جمهوری اسلامی ایران
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

مجتمع آموزش عالی گناباد

Chemical Engineering Plant and Process Design

Vahid Mahmoudi

Assistant Professor,
Department of Chemical Engineering,
University of Gonabad

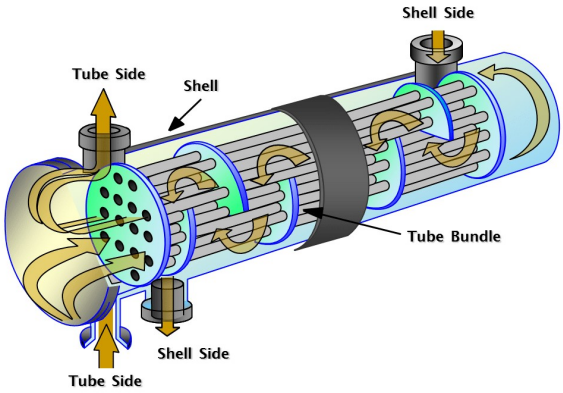
فصل سوم
طراحی مبدل های حرارتی

Heat Exchanger Design

اهمیت تجهیزات انتقال حرارت

تجهیزات انتقال حرارت اساسا در تمامی صنایع فرایندی بکار می رود. یک مهندس طراح باید با انواع مختلف تجهیزاتی که برای انتقال حرارت به کار می روند آشنا باشد. انتخاب مناسب تجهیزات انتقال حرارت مستلزم شناخت و درک مطلوب از اساس تئوریک انتقال حرارت و روشهای طراحی است.

بطور کلی حرارت می تواند از یک منبع حرارتی به سه صورت هدایت، جابجایی و تشعشع به جسم دیگر منتقل شود. در برخی حالات این تبادل تواما با دو یا سه روش مذکور صورت می گیرد.



انتقال حرارت هدایتی

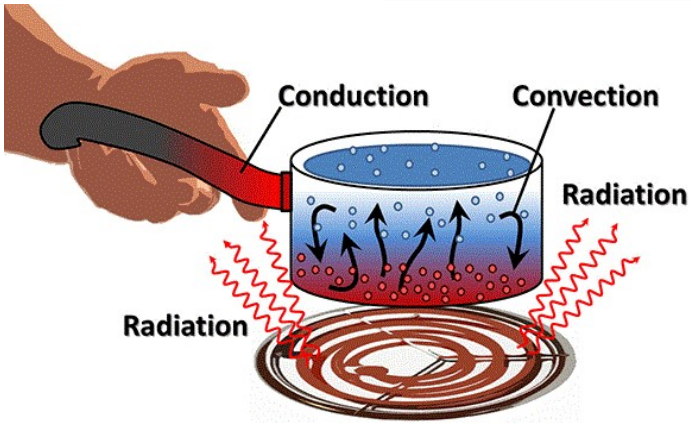
شدت انتقال حرارت به روش هدایت متناسب با سطح موثر انتقال حرارت و اختلاف دما در جهت مسیر انتقال حرارت است.

$$q = kA\frac{\Delta T}{x}$$

q: شدت انتقال حرارت

A: سطح متوسط انتقال حرارت عمود بر جهت جریان

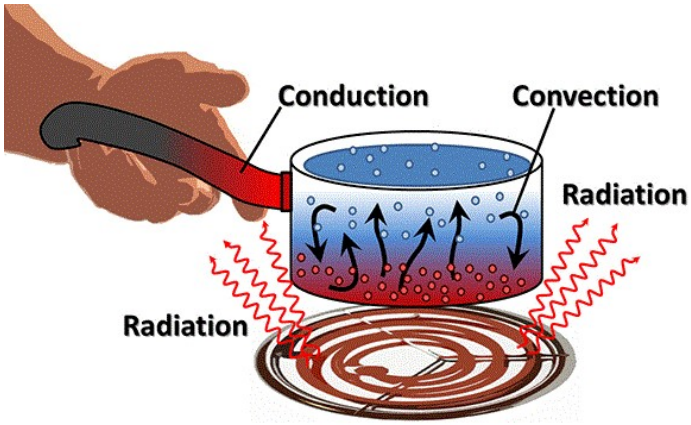
x: طول مسیر هدایت در جهت جریان انتقال حرارت



انتقال حرارت جابجایی

انتقال حرارت توسط اختلاط فیزیکی سیال گرم و سرد، انتقال حرارت به طریق جابجایی نامیده می شود. اختلاط می تواند مانند جابجایی آزاد تنها در اثر اختلاف دانسیته ایجاد شود یا مانند اجباری در اثر هم زدن مکانیکی حاصل گردد.

$$q = hA\Delta T$$



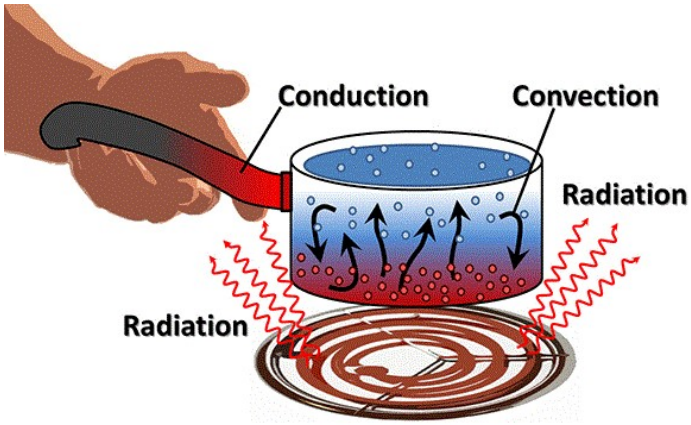
انتقال حرارت تشعشع

زمانیکه انرژی حرارتی حاصل از تشعشع از یک منبع حرارتی به جسم دیگری انتقال یابد، حرارت به طریق تشعشع را خواهیم داشت.

$$q = \sigma \varepsilon A T^4$$

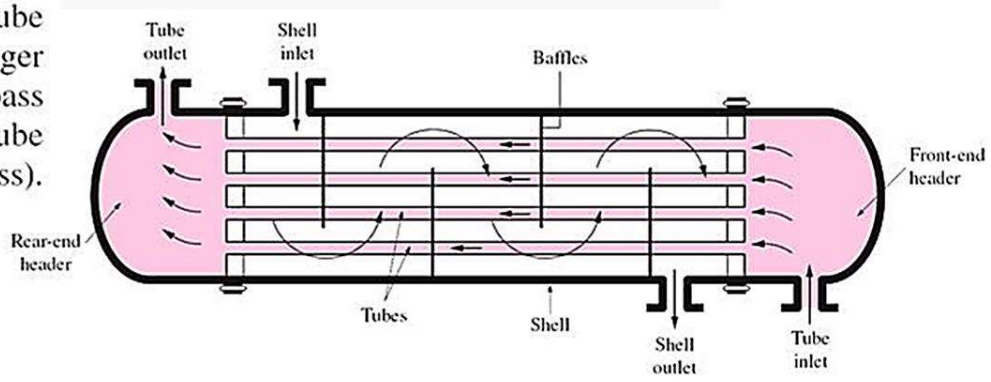
σ: ثابت استفان بولتزمن

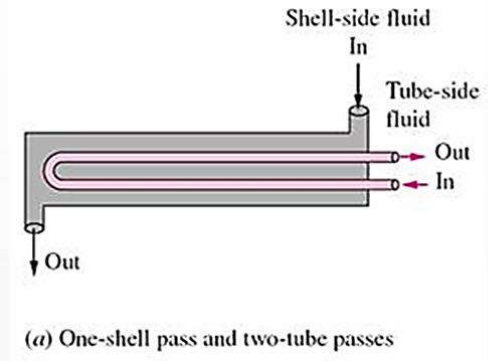
ε: میزان انتشار از سطح



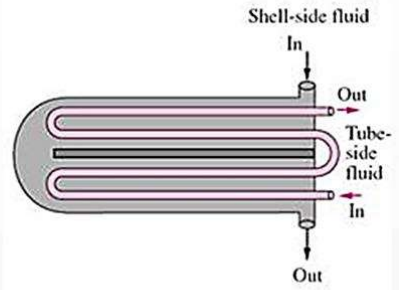
مبدل های حرارتی

The schematic of a shell-and-tube heat exchanger (one-shell pass and one-tube pass).



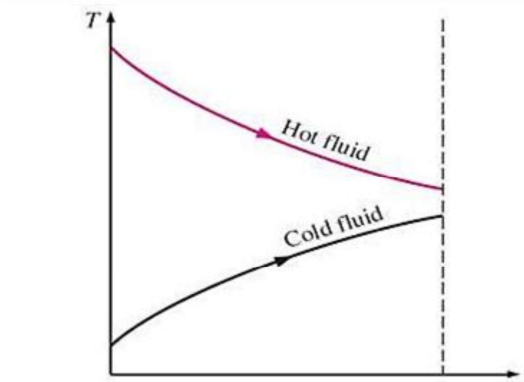


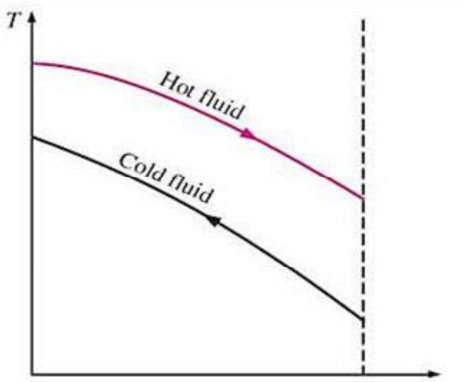
(a) One-shell pass and two-tube passes

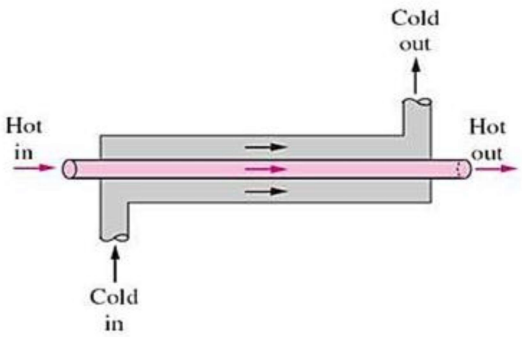


(b) Two-shell passes and four-tube passes

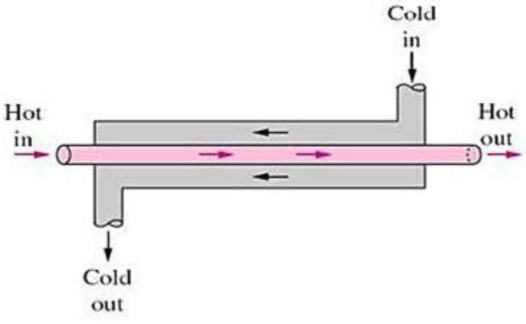
عامل انتقال حرارت..!







(a) Parallel flow



(b) Counter flow

انواع مبدل ها

- **مبدل حرارتی پوسته و لوله:** رایج ترین نوع مبدل حرارتی در کاربردهای صنعتی می باشند.
- این مبدل ها شامل تعداد زیادی لوله (گاهی چند صد) هستند که در یک پوسته قرار گرفته اند و محورهای آن ها موازی با محور پوسته است.
- انتقال حرارت زمانی صورت می گیرد که یک سیال در داخل لوله ها جریان دارد، در حالی که سیال دیگر در خارج از لوله ها از طریق پوسته جریان می یابد.
- مبدل های حرارتی پوسته و لوله بر اساس تعداد گذرهای پوسته و لوله به دسته های متفاوت طبقه بندی می شوند.

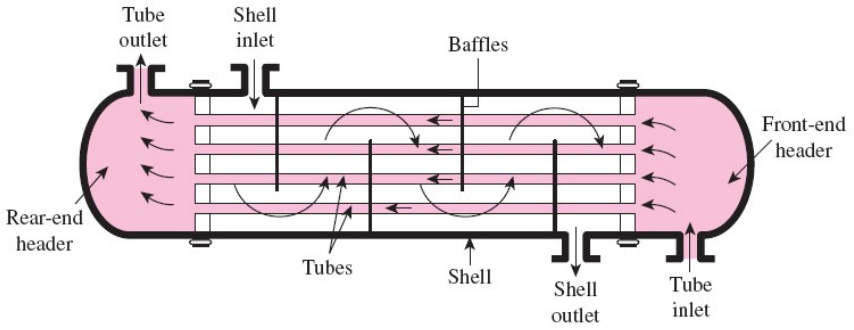


FIGURE 11–4
The schematic of a shell-and-tube heat exchanger (one-shell pass and one-tube pass).

انواع مبدل ها

مبدل حرارتی فشرده (*compact heat exchanger*): این مبدل دارای سطح انتقال حرارت بزرگ در واحد حجم (به عنوان مثال، رادیاتور ماشین، ریه انسان) می باشد. یک مبدل حرارتی با چگالی سطح $\beta > 700\ m^2/m^3$ به عنوان یک مبدل فشرده طبقه بندی می شود.

جریان متقاطع (*Cross-flow*): در مبدل های حرارتی فشرده، دو سیال معمولاً عمود بر یکدیگر حرکت می کنند. جریان متقاطع بیشتر به عنوان جریان غیر مخلوط (*unmixed*) و مخلوط (*mixed*) طبقه بندی می شود.

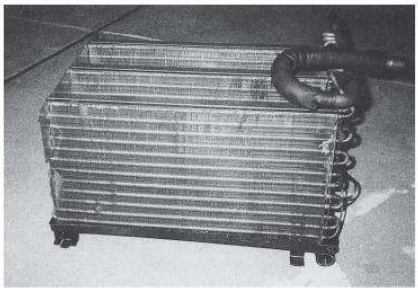
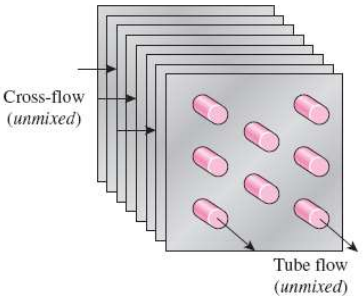
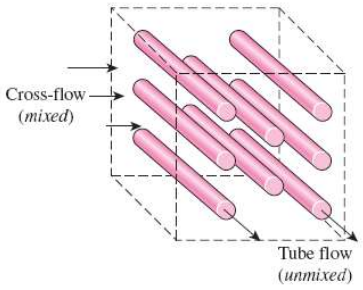


FIGURE 11–2
A gas-to-liquid compact heat exchanger for a residential air-conditioning system.



(*a*) Both fluids unmixed



(*b*) One fluid mixed, one fluid unmixed

FIGURE 11–3
Different flow configurations in cross-flow heat exchangers.

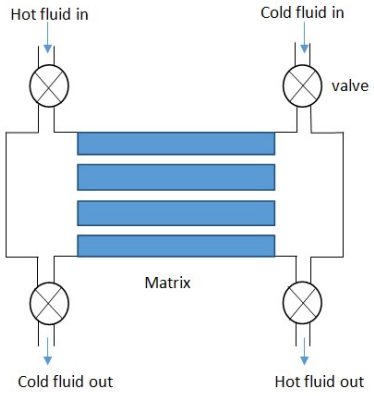
انواع مبدل ها

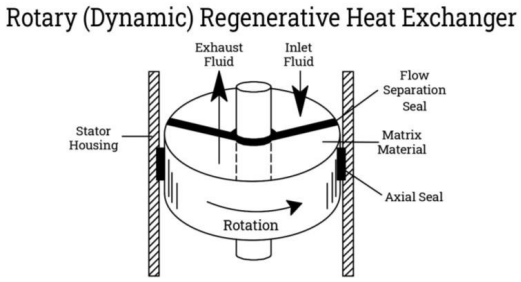
مبدل حرارتی بازیاب (Regenerative): این سیستم شامل عبور متناوب جریان سیال سرد و گرم از یک ناحیه جریان است.

مبدل بازیاب دینامیکی (Dynamic-type regenerator): شامل یک درام چرخان و جریان مداوم سیال سرد و گرم در قسمت‌های مختلف درام است، به طوری که هر قسمت از درام به طور دوره‌ای از جریان گرم عبور می‌کند و گرما را ذخیره می‌کند و سپس از طریق جریان سرد این جریان گرمای ذخیره شده را دفع می‌کند.

کندانسور: یکی از سیالات خنک شده و با عبور از مبدل حرارتی میعان می شود.

دیگ بخار: یکی از سیالات گرما را جذب کرده و تبخیر می شود.

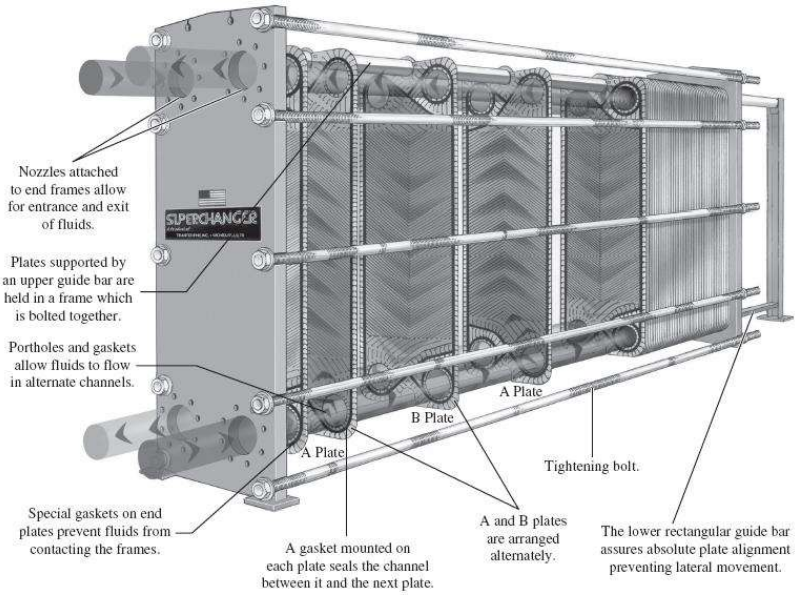




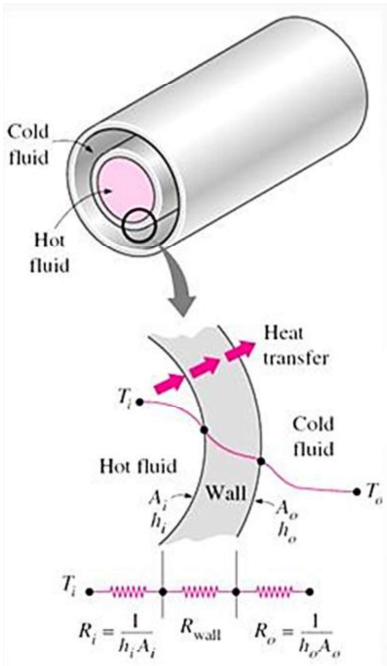
انواع مبدل ها

مبدل حرارتی قاب-صفحه (یا فقط صفحه): این مبدل متشکل از یک سری صفحات با گذرگاه های جریان مسطح موجدار است. سیالات سرد و گرم در مسیرهای متناوب جریان یافته و بنابراین هر جریان سیال سرد توسط دو جریان سیال داغ احاطه می شود. در نتیجه انتقال حرارت بسیار موثری انجام خواهد شد. این سیستم برای انتقال حرارت مایع به مایع بسیار مناسب است.

A plate-and-frame liquid-to-liquid heat exchanger.



ضریب کلی انتقال حرارت



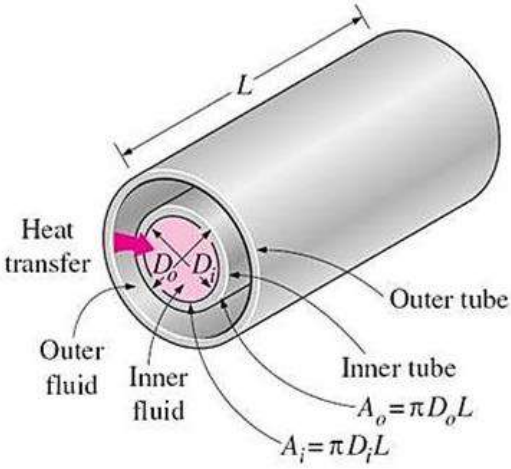
Thermal resistance network associated with heat transfer in a double-pipe heat exchanger.

زمانی تعریف می شود که با مجموعه ای از مقاومتهای حرارتی که در مسیر حرارت وجود دارد روبرو می شویم مانند:

- مقاومتی که در سیال داخلی وجود دارد
- مقاومت سیالی که در بیرون جاری است
- مقاومت ضخامت دیواره
- مقاومت رسوبات خارجی روی لوله
- مقاومت رسوبات روی دیواره داخلی لوله

Fouling: رسوباتی که در اثر رسوب املاح موجود در سیال روی دیواره ها بوجود می آید

ضریب کلی انتقال حرارت



The two heat transfer surface areas associated with a double-pipe heat exchanger (for thin tubes, $D_i \approx D_o$ and thus $A_i \approx A_o$).

$$R_{wall} = \frac{\ln (D_o/D_i)}{2\pi kL}$$

$$R = R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln (D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o}$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = UA\,\Delta T = U_i A_i\,\Delta T = U_o A_o\,\Delta T$$

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{wall} + \frac{1}{h_o A_o}$$

ضریب کلی انتقال حرارت

- هنگامی که ضخامت دیواره لوله کم بوده و ضریب هدایت حرارتی لوله بالا باشد (که معمولاً همین گونه است)، مقاومت حرارتی لوله ناچیز بوده ($R_{wall}\approx 0$) و سطوح بیرونی و درونی لوله نیز تقریباً با هم برابر هستند. یعنی $A_O \approx A_i \approx A_s$. در نتیجه:

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$

- در محاسبه مساحت انتقال حرارت، سطح پره ها هم باید در نظر گرفته شود:

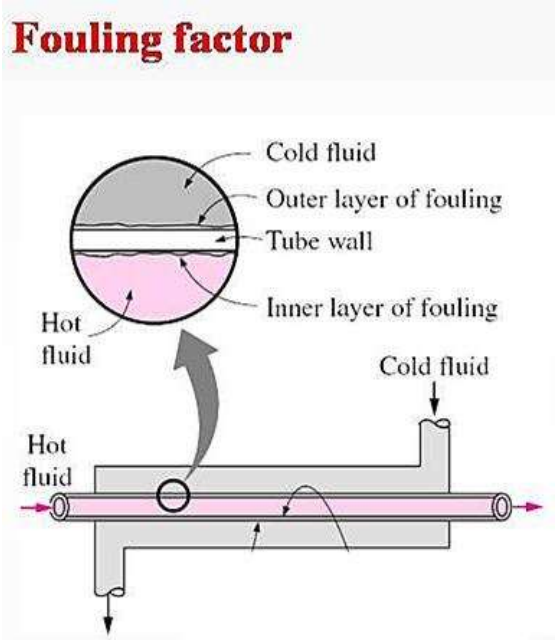
$$A_s = A_{\text{unfinned}} + \eta_{\text{fin}} A_{\text{fin}}$$

ضریب کلی انتقال حرارت

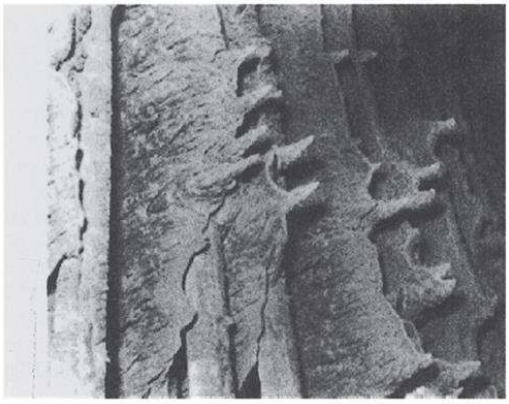
Representative values of the overall heat transfer coefficients in heat exchangers

Type of heat exchanger	U, W/m² · °C*
Water-to-water	850–1700
Water-to-oil	100–350
Water-to-gasoline or kerosene	300–1000
Feedwater heaters	1000–8500
Steam-to-light fuel oil	200–400
Steam-to-heavy fuel oil	50–200
Steam condenser	1000–6000
Freon condenser (water cooled)	300–1000
Ammonia condenser (water cooled)	800–1400
Alcohol condensers (water cooled)	250–700
Gas-to-gas	10–40
Water-to-air in finned tubes (water in tubes)	30–60†
	400–850†
Steam-to-air in finned tubes (steam in tubes)	30–300†
	400–4000‡

ضریب جرم گرفتگی



Representative fouling factors (thermal resistance due



Precipitation fouling of ash particles on superheater tubes.

Alcohol vapors	0.0001
Air	0.0004

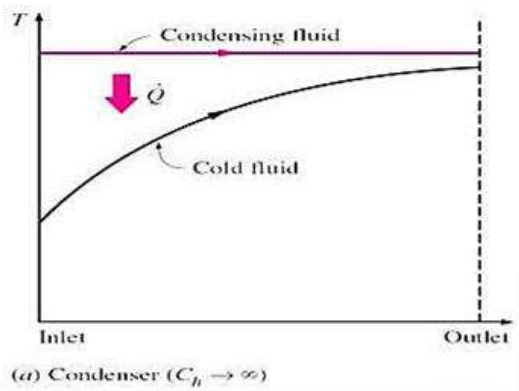
$$R = \frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln (D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o}$$

کندانسور و جوش آور

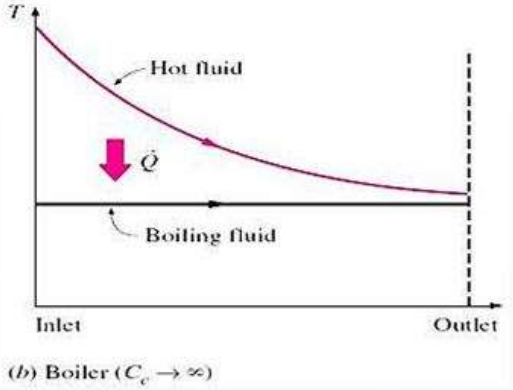
- دو نوع از مبدل های حرارتی که عموماً در فرآیندها به کار گرفته می شوند (به خصوص در برج های تقطیر) عبارتند از کندانسور و جوش آور. در این مبدل ها، سیال دچار تغییر فاز می شود و در نتیجه، نرخ انتقال حرارت را می توان به کمک عبارت زیر تعیین کرد:

$$\dot{Q} = \dot{m} h_{fg}$$

که در این عبارت، $\dot{m}$ نرخ تبخیر (جوش آور) یا میعان (کندانسور) بوده و h_{fg} انتالپی تبخیر سیال در دما و فشار فرآیند می باشد.



(a) Condenser ($C_h \to \infty$)



(b) Boiler ($C_c \to \infty$)

طراحی مبدل های حرارتی

- یکی از روش های طراحی مبدل حرارتی، روش log mean temperature difference یا LMTD می باشد.
- در این روش:

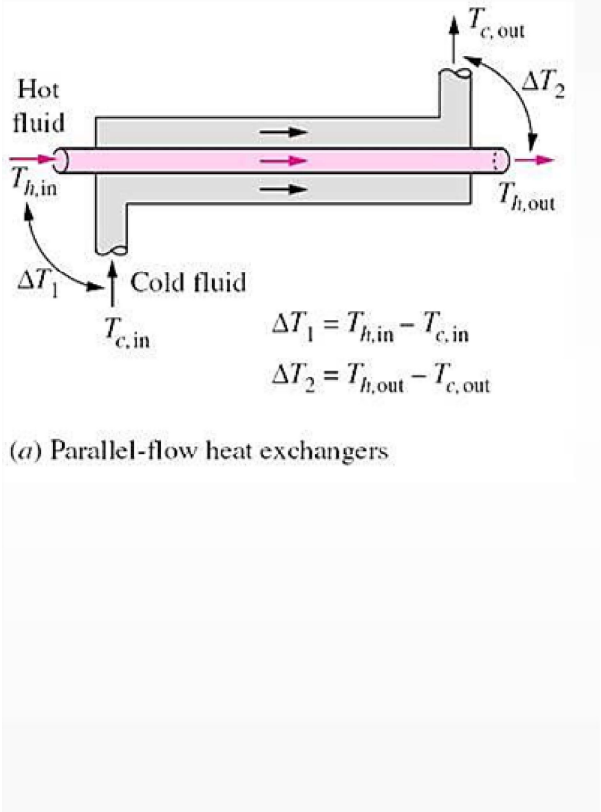
$$\dot{Q} = UA_s\Delta T_{lm}$$

که

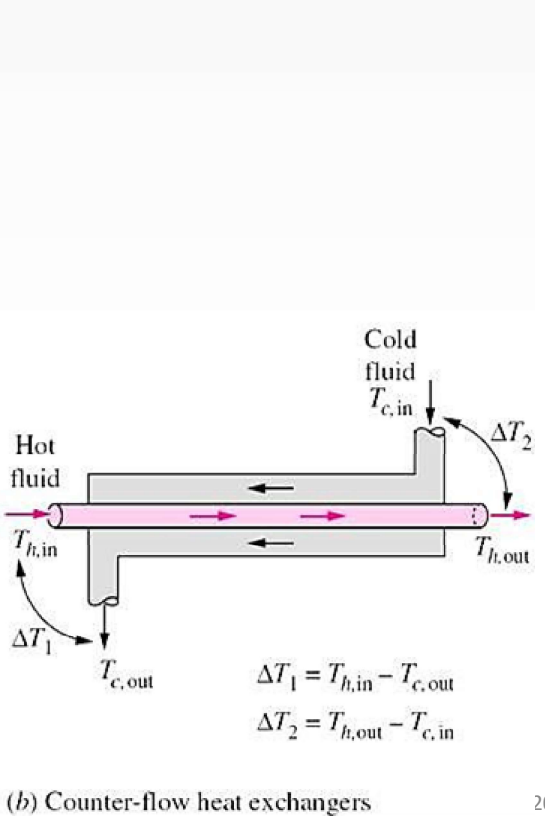
$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

- مقدار ΔT_{lm} به عنوان عدد مناسبی برای اختلاف دمای میانگین در مبدل در نظر گرفته می شود.
- همچنین مقادیر ΔT_1 و ΔT_2 عبارتند از اختلاف دمای بین دو سیال در ورودی و خروجی مبدل حرارتی.

طراحی مبدل های حرارتی



(a) Parallel-flow heat exchangers

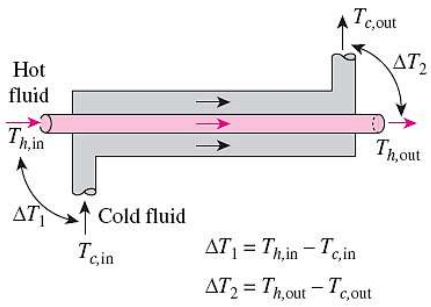


(b) Counter-flow heat exchangers

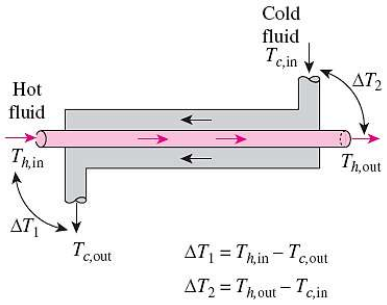
طراحی مبدل های حرارتی

$$\Delta T_{am} = \frac{1}{2}(\Delta T_1 + \Delta T_2)$$

- اختلاف دمای متوسط حسابی
- اختلاف دمای متوسط لگاریتمی ΔT_{lm} معیار دقیق تری از اختلاف دمای میانگین بین سیال سرد و گرم می باشد.
- همواره ΔT_{lm} کمتر از ΔT_{am} بوده و در نتیجه استفاده از ΔT_{am} در محاسبات به جای ΔT_{lm} نرخ انتقال حرارت بیشتری را برای مبدل به دست می دهد.
- هنگامی که ΔT_1 و ΔT_2 بیشتر از ۴۰ درصد با یکدیگر اختلاف داشته باشند، خطای استفاده از ΔT_{am} کمتر از ۱ درصد خواهد بود. اما این خطا هنگامی بیش از حد افزایش می یابد که مقدار اختلاف بین ΔT_1 و ΔT_2 به مقادیری بیشتر از ۴۰ درصد افزایش پیدا کند.



(a) Parallel-flow heat exchangers



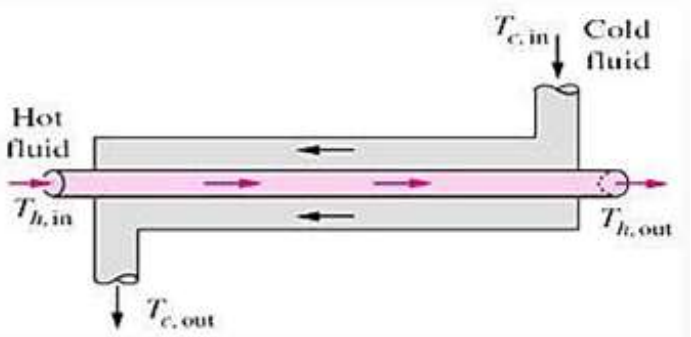
(b) Counter-flow heat exchangers

طراحی مبدل های حرارتی

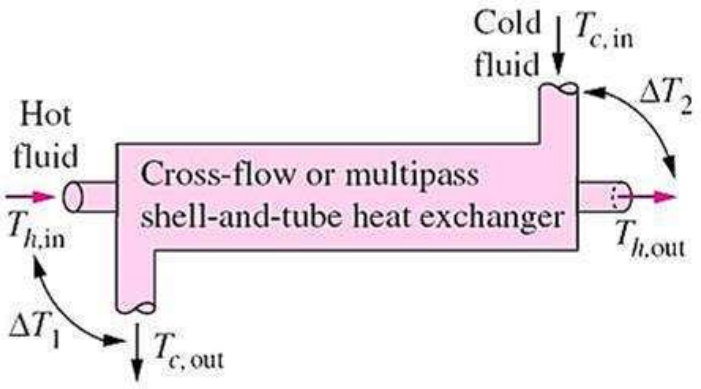
- همان طور که قبلاً اشاره شد، رابطه ΔT_{lm} تنها برای مبدل های با جریان های همسو و ناهمسو تعریف شده است.
- برای مبدل های چند جریانه و مبدل های جریان متقاطع، برای تعیین ΔT_{lm} از ضریب F (ضریب اصلاح یا correction factor) استفاده می شود.

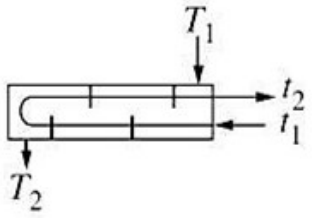
$$\Delta T_{lm} = F\,\Delta T_{lm\ CF}$$

که در این رابطه، $\Delta T_{lm\ CF}$ اختلاف دمای متوسط لگاریتمی برای یک مبدل با جریان ناهمسو (counter flow) می باشد.



مبدل های چند جریانه یا جریان متقاطع





$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

Heat transfer rate:

$$\dot{Q} = UA_s F \Delta T_{lm,CF}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{(\dot{m}C_p)_{\text{tube side}}}{(\dot{m}C_p)_{\text{shell side}}}$$

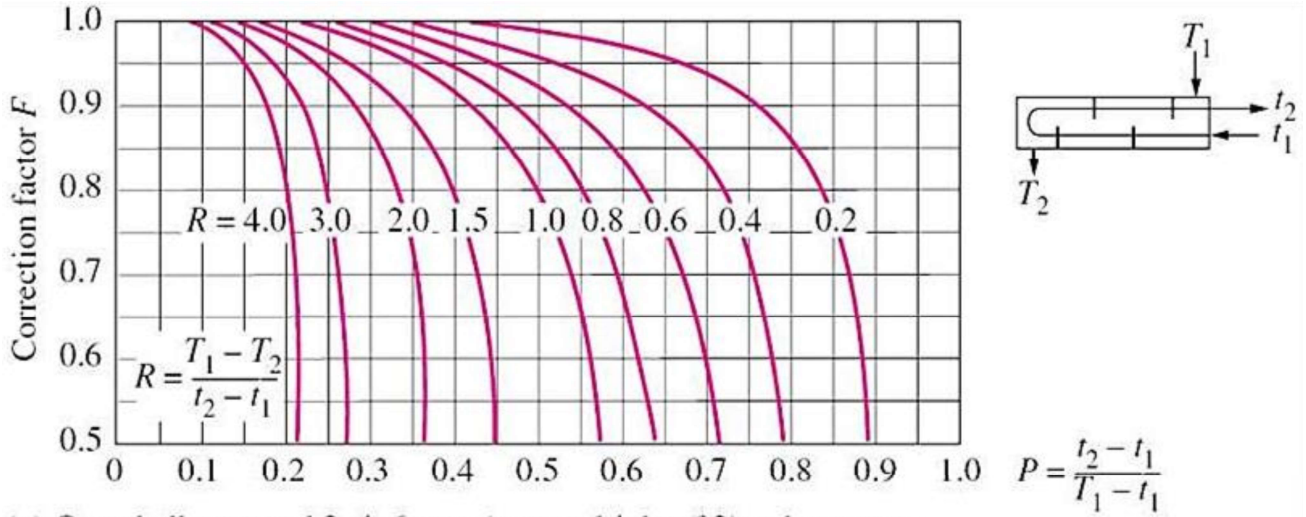
where

$$\Delta T_{\text{lm},CF} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)}$$

$$\Delta T_1 = T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{out}}$$

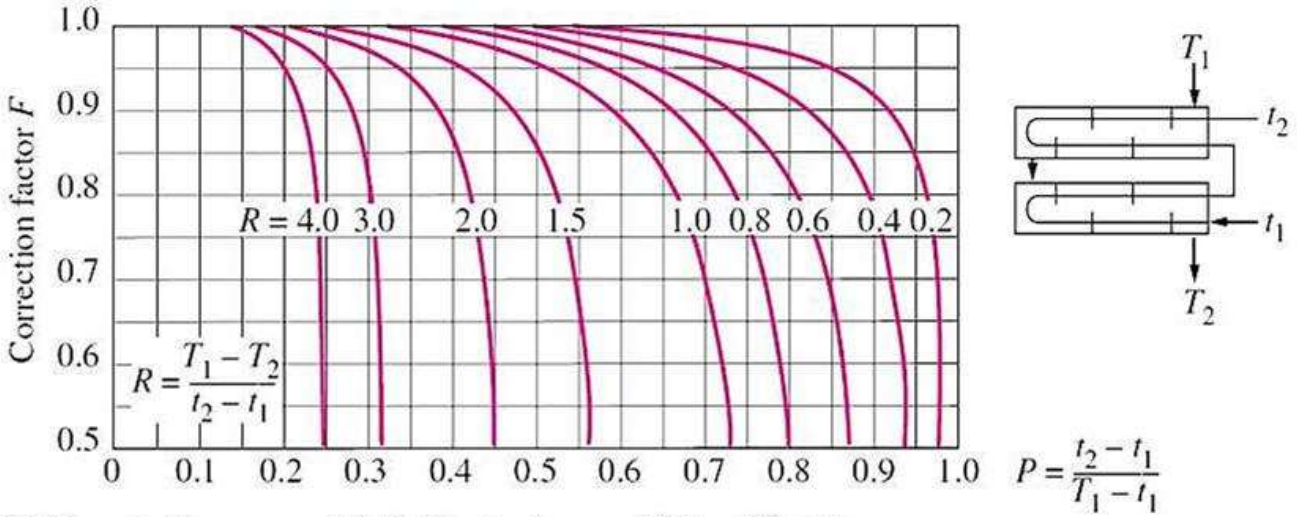
$$\Delta T_2 = T_{h,\text{out}} - T_{c,\text{in}}$$

مبدل های چند جریانه یا جریان متقاطع



(*a*) One-shell pass and 2, 4, 6, etc. (any multiple of 2), tube passes

مبدل های چند جریانه یا جریان متقاطع



(*b*) Two-shell passes and 4, 8, 12, etc. (any multiple of 4), tube passes

روش LMTD

- **در طراحی مبدل حرارتی به روش LMTD، ابتدا باید مبدل حرارتی مناسب برای فرآیند موردنظر انتخاب شود.**
- **مراحل طراحی به روش LMTD به شکل زیر است:**

۱- انتخاب مبدل مناسب برای انتقال حرارت در فرآیند موردنظر

۲- تعیین دماهای مجهول ورودی و خروجی و نرخ انتقال حرارت با استفاده از معادله موازنه انرژی

۳- محاسبه اختلاف دمای متوسط لگاریتمی یا ΔT_{lm} و (در صورت نیاز) ضریب اصلاح F.

۴- محاسبه مقدار ضریب کلی انتقال حرارت U (یا تعیین آن به کمک جدول و ...)

۵- محاسبه سطح موثر انتقال حرارت یا A_s.

روش ε-NTU

- هنگامی که اطلاعات کافی برای محاسبه **LMTD** وجود نداشته باشد، از روش NTU می توان برای تعیین نرخ انتقال حرارت و دمای خروجی سیالات گرم و سرد استفاده کرد.
- راندمان انتقال حرارت:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} = \frac{\text{Actual heat transfer rate}}{\text{Maximum possible heat transfer rate}}$$

مقدار واقعی نرخ انتقال حرارت را می توان به شکل زیر تعیین کرد:

$$\dot{Q} = C_c(T_{c,\text{out}} - T_{c,\text{in}}) = C_h(T_{h,\text{in}} - T_{h,\text{out}}) \qquad C_c = \dot{m}_c c_{pc} \text{ and } C_h = \dot{m}_c c_{ph}$$

برای تعیین بیشترین نرخ انتقال حرارت ممکن (به کمک بیشترین اختلاف دمای ممکن) می توان گفت:

$$\Delta T_{\max} = T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{in}} \qquad \dot{Q}_{\max} = C_{\min}(T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{in}})$$

روش ε-NTU

- تعیین $\overset{o}{Q}_{\max}$ نیاز به داشتن دماهای ورودی سیالات سرد و گرم و شدت جریان جرمی آن ها دارد (که معمولاً مشخص هستند). با این حال، هنگامی که بازده مبدل (ε) مشخص باشد، رابطه زیر را می توان استفاده کرده:

$$\dot{Q} = \varepsilon \dot{Q}_{\max} = \varepsilon C_{\min}(T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{in}})$$

- مقدار بازده مبدل های حرارتی معمولاً به کمک گروه بدون بعد UA_s/C_{min} تعیین می شود که تعداد واحدهای انتقال یا **number of transfer units (NTU)** نام دارد:

$$\text{NTU} = \frac{UA_s}{C_{\min}} = \frac{UA_s}{(\dot{m}c_p)_{\min}}$$

- بازده یک مبدل تابعی از **NTU** و نسبت ظرفیت ها (c) می باشد:

$$\varepsilon = \text{function}\,(UA_s/C_{\min}, C_{\min}/C_{\max}) = \text{function}\,(\text{NTU}, c)$$

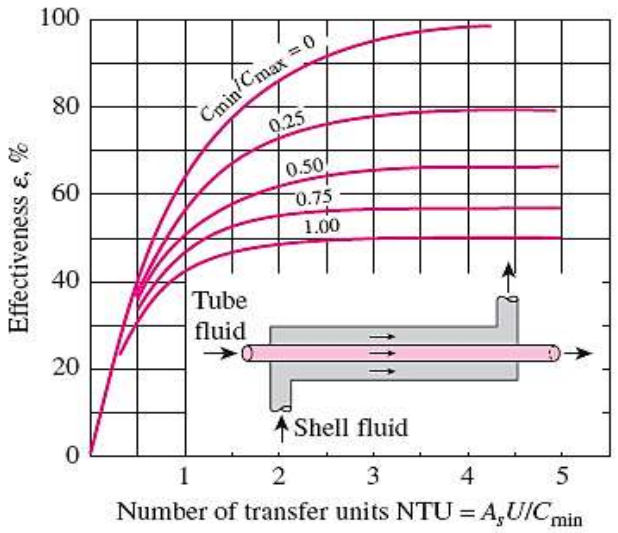
$$c = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$$

ε-NTU روش

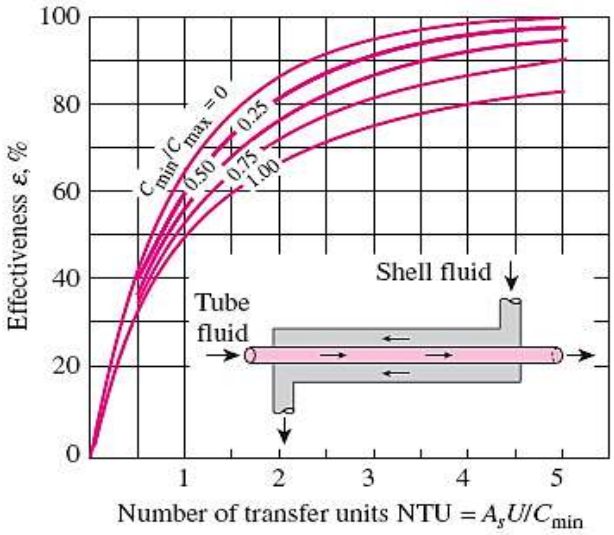
Effectiveness relations for heat exchangers: NTU = UA_s/C_{min} and $c = C_{min}/C_{max} = (\dot{m}c_p)_{min}/(\dot{m}c_p)_{max}$

Heat exchanger type	Effectiveness relation
1 *Double pipe:*	
Parallel-flow	$\varepsilon = \dfrac{1 - \exp[-\text{NTU}(1+c)]}{1+c}$
Counter-flow	$\varepsilon = \dfrac{1 - \exp[-\text{NTU}(1-c)]}{1 - c\exp[-\text{NTU}(1-c)]}$
2 *Shell-and-tube:* One-shell pass 2, 4,...tube passes	$\varepsilon = 2\left\{1 + c + \sqrt{1+c^2}\,\dfrac{1+\exp[-\text{NTU}\sqrt{1+c^2}]}{1-\exp[-\text{NTU}\sqrt{1+c^2}]}\right\}^{-1}$
3 *Cross-flow (single-pass)* Both fluids unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp\left\{\dfrac{\text{NTU}^{0.22}}{c}[\exp(-c\ \text{NTU}^{0.78}) - 1]\right\}$
C_{max} mixed, C_{min} unmixed	$\varepsilon = \dfrac{1}{c}(1 - \exp\{-c[1 - \exp(-\text{NTU})]\})$
C_{min} mixed, C_{max} unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp\left\{-\dfrac{1}{c}[1 - \exp(-c\ \text{NTU})]\right\}$
4 *All heat exchangers with* $c = 0$	$\varepsilon = 1 - \exp(-\text{NTU})$ (e.g., boiler, condenser)

Effectiveness of heat exchangers

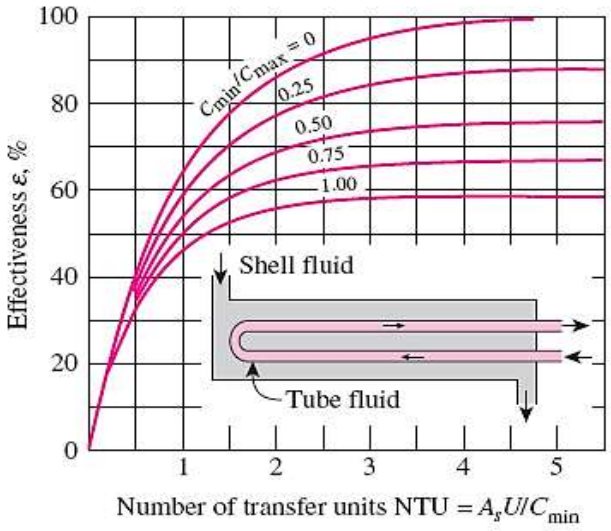


(a) Parallel-flow

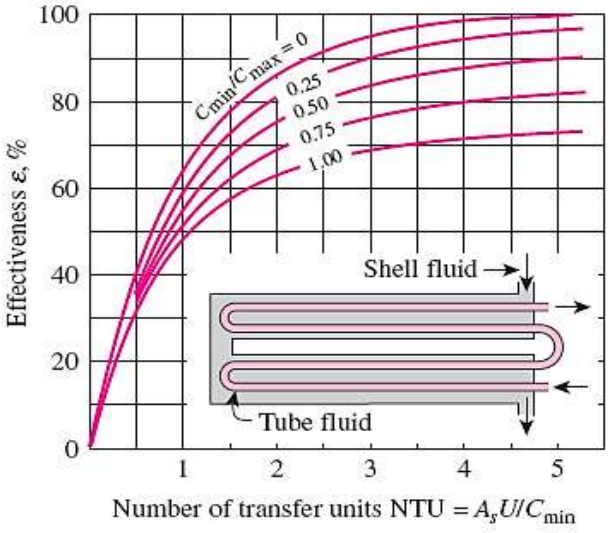


(b) Counter-flow

Effectiveness of heat exchangers



(*c*) One-shell pass and 2, 4, 6, … tube passes



(*d*) Two-shell passes and 4, 8, 12, … tube passes

Any Question?