

Kendetal og relationer ved design af varmevekslere

- almindelige definitioner og udtryk
- dimensionløse tal og korrelationer
- designmetoder

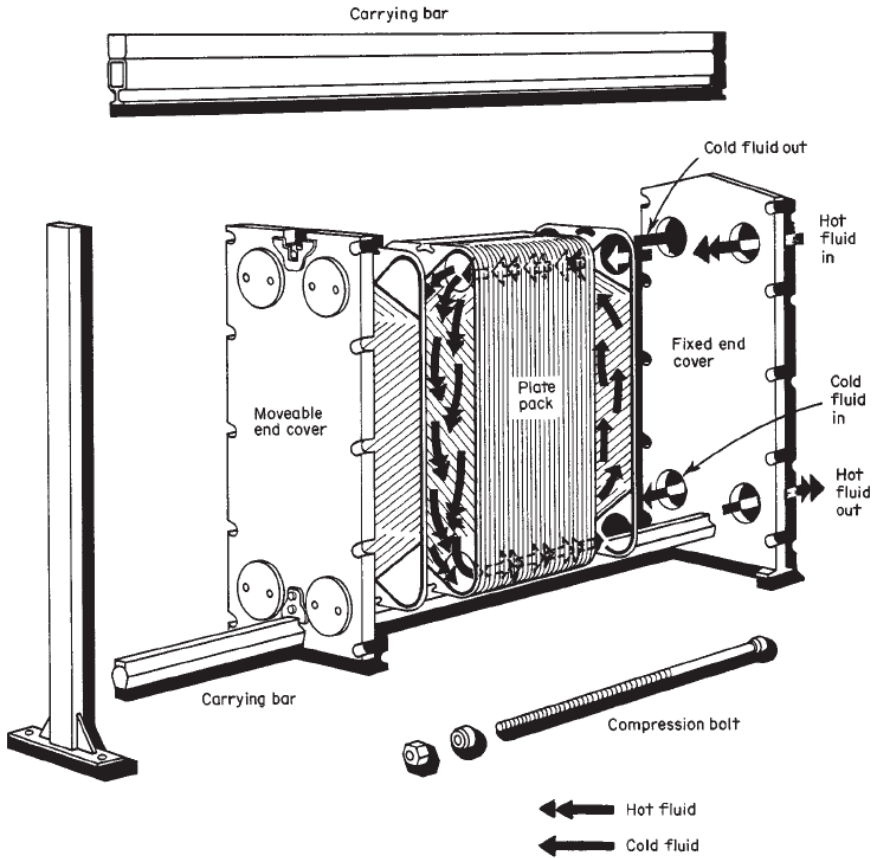
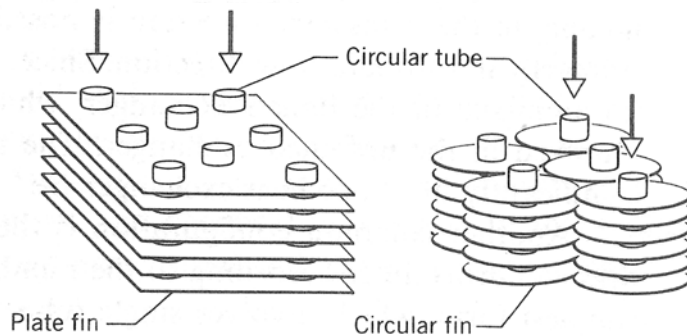
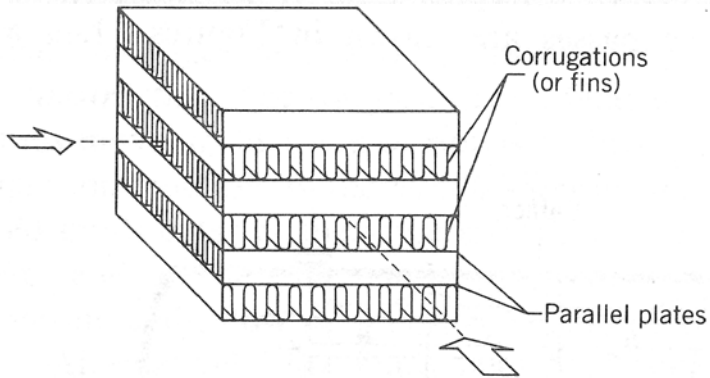
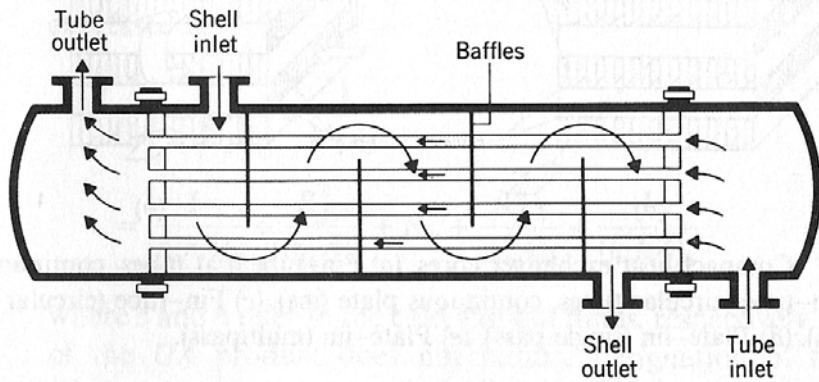
Knud Erik Meyer

Institut for Mekanik, Energi og Konstruktion (MEK)

Danmark Tekniske Universitet



Eksempler på varmevekslere



Virkningsgrad ε

Varmekapacitets strømme:

varm (h): $C_h = \dot{m}_h c_{p,h}$

kold (c): $C_c = \dot{m}_c c_{p,c}$

Overført varmeeffekt:

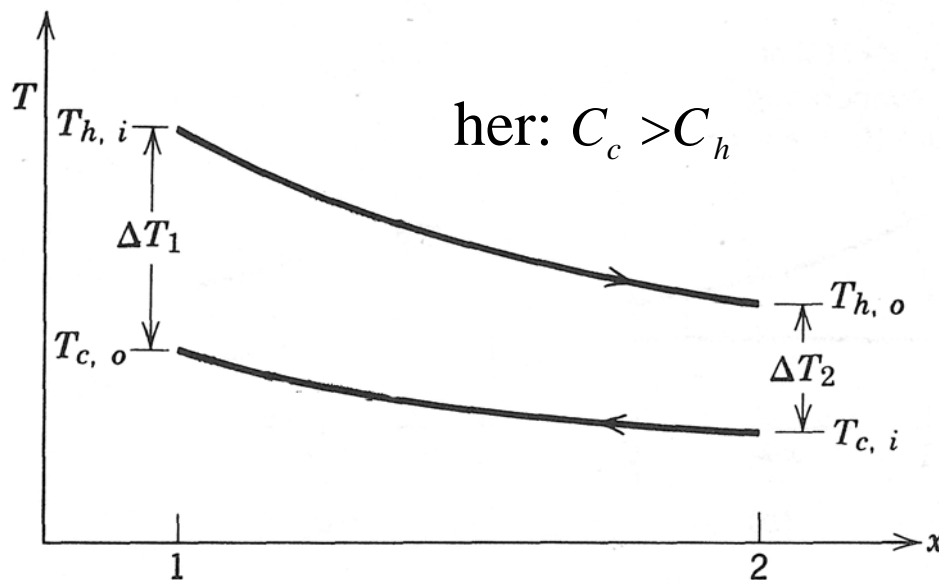
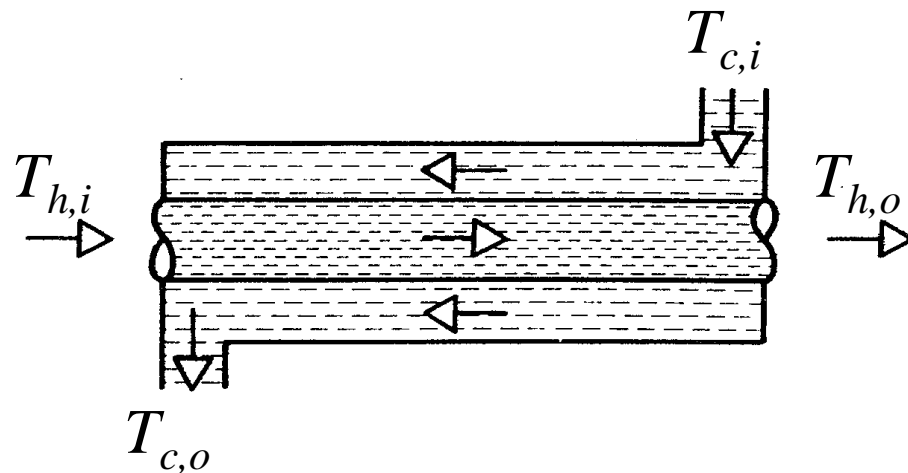
$$\dot{Q} = C_h (T_{h,i} - T_{h,o}) = C_c (T_{c,o} - T_{c,i})$$

Teoretisk max effekt:

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

Virkningsgrad:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} = \frac{C_h (T_{h,i} - T_{h,o})}{C_h (T_{h,i} - T_{c,i})}$$



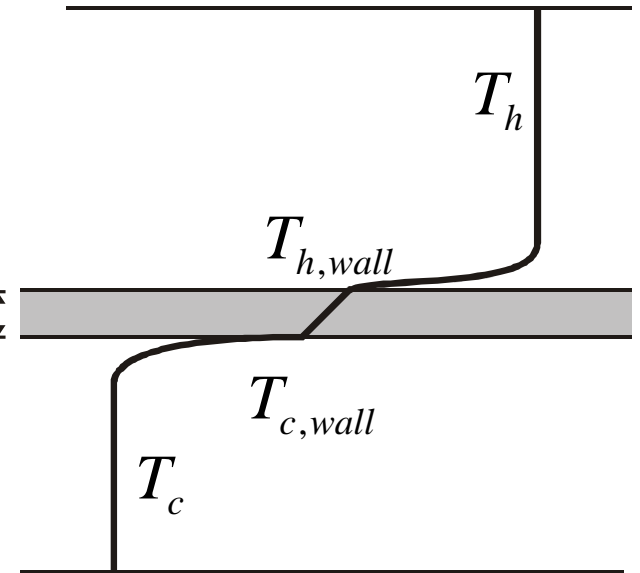
Lokal varmeoverføring

Lokal overført effekt (pr. m²):

$$\dot{q} = U(T_h - T_c)$$

hvor samlet overføringskoefficient U er:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{h_c}$$



og: h_h : varmeoverføringskoefficient, varm side ($\dot{q} = h_h(T_h - T_{h,wall})$)

λ : varmeledningsevne for væg

h_c : varmeoverføringskoefficient, kold side

Mere kompliceret udtryk ved forskellige areal på varme og kold side – f.eks. ved brug af finner

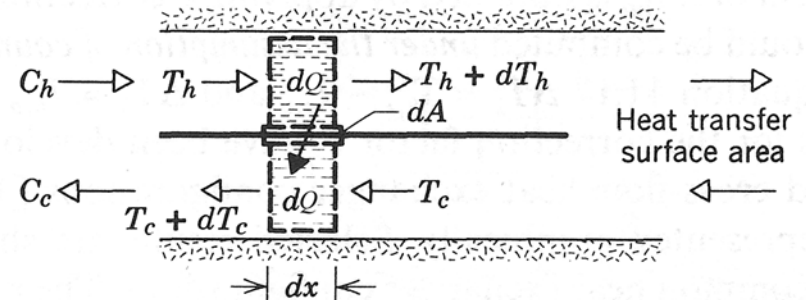
Kan også medtage varmemodstand pga. ”fouling”, dvs. belægninger

Termisk balance

Varm side: $d\dot{Q} = -C_h dT_h$

Væg: $d\dot{Q} = U(T_h - T_c)dA$

Kold side: $d\dot{Q} = C_c dT_c$

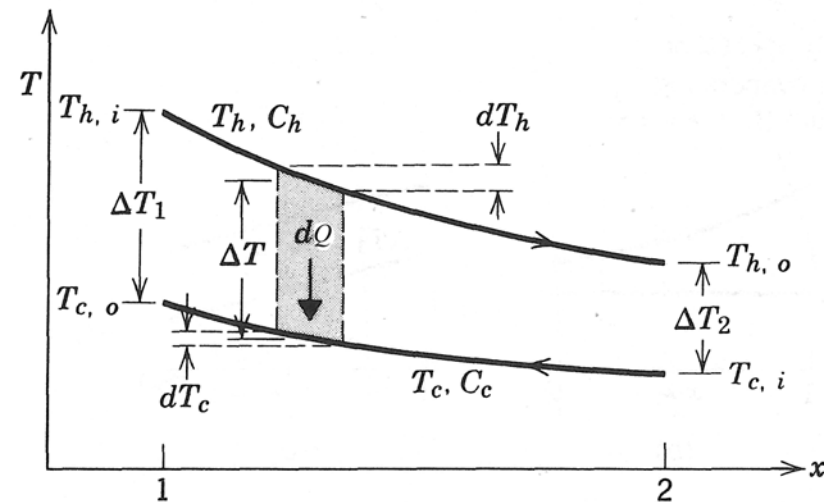


Løsning til differentligning:

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

hvor logaritmisk middeltemperaturforskell er

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



antagelse: konstante værdi af U

Dimensionsløst "areal" NTU

NTU = "number of transfer units":

$$\text{NTU} = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{\text{varmeoverføringsevne}}{\text{varmekapacitetstrøm}}$$

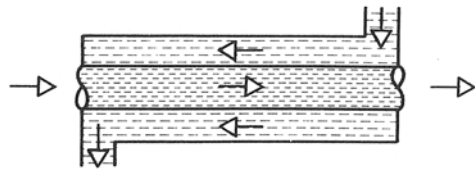
For hver type varmeveksler gælder:

$$\varepsilon = f\left(\text{NTU}, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right) \quad \text{og} \quad \text{NTU} = g\left(\varepsilon, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)$$

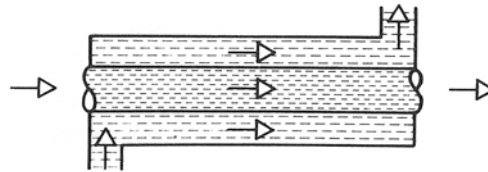
Varmevekslere med samme værdi af NTU giver samme "ydelse"

Forskellig konfigurationer

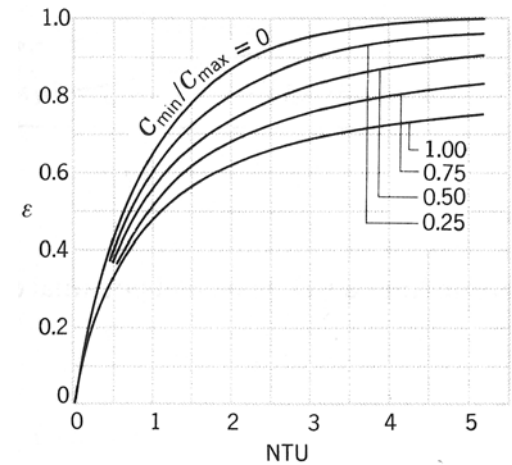
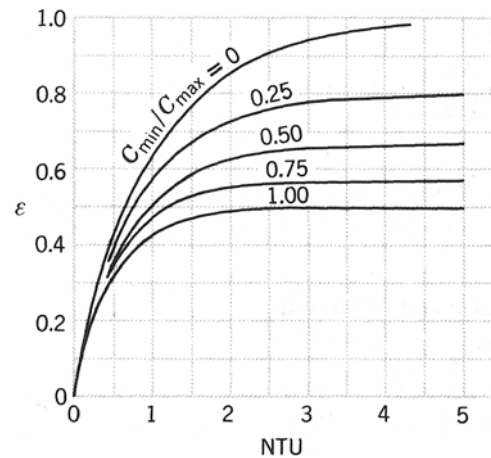
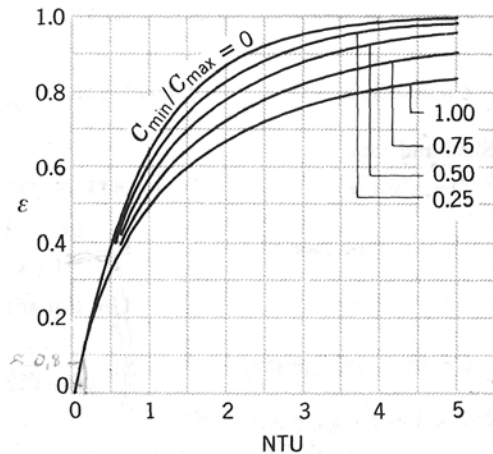
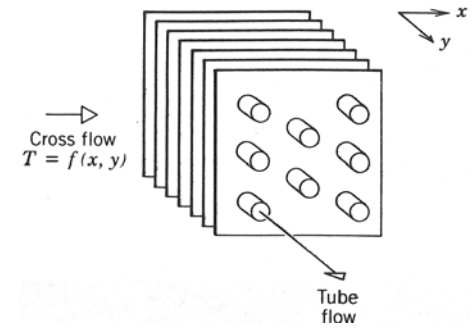
modstrøm



medstrøm



tværstrøm



Nogle gange kobles flere tværstrømsvekslere i serie (rør kobles i serie, brug af "baffles")

Mange parametre

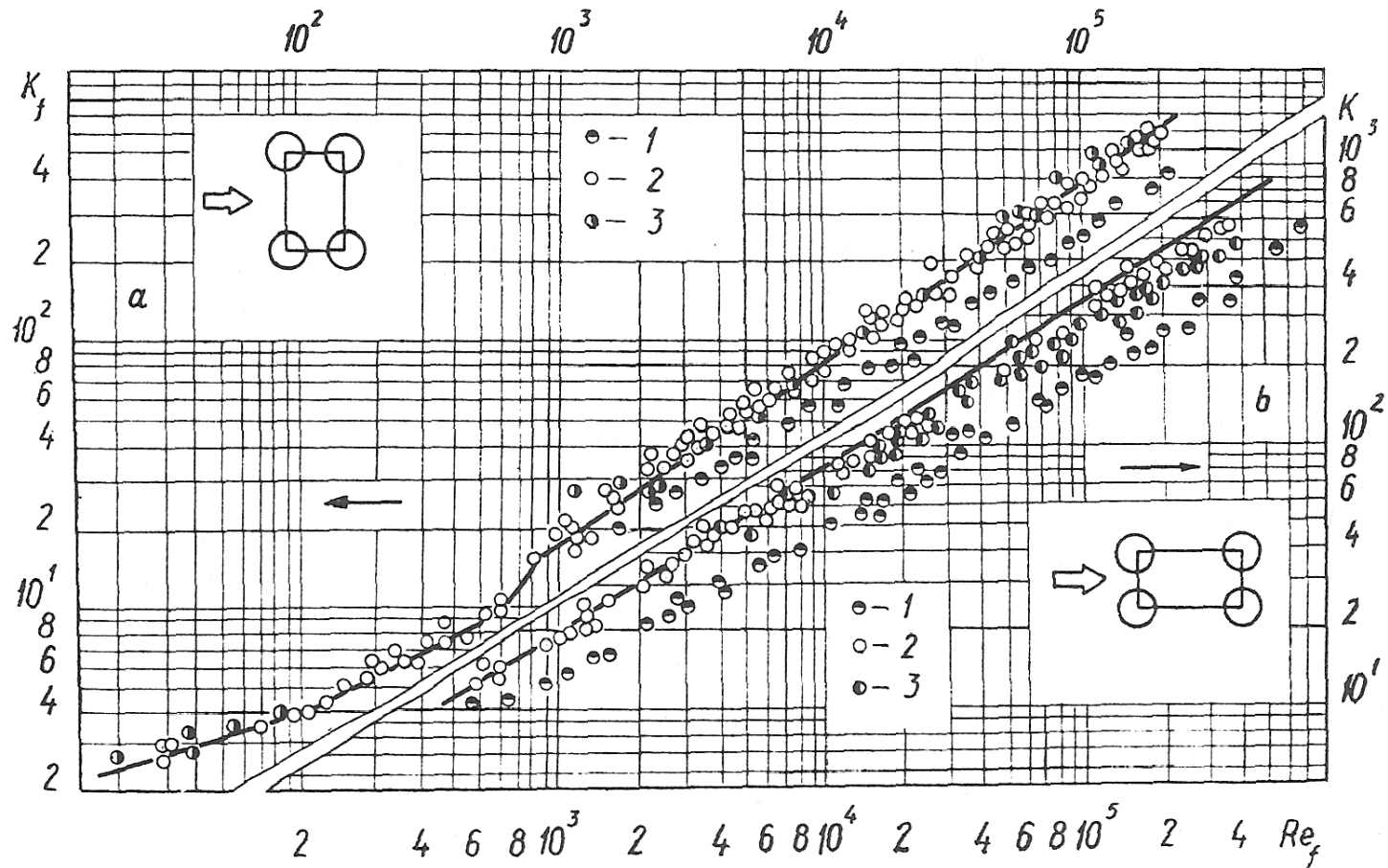
- ΔT eller ε : krav til afkøling eller ønske om maksimal varmegenvinding
- C : sekundær flowrate (f.eks. kølevand)
- Δp : trykfald (størrelse af pumpe, elforbrug)
- A : areal (materialeforbrug = pris)
- Volumen : krav til plads (lav $A \rightarrow$ højere U)

Afvejning mellem parametre må være økonomisk!
Installationspris \leftrightarrow Driftøkonomi?

Dimensionsløse tal

Reynolds tal:	$Re = \frac{UL}{\nu}$	hastighed (flow)
Prandtl tal:	$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k}$	viskosity/termisk diff.
Nusselt tal:	$Nu = \frac{hL}{k}$	varmeoverføring
Stanton tal:	$St = \frac{h}{\rho U c_p} = \frac{Nu}{Re Pr}$	varmeoverføring
Colburn faktor:	$j = St Pr^{2/3}$	varmeo.f. + Pr-effect
Friktionskoef.:	$c_f = \frac{\tau_w}{0.5 \rho U^2}$	kræfter (trykfald)
Friktionsfaktor:	$f = \frac{\Delta p}{(L/D)(0.5 \rho U^2)}$	trykfald
Grashof tal:	$Gr = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu^2}$	opdrift ($\sim Re^2$)

Eksempel på korrelation: rørbundet



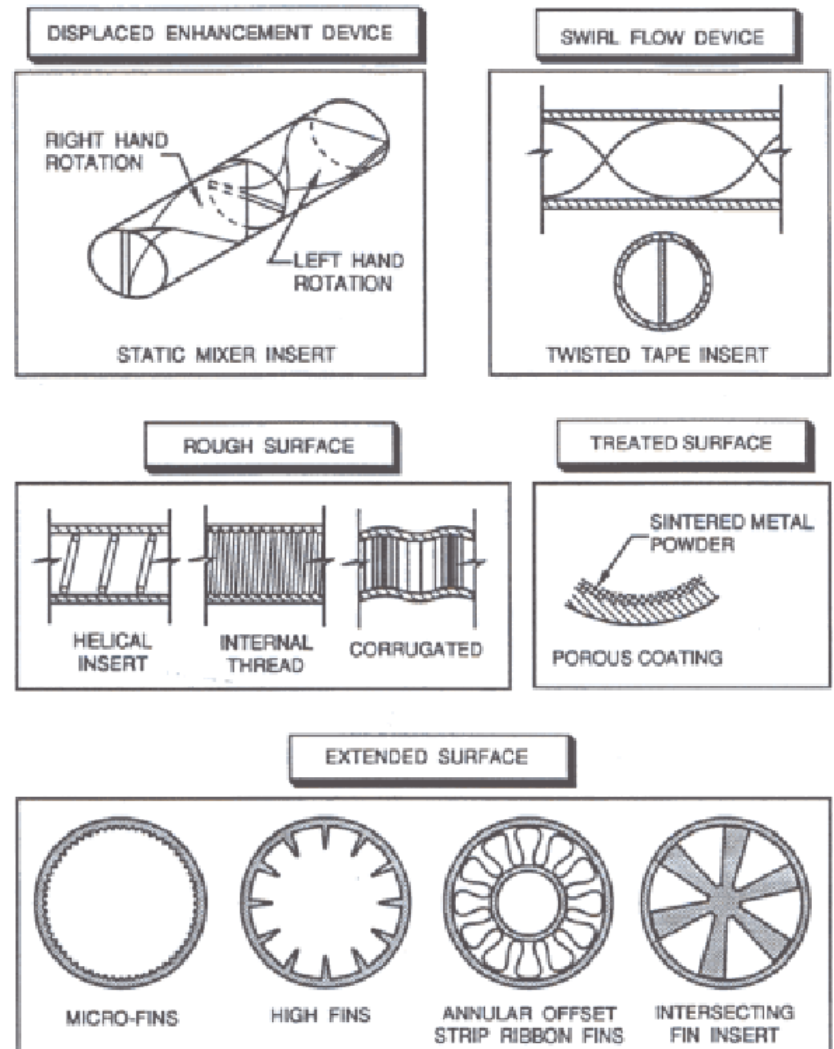
afhænger også af:

- rørarrangement
- rørafstand

$$Nu = 0.308 Re_f^{0.63} Pr_f^{0.36} (Pr_f / Pr_w)^{0.25}$$

Forbedret varmeovergang

- Større $U \rightarrow$ større NTU
- Udformning / indsats som
 - skaber opblanding
 - bryder grænse lag
- Må "betales" med højere trykfald
- Finner - især ved to forskellige medier



Design med CFD

- Geometrier har typisk mange parametre, som ikke håndteres godt nok i korrelationer
- Stort behov for CFD til geometri optimering
- Stor udfordring for CFD – flere led i kæden:
 - hastighedsfelt
 - turbulensniveau
 - model for varmetransport ved væg

Experimentelle teknikker

- Forsøg med delelement (rør, passage etc.) i stedet for fuld veksler
 - f.eks. kun delelement opvarmet
- Randbetingelse: flux \leftrightarrow temperatur
- Kan købe fluxmålere
- Vigtigt for forsøg: budget for varmetab