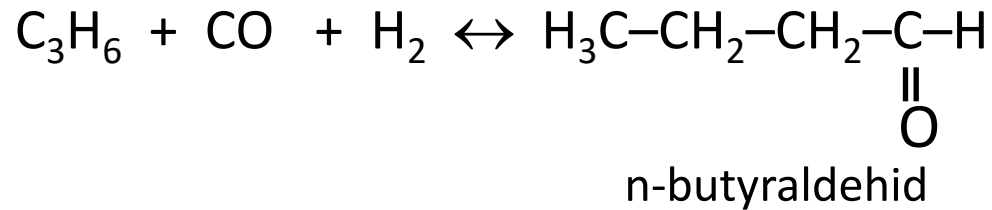
# Reaksi Paralel menghasilkan Produk Samping

- Untuk reaksi berikut



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

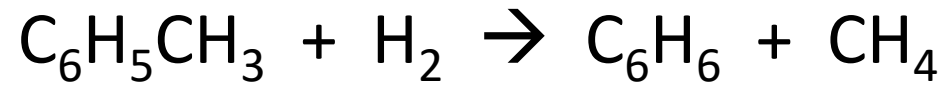
- Contoh: reaksi OXO untuk produksi C4-alkohol



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

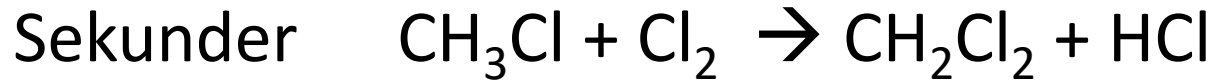


# Reaksi Seri menghasilkan Produk Samping



- 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 Sampling



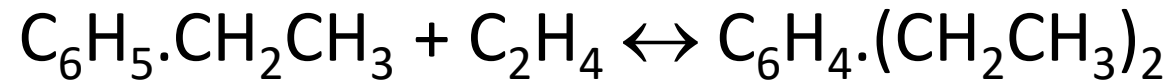
Reaksi sekunder seri terhadap khlorometan, tetapi paralel terhadap  $\text{Cl}_2$

# Reaksi Paralel dan Seri menghasilkan Produk Sampling

- 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 Sampling

- 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 dimasukkan pada titik antara (pra pemanasan)

# Kontrol Temperatur

- c. Pembawa panas (Heat Carrier), Laju alir massa ( $\text{kg.s}^{-1}$ ) Specific Heat Capacity ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ ). 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 ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ ), 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 eksesi pembentukan produk samping
- Produk reaktor sangat panas bersifat korosif, perlu bahan konstruksi khusus (mahal)
- Eksesi 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.

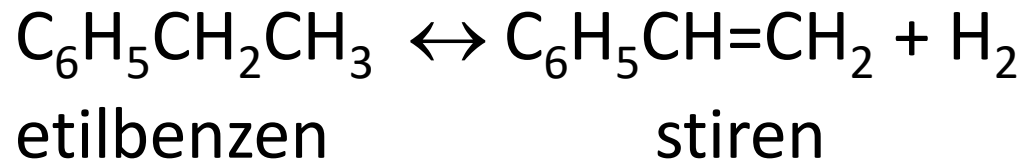
Solusi: pada awal reaksi tekanan tinggi sampai mencapai kesetimbangan, tekanan diturunkan untuk memperbesar konversi

# 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)
- Membiarkan penguapan salah satu komponen dalam reaksi reversible untuk menaikkan konversi maksimum

# FASA REAKTOR

UMPAN → PRODUK

$$r = k.C_{UMPAN}^a$$

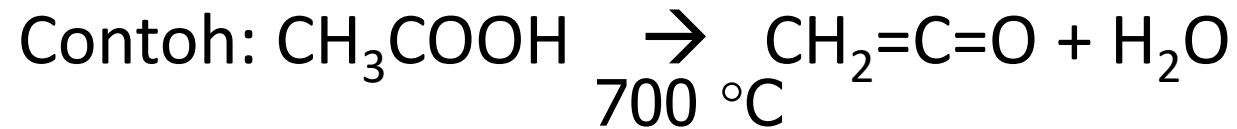
- $C_{UMPAN}$  tinggi dalam fasa cair dapat dijaga dibandingkan gas
- Pemilihan temperatur, tekanan, dan fasa reaktor akan menentukan pengaruh kesetimbangan dan selektivitas operasi fasa cair lebih dipilih



# KATALIS

## 1. Katalis Homogen

Reaksi fasa uap/cair



Katalis homogen: triethyl 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

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

UMPAN  $\rightarrow$  PROD SAMPING

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

Catatan:

- Menurunkan konsentrasi umpan menghasilkan orde reaksi rendah
- Operasi dibawah kondisi kontrol difusi menaikkan 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 unggun 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

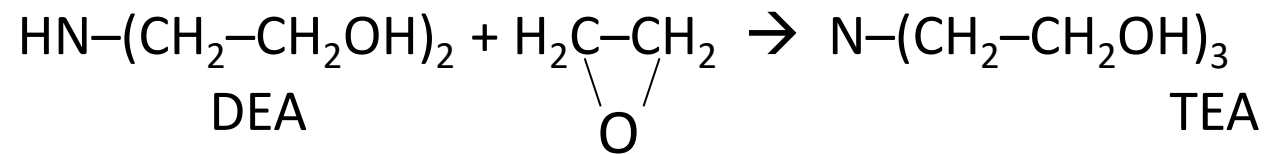
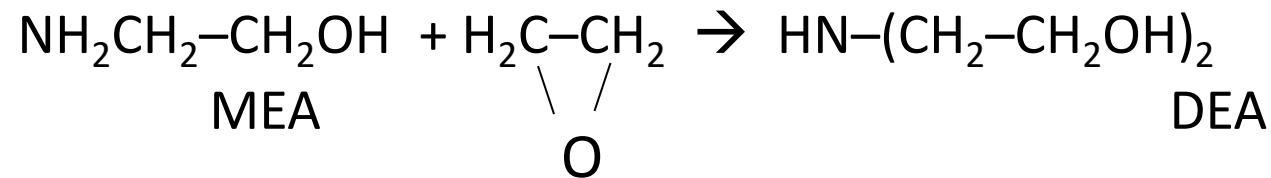
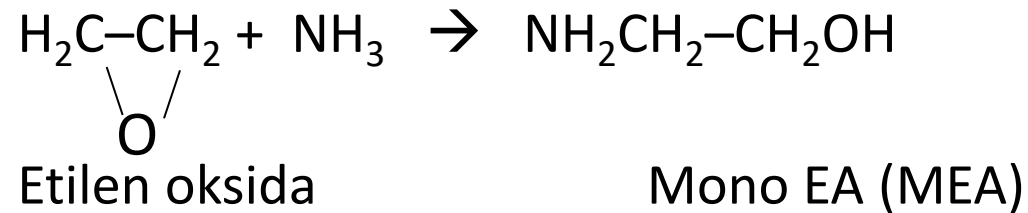
# DEGRADASI KATALIS

## 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

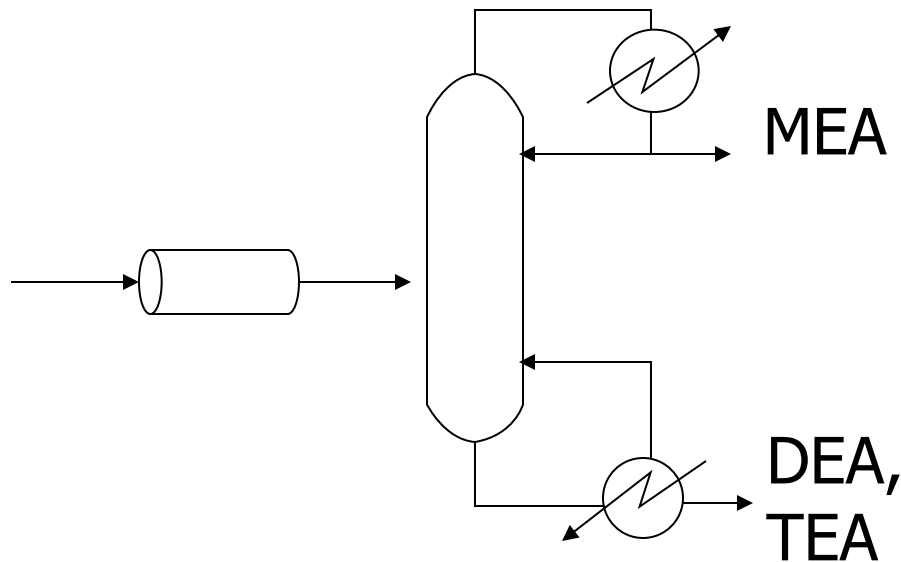
# Contoh Produksi MonoEtanolAmin

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

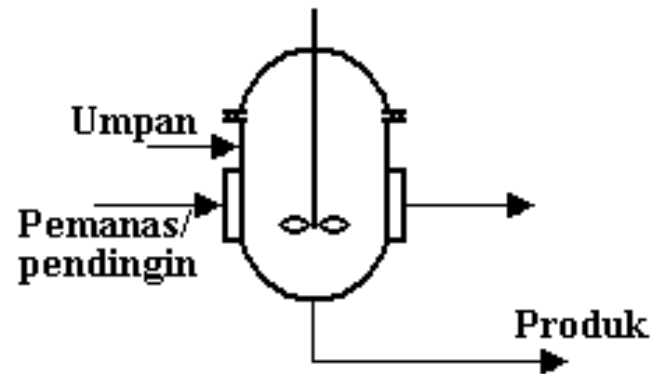
- Reaksi homogen fasa cair
- Reaksi heterogen gas-cair
- Reaksi heterogen cair-cair
- Reaksi heterogen padat-cair
- Reaksi heterogen gas-padat-cair

# Reaktor dalam Praktek

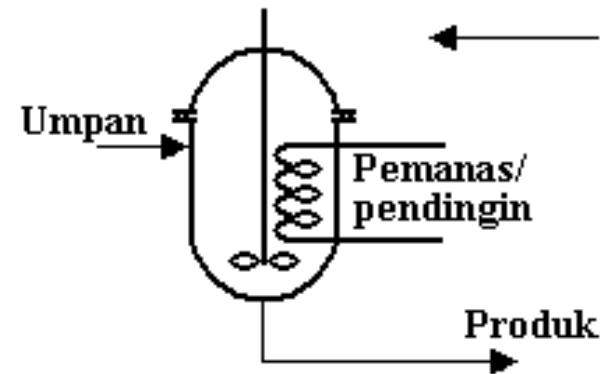
## 1. Reaktor Tangki berpengaduk

- 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

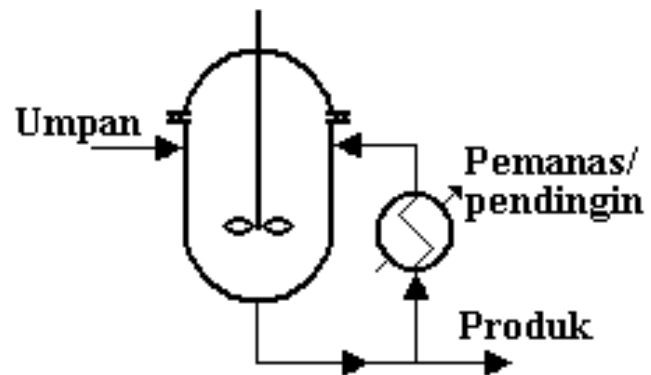
## Transfer Panas dari dan ke tangki berpengaduk



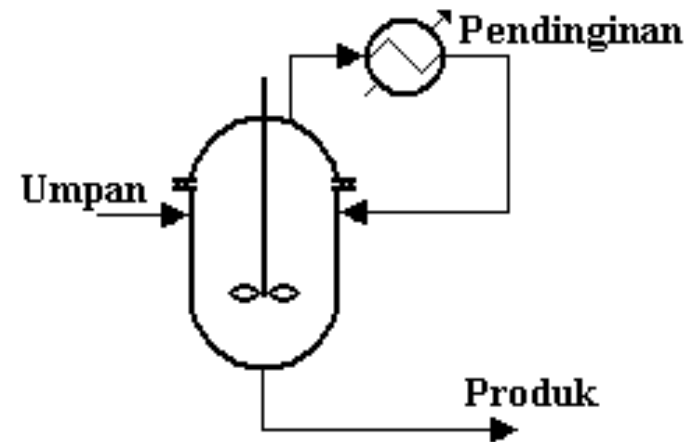
(a). melalui jaket eksternal.



(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 isothermal
- Dapat untuk reaksi dengan tekanan tinggi
- Tidak dapat dipergunakan untuk reaksi multifasa

# Reaktor dalam Praktek

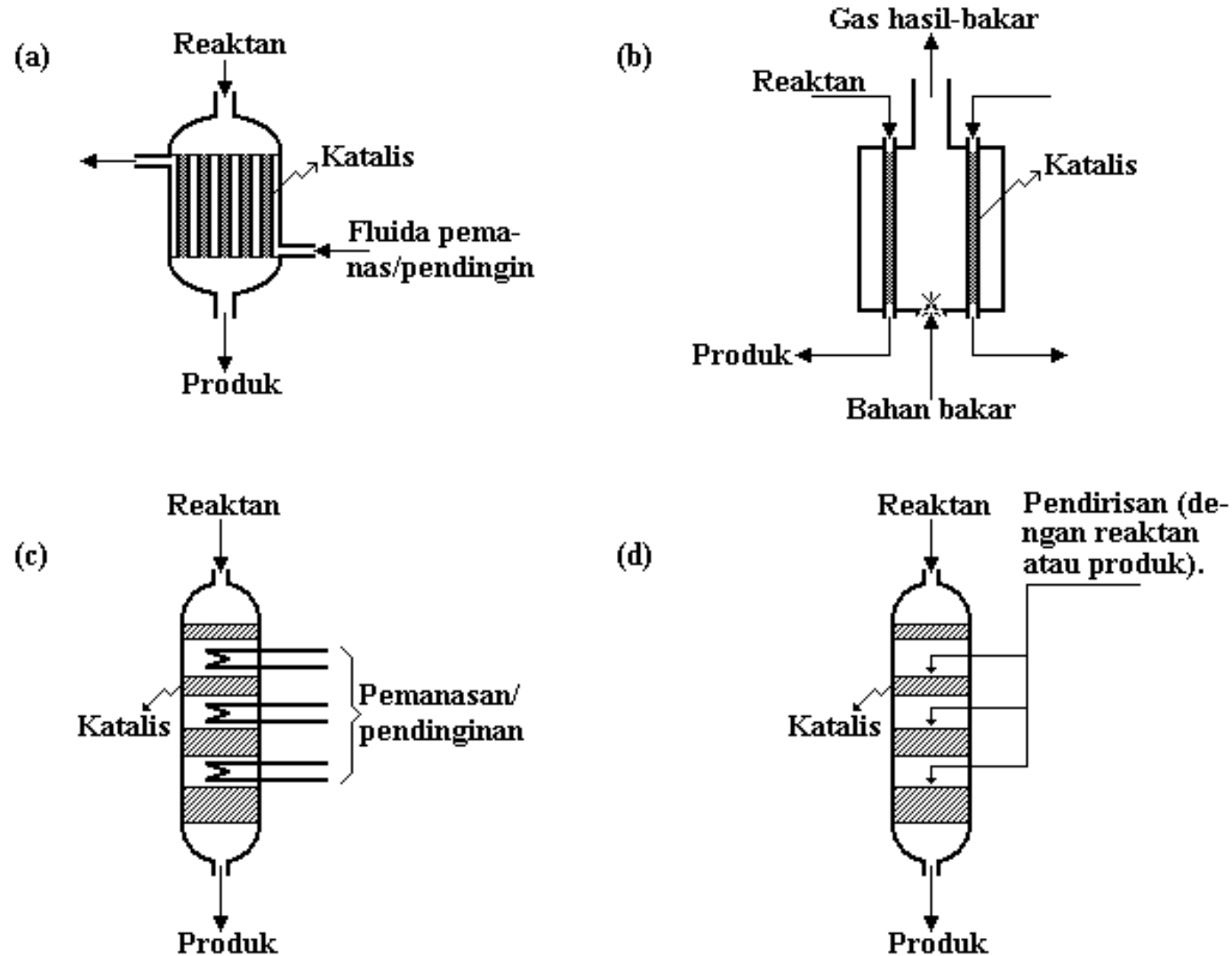
## 3. Reaktor Katalitik Unggun Tetap

### 3. Reaktor Katalitik Unggun Tetap

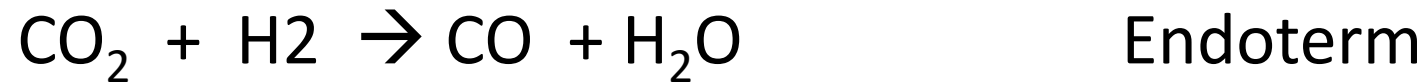
Empat kemungkinan penyusunan Reaktor Unggun Tetap :

- 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)



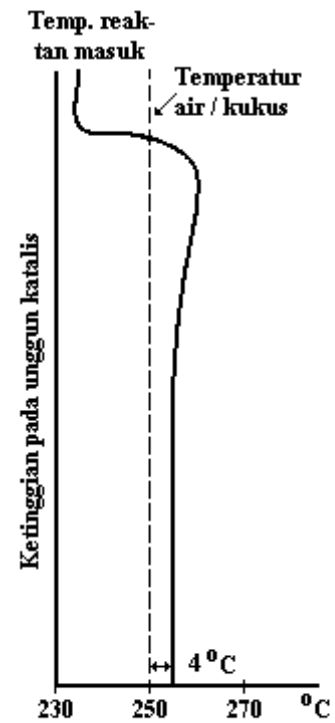
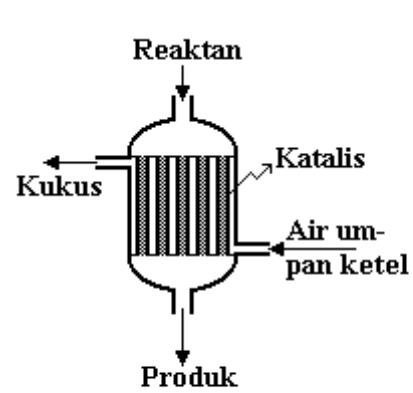
Contoh: Produksi Metanol dari Syngas ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  &  $\text{CO}_2$ ) katalis copper based dalam Reaktor buluh unggun tetap



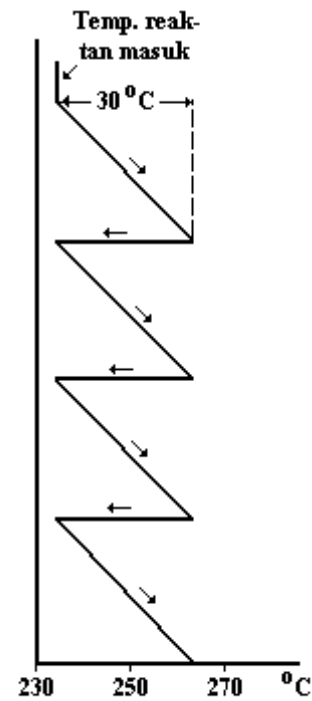
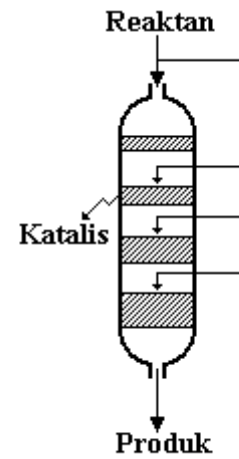
Gambar a: Tipe reaktor cangkang buluh (shell&tube) yang menghasilkan kukus dalam cangkang. Profil T relatif merata (smooth) dalam reaktor

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

## 2 alternatif rancangan reaktor untuk produksi metanol



(a). Reaktor berbuluh banyak



(b). Reaktor berpendiris

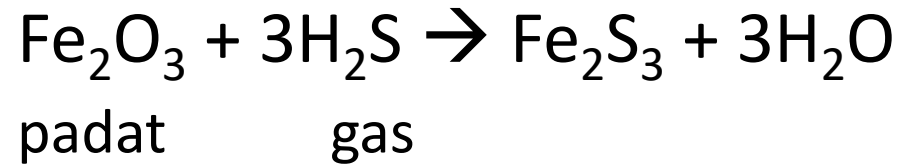
# Reaktor dalam Praktek

## 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:



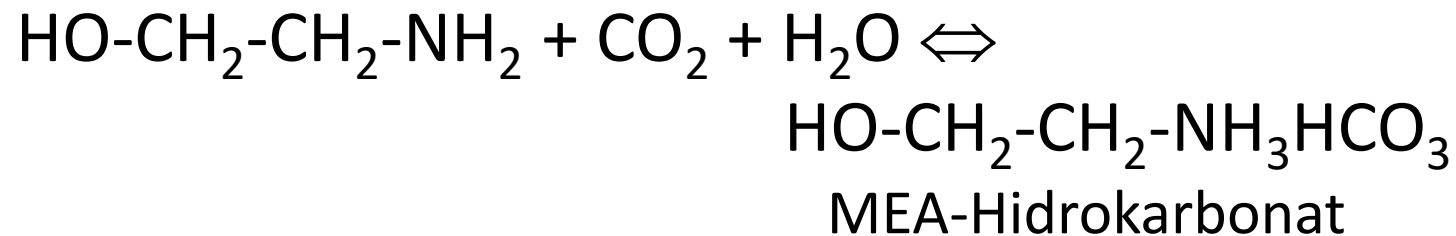
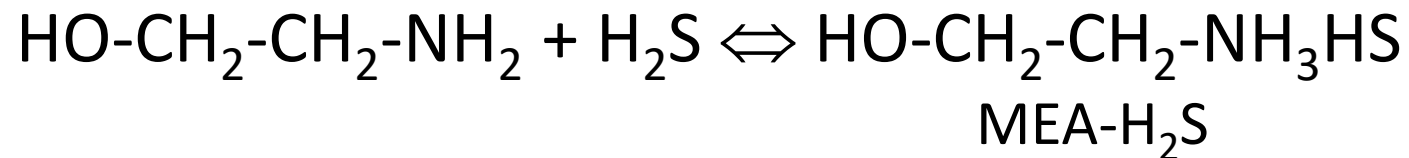
Digunakan 2 unggun tetap reaktor secara paralel, satu reaksi yang lain regenerasi

# 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

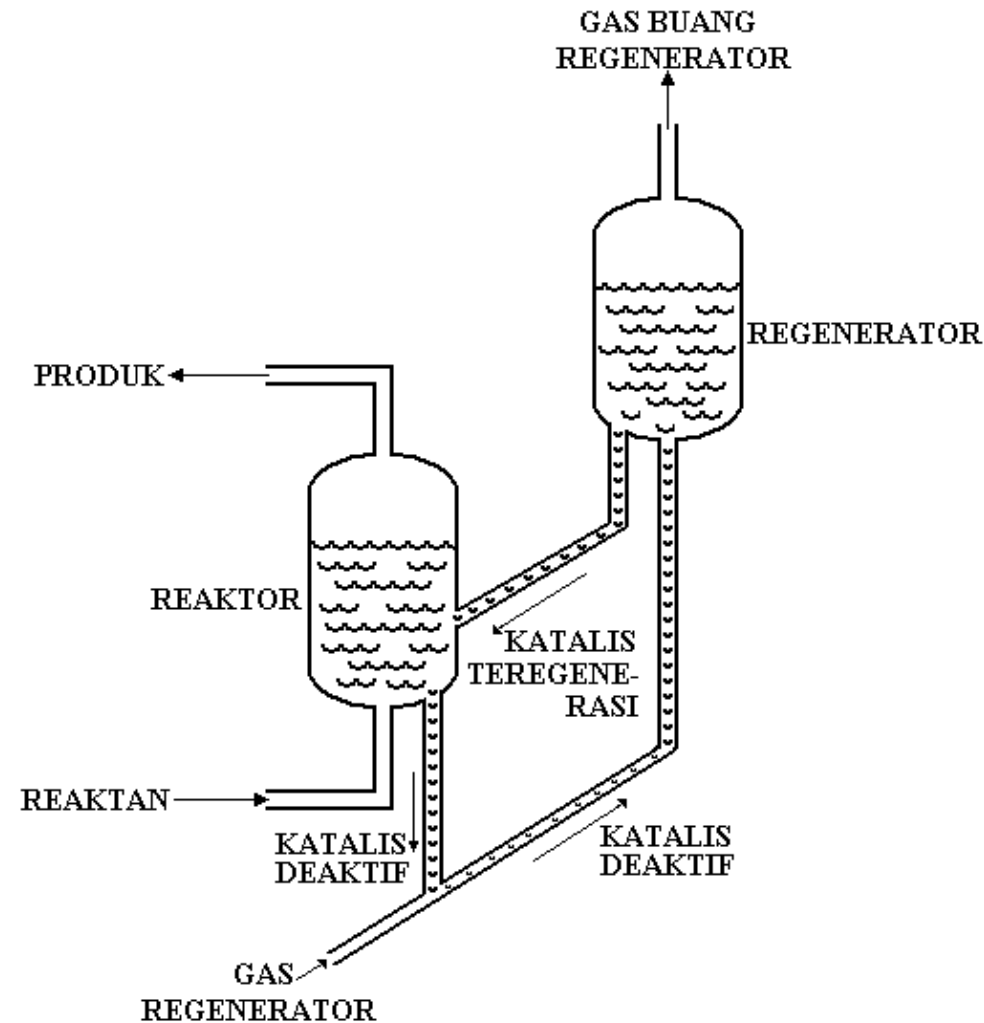
## 5. Reaktor Katalitik Unggun Tetap Terfluidisasi

(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 diumpankan ke unggun dan terbakar

# Reaktor dalam Praktek

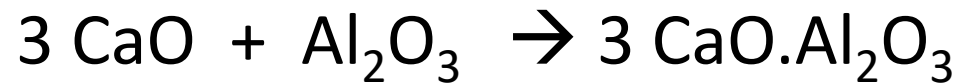
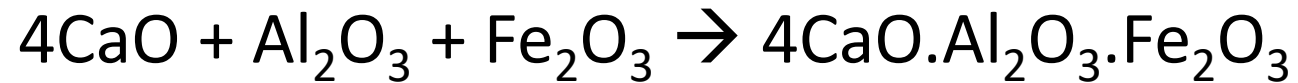
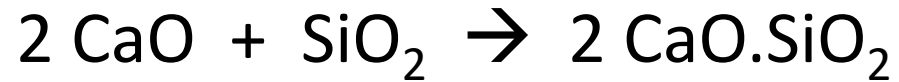
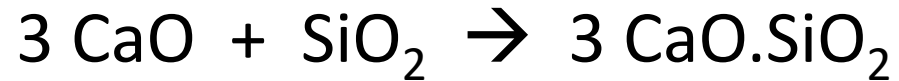
## 7. Tanur (Kiln)

- 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.

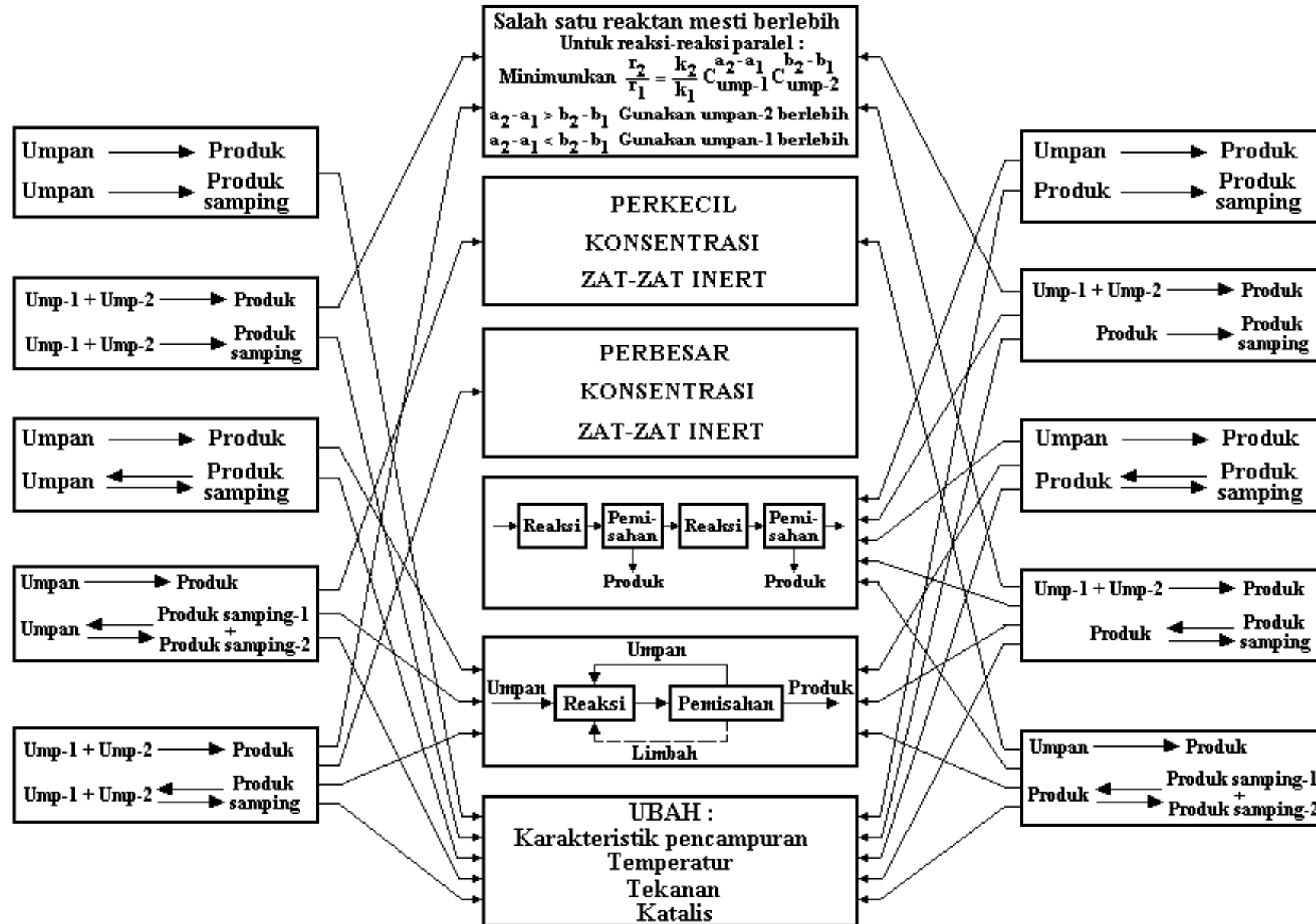
# Contoh Produksi HF



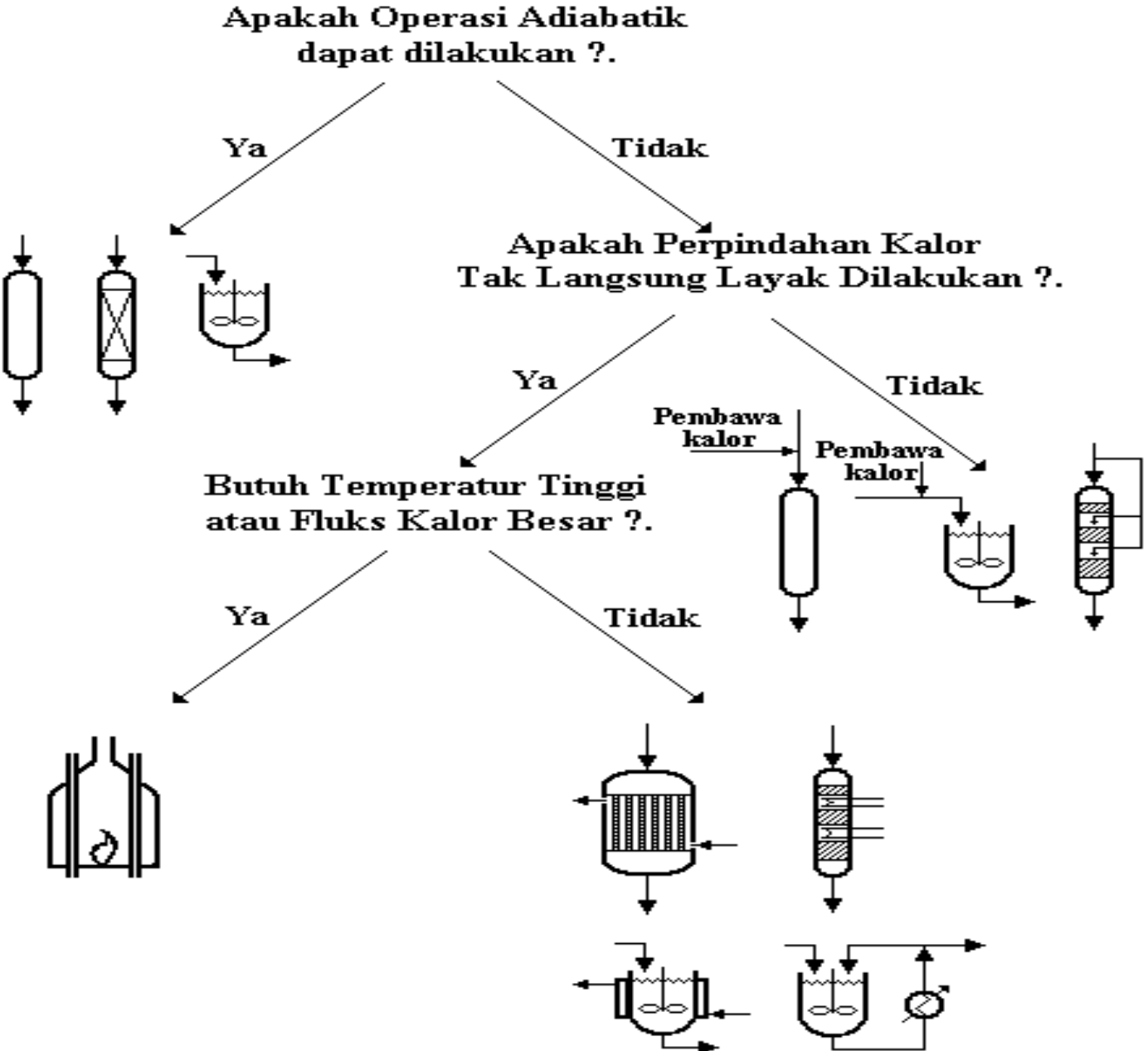
Contoh pembentukan semen



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



# Pemilihan transfer panas dalam reaktor



TERIMAKASIH