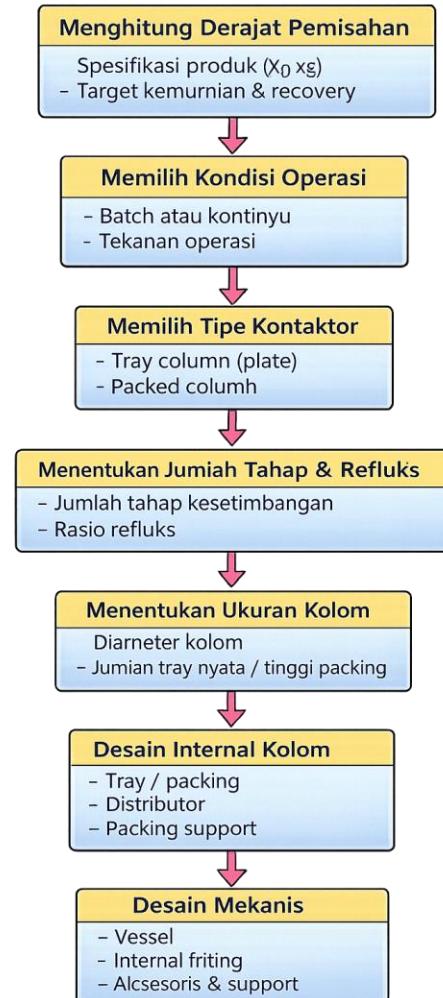


Packed Tower

Tahapan Perancangan



Pertimbangan Pemilihan Jenis Kolom: Kolom Plat (Tray) vs Kolom Isian (Packed)

1. Rentang Laju Alir

- Kolom plat dapat dirancang untuk menangani rentang laju alir gas dan cairan yang lebih luas dibandingkan kolom isian.
- Kolom isian kurang cocok untuk laju alir cairan yang sangat rendah, karena distribusi cairan menjadi tidak merata.

2. Efisiensi Pemisahan

- Efisiensi tray/plat dapat dirancang dan diperkirakan lebih pasti dibandingkan kolom isian.
- Pada kolom isian, efisiensi dinyatakan dalam HETP atau HTU, yang nilainya sering lebih sulit diprediksi secara akurat.

Pertimbangan Pemilihan Jenis Kolom: Kolom Plat (Tray) vs Kolom Isian (Packed)

3. Kepastian Desain dan Distribusi Cairan

- Kolom plat umumnya lebih terjamin dalam desainnya.
- Pada kolom isian, selalu ada keraguan terhadap kualitas distribusi cairan di seluruh penampang kolom, terutama:
 - pada diameter kolom besar
 - pada variasi kondisi operasi

4. Fleksibilitas Operasi

- Kolom plat lebih mudah untuk:
 - Memasang peralatan pendingin internal (misalnya coil pendingin).
 - Mengambil aliran samping (side draw).

Pertimbangan Pemilihan Jenis Kolom: Kolom Plat (Tray) vs Kolom Isian (Packed)

5. Fouling, Kerak, dan Padatan

- Jika cairan:
 - membentuk kerak,
 - mengandung padatan,
- maka kolom plat lebih mudah dibersihkan, karena:
 - manhole dapat dipasang pada setiap tray.
- Untuk kolom berdiameter kecil, kolom isian bisa lebih ekonomis karena packing dapat dilepas dan dibersihkan bila terjadi kerak.

Pertimbangan Pemilihan Jenis Kolom: Kolom Plat (Tray) vs Kolom Isian (Packed)

6. Fluida Korosif

- Untuk cairan yang bersifat korosif, kolom isian biasanya lebih murah dibandingkan kolom plat, karena:
 - material tray relatif mahal,
 - packing tersedia dalam berbagai material tahan korosi.

7. Liquid Hold-Up dan Keselamatan

- Liquid hold-up kolom isian jauh lebih rendah dibandingkan kolom plat.
- Hal ini sangat penting untuk:
 - cairan toksik
 - cairan mudah terbakar karena volume cairan yang harus dikendalikan menjadi lebih kecil (aspek keselamatan).

Pertimbangan Pemilihan Jenis Kolom: Kolom Plat (Tray) vs Kolom Isian (Packed)

8. Sistem Berbusa

- Kolom isian lebih cocok untuk menangani sistem berbusa, karena:
 - tidak ada tray yang dapat menahan atau memperparah pembentukan busa.

9. Pressure Drop

- Pressure drop per tahap kesetimbangan (berdasarkan HETP):
 - umumnya lebih rendah pada kolom isian dibandingkan kolom plat.
- Oleh karena itu, packing sangat disarankan untuk kolom vakum.

Pertimbangan Pemilihan Jenis Kolom: Kolom Plat (Tray) vs Kolom Isian (Packed)

10. Diameter Kolom

- Kolom isian harus selalu dipertimbangkan untuk kolom dengan:
 - diameter $< 0,6$ m
karena:
 - pemasangan tray menjadi sulit,
 - biaya tray menjadi tidak ekonomis.

Pertimbangan Pemilihan Jenis Kolom: Kolom Plat (Tray) vs Kolom Isian (Packed)

1 Aturan praktis industri (rule of thumb)

Jenis packing	Tinggi maksimum per segmen isian
Random packing	4 – 6 m
Structured packing (sheet)	6 – 10 m
Structured packing (gauze/BX)	10 – 12 m

Pertimbangan Pemilihan Jenis Kolom: Kolom Plat (Tray) vs Kolom Isian (Packed)

- ◆ **Angka praktik industri:**

Parameter	Nilai umum
Tray spacing	0,45 – 0,6 m
Jumlah tray umum	30 – 60 tray
Jumlah tray tinggi	60 – 100 tray
Tinggi kolom tipikal	20 – 40 m
Tinggi kolom maksimum praktik	±60 m

Pertimbangan Pemilihan Jenis Kolom: Kolom Plat (Tray) vs Kolom Isian (Packed)

- ◆ Tinggi total kolom isian (praktik aman)
- Dengan multi-bed + redistributor:
 - 20 – 30 m → umum & aman
 - > 30 m → mulai tidak ekonomis & sulit dikontrol
 - > 40 m → jarang dipilih, biasanya diganti tray
- 📌 Rule of thumb penting:

$$\text{Tinggi bed} \leq (6-10) \times D_{\text{kolom}}$$

Tahap Perancangan Kolom Isian (Packed Column)

1. Pemilihan Tipe dan Ukuran Packing

- Menentukan **jenis packing** (random atau structured).
- Menentukan **ukuran packing** berdasarkan:
 - efisiensi pemisahan,
 - pressure drop,
 - kapasitas kolom,
 - karakteristik fluida (korosif, berbusa, mengandung padatan).

Tahap Perancangan Kolom Isian (Packed Column)

- **2. Penentuan Tinggi Kolom**
- Menentukan **tinggi kolom isian** yang dibutuhkan untuk mencapai derajat pemisahan yang diinginkan.
- Tinggi kolom dihitung berdasarkan:
 - **HETP (Height Equivalent to a Theoretical Plate)**, atau
 - **HTU–NTU (Height and Number of Transfer Units)**.

Tahap Perancangan Kolom Isian (Packed Column)

3. Penentuan Diameter Kolom

- Menentukan **diameter kolom** untuk memastikan kolom mampu menangani:
 - laju alir cairan,
 - laju alir gas/uap,
tanpa terjadinya flooding, entrainment, atau weeping.
- Perhitungan diameter didasarkan pada:
 - kapasitas hidraulik kolom,
 - batas pressure drop yang diizinkan.

Tahap Perancangan Kolom Isian (Packed Column)

4. Pemilihan dan Desain Internal Kolom

- Mendesain dan memilih **komponen internal kolom**, meliputi:
 - **packing support** (penopang isian),
 - **liquid distributor** (pendistribusi cairan),
 - **redistributor** (untuk kolom tinggi),
 - hold-down plate dan aksesori internal lainnya.
- Tujuan utama desain internal adalah:
 - memastikan distribusi cairan yang merata,
 - menjaga stabilitas packing,
 - meminimalkan pressure drop.

Pemilihan Jenis Packing: Kelebihan, Kekurangan, dan Dampaknya

1. Random Packing

- **Contoh:** Raschig ring, Pall ring, Berl saddle, Intalox
- **Kelebihan**
- Biaya **lebih murah** dibandingkan structured packing.
- **Mudah dipasang dan diganti.**
- Tersedia dalam berbagai **material** (keramik, plastik, logam).
- Cocok untuk **kolom berdiameter kecil–menengah.**

Pemilihan Jenis Packing: Kelebihan, Kekurangan, dan Dampaknya

Kekurangan

- Distribusi cairan **kurang seragam**, terutama pada kolom besar.
- Efisiensi pemisahan **lebih rendah**.
- **HETP lebih besar**, sehingga kolom lebih tinggi.
- Pressure drop relatif **lebih tinggi** dibandingkan structured packing.

Dampak pada Desain

- Membutuhkan **tinggi kolom lebih besar** untuk mencapai pemisahan yang sama.
- Diameter kolom mungkin perlu diperbesar untuk menghindari flooding.
- Sistem distributor cairan **harus dirancang lebih hati-hati**.

Pemilihan Jenis Packing: Kelebihan, Kekurangan, dan Dampaknya

Dampak pada Efisiensi Pemisahan

- Efisiensi kontak gas–cair **lebih rendah**.
- Kurang optimal untuk pemisahan dengan **kemurnian tinggi**.
- Lebih sensitif terhadap **maldistribusi cairan**.

Pemilihan Jenis Packing: Kelebihan, Kekurangan, dan Dampaknya

2. Structured Packing

- **Contoh:** Mellapak, Flexipac, Montz packing
- **Kelebihan**
- **Efisiensi pemisahan sangat tinggi.**
- **HETP kecil**, sehingga kolom lebih pendek.
- **Pressure drop sangat rendah** → ideal untuk kolom vakum.
- Distribusi aliran **lebih seragam**.
- Liquid hold-up rendah → **lebih aman** untuk fluida berbahaya.
 - **Liquid hold-up** adalah **jumlah cairan yang tertahan di dalam kolom** (khususnya pada tray atau di sela-sela packing) **pada saat operasi berlangsung**, bukan yang mengalir keluar.

Pemilihan Jenis Packing: Kelebihan, Kekurangan, dan Dampaknya

Kekurangan

- **Biaya lebih mahal.**
- Lebih sensitif terhadap:
 - fouling,
 - padatan,
 - kerak.
- Instalasi membutuhkan **ketelitian tinggi**.

Pemilihan Jenis Packing: Kelebihan, Kekurangan, dan Dampaknya

Dampak pada Desain

- Tinggi kolom dapat **dipersingkat secara signifikan**.
- Cocok untuk **revamping kolom lama** (de-bottlenecking).
- Memerlukan **distributor dan redistributor cairan berkualitas tinggi**.

Dampak pada Efisiensi Pemisahan

- Kontak gas-cair sangat efektif.
- Mampu mencapai **kemurnian produk tinggi**.
- Stabil pada operasi tekanan rendah (vakum).

Rentang tipikal k_x & k_y untuk packing

A. Random packing (Pall ring, Berl saddle, Intalox)

- Asumsi tipikal operasi distilasi/absorpsi (non-vakum, distributor baik):
- $k_x \approx (2 \times 10^{-4}) - (1 \times 10^{-3}) \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- $k_y \approx (1 \times 10^{-4}) - (6 \times 10^{-4}) \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- **Makna desain:** efisiensi biasanya sedang \rightarrow HETP cenderung lebih besar dibanding structured.

Rentang tipikal k_x & k_y untuk packing

B. Structured packing (Mellapak/Flexipac 250Y–500Y, BX gauze)

- $k_x \approx (5 \times 10^{-4}) - (2 \times 10^{-3}) \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- $k_y \approx (2 \times 10^{-4}) - (1 \times 10^{-3}) \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- **Makna desain:** efisiensi lebih tinggi (HETP lebih kecil) terutama bila distribusi cairan bagus.

HETP (Height Equivalent to a Theoretical Plate)

- HETP adalah **tinggi kolom isian (packing)** yang setara dengan satu tahap kesetimbangan (theoretical plate) pada kolom tray.
 - Dengan kata lain:
HETP menyatakan “seberapa efisien” packing dalam menghasilkan satu tahap pemisahan.

Definisi matematis

$$\text{HETP} = \frac{Z}{N_t}$$

di mana:

- Z = tinggi total kolom isian (m)
- N_t = jumlah tahap kesetimbangan teoritis

➡ Semakin kecil HETP → semakin efisien packing

Hubungan HETP dengan desain kolom

- Jika jumlah tahap teoritis sudah diketahui (misalnya dari metode McCabe–Thiele atau Fenske–Underwood–Gilliland):
 - $Z=N_t \times HETP$

Desain kolom isian berbasis HTU–NTU

Prinsip umumnya:

Tinggi kolom yang dibutuhkan agar gas mengalami **1 unit transfer massa**

$$z = HTU \times NTU$$

Kolom bisa dianalisis dari:

- **sisi gas**
- **sisi cair**
- **overall (gabungan gas–cair)**

Desain kolom isian berbasis HTU–NTU

HTU sisi gas

$$H_G = \frac{V}{k'_y a S} \quad (m)$$

Artinya:

- H_G = *Height of Transfer Unit* sisi gas
 - V = laju alir gas (kmol/s)
 - k'_y = koefisien transfer massa gas (basis fraksi mol)
 - a = luas antarmuka efektif (m^2/m^3)
 - S = luas penampang kolom
- Semakin besar $k_y a \rightarrow H_G$ makin kecil → pemisahan makin efisien.

Desain kolom isian berbasis HTU–NTU

NTU sisi gas

$$N_G = \int_{y_2}^{y_1} \frac{(1 - y)_{iM}}{(1 - y)(y - y_i)} dy$$

Makna fisik:

- Mengukur “kesulitan pemisahan”
- Bergantung pada:
 - driving force $(y - y_i)$
 - perubahan komposisi sepanjang kolom

Desain kolom isian berbasis HTU–NTU

$$H_L = \frac{L}{k_x a S}$$

dengan:

- L = laju alir cairan (kmol/s)
- k_x = koefisien transfer massa sisi cair (basis fraksi mol)
- a = luas antarmuka efektif (m^2/m^3)
- S = luas penampang kolom (m^2)

→ Semakin besar $k_x a \rightarrow H_L$ makin kecil → kolom makin efisien.

Desain kolom isian berbasis HTU–NTU

2 Rumus dasar NTU sisi cair (bentuk integral)

Untuk kolom isian **counter-current**:

$$N_L = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{(x^* - x)}$$

dengan:

- x = fraksi mol solut di fase cair
 - x^* = fraksi mol cairan **setimbang** dengan fase gas lokal
- Jika driving force kecil $(x^* - x) \rightarrow N_L$ besar \rightarrow kolom tinggi.

Desain kolom isian berbasis HTU–NTU

HTU sisi cair (overall liquid)

$$H_{OL} = \frac{L}{K'_x a S} \quad (m)$$

- L = laju alir cairan
- K'_x = koefisien transfer massa **overall** berbasis cairan

NTU sisi cair

$$N_{OL} = \int_{x_2}^{x_1} \frac{(1 - x)_{*M}}{(1 - x)(x^* - x)} dx$$

Rumus

2 Rumus dasar N_{OG} (bentuk integral)

Untuk kolom isian counter-current:

$$H_{OG} = \frac{V}{K_y a S}$$

- V = laju alir molar gas (kmol/s)
- K_y = koef. transfer massa **overall basis gas**

dengan:

- y = fraksi mol solut di gas
 - y^* = fraksi mol gas **setimbang** dengan cairan lokal
- Driving force gas = $(y - y^*)$

$$N_{OG} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{(y - y^*)}$$

6 Hubungan N_{OG} dengan jumlah tahap teoritis (N)

Untuk absorpsi ideal:

$$N_{OG} = \frac{\ln A}{(1 - 1/A)} N$$

→ Pendekatan kontinyu (NTU) \leftrightarrow pendekatan diskrit (tray/tahap)

7 Hubungan dengan HETP

Karena:

$$\text{HETP} = \frac{z}{N}$$

dan:

$$z = H_{OG} N_{OG}$$

maka:

$$\text{HETP} = H_{OG} \frac{N_{OG}}{N} = H_{OG} \frac{\ln A}{(1 - 1/A)}$$