



FKITMCMXIX

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije



# IZMJENJIVAČI TOPLINE

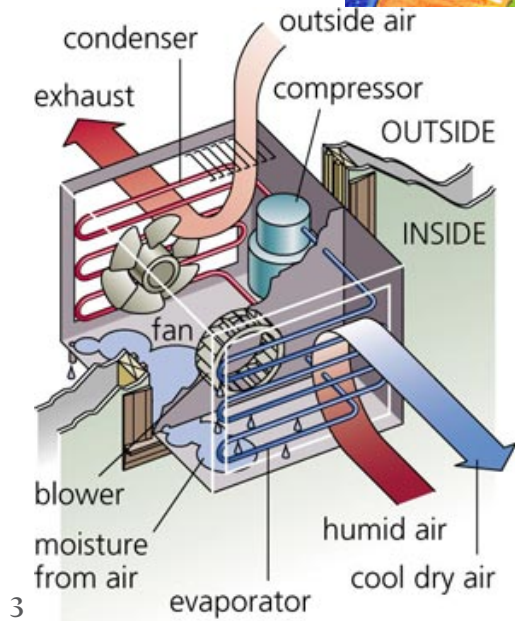
## Definicija i primjena

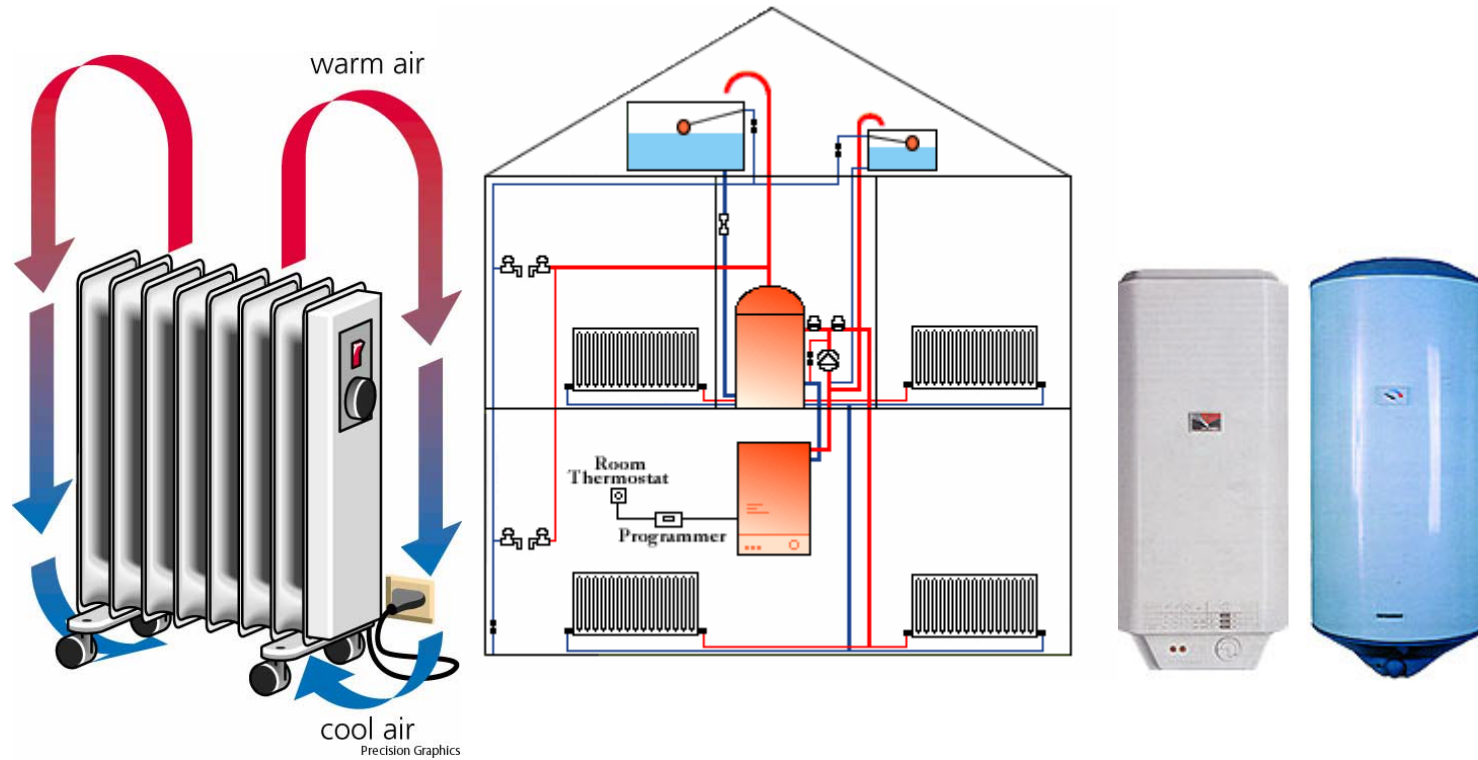
---

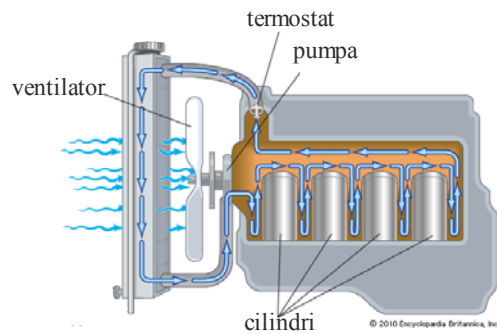
- Izmjenjivači topline su uređaji u kojima se toplinska energija prenosi sa jednog fluida na drugi bez međusobnog miješanja ta dva fluida
- U svakodnevnom životu
- U industriji



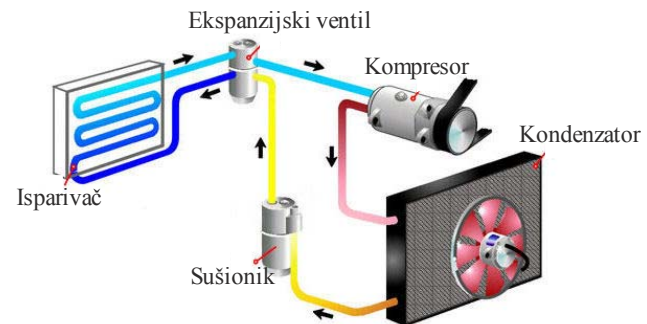
FKIT MCMXIX



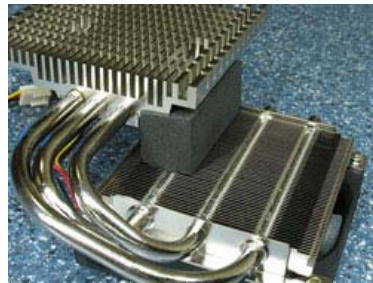
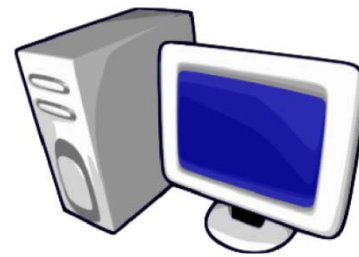




HLADNJAK



KLIMA UREĐAJ



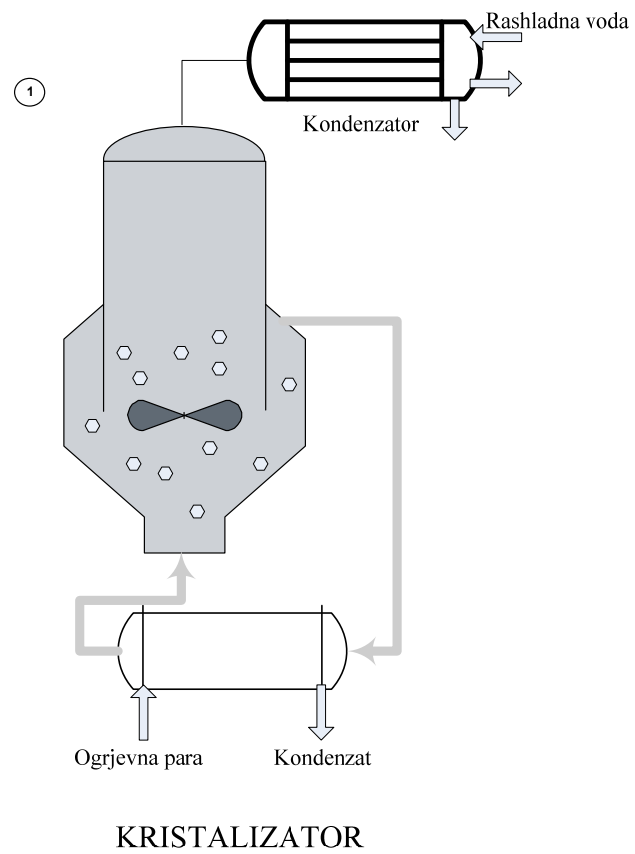
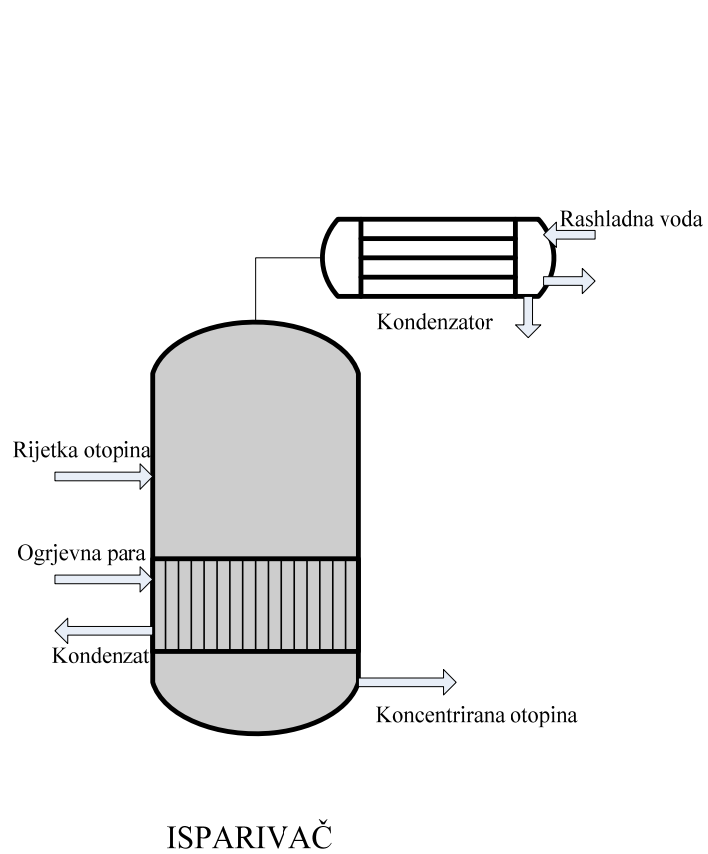


FKIT MCMXIX

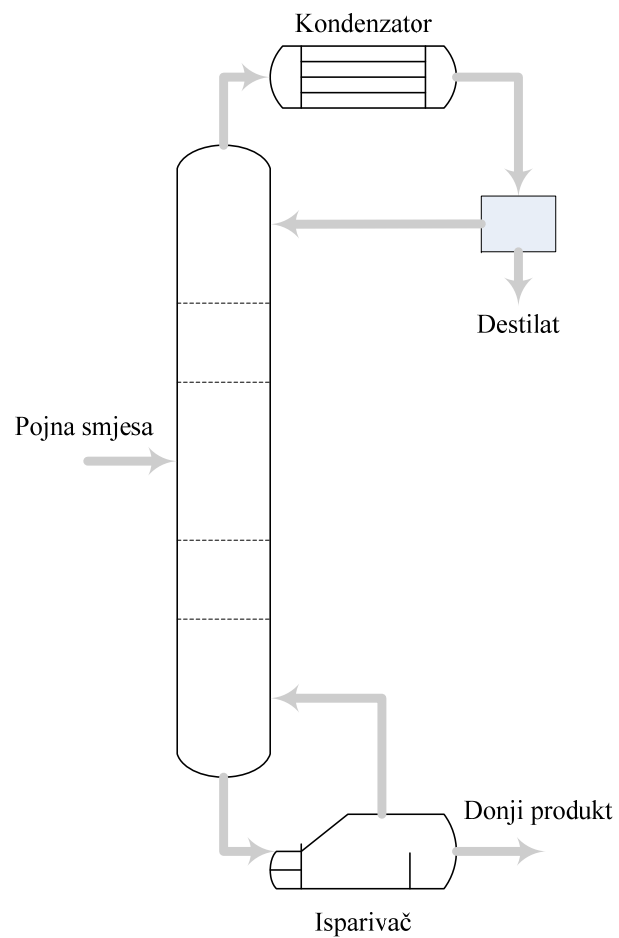


- U industriji (vezano uz toplinske separacijske procese):
- destilacija
- sušenje
- kristalizacija
- Isparavanje
- apsorpcija
- ekstrakcija

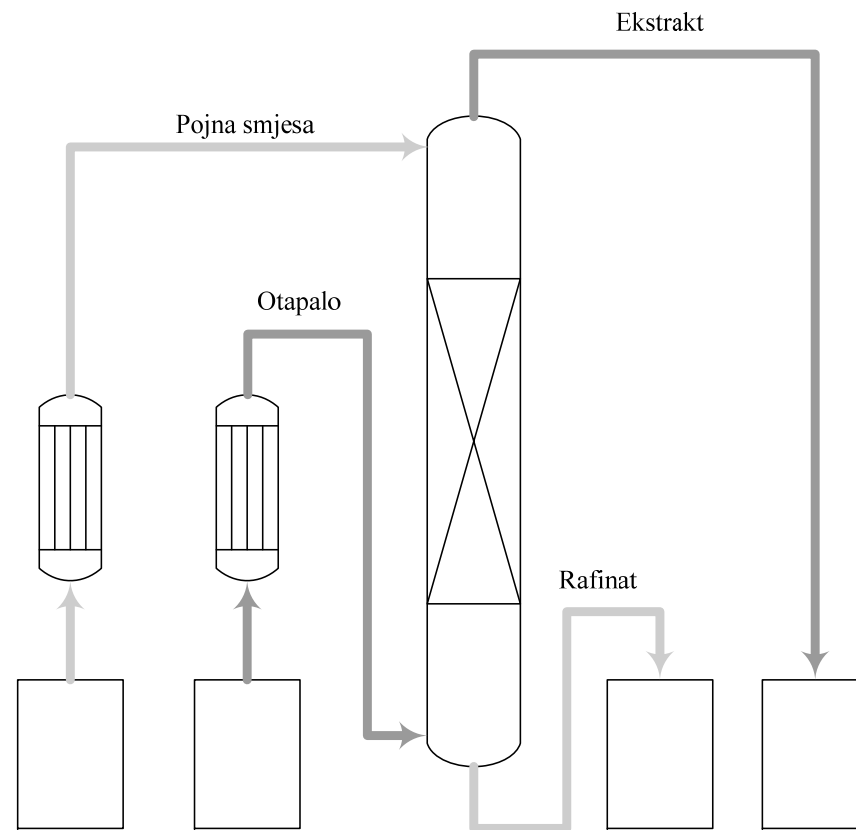






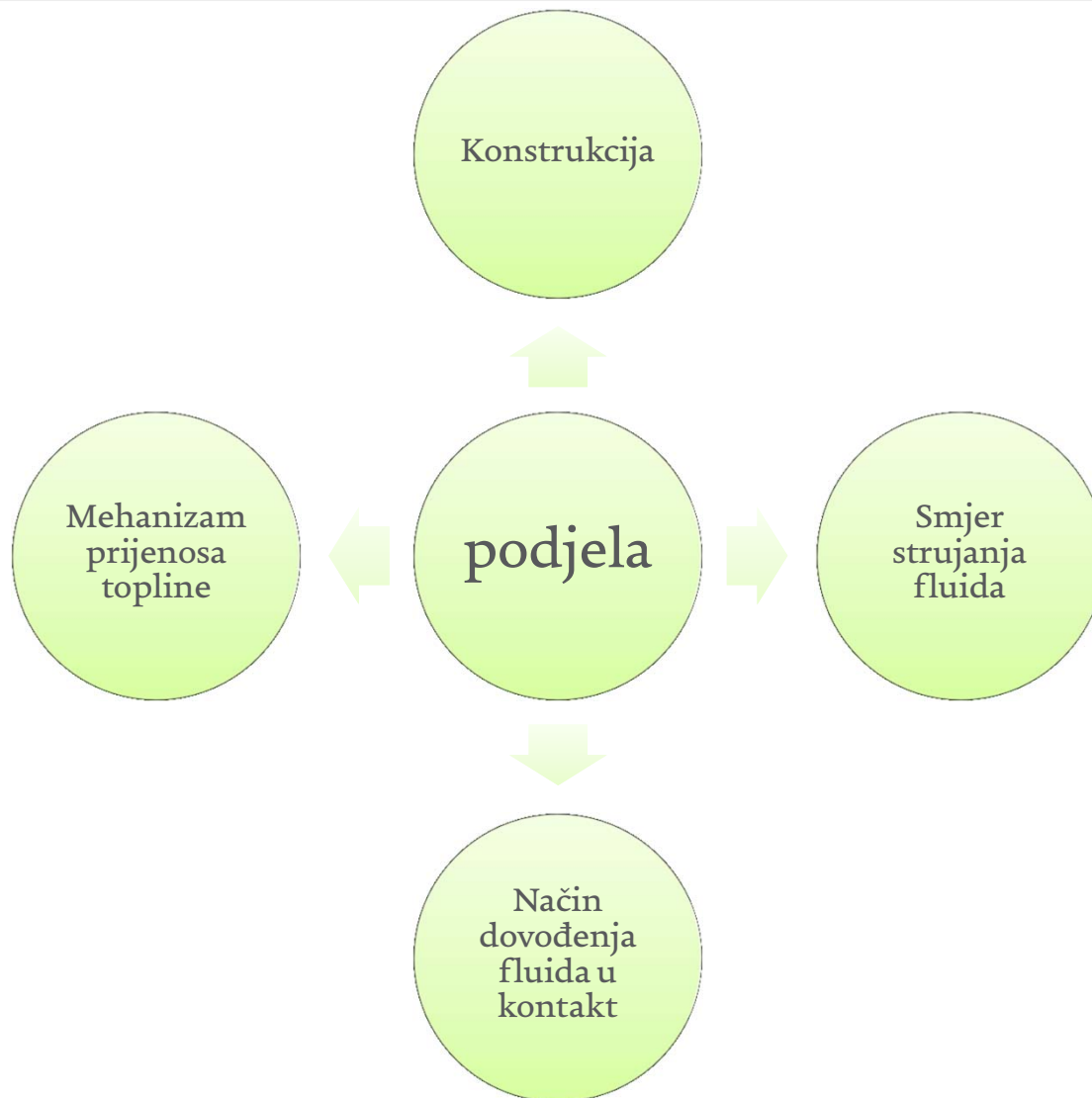


DESTILACIJA

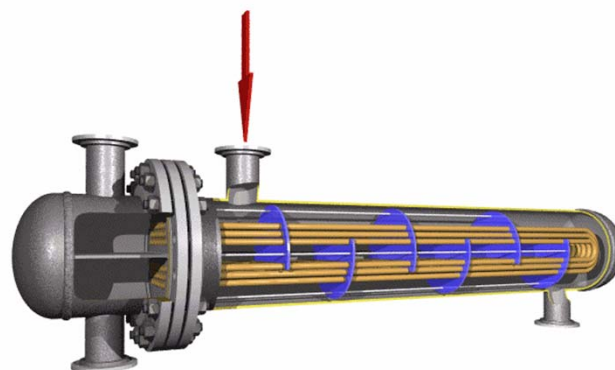


EKSTRAKCIJA

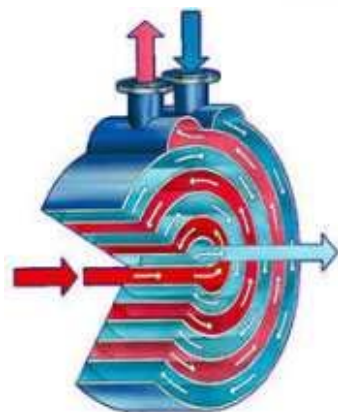
# Klasifikacija izmjenjivača topline



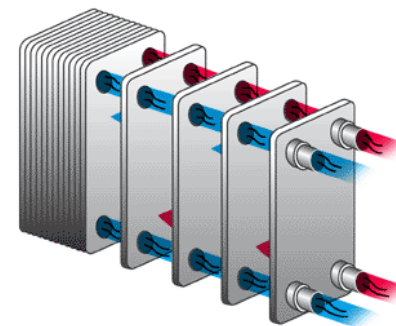
# Obzirom na konstrukciju



Cijevni izmjenjivač topline

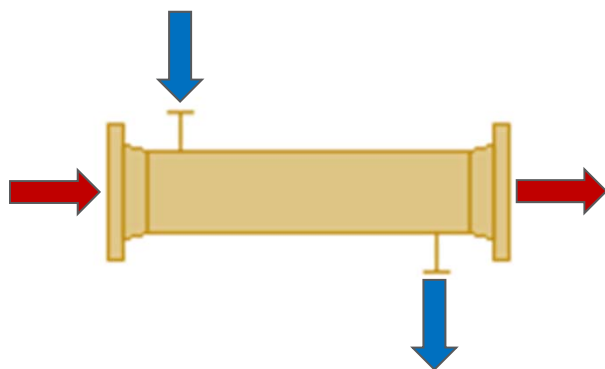


Spiralni izmjenjivač topline

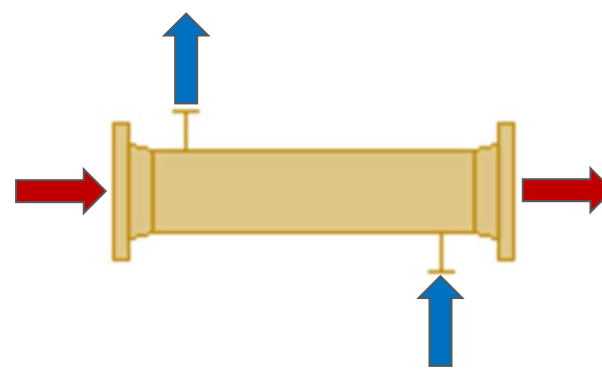


Pločasti izmjenjivač topline

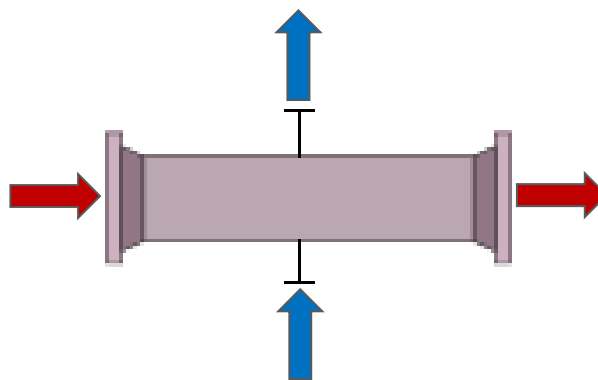
# Obzirom na smjer strujanja fluida



istostrujni



protustrujni

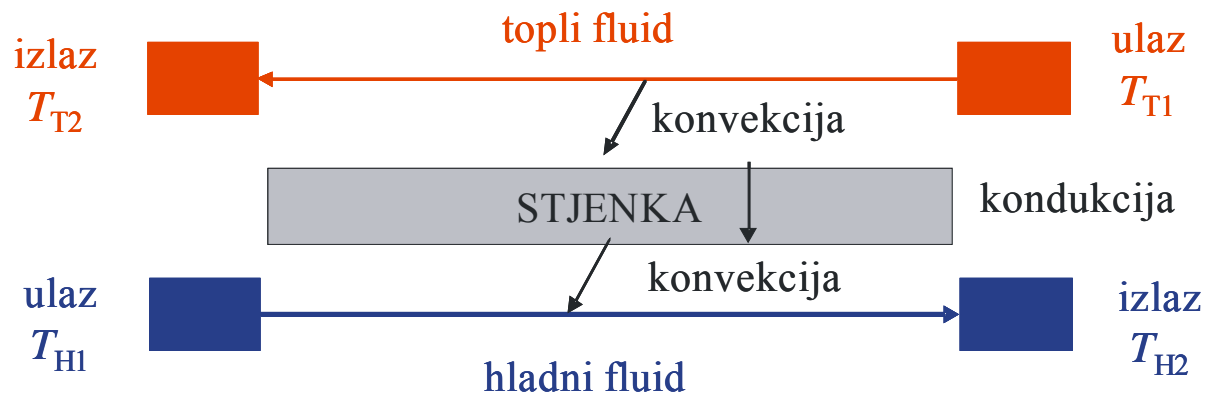


križni

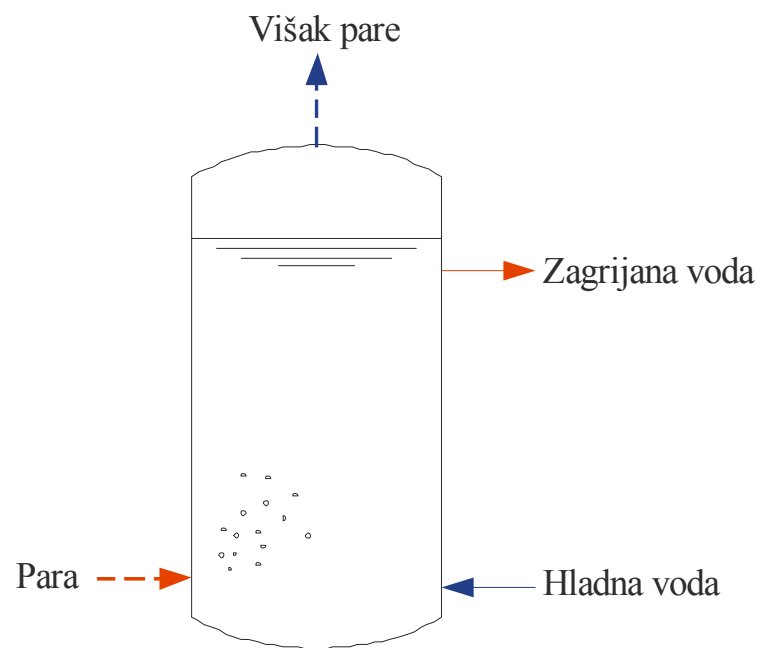
- 
- **ISTOSTRUIJNI**
    - velika brzina izmjene topline na jednoj strani IT-a, a mala na drugoj (gdje je manja razlika temperatura)
  - **PROTUISTRUIJNI**
    - razlika temperatura po duljini izmjenjivača se gotovo ne mijenja, pa je brzina izmjene topline stalna
    - moguće je da su izlazne temperature oba fluida bliske vrijednosti

# Mehanizmi prijenosa topline

- Za opis izmjene topline do koje dolazi u izmjenjivaču topline potrebno je poznavanje principa izmjene topline kondukcijom, konvekcijom i često radijacijom



## Primjer direktnog izmjenjivača topline





# Cijevni izmjenjivači topline

---

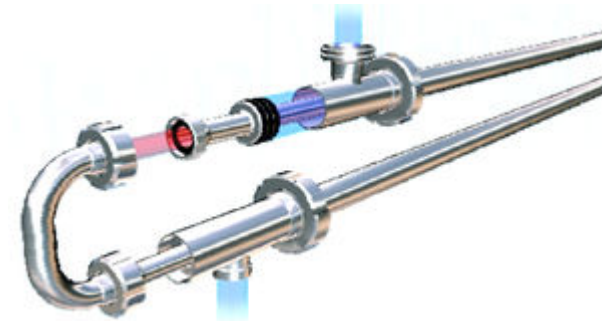
- najčešće korišteni u industriji
- velike količine topline uz niske cijene
- velika površina izmjene topline
  
- široka primjena
  
- Cijev u cijevi
- Snop cijevi u plaštu



## Cijev u cijevi

### Prednosti

- Lagano se ostvaruje protustrujni tok
- Podnosi visoki tlak
- Modularna konstrukcija
- Lagano se održava i popravlja
- Mnogi dobavljači



### Nedostaci

- Postaje skup za izmjenu velike količine topline (>1 MW)

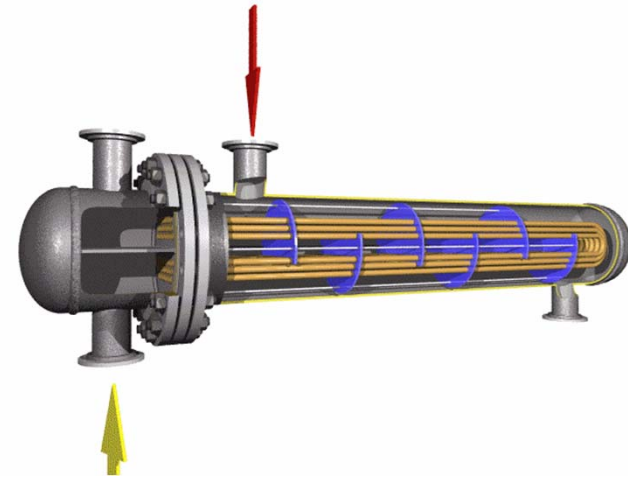
## Snop cijevi u plaštu

### Prednosti:

- Fleksibilan i robustan dizajn
- Lagano održavanje i popravci
- Može se konstruirati tako da se odvoji za čišćenje
- Mnogi dobavljači

### Nedostaci:

- Zauzima mnogo prostora-dodatni prostor za uklanjanje snopa cijevi
- Pločasti jeftiniji za  $p < 16 \text{ bar}$  i  $T < 200 \text{ °C}$



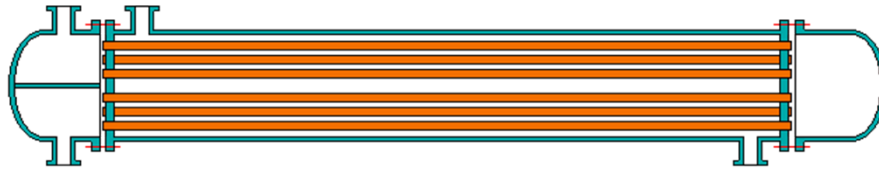
## Opće karakteristike

---

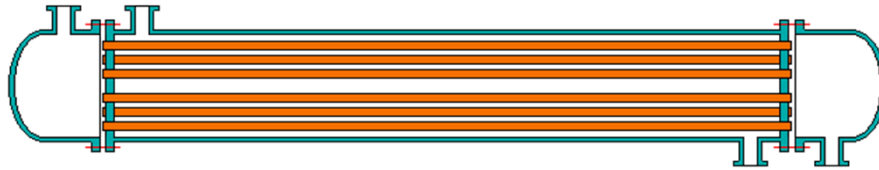
- cijev (snop), plašt
- 1 fluid kroz cijev, a drugi kroz plašt
- cijevi su mehanički povezane sa plaštem
- ulazi i izlazi za fluide
- fluidi ne dolaze u kontakt → ne miješaju se
- izvedba
  - sa fiksnim snopom cijevi
  - sa plivajućom glavom
  - U-cijevi

- 
- cijevi moraju biti u potpunosti ispunjene fluidom kako ne bi postojala mjesta ispunjena zrakom
  - zrak ima nisku toplinsku vodljivost → smanjenje količine prenesene topline
  - smanjenje efikasnosti
  - stvaranje vrućih mjesta gdje može doći do oštećenja cijevi ako se ne hlade ispravno
  - plašt iz istog razloga mora biti ispunjen fluidom
  - može doći do stvaranja zračnih džepova → ventili

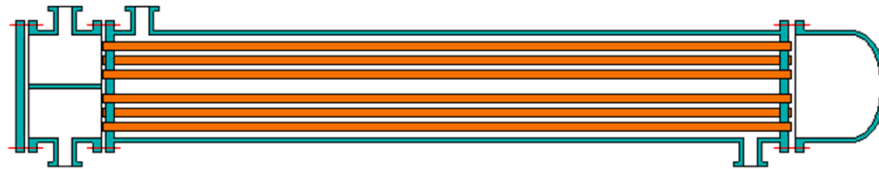
## primjeri



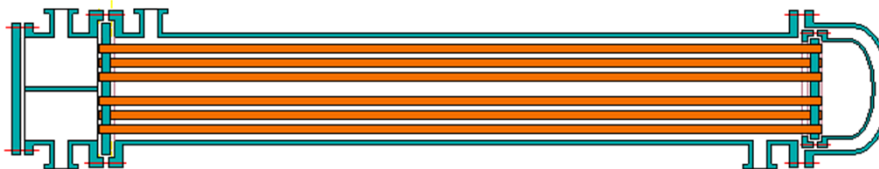
BEM – (IT 1-2)



BEM – (IT 1-1)



AEM – (IT 1-2)



AES – (IT 1-2)

# Toplinska ekspanzija

---

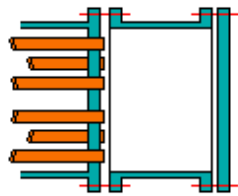
- fluidi različitih T, protoka, toplinskih svojstava → rastezanje cijevi i plašta
- velike razlike u temperaturama:
  - deformacija plašta, cijevi, pucanje cijevi ili su cijevi izbačene iz snopa
- fiksni snop cijevi jako osjetljiv
- → ugrađuju se EKSPANZIJSKI SPOJEVI
- PLIVAJUĆA GLAVA- pričvršćene iznutra za plašt
- U-CIJEVI- teško čišćenje i zamjena



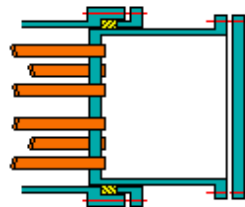
- 
- različiti metali se različito rastežu pri istim temperaturnim razlikama
  - isti metal se različito rasteže pri različitim temperaturama
  - temperature nisu iste po duljini izmjenjivača
  - plašt i cijevi su uglavnom iz različitih materijala
  - stjenke cijevi su male debljine → može doći do savijanja, pucanja i izbacivanja cijevi iz snopa

- jednostavni IT s fiksnim snopom cijevi koristi se samo kada su razlike temperatura između fluida u cijevima i plaštu male
- izmjenjivač topline s plivajućom glavom → velike temperaturne razlike → plašt i cijevi mogu ekspandirati neovisno jedno o drugome
- U-cijev → svaka se cijev može neovisno rastezati → samo kada se mogu cijevi čistiti kemijski

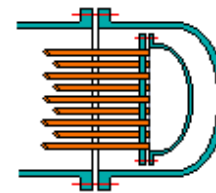
Izmjenjivač topline s fiksnim snopom cijevi



Izmjenjivač topline s plivajućom glavom

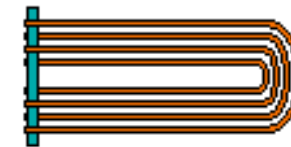


pomične cijevi

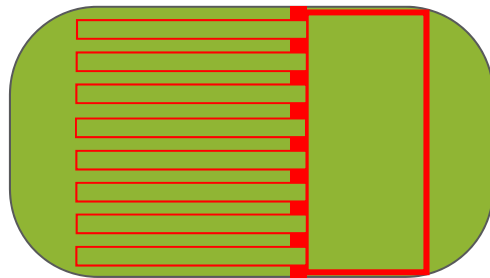


pomična glava

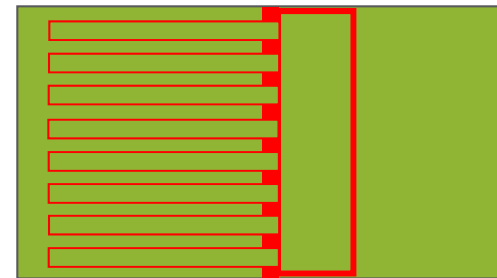
Izmjenjivač topline s U- cijevi







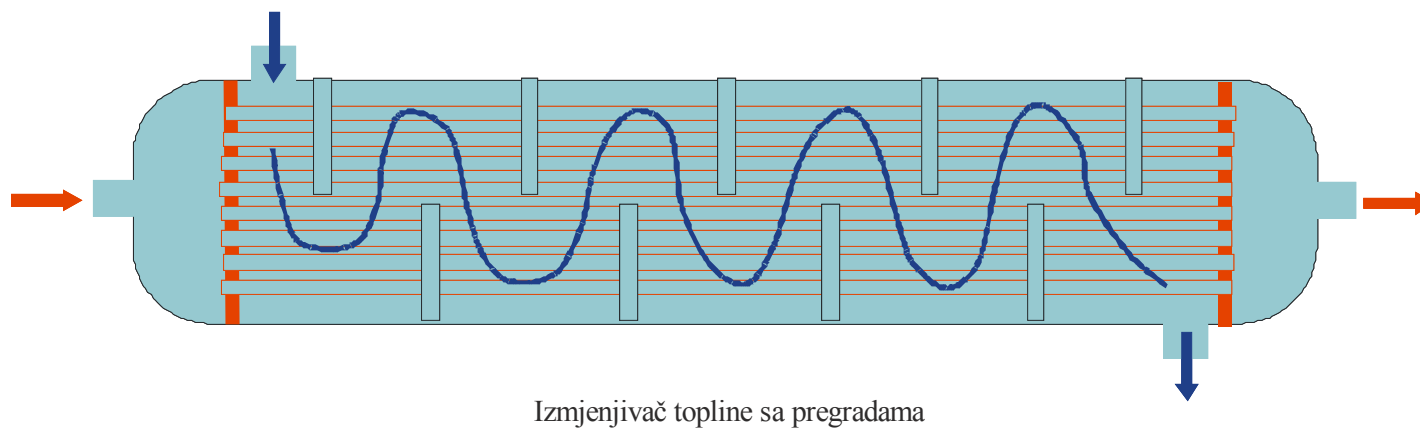
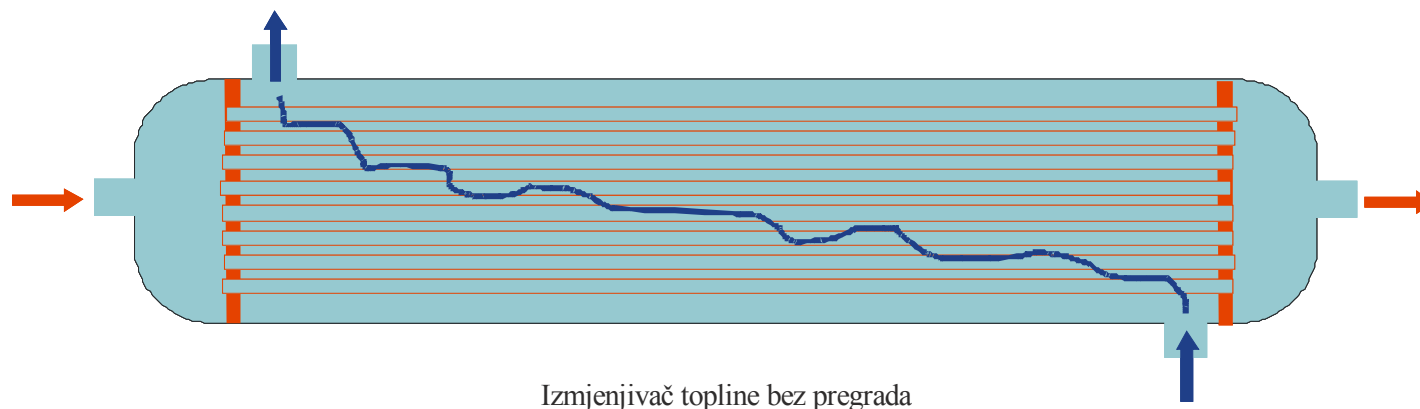
Pomične cijevi



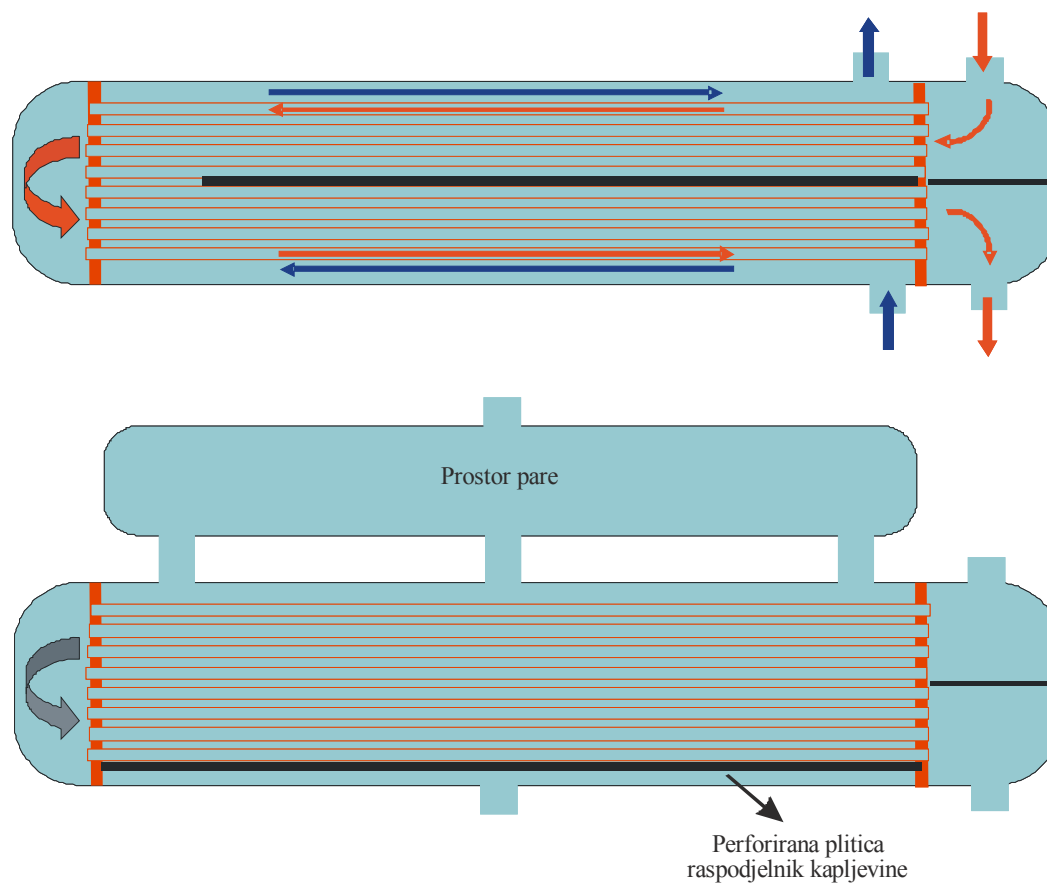
Pomična glava

## Pregrade

- Pregrade imaju trostruku ulogu: pridržavaju cijevi, održavaju cijevi na razmaku i usmjeravaju fluid na strani plašta.
- Pregrade ne ispunjavaju cijeli poprečni presjek plašta
- Loše odabran odsječak rezultira lošom raspodjelom fluida u plaštu, većim padovima tlaka i mrtvim zonama iza pregrada (stagniranje fluida).
- Razmak između pregrada i odsječak pregrade odabiru se tijekom dizajna izmjenjivača topline kako bi se osigurala najveća brzina strujanja fluida i brzina prijenosa topline uz dopustivi pad tlaka.
- Za horizontalne izmjenjivače topline orijentacija reza pregrada je bitna. Ako nema fazne promjene, rez mora biti horizontalan. Zbog toga fluid struji gore-dolje čime se sprečava stvaranje slojeva, i to toplijeg fluida pri vrhu a hladnijeg pri dnu. Ako fluid u plaštu kondenzira rez je vertikalna kako bi se osigurao tok kondenzata prema izlazu bez značajnog zadržavanja kapljevine pregradom. Ako dolazi do vrenja pregrade mogu biti ili vertikalne ili horizontalne.



# Uzdužna pregrada



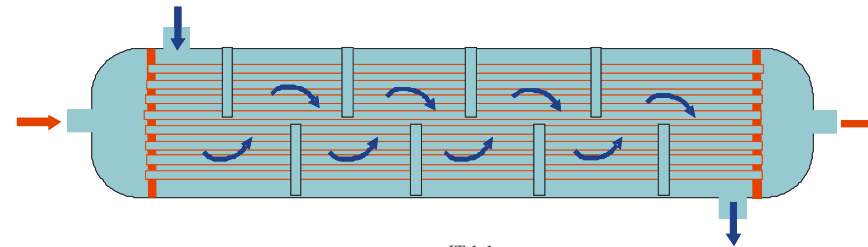
## Izmjenjivači topline složene geometrije

---

- jedan prolaz → fluid kroz cijevi struji jedan puta od jednog do drugog kraja izmjenjivača
- Složena geometrija → višestruko prolazi kroz plašt odnosno cijevi IT
- broj prolaza ograničen → do 8
- Općenito se označava IT broj prolaza kroz plašt – broj prolaza kroz cijevi

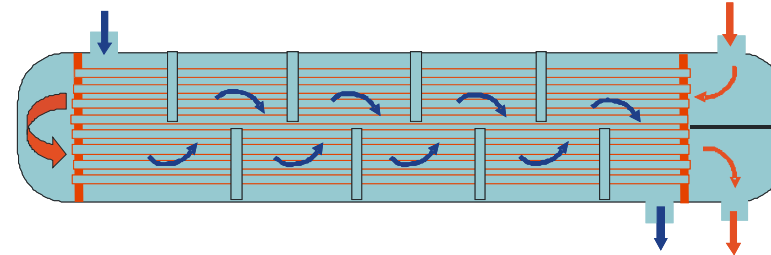


1 prolaz kroz plašt i 1 prolaz kroz cijevi



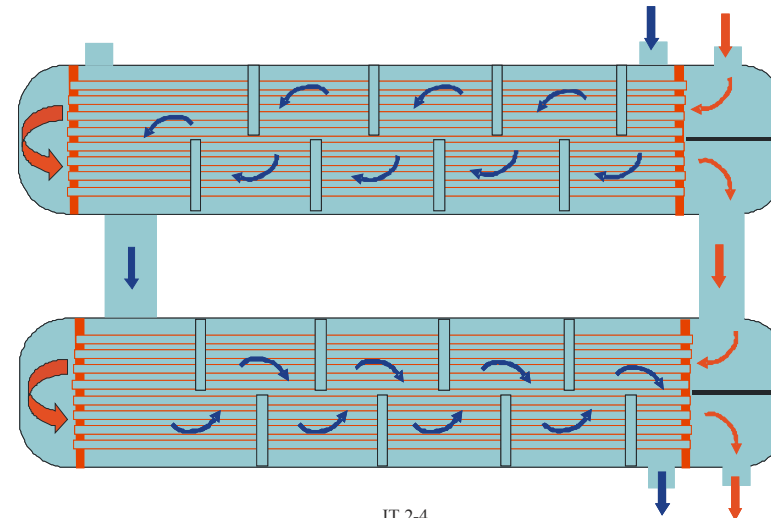
IT 1-1

1 prolaz kroz plašt i 2 prolaza kroz cijevi



IT 1-2

2 prolaza kroz plašt i 4 prolaza kroz cijevi



IT 2-4

# Dizajn izmjenjivača topline

---

Obuhvaća:

- toplinsku analizu procesa
- procjenu snage pumpe
- procjenu veličine i težine uređaja
- pad tlaka
- cijenu
- odabir fluida u cijevi i u plaštu

# Odabir mjesta strujanja fluida

- značajan utjecaj na izvedbu, ekonomski aspekt i održavanje izmjenjivača topline

Viskozni fluid

Naslage

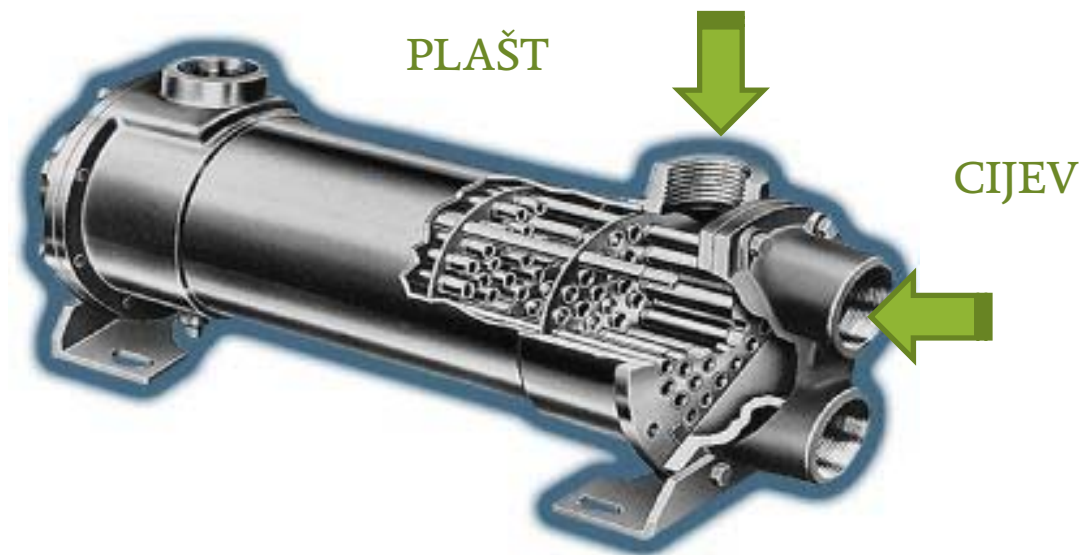
Korozija

Viši tlak

$Re < 200$

Plin, para

Niski  $\alpha$





- 
- fluid koji izaziva stvaranje više naslaga ili je korozivan trebao bi strujati kroz cijevi
  - mnogo jednostavnije čišćenje
  - brzina strujanja fluida u cijevima je veća , što rezultira otkidanjem naslaga
  
  - kroz cijevi fluid sa većim radnim tlakom
  - ukoliko kroz plašt struji fluid pod visokim tlakom debljina stjenke bi morala biti veća

- 
- Viskozniji fluid  $\rightarrow$  u plašt
  - Nastrujavanjem fluida na prepreku stvaraju se vrtlozi (turbulencija)
  - Ako je jedan fluid plin ili para taj se fluid smješta u plašt (veći volumen zauzima)

# Toplinska analiza

---

- ulazne i izlazne temperature oba fluida
  - specifični toplinski kapaciteti toplog i hladnog fluida
  - količina topline koja se mora izmijeniti
  - koeficijenti prijenosa topline,  $\alpha$ , i koeficijent toplinske vodljivosti stjenke,  $\lambda$
  - otpori naslaga (fouling faktor)
  - ODABIR KONFIGURACIJE IT-a
- površina izmjene topline → veličina značajna za dizajn

- Bilancna jednađba

hladni fluid

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_H \cdot c_{p,H} \cdot \Delta T_H$$

topli fluid

$$\dot{Q}_T = \dot{m}_T \cdot c_{p,T} \cdot \Delta T_T$$

- $Q$ , izmijenjena toplina, W
- $m$ , maseni protok,  $\text{kg s}^{-1}$
- $c_p$ , specifični toplinski kapacitet,  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
- $T$ , temperatura, K

# Vodena vrijednost fluida

---

- vodeni ekvivalent ili kapacitivna brzina

$$C = \dot{m} \cdot c_p$$

- $\dot{m}$ , maseni protok,  $\text{kg s}^{-1}$
- $c_p$ , specifični toplinski kapacitet,  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
- $C$ , vodena vrijednost,  $\text{J s}^{-1} \text{K}^{-1}$

- uz pretpostavku da nema gubitaka topline

$$\dot{m}_H \cdot c_{p,H} \cdot \Delta T_H = \dot{m}_T \cdot c_{p,T} \cdot \Delta T_T$$

$$\frac{C_H}{C_T} = \frac{\Delta T_T}{\Delta T_H}$$

- fluid koji ostvari veću razliku temperatura ima manju vodenu vrijednost

$$\Delta T_T > \Delta T_H$$



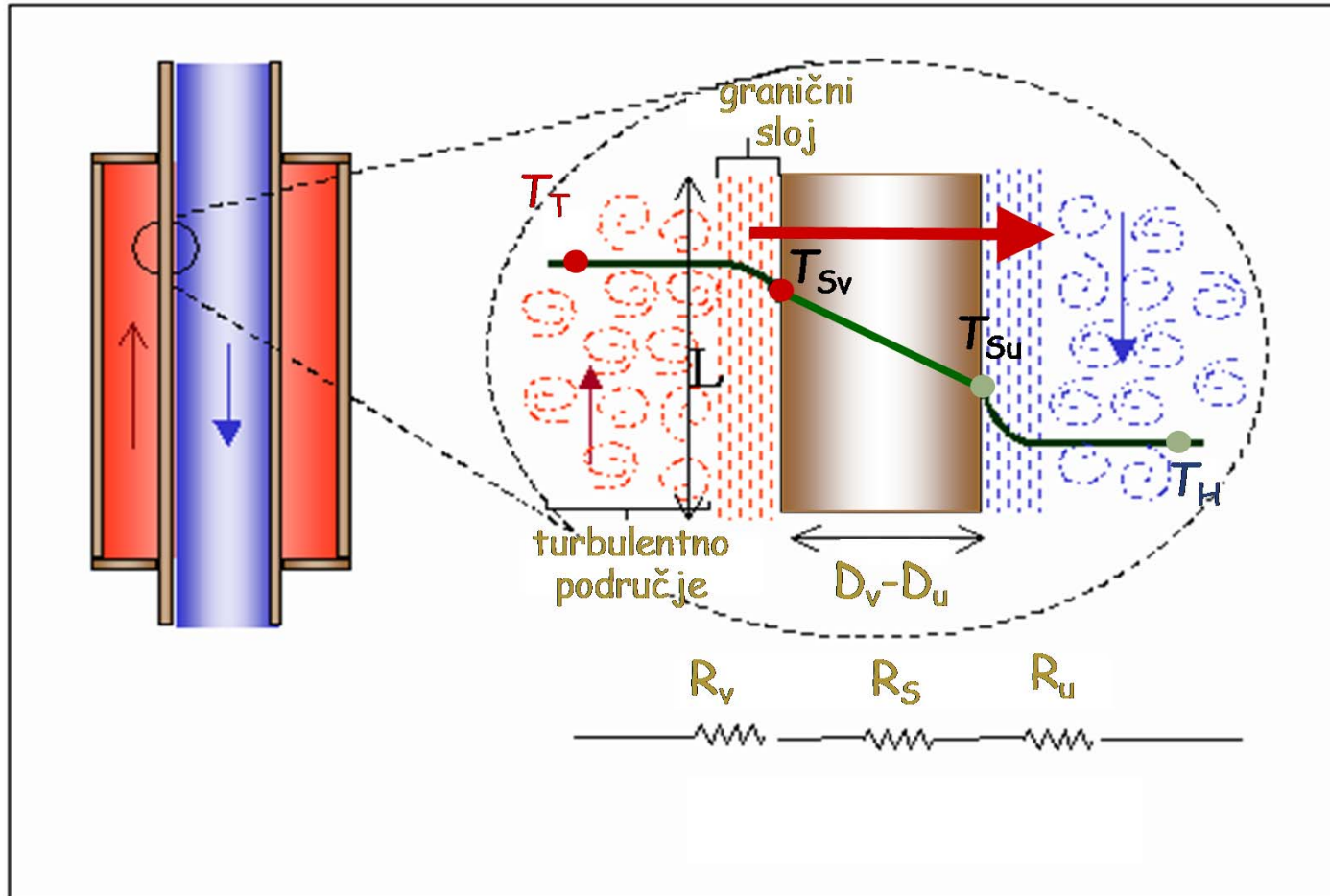
$$C_T < C_H$$

$$C_T = C_{\min}$$

# Kinetička jednačina

$$\dot{Q} = K \cdot A \cdot \Delta T_{LM}$$

- $Q$ , izmijenjena toplina, W
- $K$ , koeficijent prolaza topline,  $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
- $A$ , površina izmjene topline,  $\text{m}^2$
- $\Delta T_{lm}$ , pokretačka sila procesa, K





- obzirom na vanjsku površinu cijevi

$$K = \frac{1}{\left(\frac{D_v}{D_u}\right) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_u} + R_{f,u}\right) + \frac{D_v}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{D_v}{D_u}\right) + R_{f,v} + \frac{1}{\alpha_v}}$$

- obzirom na unutarnju površinu cijevi

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_u} + R_{f,u} + \frac{D_u}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{D_v}{D_u}\right) + \left(\frac{D_u}{D_v}\right) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_v} + R_{f,v}\right)}$$

## Koeficijent prolaza topline

- Za inicijalne vrijednosti uzima se podatak iz tablica (za čiste izmjenjivače topline) ili se koristi nomogram

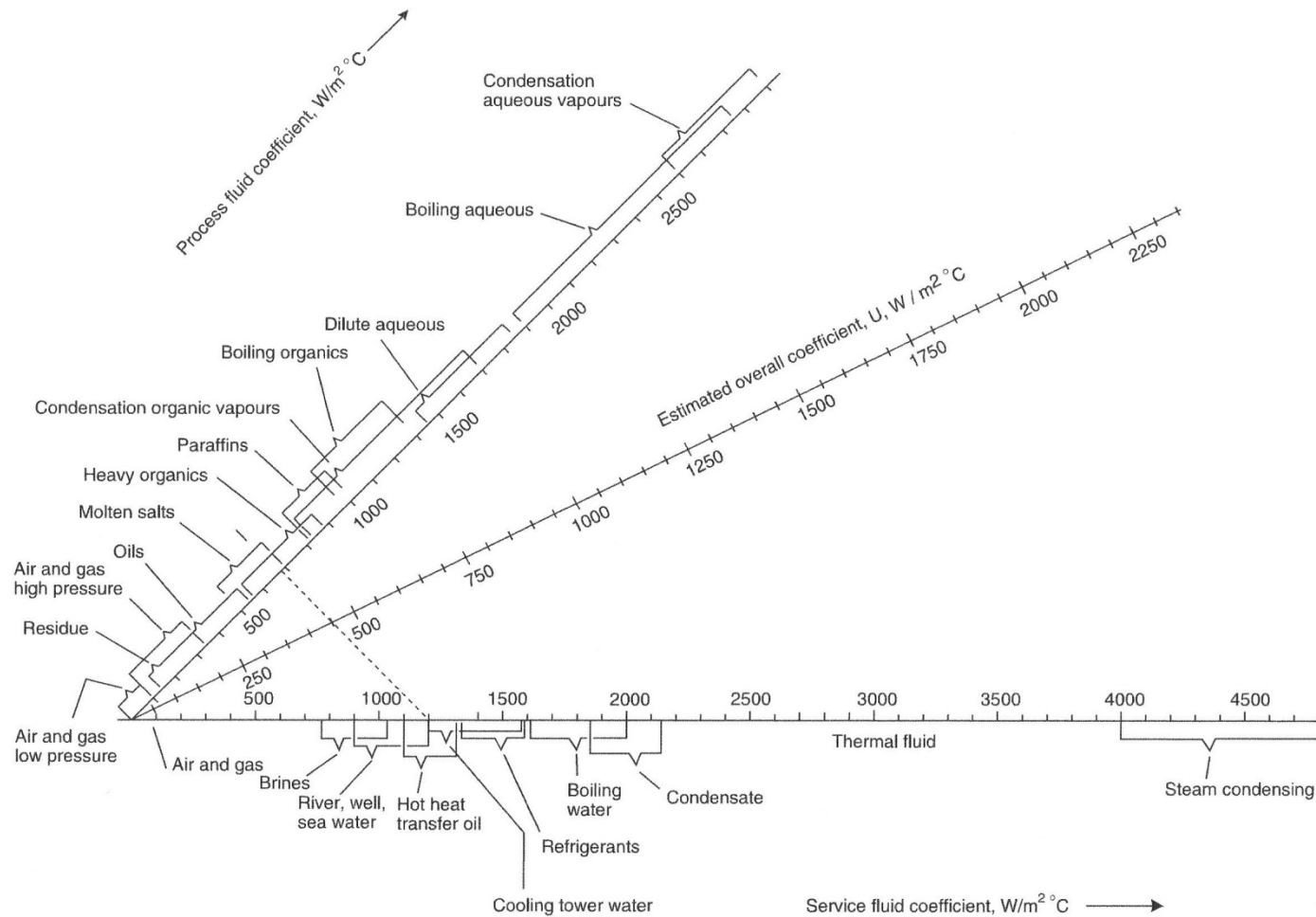
	Topli fluid	Hladni fluid	K, $Wm^{-2}C^{-1}$
IT	voda	voda	800-1500
	org.otapalo	org.otapalo	100-300
	plinovi	plinovi	5-35
Hladnjaci	or.otapalo	voda	250-750
	plinovi	voda	5-35
Grijači	voda	morska voda	600-1200
	para	voda	1500-4000
	para	plinovi	30-300
Kondenzatori	para	org.otapalo	500-1000
	vodena para	voda	1000-1500
	org.pare	voda	700-1000
Isparivači	para	vodena otopina	1000-1500
	para	org.otapala	600-1200

Reaktori s plaštem	Plašt	Reaktor	K [ $W/m^2C$ ]
	Para	Razrjeđena vodena otopina	500 - 700
	Para	Organska otapala	250 - 500
	Voda	Razrjeđena vodena otopina	200 - 500
	Voda	Organska otapala	200 - 300

Zrakom hlađeni izmjenjivači	Radni fluid	K [W/m <sup>2</sup> C]
		voda
	niži CH	300-700
	viši CH	50-150
	plinovi	50-300
	kondenzirajući CH	300-600

Uronjene zavojnice	Zavojnica	Bazen	K [W/m <sup>2</sup> C]
	Prirodna cirkulacija	Para	Razrjeđena vodena otopina
	Vodena otopina	Voda	200 - 500
Prisilna cirkulacija	Para	Razrjeđena vodena otopina	800 - 1500
	Vodena otopina	Voda	400 - 700

# Nomogram za određivanje koeficijenta prolaza topline



## Fouling faktor – otpori naslaga

- rad izmjenjivača topline ovisi o površini izmjene topline koja mora biti čista i nekorodirana
- otpori naslaga povećavaju otpore prijenosu topline i  $\Delta p$ , što rezultira smanjenjem djelotvornosti uređaja
- Fouling faktor se određuje eksperimentalno testirajući izmjenjivač topline sa i bez naslaga

- $10^{-5} < R_f < 10^{-4}$  
$$R_f = \frac{1}{K_{\text{sa naslagama}}} - \frac{1}{K_{\text{bez naslaga}}}$$

- Fouling – bilo koja promjena na stijenci izmjenjivača topline, posljedica koje je smanjen prijenos topline
- kristalizacija
- taloženje organskih tvari
- polimerizacija i oksidacija
- taloženje mulja, hrđe ili prašine
- biološke naslage
- korozija



## Otpori naslaga

- Teško se predviđa pa se procjenjuje na temelju iskustva

Fluid	Koeficijent (W/m <sup>2</sup> °C)	Otpor (m <sup>2</sup> °C/W)
Riječna voda	3000 - 12000	0.0003 – 0,0001
Morska voda	1000 - 3000	0.001 – 0,0003
Rashladna voda (tornjevi)	3000 - 6000	0.0003 – 0,00017
Meka gradska voda	3000 - 5000	0.0003 – 0,0002
Tvrda gradska voda	1000 - 2000	0.001 – 0,0005
Kondenzat pare (bez ulja)	1500 - 5000 4000 - 10000	0.00067 – 0,0002 0.0025 – 0,0001
(ulje u tragovima)	2000 - 5000	0.0005 – 0,0002
Rashlađena slana voda	3000 - 5000	0.0003 – 0,0002
Zrak i industrijski plinovi	5000 - 10000	0.0002 – 0,0001
Dimni plinovi	2000 - 5000	0.0005 – 0,0002
Organske pare	5000	0.0002
Organske kapljevine	5000	0.0002
Laki ugljikovodici	5000	0.0002
Teški ugljikovodici	2000	0.0005
Vrijuće org. Tvari	2500	0.0004
Kondenzirajuće org. tvari	5000	0.0002
Fluidi za prijenos topline	5000	0.0002
Vodene otopine soli	3000 - 5000	0,0003 – 0,0002

# Uklanjanje naslaga

---

- Mehaničko čišćenje
  - struganje, četkanje
  - fluid u cijev
- Kemijsko čišćenje
  - otapalo ili kemijska reakcija
  - plašt
- Ispiranje





## Kemijsko čišćenje

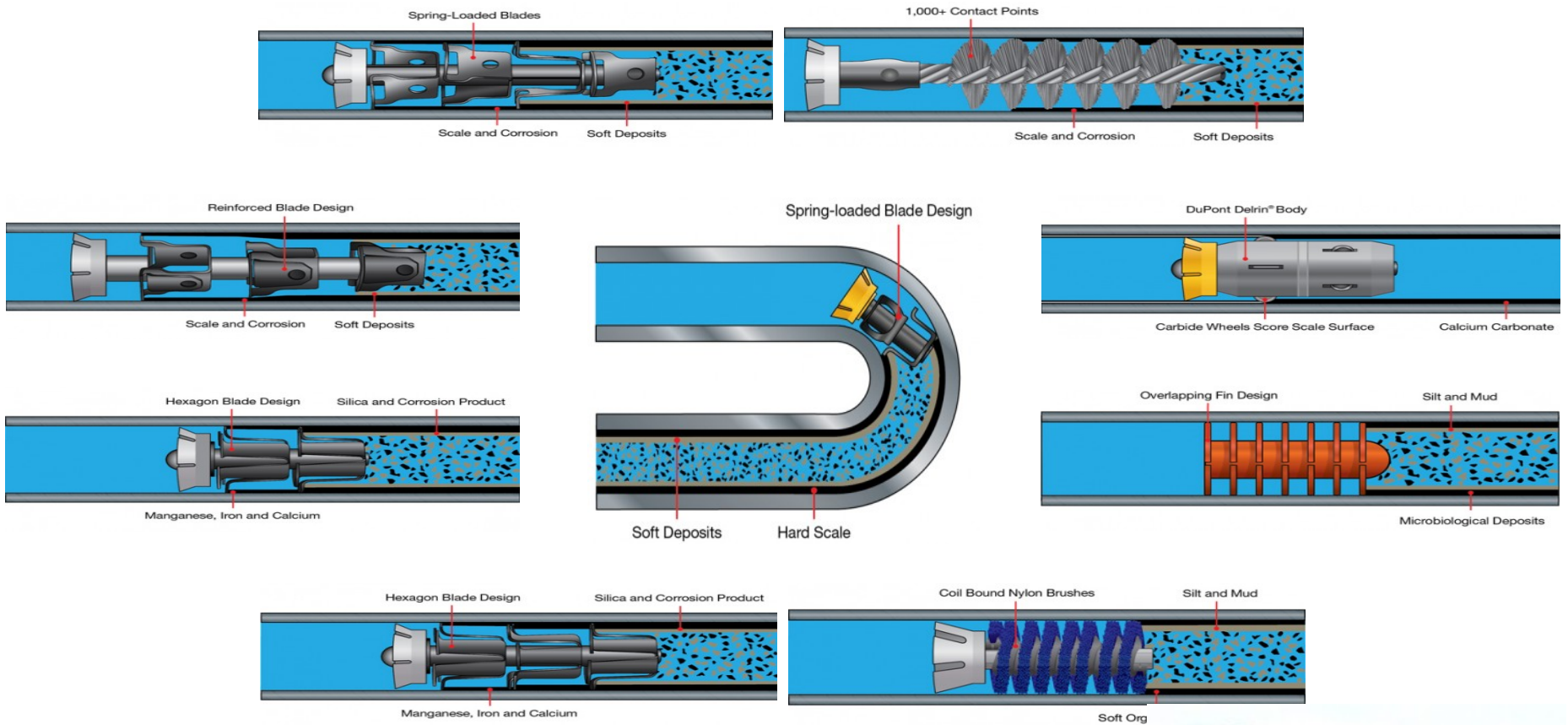


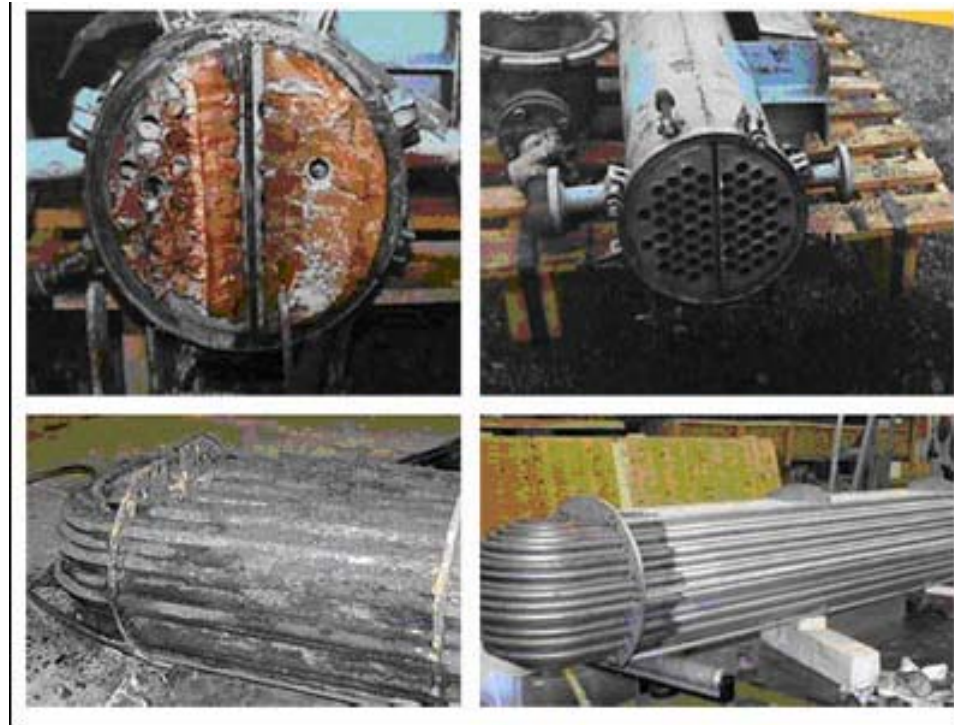
## Ispiranje





FKIT MCMXIX

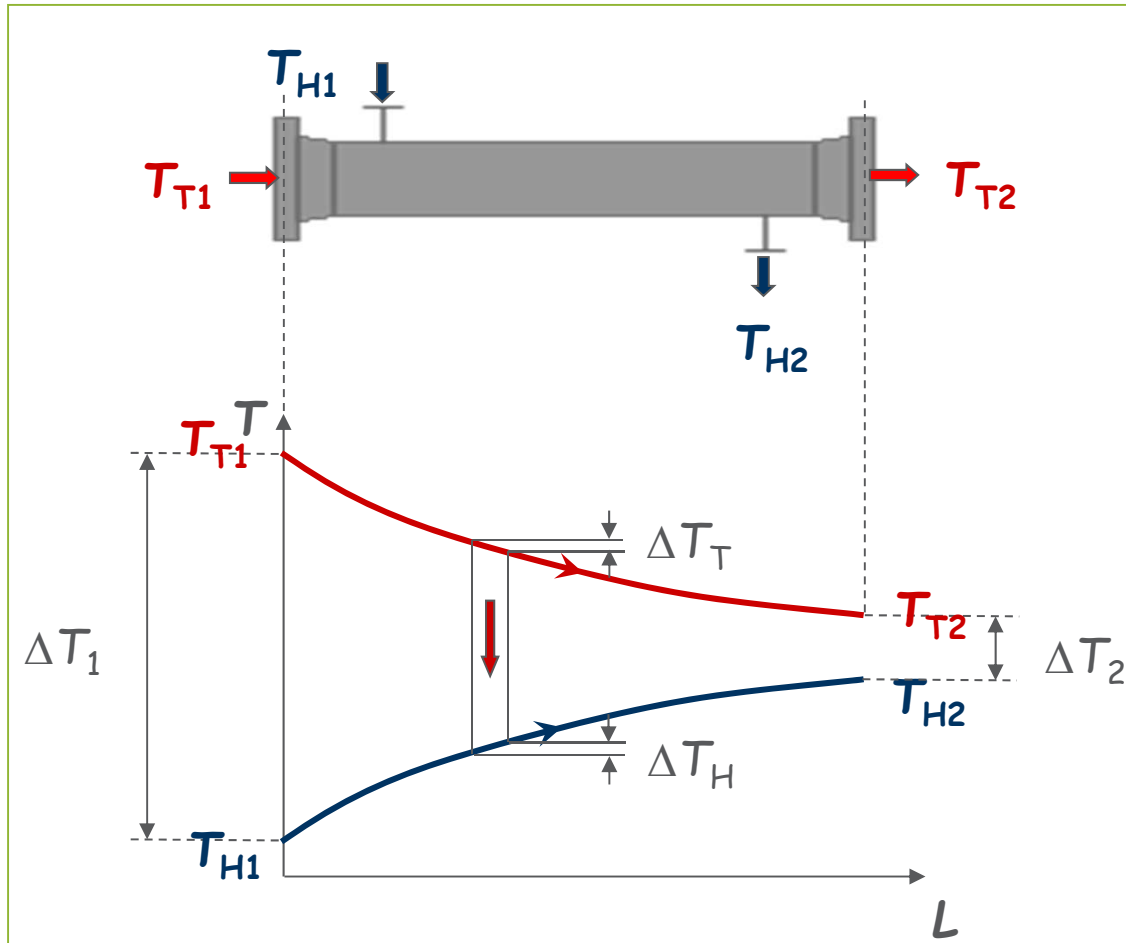




## Pokretačka sila, $\Delta T_{lm}$

- kod realnog izmjenjivača topline  $K=f(L)$  jer se koeficijenti prijelaza topline mijenjaju po duljini izmjenjivača
- ukupna količina prenesene topline računa se iz kinetičke jednadžbe:
- za preliminarni se proračun uzima da je  $K=const.$
- $\alpha...$  koeficijent prijelaza topline ovisi o vodljivosti fluida i debljini toplinskog graničnog sloja
- debljina sloja ovisi o režimu strujanja ( $Re=f(v, d, \rho, \eta)$ ), pri čemu su  $\rho, \eta$  podložni temperaturnoj promjeni

# T-L diagram, IT 1-1, istostrujni



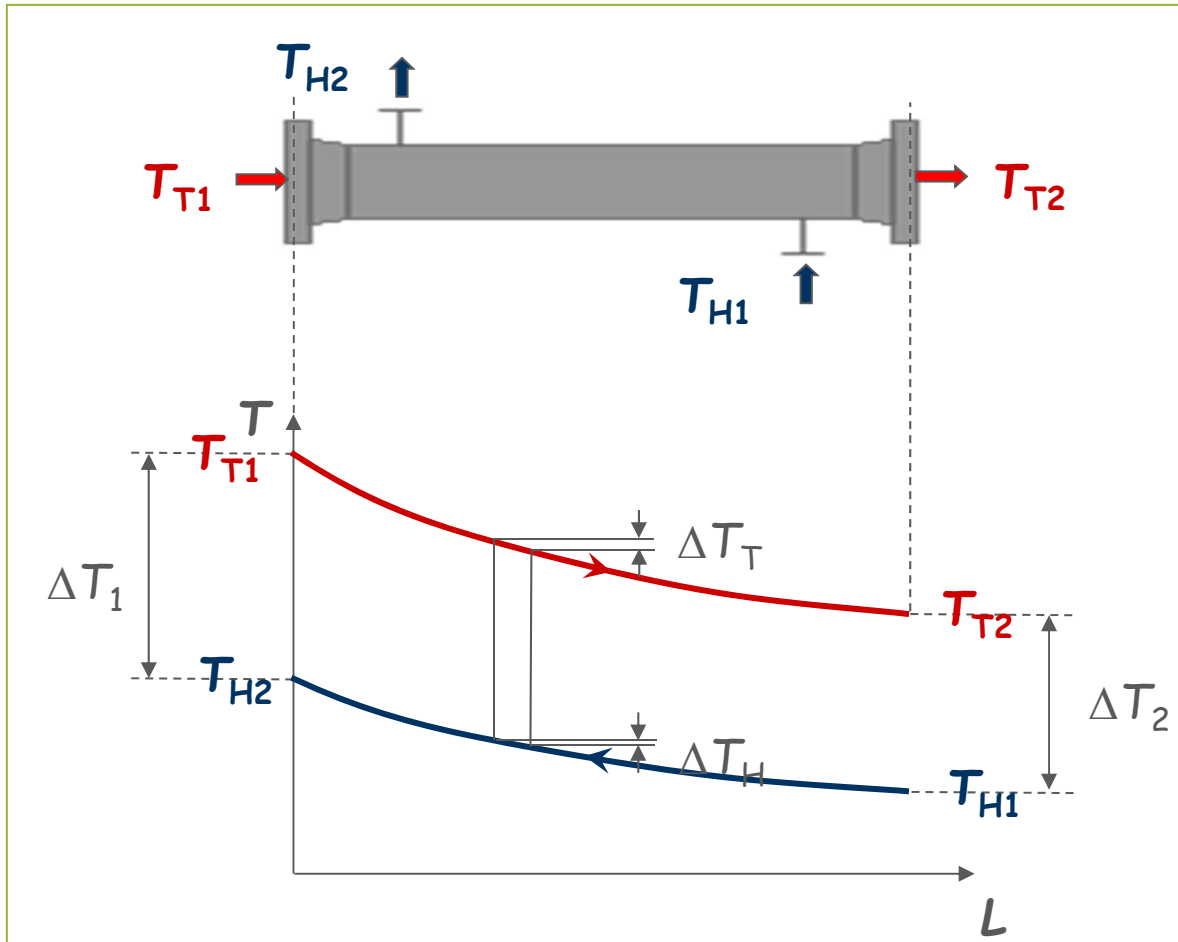
$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

$$\Delta T_1 = T_{T1} - T_{H1}$$

$$\Delta T_2 = T_{T2} - T_{H2}$$



# T-L dijagram, IT 1-1, protustrujni



$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

$$\Delta T_1 = T_{T1} - T_{H2}$$

$$\Delta T_2 = T_{T2} - T_{H1}$$

# Maksimalna razlika temperatura

---

- Razlika ulaznih temperatura toplog i hladnog fluida

$$\Delta T_{\max} = T_{T1} - T_{H1}$$

## Izmjenjivači topline složene geometrije

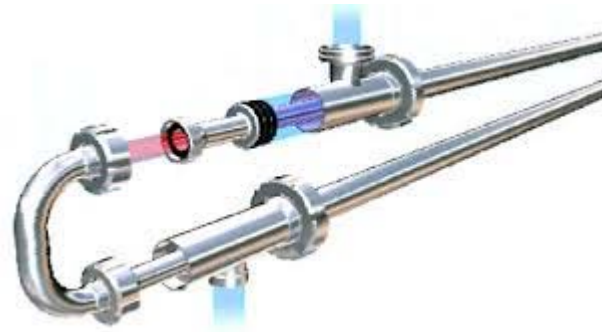
- u izmjenjivaču topline složene geometrije izmjenjuje se veća količina topline između toplog i hladnog fluida
- ako je površina izmjene topline ista, za jednaku količinu izmijenjene topline, izmjenjivač složene geometrije može se smjestiti na manjem prostoru
- svode se na jednostruki protustrujni izmjenjivač topline tipa 1-1 (1 prolaz kroz plašt i 1 prolaz kroz cijev)
- količina topline koja se izmjenjuje između toplog i hladnog fluida u izmjenjivaču topline

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta T_{LM} \cdot F$$

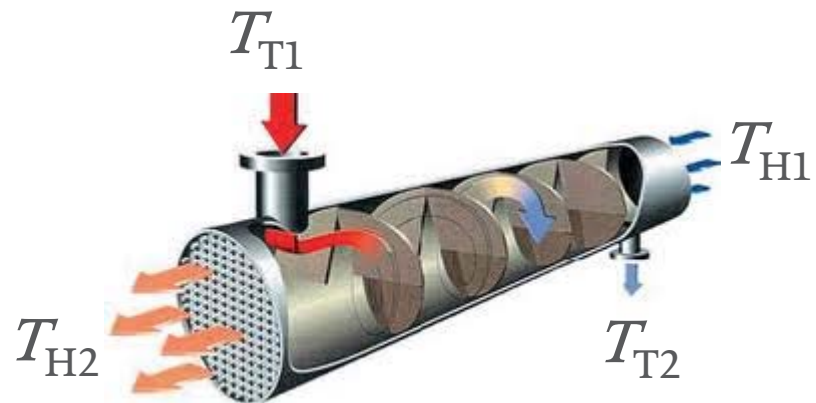


# Izmjenjivač topline tipa 1-1

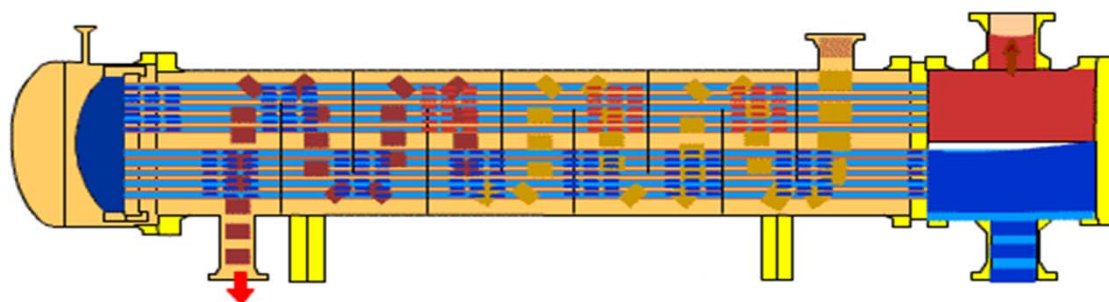
- Cijev u cijev



- Snop cijevi

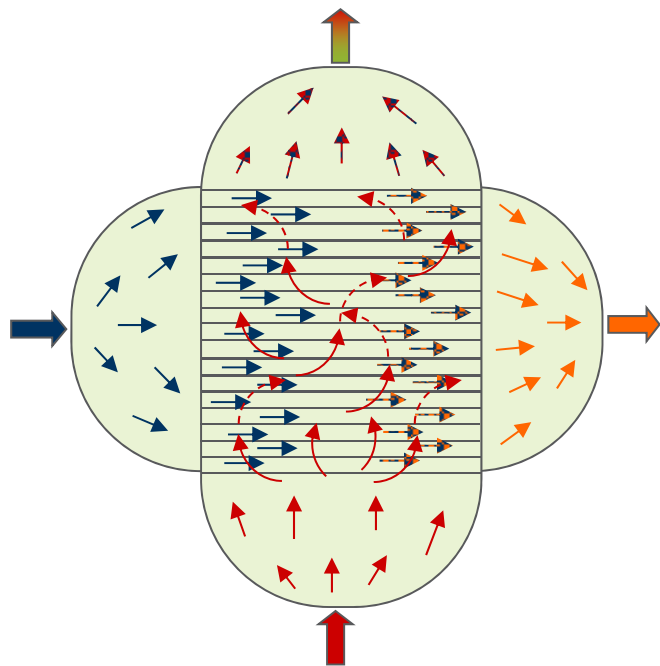


# Izmjenjivač topline tipa 1-2

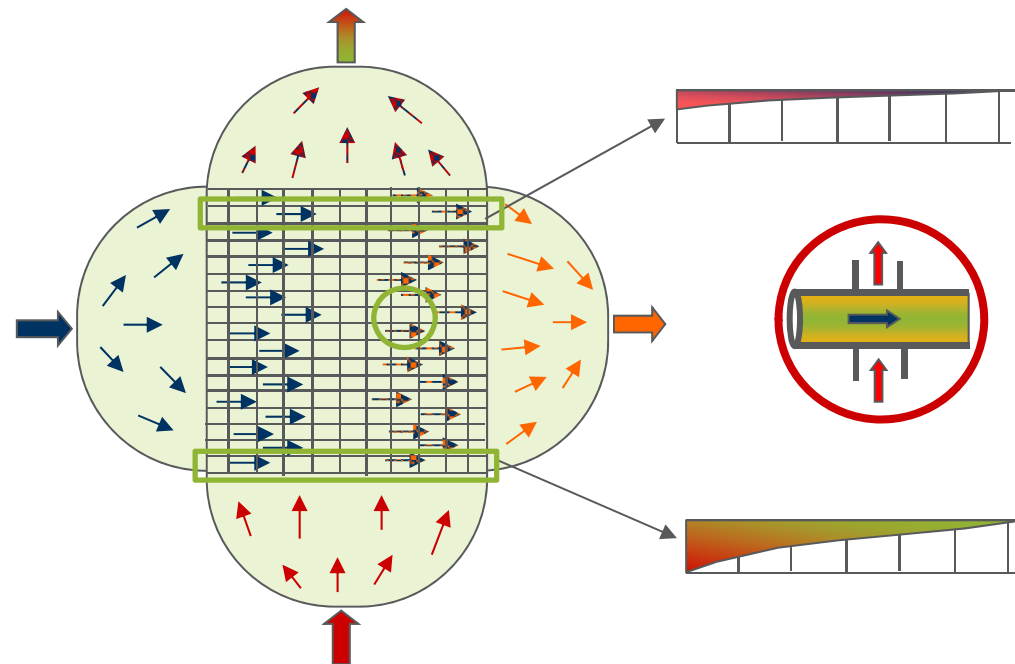


## ■ Križni izmjenjivač topline

### ■ Miješani tok fluida



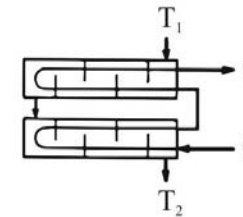
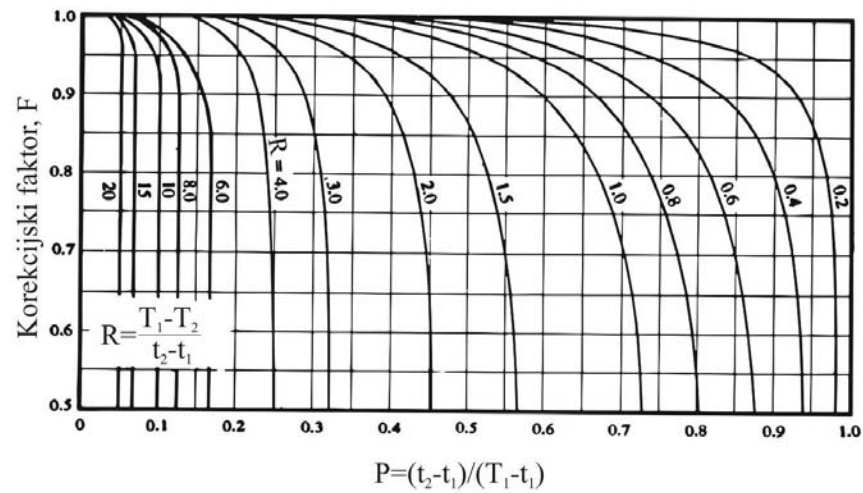
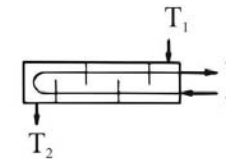
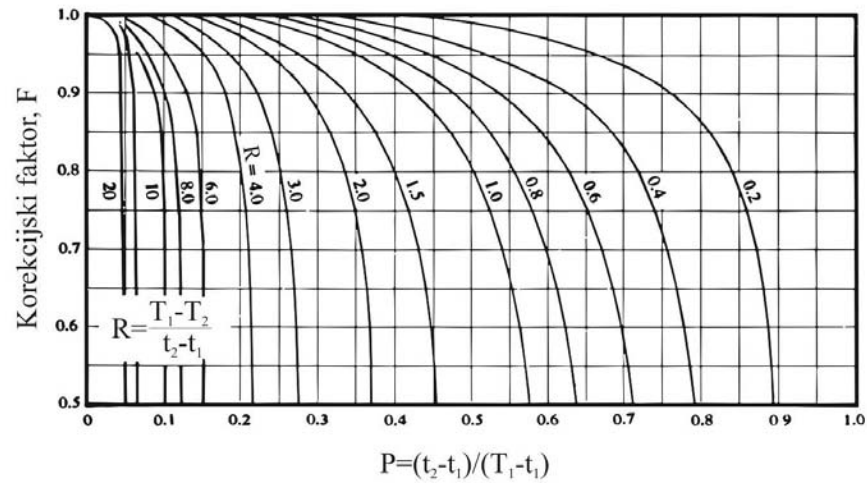
### ■ Oba fluida nemiješana

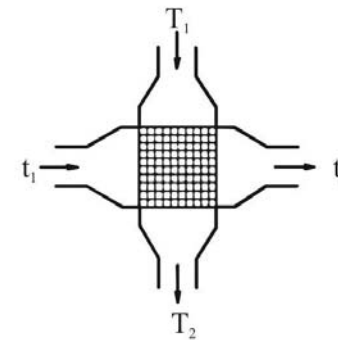
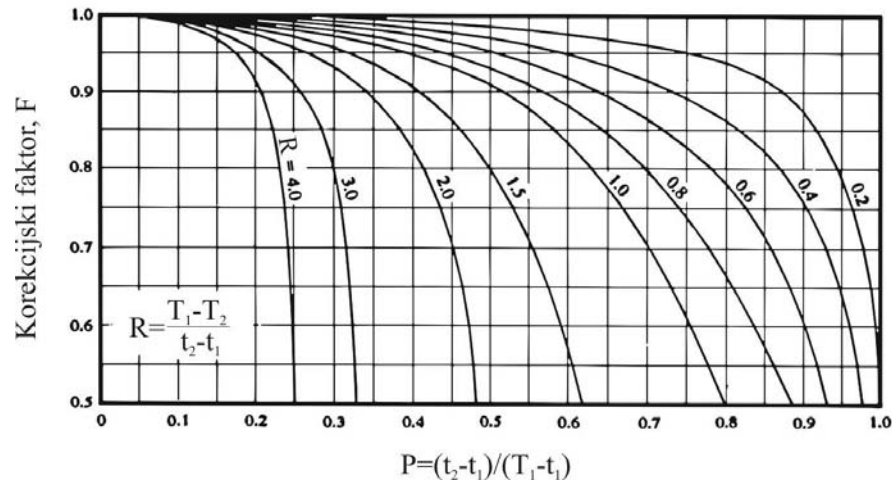
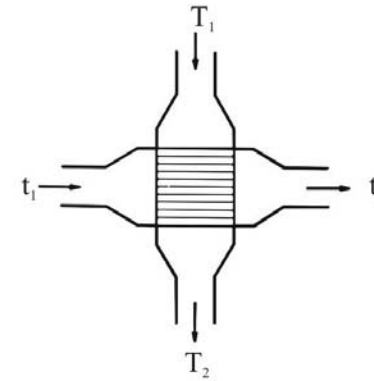
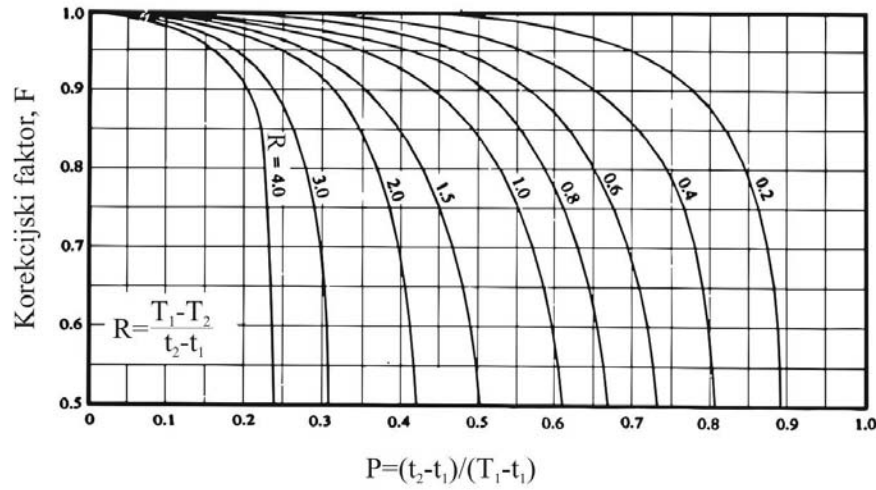


## Korekcijski faktor, F

- $F=0..1$  korekcijski faktor  $F=f(P, R, \text{geometrija})$
- F korigira složenu geometriju i omogućava korištenje jednostavnog izraza za tok topline
- za izračunavanje parametara P i R potrebno je poznavanje ulaznih i izlaznih temperatura oba fluida
- ako je  $F < 0,75$  izmjenjivač topline nije dobar
- za različite geometrije izmjenjivača postoje dijagrami iz kojih se uz poznate parametre P i R može očitati korekcijski faktor F

$$P = \frac{\Delta T_{cijev}}{T_{T1} - T_{H1}} \qquad R = \frac{\Delta T_{plajt}}{\Delta T_{cijev}}$$





## Broj jedinica prijenosa, NTU

- mjera veličine izmjenjivača topline
- direktno je u funkciji površine izmjene (geometrijske karakteristike)
- Izjednačavanjem bilancne i kinetičke jednadžbe

$$c_{\min} \cdot \Delta T = K \cdot A \cdot \Delta T_{LM}$$

$$NTU = \frac{\Delta T}{\Delta T_{LM}} = \frac{K \cdot A}{c_{\min}}$$

- izmjenjivač topline koji po jedinici volumena ima najveću površinu → DOBAR IT

# Efikasnost izmjenjivača topline, $\varepsilon$

Računski

$$\varepsilon = \frac{Q_{st\ var\ na}}{Q_{max}}$$

$$\varepsilon = \frac{c_{min} \cdot \Delta T}{c_{min} \cdot \Delta T_{max}} = \frac{\Delta T}{\Delta T_{max}}$$



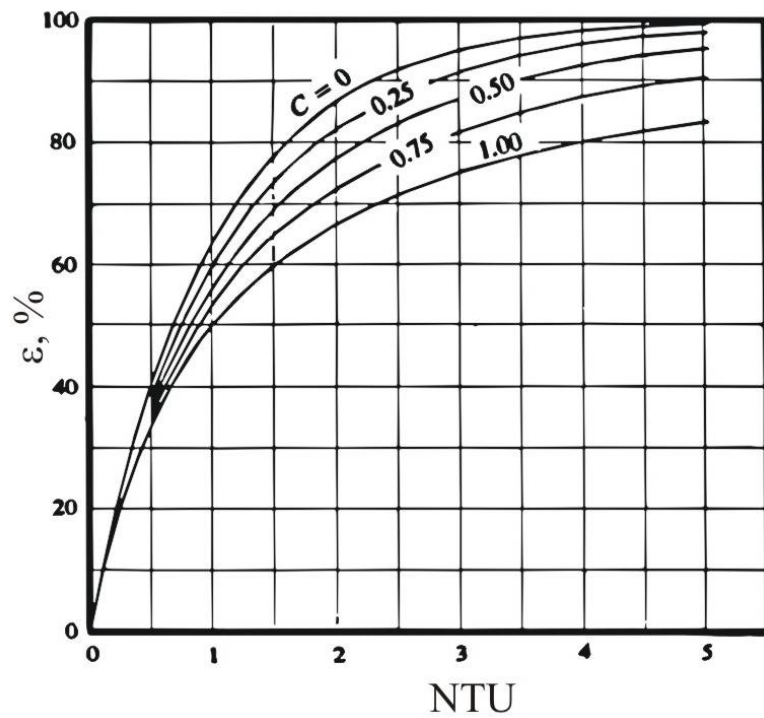
# Grafički

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

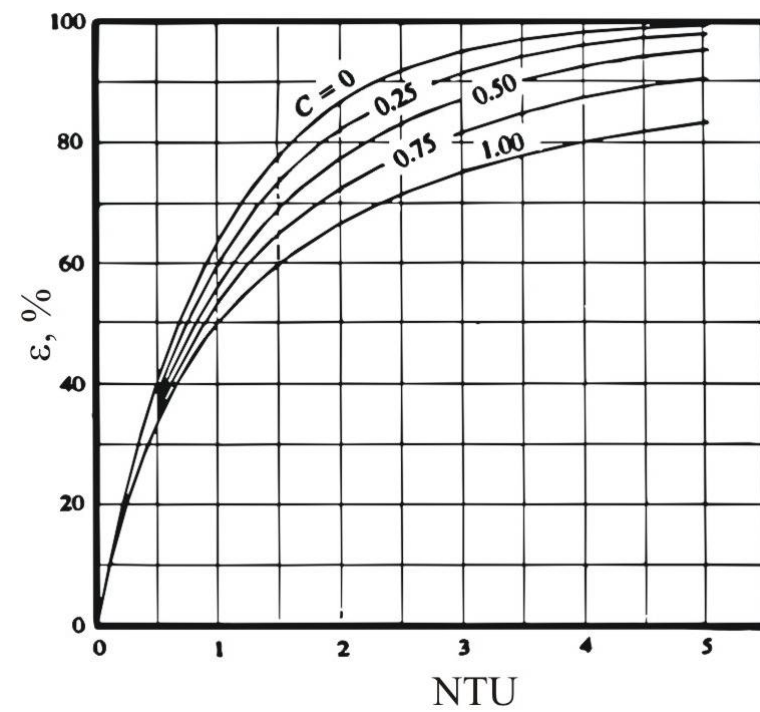
$$NTU = \frac{K \cdot A}{C_{\min}}$$

$$\varepsilon = f(C, NTU)$$

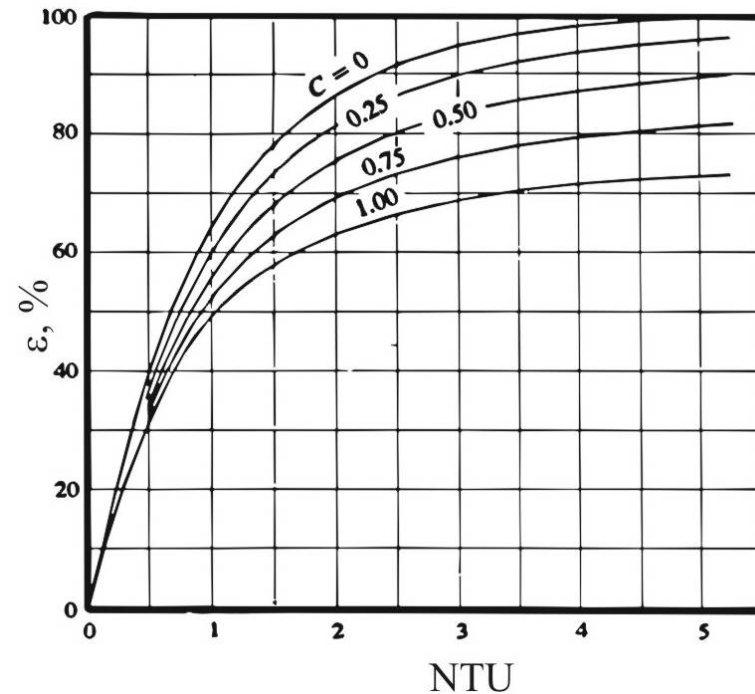
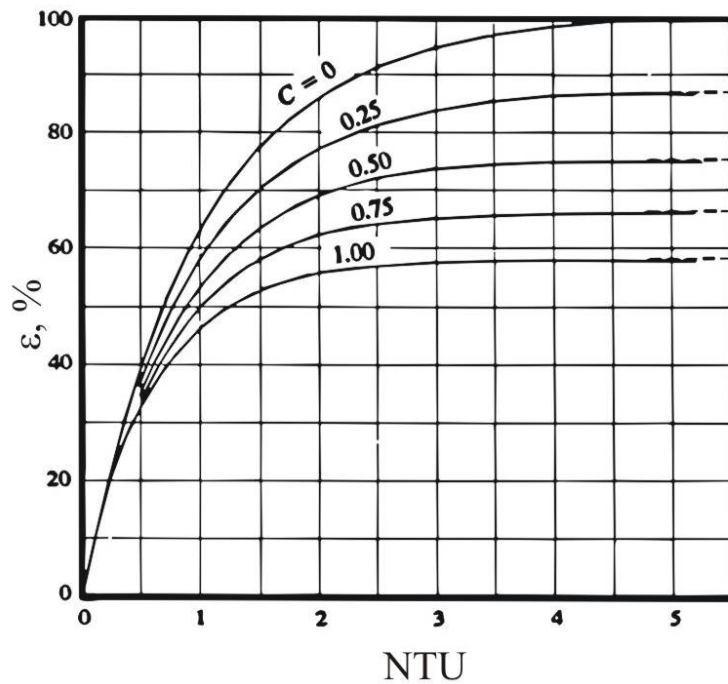
- jednostruki istostrujni



- jednostruki protustrujni

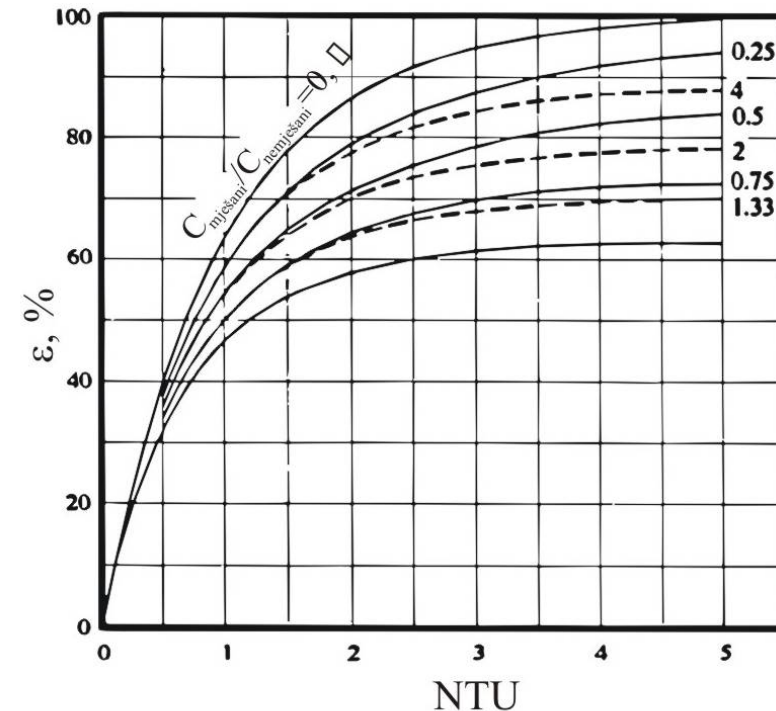
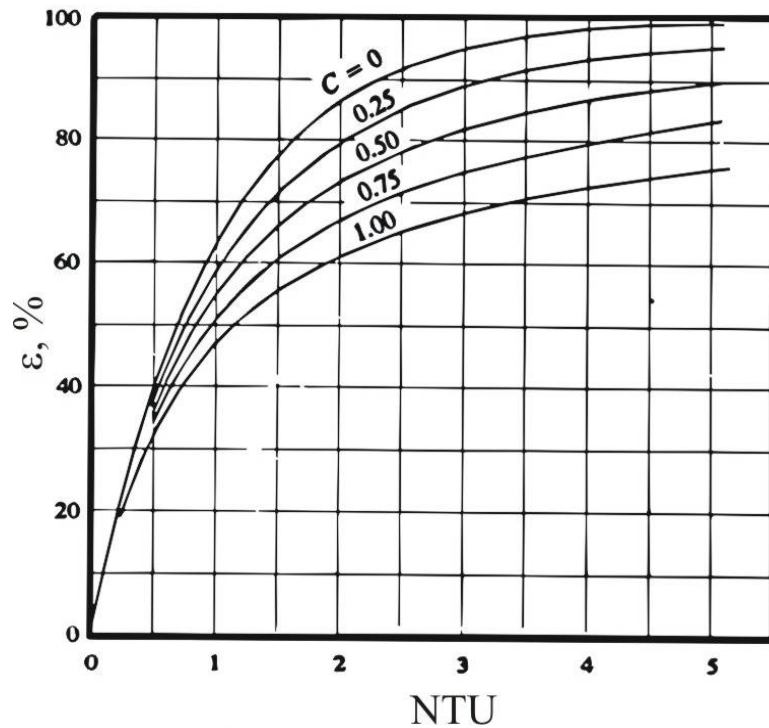


- izmjenjivač topline 1-2 (1-n)
  - n prolaza kroz plašt
  - 2n, 4n, 6n prolaza kroz cijev



■ izmjenjivač topline s križnim tokom

■ oba nemiješana



križni izmjenjivač sa jednim mješanim fluidom

-----  $C_{\min}$  - nemješani  
 —————  $C_{\max}$  - mješani