

# DISAIN JARINGAN PENUKAR KALOR (HEAT EXCHANGER NETWORK DESIGN)



# Pendahuluan

- **Jaringan Penukar Kalor (Heat Exchanger Network - HEN)** adalah aplikasi integrasi panas (heat integration) yang dirancang untuk mengatur hubungan efisien antar penukar kalor (heat exchanger) dalam suatu sistem proses industri.
- **Tujuannya** adalah untuk mentransfer panas antara beberapa aliran panas (hot streams) dan aliran dingin (cold streams) guna memaksimalkan pemulihan energi (heat recovery) dan meminimalkan penggunaan utilitas eksternal (seperti steam atau air pendingin).

## 1. Konsep dan Prinsip Utama

- **Analisis Pinch (Pinch Analysis):** Metodologi sistematis yang digunakan untuk menemukan titik pinch (pinch point) dalam sistem, yang menentukan batas minimum konsumsi energi dan memaksimalkan efisiensi.
- **Maximum Energy Recovery (MER):** Jaringan dirancang untuk memulihkan panas sebanyak mungkin antara aliran proses sebelum menggunakan utilitas eksternal.
- **Pinch Point:** Daerah di mana perbedaan suhu antara aliran panas dan dingin adalah yang terendah, membagi sistem menjadi dua zona (di atas dan di bawah pinch).
- **Aturan Pinch (Pinch Rules):**
  - ✓ *Above Pinch:* Tidak menggunakan pendingin (cold utility).
  - ✓ *Below Pinch:* Tidak menggunakan pemanas (hot utility).
  - ✓ *No Heat Exchange across Pinch:* Tidak memindahkan panas dari atas ke bawah, karena akan mengurangi efisiensi.



# Pendahuluan

## 2. Langkah-Langkah Desain

- **Ekstraksi Data:** Mengidentifikasi aliran panas (sumber) dan dingin (sank) dari neraca massa dan energi, termasuk suhu dan entalpi.
- **Targeting:** Menghitung kebutuhan pemanasan dan pendinginan minimum menggunakan *Composite Curves* dan *Grand Composite Curve*.
- **Desain Jaringan (Network Design):** Membuat diagram grid (koneksi) penukar panas berdasarkan analisis pinch dan aturan heuristik (heuristic rules) untuk meminimalkan jumlah unit dan memaksimalkan recovery.
- **Loop Breaking:** Mengurangi jumlah penukar kalor dengan "memecah loop" yang terbentuk, seringkali dengan menambahkan atau mengurangi beban panas pada unit tertentu

## 3. Metode dan Pendekatan

- **Metode Pinch (Pinch Method):** Metode berbasis termodinamika untuk desain.
- **Pemrograman Matematika (Mathematical Programming):** Menggunakan optimasi Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) atau Mixed-Integer Linear Programming (MILP).
- **Algoritma Evolusioner:** Penggunaan algoritma genetika atau *simulated annealing* untuk mencari desain optimal.
- **Software:** Aspen Energy Analyzer, Python, atau tools buatan sendiri sering digunakan untuk memodelkan HEN

## 4. Keuntungan Desain Jaringan yang Baik

- Mengurangi biaya energi secara signifikan (penurunan penggunaan utilitas panas/dingin).
- Mengurangi modal (capital cost) untuk peralatan (jumlah penukar panas).
- Meningkatkan efisiensi termal dan keamanan operasional.

# Hukum Pertama dan Kedua Termodinamika

- Hukum Pertama memberikan persamaan untuk mencari perubahan entalpi pada arus-arus yang melewati heat exchanger.
- Hukum Kedua memberikan arah aliran panas, yaitu dari zat yang lebih panas ke zat yang lebih dingin.
- Pada HE, suhu arus panas (hot stream) tidak bisa lebih rendah dari arus dingin. Hanya bisa didinginkan hingga mendekati perbedaan suhu minimal yang diizinkan ( $DT_{min}$ ).
- Suhu yang mendekati suhu akhir arus panas terendah pada HE disebut pinch point atau pinch condition. Sedangkan pengertian pinch adalah driving force minimal yang diizinkan dalam suatu unit HE

# Konsep Dasar Analisa Pinch

1. Composite Curve arus panas dan dingin, untuk memperkirakan;
  - Kebutuhan energi minimal (untuk utilitas panas dan dingin)
  - Kebutuhan luas jaringan (network area) minimal
  - Kebutuhan jumlah HE minimal
2.  $DT_{min}$  dan Pinch Point  $DT_{min}$  diperlukan untuk menentukan seberapa dekat Composite curve arus panas dan dingin bisa didekatkan tanpa melanggar Hukum Kedua Termodinamika
3. Grand Composite Curve, menentukan pemenuhan kebutuhan energi pada sistem dengan utilitas

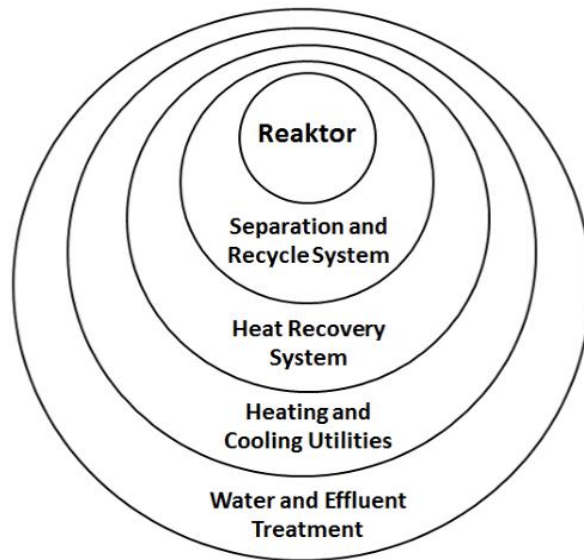
# Aplikasi Teknologi Pinch

Awalnya hanya digunakan pada sektor petrochemical namun sekarang Pinch Technology sudah digunakan secara luas di industri kimia. Contoh penggunaan teknologi ini:

1. Saat memanaskan atau mendinginkan suatu proses, pinch teknologi digunakan sebagai Waste heat recovery
2. Energy saving (menghemat energy) pada industri baja, makanan, kertas, semen, dan minyak.
3. Digunakan pada masalah seperti, meningkatkan kualitas/penggunaan kembali limbah, mengurangi emisi, meningkatkan yield produk, serta meningkatkan keamanan (safety) dari proses.



# Onion Model For Process Design



Gambar II-1 Onion model dari desain proses

- **Onion Model (model bawang)** dalam **desain proses kimia**, menggambarkan bahwa desain proses dilakukan **berlapis dari inti ke luar**, dengan fokus utama pada reaktor terlebih dahulu, lalu sistem pendukungnya
- Desain dilakukan **secara sistematis dan hierarkis**.
- Keputusan di lapisan dalam akan membatasi dan memengaruhi lapisan luar.
- Membantu mencapai desain yang **efisien energi, ekonomis, dan ramah lingkungan**

Penjelasan tiap lapisan (dari dalam ke luar):

## 1. Reaktor

- Inti dari desain proses.
- Menentukan reaksi kimia, konversi, selektivitas, kondisi operasi (T, P), dan kinetika.
- Keputusan di tahap ini sangat memengaruhi seluruh desain berikutnya.

## 2. Separation and Recycle System (Pemisahan dan Daur Ulang)

- Memisahkan produk dari reaktan yang tidak bereaksi dan produk samping.
- Reaktan yang belum bereaksi biasanya direcycle kembali ke reaktor.
- Contoh: distilasi, absorpsi, ekstraksi, membran.

## 3. Heat Recovery System (Pemulihan Panas)

- Mengintegrasikan panas dari aliran panas untuk memanaskan aliran dingin.
- Bertujuan mengurangi konsumsi energi dan biaya utilitas.
- Biasanya direalisasikan melalui **heat exchanger network**.

## 4. Heating and Cooling Utilities (Utilitas Pemanas & Pendingin)

- Menyediakan panas atau pendinginan tambahan yang tidak bisa dipenuhi dari heat recovery.
- Contoh: steam, furnace, cooling water, refrigerant.

## 5. Water and Effluent Treatment (Pengolahan Air & Limbah)

- Lapisan terluar, menangani air limbah, gas buang, dan residu padat.
- Bertujuan memenuhi regulasi lingkungan dan keselamatan

# Onion Model Reactor

## Definisi Reactor:

Reaktor adalah unit inti (core) dalam sistem proses yang mengkonversi umpan (feed) menjadi produk melalui reaksi kimia.

## Aliran Proses:

Input (F): Feed stream - umpan mentah yang masuk ke reaktor

Proses: Reaksi kimia berlangsung di dalam reaktor

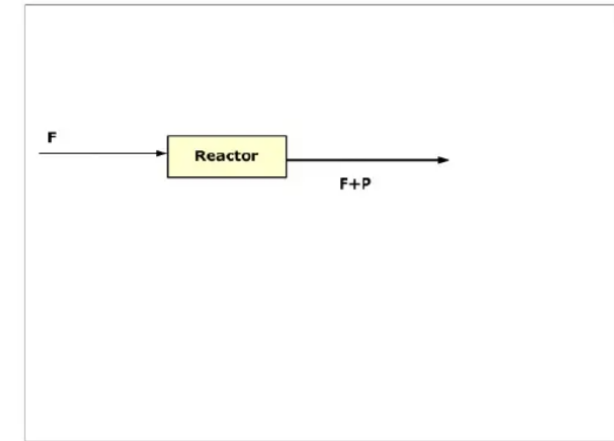
Output (F+P): Campuran keluaran yang terdiri dari:

F: Umpan yang tidak bereaksi (unreacted feed)

P: Produk yang terbentuk

## Parameter Kritis Reactor:

- Konversi (conversion rate)
- Selektivitas (selectivity)
- Yield produk (product yield)
- Suhu dan tekanan operasi
- Waktu tinggal (residence time)



## Signifikansi:

- Performa reaktor menentukan kualitas dan kuantitas produk
- Keputusan desain reaktor akan mempengaruhi semua layer di atasnya
- Optimasi reaktor adalah fondasi dari keseluruhan sistem yang efisien



# Onion Model Separator

## Fungsi Separator:

Separator memisahkan aliran keluaran reaktor ( $F+P$ ) menjadi dua fraksi: produk murni ( $P$ ) dan umpan yang tidak bereaksi ( $F$ ).

## Aliran Proses:

Input:  $F+P$  dari reaktor

Proses Pemisahan:

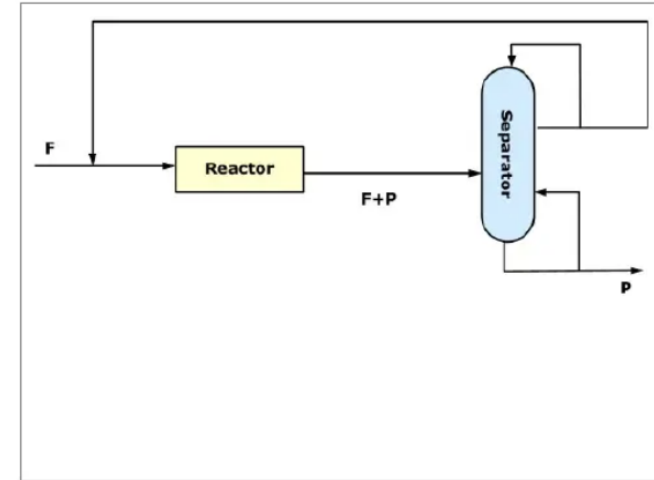
- Produk ( $P$ ) dikeluarkan sebagai final product
- Unreacted feed ( $F$ ) direcycle kembali ke reaktor

Output:

- $P$  (produk akhir/bottom product)
- $F$  (recycle stream kembali ke inlet reaktor)

## Parameter Penting Separator:

- Efisiensi pemisahan (separation efficiency)
- Recovery produk (product recovery)
- Kemurnian produk (product purity)
- Laju recycle



## Signifikansi:

- Separator efficiency menentukan overall conversion
- Recycle strategy meningkatkan yield total produk
- Desain separator yang baik meminimalkan product loss
- Jumlah dan kualitas recycle mempengaruhi beban reaktor

# Onion Model Heat Recovery

## Konsep Heat Recovery:

Memfaatkan perbedaan temperatur antara stream panas dan dingin untuk transfer energi internal, mengurangi kebutuhan utilitas eksternal.

## Komponen Utama:

C (Cooler): Pendingin pada outlet separator

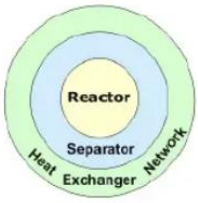
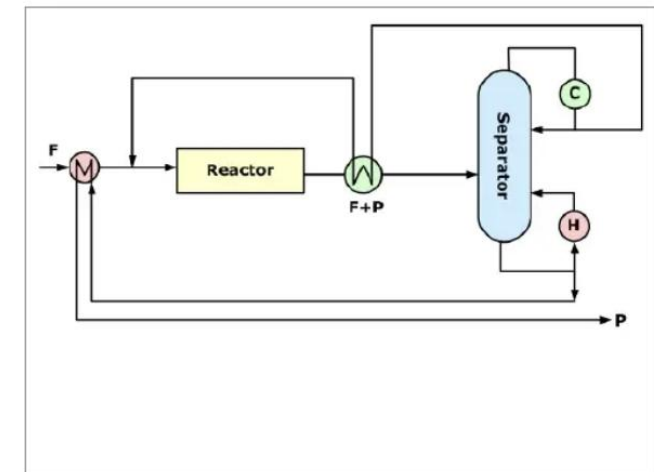
- Mendinginkan stream panas yang keluar dari separator
- Energi panas dimanfaatkan untuk memanaskan stream lain

H (Heater): Pemanas pada inlet separator

- Menerima energi dari stream panas yang didinginkan
- Menaikkan suhu stream inlet sebelum masuk separator

## Keuntungan Heat Recovery:

- Meningkatkan efisiensi energi keseluruhan
- Mengurangi konsumsi utilitas eksternal (steam, pendingin)
- Menurunkan biaya operasional
- Mengurangi dampak lingkungan



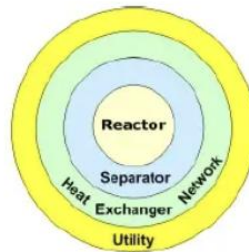
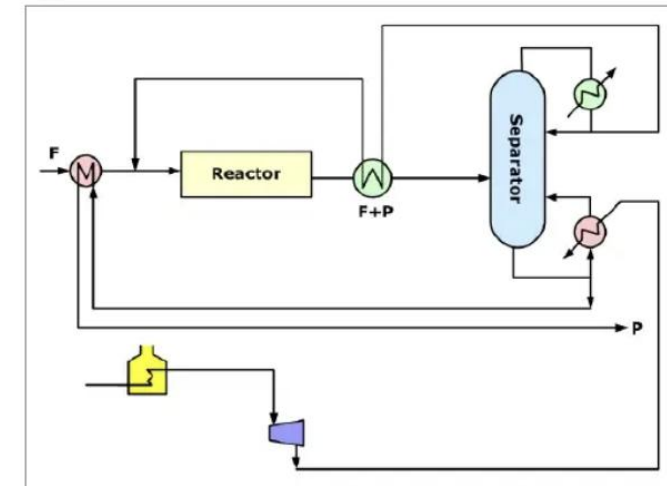
# Onion Model Utility

## Fungsi Utility:

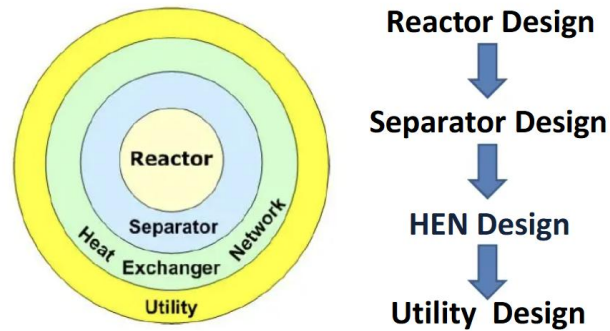
Sistem utilitas eksternal menyediakan energi tambahan yang tidak dapat dipulihkan secara internal untuk menyeimbangkan neraca energi keseluruhan.

## Komponen Utama:

- Mixer (M): Mencampur feed segar dengan recycle dari separator
- Reactor: Unit reaksi utama
- Separator: Pemisah produk dan recycle
- Heat Exchanger Network: Jaringan pertukaran panas internal
- Utility Equipment (ditunjukkan dengan simbol steam dan cooling):
  - Steam/Hot Utility: Untuk memberikan panas (heating)
  - Cooling Water/Cold Utility: Untuk mendinginkan (cooling)



# Hierarchy Process Design



Process design is strongly coupled with Heat Exchanger Networks

- Desain proses **tidak boleh dipisahkan** dari desain HEN.
- Perubahan kecil pada: suhu reaktor, tekanan operasi, urutan pemisahan dapat **mengubah total kebutuhan energi secara signifikan**.

## Contoh Studi Kasus Sederhana, Proses Produksi Metanol

### 1. Reaktor metanol

- Reaksi:  $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$  (eksotermis)
- Suhu keluar reaktor  $\approx 250\text{--}270^\circ\text{C}$  (panas tinggi)

### 2. Pendinginan & Separator

Gas panas didinginkan sebelum kondensasi metanol

### 3. Pemurnian

Distilasi membutuhkan reboiler (panas)

## Pendekatan Konvensional (tidak terintegrasi)

- Panas reaktor  $\rightarrow$  dibuang ke cooling water
- Reboiler distilasi  $\rightarrow$  dipanaskan dengan steam
- Akibatnya: Konsumsi steam tinggi, Cooling water boros, Biaya energi besar

## Integrasi dengan Heat Exchanger Network (HEN)

- Panas dari effluent reaktor **tidak dibuang**, digunakan untuk: Memanaskan umpan reaktor, Menyediakan panas sebagian untuk reboiler distilasi
- Di sinilah **Pinch Analysis** berperan

## Kaitan dengan Pinch Analysis

### a. Konsep Dasar Pinch Analysis

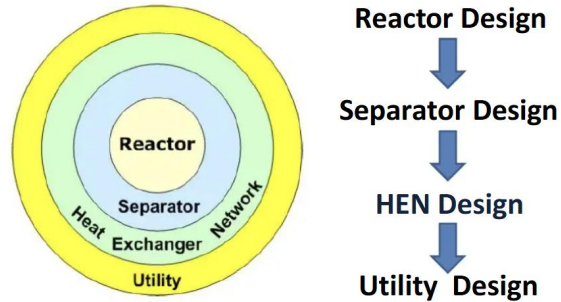
Pinch analysis adalah metode sistematis untuk:

- Menentukan **kebutuhan minimum energi panas** ( $Q_{H,min}$ )
- Menentukan **kebutuhan minimum pendinginan** ( $Q_{C,min}$ )
- Menentukan **titik pinch temperature**

### b. Identifikasi Stream

- **Hot streams:** Effluent reaktor ( $270 \rightarrow 150^\circ\text{C}$ ) & Produk panas dari kolom distilasi
- **Cold streams:** Feed reaktor ( $40 \rightarrow 220^\circ\text{C}$ ) & Reboiler distilasi

# Hierarchy Process Design



Process design is strongly coupled with Heat Exchanger Networks

## c. Composite Curve

Dari composite curve:

- Ditemukan **pinch temperature**, misalnya:  $T_p \approx 180^\circ\text{C}$
- Aturan desain:
  - ✓ Tidak boleh transfer panas melewati pinch
  - ✓ Tidak boleh ada pemanasan utilitas di bawah pinch
  - ✓ Tidak boleh ada pendinginan utilitas di atas pinch

## d. Hasil Integrasi

- Steam yang dibutuhkan turun drastis
- Cooling water berkurang signifikan
- Jumlah heat exchanger mungkin bertambah, tetapi **energi total turun**

## 4. Implikasi Energi Sebelum Integrasi

- Steam: 100%
- Cooling water: 100%
- Energy recovery: rendah

## Setelah Integrasi HEN + Pinch

- Penghematan energi panas: **20–50%**
- Pengurangan emisi CO<sub>2</sub> (karena boiler lebih kecil)
- Efisiensi termal proses meningkat

Dalam industri kimia berat, penghematan energi 30% adalah **sangat signifikan**.

## 5. Implikasi Ekonomi

### a. Capital Cost (CAPEX)

- ↑ Bisa meningkat karena:
- Lebih banyak heat exchanger
  - Desain lebih kompleks

### b. Operating Cost (OPEX)

- ↓ Turun secara signifikan:
- Konsumsi steam menurun
  - Beban cooling water lebih kecil
  - Boiler & cooling tower lebih kecil

# Investasi vs Energi

Dalam desain jaringan alat penukar panas:

- **Energi** → biaya operasi (steam, bahan bakar, cooling water, listrik)
- **Investasi** → biaya awal (jumlah heat exchanger, luas perpindahan panas, pipa, kontrol)

Tujuan desain HEN **bukan sekadar meminimalkan energi**, tetapi **meminimalkan total biaya (total annual cost)**.

Desain jaringan alat penukar panas terkait persoalan berikut:

- Aliran panas  $N_H$  dengan laju alir kapasitas panasnya akan didinginkan dari suhu input  $T_H$  suplai menjadi suhu capaian  $T_H$  target.
- Aliran dingin  $N_c$  dengan laju alir kapasitas panasnya akan dipanaskan dari suhu input  $T_c$  suplai menjadi suhu capaian  $T_c$  target

## Pilihan 1: Energi Murah, Investasi Rendah

- Panas dibuang ke cooling water
- Panas tambahan dari steam
- Sedikit heat exchanger
- ✗ Energi boros
- ✓ Investasi kecil

## Pilihan 2: Energi Minimum (Pinch Target)

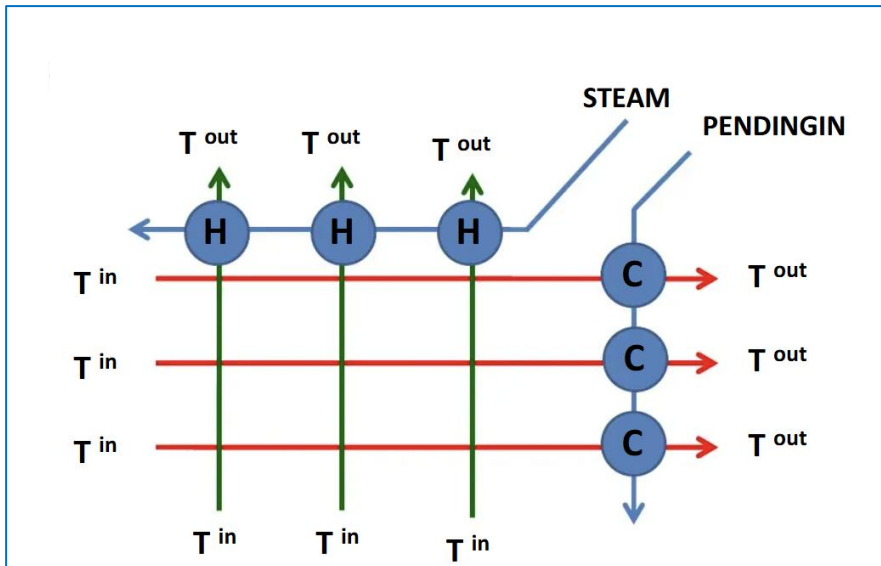
- Panas hot stream dimanfaatkan maksimal
- Utility diminimalkan
- Banyak heat exchanger
- ✓ Energi minimum
- ✗ Investasi besar

**Desain optimal berada di tengah**, bukan di ekstrem.



# Example

Apakah meminimalkan biaya or energi



## Identifikasi Elemen

- **H** = heater (dipanaskan oleh **steam**)
- **C** = cooler (didinginkan oleh **pendingin**)
- Garis merah = **aliran panas (hot stream)**
- Garis hijau = **aliran dingin (cold stream)**
- $T_{in}$  dan  $T_{out}$  = temperatur masuk & keluar

## Sudut Pandang Energi

- Tidak ada **heat recovery**
- Semua panas diambil dari steam dan Dibuang ke pendingin. Ini berarti: Konsumsi steam **maksimum**, Konsumsi cooling water **maksimum**, Jauh dari target pinch ( $Q_{H,min}$  &  $Q_{C,min}$ )
- **Energi sangat tidak efisien**

## Sudut Pandang Investasi (Biaya Peralatan)

Apa yang menentukan biaya alat penukar panas?

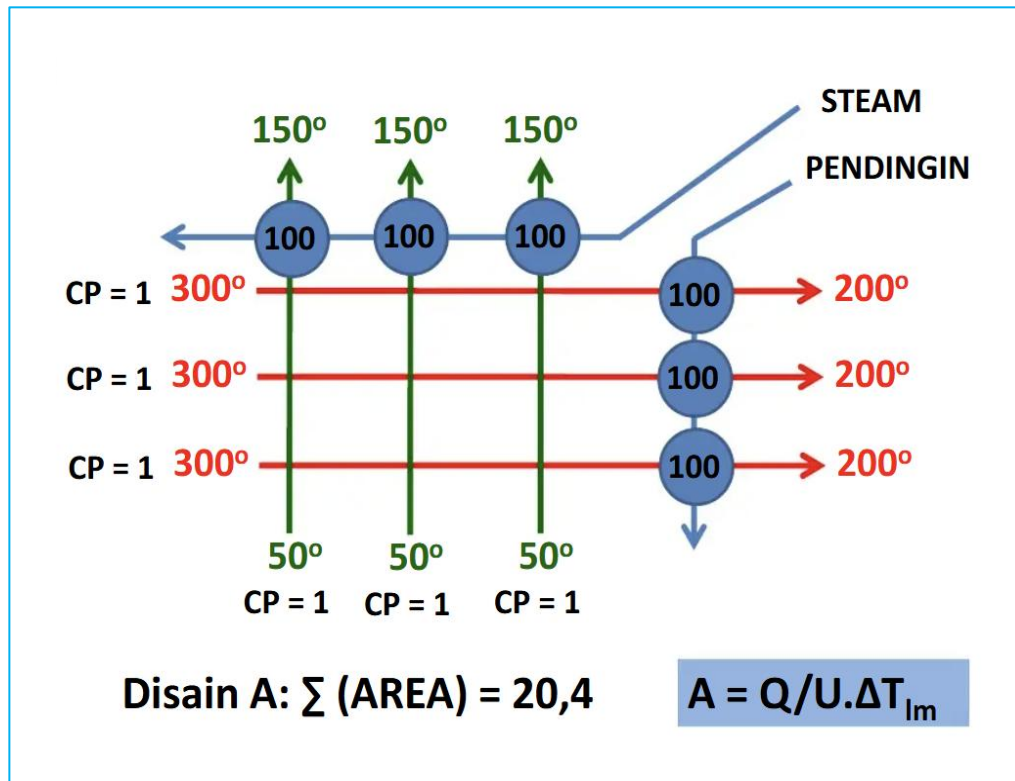
1. Jumlah unit heat exchanger
2. Luas perpindahan panas
3. Kompleksitas jaringan

Pada gambar: Setiap stream punya **satu heater atau satu cooler sederhana**, Tidak ada jaringan silang antar stream, Tidak ada kontrol temperatur kompleks

- ✓ Jumlah unit minimum
- ✓ Desain paling sederhana
- ✓ Area HX relatif kecil ( $\Delta T$  besar dengan utility)

Dari sisi **peralatan saja**, ini **sangat murah**

# Example

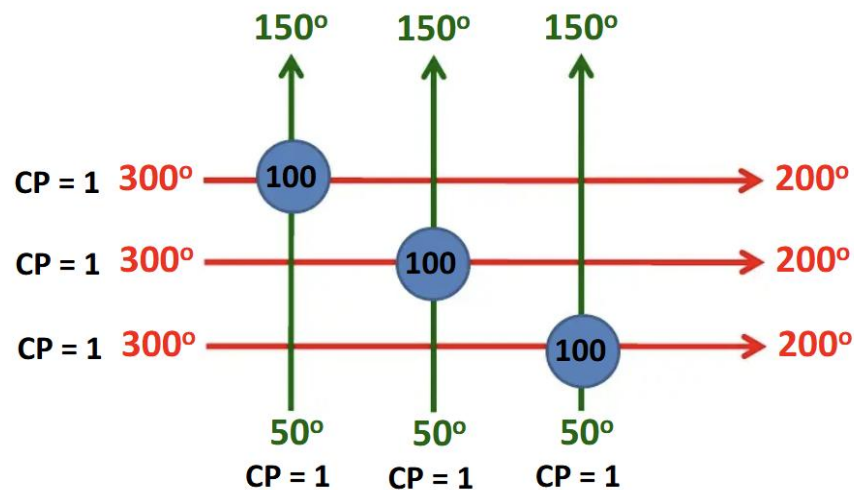


Konfigurasi dengan internal heat recovery yang mengintegrasikan hot dan cold streams. Hot streams melewati heat exchanger internal untuk memanaskan cold streams sebelum didinginkan utilitas, mengurangi kebutuhan energi eksternal hingga 30-50%.

Karakteristik:

- Capital cost: TINGGI (area lebih besar)
- Operating cost: RENDAH (utilitas berkurang)
- Efisiensi energi: TINGGI
- Total cost tahunan: LEBIH RENDAH dari Disain B (dalam jangka panjang)

# Example



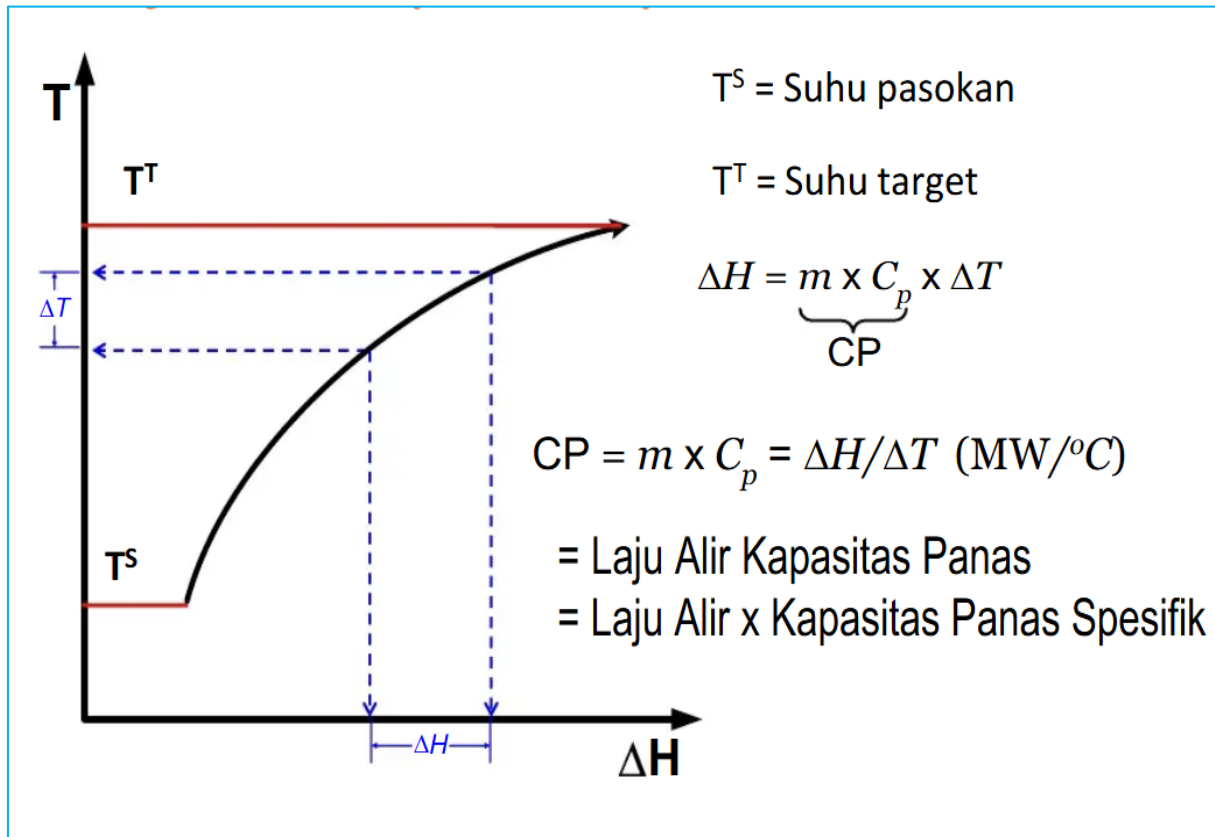
Disain B:  $\sum (\text{AREA}) = 13,3$

Konfigurasi paling sederhana tanpa internal heat recovery. Setiap hot stream ( $300^{\circ}\text{C} \rightarrow 200^{\circ}\text{C}$ ) didinginkan secara independen, dan setiap cold stream ( $50^{\circ}\text{C} \rightarrow 150^{\circ}\text{C}$ ) dipanaskan secara independen menggunakan utilitas eksternal.

Karakteristik:

- Capital cost: RENDAH
- Operating cost: TINGGI (semua energi dari utilitas eksternal)
- Efisiensi energi: RENDAH
- Fungsi: Baseline/referensi untuk perbandingan

# Laju Alir Kapasitas Panas



## Definisi:

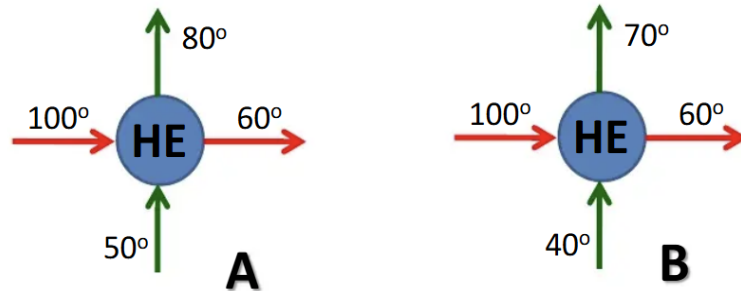
CP adalah jumlah energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu aliran fluida sebesar  $1^{\circ}C$ . Dinyatakan dalam satuan MW/ $^{\circ}C$  atau kW/K.

## Arti Fisik:

- CP besar  $\rightarrow$  Diperlukan energi banyak untuk mengubah suhu (sulit dipanaskan/didinginkan)
- CP kecil  $\rightarrow$  Diperlukan energi sedikit untuk mengubah suhu (mudah dipanaskan/didinginkan)

# $\Delta T_{\text{Minimum}}$

$\Delta T_{\text{min}}$  = beda suhu terkecil yang diizinkan



Sistem manakah yang memiliki beda suhu kecil dari 20° ? (jika  $\Delta T_{\text{min}} = 20^\circ$ )

## Definisi:

$\Delta T_{\text{min}}$  adalah beda suhu terkecil yang diizinkan antara hot stream dan cold stream dalam heat exchanger. Parameter ini sangat penting dalam design HEN.

## Contoh Kasus A ( $\Delta T_{\text{min}} = 20^\circ\text{C}$ disyaratkan):

Heat exchanger dengan:

- Hot stream: inlet 100°C → outlet 60°C
- Cold stream: inlet 50°C → outlet 80°C

Analisis:

- Outlet hot stream = 60°C
- Inlet cold stream = 50°C
- $\Delta T = 60 - 50 = 10^\circ\text{C}$  ✗ TIDAK MEMENUHI (kurang dari 20°C)

## Contoh Kasus B ( $\Delta T_{\text{min}} = 20^\circ\text{C}$ disyaratkan):

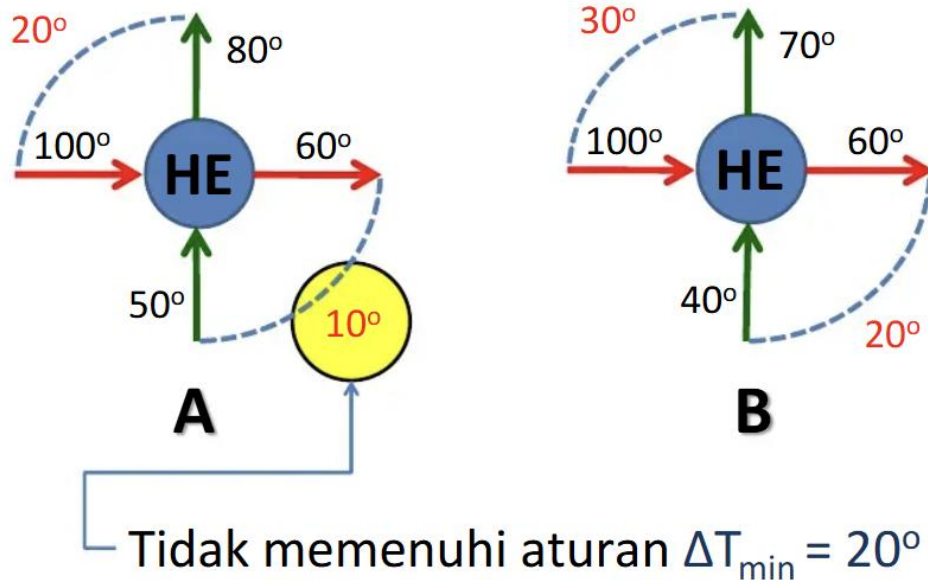
Heat exchanger dengan:

- Hot stream: inlet 100°C → outlet 60°C
- Cold stream: inlet 40°C → outlet 70°C

Analisis:

- Outlet hot stream = 60°C
- Inlet cold stream = 40°C
- $\Delta T = 60 - 40 = 20^\circ\text{C}$  ✓ MEMENUHI (sama dengan minimum)

# $\Delta T_{\text{Minimum}}$



## Sistem A - TIDAK MEMENUHI:

- $\Delta T_{\text{min}}$  pada titik terdekat = 10° (kuning)
- Lebih kecil dari requirement 20°
- Thermodynamically TIDAK FEASIBLE
- Panas tidak bisa ditransfer dari hot ke cold stream pada kondisi ini

## Sistem B - TIDAK MEMENUHI:

- $\Delta T_{\text{min}}$  pada titik terdekat = 20° (diagram menunjukkan 30°)
- Terlihat lebih besar, tetapi analisis detail menunjukkan tidak memenuhi requirement strict
- Atau feasible dengan critical constraint

Kesimpulan: Kedua sistem tidak memenuhi aturan strict  $\Delta T_{\text{min}} = 20^\circ$  pada semua titik pertukaran panas.



# Beban Penukar Panas

Data:

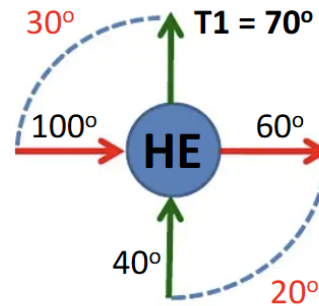
- CP aliran panas = 0,3 MW/°C
- CP aliran dingin = 0,4 MW/°C

Periksa:

- $T1 = 40 + (100 - 60) (0,3/0,4) = 70^\circ$  (OK)

Beban penukar panas:

- $Q = 0,4 (70 - 40) = 0,3 (100 - 60) = 12 \text{ MW}$



Luas permukaan perpindahan (A)

Formula:

$$A = Q / (U \cdot \Delta T_{lm})$$

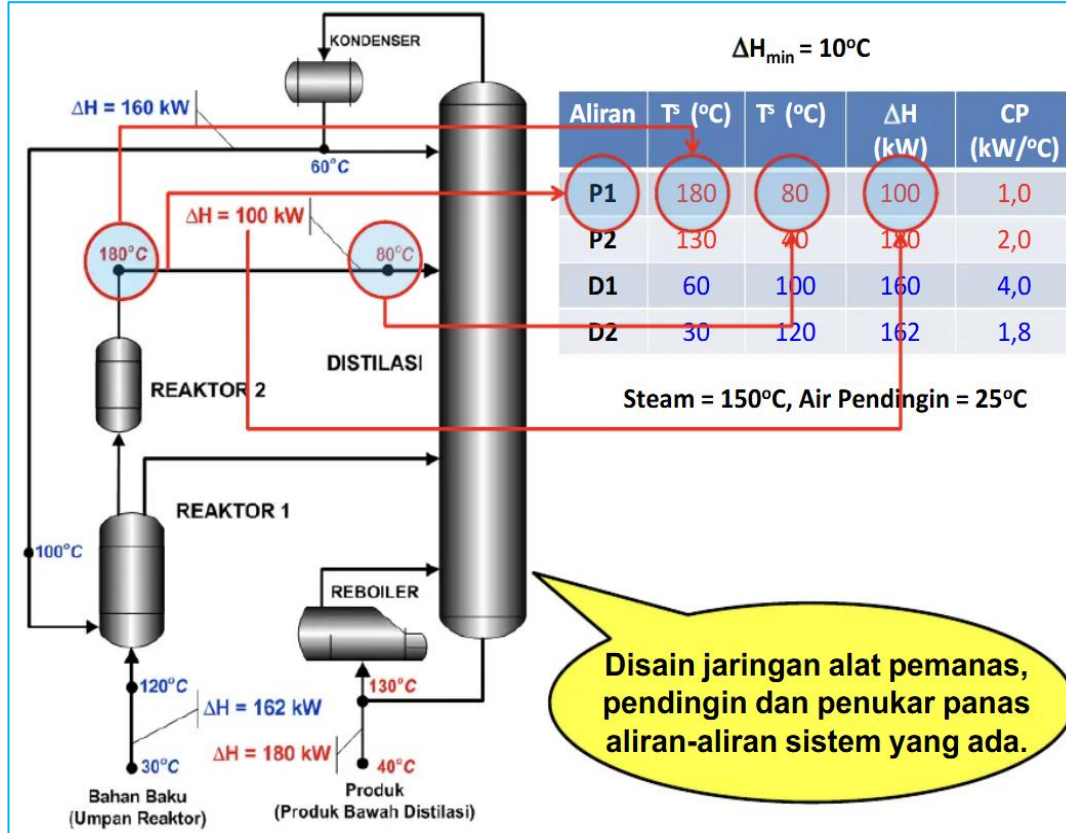
Jika diketahui:

- Koefisien perpindahan panas overall,  $U = 1,7 \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $\Delta T_{lm} = (30 - 20) / \log_e(30/20) = 24,66$

Maka:

$$A = 12.000 / (1,7 \times 24,66) = 286,2 \text{ m}^2$$

## Disain Baseline (Tanpa Optimasi)



Sistem:

- Reaktor 1 (100°C) → Reaktor 2 (180°C) → Kolom Distilasi (60°C) → Kondenser & Reboiler

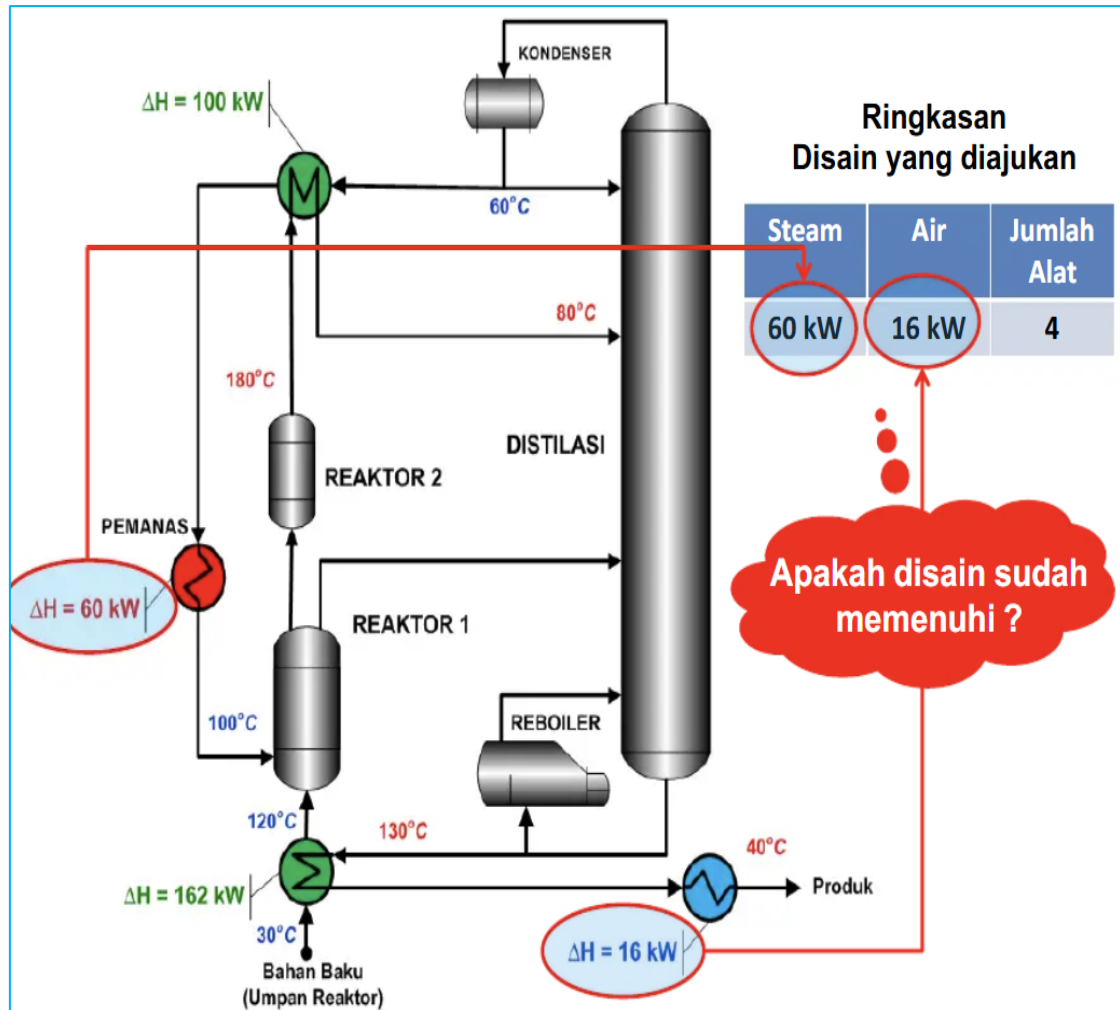
Beban Utilitas (Energi dari luar):

- Steam Kondenser: 160 kW
- Heater Reaktor 2: 100 kW
- Reboiler Distilasi: 180 kW
- Total: ~440 kW

### Karakteristik:

- Capital cost RENDAH
- Operating cost TINGGI (boros energi)
- Efisiensi energi RENDAH (tidak ada internal heat recovery)

# Disain Optimasi dengan Heat Recovery



## Strategi:

- Tambah 1 Heat Exchanger internal (M) untuk memanfaatkan panas dari hot streams P1, P2
- Transfer panas ke cold streams D1, D2 sebelum utilitas eksternal
- Reduce kebutuhan steam dan cooling water

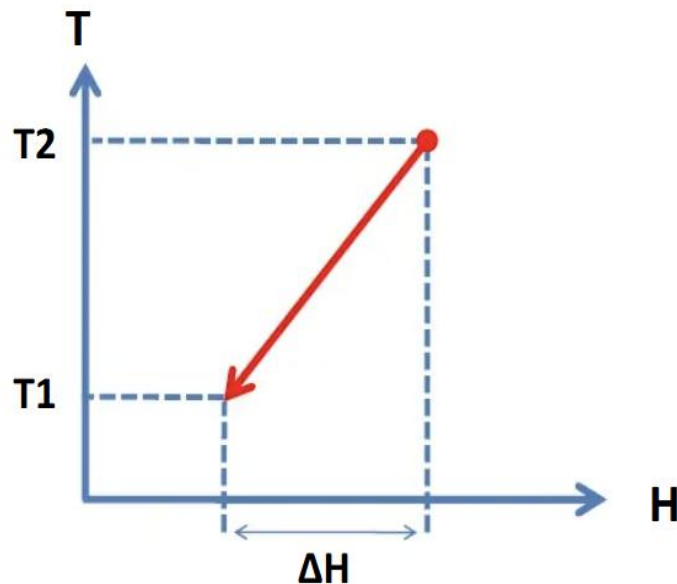
## Hasil Optimasi:

- Steam: 160 kW  $\rightarrow$  60 kW ( $\downarrow$ 62.5%)
- Cooling Water: 280 kW  $\rightarrow$  16 kW ( $\downarrow$ 94%)
- Total Utilitas: 440 kW  $\rightarrow$  76 kW ( $\downarrow$ 82.7%)

## Karakteristik:

- Capital cost NAIK (1 alat tambahan)
- Operating cost TURUN DRASTIS (82.7% pengurangan)
- ROI sangat cepat (<6 bulan)
- Efisiensi energi TINGGI

# Diagram Entalpi - Suhu



**Kasus 1 aliran panas**

## Kasus 1 - Aliran Panas Tunggal

Diagram T-H (Temperature-Enthalpy):

- Sumbu Y (Vertical): Suhu (T) - T1 hingga T2
- Sumbu X (Horizontal): Entalpi (H)
- Garis Merah: Kurva perubahan entalpi aliran dari T1 ke T2

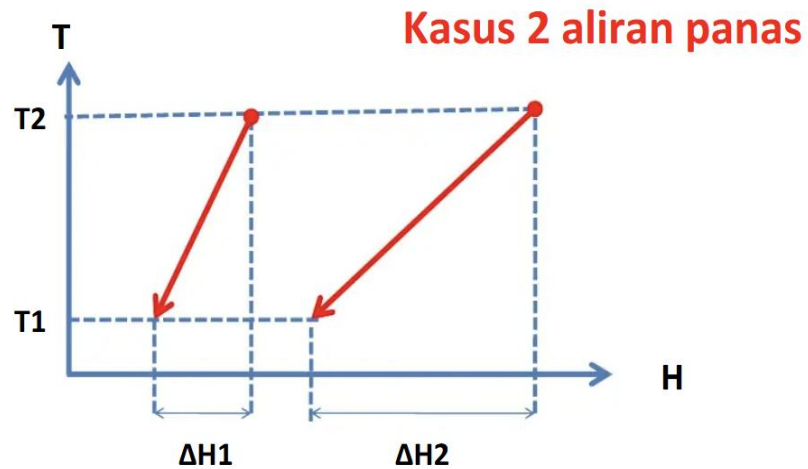
Interpretasi:

- Aliran panas masuk pada T1, keluar pada T2
- Perubahan entalpi =  $\Delta H$  = horizontal distance
- Semakin besar  $\Delta H$ , semakin banyak energi yang ditransfer
- Slope garis menunjukkan CP (kapasitas panas): slope =  $\Delta T / \Delta H = 1/CP$

Kegunaan:

- Visualisasi thermal profile single stream
- Basis untuk analisis Pinch Point dalam HEN design

# Diagram Entalpi - Suhu



## Kasus 2 - Dua Aliran Panas

Diagram T-H dengan 2 Hot Streams:

- Garis Merah 1: Hot stream pertama ( $T1 \rightarrow T2$  dengan  $\Delta H1$ )
- Garis Merah 2: Hot stream kedua ( $T1 \rightarrow T2$  dengan  $\Delta H2$ )
- Kedua streams memiliki suhu inlet/outlet sama tetapi energi berbeda

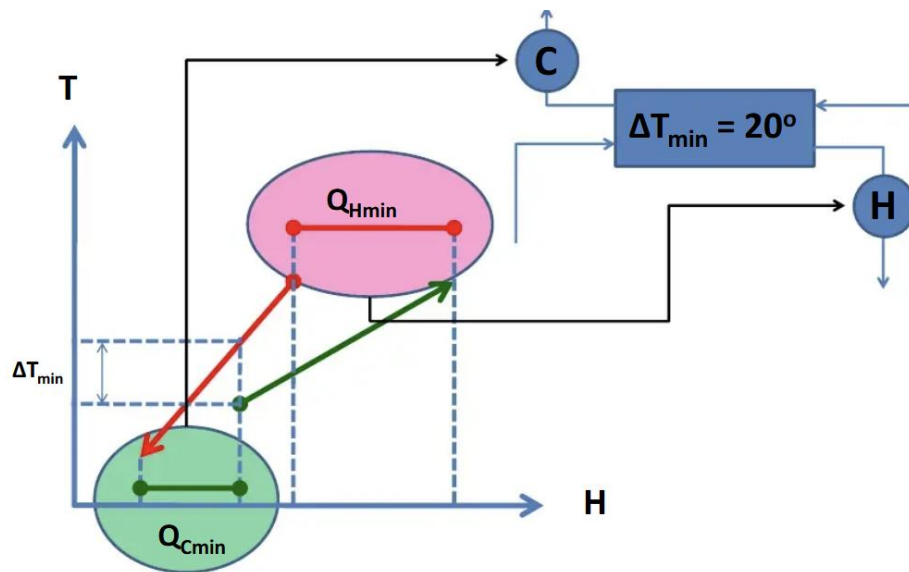
Interpretasi:

- $\Delta H1 < \Delta H2 \rightarrow$  Stream kedua release lebih banyak energi
- Slope berbeda  $\rightarrow$  CP berbeda antara dua streams
- Stream dengan slope lebih kecil = CP lebih besar

Kegunaan:

- Membandingkan karakteristik energi multiple streams
- Identifikasi stream mana yang "heavier" (CP besar) atau "lighter" (CP kecil)

# Diagram Entalpi - Suhu



## Diagram T-H Komprehensif dengan Utilitas

Struktur Lengkap:

Hot Streams (Merah):

- Masuk panas, harus didinginkan (C = Cooler)
- Area hijau: Panas yang dipulihkan internal ( $Q_{Cmin}$ )

Cold Streams (Hijau):

- Masuk dingin, harus dipanaskan (H = Heater)
- Area: Panas yang diterima secara internal

Pinch Point ( $\Delta T_{min} = 20^\circ$ ):

- Titik kritis di mana hot dan cold streams paling dekat
- $\Delta T_{min}$  harus dijaga minimal  $20^\circ$  untuk feasibility
- Membagi problem menjadi hot side dan cold side

Utilitas:

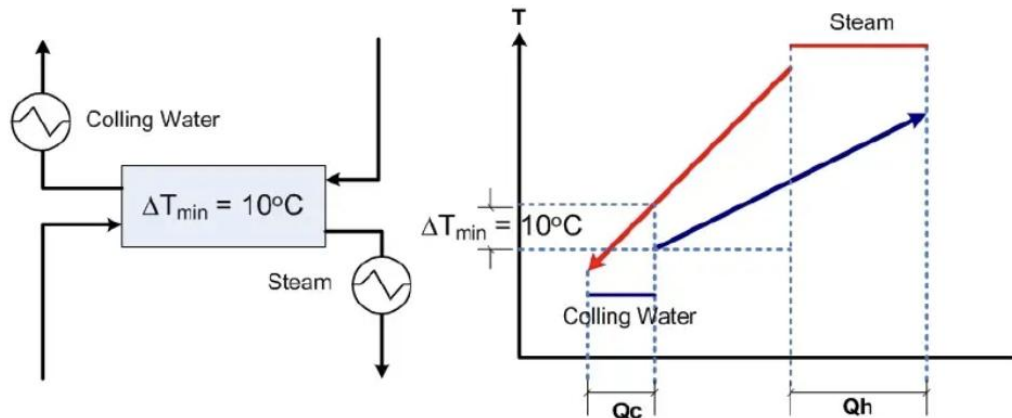
- $Q_{Hmin}$  (Panas): Panas minimum dari steam yang diperlukan
- $Q_{Cmin}$  (Pendingin): Pendingin minimum yang diperlukan
- Semakin kecil  $Q_{Hmin}$  dan  $Q_{Cmin} \rightarrow$  desain lebih optimal

Keuntungan Diagram Ini:

- Visual pemahaman struktur thermal sistem
- Identifikasi pinch point untuk optimization
- Estimasi minimum utility requirement
- Target untuk HEN design optimization



# Diagram Entalpi - Suhu



## Kasus $\Delta T_{min} = 10^{\circ}\text{C}$

### Diagram Aliran (Kiri):

- Sistem dengan minimum temperature approach  $10^{\circ}\text{C}$
- Perbedaan suhu minimal antara hot dan cold stream =  $10^{\circ}\text{C}$

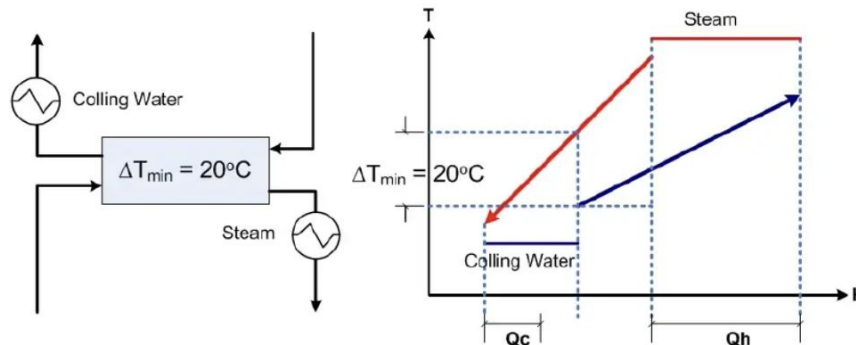
### Diagram T-H (Kanan):

- Garis Merah (Hot Stream): Masuk panas, harus didinginkan
- Garis Biru (Cold Stream): Masuk dingin, harus dipanaskan
- Gap Vertikal =  $10^{\circ}\text{C}$ : Menunjukkan  $\Delta T_{min}$  yang kecil

### Konsekuensi $\Delta T_{min} = 10^{\circ}\text{C}$ :

- $Q_{Hmin}$  (Utilitas Steam): BESAR (karena banyak energi dari internal recovery)
- $Q_{Cmin}$  (Utilitas Cooling Water): BESAR
- Heat Exchanger Area: BESAR (driving force kecil = area besar)
- Capital Cost: TINGGI (banyak alat)
- Operating Cost: RENDAH (utilitas sedikit)

# Diagram Entalpi - Suhu



Correlation between  $\Delta T_{min}$ ,  $Q_{Hmin}$  and  $Q_{Cmin}$

More in, More out!  $Q_{Hmin} + x \Rightarrow Q_{Cmin} + x$

## Kasus $\Delta T_{min} = 20^\circ\text{C}$

Diagram Aliran (Kiri):

- Sistem dengan minimum temperature approach  $20^\circ\text{C}$  (lebih besar dari sebelumnya)
- Perbedaan suhu minimal =  $20^\circ\text{C}$

Diagram T-H (Kanan):

- Gap Vertikal =  $20^\circ\text{C}$ :  $\Delta T_{min}$  yang lebih besar
- Hot dan cold streams lebih jauh terpisah

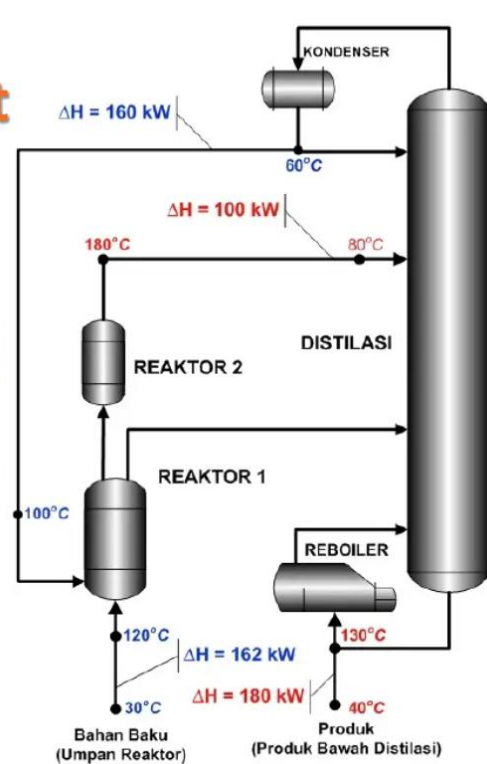
Konsekuensi  $\Delta T_{min} = 20^\circ\text{C}$ :

- $Q_{Hmin}$  (Utilitas Steam): LEBIH BESAR (kurang recovery internal)
- $Q_{Cmin}$  (Utilitas Cooling Water): LEBIH BESAR
- Heat Exchanger Area: LEBIH KECIL (driving force besar = area kecil)
- Capital Cost: LEBIH RENDAH (sedikit alat)
- Operating Cost: LEBIH TINGGI (utilitas lebih banyak)

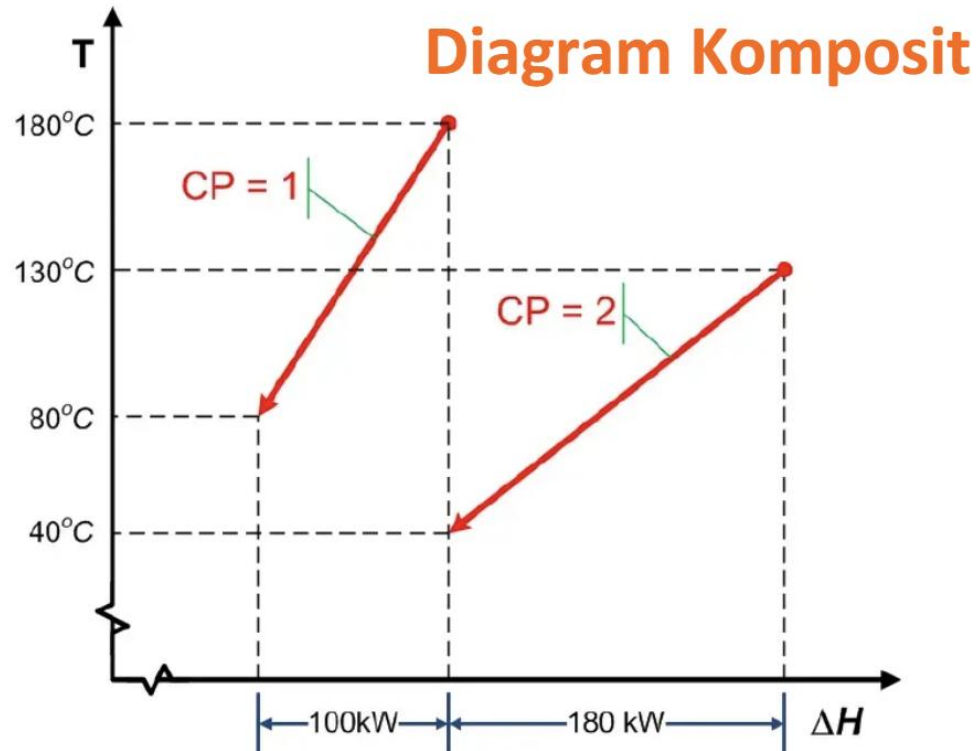
# Diagram Komposit

## Diagram Komposit

Aliran	T <sup>s</sup> (°C)	T <sup>r</sup> (°C)	ΔH (kW)	CP (kW/°C)
P1	180	80	100	1,0
P2	130	40	180	2,0
D1	60	100	160	4,0
D2	30	120	162	1,8



# Diagram Komposit



## Diagram Komposit - Stream Terpisah

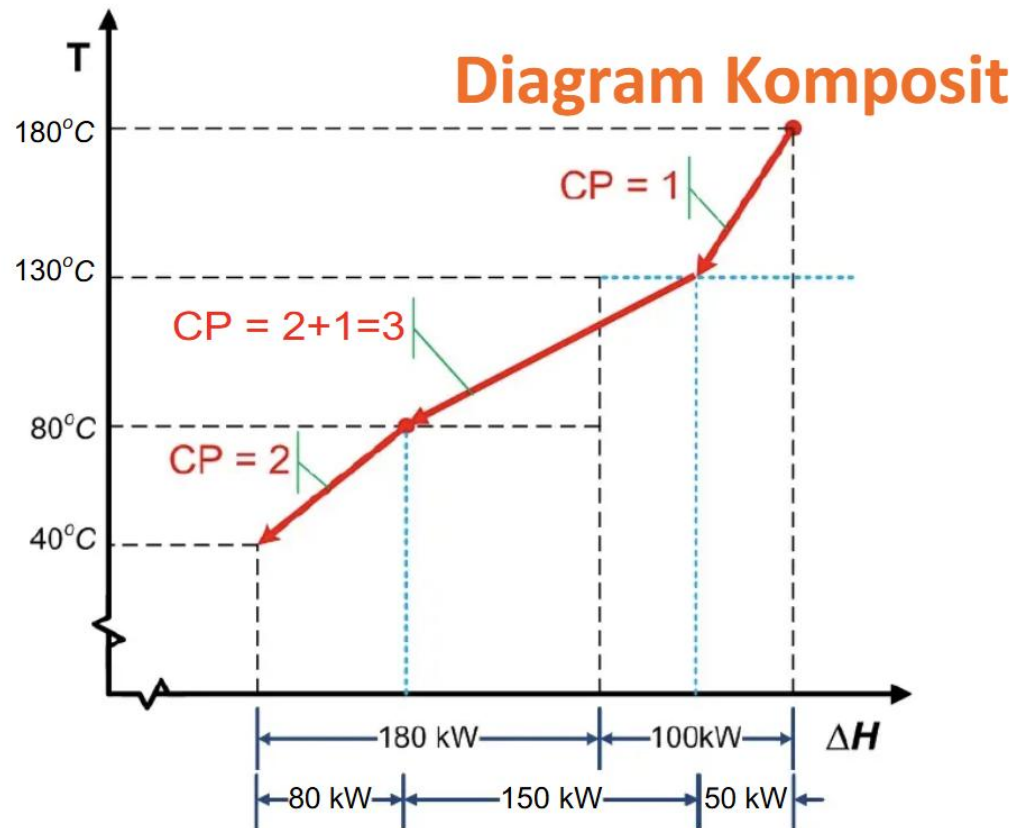
Struktur:

- Garis Merah ( $CP=1$ ): Hot stream  $180^{\circ}\text{C} \rightarrow 80^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta H=100$  kW (slope curam)
- Garis Merah ( $CP=2$ ): Hot stream  $130^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta H=180$  kW (slope landai)
- Menunjukkan dua hot streams dengan  $CP$  berbeda

Arti:

- $CP=1$ : stream "ringan" (sedikit energi per  $^{\circ}\text{C}$ )
- $CP=2$ : stream "berat" (banyak energi per  $^{\circ}\text{C}$ )
- Slope berbanding terbalik dengan  $CP$

# Diagram Komposit



## Diagram Komposit - Stream Digabung (Hot Side)

Strategi Penggabungan:

- Dua hot streams digabung menjadi satu kurva komposit
- Pada interval tertentu: CP total = 1 + 2 = 3
- Kurva menjadi "tangga" dengan perubahan slope

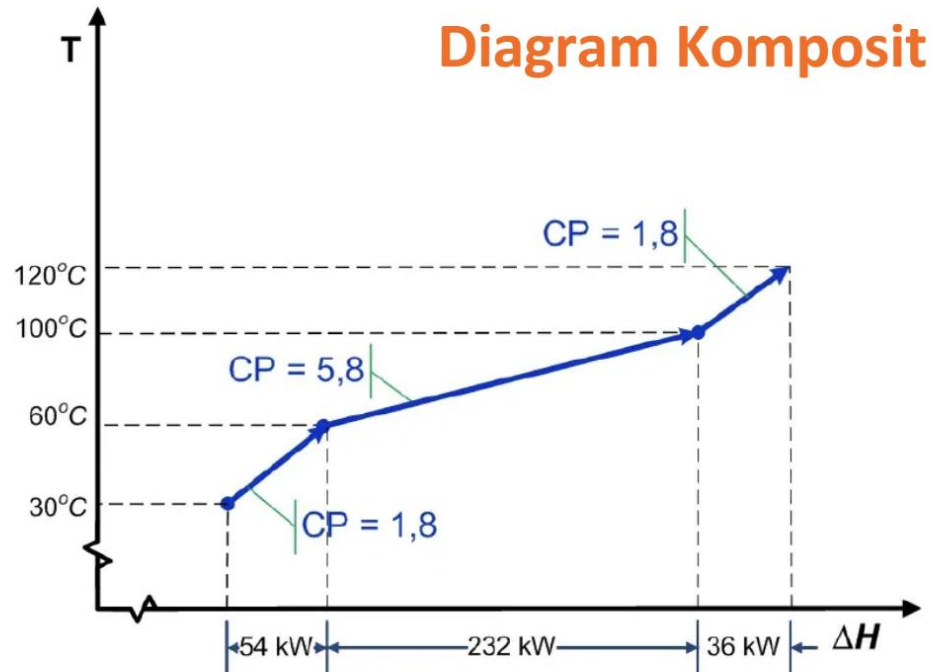
Keuntungan:

- Visualisasi profil thermal gabungan
- Identifikasi mana yang lebih "heavy" atau "light"
- Basis untuk matching dengan cold streams

CP Profil:

- Dari 80-130°C: CP = 2 (satu stream)
- Dari 130-180°C: CP = 1+2 = 3 (dua streams)
- Slope berubah di setiap titik composite

# Diagram Komposit



Manipulasi kurva aliran panas dan dingin sehingga memenuhi  $\Delta T_{\min}$

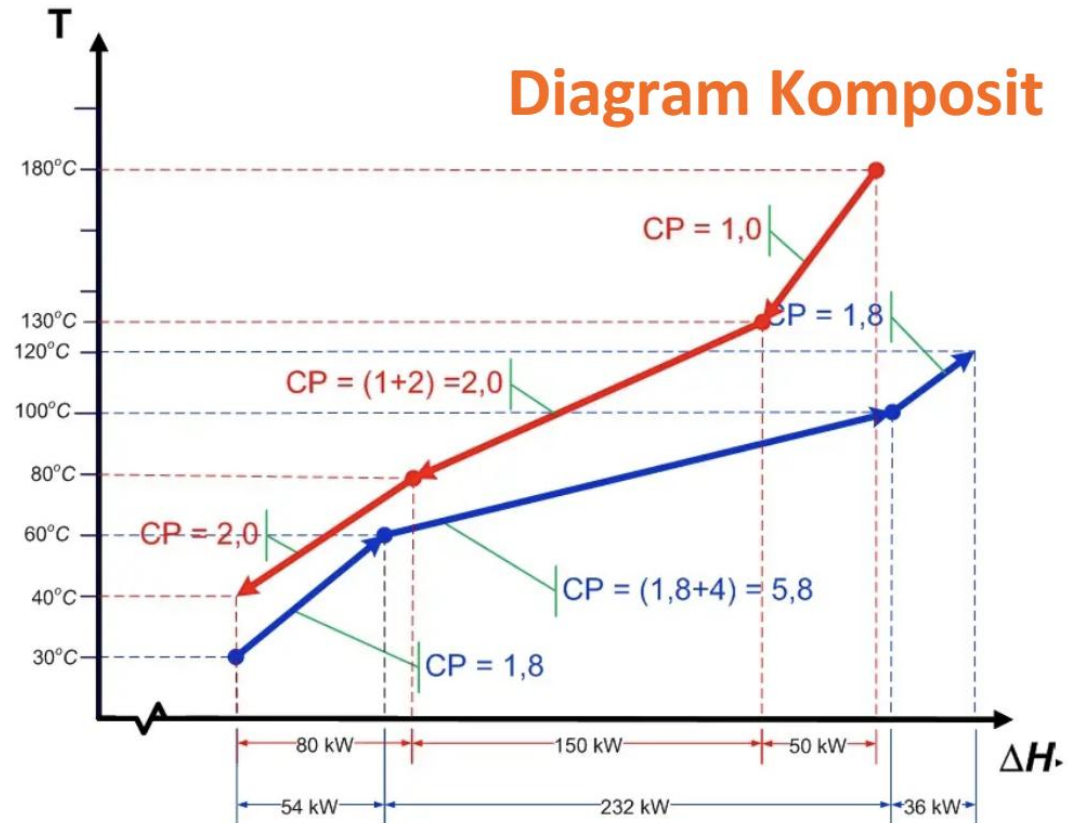
*(Dilakukan dengan cara menggeser kurva ke kiri ataupun ke kanan, sehingga jarak kedua kurva terdekat tidak kurang dari harga  $\Delta T_{\min}$ )*

Hasil yang diperoleh:

$Q_{\text{Cmin}}$  dan  $Q_{\text{Hmin}}$  pada  $\Delta T_{\min}$  yang disyaratkan



# Diagram Komposit



## Diagram Komposit - Cold Stream

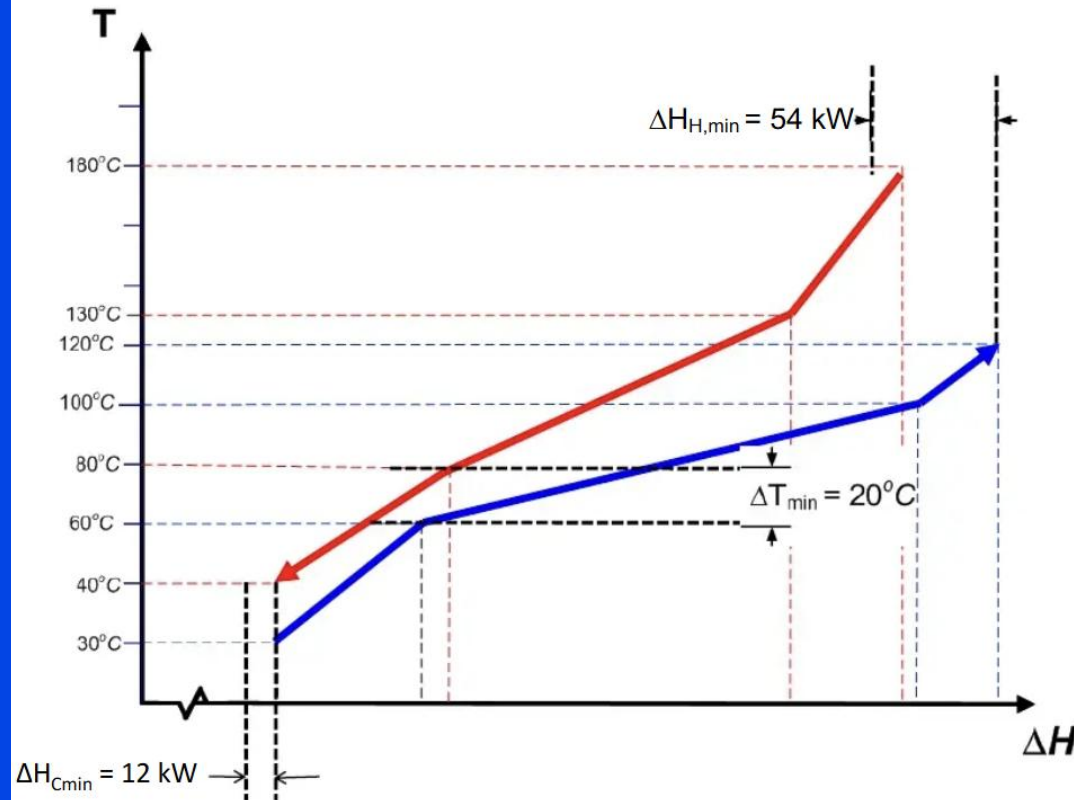
### Struktur:

- Garis Biru ( $CP=1.8$ ): Cold stream  $30^{\circ}\text{C} \rightarrow 120^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta H=232$  kW
- Segmen dengan  $CP=5.8$ : Bagian di mana ada penambahan energi
- Menunjukkan cold stream tunggal dengan profil kompleks

### Interpretasi:

- Energy requirement besar untuk naik dari  $30^{\circ}\text{C}$  ke  $120^{\circ}\text{C}$
- $\Delta H=232$  kW  $>$   $\Delta H$  hot streams karena range suhu lebih luas

# Diagram Komposit



## Diagram Komposit - Cold Stream

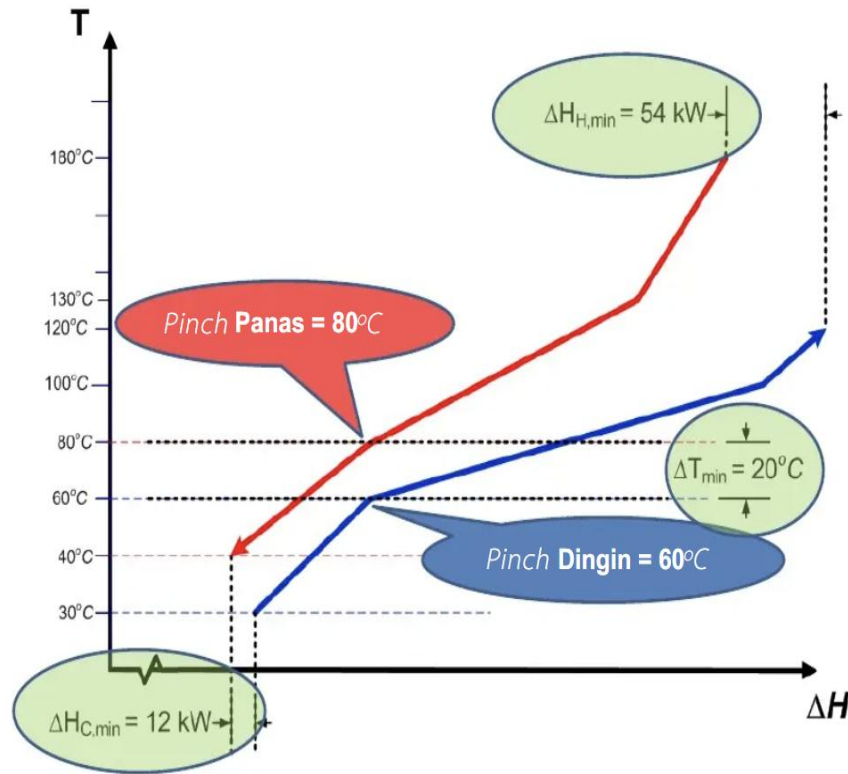
### Struktur:

- Garis Biru (CP=1.8): Cold stream 30°C → 120°C, ΔH=232 kW
- Segmen dengan CP=5.8: Bagian di mana ada penambahan energi
- Menunjukkan cold stream tunggal dengan profil kompleks

### Interpretasi:

- Energy requirement besar untuk naik dari 30°C ke 120°C
- ΔH=232 kW > ΔH hot streams karena range suhu lebih luas

# Diagram Komposit



Titik Pinch adalah titik yang terdekat jaraknya antara aliran fluida panas dan aliran fluida dingin. Pinch point bertujuan untuk menentukan recovery energy.

Pada komposite apabila pinch point tidak saling bersentuhan, maka digunakan nilai  $\Delta T_{\min}$ .

MER target:

Pinch panas = 80 °C

Pinch dingin = 60 °C

$Q_{H\min}$  = 54 kW

$Q_{C\min}$  = 12 kW

## Identifikasi Pinch Point

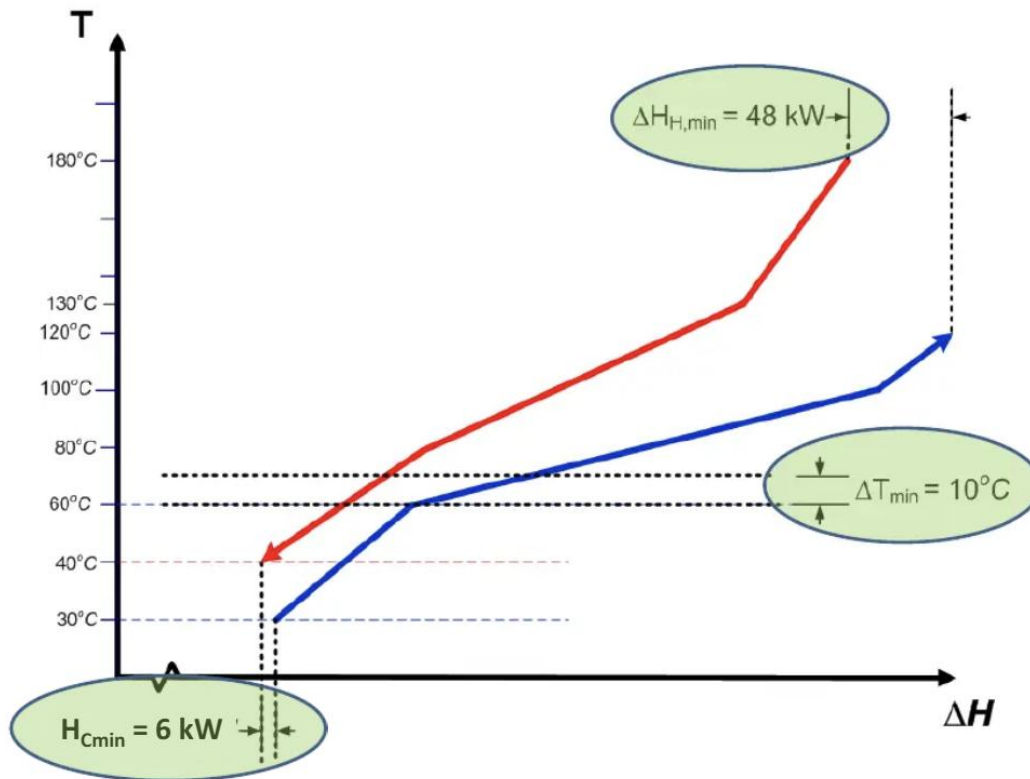
Elemen Kunci:

- $\Delta H_{H\min}$  = 54 kW: Minimum steam requirement (utilitas panas)
- $\Delta H_{C\min}$  = 12 kW: Minimum cooling requirement (utilitas dingin)
- Pinch Panas = 80°C: Titik di mana hot stream paling dekat dengan cold stream
- Pinch Dingin = 60°C: Corresponding point pada cold stream
- $\Delta T_{\min}$  = 20°C: Gap antara kedua pinch points (80 - 60 = 20)

Pengertian Pinch Point:

- Lokasi kritis di mana perbedaan temperatur minimal
- Menentukan fundamental limit untuk heat recovery
- Below pinch: Cold side (perlu heating)
- Above pinch: Hot side (perlu cooling)

# Diagram Komposit



MER target:

Pinch panas =  $70^{\circ}\text{C}$

Pinch dingin =  $60^{\circ}\text{C}$

$Q_{Hmin}$  = 48 kW

$Q_{Cmin}$  = 6 kW

Dari manipulasi kurva aliran panas dan dingin dengan  $\Delta T_{min} = 10^{\circ}\text{C}$  (slide sebelumnya), diperoleh hasil akhir dengan:

- $\Delta H_{Cmin} = 6 \text{ kW}$  (utilitas pendingin minimum)
- $\Delta H_{Hmin} = 48 \text{ kW}$  (utilitas panas minimum)
- $\Delta T_{min}$  approach =  $10^{\circ}\text{C}$  pada titik pinch

Hasil ini lebih baik dari target awal (54 kW dan 12 kW) karena  $\Delta T_{min}$  yang lebih kecil menghasilkan heat recovery yang lebih optimal.

# Penentuan Arus Panas dan Dingin

## SISTEM SINGLE STREAM SEDERHANA:

Aliran Proses:

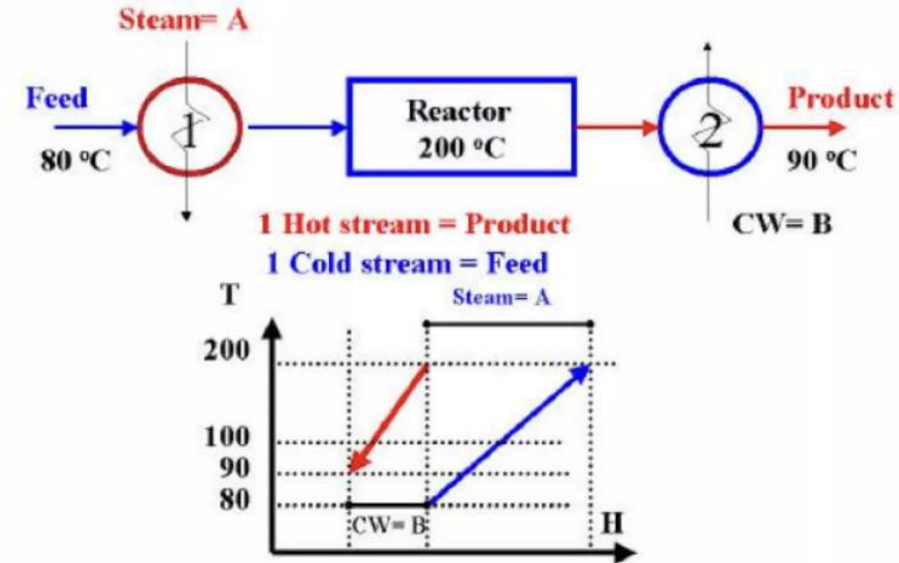
- Feed masuk  $80^{\circ}\text{C}$   $\rightarrow$  Reactor  $200^{\circ}\text{C}$   $\rightarrow$  Product keluar  $90^{\circ}\text{C}$
- Hot stream: Product ( $200^{\circ}\text{C} \rightarrow 90^{\circ}\text{C}$ ) = panas yang tersedia
- Cold stream: Feed ( $80^{\circ}\text{C}$ ) = dingin yang membutuhkan panas

Analisis Energi:

- Hot stream release energy ketika didinginkan dari  $200^{\circ}\text{C}$  ke  $90^{\circ}\text{C}$
- Cold stream dapat menerima panas dari hot stream sebelum masuk reaktor
- Dengan heat recovery, feeding bisa dipanaskan dari  $80^{\circ}\text{C}$  mendekati  $200^{\circ}\text{C}$
- Mengurangi kebutuhan steam eksternal untuk reaktor

Diagram T-H:

Menunjukkan karakteristik thermal kedua stream dan potensi heat recovery antara product panas dan feed dingin



# Hubungan Suhu-Entalpi Dalam Pembuatan Composite Curve

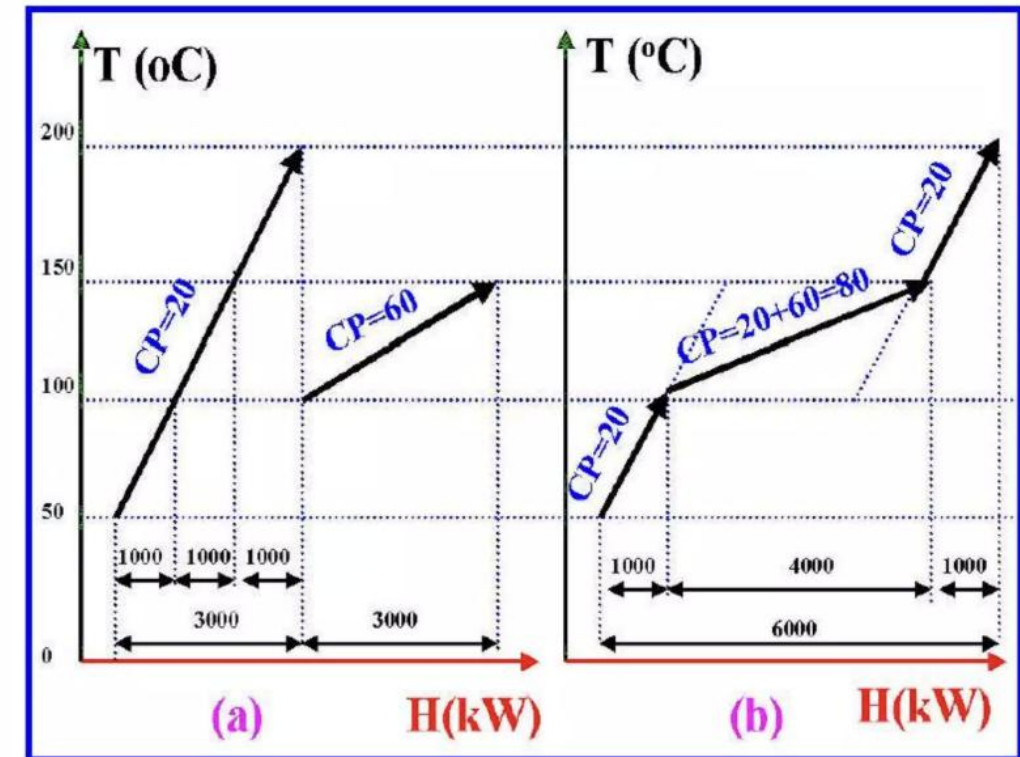
## COMPOSITE CURVE:

Diagram (a) - Profil Individual:

- Kurva dengan  $CP=20$ : slope curam (energi kecil per  $^{\circ}C$ )
- Kurva dengan  $CP=60$ : slope landai (energi besar per  $^{\circ}C$ )
- Ketika kedua kurva digabung menjadi composite ( $CP=20+60=80$ ) slope menjadi lebih landai karena total energi requirement lebih besar

Diagram (b) - Composite Curve Gabungan:

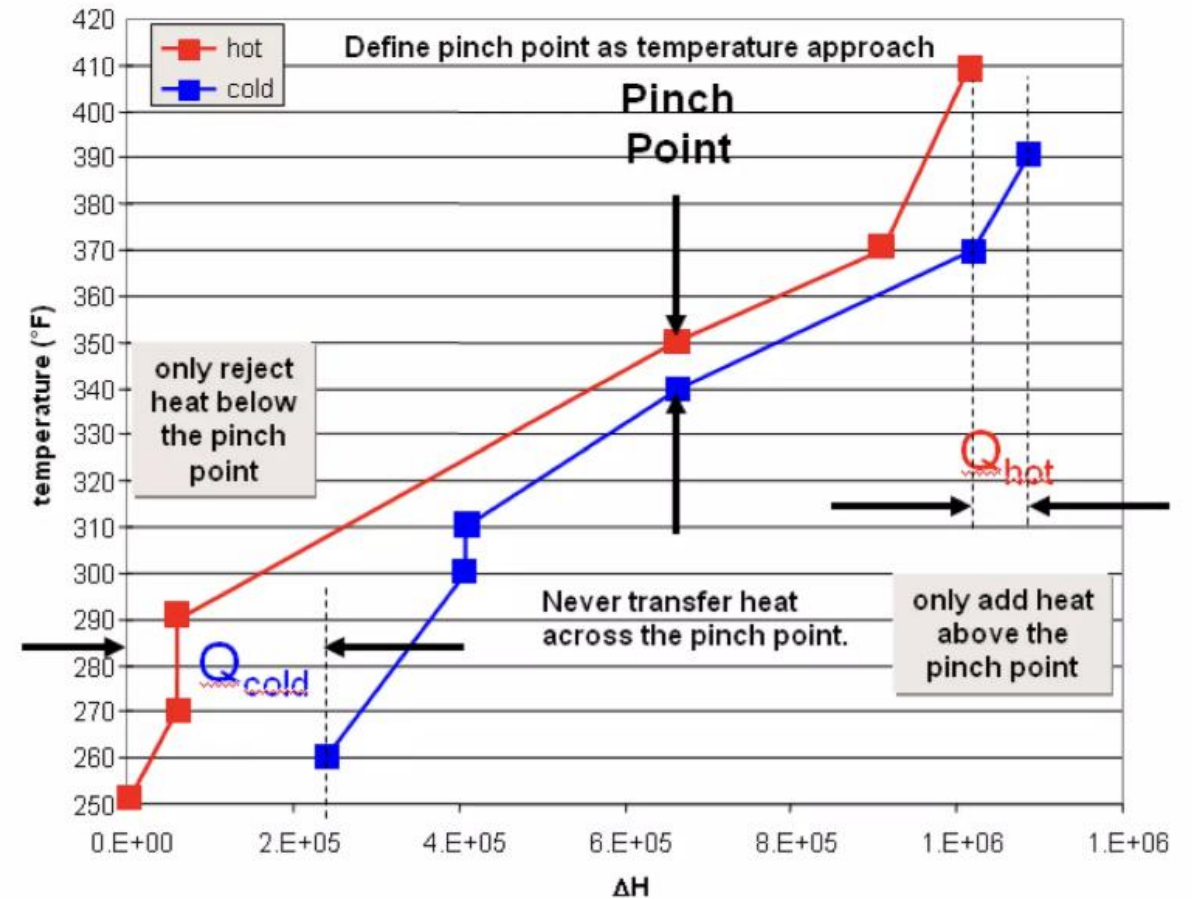
- Single curve dengan  $CP=80$  merepresentasikan total energi requirement
- Memudahkan matching dengan cold composite curve
- Dari x-axis dapat dibaca total  $\Delta H$  requirement = 6000 kW
- Kurva composite adalah step function akibat perubahan CP di interval T





# Composite Curve

Composite curve menunjukkan energetic signature sistem. Pinch point adalah bottleneck dalam sistem - perbedaan temperatur di titik ini minimal dan menentukan fundamental limit untuk heat recovery.

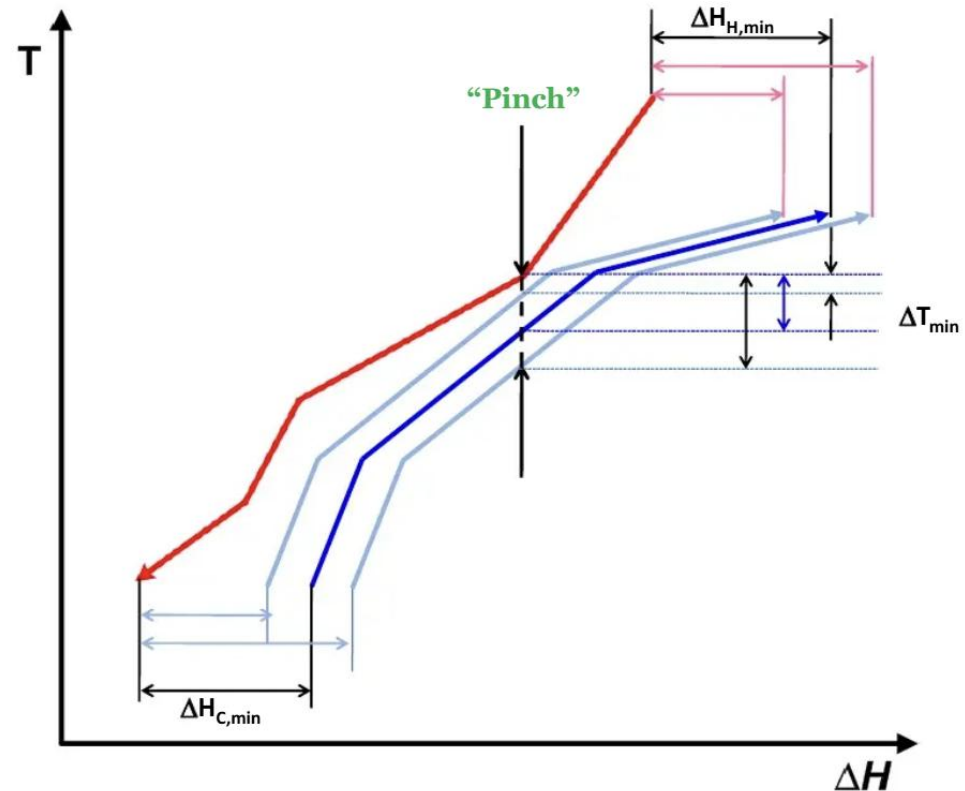




# Minimum Temperature

## Minimum Temperature Approach ( $\Delta T_{\min}$ ):

- Merupakan constraint thermodynamic yang menentukan feasibility
- Nilai kecil: lebih banyak heat recovery, lebih besar HE area
- Nilai besar: lebih sedikit heat recovery, lebih kecil HE area
- Harus dijaga di atas 5-15°C untuk feasibility praktis



# Pinch Zone

## PEMBAGIAN ZONE BERDASARKAN PINCH:

Di atas Pinch (Hot Side):

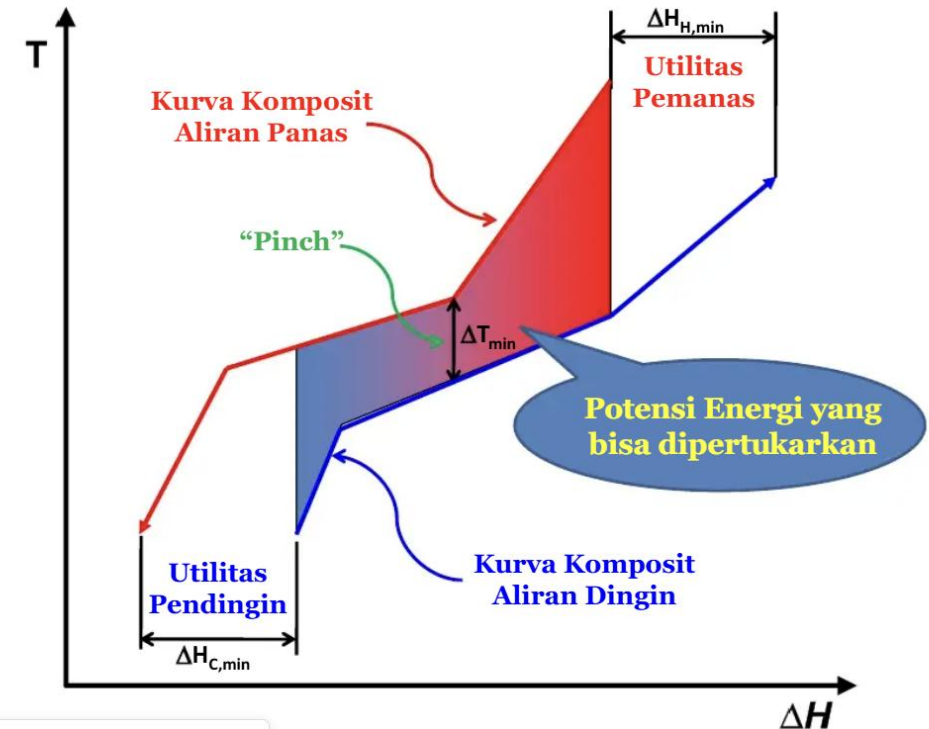
- Hanya perlu cooling/pendingin eksternal (CW)
- Tidak boleh transfer panas ke cold side
- Area ini menunjukkan excess heat dari hot streams

Di bawah Pinch (Cold Side):

- Hanya perlu heating/pemanas eksternal (Steam)
- Tidak boleh menerima panas dari hot side
- Area ini menunjukkan heat deficit pada cold streams

Potensi Heat Recovery (Overlapping Area):

- Area di mana heat recovery dapat terjadi
- Semakin besar area = semakin besar kemampuan recovery
- Menentukan besarnya heat exchanger network yang diperlukan



Titik Pinch adalah titik yang terdekat jaraknya antara aliran fluida panas dan aliran fluida dingin. Pinch point bertujuan untuk menentukan recovery energy. Pada komposite apabila pinch point tidak saling bersentuhan, maka digunakan nilai  $\Delta T_{\min}$ .

# TERIMA KASIH

FOR YOUR ATTENTION

