

Standar spesifikasi alat penukar kalor
Deskripsi: Berbagai Jenis Kondensor dan
Pendidih (kettle reboiler, calandria)

Standar Spesifikasi Alat Penukar Kalor

TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association)

TEMA adalah organisasi industri yang menerbitkan standar paling banyak digunakan untuk APK tipe shell and tube di seluruh dunia.

| Kelas TEMA | Nama Lengkap | Aplikasi Utama | Tekanan Maks. |
|------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Kelas R | Petroleum & Petrochemical Processing | Kilang minyak, petrokimia berat | Tidak ada batas (tergantung ASME) |
| Kelas C | General Commercial Process | Industri umum, HVAC, proses ringan | Lebih rendah dari R |
| Kelas B | Chemical Process Service | Industri kimia umum | Intermediate |

API 660

standar TEMA saja tidak cukup untuk menangani fluida hidrokarbon dengan suhu dan tekanan ekstrem serta sifat korosif yang tinggi. API 660 hadir untuk menjawab kebutuhan tersebut, lahir dari konsensus para ahli kilang yang menginginkan standar yang lebih ketat dari TEMA.

API 660 memberikan persyaratan tambahan yang melampaui TEMA, khususnya untuk:

- Desain mekanik di bawah tekanan tinggi,
- Pemilihan material tahan korosi (seperti stainless steel atau logam paduan nikel),
- Prosedur fabrikasi, inspeksi non-destruktif, serta
- Pengujian tekanan dan persiapan pengiriman

Kalor sensibel dan kalor laten



Tabel perbedaan antara kalor sensibel dan kalor laten

| Aspek | Kalor Sensibel | Kalor Laten |
|------------------------------------|---|--|
| Definisi | Panas yang diserap atau dilepaskan oleh suatu zat yang menyebabkan perubahan suhu (temperatur) zat tersebut, tanpa disertai perubahan fase. | Panas yang diserap atau dilepaskan oleh suatu zat yang menyebabkan perubahan fase (padat ↔ cair ↔ gas) pada suhu dan tekanan konstan, tanpa disertai perubahan suhu. |
| Perubahan Fisik | Suhu naik atau turun. | Wujud zat berubah (mencair, membeku, menguap, mengembun). |
| Keberadaan Selama Perubahan | Selama proses berlangsung, suhu zat terus berubah. | Selama proses berlangsung, suhu zat tetap konstan (isothermal) meskipun panas terus ditambahkan atau dilepaskan. |

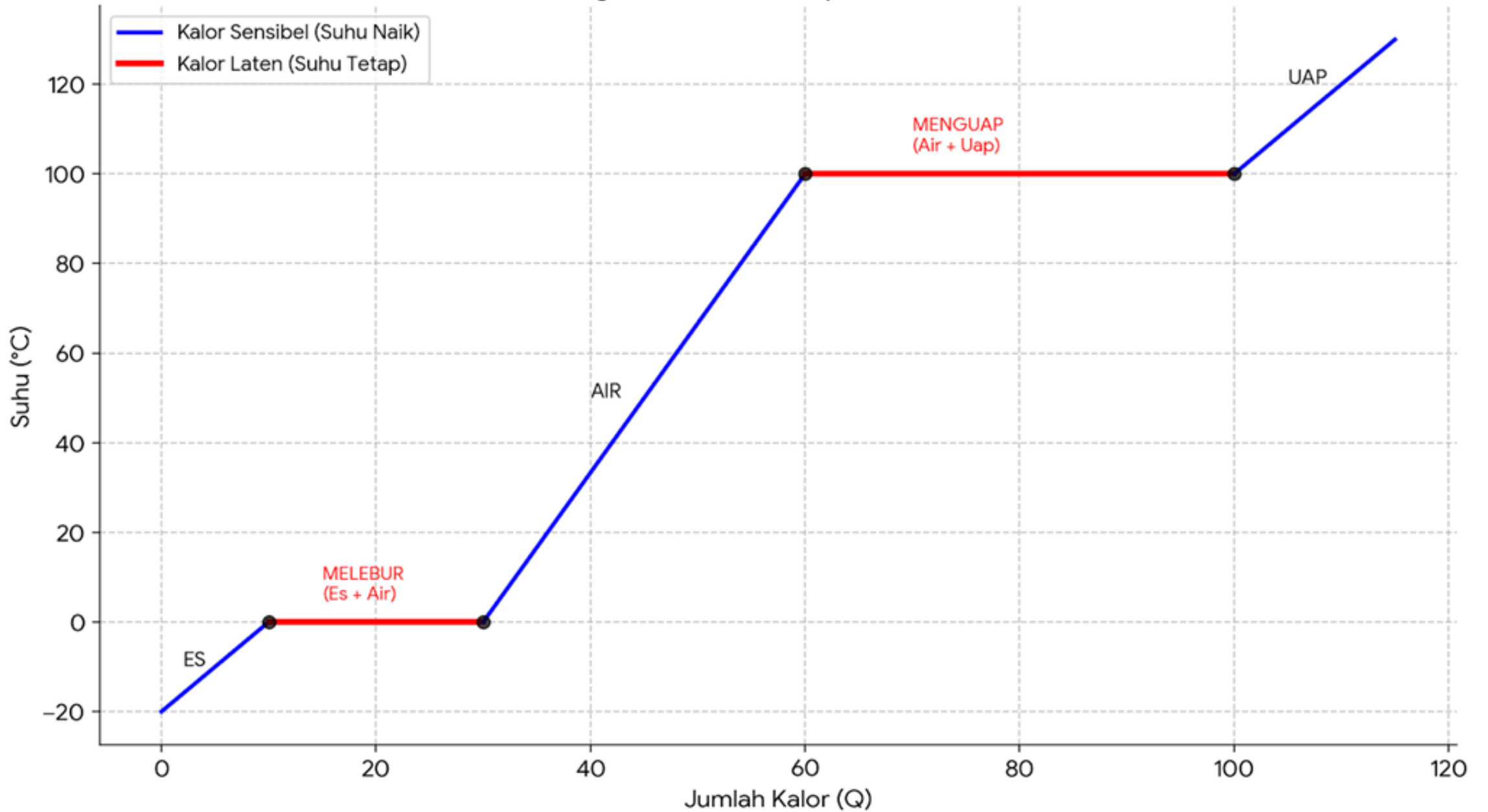
Tabel perbedaan antara kalor sensibel dan kalor laten

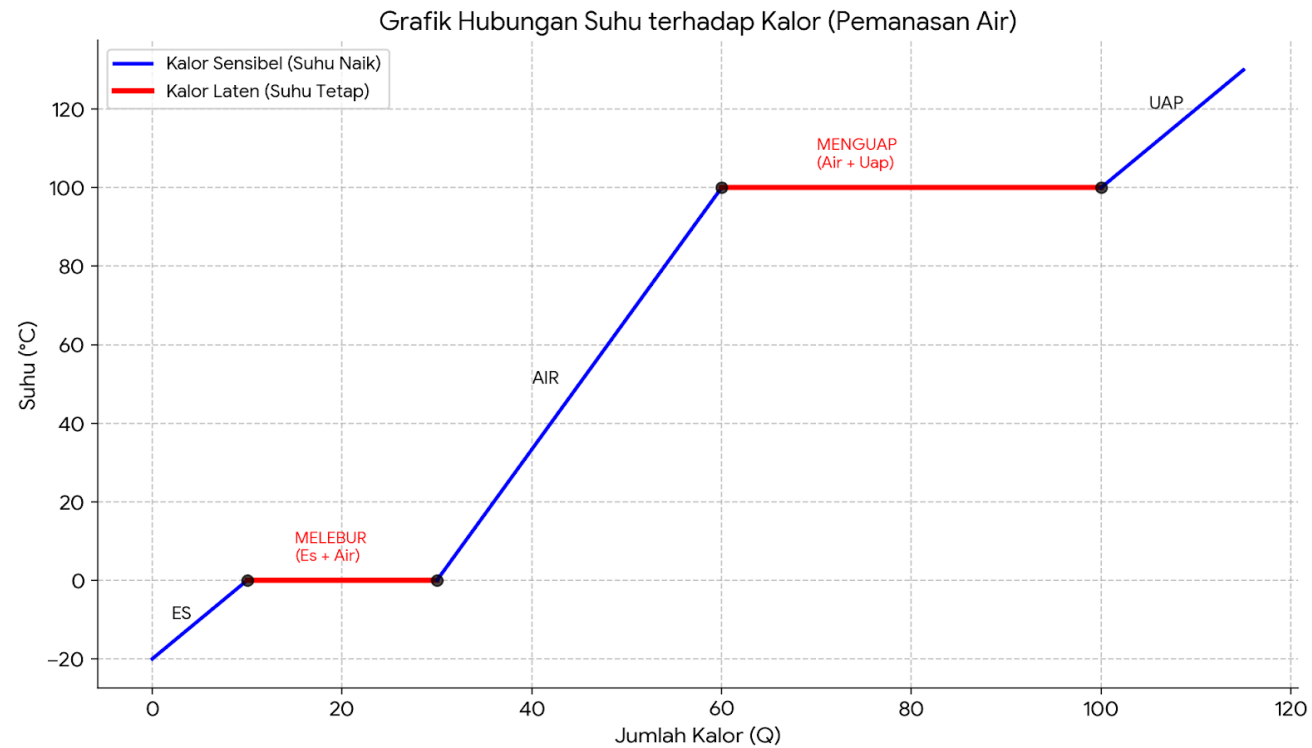
| Aspek | Kalor Sensibel | Kalor Laten |
|------------------------------------|---|---|
| Rumus Perhitungan | $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$ <p>atau</p> $Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$ <p>di mana: Q = kalor sensibel (J atau W) m = massa (kg) c_p = kapasitas panas spesifik (J/kg·K) ΔT = perubahan suhu (K atau °C)</p> | $Q = m \cdot L$ <p>atau</p> $Q = \dot{m} \cdot L$ <p>di mana: L = panas laten (J/kg) - L_f (panas lebur) untuk padat ↔ cair - L_v (panas penguapan) untuk cair ↔ gas - L_s (panas sublimasi) untuk padat ↔ gas</p> |
| Satuan (SI) | Joule (J) atau Watt (W) | Joule (J) atau Watt (W) |
| Contoh dalam Kehidupan Sehari-hari | <ul style="list-style-type: none"> • Memanaskan air dari 25°C menjadi 80°C di atas kompor. • Mendinginkan kopi panas dari 90°C menjadi 40°C dengan menambahkan es. • Badan terasa panas saat berada di bawah sinar matahari (suhu tubuh naik). | <ul style="list-style-type: none"> • Es batu mencair pada 0°C (menyerap panas laten lebur). • Air mendidih pada 100°C menjadi uap (menyerap panas laten penguapan). • Uap air mengembun di kaca dingin (melepas panas laten kondensasi). |

Tabel perbedaan antara kalor sensibel dan kalor laten

| Aspek | Kalor Sensibel | Kalor Laten |
|-------------------------------------|---|---|
| Contoh Operasi Perpindahan Kalor | <ul style="list-style-type: none">• Pendinginan minyak dalam HE: minyak turun dari 130°C ke 85°C.• Pemanasan crude oil sebelum masuk kolom distilasi: dari 40°C ke 250°C.• Superheating steam di boiler: dari uap jenuh 150°C menjadi uap panas lanjut 300°C. | <ul style="list-style-type: none">• condenser di puncak kolom distilasi: uap hidrokarbon mengembun menjadi cairan (melepas panas laten kondensasi).• Kettle reboiler di dasar kolom: cairan menguap pada suhu konstan (menyerap panas laten penguapan).• Evaporator dalam industri susu: air dalam susu diuapkan pada suhu konstan. |
| Visualisasi Kurva Pemanasan | Pada grafik suhu vs. waktu, kalor sensibel ditunjukkan oleh garis miring (naik atau turun). | Pada grafik suhu vs. waktu, kalor laten ditunjukkan oleh garis datar (plateau) selama perubahan fase berlangsung |

Grafik Hubungan Suhu terhadap Kalor (Pemanasan Air)





Tahapan dalam Grafik:

1. Fase Es : Kalor sensibel menaikkan suhu es.
2. Titik Lebur (0°C) : Kalor laten mengubah es menjadi air.
3. Fase Air : Kalor sensibel menaikkan suhu air hingga mencapai titik didih.
4. Titik Didih (100°C) : Kalor laten mengubah air menjadi uap.
5. Fase Uap : Kalor sensibel menaikkan suhu uap lebih lanjut (superheated steam).

Saturated steam (uap jenuh)

❖ **Saturated steam** (uap jenuh) adalah uap air yang berada pada kondisi kesetimbangan antara fase cair dan fase gas pada tekanan dan suhu tertentu.

❖ **Mengapa Saturated steam Penting dalam Industri?**

Dalam bidang teknik, Saturated steam / uap jenuh sering dipilih sebagai media pemanas dibandingkan uap panas lanjut (*superheated steam*) karena:

- a) Memiliki koefisien perpindahan panas yang sangat tinggi saat mengembun.
- b) Suhu pemanasannya konstan dan mudah dikendalikan hanya dengan mengatur tekanan.
- c) Tidak menyebabkan panas berlebih (*overheating*) pada material peralatan yang sensitif terhadap suhu.

Superheated steam (uap panas lanjut)

- ❖ **Superheated steam** (uap panas lanjut) adalah uap air yang memiliki suhu lebih tinggi daripada titik didihnya (suhu jenuh) pada tekanan tertentu.
- ❖ Sederhananya, jika terus memanaskan uap jenuh (*saturated steam*) tanpa meningkatkan tekanannya, molekul uap akan menyerap lebih banyak energi kinetik dan suhunya akan naik. Uap ini tidak lagi berada dalam kesetimbangan dengan fase cairnya, sehingga tidak mengandung tetesan air sama sekali (100% gas kering).
- ❖ **Karakteristik Superheated Steam**
 - a) **Suhu di Atas Titik Jenuh ($T > T_{sat}$):** Jika pada tekanan 1 atm air mendidih pada 100°C , maka uap air pada suhu 150°C pada tekanan yang sama disebut *superheated*.
 - b) **Properti Seperti Gas Sejati:** Berbeda dengan uap jenuh yang perilakunya sangat bergantung pada tekanan, *superheated steam* berperilaku lebih seperti gas ideal.
 - c) **Tidak Ada Kandungan Air:** Karena suhunya yang tinggi, uap ini benar-benar kering. Jika uap ini bersentuhan dengan permukaan yang sedikit lebih dingin, ia tidak akan langsung mengembun menjadi air selama suhunya masih di atas suhu jenuh.
 - d) **Kandungan Energi Internal yang Tinggi:** Memiliki entalpi yang sangat besar, yang membuatnya sangat bertenaga untuk menggerakkan mesin.

Superheated steam (uap panas lanjut)

Kegunaan Utama Superheated steam (uap panas lanjut) ;

- 1.Pembangkit Listrik (Turbin Uap):** Digunakan untuk memutar turbin karena sifatnya yang kering tidak akan merusak bilah turbin akibat korosi atau erosi tetesan air.
- 2.Efisiensi Termis:** Memberikan efisiensi termodinamika yang lebih tinggi pada siklus Rankine.
- 3.Transportasi Jarak Jauh:** Karena tidak mudah mengembun di dalam pipa dibandingkan uap jenuh, uap ini lebih efektif untuk didistribusikan dalam jarak jauh

VLE (Vapor-Liquid Equilibrium) – Kestimbangan Uap-Cair

VLE adalah singkatan dari **Vapor-Liquid Equilibrium**, yaitu kondisi di mana fasa uap dan fasa cair dari suatu zat (atau campuran zat) berada dalam kestimbangan termodinamika. Dalam kondisi ini, laju penguapan molekul dari cairan ke uap sama persis dengan laju kondensasi molekul dari uap kembali ke cairan, sehingga secara makroskopis tidak ada perubahan komposisi maupun suhu/tekanan seiring waktu.

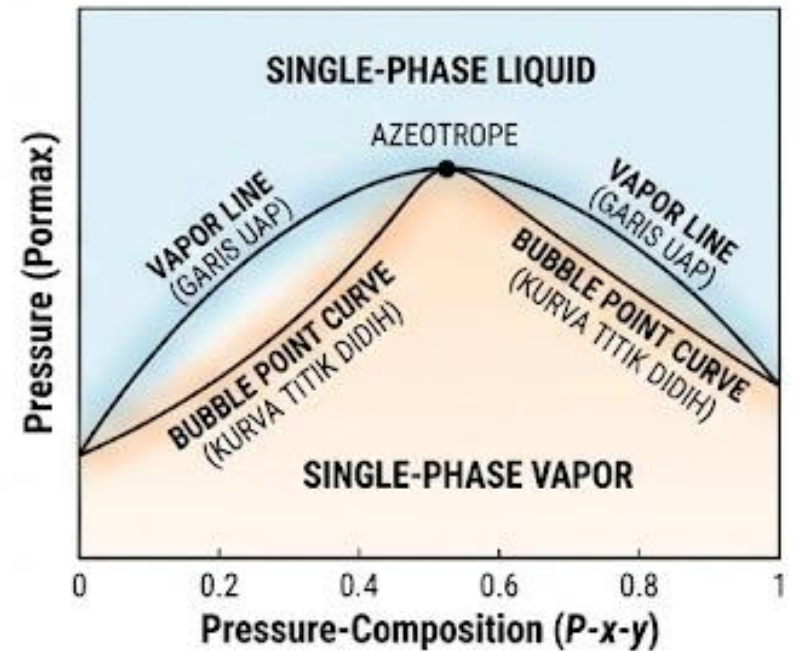
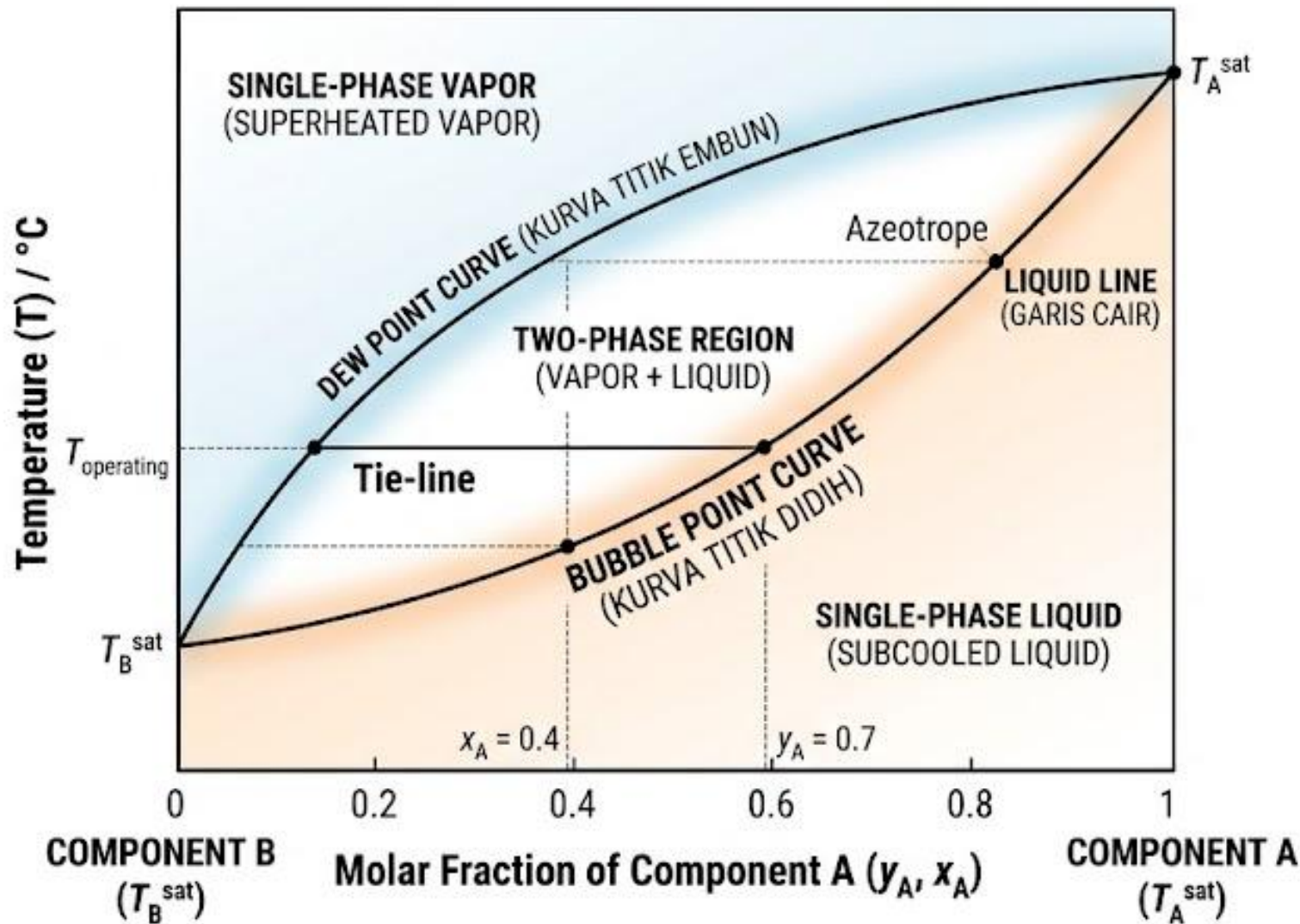
Mengapa VLE Penting dalam Operasi Perpindahan Kalor?

Sebagai mahasiswa teknik kimia, akan menemukan konsep VLE di hampir setiap proses pemisahan, terutama **distilasi**. Kaitannya dengan mata kuliah kita (Operasi Perpindahan Kalor) adalah:

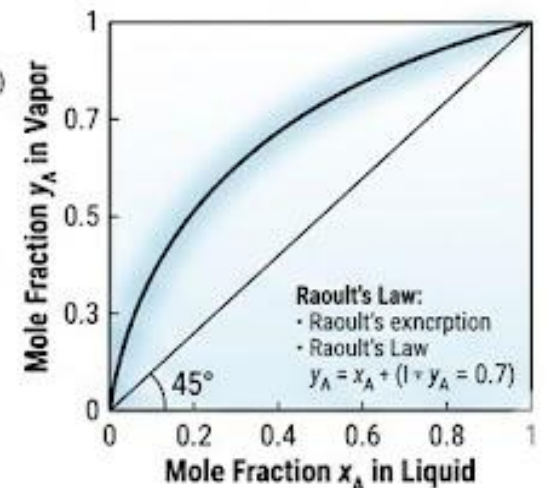
- **Kondensor puncak kolom distilasi** : Uap yang naik dari puncak kolom memiliki komposisi tertentu sesuai VLE pada tekanan operasi. Kondensor harus membuang panas laten cukup agar uap tersebut mengembun sempurna menjadi cairan (*reflux* dan *distillate product*).
- **Reboiler dasar kolom** : Cairan dasar harus dipanaskan hingga mencapai titik didihnya pada tekanan tertentu, menghasilkan uap yang komposisinya ditentukan oleh VLE. Panas yang disuplai (laten + sensibel) dihitung berdasarkan data VLE.
- **Desain heat exchanger** : Sifat termodinamika seperti suhu didih, suhu embun, panas laten penguapan, dan kapasitas panas fasa cair/uap semuanya berasal dari data atau model VLE.



VAPOR-LIQUID EQUILIBRIUM (VLE) – KESETIMBANGAN UAP-CAIR (Binary Mixture)



- Raoult's Law:**
- Ethanol-Water -matanol (Superheated Maximum)
 - Concooled Water $y_A = 0.4$ (lim $x_A = 0.7$)
- Definit's Law:**
- E_g, Ethanol-Water Subcooled liquid $y_A = x_A$ (Por Non-Ideal)



VLE (Vapor-Liquid Equilibrium) – Keseimbangan Uap-Cair

Membaca grafik VLE (Vapor-Liquid Equilibrium) sangat penting dalam proses distilasi dan perancangan alat industri seperti boiler atau *reboiler*. Berdasarkan gambar, cara membacanya:

1. Memahami Sumbu Grafik (Diagram T-x-y)

- **Sumbu Y (Vertikal):** Menunjukkan **Suhu (T)**. Semakin ke atas, suhu semakin tinggi.
- **Sumbu X (Horizontal):** Menunjukkan **Fraksi Mol (x,y)**.
 - Angka **0** biasanya mewakili komponen yang kurang volatil (titik didih tinggi).
 - Angka **1** mewakili komponen yang lebih volatil/mudah menguap (titik didih rendah).

2. Mengenali Garis Utama

- **Bubble Point Curve (Kurva Titik Didih):** Garis bagian bawah. Jika titik berada di bawah garis ini, zat berbentuk **cairan murni (subcooled liquid)**. Tepat pada garis ini, gelembung uap pertama kali terbentuk.
- **Dew Point Curve (Kurva Titik Embun):** Garis bagian atas. Jika titik berada di atas garis ini, zat berbentuk **uap murni (superheated vapor)**. Tepat pada garis ini, tetesan cairan pertama kali terbentuk dari uap.
- **Two-Phase Region:** Area di dalam "mata" atau "kubah" antara kedua garis tersebut. Di sini, zat berada dalam kondisi campuran **uap dan cair** secara bersamaan.

VLE (Vapor-Liquid Equilibrium) – Kesetimbangan Uap-Cair

3. Cara Menggunakan "Tie-Line" (Garis Hubung)

Misalkan memiliki campuran pada suhu tertentu ($T_{\text{operating}}$) yang berada di dalam kubah:

- Tarik garis horizontal (**Tie-line**) hingga menyentuh kurva kiri dan kanan.
- **Titik Potong Kiri (pada Bubble Point):** Turunkan ke sumbu X untuk mengetahui komposisi cairan (x).
- **Titik Potong Kanan (pada Dew Point):** Turunkan ke sumbu X untuk mengetahui komposisi uap (y).
- **Hasilnya:** akan melihat bahwa pada suhu yang sama, uap selalu mengandung lebih banyak komponen yang mudah menguap dibandingkan cairannya. Inilah prinsip dasar distilasi

4. Mengenali Titik Azeotrop

Jika melihat kedua kurva (cair dan uap) bertemu atau menyentuh di satu titik di tengah grafik (seperti pada bagian kanan gambar), itu disebut **Titik Azeotrop**.

- Pada titik ini, komposisi cairan dan uap adalah **sama**.
- Campuran tidak bisa dipisahkan lagi dengan distilasi biasa karena saat dididihkan, uap yang dihasilkan memiliki kadar yang sama dengan cairannya

Fouling Factor (Faktor Pengotor)

Fouling adalah pembentukan endapan atau lapisan di permukaan tube yang meningkatkan resistansi termal dan menurunkan kinerja APK. Faktor pengotor ini wajib diperhitungkan dalam desain karena berdampak langsung pada area perpindahan kalor yang diperlukan.

$$1/U \text{ dirty} = 1/U \text{ clean} + R_f \text{ tube in} + R_f \text{ tube out} * (A \text{ in} / A \text{ out}) + R \text{ wall}$$

Nilai tipikal fouling resistance R_f menurut TEMA :

- air sungai = 0.0001 m².K/W;
- air laut = 0.0001-0.0002 m².K/W;
- crude oil = 0.0002-0.0009 m².K/W;
- uap (steam) = 0.0001 m².K/W.

Jenis Condenser



Pengertian dan Fungsi Condenser

- ❖ Condenser adalah jenis APK khusus di mana fluida panas (biasanya berupa uap atau campuran uap) mengalami kondensasi dengan cara melepaskan kalor laten penguapan kepada media pendingin.
- ❖ Kondensasi terjadi pada suhu jenuh (saturation temperature) yang bergantung pada tekanan operasi.
- ❖ Condenser banyak digunakan dalam sistem distilasi, refrigerasi, sistem turbin uap, dan sistem pendingin proses.
- ❖ Proses perpindahan kalor dalam condenser melibatkan dua mekanisme utama:
 1. perpindahan kalor dari uap ke dinding tube saat kondensasi (filmwise atau dropwise condensation); dan
 2. perpindahan kalor dari dinding tube ke fluida pendingin melalui konveksi paksa.

Klasifikasi condenser

Klasifikasi Berdasarkan Kontak Fisik

Berdasarkan apakah fluida pendingin dan fluida proses bercampur secara langsung atau tidak, kondensor terbagi menjadi:

- **Surface Condenser** – kedua fluida dipisahkan oleh dinding logam. Paling banyak digunakan karena menjaga kemurnian fluida proses. Contoh utamanya adalah tipe shell-and-tube di mana air pendingin mengalir di dalam tube-tabung dan uap proses mengembun di sisi shell atau sebaliknya.
- **Direct-contact Condenser** – uap proses dikontakkan langsung dengan air pendingin. Meskipun perpindahan panasnya sangat intensif karena tidak ada tahanan dinding logam, kontak langsung ini menyebabkan fluida proses terkontaminasi air pendingin, sehingga hanya cocok untuk aplikasi di mana kontaminasi diizinkan (misalnya pendinginan uap air di pembangkit listrik tenaga panas bumi)

Klasifikasi condenser

Klasifikasi Berdasarkan Fluida Pendingin

Berdasarkan medium pendingin yang digunakan, kondensor dapat digolongkan menjadi tiga kategori utama:

a. Air-Cooled Condenser (Kondensor Berpendingin Udara)

Kondensor ini menggunakan aliran udara ambien yang ditiupkan melalui sirip-sirip pendingin untuk mengembunkan refrigeran atau uap proses di dalam tabung. Kelebihannya sangat nyata: tidak memerlukan air pendingin yang langka dan mahal di daerah gurun atau lahan kering. Kekurangannya adalah koefisien perpindahan panas yang rendah (sekitar $30\text{--}50\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) sehingga membutuhkan luas area yang sangat besar. Selain itu, kinerjanya sangat bergantung pada suhu udara lingkungan—pada musim panas di daerah tropis, kemampuannya bisa turun drastis hingga 40% dari desain semula.

b. Water-Cooled Condenser (Kondensor Berpendingin Air)

Inilah tipe yang paling umum dijumpai di pabrik kimia yang memiliki pasokan air pendingin cooling wateryang melimpah. Fluida proses yang mengalir di dalam tabung (pada shell-and-tube atau di luar tabung dikondensasikan oleh air yang mengalir di sisi lainnya. Koefisien perpindahan panasnya jauh lebih tinggi daripada tipe berpendingin udara, mencapai $500\text{--}1500\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ untuk air bersih. Namun, penggunaan air pendingin dalam jumlah besar memiliki konsekuensi: kebutuhan cooling tower yang mahal dan masalah fouling (pengotoran) dari kandungan mineral air.

c. Evaporative Condenser (Kondensor Evaporatif)

Tipe ini menggabungkan prinsip pendinginan air dan udara secara simultan. Air disemprotkan ke permukaan tabung kondensor sementara udara ditarik melalui fill pack, Sebagian air menguap, menyerap panas dari kondensor dengan efisiensi yang sangat tinggi. Namun, konsumsi air tawar cukup besar dan kalian harus waspada terhadap masalah (kerak) dari air sadah yang bisa menyumbat nosel.

Klasifikasi condenser

I. condenser Shell and Tube

a) condenser Tipe E (Single Pass Shell)

b) condenser Tipe J (Divided Flow)

c) condenser Partial dan Total

II. Air-Cooled Condenser (ACC)

III. Plate Condenser dan Brazed Plate Condenser

IV. Direct Contact Condenser

V. Barometric Condenser

Klasifikasi condenser

I. condenser Shell and Tube

condenser tipe shell and tube adalah jenis yang paling umum digunakan di industri proses karena kapasitasnya besar, mudah dibersihkan, dan dapat beroperasi pada tekanan tinggi. Uap (steam atau vapour proses) biasanya dialirkan di sisi shell, sementara air pendingin dialirkan di sisi tube. Desain ini mengikuti str TEMA secara penuh.

a) condenser Tipe E (Single Pass Shell)

condenser TEMA tipe E adalah konfigurasi paling sederhana dengan satu shell pass. Uap masuk dari satu ujung shell dan kondensat keluar dari ujung yang sama atau ujung lain. Baffle (sekat pengarah) dipasang untuk meningkatkan kecepatan aliran shell-side dan memperbaiki koefisien perpindahan kalor. Tipe ini cocok untuk kondensasi komponen tunggal (pure component).

b) condenser Tipe J (Divided Flow)

Pada condenser tipe J, uap masuk dari tengah shell dan kondensat keluar dari kedua ujung. Konfigurasi ini memberikan pressure drop yang lebih rendah di sisi shell dibandingkan tipe E, sehingga cocok untuk kondensasi di bawah vakum (sub-atmospheric pressure) di mana pressure drop sangat kritis.

C(condenser Partial dan Total

condenser total (total condenser) mengkondensasikan seluruh uap yang masuk menjadi cairan.

condenser partial (partial condenser) hanya mengkondensasikan sebagian uap; fraksi yang tidak terkondensasi keluar sebagai produk gas. condenser partial sering digunakan pada puncak kolom distilasi untuk mengontrol komposisi produk atas.

Klasifikasi condenser

II. Air-Cooled Condenser (ACC)

- ❖ Prinsipnya adalah uap dialirkan dalam tube, sedangkan udara dialirkan secara paksa oleh kipas (fan) melintasi tube yang bersirip (finned tube) di bagian luar.
- ❖ condenser berpendingin udara menggunakan udara ambien sebagai media pendingin dan tidak memerlukan air pendingin. Hal ini sangat menguntungkan di daerah yang pasokan airnya terbatas atau mahal.
- ❖ Keunggulan ACC antara lain: tidak memerlukan cooling tower dan sistem pengolahan air pendingin; ramah lingkungan karena tidak ada hot water discharge; biaya operasional air yang sangat rendah.
- ❖ Kelemahannya adalah ukurannya besar, dan kinerjanya sangat dipengaruhi oleh suhu udara ambien (terutama di musim panas).

Luas area perpindahan kalor efektif untuk *finned tube* dihitung dengan:

$$A_{eff} = A_{fin} * \eta_{fin} + A_{unfinned}$$

di mana η_{fin} adalah efisiensi sirip (fin efficiency) yang bergantung pada geometri dan konduktivitas termal material sirip.

Klasifikasi condenser

III. Plate Condenser dan Brazed Plate Condenser

condenser tipe pelat terdiri dari lempengan logam corrugated yang disusun berdekatan, membentuk saluran zig-zag untuk kedua fluida. condenser pelat sangat kompak dan memiliki koefisien perpindahan kalor tinggi (U dapat mencapai $3000-6000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ untuk kondensasi refrigeran). Cocok untuk skala menengah, industri makanan dan minuman, serta sistem refrigerasi.

Brazed Plate Condenser (BPC) adalah versi yang disolder dengan tembaga atau nikel, tanpa gasket, sehingga lebih tahan tekanan dan temperatur tinggi. Digunakan luas pada sistem HVAC, chiller, dan heat pump.

Klasifikasi condenser

IV. Direct Contact Condenser

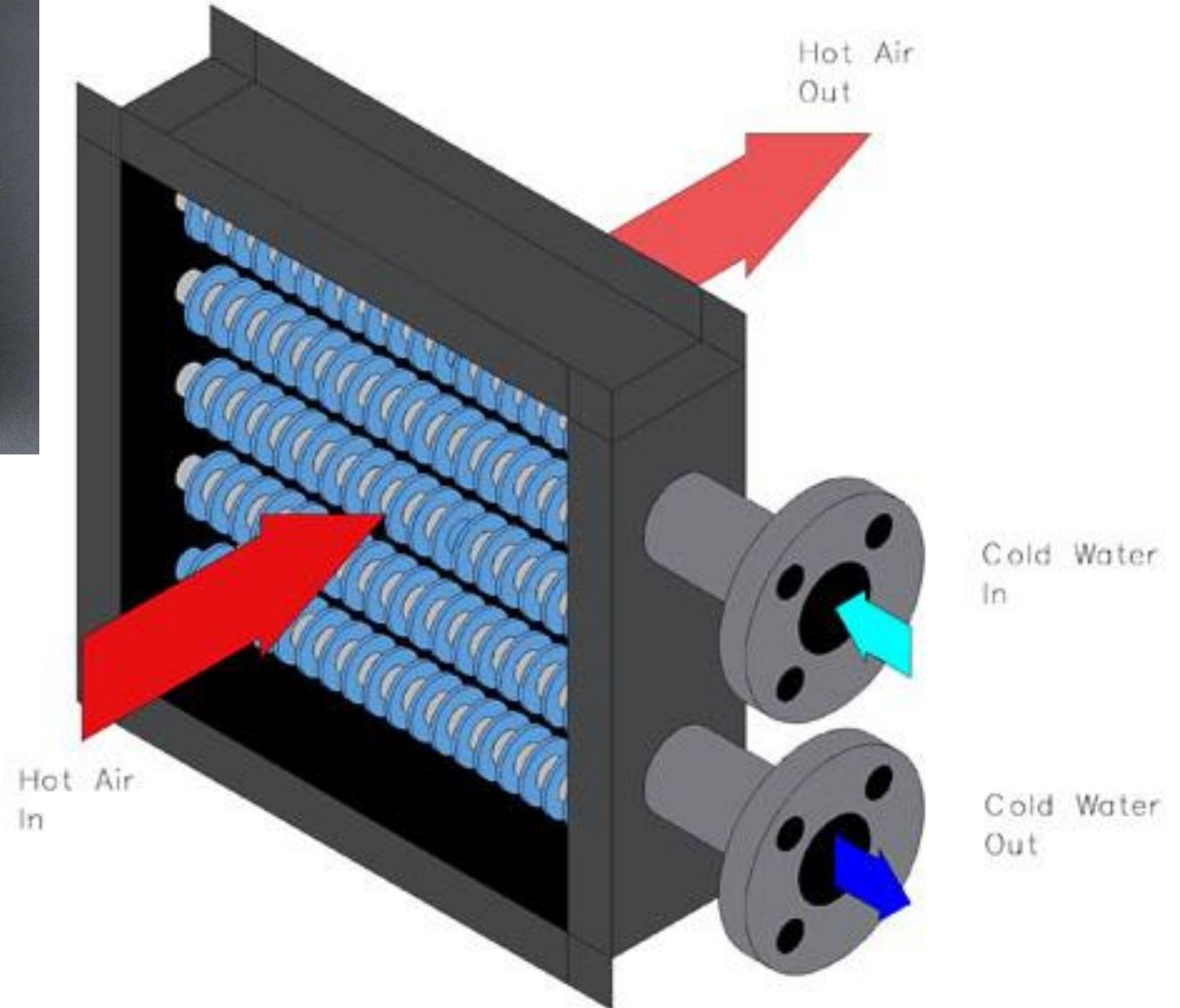
Berbeda dengan condenser permukaan (surface condenser), direct contact condenser mencampur uap langsung dengan cairan pendingin. Kondensat dan air pendingin keluar sebagai satu aliran campuran. Tipe ini memiliki efisiensi perpindahan kalor yang sangat tinggi karena tidak ada hambatan dinding, tetapi hanya dapat digunakan jika uap dan cairan pendingin dapat bercampur (misal: kondensasi uap air dengan air pendingin).

V. Barometric Condenser

Barometric condenser adalah jenis direct contact condenser yang memanfaatkan tekanan atmosfer untuk mengalirkan kondensat. Air pendingin dijatuhkan dari atas ke dalam chamber vakum tempat uap masuk. Kondensat mengalir ke bawah melalui pipa barometrik yang terendam dalam sumur (hot well). Digunakan pada sistem pendingin proses vakum di industri gula dan kertas.



FINNED TUBE



Finned Tube dalam Perpindahan Kalor

- **Fin** (dalam bahasa Indonesia: **sirip**) adalah perpanjangan permukaan padat dari dinding dasar suatu alat penukar kalor, yang bertujuan untuk **memperluas luas area perpindahan panas** tanpa menambah ukuran alat secara signifikan.
- **Finned tube adalah tabung (pipa) yang permukaannya luarnya (atau dalamnya) dilengkapi dengan sirip**. Sirip-sirip ini dapat dipasang secara membujur (longitudinal), melingkar (circumferential / helical), atau radial (pin fin).
- **Fungsi utama fin:**
 1. **Meningkatkan laju perpindahan panas** dengan memperbesar luas permukaan kontak antara dinding padat dan fluida.
 2. Sangat berguna ketika salah satu fluida memiliki koefisien perpindahan panas konveksi (h) yang sangat rendah, misalnya **udara** atau **gas**.
 3. Dengan menambahkan fin, tahanan termal sisi fluida yang kecil h dapat dikurangi secara efektif.

Efisiensi Sirip (*Fin Efficiency*)

Efisiensi sirip didefinisikan sebagai:

$$\eta_f = \frac{\textit{panas aktual yang dilepas sirip}}{\textit{panas jika seluruh sirip bersuhu sama dengan dinding dasar}}$$

Untuk sirip lurus dengan penampang seragam dan ujung terisolasi:

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL)}{mL}$$

$$\text{dengan } m = \sqrt{\frac{hP}{kA_c}}$$

- h adalah koefisien perpindahan panas konveksi
- P = keliling sirip (m)
- A_c = luas penampang sirip (m²)
- L = panjang sirip (m)

Semakin panjang sirip, efisiensi makin turun. Oleh karena itu, ada panjang optimal sirip.

JENIS PENDIDIH (REBOILER): KETTLE DAN CALANDRIA



Definisi Reboiler

- ❖ Reboiler atau pendidih adalah APK yang berfungsi memberikan panas kepada cairan di dasar kolom distilasi (bottom product) sehingga menghasilkan uap yang naik ke atas kolom sebagai driving force proses pemisahan.
- ❖ Reboiler merupakan komponen kritis dalam unit distilasi karena menentukan kapasitas, efisiensi, dan stabilitas operasi kolom.
- ❖ Pemilihan tipe reboiler yang tepat bergantung pada sifat fluida proses, duty termal, tekanan operasi, dan pertimbangan biaya.
- ❖ Proses penguapan dalam reboiler dapat terjadi dalam tiga rezim: subcooled boiling, nucleate boiling (penguapan nukleasi, efisiensi tertinggi), dan film boiling (burnout, harus dihindari).

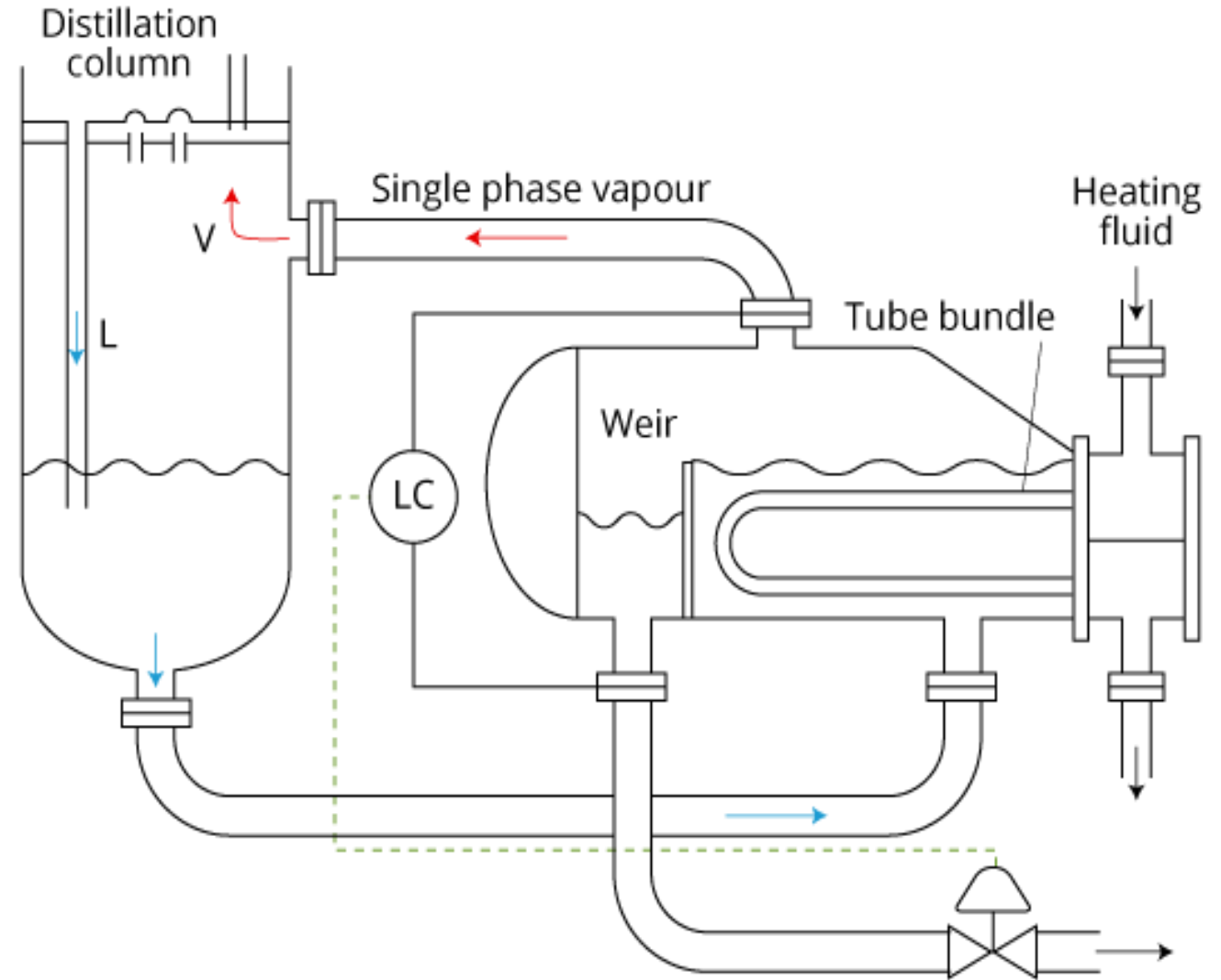
Kettle Reboiler

- ❖ **Konstruksi** Kettle reboiler (reboiler tipe ketel) adalah salah satu desain reboiler yang paling sederhana dan paling banyak digunakan. Shell-nya lebih besar dari bundle tube sehingga terdapat ruang uap (vapour space) di atas cairan. Tube bundle bisa dicabut untuk keperluan pembersihan dan inspeksi, yang merupakan keunggulan penting di industri.
- ❖ Ciri khas kettle reboiler adalah adanya weir (bendungan) di dalam shell. **Weir berfungsi untuk menjaga level cairan di sekitar bundle tube agar tetap terendam sepenuhnya.** Cairan yang berlebih meluap dari weir dan keluar sebagai bottom product melalui nosel di sisi lain.

Kettle Reboiler

Prinsip Kerja

fluida proses (bottom product kolom distilasi) masuk ke dalam shell melalui nosel di satu ujung, merendam seluruh bundle tube. Media pemanas (steam atau hot oil) dialirkan di dalam tube. Kalor dari tube berpindah ke cairan proses melalui konveksi dan konduksi, menghasilkan gelembung uap di permukaan tube (nucleate pool boiling). Uap naik ke bagian atas shell (vapour space) dan keluar melalui nosel uap menuju kolom distilasi.



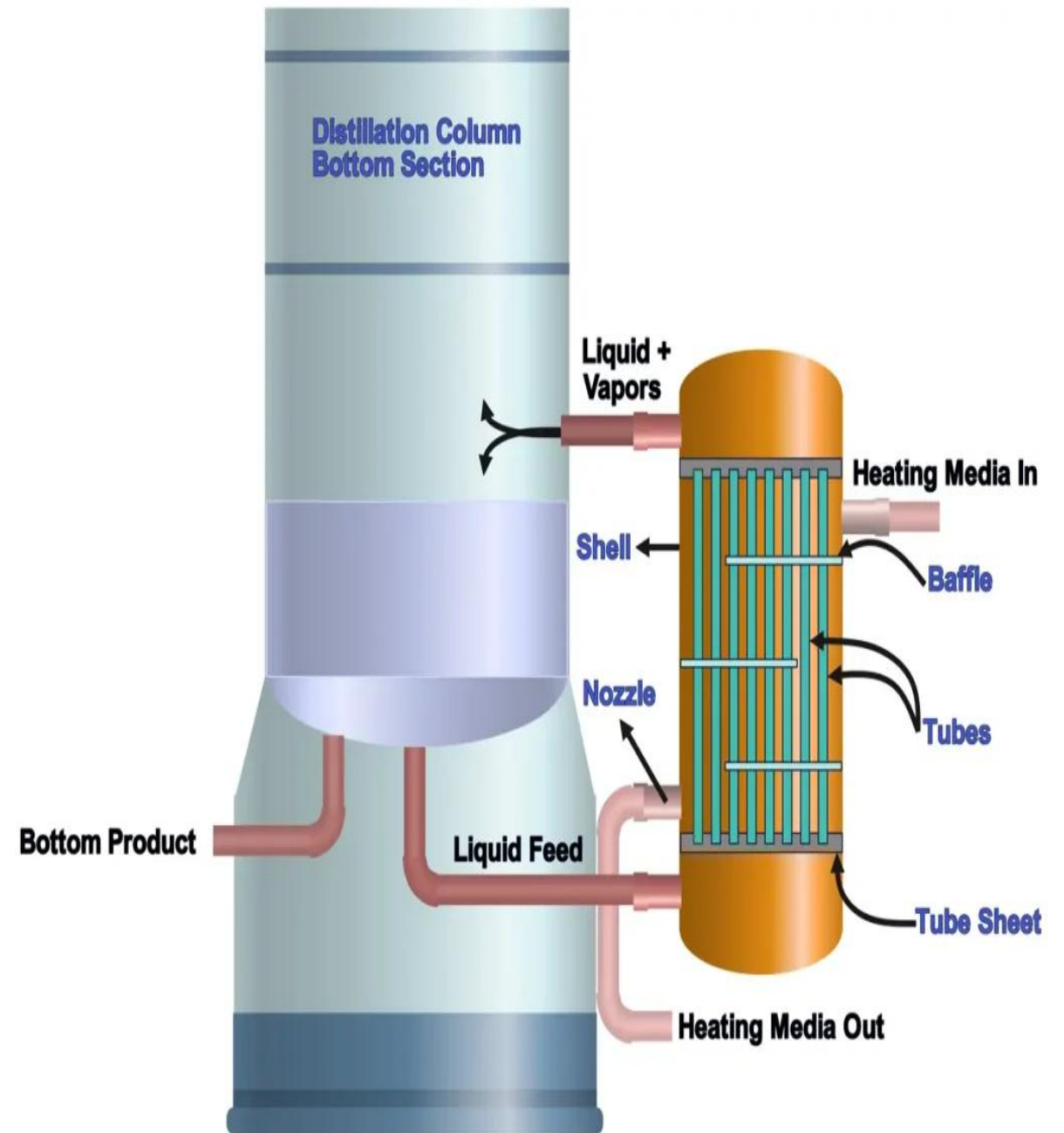
Kettle-type reboiler

Calandria Reboiler

Konstruksi dan Prinsip Kerja

Calandria reboiler adalah tipe reboiler yang dipasang langsung di bagian bawah kolom distilasi (integral dengan kolom). Desainnya mirip dengan APK shell and tube horizontal, dengan bundle tube yang terendam dalam cairan proses di dalam shell. Media pemanas mengalir di dalam tube sementara cairan proses ada di sisi shell.

Prinsip kerja calandria memanfaatkan sirkulasi alami (natural circulation) yang digerakkan oleh perbedaan densitas antara cairan dan campuran dua fasa (bubbly mixture). Cairan turun melalui downcomer di bagian pinggir kolom, masuk ke shell calandria, dipanaskan dan sebagian menguap, lalu campuran cair-uap yang lebih ringan naik kembali ke kolom. Sirkulasi alami ini berlangsung terus-menerus tanpa pompa tambahan..



Tabel Perbandingan Kettle Reboiler vs Calandria Reboiler

| Parameter | Kettle Reboiler | Calandria Reboiler |
|-----------------------|---------------------------------------|--|
| Lokasi pemasangan | Eksternal (di samping kolom) | Integral / bawah kolom |
| Sirkulasi fluida | Natural (pool boiling) | Natural thermosyphon (downward dan upward) |
| Desain shell | Shell diameter > bundle (dengan weir) | Shell diameter = bundle (kompak) |
| Kemudahan pembersihan | Bundle dapat dicabut | Lebih sulit (integral) |
| Residence time | Panjang (hold-up besar) | Singkat (cocok heat-sensitive) |
| Efisiensi termal | Baik | Sangat baik (sirkulasi tinggi) |
| Vaporization fraction | Hingga 80% | 10-30% (disarankan) |

CONTOH SOAL



Soal 1

Sebuah kondenser parsial pada unit distilasi memerlukan pendinginan uap hidrokarbon campuran. Laju alir uap adalah 8.5 kg/s dengan entalpi masuk $H_{v,in} = 420$ kJ/kg dan entalpi keluar (kondensasi parsial) $H_{v,out} = 180$ kJ/kg. Air pendingin tersedia pada suhu 30°C dan dapat keluar maksimum pada 50°C. Tentukan:

- (a) Duty panas total Q
- (b) Laju alir massa air pendingin
- (c) LMTD untuk konfigurasi 1 shell pass – 2 tube pass, serta faktor koreksi F
- (d) Rekomendasi jenis APK

Soal 1

Penyelesaian:

(a) Kalor / Beban termal condenser

Dalam kasus ini perpindahan panas melibatkan perubahan entalpi (bukan hanya sensibel), sehingga:

$$\begin{aligned}Q &= \dot{m}_{vapor} \times (H_{v,in} - H_{v,out}) \\Q &= 8.5 \text{ kg/s} \times (420 - 180) \text{ kJ/kg} \\Q &= \boxed{2,040 \text{ kW} = 2.04 \text{ MW}}\end{aligned}$$

b) Laju Alir Massa Air Pendingin

$$\begin{aligned}Q &= \dot{m}_{water} \cdot C_{p,water} \cdot (T_{c,out} - T_{c,in}) \\2,040,000 &= \dot{m}_{water} \times 4,180 \times (50 - 30) \\ \dot{m}_{water} &= \frac{2,040,000}{4,180 \times 20} \\ \dot{m}_{water} &= \boxed{24.40 \text{ kg/s}}\end{aligned}$$

Soal 1

c) LMTD dan Faktor Koreksi F

Uap masuk pada $T_{h,in} =$ anggap 95°C dan keluar pada $T_{h,out} = 55^{\circ}\text{C}$ (kondensasi parsial).

LMTD *countercurrent* (sebagai basis):

- $\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out} = 95 - 50 = 45^{\circ}\text{C}$
- $\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in} = 55 - 30 = 25^{\circ}\text{C}$

$$\text{LMTD}_{cc} = \frac{45 - 25}{\ln(45/25)} = \frac{20}{\ln(1.8)} = \frac{20}{0.5878} = 34.03^{\circ}\text{C}$$

Untuk 1-2 shell and tube exchanger (1 shell pass, 2 tube pass), parameter untuk grafik F:

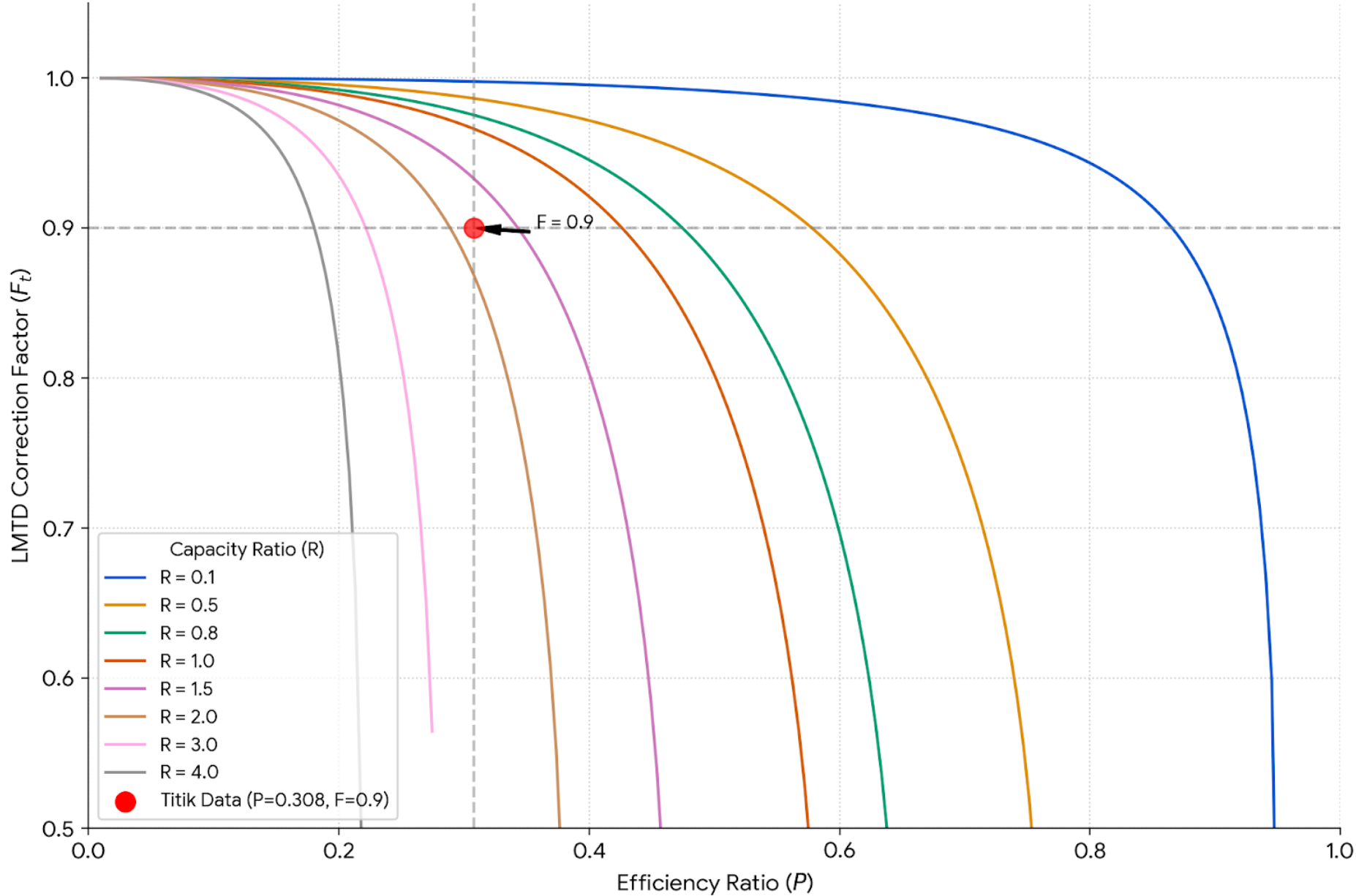
$$P = \frac{T_{c,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}} = \frac{50 - 30}{95 - 30} = \frac{20}{65} = 0.308$$
$$R = \frac{T_{h,in} - T_{h,out}}{T_{c,out} - T_{c,in}} = \frac{95 - 55}{50 - 30} = \frac{40}{20} = 2.0$$

Dari grafik TEMA untuk 1-2 exchanger dengan $P = 0.308$ dan $R = 2.0$, diperoleh:

$$\boxed{F \approx 0.90}$$

$$\text{LMTD}_{eff} = F \times \text{LMTD}_{cc} = 0.90 \times 34.03 = \boxed{30.63^{\circ}\text{C}}$$

Faktor Koreksi LMTD (F_t) untuk Exchanger 1-2 Shell & Tube

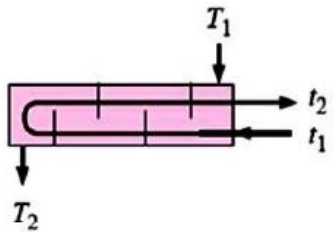
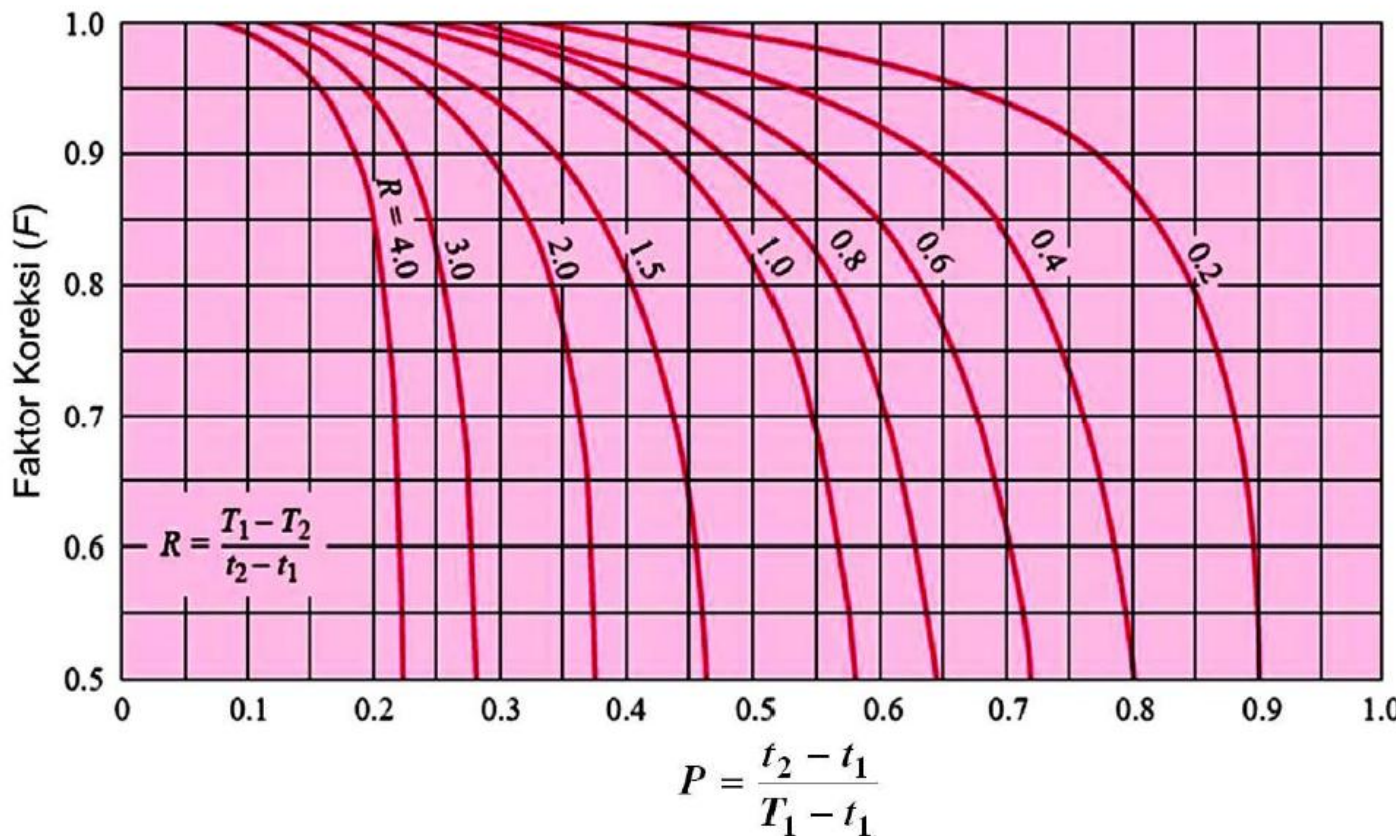


Dari grafik TEMA untuk 1-2 exchanger dengan $P = 0.308$ dan $R = 2.0$, diperoleh:

$$F \approx 0.90$$

$$\begin{aligned} \text{LMTD}_{eff} &= F \times \text{LMTD}_{cc} \\ &= 0.90 \times 34.03 \\ &= 30.63 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Grafik untuk menentukan nilai faktor koreksi LMTD:



Dari grafik TEMA untuk 1-2 exchanger dengan $P = 0.308$ dan $R = 2.0$, diperoleh:

$$\begin{aligned}
 & \boxed{F \approx 0.90} \\
 & \text{LMTD}_{eff} \\
 & = F \times \text{LMTD}_{cc} \\
 & = 0.90 \times 34.03 \\
 & = \boxed{30.63 \text{ } ^\circ\text{C}}
 \end{aligned}$$

Gambar 1.5 Grafik faktor koreksi untuk alat penukar-kalor dengan satu lintasan pada shell dan dua, empat, atau kelipatannya dari lintasan pada tube

Soal 1

Analisis Parameter

- **Efficiency Ratio (P):** Menunjukkan efektivitas perpindahan panas dari sisi *tube*. Berdasarkan data nilai $P = 0.308$ berada pada rentang yang cukup efisien untuk satu unit exchanger tunggal.
- **Capacity Ratio (R):** Rasio laju alir massa dikalikan panas jenis antara kedua fluida. Nilai $R = 2.0$ menunjukkan bahwa fluida di sisi *shell* memiliki perubahan suhu yang lebih besar dibanding sisi *tube*.
- **LMTD Correction Factor (F):** Diperoleh nilai **0.9**.
 - Dalam perancangan teknis, nilai $F > 0.75$ dianggap aman dan efisien.
 - Jika nilai $F < 0.75$ atau mendekati garis vertikal curam pada grafik (zona *temperature cross*), maka disarankan untuk menggunakan lebih dari satu *shell* dalam susunan seri.

Soal 1

(d) Rekomendasi APK

Dengan $Q = 2.04$ MW, ini adalah beban panas yang besar. Estimasi luas permukaan dengan $U_{est} = 600$ W/(m²·K) (tipikal untuk kondenser):

$$A = \frac{2,040,000}{600 \times 30.63} = 111 \text{ m}^2 = \mathbf{1.194,79 \text{ ft}^2}$$

Karena $A = \mathbf{1.194,79 \text{ ft}^2} \gg \mathbf{200 \text{ ft}^2}$, **Shell and Tube Heat Exchanger sangat direkomendasikan** dengan konfigurasi 1-2 (satu shell pass, dua tube pass), menggunakan tube berdiameter 1 inci pada triangular pitch.

SOAL 2: Neraca Massa dan Neraca Panas condenser Total

Sebuah condenser total di unit distilasi mengkondensasikan campuran uap yang terdiri dari benzena dan toluena. Uap masuk condenser pada suhu 85 C dan tekanan 101.325 kPa (tekanan atmosferik) dengan laju alir total 5.000 kg/jam. Komposisi uap masuk: 40% mol benzena, 60% mol toluena. Air pendingin (cooling water, CW) masuk pada 30 C dan keluar pada 45 C. Tentukan:

- (a) Laju alir kondensat yang keluar (kg/jam)
- (b) Beban termal condenser, Q (kW)
- (c) Laju alir air pendingin yang dibutuhkan (kg/jam)

Data sifat fisik (pada suhu rata-rata):

- Massa molar benzena = 78,11 g/mol; toluena = 92,14 g/mol
- Kalor laten kondensasi benzena pada 80,1 C: $\lambda_{\text{benz}} = 393,9$ kJ/kg
- Kalor laten kondensasi toluena pada 110,6 C: $\lambda_{\text{tol}} = 363,0$ kJ/kg
- C_p air = 4,18 kJ/kg.K
- Asumsi: kondensasi terjadi pada titik embun campuran, abaikan subcooling kondensat

SOAL 2: Neraca Massa dan Neraca Panas condenser Total

PENYELESAIAN SOAL 2:

Langkah 1: Neraca Massa

Dengan asumsi condenser total (tidak ada losses), maka seluruh uap masuk terkondensasi menjadi kondensat. Berdasarkan hukum kekekalan massa (steady state):

$$m_{\text{uap_masuk}} = m_{\text{kondensat_keluar}}$$

$$m_{\text{kondensat}} = 5.000 \text{ kg/jam}$$

Menentukan komposisi massa uap masuk:

Basis: 1 mol campuran uap total.

Fraksi mol benzena (y_{benz}) = 0,40; fraksi mol toluena (y_{tol}) = 0,60

$$M_{\text{campuran}} = 0,40 \cdot 78,11 + 0,60 \cdot 92,14 = 86,528 \text{ g/mol}$$

$$\text{Fraksi massa benzena: } x_{\text{benz}} = (0,40 \cdot 78,11) / 86,528 = 0,3611$$

$$\text{Fraksi massa toluena: } x_{\text{tol}} = (0,60 \cdot 92,14) / 86,528 = 0,6389$$

$$\text{Cek: } 0,3611 + 0,6389 = 1,0 \text{ (benar)}$$

SOAL 2: Neraca Massa dan Neraca Panas condenser Total

Laju alir komponen:

$$m_{\text{benz}} = 0,3611 * 5.000 = 1.805,5 \text{ kg/jam}$$

$$m_{\text{tol}} = 0,6389 * 5.000 = 3.194,5 \text{ kg/jam}$$

Total: 1.805,5 + 3.194,5 = 5.000 kg/jam (cek neraca massa terpenuhi)

Langkah 2: Neraca Panas - Beban Termal condenser

Panas yang dilepaskan selama kondensasi = kalor laten masing-masing komponen:

$$Q = m_{\text{benz}} * \lambda_{\text{benz}} + m_{\text{tol}} * \lambda_{\text{tol}}$$

$$Q = 1.805,5 \text{ kg/jam} * 393,9 \text{ kJ/kg} + 3.194,5 \text{ kg/jam} * 363,0 \text{ kJ/kg}$$

$$Q = 1.870.788,95 \text{ kJ/jam}$$

$$Q = 1.870.788,95 / 3.600 \text{ kW} = 519,7 \text{ kW}$$

Beban termal condenser $Q = 519,7 \text{ kW}$ (atau $519,7 \text{ kJ/s}$).

SOAL 3: Neraca Massa dan Neraca Panas Kettle Reboiler

Data Soal:

Sebuah kettle reboiler pada unit distilasi memproses campuran etanol-air. Aliran bottom kolom distilasi masuk ke reboiler pada laju 10.000 kg/jam dengan temperatur 96 C dan komposisi 10% berat etanol, 90% berat air. Reboiler menghasilkan uap dengan fraksi penguapan (vaporization fraction, V/F) sebesar 0,25 (artinya 25% dari umpan reboiler menguap). Komposisi uap yang keluar: **30% berat etanol**, 70% berat air. Steam pemanas masuk pada tekanan 3 barg (suhu jenuh 143,6 C, kalor laten 2.133 kJ/kg) dan keluar sebagai kondensat pada suhu yang sama. Tentukan:

- (a) Laju alir uap yang dihasilkan reboiler (kg/jam)
- (b) Laju alir liquid bottom product yang keluar (kg/jam) dan komposisinya
- (c) Beban panas reboiler Q_{reb} (kW)
- (d) Laju alir steam pemanas yang dibutuhkan (kg/jam)

Data sifat fisik:

- Kalor laten penguapan etanol pada 78,4 C: 841 kJ/kg
- Kalor laten penguapan air pada 100 C: 2.257 kJ/kg
- C_p campuran cair (estimasi, 96 C): 3,9 kJ/kg.K
- Titik didih campuran (10% berat etanol) pada 101,325 kPa: 96 C (sesuai data VLE)

SOAL 3: Neraca Massa dan Neraca Panas Kettle Reboiler

PENYELESAIAN SOAL 3:

Langkah 1: Neraca Massa

Definisi variabel: F = feed reboiler, V = laju alir uap keluar, L = laju alir liquid keluar (bottom product).

$$F = 10.000 \text{ kg/jam}$$

$$V/F = 0,25 \Rightarrow V = 0,25 * 10.000 = 2.500 \text{ kg/jam}$$

$$F = V + L \text{ (neraca massa total)}$$

$$L = F - V = 10.000 - 2.500 = 7.500 \text{ kg/jam}$$

Neraca massa komponen etanol (check komposisi liquid):

$$F * z_{\text{etanol}} = V * y_{\text{etanol}} + L * x_{\text{etanol}}$$

$$10.000 * 0,10 = 2.500 * 0,30 + 7.500 * x_{\text{etanol}}$$

$$x_{\text{etanol}} = 0,0333 = 3,33\% \text{ berat}$$

$$x_{\text{air}} = 1 - 0,0333 = 0,9667 = 96,67\% \text{ berat}$$

SOAL 2: Neraca Massa dan Neraca Panas Kettle Reboiler

Neraca air:

$$F * z_{\text{air}} = V * y_{\text{air}} + L * x_{\text{air}}$$

$$10.000 * 0,90 = 2.500 * 0,70 + 7.500 * 0,9667$$

$$9.000 = 1.750 + 7.250 = 9.000 \text{ (neraca terpenuhi)}$$

Langkah 2: Beban Panas Reboiler (Neraca Enthalpi)

Beban panas reboiler = kalor yang dibutuhkan untuk menguapkan sebagian umpan:

Q_{reb} = laju kalor penguapan komponen etanol di uap + laju kalor penguapan komponen air di uap:

$$m_{\text{etanol_di_uap}} = 2.500 * 0,30 = 750 \text{ kg/jam}$$

$$m_{\text{air_di_uap}} = 2.500 * 0,70 = 1.750 \text{ kg/jam}$$

$$Q_{\text{reb}} = m_{\text{etanol_uap}} * \lambda_{\text{etanol}} + m_{\text{air_uap}} * \lambda_{\text{air}}$$

$$Q_{\text{reb}} = 750 * 841 + 1.750 * 2.257 \text{ [kJ/jam]}$$

$$Q_{\text{reb}} = 4.580.500 \text{ kJ/jam} = 4.580.500 / 3.600 = 1.272,4 \text{ kW}$$

SOAL 2: Neraca Massa dan Neraca Panas Kettle Reboiler

Langkah 3: Laju Alir Steam Pemanas

Steam melepaskan kalor sebesar kalor latennya saat berkondensasi (asumsi tidak ada subcooling kondensat):

$$Q_{reb} = m_{steam} * \lambda_{steam}$$

$$1.272,4 \text{ kW} = m_{steam} * (2.133 \text{ kJ/kg} / 3600 \text{ s/jam}) * 3600$$

$$m_{steam} = 2.147,9 \text{ kg/jam} \sim 2.148 \text{ kg/jam}$$

Hasil Soal 3:

- (a) Laju alir uap keluar reboiler $V = 2.500 \text{ kg/jam}$
- (b) Laju alir liquid bottom product $L = 7.500 \text{ kg/jam}$; komposisi: 3,33% berat etanol, 96,67% berat air
- (c) Beban panas reboiler $Q_{reb} = 1.272,4 \text{ kW}$
- (d) Laju alir steam pemanas = 2.148 kg/jam

LATIHAN PERTEMUAN 5



Soal 1: Kondensor Sederhana (Uap Air dengan Air Pendingin)

Sebuah kondensor shell-and-tube menerima uap air jenuh (saturated steam) pada tekanan 1 atm (suhu jenuh 100°C) dengan laju aliran $0,5 \text{ kg/s}$. Air pendingin masuk pada suhu 25°C dengan laju 8 kg/s . Koefisien perpindahan panas menyeluruh $U=1200 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Uap keluar sebagai cairan jenuh pada suhu 100°C (tidak ada subcooling).

Hitung:

- a) Suhu keluar air pendingin.
- b) LMTD (Log Mean Temperature Difference).
- c) Luas permukaan perpindahan panas yang diperlukan.

Data:

Panas laten penguapan air pada 100°C , $h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}$

Kapasitas panas air pendingin $C_p = 4180 \text{ J/kg}$

Soal 2: Kondensor dengan Uap Hidrokarbon (Pendinginan + Kondensasi + Subcooling)

Sebuah kondenser digunakan untuk mengembunkan uap propana. Uap propana masuk pada suhu 70°C (superheated) dengan laju $0,3 \text{ kg/s}$. Tekanan operasi kondenser dijaga sehingga suhu jenuh propana pada tekanan tersebut adalah 50°C . Cairan propana keluar sebagai subcooled liquid pada suhu 40°C . Air pendingin masuk pada 20°C dan keluar pada 35°C . Koefisien perpindahan panas menyeluruh dapat dianggap konstan $U=850 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Data termofisika propana (nilai pendekatan):

$$C_p \text{ v (uap superheated)} = 1,67 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$h_{fg} \text{ pada } 50^{\circ}\text{C} = 300 \text{ kJ/kg (panas laten)}$$

$$C_p \text{ l (cair)} = 2,4 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

Hitung:

- Beban panas total kondenser (Q total).
- LMTD.
- Luas permukaan yang diperlukan.

PERTANYAAN ?



KESIMPULAN

- ❖ Setiap spesifikasi alat penukar kalor tubular harus merujuk pada kelas konstruksi TEMA (atau B)
- ❖ Kondensor membuang panas laten agar uap berubah menjadi cair, sementara reboiler justru menambahkan panas laten untuk menguapkan cairan.
- ❖ Dengan menambahkan sirip, luas permukaan efektif membesar
- ❖ Kalor sensibel mengubah suhu tanpa perubahan fase ($Q = mc_p\Delta T$), sedangkan kalor laten mengubah fase tanpa perubahan suhu ($Q = mL$).
- ❖ Berdasarkan proses fluida bercampur secara langsung atau tidak, kondensor terbagi menjadi: Surface Condenser dan Direct-contact Condenser
- ❖ Reboiler adalah APK yang berfungsi memberikan panas kepada cairan di dasar kolom distilasi (bottom product) sehingga menghasilkan uap yang naik ke atas kolom sebagai driving force proses pemisahan.



TERIMA KASIH