



FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE  
Laboratorij za toplinu i toplinske uređaje

**Kolegij:**  
**MJERENJA U TERMOTEHNICI**

**Predavanja**

# Sadržaj

## PRIJELAZ TOPLINE (U APARATIMA)

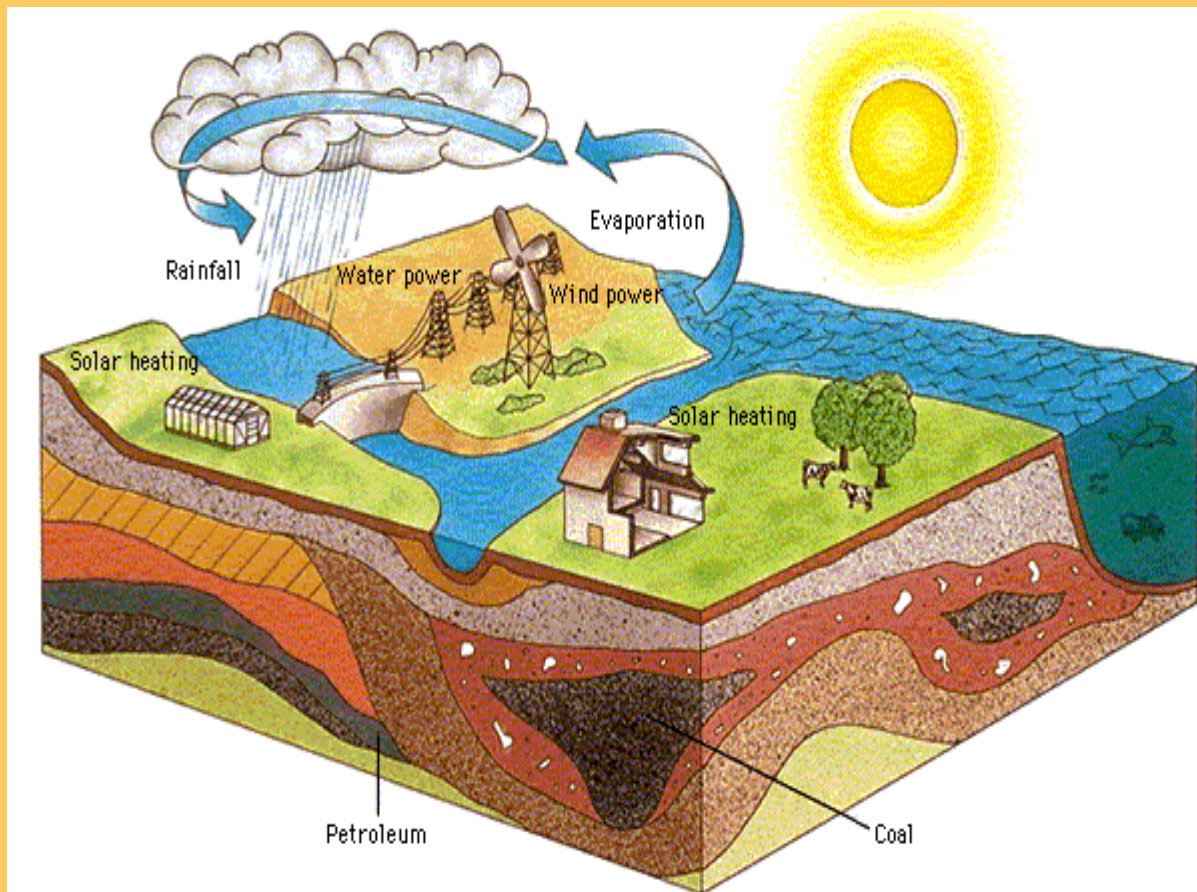
Zadatak inženjera: ispravno projektiranje izmjenjivača topline → potrebno poznavanje prijelaza topline.

- Ω Modeli prijelaza topline
- Ω Bezdimenzijske značajke
- Ω Stacionarno provođenje topline

# Sadržaj

## Modeli prijelaza topline

- ➔ provođenje topline
- ➔ konvekcija
- ➔ zračenje



# Sadržaj

---

## Bezdimenzijske značajke

- ☞ teorem sličnosti
- ☞ utjecajne veličine procesa
- ☞ izvedene karakteristične bezdimenzijske značajke i njihovo fizikalno tumačenje

# Sadržaj

## $\Omega$ Stacionarno provođenje topline

- ☞ razlika između stacionarnog provođenja topline i nestacionarnog provođenje topline
- ☞ koeficijent prijelaza topline
- ☞ koeficijent prolaza topline

# PROVOĐENJE

## *Modeli prijelaza topline*

- Ω kroz homogenu neprozirnu krutinu
- Ω srednja brzina molekula u tijelu funkcija je temperature
- Ω pri sudaru molekula brže/sporije dolazi do transfera kinetičke energije-izmjene topline
- Ω Traje do izjednačenja temperatura
- Ω metali: difuzija slobodnih elektrona iz područja više temp. → niže
- Ω Kod plinova izmjena topline isto tako izmjenom impulsa između molekula
- Ω kod kapljevina transport energije elastičnim oscilacijama

# PROVODENJE

*Modeli prijelaza topline*

Ω kod neprozirnih krutina -jedini mogući način prijelaza topline (dok za staklo, kvarc... provođenje/zračenje)

$q = -\lambda \frac{\Delta \vartheta}{\Delta n}$   
Ω kondukcija funkcija fizikalnih svojstava tijela (temp., tlak).

Ω  $\lambda$  (W/mK) koeficijent vodljivosti topline – određuje se eksperimentalno

$$q = -\lambda \frac{\Delta \vartheta}{\Delta n}$$

gustoća toplinskog toka, (W/m<sup>2</sup>)  
Fourierov stavak

# KONVEKCIJA

*Modeli prijelaza topline*

## BEZ PROMJENE AGREGATNOG STANJA

Izmjena topline između kapljevine ili plina i neke krute stijenke koja je s njima u dodiru.

Što je gibanje čestica nesređeniije to je izmjena topline bolja. Ovdje su uz fizikalna svojstva od značaja i hidrodinamički procesi.

Gibanje medija : **SLOBODNO**  
(razlika gustoće)

**PRISILNO** (ventilator, pumpa ...)



# KONVEKCIJA

*Modeli prijelaza topline*

Izmjenjena topline (Newton-ov zakon):

$$Q = \alpha \cdot (\vartheta_{\text{fluid}} - \vartheta_{\text{stijenka}}) \cdot A ; \text{ (W)}$$

$\alpha$  (W/m<sup>2</sup>K) koeficijent prijelaza topline

- Mjera intenziteta izmjene topline
- Funkcija veličine i oblika tijela, načina strujanja tekućine, brzine, temperature i fiz. svojstava

# KONVEKCIJA

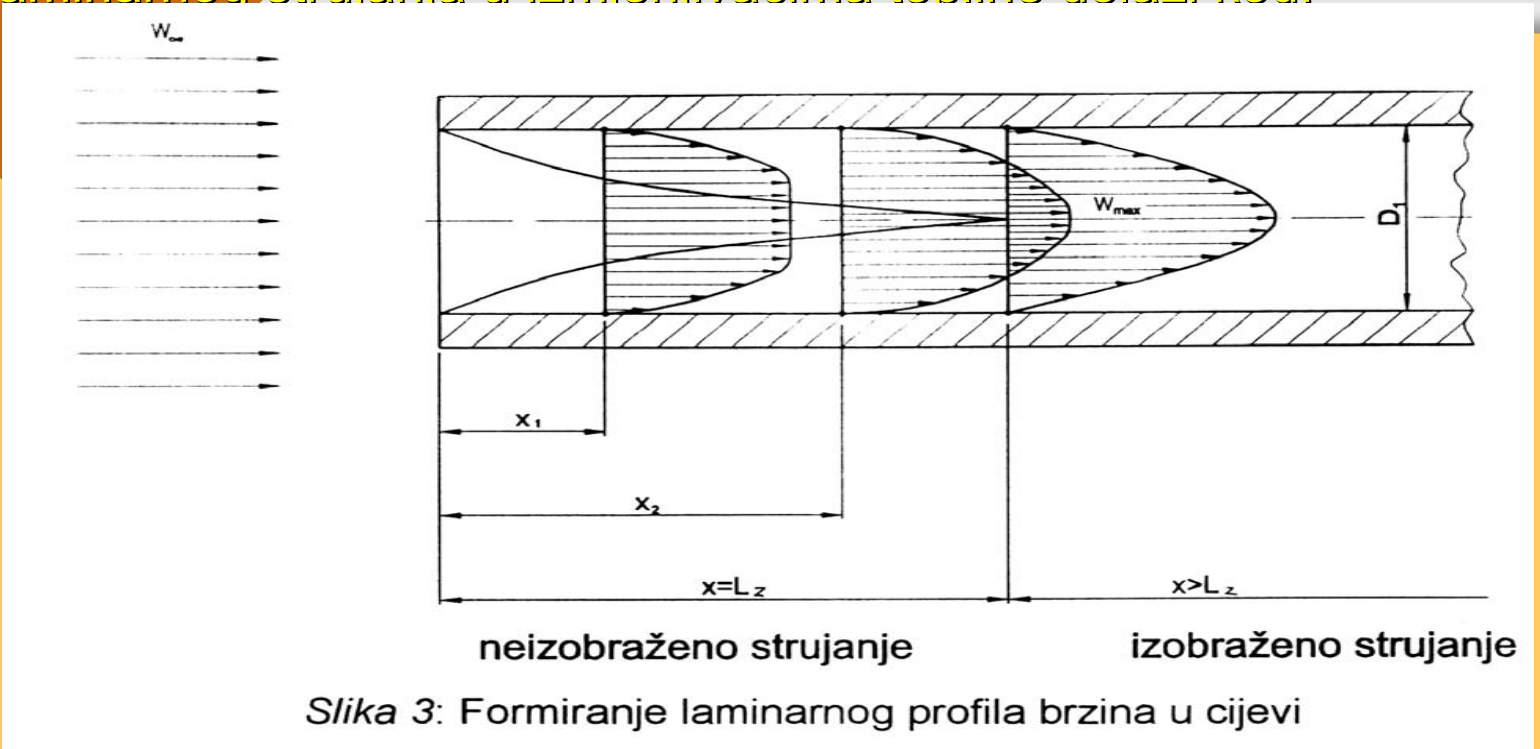
Modeli prijelaza topline

## VRSTE STRUJANJA:

- LAMINARNO
- TURBULENTNO
- Ω kod laminarnog se slojevi ne miješaju, pa se izmjena topline odvija poprečno na slojeve provođenjem
- Ω kod turbulentnog, samo u graničnom podsloju dominantno je provođenje topline, izvan njega (dalje) poprečno gibanje čestica- miješanje

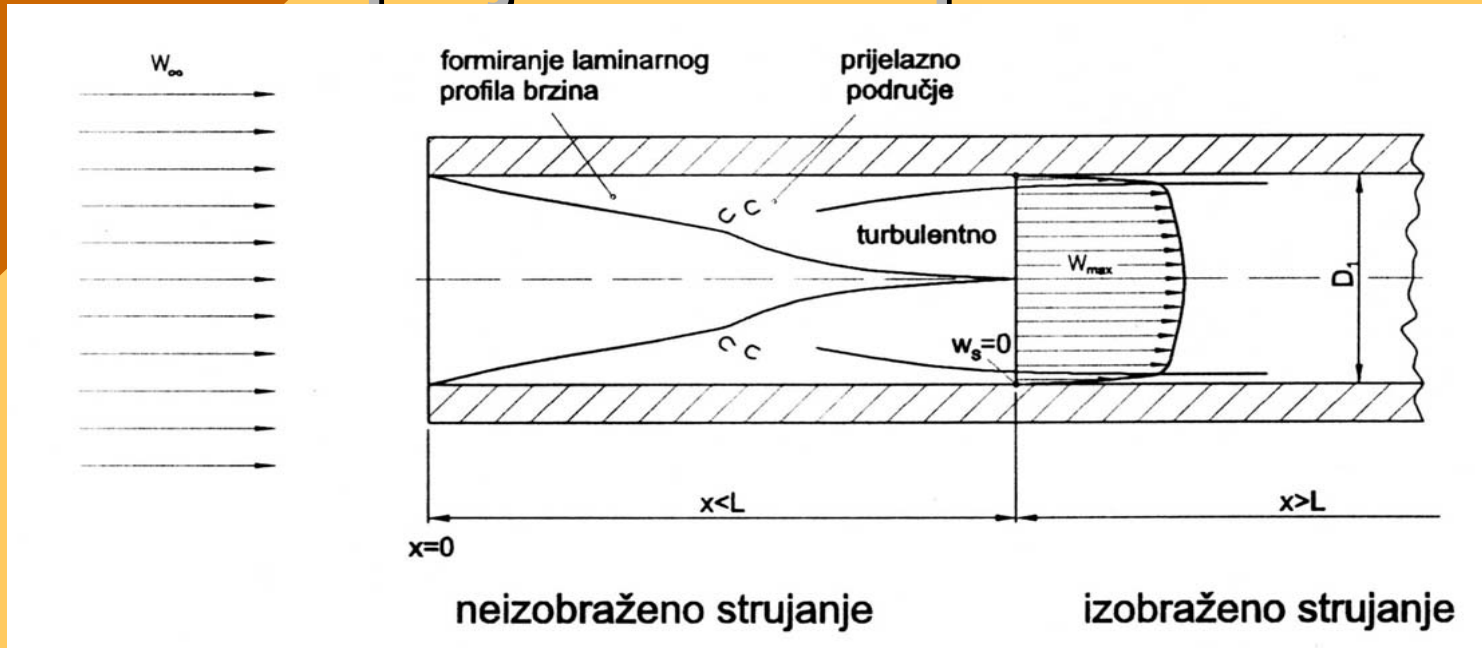
# Modeli prijelaza topline

Do laminarnog strujanja u izmjenivačima topline dolazi kod:



- primjene cijevi malih promjera,
- malih brzina strujanja,
- žilavih (viskoznih) kapljevina.

# Modeli prijelaza topline



- područje neizobraženog strujanja  $\Rightarrow$  profil brzine od mjesta do mjesta se mijenja
- područje izobraženog strujanja  $\Rightarrow$  profil brzina ostaje nepromijenjen
- kod izobraženog turbulentnog strujanja neposredno uz stijenku formira se vrlo tanki laminarni granični sloj

## Modeli prijelaza topline

- znatan broj praktičnih problema su problemi prijelaza topline u graničnom sloju
- **hidrodinamički granični sloj** – posljedica djelovanja stijenke i viskoznosti fluida
- **toplinski granični sloj** – sloj u kojem se odvija izmjena topline
- debljina toplinskog graničnog sloja  $\delta_t$  različita je od debljine hidrodinamičkog graničnog sloja  $\delta$ . Odnos  $\delta_t/\delta$  ovisi o fizikalnim svojstvima fluida (tj. njihovom Pr-broju).
- jako viskozne kapljevine  $\Rightarrow$  prisustvo stijenke uzrokuje nastanak usporenog sloja čija je debljina vrlo velika
- plinovi i slabo viskozne kapljevine  $\Rightarrow$  granični sloj je tanak u odnosu na preostali dio slobodne struje

## Modeli prijelaza topline

- zaletna staza – put koji medij mora preći da bi se postiglo izobraženo laminarno ili turbulentno strujanje
- Laminarno strujanje tekućine u cijevi
- neizobraženo strujanje – područje unutar kojeg se profil brzine mijenja ( $0 \leq x \leq L_z$ )
- područje izobraženog strujanja – područje kod koga se profil brzine od mjesta do mjesta više ne mijenja ( $x > L_z$ ), profil brzina se ustalio, a debljina graničnog sloja jednak je unutrašnjem polumjeru cijevi.
- kod izobraženog laminarnog strujanja tekućine u cijevi profil brzine odgovara, prema Poiseuilleovu zakonu, kvadratnoj paraboli ( $w=f(r^2)$ ).

# Modeli prijelaza topline

Ω prijelaz topline je **intenzivniji** u neizobraženom, nego li u izobraženom području-veća relativna brzina laminarnih slojeva

– u izobraženom području debljina je graničnog sloja,  $\delta_L = R_1$  konstantna, te uz iste ostale uvjete u tom području je i konstantan prijelaz topline.

Ω Razni eksperimenti su pokazali da dužina zaletne staze kod laminarnog strujanja ovisi o unutarnjem promjeru cijevi  $d_u$  i Reynoldsovoj značajci Re:

$$L_z = C \cdot Re \cdot d_u$$

Za praktične proračune **C=0.06**.

Ω Za proračun pada pritiska u cijevima i kanalima se općenito koristi izraz:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}$$

$\Delta p$  - pad pritiska, Pa

$\xi$  - koeficijent trenja

L - dužina cijevi, m

$d_u$  - unutarnji promjer cijevi ili hidraulički promjer kanala, m

$\rho$  - gustoća medija, kg/m<sup>3</sup>

w -brzina strujanja medija, m/s

# Modeli prijelaza topline

## ∞ Turbulentno strujanje tekućine u cijevi

- utjecaj Re značajke na dužinu zaletne staze zanemarivo mali, pa dužina zaletne staze  $L_z$  ovisi praktički samo o promjeru cijevi.

### ∞ Na osnovi eksperimenta vrijedi:

$$- L_z = (50 \text{ do } 100) \cdot d_u$$

Kirstena

$$L_z = (25 \text{ do } 40) \cdot d_u$$

Nikuradse

### ∞ Sa sigurnošću se može uzeti, da se izobraženi profil brzina pri

turbulentnom strujanju stvara nakon dužine  **$L_z = 50 \cdot d_u$**

- od  $x=0$ , počinje se formirati laminarni granični sloj tekućine
- nakon određene duljine cijevi dolazi do razgradnje tog graničnog sloja i pojave formiranja turbulentnog graničnog sloja



# Modeli prijelaza topline

- Ω Do nastajanja turbulentnog strujanja doći će to prije što je:
  - veća prosječna brzina strujanja fluida u cijevi,
  - veći unutrašnji promjer cijevi,
  - manja kinematička žilavost tekućine  $\nu$  koja struji kroz cijev
  
- Ω Kvalitativni prikaz ova dva slučaja ukazuje na  $\Rightarrow$ 
  - izravnu vezu između koeficijenta konvektivnog prijelaza topline  $\alpha$  i hidrodinamičkog i temperaturnog profila medija koji se formiraju unutar graničnih slojeva.

## Modeli prijelaza topline

Ω Praktičan način proračuna konvekcije bazira se na Newtonovu zakonu:

$$dQ = \alpha \cdot (\vartheta_s - \vartheta_\infty) \cdot dA \quad (0)$$

- razlika temperatura  $\vartheta_s - \vartheta_\infty$  označuje temp. pad u graničnom sloju fluida koji se formira neposredno uz stijenku
- $\vartheta_\infty$ , temperatura okolišnjeg fluida,  $\vartheta_s$ , temperatura stijenke,  $dQ$  diferencijalna vrijednost toplinskog toka u W, koji se konvekcijom izmjeni s elementa krute površine  $dA$ , koeficijent proporcionalnosti  $\alpha$  u  $W/(m^2K)$ .

Ω U generalnom slučaju  $\alpha$  je funkcija: veličine i oblika tijela, načina strujanja tekućine, brzine tekućine, temperature i fizikalnih svojstava tekućine.

# Modeli prijelaza topline

## PROMJENA AGREGATNOG STANJA

- ▶ kondenzacija ili isparavanje
- ▶ smrzavanje ili topljenje
- ▶ sublimacija

Ω Osnovni uvjet za kondenzaciju: temperatura stijenke niža od temperature kondenzacije

- filmska kondenzacija
- kapljičasta kondenzacija

Ω Osnovni uvjeti za isparavanje:

- postojanje temperaturne razlike
- intenzitet toplinskog toka

# Modeli prijelaza topline

## PROMJENA AGREGATNOG STANJA

Gustoća toplinskog toka mala

→ *slobodna konvekcija*

∞ Gustoća toplinskog toka srednja

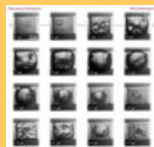
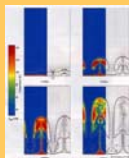
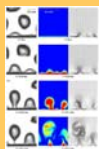
→ *mjehuričasto isparavanje*

∞ Gustoća toplinskog toka velika

→ *nestabilno filmsko isparavanje*

∞ Gustoća toplinskog toka vrlo velika

→ *stabilno filmsko isparavanje*



# KONVEKSIJA

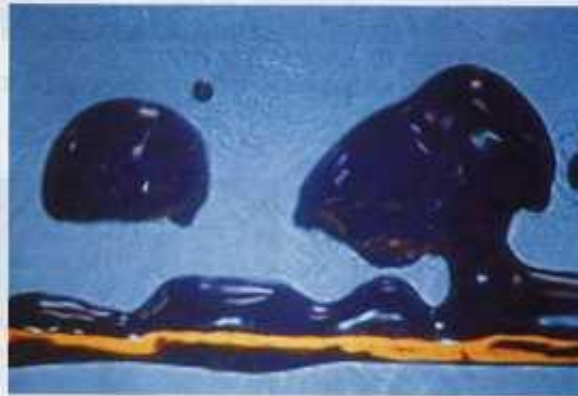
## Mode



(a)  $q=37 \text{ W/cm}^2$



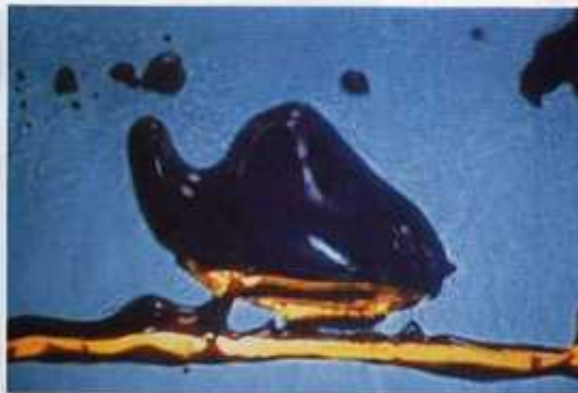
(b)  $q=61 \text{ W/cm}^2$



(c)  $q=90 \text{ W/cm}^2$



(d)  $q=99 \text{ W/cm}^2$



(e)  $q=107 \text{ W/cm}^2$



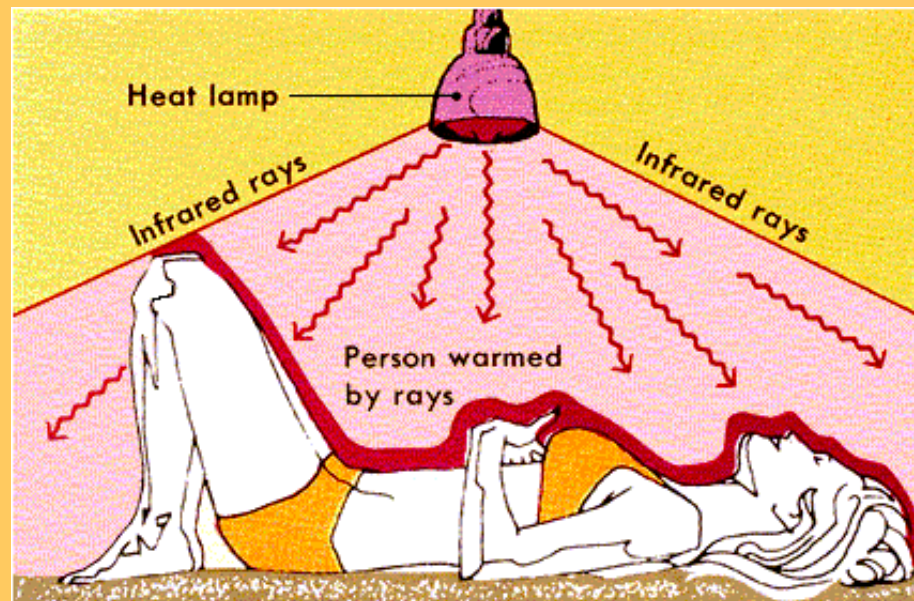
(f)  $q=107 \text{ W/cm}^2$

5 mm

# ZRAČENJE

## Modeli prijelaza topline

- Ω Nosioći energije elektromagnetski valovi (zračenje).  
Širi se pravocrtno i nije vezano na tvar.  
(sunce, vakuum, zemlja)



# Bezdimenzijske značajke

- Matematički opisati neki fizikalni proces znači postaviti jednadžbu ili sustav jednadžbi koji taj proces što istinitije opisuje, povezujući pojedine utjecajne parametre.
- Parametri su obično vremenski i prostorno promjenljivi
- zato beskonačno male promjene vremena, volumena... (limes, integral površinski)
- Rezultat: dobivamo diferencijalne jednadžbe (koje su diferencijalne jednadžbe procesa)

# Bezdimenzijske značajke

- **Prijelaz topline ovisan je o termodinamičkim i hidrodinamičkim veličinama,**
- zato se procese opisuje s više diferencijalnih jednažbi
- Analitička rješenja postoje samo za specifične slučajeve
- zato je i dalje neophodan eksperiment kojem slijedi numerička analiza.
- komplicirani procesi traže dugotrajna ispitivanja.



# Bezdimenzijske značajke


🧠 **Pitanje:** mogu li se rezultati dobiveni eksperimentom na modelu, primjeniti na sva moguća realno postiziva stanja (izvedba)?

🧠 Nusselt, prvi spoznao i primjenio fizikalne zakone sličnosti na procese prijelaza topline. **NIJE GEOMETRIJSKA SLIČNOST!**

🧠 Relevantne su ostale referentne veličine (brzina, temperatura, fizikalna svojstva itd.) koje su u nekakvom konstantnom omjeru. Pokazao da se diferencijalne jednačbe modela i izvedbe mogu opisati bezdimenzijskim diferencijalnim jednačbama

🧠 Kad su omjeri pojedinih veličina isti i procesi će biti **slični**.

# Bezdimenzijske značajke

 **Za određivanje bezdimenzijskih značajki treba poznavati diferencijalne jednačbe procesa. Budući da ni one nisu poznate za kompliciranije procese, za određivanje značajki koristi se bezdimenz. analiza-VEZA između bezdim. značajki.**

 ***Primjer za (bez)dimenzijsku analizu***

 ***Izmjena topline pri prisilnom strujanju medija kroz cijev.***

 ***Fizikalna svojstva medija su konstantna i neovisna o temperaturi***

# Bezdimenzijske značajke

## $\Omega$ Utjecajne veličine procesa

$\alpha$  W/m<sup>2</sup>K

$\lambda$  W/(mK)

$w$  m/s

$\eta$  kg/(ms) (d. viskozitet)

$c$  J/kgK (Ws/kgK)

$d$  m (promjer)

$\rho$  kg/m<sup>3</sup>

$\Omega$  **Rješenje problema mora sadržavati komponente od kojih se zahtijeva da sadrže produkte potencija navedenih veličina.**

# Bezdimenzijske značajke

$$\alpha^{n_1} \cdot w^{n_2} \cdot c^{n_3} \cdot \rho^{n_4} \cdot \lambda^{n_5} \cdot \eta^{n_6} \cdot d^{n_7}$$

$$\left(\frac{W}{m^2 K}\right)^{n_1} \cdot \left(\frac{m}{s}\right)^{n_2} \cdot \left(\frac{W \cdot s}{kg \cdot K}\right)^{n_3} \cdot \left(\frac{kg}{m^3}\right)^{n_4} \cdot \left(\frac{W}{m \cdot K}\right)^{n_5} \cdot \left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)^{n_6} \cdot (m)^{n_7}$$

$$W^{n_1+n_3+n_5} \cdot m^{n_2+n_7-2n_1-3n_4-n_5-n_6} \cdot s^{n_3-n_2-n_6} \cdot kg^{n_4+n_6-n_3} \cdot K^{-n_1-n_3-n_5}$$

# Bezdimenzijske značajke

Ω Svaka pojedina veličina postaje bezdimenzionalna kad je njezin eksponent jednak 0.

$$n_1 + n_3 + n_5 = 0; \quad n_2 + n_7 - 2n_1 - 3n_4 - n_5 - n_6 = 0$$

$$n_3 - n_2 - n_6 = 0; \quad n_4 + n_6 - n_3 = 0; \quad -n_1 - n_3 - n_5 = 0$$

Prvi i zadnji izraz su isti, ostaje 4 jednadžbe sa 7 nepoznanica. Slobodno odabiremo  $7 - 4 = 3$  eksponenta  $(n_1; n_2; n_3)$ , tada su ostali funkciju odabranih.

$$n_4 = n_2$$

$$n_6 = n_3 - n_2$$

$$n_5 = -n_1 - n_3$$

$$n_7 = n_1 + n_2$$

# Bezdimenzijske značajke

Ako ih unesemo u izraz 😊 slijedi

$$\alpha^{n_1} \cdot w^{n_2} \cdot c^{n_3} \cdot \rho^{n_2} \cdot \lambda^{-n_1-n_3} \cdot \eta^{n_3-n_2} \cdot d^{n_1+n_2}$$

Ω Kako su  $n_1, n_2, n_3$  i dalje nepoznati uvrstimo redom za jedan jedinicu, za ostale 0

Ω Za  $n_1=1; n_2=0; n_3=0 \rightarrow \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = Nu$

Ω Za  $n_1=0; n_2=1; n_3=0 \rightarrow \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\eta} = \frac{w \cdot d}{\nu} = Re$

Ω Za  $n_1=0; n_2=0; n_3=1 \rightarrow \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = Pr$

# Bezdimenzijske značajke

- Time je problem prisilnog strujanja u cijevi definiran na tri bezdimenzijske značajke i znatno pojednostavljen tijekom proračuna i troškovi eksperimenta.
- Ako je na osnovi eksperimenta nađena ovisnost  $F(\text{Nu}, \text{Re}, \text{Pr})=0$  onda ista vrijedi za sve procese koji su međusobno slični.
- Željenu veličinu dobiva se tako da se funkciju  $F$  riješi po značajki koja tu veličinu sadrži.
- Tražimo li  $\alpha$  pišemo  $\text{Nu} = F(\text{Re}, \text{Pr})$  odakle slijedi

$$\alpha = \frac{\lambda}{d} F(\text{Re}, \text{Pr})$$

# Bezdimenzijske značajke

Ω Osim navedenih značajki postoji čitav niz drugih koje opisuju pojedine vrste prijelaza topline i tvari.

## Ω ZNAČAJKE

Ω Fourierova značajka odnosi

$$Fo = \frac{\alpha \cdot \tau}{L^2}$$

Ω se na nestacionarno provođenje topline

Nusseltova značajka predstavlja omjer gustoće

toplinskog toka za kojeg je

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{\frac{\lambda}{L} \cdot \Delta t} = \frac{\dot{q}_\alpha}{\dot{q}_\lambda}$$

mjerodavan  $\alpha$  i gustoće toplinskog

toka koji bi s istim  $\Delta t$  provođenjem

prošao kroz sloj debljine  $L$  uz odgovarajući  $\lambda$ .



# Bezdimenzijske značajke

## Pecletova značajka

omjer gustoće toplinskog toka pri grijanju ili hlađenju za  $\Delta t$  prema gustoći toplinskog toka definiranoj u Nu.

$$Pe = \frac{w \cdot L}{a}$$

$$Pe = \frac{w \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta t}{\frac{\lambda}{L} \cdot \Delta t} = \frac{\dot{q}_{\Delta t}}{\dot{q}_{\lambda}}$$

## Toplinska difuzivnost/koefficient

temperaturne vodljivosti predstavlja.....

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

esencijalnu veličinu kod nestacionarnih procesa i definira brzinu promjene temperature.

$\lambda$  predstavlja sposobnost provođenja

topline. **a** predstavlja mjeru toplinske inercije !!!

# Bezdimenzijske značajke

## Reynoldsova značajka

∞ omjer sila ubrzanja i sila trenja

$$\text{Re} = \frac{w \cdot L \cdot \rho}{\eta} = \text{Reynolds} = \frac{w \cdot \rho \cdot L}{\eta} \cdot \frac{w}{w} = \frac{w^2 \cdot \rho}{\eta \cdot \frac{w}{L}}$$

Prandtlova značajka ovisi samo o fizikalnim svojstvima -  
odnos polja brzina prema temperaturnom polju.

$$\text{Pr} = \frac{\eta \cdot c}{\lambda}$$

# Bezdimenzijske značajke

## Grashofova značajka

Ω odnos gravitacijskog uzgona i sila tromosti

$$Gr = \frac{g \cdot \rho \cdot \beta \cdot \Delta t}{\rho \cdot \frac{w^2}{L}} \cdot Re^2 \quad Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot \Delta t}{v^2}$$

● Kod proračuna bezdimenzijskih značajki pažnju treba obratiti na:

● karakterističnu brzinu  $w$  - brzina u točno definiranom presjeku

# Bezdimenzijske značajke

$\Omega$  karakterističnu duljina  $L$  - kod ploče ili stijenke najčešće duljina u smjeru strujanja. Kod cijevi vanjski ili unutarnji promjer ovisno koju stranu promatramo.

$\Omega$  Kod nekružnog presjeka hidraulički radijus.

$$d_u = \frac{4 \cdot A}{D}$$

Umjesto oplahivanog opsega može se uzeti i termodinamički. Isto tako često se uzima i oplahivana dužina

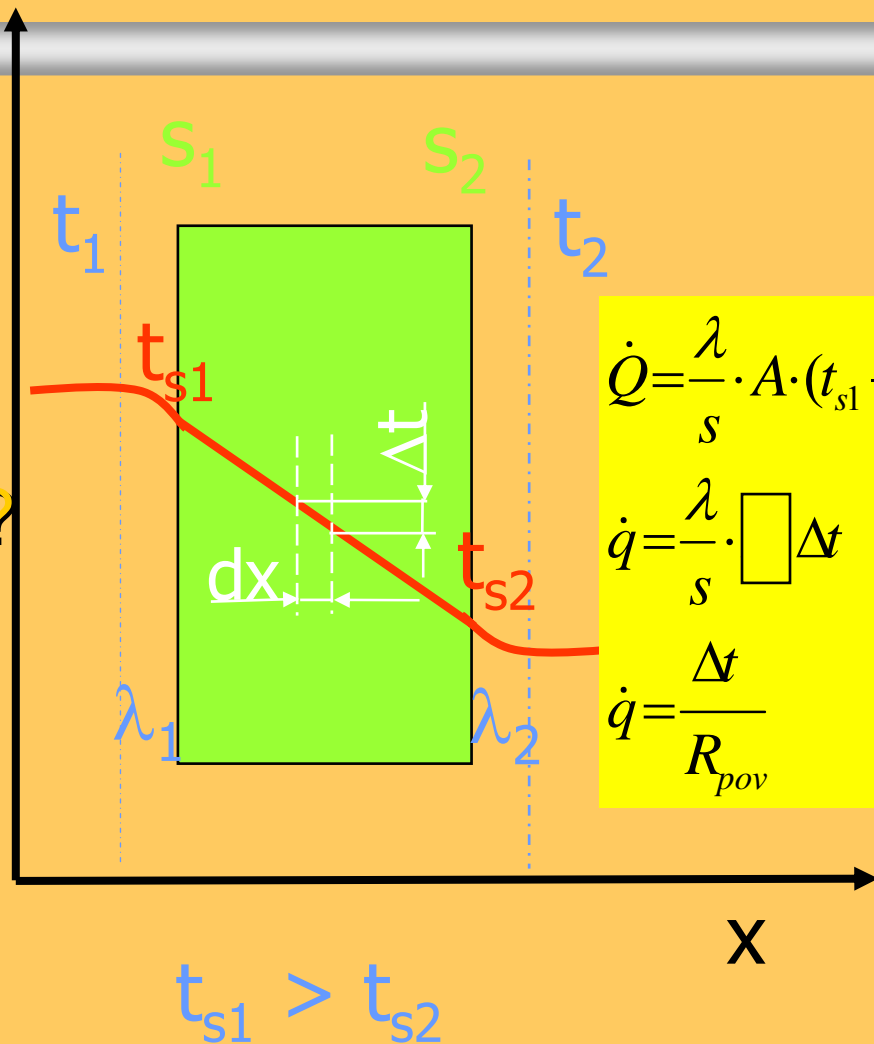
$$L = \frac{d_v \cdot \pi}{2}$$

Referentna temperatura za izbor fizikalnih svojstava (temp. stijenke, medija ili srednja između njih)

# Stacionarno provođenje topline

Ω **PROBLEM:** koliko se topline može prenijeti s medija više na medij niže temperature kad su odvojeni stijenkom?

Ω kako se mora dimensionirati površina da bi se zadana toplina mogla prenijeti ?



$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (t_{s1} - t_{s2}) \quad [W]$$

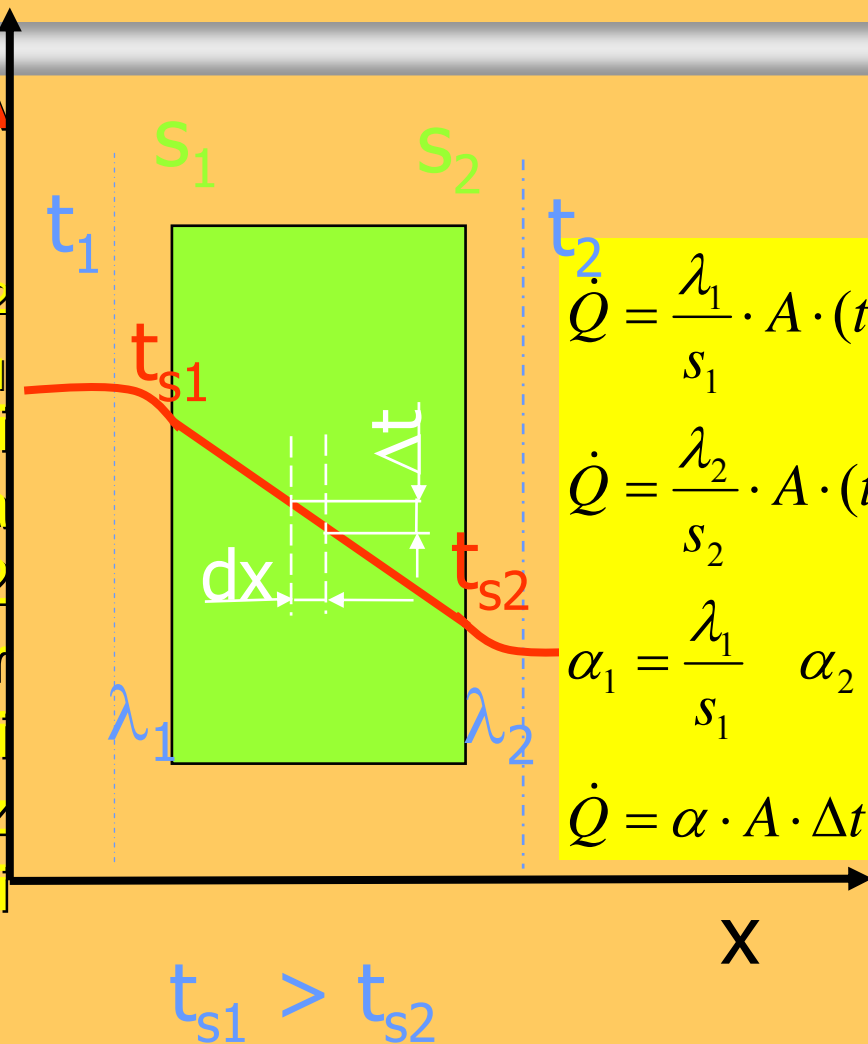
$$\dot{q} = \frac{\lambda}{s} \cdot \Delta t \quad [W/m^2]$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta t}{R_{pov}}$$

# Stacionarno provođenje topline

## KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE $\alpha$ [W/m<sup>2</sup>K]

Uglavnom su  $t_{s1}$  i  $t_{s2}$  nepoznate, a poznate su  $t_1$  i  $t_2$ . Ako su one vremenski konstantne toplina koja prelazi s medija 1 na 2 mora savladati otpor provođenja kroz stijenku i otpore provođenja kroz granični sloj debljine  $s_1$  i  $s_2$ , tako da vrijede izrazi:



$$\dot{Q} = \frac{\lambda_1}{s_1} \cdot A \cdot (t_1 - t_{s1})$$

$$\dot{Q} = \frac{\lambda_2}{s_2} \cdot A \cdot (t_{s1} - t_2)$$

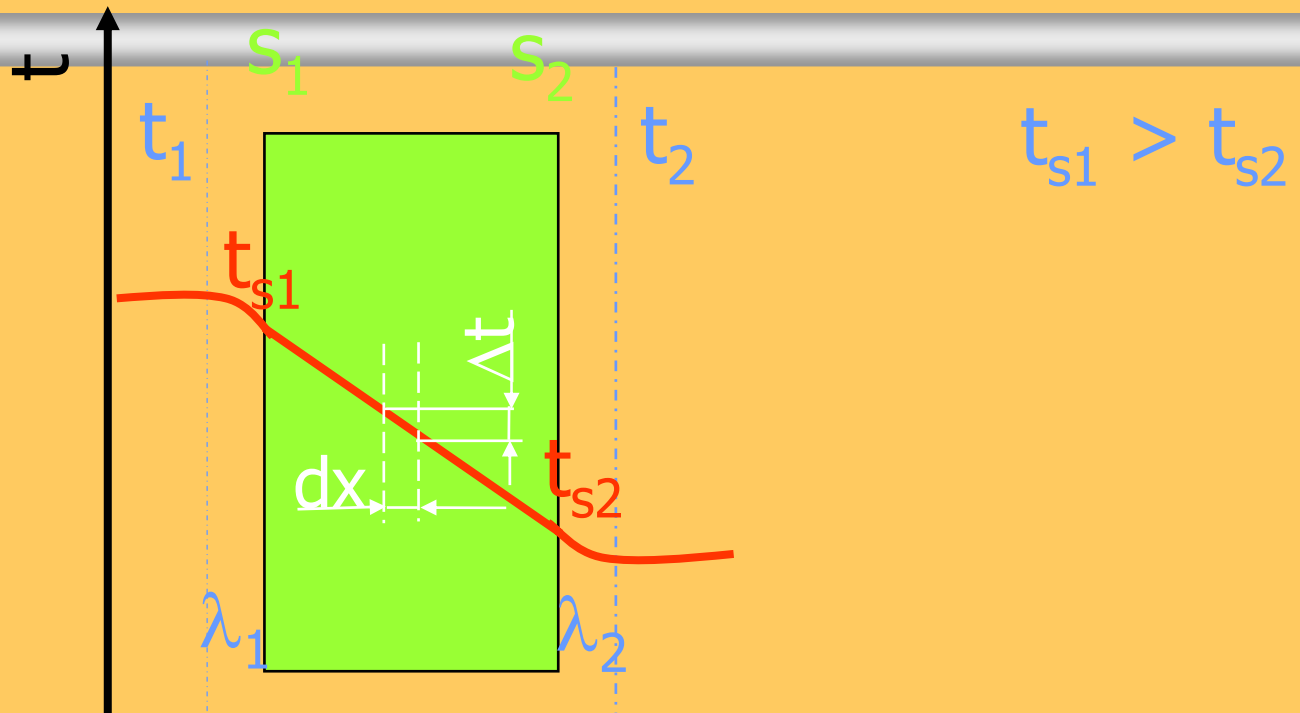
$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1}{s_1} \quad \alpha_2 = \frac{\lambda_2}{s_2}$$

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta t$$

$$t_{s1} > t_{s2}$$

# KOEFICIJENT PRIJELAZA TOPLINE $k$ [W/m<sup>2</sup>K]

## Stacionarno provođenje topline



$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta t_{ef} = \alpha_1 \cdot A_1 \cdot (t_1 - t_{s1}) = \frac{\lambda}{s} \cdot A_s \cdot (t_{s1} - t_{s2}) = \alpha_2 \cdot A_2 \cdot (t_{s2} - t_2)$$

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot (t_1 - t_2)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

• Ukoliko je stijenka ravna  $A=A_1=A_s=A_2$

# Stacionarno provođenje topline

ukoliko je stijenka zaobljena slijedi;  
 $\Omega$  Provođenje kroz stijenku

$$Q = 2\pi\lambda L \frac{t_{s1} - t_{s2}}{\ln \frac{d_v}{d_u}}$$

Izraz za koeficijent  
prijelaza topline

$$\frac{1}{k \cdot A_s} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot A_1} + \frac{\ln \frac{d_v}{d_u}}{2\pi\lambda L} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot A_2}$$

$$A_s = \frac{A_1 - A_2}{\ln \frac{A_1}{A_2}}$$

za cijev

za kuglu

$$A_s = \sqrt{A_1 \cdot A_2}$$



# Stacionarno provođenje topline

Ω U literaturi se obično govori o vanjskoj i unutrašnjoj površini, uzevši u obzir onečišćenja na cijevi dobivamo izraz:

$$\frac{1}{k_v} = \frac{1}{\alpha_v} + R_v + \frac{A_v}{A_s} \cdot \frac{s}{\lambda} + \frac{A_v}{A_u} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_u} + R_u \right)$$

Kod aparata se  $k$  obično svodi na vanjsku površinu. Treba reći da ovo sve vrijedi za stacionarno stanje.

# Stacionarno provođenje topline

Ω Prednost ovakvog načina proračuna je vrlo lako uočavanje veličine koja je od dominantnog utjecaja na površinu aparata, pa možemo utjecati na njezinu promjenu

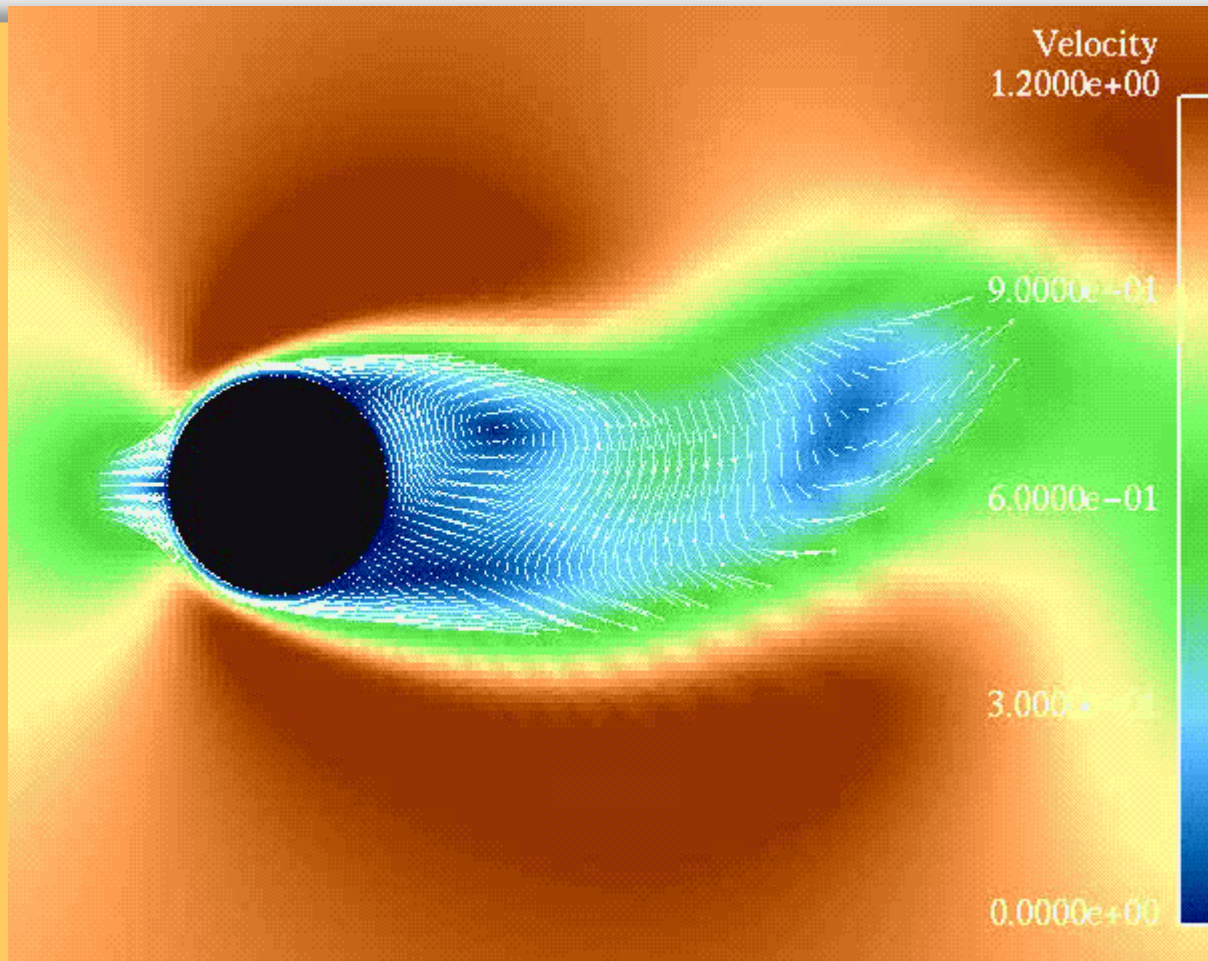
💡 (povećanjem površine - orebrenjem)

💡 upotrebom specijalnih cijevi,

💡 samom konstrukcijom pojedinih dijelova aparata

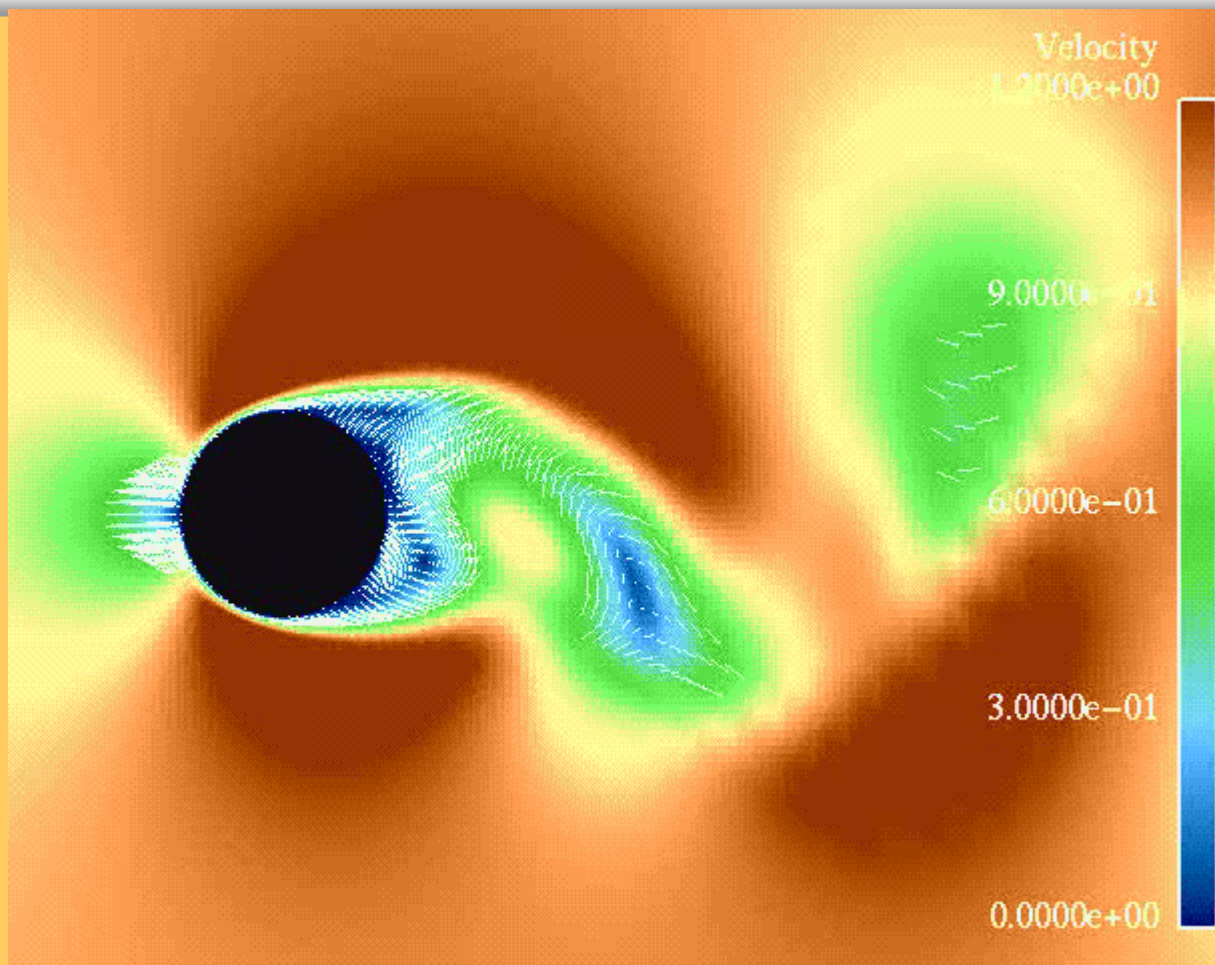
💡 promjenom parametara (brzina).

# Laboratorij za toplinu i toplinske uređaje

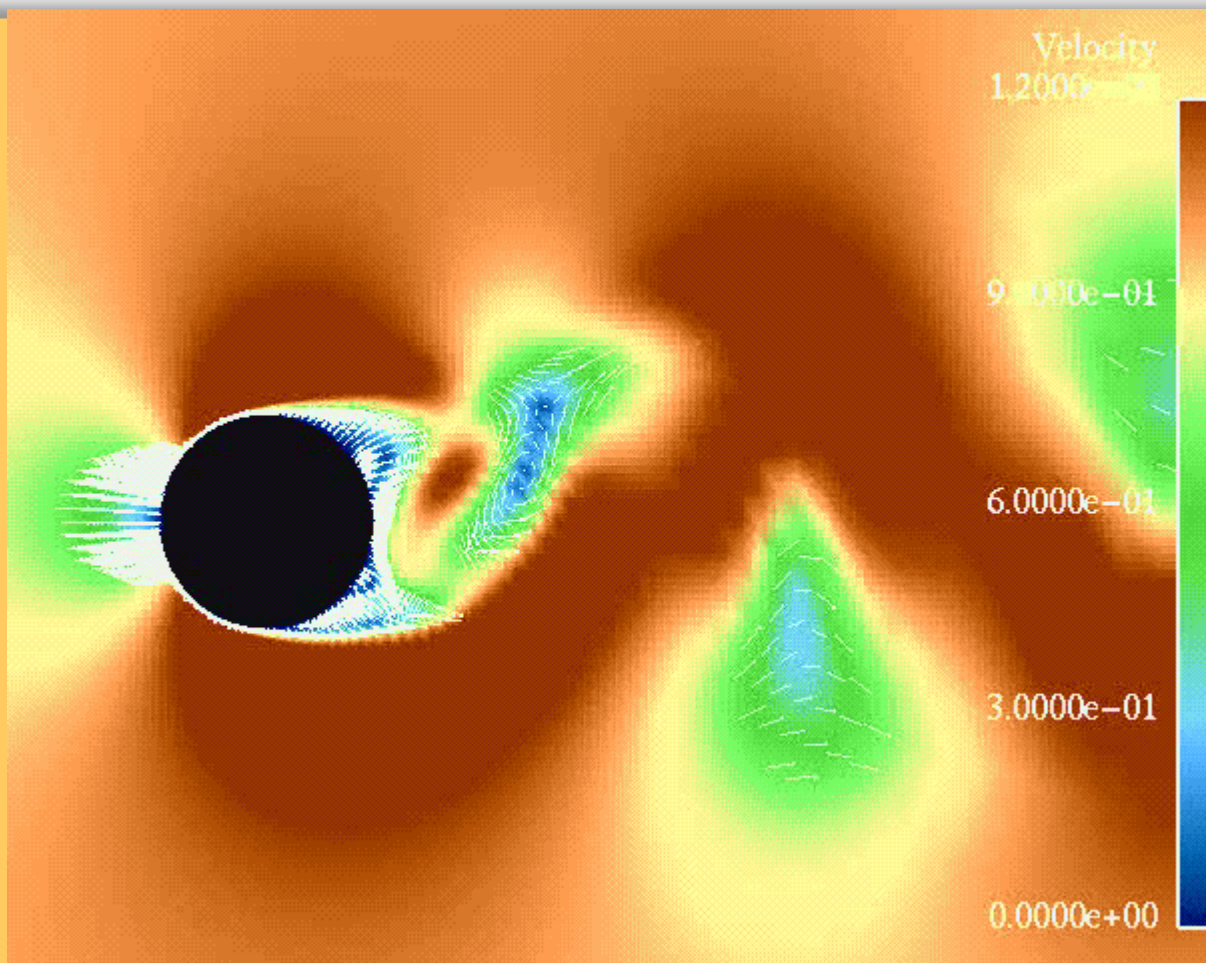


Re=100

# Laboratorij za toplinu i toplinske uređaje

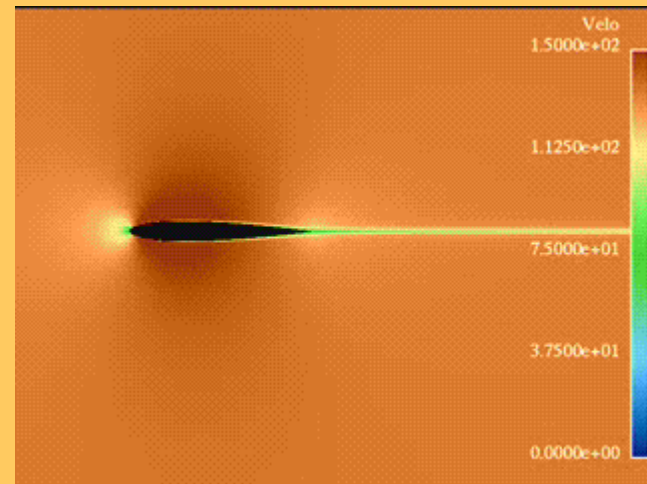
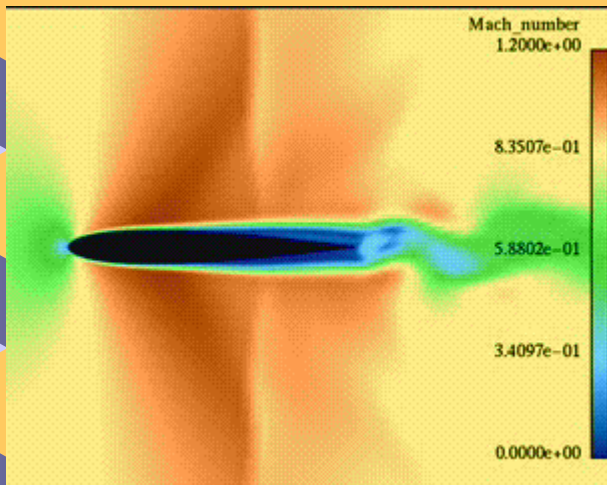


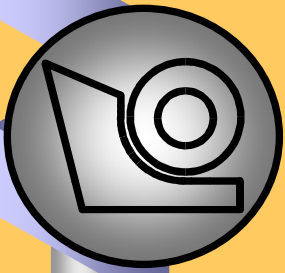
# Laboratorij za toplinu i toplinske uređaje



Re=1000

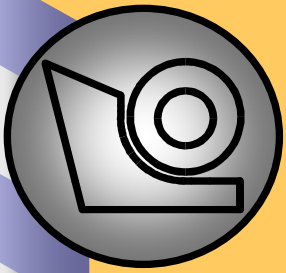
# Laboratorij za toplinu i toplinske uređaje





***Elementi gradnje aparata***  
**Tipovi izmjenjivača**

# ***Izmjenjivači topline i njihove karakteristike***



***Elementi gradnje aparata***  
**Tipovi izmjenjivača**

***Osnovni tipovi izmjenjivača topline***

***Shell&tube- kaplj./kaplj.; (plin/kaplj.)***

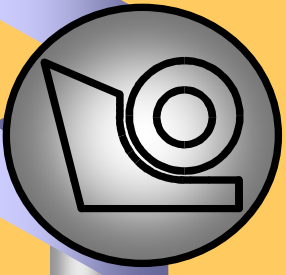
***Orebreni- plin/kaplj.***

***Kompaktni- plin/kaplj.; kaplj./kaplj.***

***Koaksijalni- kaplj./kaplj.***

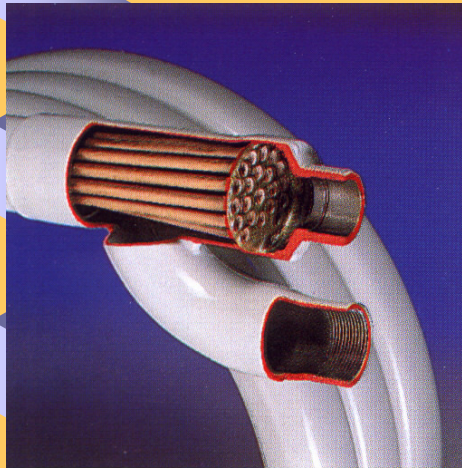
***Spiralni- kaplj./kaplj., plin/kaplj., plin/plin***





***Elementi gradnje aparata***  
**Tipovi izmjenjivača**

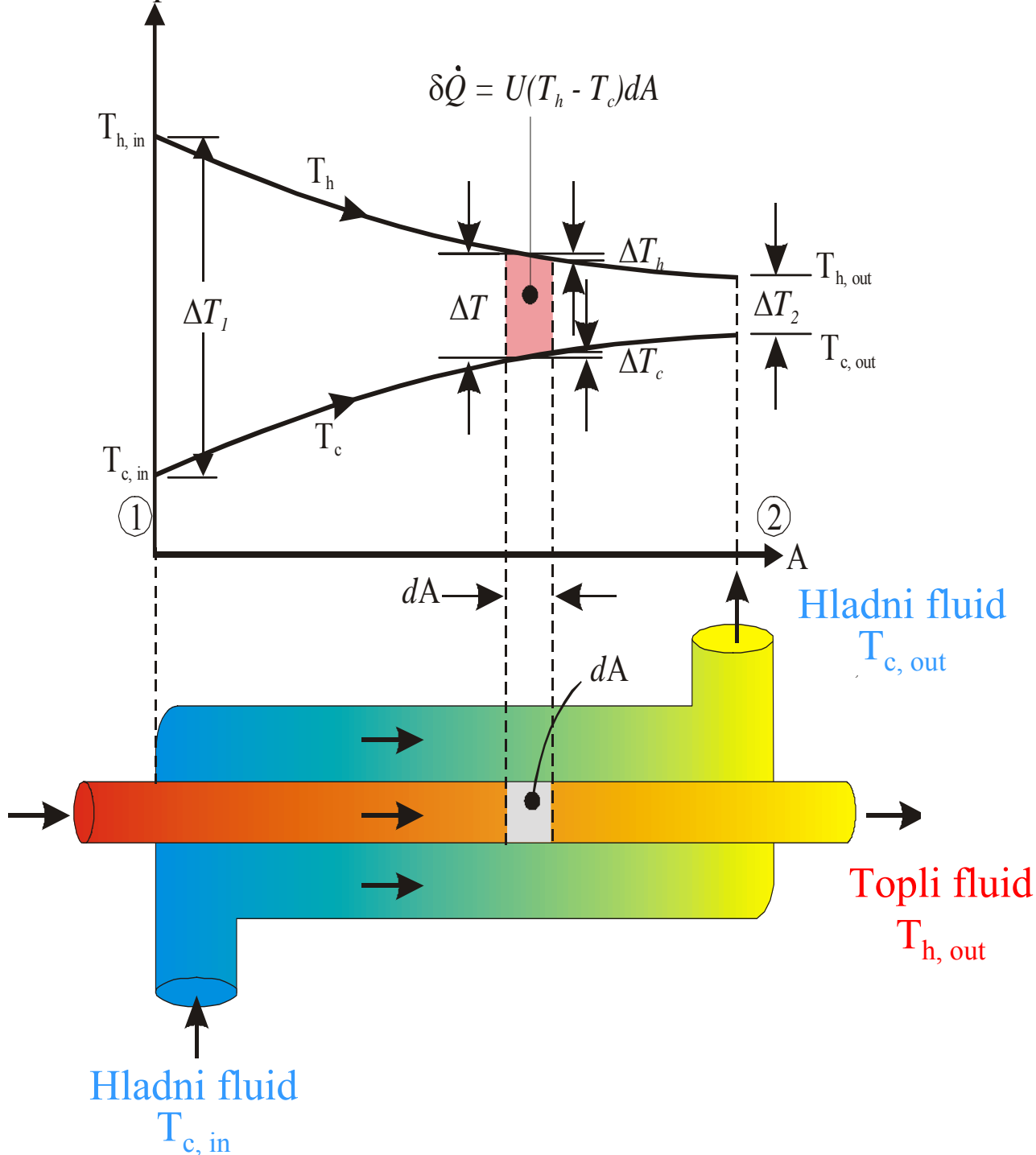
***Koaksijalni izmjenjivači***  
***(cijev u cijevi)***



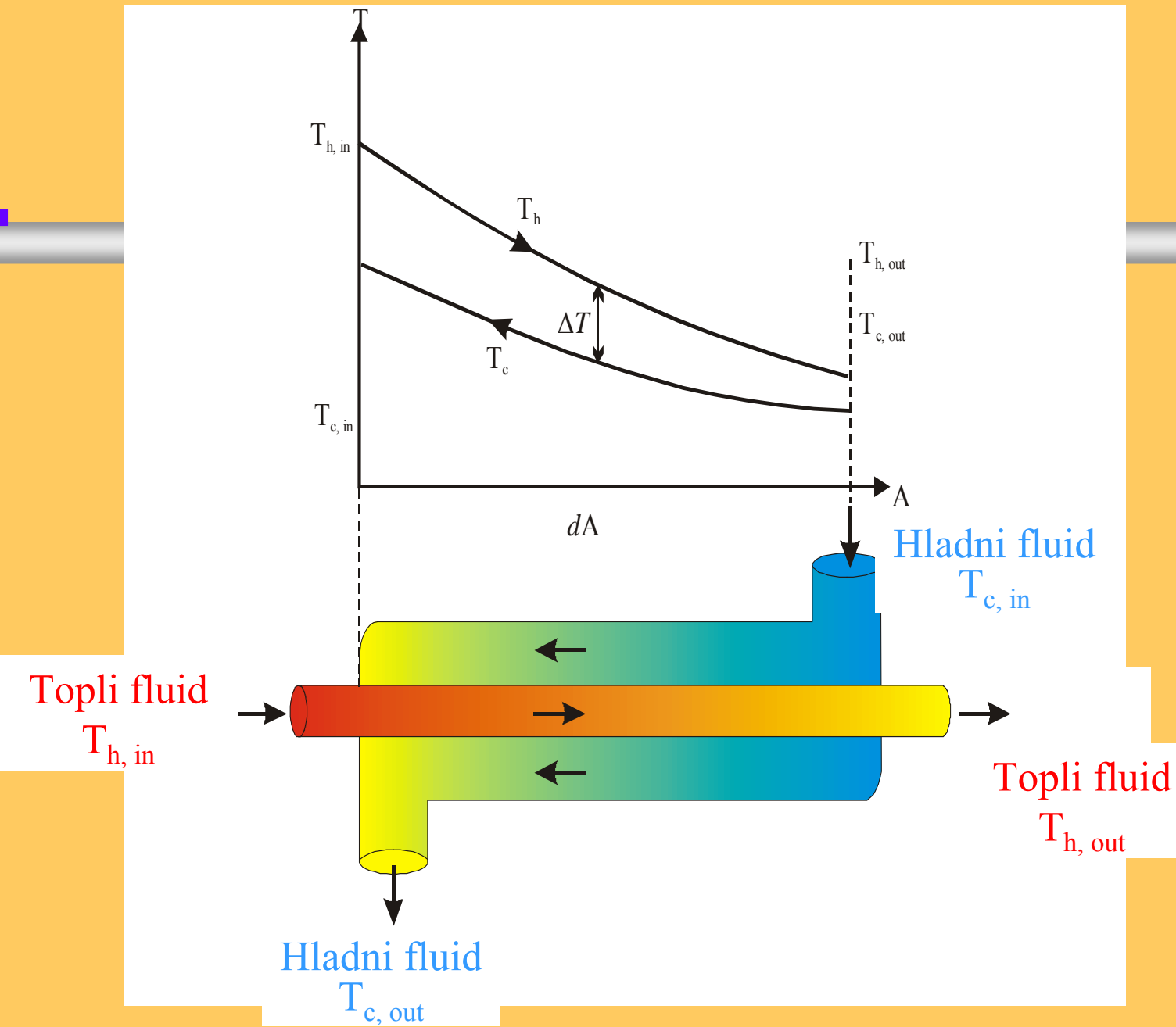


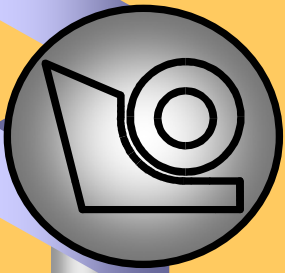
# Istosmjerni izmjenjivač

Topli fluid  
 $T_{h, in}$



# Protusmjerni izmjenjivač





***Elementi gradnje aparata***  
**Tipovi izmjenjivača**

***Pločasti izmjenjivači***

***Materijal: uglj.čelik***

***Primjena: isparivači i kondenzatori***

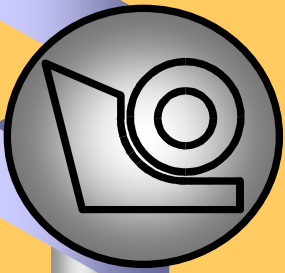
***Radni parametri:***

***Temp: -30-100°C***

***Tlak: do 25 bar***

***Medij: freoni, sek.rad.tvar, zeotrop.smj.***

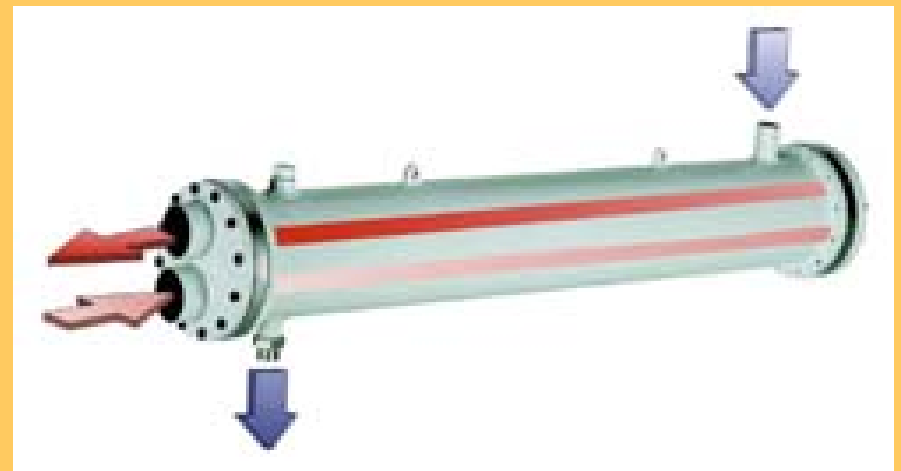
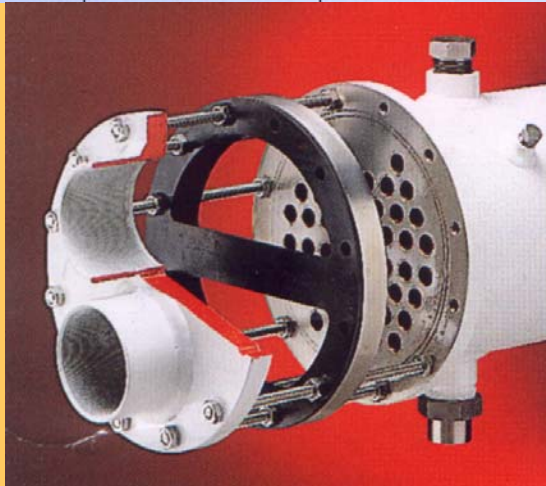
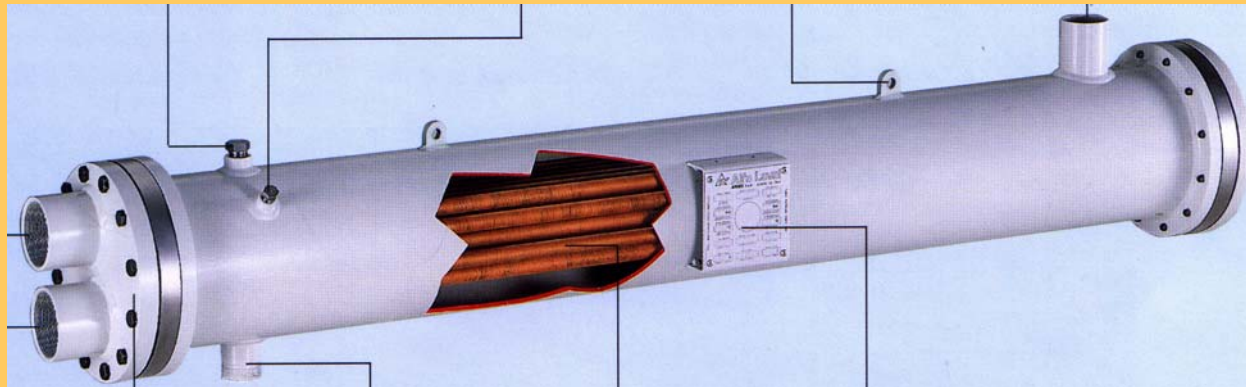
***Kapacitet: 4-100kW***

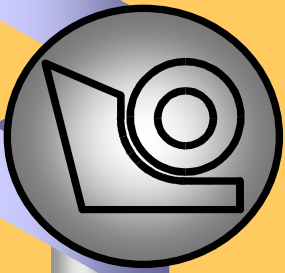


# *Elementi gradnje aparata*

## Tipovi izmjenjivača

# Shell&tube (kondenzator)





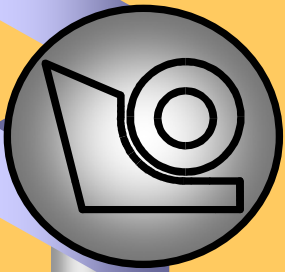
# *Elementi gradnje aparata*

## Tipovi izmjenjivača

### Shell&tube (isparivač)

potopljeni

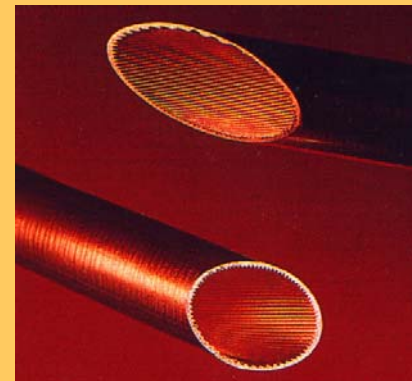
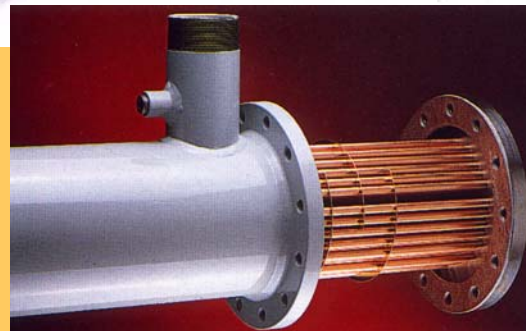
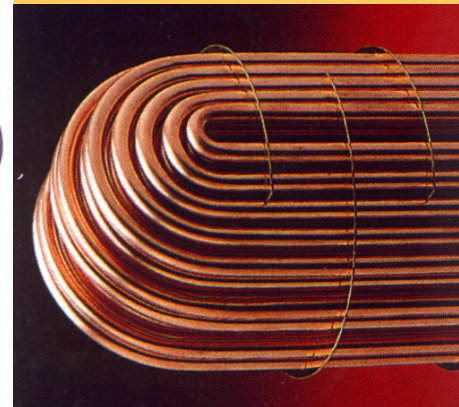
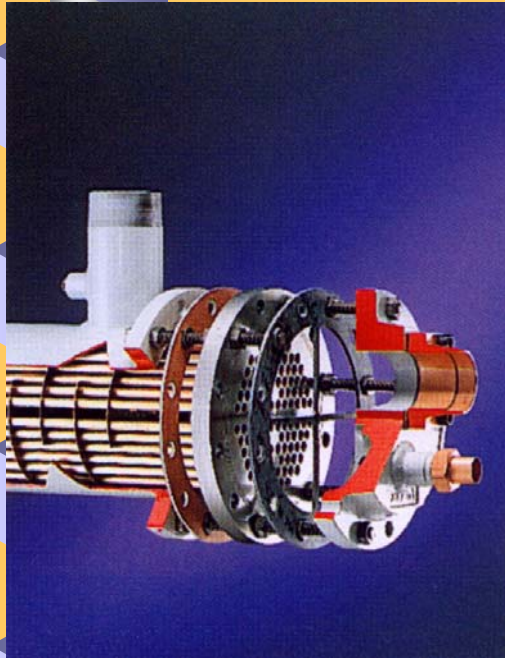


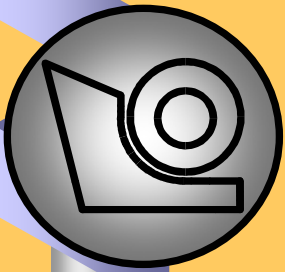


# *Elementi gradnje aparata*

## Tipovi izmjenjivača

### *Shell&tube (isparivač)*





*Elementi gradnje aparata*  
Tipovi izmjenjivača

## *Shell&tube*

### *Materijali gradnje*

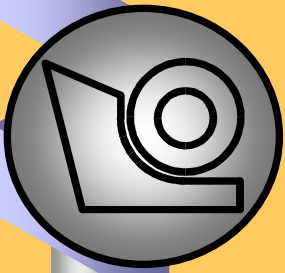
**PLAŠT, PODNICA, PRIRUBNICA, CIJEVNA STIJENKA,  
PRIKLJUČCI: ugljični čelici**

**CIJEVI: bakar, (nehrđ.) čelik (r.t. amonijak),**

**PREGRADE: bronca, čelik**

**BRTVE: klingerit, čelik, azbest, papir, guma,  
pluto, teflon**





***Elementi gradnje aparata***  
**Tipovi izmjenjivača**

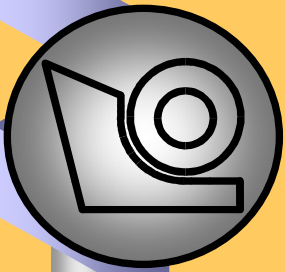
***Shell&tube***

***Primjena***

**isparivači (potopljeni, direktni)**

**kondenzatori**

**sve vrste aparata kaplj./kaplj. bez promjene  
agregatnog stanja**



*Elementi gradnje aparata*  
Tipovi izmjenjivača

## *Shell&tube*

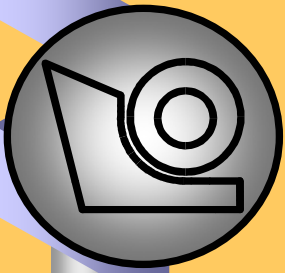
### *Radni parametri*

**TEMPERATURE: -40 - 300°C**

**TLAK: do 150 bar (nuklearke)**

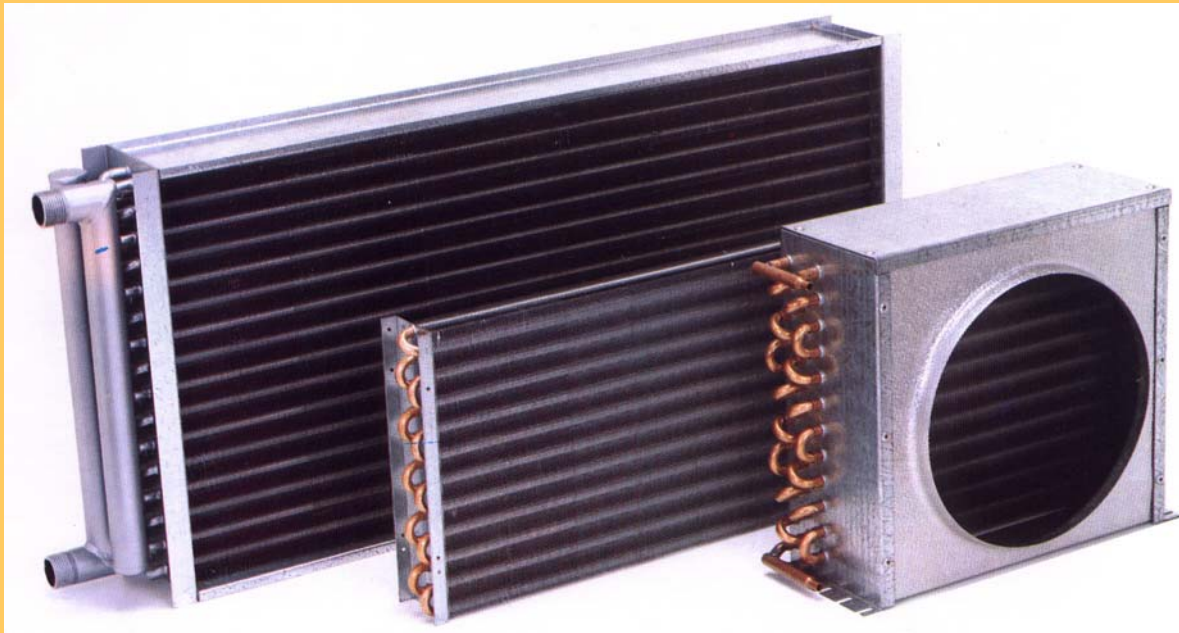
**RADNI MEDIJI: voda, freoni, amonijak, glikol (sek.radne tvari), plinovi izgaranja**

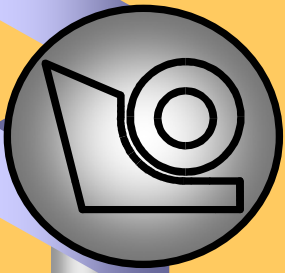
**KAPACITET: 10-2000 kW**



***Elementi gradnje aparata***  
**Tipovi izmjenjivača**

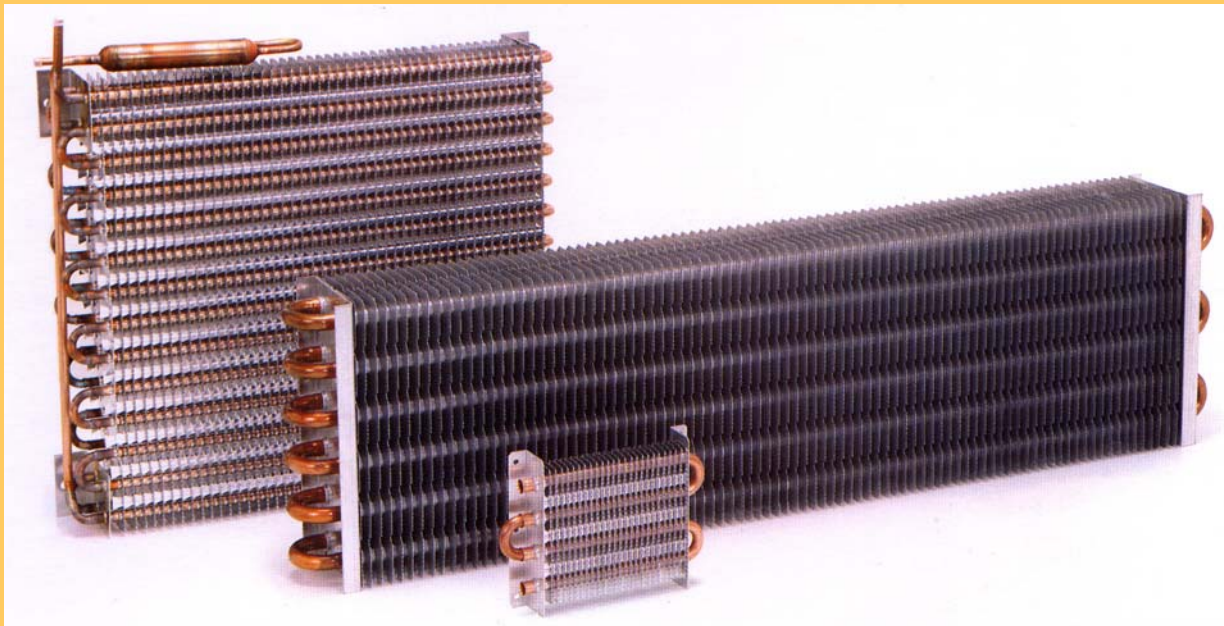
***Orebreni izmjenjivači (zrak-  
kapljevina)***



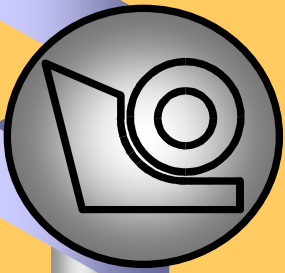


***Elementi gradnje aparata***  
**Tipovi izmjenjivača**

***Orebreni gravitacijski  
izmjenjivači (zrak-kapljevina)***



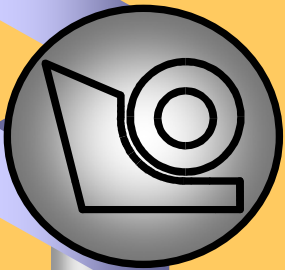
slobodna  
konvekcija  
na rebrima



## *Elementi gradnje aparata* Tipovi izmjenjivača

# Hladnjaci zraka (unit cooler) i aksijalni kondenzatori

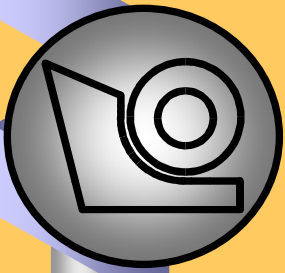




***Elementi gradnje aparata***  
**Tipovi izmjenjivača**

***Hladnjaci zraka (unit cooler)***

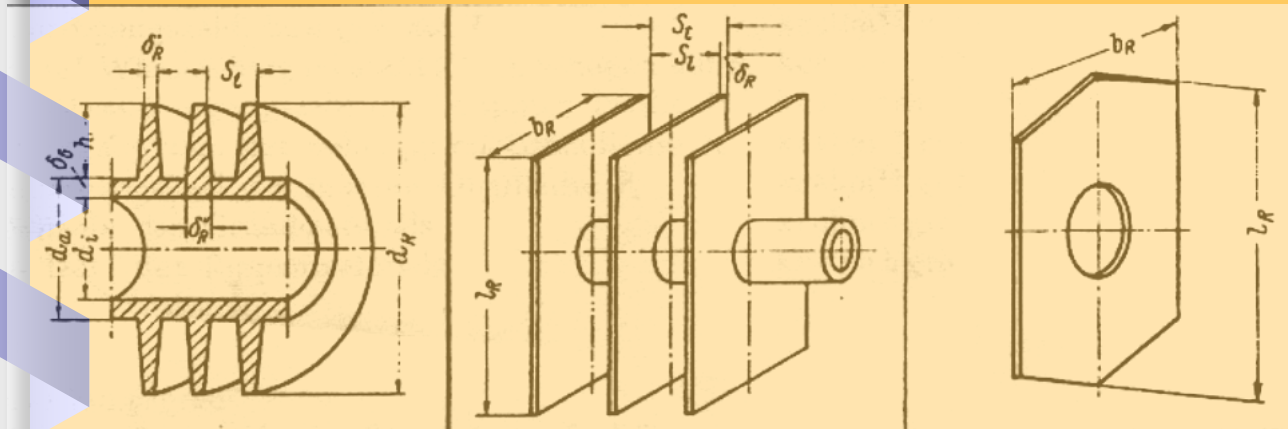




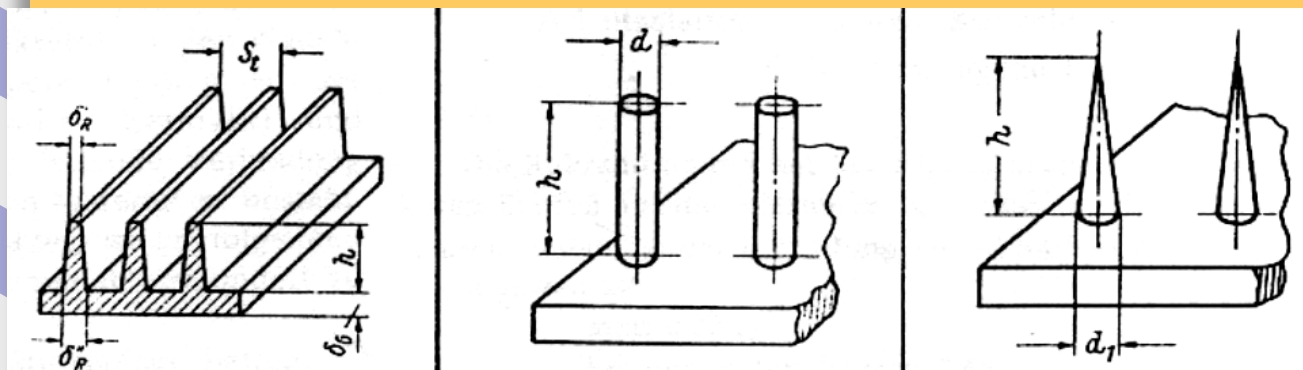
# Elementi gradnje aparata

## Tipovi izmjenjivača

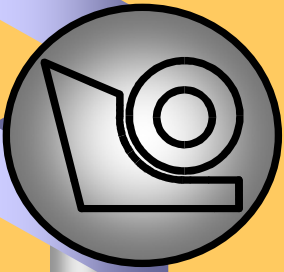
### Vrste orebrenja



za cijevi



za ploče



## ***Elementi gradnje aparata*** **Tipovi izmjenjivača**

### **Zašto orebrenje?**

izmijenjena toplina

$$Q = k \cdot A \cdot (t_u - t_v)$$

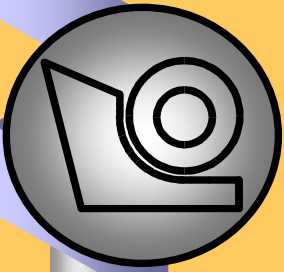
koeficijent prolaza topline  
(ravna stijenka)

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_u} + \sum \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_v}$$

plin (v)/kapljevina (u)

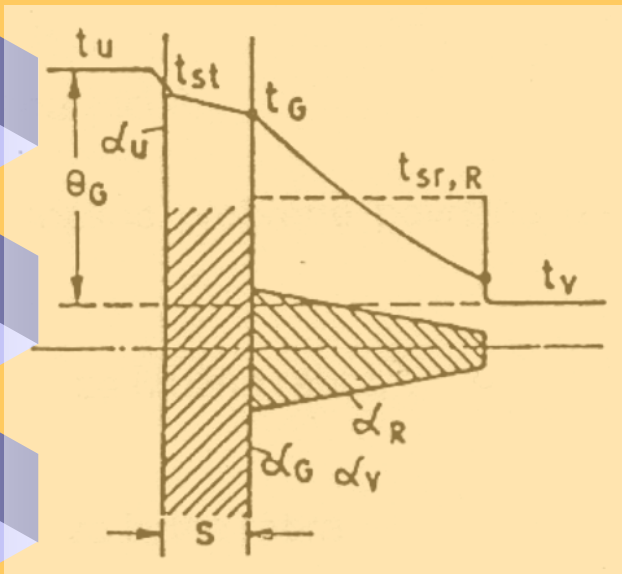
$$\alpha_v \ll \alpha_u \Rightarrow k < \alpha_v$$





# Zašto orebrenje?

Temp. raspodjela na rebro

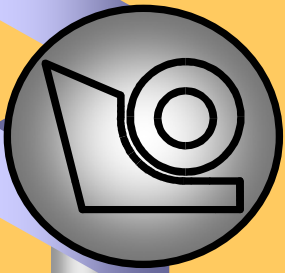


IZMIJENJENA TOPLINA

$$Q = Q_R + Q_G$$

$$Q = k \cdot A \cdot (t_u - t_v)$$

rebro predstavlja  
dodatni topl.otpor



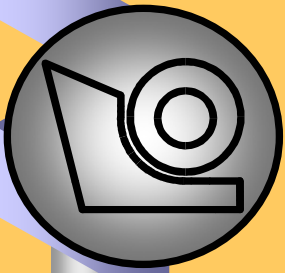
*Elementi gradnje aparata*  
Tipovi izmjenjivača

*Orebreni izmjenjivači*

*Materijali gradnje*

**rebra: aluminij, bakar, čelik**

**CIJEVI: bakar, čelik (r.t. amonijak)**



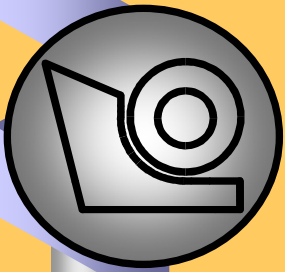
## ***Orebreni izmjenjivači***

### ***Primjena***

**isparivači (potopljeni, direktni)**

**kondenzatori**

**grijači i hladnjaci zraka**



***Elementi gradnje aparata***  
**Tipovi izmjenjivača**

***Orebreni izmjenjivači***

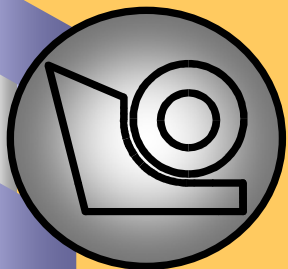
***Radni parametri***

**TEMPERATURE:-25-100°C**

**TLAK: do 30 bar**

**RADNI MEDIJI: zrak, voda, freoni, amonijak,  
sekund.rad.tvari**

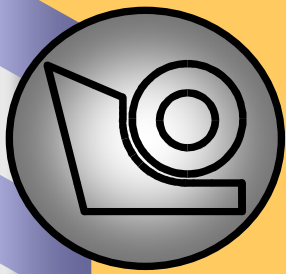
**KAPACITET:3-1000kW**



## **Kompaktni izmjenjivači**

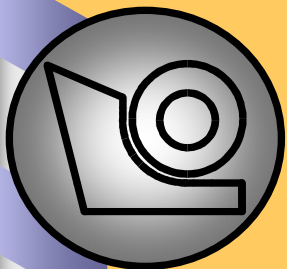
### **Karakteristike-prednosti**

- ✓ **veliki odnos površina/volumen**  
**(1300 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)**
- ✓ **visoki koef. prijelaza topline:**  
**cijevi malog hidraul. promjera, lokal. vrtloženja rad. medija**
- ✓ **mala temp. razlika primar/sekundar**
- ✓ **mala količina radnog medija**
- ✓ **reducirana težina**



## ***Karakteristike-nedostaci***

- ✓ veći pad tlaka**
- ✓ složenija izrada**
- ✓ problemi sa čišćenjem izmj. površina**

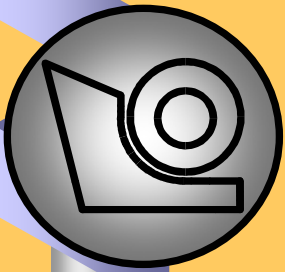


## *Elementi gradnje aparata* Tipovi izmjenjivača

### *Moguća podjela*

✓ **PLOČASTI** kaplj./kaplj.  
(Plate heat exchangers)

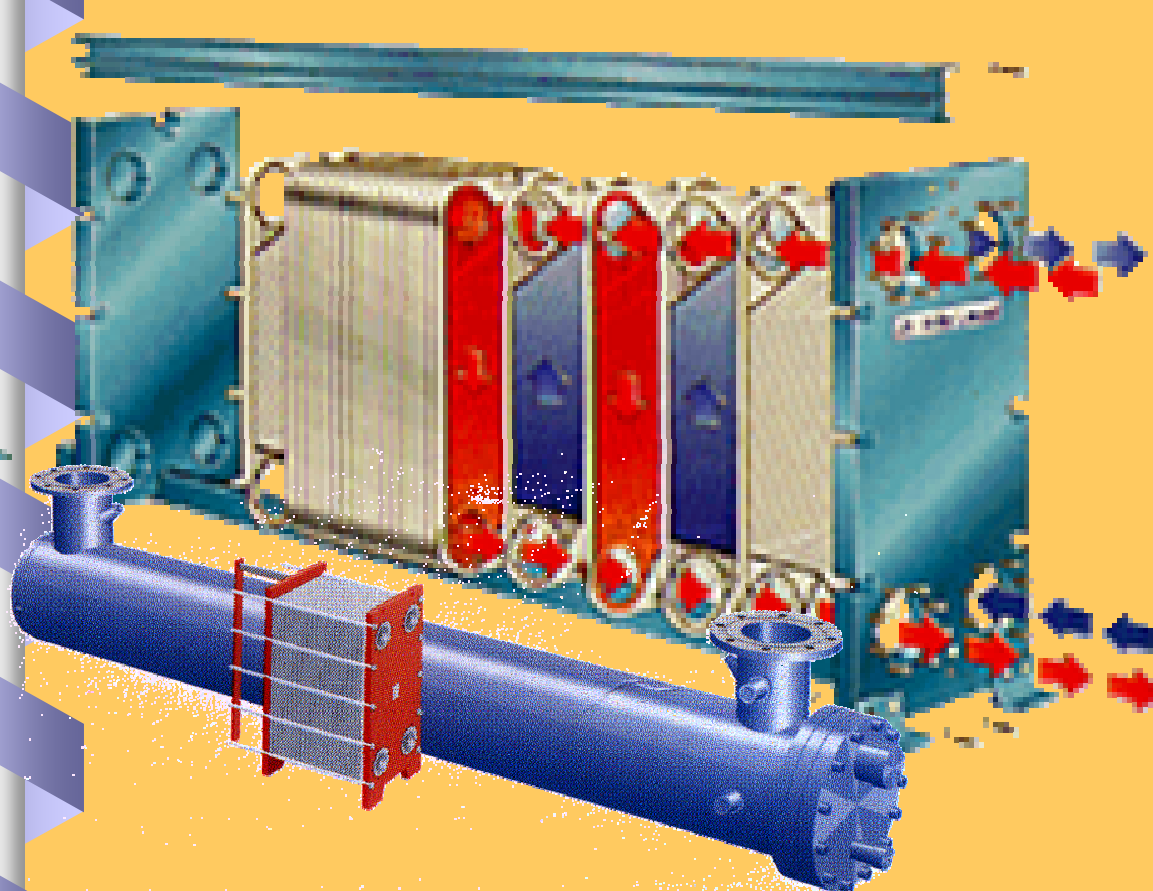
✓ **MATRIČNI** plin/plin, kaplj./plin  
(Compact heat exchangers or Plate fin heat exchangers)



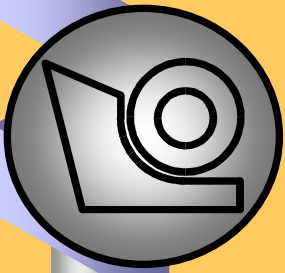
# *Elementi gradnje aparata*

## Tipovi izmjenjivača

# *Pločasti izmjenjivači s brtvama*



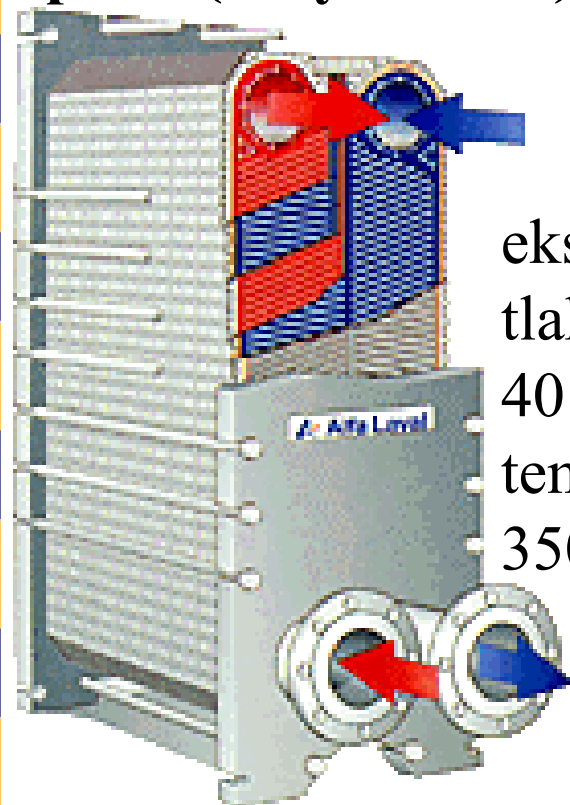




## ***Elementi gradnje aparata*** **Tipovi izmjenjivača**

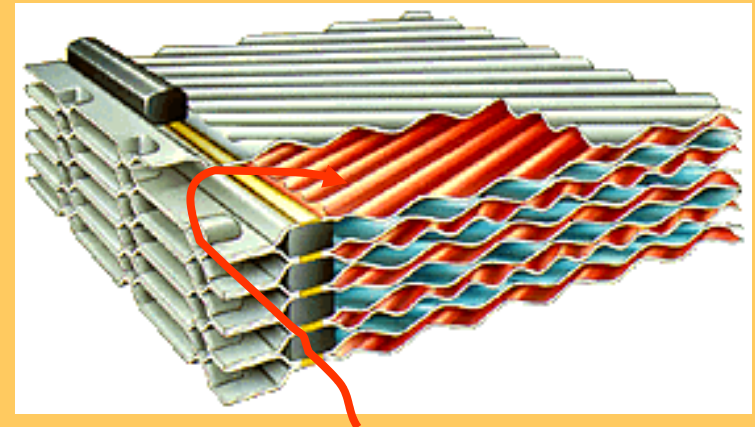
# ***Zavareni pločasti izmjenjivači***

**potpuno (fully welded)**

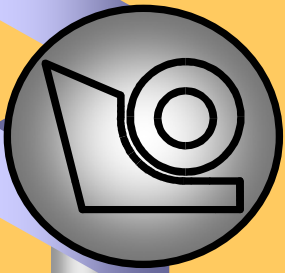


ekstremni  
tlakovi (do  
40 bar) i  
temp. (-50-  
350°C)

**djelomično (semi-welded)**

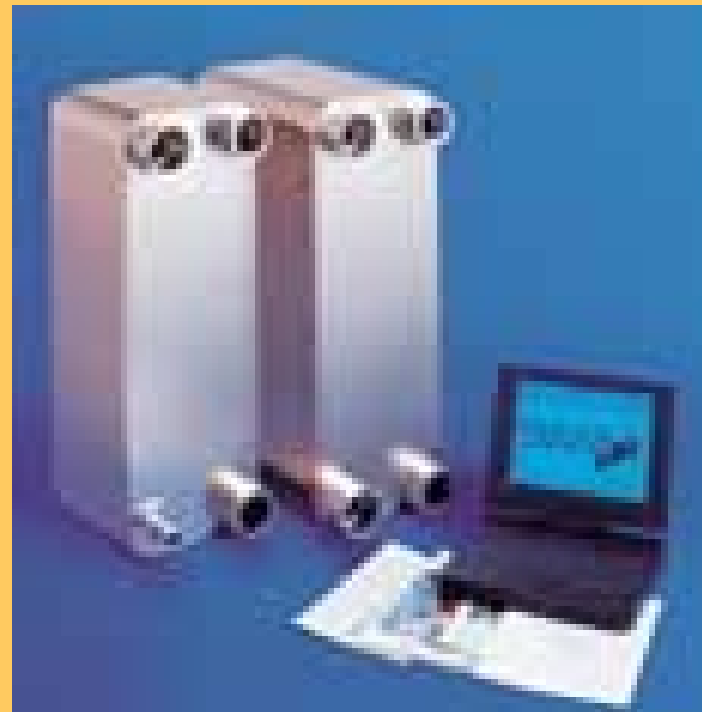


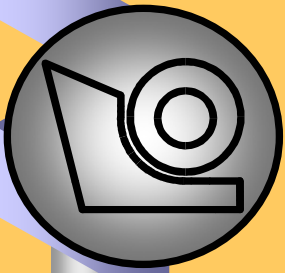
agresivni medij u  
zavarenom kanalu



***Elementi gradnje aparata***  
**Tipovi izmjenjivača**

***Lemljeni (brazed) pločasti izmjenjivači***

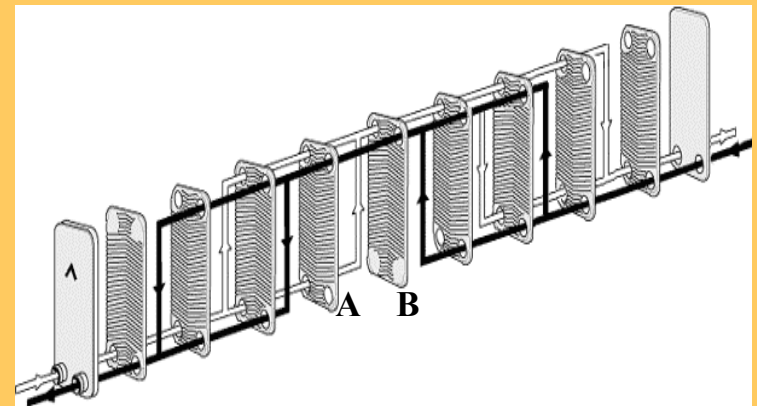
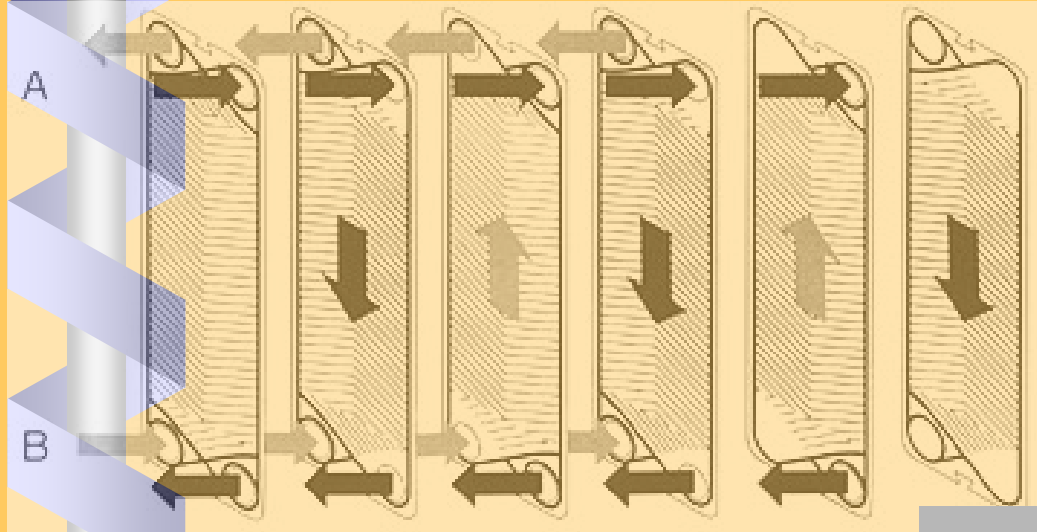




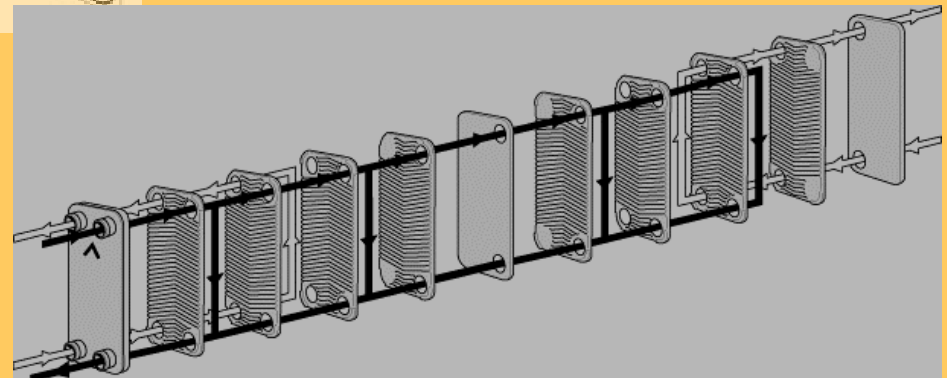
## ***Elementi gradnje aparata*** **Tipovi izmjenjivača**

# ***Konfiguracija strujanja***

***Jedan prolaz svake struje***      ***Dva prolaza svake struje***



***Dva nezavisna kruga strujanja***





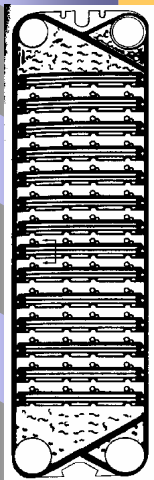
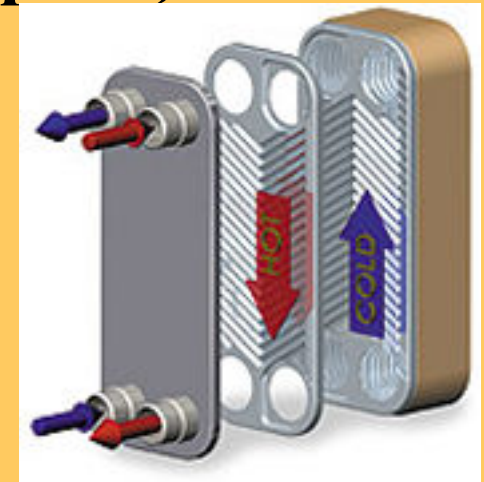
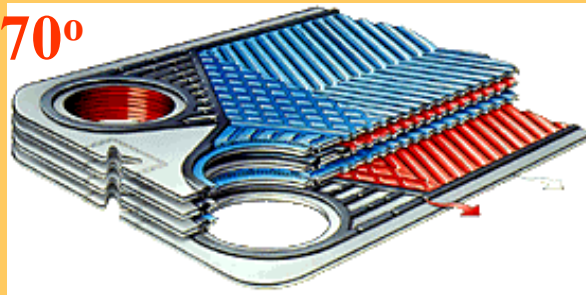
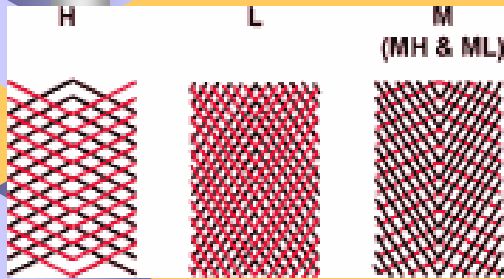
# Elementi gradnje aparata

## Tipovi izmjenjivača

# Geometrija ploča

## valovita V-PLOČA (Chevron plate)

kutevi žlijebova 25-70°



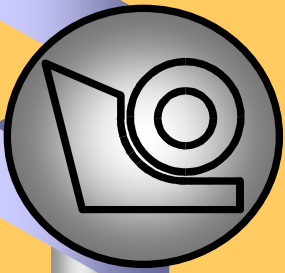
“ribača ploča”

(wash  
boarding,  
intermating)



riblja kost  
(herringbone)





## *Pločasti izmjenjivači*

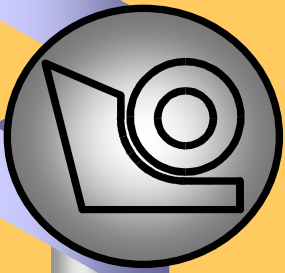
### *Materijali gradnje*

**ploče: nehrđ.čelici, aluminij, titan, nikal**

**brtve: razni elastomeri (EPDM, fluorocarbon)**

**lem: bakar, kositar (r.t.amonijak)**

**granične ploče: uglj. čelik**



## ***Pločasti izmjenjivači***

### ***Primjena***

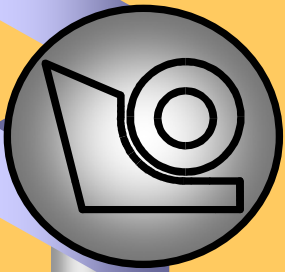
**isparivači (potopljeni, direktni)**

**kondenzatori**

**sve vrste aplikacija kaplj./kaplj. bez promjene  
agregatnog stanja**

**prehrambena, mliječna i industrija piva**

**viskozni mediji (plastika, sek.rad.tvari, sirupi..)**



***Elementi gradnje aparata***  
**Tipovi izmjenjivača**

***Pločasti izmjenjivači***

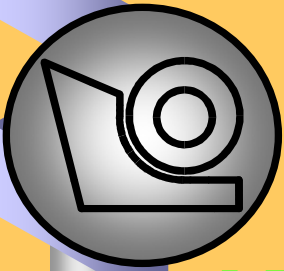
***Radni parametri***

**TEMPERATURE: (-160-400°C *lemljen*), (-30-150°C *s brtvama*)**

**TLAK: do 30 bar *lemlj.*, do 25 bar *s brtvama***

**RADNI MEDIJI: voda, freoni, amonijak, sekund.rad.tvari, pseudo plastični fluidi, mlijeko**

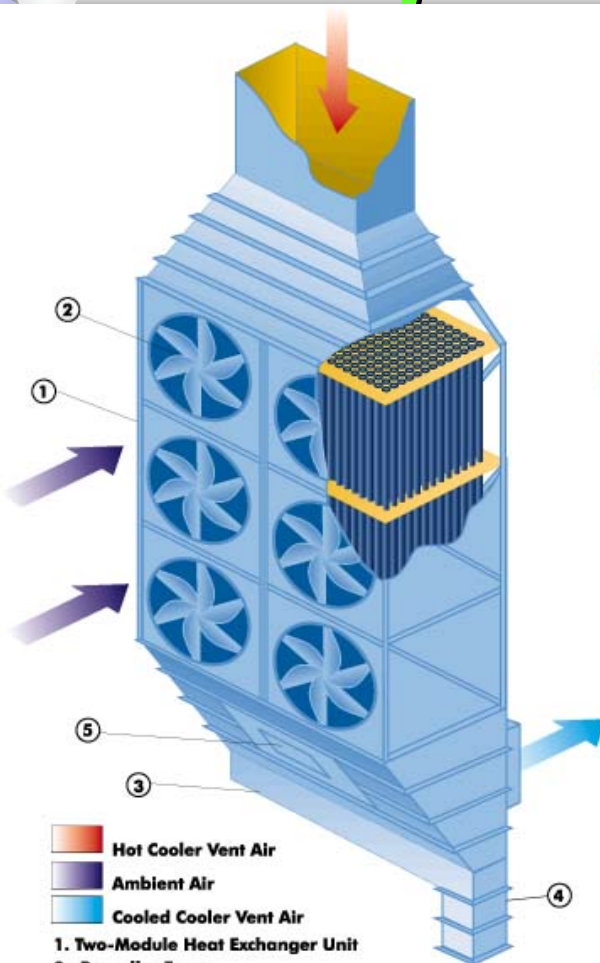
**KAPACITET: 5-7000 kW**



# Elementi gradnje aparata

## Tipovi izmjenjivača

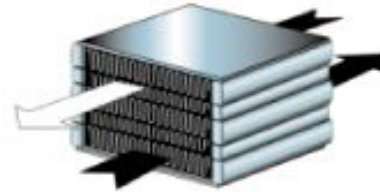
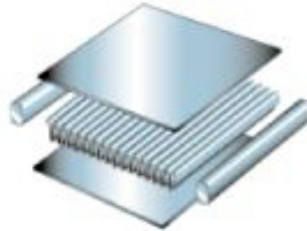
# Kompaktni izmjenjivači



- Hot Cooler Vent Air
- Ambient Air
- Cooled Cooler Vent Air

1. Two-Module Heat Exchanger Unit
2. Propeller Fans
3. Screw Conveyor
4. Double Tipping Valve
5. Access Door

protusmjerno  
strujanje



unakrsno  
strujanje





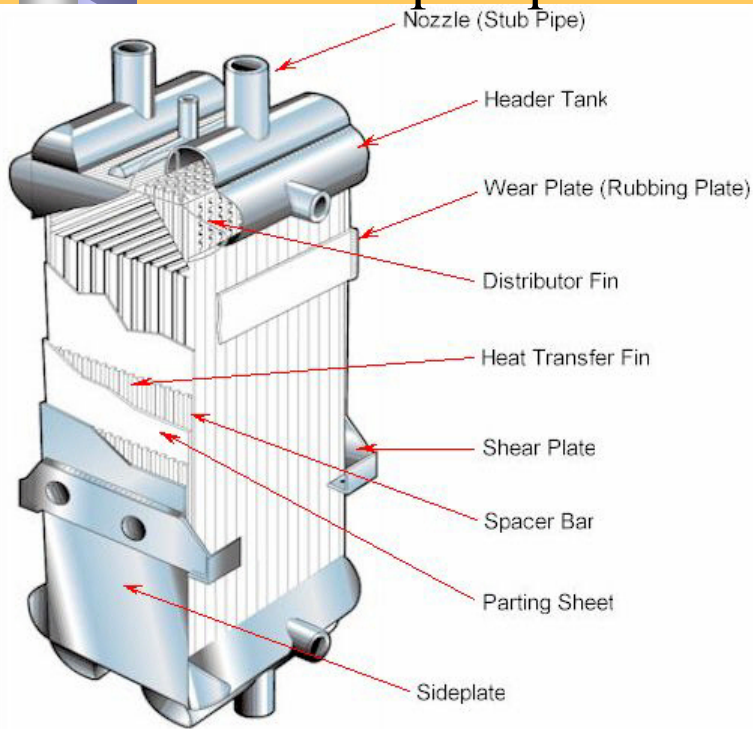
# Elementi gradnje aparata

## Tipovi izmjenjivača

# Kompaktni izmjenjivači

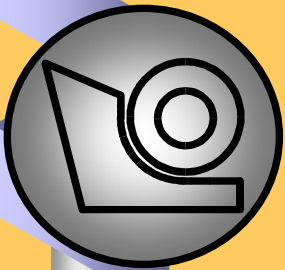
rekuperator

plin/plin



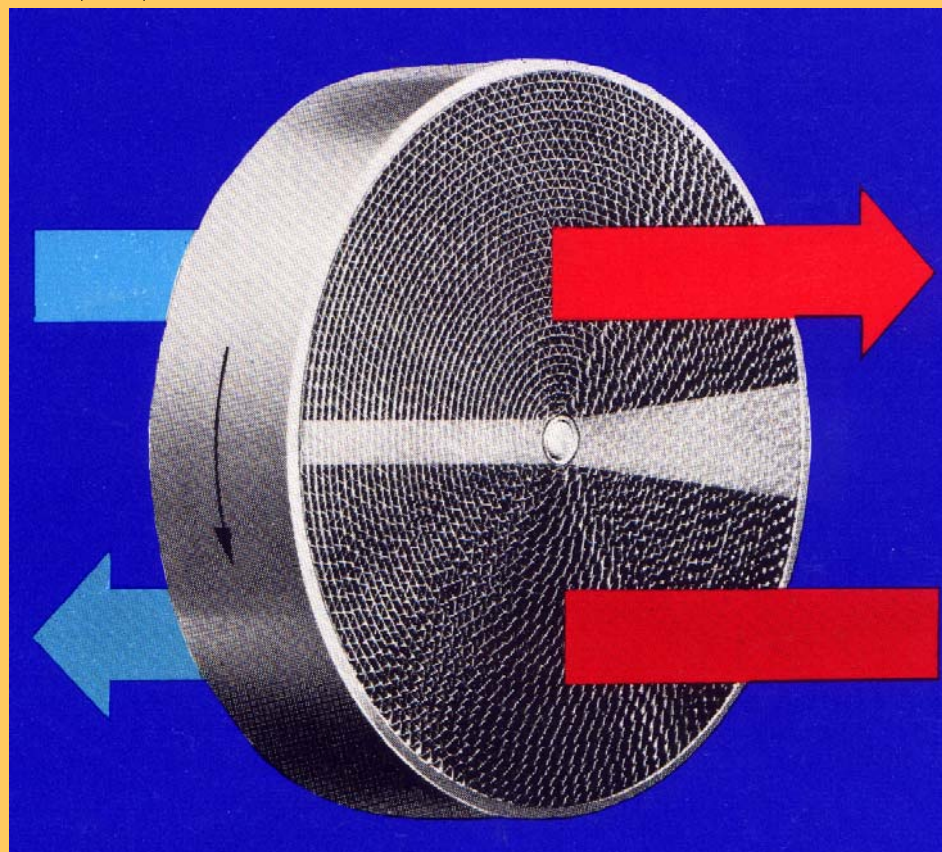
plin/kaplj.



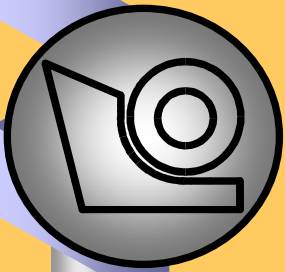


*Elementi gradnje aparata*  
Tipovi izmjenjivača

**Kompaktni izmjenjivači**  
REGENERATIVNI



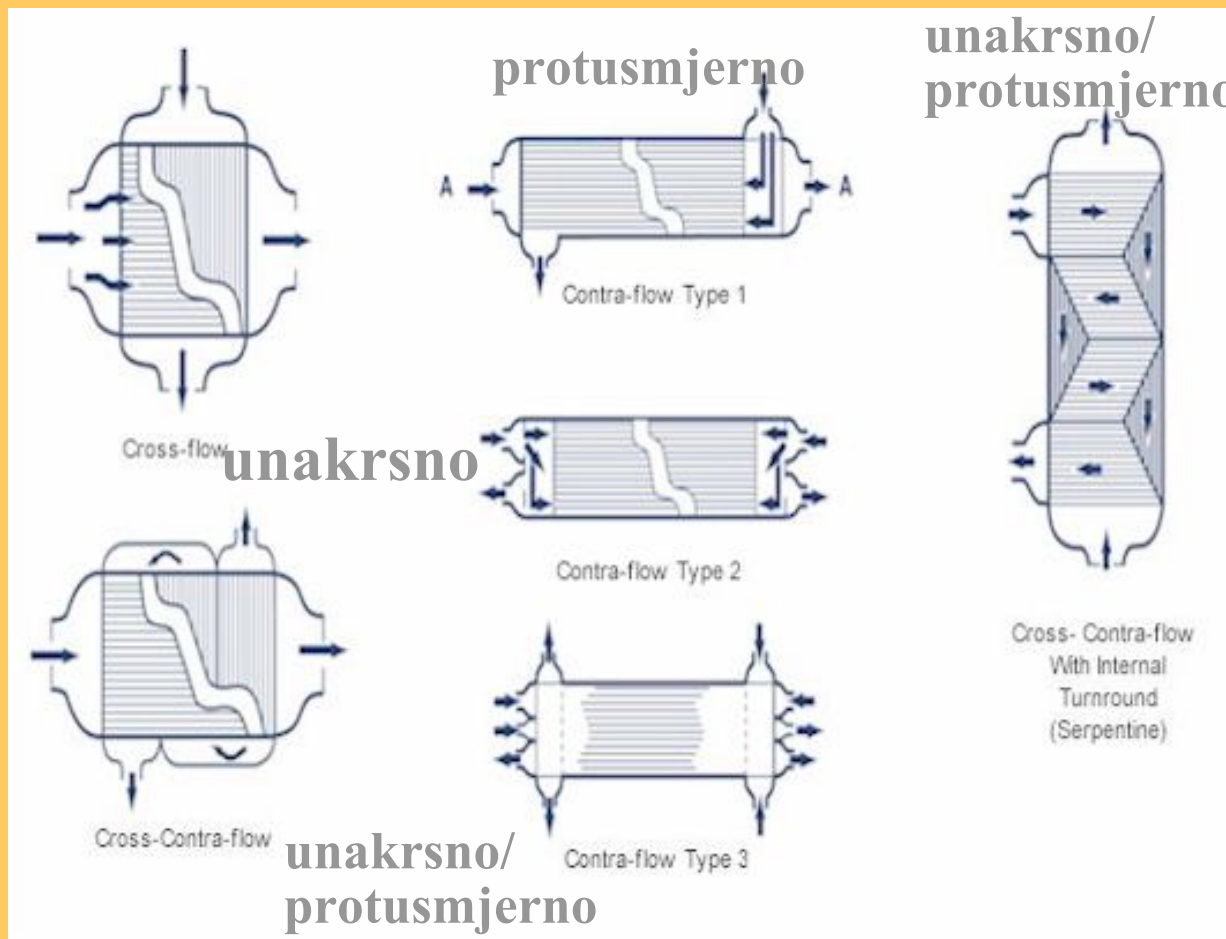
plin/plin

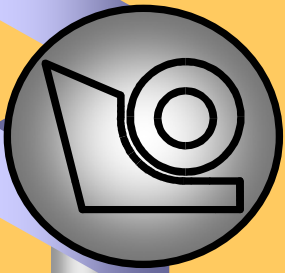


# Elementi gradnje aparata

## Tipovi izmjenjivača

### Konfiguracija strujanja





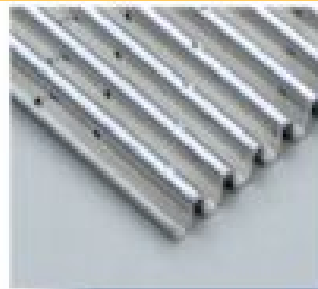
## ***Elementi gradnje aparata*** **Tipovi izmjenjivača**

# ***Geometrija izmj. površina***



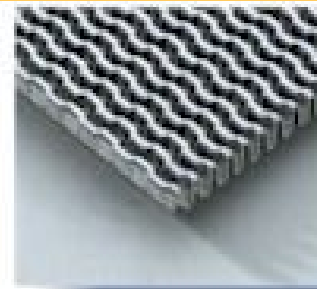
### **Plain**

A sheet of metal corrugated with fins at right angles to the plate



### **Perforated**

Refers to a plain corrugation constructed from perforated material



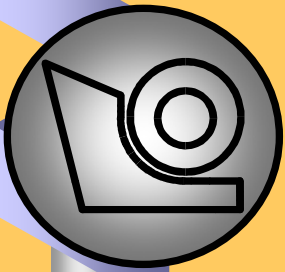
### **Serrated**

This corrugation is constructed by making cuts in the fin and displacing half way between the preceding fin



### **Herringbone**

Made by displacing the fins sideways to produce a zig-zag effect



*Elementi gradnje aparata*  
Tipovi izmjenjivača

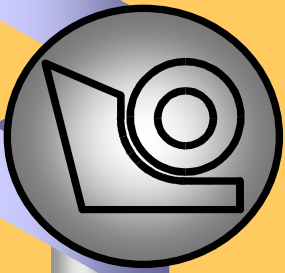
*Kompaktni izmjenjivači*

*Materijali gradnje*

**PLOČE: aluminij, čelik**

**LEM: bakar, kositar**

**PREGRADE: alu. legure**



## *Kompaktni izmjenjivači*

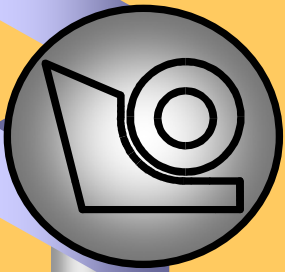
### *Primjena*

**rekuperatori (npr. za turbine)**

**regeneracija (npr. predgrijači zraka za peći)**

**hladnjaci i grijači zraka ili ulja (npr. za motore)**

**procesna industrija (ukapljivanje, separacija zraka..)**



*Elementi gradnje aparata*  
Tipovi izmjenjivača

*Kompaktni izmjenjivači*

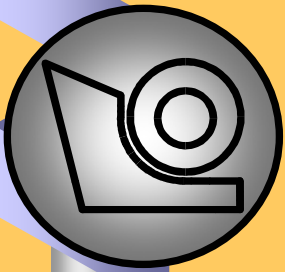
*Radni parametri*

**TEMPERATURE:-200 - 400°C**

**TLAK:do 100 bar**

**RADNI MEDIJI:zrak, ispušni plinovi, voda, dušik,  
CO<sub>2</sub>, freoni, amonijak**

**KAPACITET:do 1000kW**



# Elementi gradnje aparata

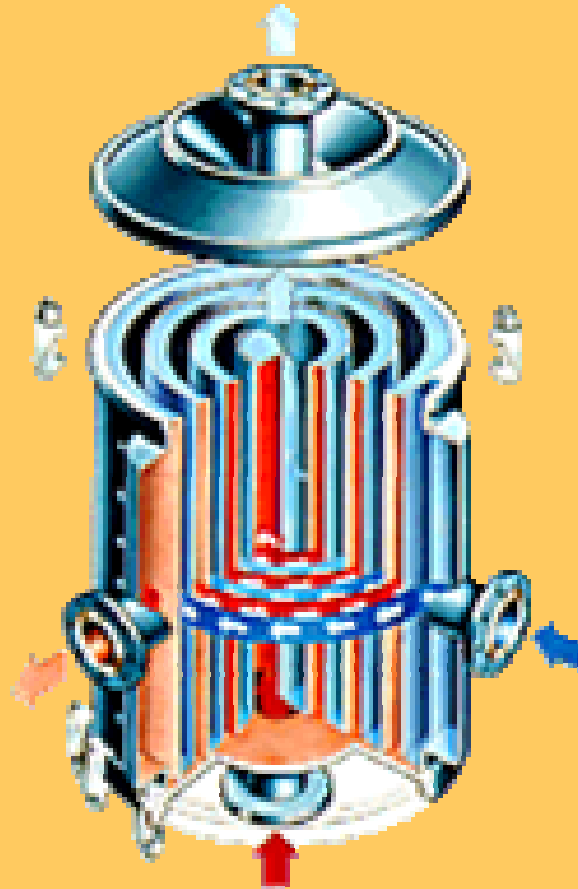
## Tipovi izmjenjivača

# Spiralni izmjenjivači

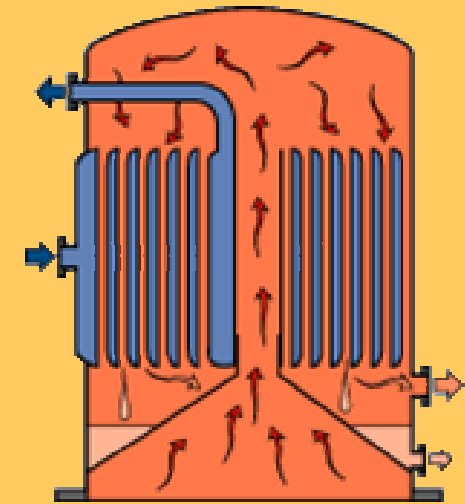
kaplj./kaplj.



nakupljanje  
nečistoća

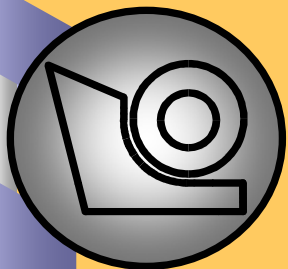


kondenzator



- ➡ Coolant
- ➡ Vapour from column
- ➡ Inert gas
- ➡ Condensate





## ***Spiralni izmjenjivači***

***Materijali:*** metali pogodni za hladno oblikovanje i zavarivanje

***Primjena:*** kondenzatori, industrija papira, tretman otpadnih voda, PVC industrija

***Radni parametri:***

***Temp: do 400°C***

***Tlak: do 15 bar***

***Medij: voda (para), tekući PVC, viskozni i nečisti mediji***



# Vježba

---

**Određivanje termodinamičkih  
karakteristika shell & tube  
izmjenjivača topline**



# Vježba 1: Protustrujni izmjenjivač topline

- ∞ mjerna linija sa ugrađenim izmjenjivačem sa spiralno savijenim čeličnim cijevima.
- ∞ Vrela voda u primarnom krugu izmjenjivača topline struji kroz cijevi (ogrijevni medij), u sekundarnom krugu, struji hladna voda (grijani medij).
- ∞ Kao izvor topline korištena je vrela voda toplane (primarni krug).

# Vježba 1: Protustrujni izmjenjivač topline

- ∞ **Cilj vježbe** upoznavanje studenata s načinom određivanja termodinamičkih i hidrodinamičkih karakteristika izmjenjivača topline.
- ∞ **Mjerenje** protoka primarne i sekundarne struje, temperatura na ulazu i izlazu, potrebno odrediti
  - učin izmjenjivača
  - koeficijent prolaza topline
  - koeficijente prijelaza topline

# Vježba 1: Protustrujni izmjenjivač topline

- ∞ Temperature ulaza i izlaza sekundara i primara mjerene su termoparovima bakar konstantan (tip T). Termoparovi su uronjeni izravno u vodu i provučeni između prirubnica i spojeni na A/D pretvarač te dalje na PC.
- ∞ bitna karakteristika ---> **samo nadtemperatura, tablice napona**

# Vježba 1: Protustrujni izmjenjiva ~ topline

- ∞ **Protok** se mjeri pomoću mjernih prigušnica izrađenih prema DIN 1952. Usljed strujanja medija, na mjernoj prigušnici se javlja pad tlaka koji je proporcionalan protoku. Razlika tlaka na prigušnici mjeri se diferencijalnim davačem tlaka
- ∞ Geometrija prigušnice i pad tlaka

# Vježba 1: Protustrujni izmjenjivač topline

$$G = C * E * \varepsilon * \frac{d^2 * \pi}{4} * \sqrt{2 * \rho * \Delta p}$$

# Vježba 1: Protustrujni izmjenjivač topline

- ∞ Učin izmjenjivača topline se određuje mjerenjem učina primarne i sekundarne struje.

$$Q_p = G_p * c_p * ( \vartheta_{p'} - \vartheta_{p''} )$$

- ∞ standardom propisana veličina odstupanja učina primara od sekundara (za ovu vježbu je to 10 %), vrijednosti koje su zadovoljile uvjet osrednjiti i na taj način umanjiti grešku



# Vježba 1: Protustrujni izmjenjivač topline

$$Q = \frac{Q_p + Q_s}{2}$$

$$k = \frac{Q}{A * \Delta \vartheta_m}$$

$$\Delta \vartheta_m = \frac{(\vartheta_{p'} - \vartheta_{s''}) - (\vartheta_{p''} - \vartheta_{s'})}{\ln \left( \frac{\vartheta_{p'} - \vartheta_{s''}}{\vartheta_{p''} - \vartheta_{s'}} \right)}$$

# Vježba 1: Protustrujni izmjenjivač topline

## Ω PRIJELAZ TOPLINE U CIJEVIMA

Ω Kod cijevnih zmijsa centrifugalna sila dodatno utječe na prijelaz topline

Ω Za laminarno strujanje  $100 < Re < Re_{kr}$

$$Nu = 3,65 + 0,08 \left[ 1 + 0,8 \left( \frac{d_u}{D} \right)^{0,9} \right] Pr^{\frac{1}{3}} Re^{0,5+0,29 \left( \frac{d_u}{D} \right)^{0,9}}$$

# Vježba 1: Protustrujni izmjenjivač topline

$$Re_{kr} = 2300 \left[ 1 + 8,6 \left( \frac{d_u}{D} \right)^{0,45} \right]$$

**Za izobraženo turbulentno strujanje  
vrijedi  $Re_{kr} < Re < 20000$**

$$Nu = 0,023 \left[ 1 + 14,8 \left( 1 + \frac{d_u}{D} \right) \left( \frac{d_u}{D} \right)^{\frac{1}{3}} \right] Pr^{\frac{1}{3}} Re^{0,8-0,22 \left( \frac{d_u}{D} \right)^{0,1}}$$

# Vježba 1: Protustrujni izmjenjivač topline

$$\text{Re} = \frac{w d \rho}{\eta}$$

$$\text{Pr} = \frac{\eta c_p}{\lambda}$$

## PRIJELAZ TOPLINE U PLAŠTU

$$\alpha_v = \frac{1}{\frac{1}{k} - \frac{A_v}{A_{sr}} \frac{s}{\lambda} - \frac{A_v}{A_u} \frac{1}{\alpha_u}}$$

# Vježba 1: Protustrujni izmjenjivač topline

## ZADATAK

odrediti koeficijent prolaza topline

odrediti koeficijente prijelaza topline na vanjskoj u unutrašnjoj strani cijevi

odrediti **konstantu c** prema:

$$Nu = c Re^{0,6} Pr^{0,33} = \frac{\alpha_v d_v}{\lambda}$$