



MATERI PERTEMUAN 13

MATA KULIAH: TEKNIK REAKSI KIMIA II

REAKTOR FIXED BED

Prof. Ir. Herliati, M.T, Ph.D

Definisi



Fixed bed multitube reactor adalah reaktor katalitik yang terdiri dari:

- Ratusan hingga ribuan pipa kecil (tubes)
- Setiap tube diisi katalis padat (fixed bed)
- Fluida reaksi mengalir di dalam tube
- Fluida pemanas / pendingin mengalir di shell (di luar tube)

Tujuan utama desain multitube:

- Mengontrol panas reaksi
- Mencegah hot spot
- Menjaga operasi isothermal / mendekati isothermal

Kapan multitube dipilih (dibanding PFR tunggal)?

- Reaksi sangat eksotermis/sangat endotermis
- Katalis padat
- Laju panas reaksi tinggi (MW scale)
- Resiko hot spot tinggi

Contoh pada industri

- Oksidasi ($\text{NH}_3 \rightarrow \text{NO}$)
- Hidrogenasi
- Steam reforming
- Oksidasi parsial
- Reaksi aromatik eksotermis



Aplikasi di industri menggunakan reaktor katalitik dan multi-fase :

Untuk Reaktor *Fixed Bed* Katalitik :

- oksidasi parsial dari O-xylene menjadi Ptalic Anhidrid.
- Hidrogenasi aromatik dan olefin
- Dehidrogenasi etilbenzene menjadi styrene

Untuk Reaktor *Fixed-bed upward bubble-flow* (multi fase):

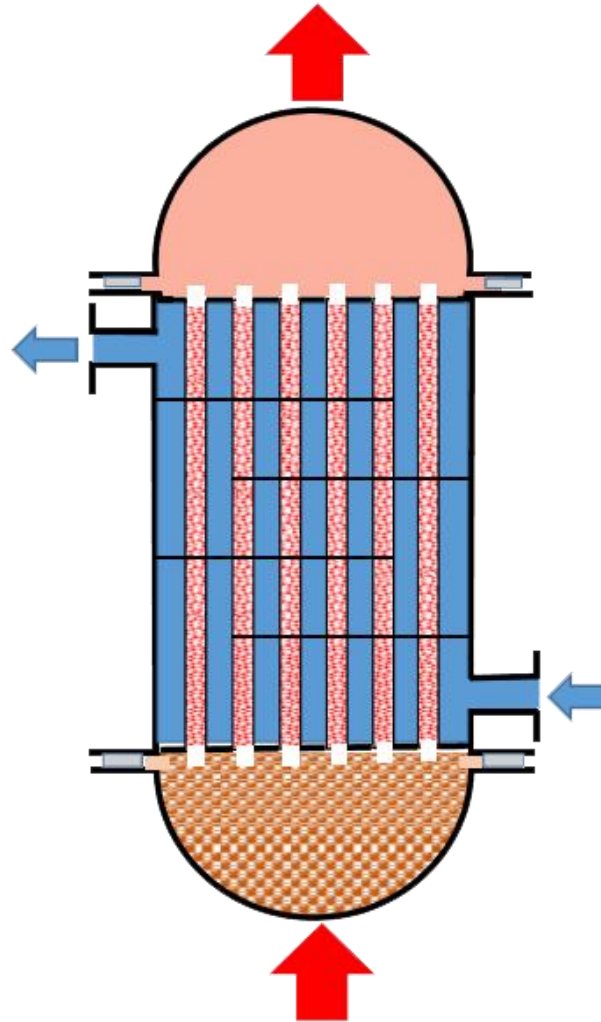
- proses *Fischer-Tropsch*
- pencairan batu bara



Langkah umum desain Fixed Bed Multitube Reactor

- Tentukan laju reaksi & konversi
- Hitung total katalis
- Tentukan D_t , L_t
- Hitung jumlah tube
- Hitung duty panas
- Sizing heat transfer

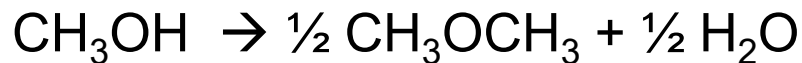
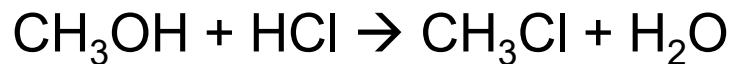
Konfigurasi *Fixed Bed Reactor*



Catalytic Fixed Bed (TFXB)

CONTOH SOAL :

Pembuatan metil klorida dari methanol dan asam klorida dijalankan di dalam reactor fixed bed. Reaksi yang terjadi



Konversi methanol keluar reactor 95 %. Perbandingan konversi methanol dari reaksi utama dan reaksi samping adalah 98:2.

Jika umpan terdiri dari uap methanol dan HCl yang equimolar, space velocity (SV) = 300/jam. Kapasitas produksi metil klorida adalah 100 ton/hari dengan kemurnian 99% berat. Reaktor fixed bed yang dipakai berbentuk seperti HE dengan diameter pipa 3,5 in dan tebal 0.29 in serta panjang 12 ft. Buatlah desain reactor tersebut. Reaktor beroperasi pada 1 atm, 625 °C

$$\rho_b = 90 \text{ lb/ft}^3$$

$$\text{porositas bed } \varepsilon = 0,40$$

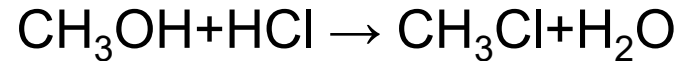
$$\text{diameter partikel } dp = 4 \text{ mm} = 0.004 \text{ m}$$

Penyelesaian:

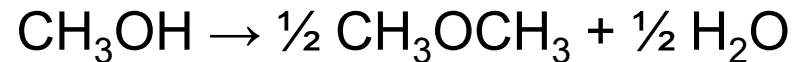


1. Data dan reaksi

Reaksi Utama (R1):



Reaksi Samping (R2):



Diketahui:

- Konversi metanol total keluar reaktor: $X_{MeOH} = 0,95$
- Fraksi metanol yang terkonversi: 98% ke R1 dan 2% ke R2
- Umpan CH_3OH dan HCl equimolar
- Space velocity (SV) pada 1 atm, 25 °C: 300 jam^{-1}
- Kapasitas produk metil klorida: 100 ton/hari dengan kemurnian 99 wt%
- Reaktor multitube: OD tube = 3.5 in, tebal = 0.29 in, panjang = 12 ft

2. Laju produksi CH_3Cl (molar)
Produk “murni” (99 wt%):



$$m_{\text{CH}_3\text{Cl}} (\text{murni}) = 0,99 \times 1000.000 = 99.000 \text{ kg/hari}$$

BM $\text{CH}_3\text{Cl} \approx 50.485 \text{ kg/kmol}$

$$n_{\text{CH}_3\text{Cl}} = \frac{99.000}{50,485} = 1961 \text{ kmol/hari}$$

$$n_{\text{CH}_3\text{Cl}} = \frac{1961}{24} = 81,71 \text{ kmol/jam}$$

3. Hitung laju umpan metanol & HCl

CH_3Cl terbentuk hanya dari R1, dan 1:1 terhadap metanol yang bereaksi via R1.

Metanol yang bereaksi total = $0.95F_{\text{MeOH,umpan}}$

Yang masuk R1 = $0.98(0.95F_{\text{MeOH,umpan}}) = 0.931F_{\text{MeOH,umpan}}$



$$n_{CH_3Cl} = 0,931 \times F_{CH_3OH,umpan}$$

$$F_{CH_3OH,umpan} = \frac{81,71}{0,931} = 87,76 \text{ kmol/jam}$$

Karena umpan equimolar:

$$F_{HCl,umpan} = 87,76 \text{ kmol/jam}$$

Total molar feed:

$$FT_0 = 2 \times 87,76 = 175,53 \text{ kmol/jam}$$

4. Hitung debit volumetrik feed pada 1 atm, 25°C

Gunakan gas ideal ($R = 0.082057 \text{ m}^3 \cdot \text{atm}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$, $T = 298.15 \text{ K}$, $P = 1 \text{ atm}$):

$$V_0 = \frac{FT_0 RT}{P} = \frac{175.53(0.082057)(298.15)}{1} = 4294,3 \text{ m}^3/\text{jam}$$

5. Volume bed reaktor dari SV



$$SV = \frac{V_0}{V_{bed}} \Rightarrow V_{bed} = \frac{V_0}{SV} = \frac{4294,3}{300} = 14,31 \text{ m}^3$$

6. Volume per tube dan jumlah tube

Tube OD = 3.5 in, tebal = 0.29 in $\Rightarrow$ ID:

$$D_i = 3,5 - 2(0,29) = 2,92 \text{ in} = 0,07417 \text{ m}$$

$$\text{Panjang tube} = 12 \text{ ft} = 3,6576 \text{ m}$$

Volume bed per tube:

$$V_t = \frac{1}{4} \pi \cdot D^2 L = \frac{3,13}{4} (0,07417)^2 (3,6576) = 0,0158 \text{ m}^3$$

Jumlah tube

$$N = \frac{V_{bed}}{V_t} = \frac{14,31}{0,0158} \approx 906 \text{ tube}$$



Perkiraan diameter shell (tube layout & pitch)

Data tube

- OD tube = 3.5 in = 0,0889 m
- Tebal = 0,29 in $\Rightarrow$ ID = 2,92 in = 0,0742 m (untuk aliran reaksi)
- Jumlah tube: N = 906

Pilih pitch (jarak antar pusat tube)

Umum dipakai

- Triangular pitch: $Pt=1,25 D_o$
- Square pitch: $Pt=1,25 D_o$

Maka:

$$Pt = 1,25 (0,0889) = 0,1111 \text{ m}$$

Estimasi diameter bundle/shell (metode pendekatan Kern)



Massa Katalis

Konversi densitas bulk

$$90 \frac{lb}{ft^3} = 90 \frac{0,453592}{0,0283168} \approx 1442 \frac{kg}{m^3}$$

Massa total katalis

$$W = \rho_{\text{bulk}} V_{\text{bed}} = 1442 (14,31) \approx 2,06 \times 10^4 \text{ kg}$$



Untuk triangular pitch, pendekatan praktis:

$$N \approx 0,907 \left(\frac{D_b}{P_t} \right)^2$$

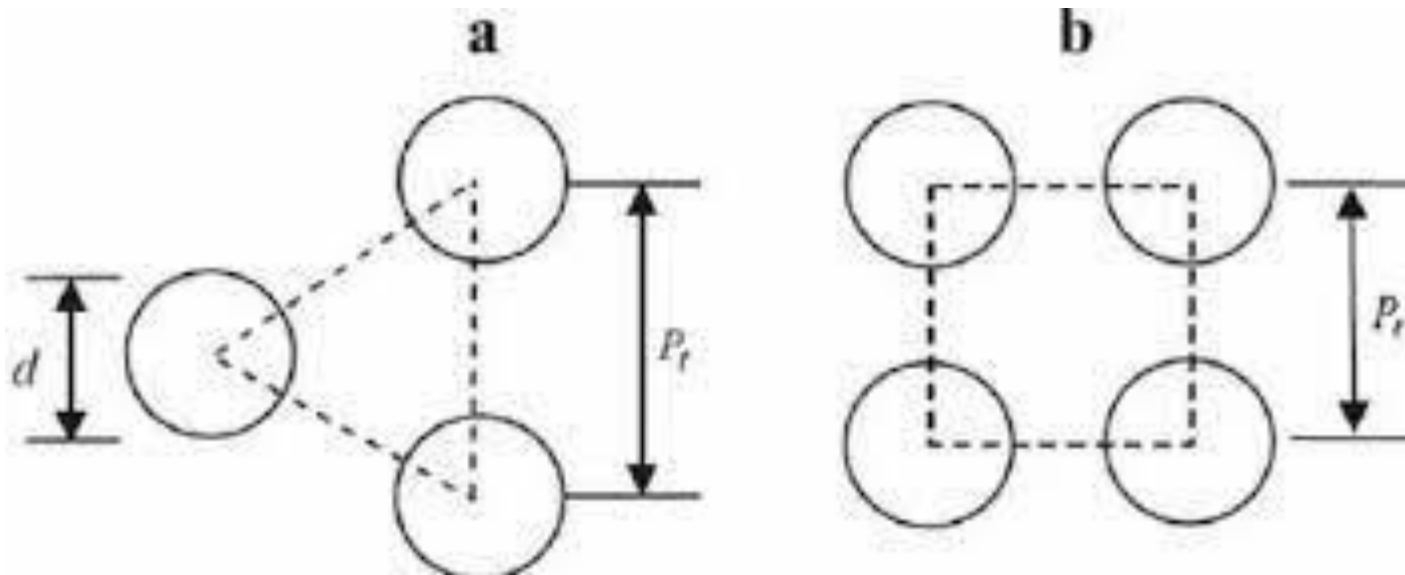
$$D_b = P_t \left(\frac{N}{0,907} \right)^{1/2}$$

$$D_b = 0,111 \left(\frac{906}{0,907} \right)^{1/2} = 3,76 \text{ m}$$

Rekomendasi praktis shell ID (tambah clearance & toleransi manufaktur):

- Triangular: $\approx 3.6\text{--}3.8 \text{ m}$
- Square: $\approx 3.9\text{--}4.1 \text{ m}$

Tube Layout:



Kebutuhan pendinginan/pemanasan (reaktor seperti heat exchanger)

1. Reaksi eksoterm atau endoterm?

hitung ΔH° reaksi dari data ΔH_f° (298 K):

Senyawa	ΔH_f° (298 K)	Satuan
CH ₃ OH(g)	-205	kJ/mol
HCl (g)	-92,31	kJ/mol
CH ₃ Cl (g)	-83,68	kJ/mol
H ₂ O (g)	-241,83	kJ/mol

Perhatikan hanya reaksi utama:

$$\Delta H_{R1} = [(-83.68) + (-241.83)] - [(-205) + (-92.31)] \approx -28.2 \text{ kJ/mol}$$

Tanda negative menunjukkan reaksi eksotermis

Laju pembentukan CH₃Cl = 81.71 kmol/jam

$$\begin{aligned} Q = \Delta H &= (81.71 \times 10^3) \text{ mol/jam} \times (28,2) \text{ kJ/mol} = 2,3 \times 10^6 \text{ kJ/jam} \\ &= 640 \text{ KW} \end{aligned}$$

Superficial velocity dalam tube

kondisi operasi

- $P = 1 \text{ atm}$,
- $T = 625 \text{ }^{\circ}\text{C} = 898 \text{ K}$
- Jumlah tube $N = 906$
- ID tube $= 2.92 \text{ in} = 0,07417 \text{ m}$
- $L = 12 \text{ ft} = 3,6576 \text{ m}$
- Debit volumetrik operasi total $V'_{op} \approx 12946 \text{ m}^3/\text{jam}$
 $\Rightarrow$ per tube $14,29 \text{ m}^3/\text{jam}$

$$A_{cs} = \frac{\pi D_i^2}{4} = \frac{\pi (0,07417)^2}{4} = 0,00432 \text{ m}^2$$

$$\dot{V}_{tube} = 14,29 \text{ m}^3/\text{jam} = 0,00397 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$u_s = \frac{\dot{V}_{tube}}{A_{cs}} = \frac{0,00397}{0,00432} = 0,92 \text{ m/s}$$

Desain sebagai heat exchanger (tube-side reaction, shell-side utility)

Pendingin diletakkan pada shell side

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{LMTD}$$

area perpindahan panas (luar tube):

$$A \approx N \cdot \pi \cdot D \cdot L = (906)(3,14)(0,0889)(3,6576) \approx 923 \text{ m}^2$$

Digunakan molten salt sebagai pendingin dengan

$$T_{in} = 450 \text{ K}; T_{out} = 550 \text{ K}$$

$$\Delta T_1 = 625 - 450 = 175 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = 625 - 550 = 75 \text{ K}$$

$$\text{Maka } \Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{175 - 75}{\ln(175/75)} \approx 118 \text{ K}$$

Maka kebutuhan U kira-kira:

$$U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{LMTD}} = \frac{6,4 \times 10^5}{(923)(118)} = 5,9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Menentukan Pressure Drop

Viskositas gas $\mu = 3,5 \times 10^{-5}$ Pa

Dengan $\varepsilon = 0,40$, $d_p = 0,004$ m, $u_s = 0,92$, $\rho = 0,465$, $\mu = 3,5 \times 10^{-5}$:

- Komponen viskos:

$$\left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{visc} = 1698 \text{ Pa/m}$$

- Komponen inersia:

$$\left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{inert} = 1614 \text{ Pa/m}$$

Total:

$$\frac{\Delta P}{L} = 3312 \text{ Pa/m}$$

Maka untuk $L = 3,6576$ m:

$$\Delta P = 3312(3,6576) = 12115 \text{ Pa} = 12,1 \text{ kPa}$$



Kampus
Merdeka
INDONESIA JAYA

THANK YOU

