

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za matematiko in fiziko

# Toplotni izmenjevalniki (uparjalniki in kondenzatorji)

Reaktorska tehnika in energetika

Avtor: Angelo Mohorovič  
Mentor: prof. dr. Iztok Tiselj

# Vsebina

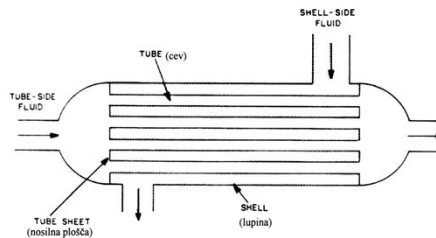
- Toplotni izmenjevalniki
  - vrste,
  - prenos toplote
- Uparjalnik
  - opis,
  - toplotni proces,
  - kaluženje
- Kondenzator
  - proces,
  - prenos toplote,
  - ejektorji,
  - hladilni stolpi

# Toplotni izmenjevalniki (TI)

TI je naprava za nadzorovano prenašanje toplote med tekočinama.

## 1. Vrste TI:

- a) Mešalni TI (tekočini se mešata)
- b) Površinski TI (tekočini se ne mešata)
  - I. PWR - Tlačnovodna jed. elekt (NEK)
  - II. Materiali:
    - Ogljikovo jeklo (dodati kemične snovi za zmanjšanje korozije)
    - Avstenitno jeklo
    - Incalloy – zlitine nikelj-krom-železo
- c) Neregenerativni TI
  - prenaša toploto med tekočinama v dveh različnih sistemih
  - v PWR se uporabljajo le za odzemanje toplote iz določenega sistema
  - odvzeta toplota se nekoristno zavrže

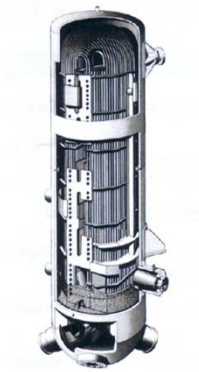


Tipični cevni TI

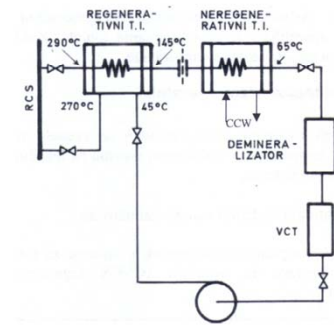
- Toplotni izmenjevalnik je naprava, v kateri se nadzorovano prenaša toplota med dvema tekočinama.
- Separacija tekočin preprečuje širjenje radioaktivnih snovi in omogoča boljše obvladovanje korozije.
- Pri cevnih TI je v ohišju snop cevi (tube), po katerih se pretaka ena tekočina (višja temperatura in tlak), druga pa obliva cevi (shell).

### č) Regenerativni TI

- toplota se prenaša iz tekočine z višjo temperaturo na tekočino z nižjo temperaturo v istem sistemu
- Primeri:
  - Sistem za uravnavanje kemične sestave in volumna
  - Sistem za toplotno regeneracijo borove kisline
  - Nizkotlačni in visokotlačni grelniki v sekundarnem sistemu



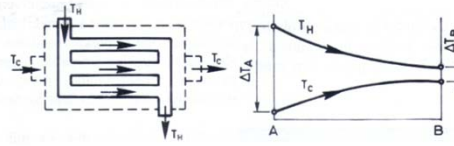
Regenerativni grelnik napajalne vode



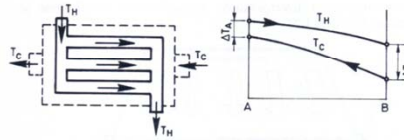
Poenostavljen sistem za uravnavanje kemične sestave in volumna primarne vode

d) Glede smeri pretakanja obeh tekočin

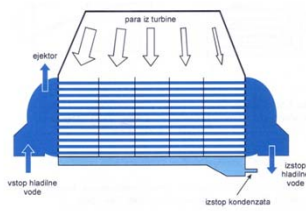
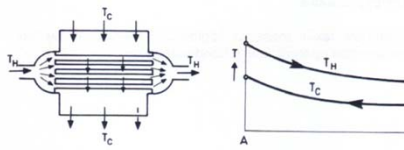
- TI z istosmernim pretakanjem



- TI s protismernim pretakanjem



- TI z navkrižnim pretakanjem



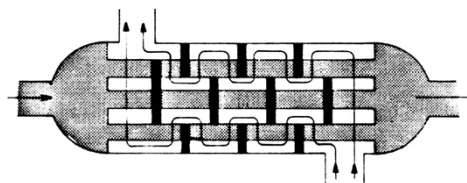
Kondenzator

e) TI s kombiniranim pretakanjem

- V takih TI so vgrajena vodila oz. pregrade
- Pospešujejo mešanje tekočine
- Povečanje izkoristka TI
- Primeri:
  - Uparjalniki
  - Kondenzatorji



istosmerni + navzkrižni  
toplotni izmenjevalnik



protismerni + navzkrižni toplotni  
izmenjevalnik

## 2. Prenos toplote v TI s kombiniranim pretakanjem

### a) Prenos toplote v cevnem TI z istosmernim ali protismernim pretakanjem

Parametri:

$A_1$  - notranja površina cevi ( $m^2$ )

$A_2$  - zunanja površina cevi ( $m^2$ )

$\lambda$  - toplotna prevodnost cevi ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )

$h_{c1}$  - toplotni prestopnostni koeficient iz tekočine 1 na cev ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )

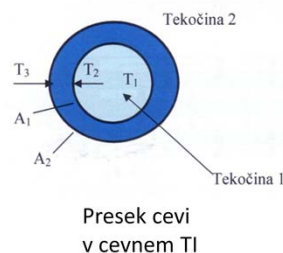
$h_{c2}$  - toplotni prestopnostni koeficient iz cevi na tekočino 2 ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )

$r_0$  - zunanji polmer cevi (m)

$r_i$  - notranji polmer cevi (m)

$L$  - dolžina cevi (m)

$\Delta T$  - razlika temperatur obeh tekočin ( $^{\circ}C$ )



Vpeljemo sledeč izraz: 
$$\frac{\dot{Q}}{\Delta T} = \frac{1}{\frac{1}{h_{c1} A_1} + \frac{\ln(r_0/r_i)}{2\pi\lambda L} + \frac{1}{h_{c2} A_2}} = UA$$

Dobimo: 
$$\dot{Q} = UA \Delta T$$

$\dot{Q}$  - toplotni tok v wattih (J/s)

$U$  - toplotna prehodnost oz. skupni koeficient prenosa toplote

$A$  - površina za prenos toplote (dogovor: skupna zunanja površina cevi ( $m^2$ ))

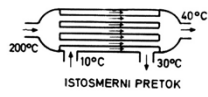
$\Delta T$  - razlika temperatur obeh tekočin ( $^{\circ}C$ ),  $\Delta T = T_H - T_C$

- Toplotna prehodnost  $U$  se spreminja s temperaturo, tlakom, hitrostjo, gostoto in viskoznostjo tekočine ter s toplotnim tokom.
- Pri določenem obratovalnem stanju pa je  $U$  konstanten

- Povprečna logaritemska temperatura

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln \frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}}$$

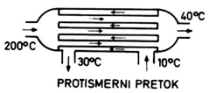
- Primer:



$$\Delta T_A = 200^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C} = 190^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_B = 40^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C} = 10^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln \frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}} = \frac{190 - 10}{\ln 190/10} = \frac{180}{2,95} = 61^\circ\text{C}$$



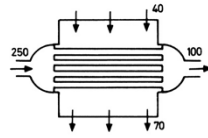
$$\Delta T_A = 200^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C} = 170^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_B = 40^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C} = 30^\circ\text{C}$$

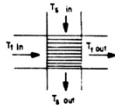
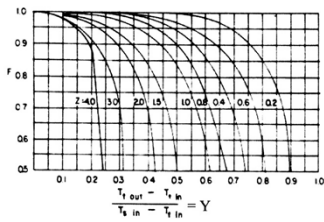
$$\Delta T_m = \frac{170 - 30}{\ln 170/30} = \frac{140}{1,72} = 81^\circ\text{C}$$

b) Prenos toplote v TI z navzkrižnim pretakanjem

- Popravni faktor F odčitamo iz diagrama



$T_{s,\text{in}} = 40^\circ\text{C}$   
 $T_{s,\text{out}} = 70^\circ\text{C}$   
 $T_{l,\text{in}} = 250^\circ\text{C}$   
 $T_{l,\text{out}} = 100^\circ\text{C}$



$$\Delta T_A = 250 - 70 = 180^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_B = 100 - 40 = 60^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_m = \frac{180 - 60}{\ln 180/60} = \frac{120}{1,099} = 109^\circ\text{C}$$

$$Z = \frac{40 - 70}{100 - 250} = \frac{-30}{-150} = 0,20$$

$$Y = \frac{100 - 250}{40 - 250} = \frac{-150}{-210} = 0,71$$

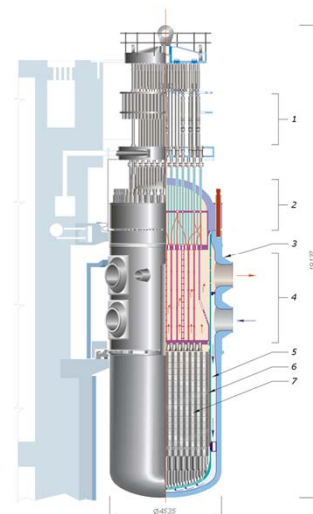
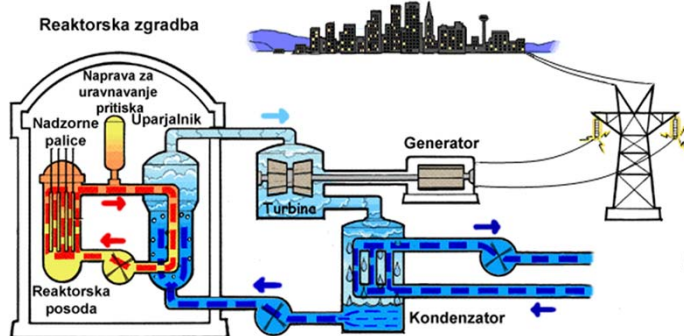
$$\Delta T_m = F \cdot \Delta T_m \text{ (protismerni pretok)}$$

$$\Delta T_m = 0,95 \cdot 109^\circ\text{C} = 104^\circ\text{C}$$



# Uparjalnik

- Osnovna naloga: prenašanje toplote s primarnih hladilnih zank na sekundarni del elektrarne
- V jedrskih elektrarnah s tlačnovodnim reaktorjem se v gorivu sproščena toplota prenaša z reaktorskim (primarnim) hladilom v uparjalnik na sekundarni sistem.
- Prednost PWR elektrarn je, da se radioaktivne snovi ne prenašajo v turbino



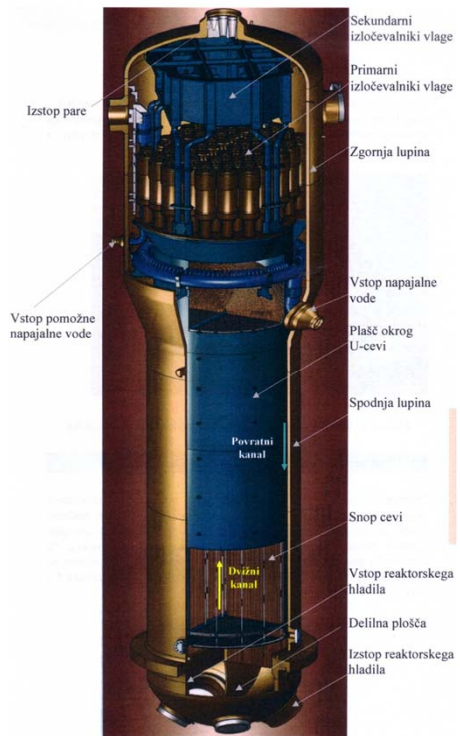
Skica ruskega tlačnovodnega reaktorja vrste WER-1000, kakršen je npr. v Temelinski jedrski elektrarni

Uparjalnik je sestavljen iz:

- Zgornja lupina
- Spodnja lupina
- Prehodni konusni obroč
- Vstopni priključek



Pogled na spodnji del uparjalnika



Prerez uparjalnika Siemens KWU D4-2

- Uparjalnik je velik toplotni izmenjevalnik in je glavni ponor toplote iz primarnega dela elektrarne.

Osnovni podatki o uparjalniku D4-2.

Višina celotnega uparjalnika	20,6 m
Število U-cevi	5428
Premer U-cevi	19,05 mm
Debelina stene U-cevi	1,09 mm
Površina za prenos toplote	7177 m <sup>2</sup>
Masni pretok na primarni strani	4479 kg/s
Vstopna temperatura primarnega hladila	324° C
Izstopna temperatura primarnega hladila	287° C
Temperatura napajalne vode	219,4° C
Tlak pare	65 bar
Masni tok pare	544 kg/s
Kvaliteta pare	najmanj 99,9%

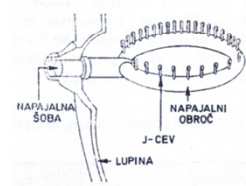
- U-cevi so privarjene na cevno ploščo, narejene so iz zlitine 690 TT (inconel)
- Sestavini zlitine sta nikelj (60%) in krom (30%)
- Zlitina je odporna na korozijske efekte pri povišanih temperaturah.

### a) U-cevi

- U-cevi so privarjene na cevno ploščo, narejene so iz zlitine 690 TT (inconel).
- Sestavini zlitine sta nikelj (60%) in krom (30%).
- Zlitina je odporna na korozijske efekte pri povišanih temperaturah.
- U-cevi so vpete s podpornimi ploščami, katere preprečujejo vibracije cevi in nalaganje nečistoč.

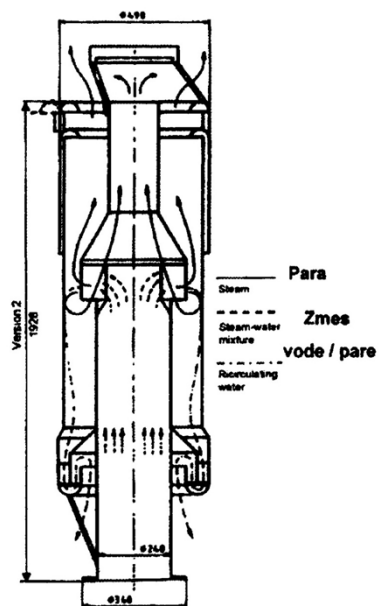
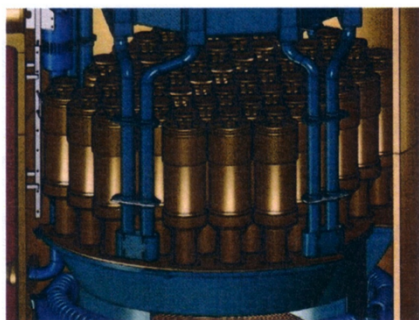
### b) Sistem glavne napajalne vode

- Napajalna voda priteka skozi napajalno šobo.
- Vteka v uparjalnik preko majhnih J-cevi.
- J-cevi so neenakomerno razporejene po obroču.
- Toplejša voda iz kanalov, bolj na gosto so.



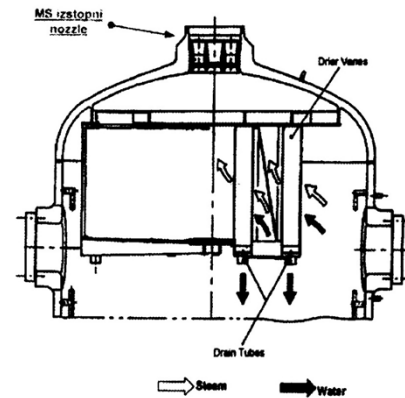
### c) Primarni izločevalniki vlage

- V zgornjem delu uparjalnika
- Iz dviznega kanala izstopa dvofazni tok
- Vgrajenih je 48 kosov
- Delujejo na principu vrtnčenja pare
- V ceveh so fiksne vodilne lopatice, katere zavrtijo curek dvofaznega toka
- Vodo odnese na rob cevi radialni pospešek



### č) Sekundarni izločevalniki vlage

- Izločena voda iz primarnih izločevalnikov vlage se prelije v povratni kanal.
- Mokra para uide proti sekundarnim izločevalnikom.
- Kapljice vode v mokri pari ne sledijo spremembam smeri,
- trčijo ob stene in se odcedijo v povratni kanal,
- suha para pa odteka proti iztočni šobi uparjalnika.



Kapljice vode v mokri pari ne sledijo spremembam smeri, tako da trčijo ob stene in se odcedijo v povratni kanal, suha para pa odteka proti iztočni šobi uparjalnika

d) Izstop pare iz uparjalnika

- Izstop pare izveden z omejevalcem iztoka
- Ta je sestavljen iz 7 venturijevih šob, katere omejujejo maksimalen iztok pare
- Obenem služijo kot zaslonka za meritev tlačnega padca ( $\Delta p$ )
- Para, ki odteka iz uparjalnika, je skoraj suho nasičena (vsebovati sme največ 0,1 % vodnih kapljic)

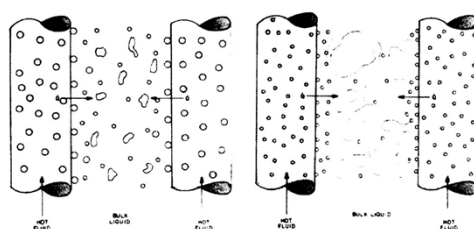
e) Sistem pomožne napajalne vode

- Dovod pomožne napajalne vode je izveden ločeno od glavne napajalne vode
- Dvižni del cevi zagotavlja stalen nivo vode v cevi, da ne prihaja do vračanja pare v linije
- Na koncu nameščena iztočna šoba, ki deluje kot kondenzator



## Toplotni proces v uparjalniku

- Napajalna voda in voda, ki se izloči iz izločevalnika vlage pretakata v dvižni del uparjalnika.
- Prejmeta toploto od toplejše primarne vode (pretaka znotraj U-cevi).
- Medtem, ko je primarna voda pod tlakom 157 bar še vedno podhlajena, se napajalna voda prične uparjati.
- Dosežena je temperatura nasičenja pri stalnem tlaku, v dvižnem delu se pojavi dvofazni tok.
- V uparjalniku se pojavi prostorninsko vrenje.
- Dvofazni tok je mehurčkasto-čepaste ali čepaste vrste.

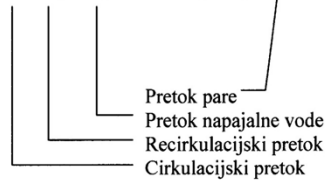




## Pretok napajalne vode v uparjalniku

- Pretok kapljevine (vode), ki se izloči v izločevalnikih vlage imeujemo **recirkulacijski pretok**.
- Pretok dvofazne mešanice v dvižnem delu uparjalnika pa je **cirkulacijski pretok**.

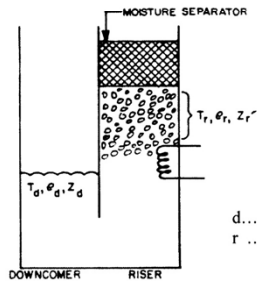
$$\dot{m}_c = \dot{m}_r + \dot{m}_f \quad \text{oz.} \quad \dot{m}_c = \dot{m}_r + \dot{m}_s \quad (\text{stacionarno stanje})$$



- Prednosti recirkulacije:
  - Mešanje pri visoki temperaturi z napajalno vodo (ki ima nižjo temperaturo), povečuje izkoristek.
  - Višji nivo vode v povratnem kanalu pomeni večjo potisno silo in boljše kaluženje uparjalnika.

### Potisna sila dvofazne mešanice:

- Za cirkulacijo vode niso potrebne črpalke, saj se vzdržuje na naravni način zaradi razlike med gostoto kapljevine v povratnem kanalu in gostoto dvofaznega toka v dvižnem delu uparjalnika.
- To razliko gostot imenujemo kot potisno silo dvofazne mešanice skozi uparjalnik



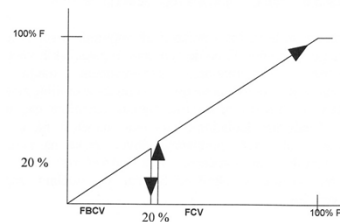
d..... downcomer (povratni kanal)  
r ..... riser (dvižni kanal)

$$\rho_d g z_d > \rho_r g z_r$$

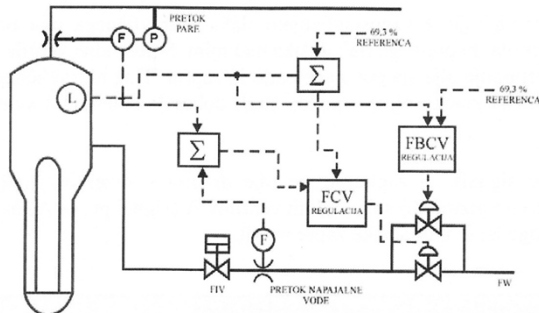
$$\Delta p_{\text{potisni}} = \rho_d g z_d - \rho_r g z_r$$

## Regulacija nivoja vode uparjalnikov

- Dve regulacijski zanki:
  - Za glavni regulacijski ventil (FCV)
  - Obvodni regulacijski ventil (FBCV)
- Prvo uporabljamo pri močeh do 20% (FBCV)
- Referenčni nivo vode v uparjalniku 69,3%
- nad 20% moči je v funkciji druga reg. zanka (FCV)
- Primerjajo se fri vhodne veličine:
  - Skupni pretok napajalne vode
  - Tlačno kompenziran pretok pare
  - Razliko nivoja vode med dejanskim in referenčnim



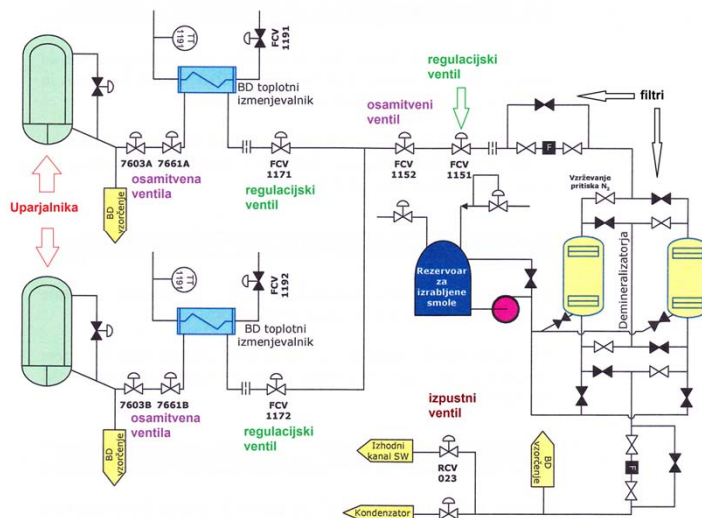
Program odpiranja regulacijskih ventilov



# Kaluženje uparjalnikov

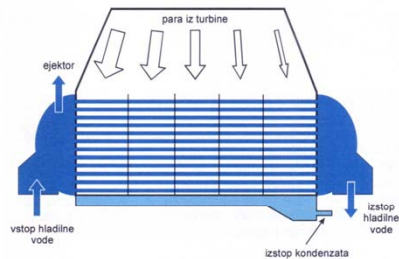
Sistem za kaluženje uparjalnika:

- Vzdržuje kemično sestavo sekundarne vode
- Ohranja toploto kalužne vode s segrevanjem kondenzatne vode
- Kemična odbelava pred vračanjem v kondenzator



# Kondenzator

- Kondenzator je velik površinski cevni toplotni izmenjevalnik z navzkrižnim pretakanjem.
- Nameščen pod nizkotlačnimi turbinami



## a) Proces v kondenzatorju:

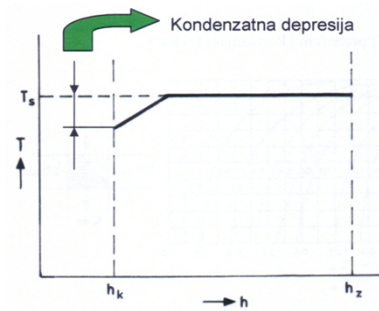
- mokra para obdaja cevi, katerih temperatura je nižja od temp. nasičenja,
- para, ki ima temp. nasičenja, oddaja na cevi kondenzacijsko toploto in kondenzira,
- temp. pare med kondenzacijo je določena s temp. hladilne vode (Save) v ceveh in s količino toplote, ki jo moramo odvesti.
- Tlak pare v kondenzatorju je tlak nasičenosti pri temperaturi kondenzacije.
- Kondenzat se na zadnjih ceveh podhladi pod temperaturo pare in se zbira v zbiralniku.

## Prenos toplote v kondenzatorju

- toplotni tok pare:  $\dot{Q}_p = \dot{m}_p(h_k - h_z)$
- $\dot{m}_p$  - masni pretok pare
- $h_z$  - začetna entalpija pare pri vstopu
- $h_k$  - končna entalpija kondenzata v zbiralniku

Fazni diagram T-h – nazorno prikazan prenos toplote v kondenzatorju

- Vodoravni del krivulje – odvod izparilne toplote, ko para kondenzira v vodo
- Strmi del – kondenzat ohladi pod temperaturo kondenzacije (kondenzatna depresija)
- Kondenzatna depresija:
  - Majhna nedogretost kondenzatne vode je potrebna, da ne pride do močnejše kavitacije.
  - Večja nedogretost kondenzatne vode ni zaželjena, ker se s tem zmanjša toplotni izkoristek sek. sist.



### Ocena masnega pretoka hladilne vode

- toplotni tok v hladilni vodi enak toplotnemu toku iz sekundarnega dela elektrarne

$$\dot{Q}_{hv} = -\dot{Q}_p$$

- Razmerje masnih pretokov hladilne vode in pare je:

$$\frac{\dot{m}_{hv}}{\dot{m}_p} = \frac{h_z - h_k}{c_p (T_H - T_C)}$$

Tipične vrednosti parametrov (NEK):

- $h_z \approx 2245$  kJ/kg nominalna vrednost po projektu,
- $h_k$  (0,05 bar)  $\approx 138$  kJ/kg,
- $T_h \approx 29^\circ$  C nominalna po projektu,
- $T_c \approx 17^\circ$  C nominalna po projektu,
- $c_p = 4,2$  kJ/kgK.

$$\frac{\dot{m}_{hv}}{\dot{m}_p} = \frac{2245 - 138}{4,2 \cdot 12} \approx 42$$

**Po projektu NEK:**

$$\dot{m}_{hv} = 25000 \text{ kg/s}$$

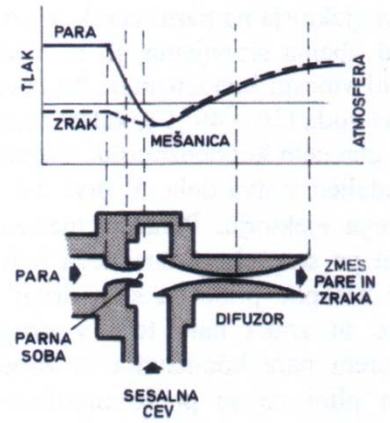
$$\dot{m}_p = 600 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{hv} / \dot{m}_p = 25000 / 600 \approx 42$$

- Na prenos toplote skozi cevi v kondenzatorju vplivajo predvsem:
  - Količina in vrsta nečistoč v hladilni vodi,
  - Zrak in plini v kondenzatorju, ki ne kondenzirajo

## Parni ejektorji

- Zrak in pline v pari, ki ne kondenzirajo, izsesavamo iz kondenzatorja z ejektorji na parni curek oz vakuumskimi črpalkami.
- Ejektor kombinacija dveh šob.
- Hitrost pare pri vstopu podzvočna, tlak pade.
- Po vstopu hitrost pare nadzvočna, tlak pade.
- Druga šoba – difuzor, hitrost nižja, tlak se poveča.



Shema enostopenjskega ejektorja



## Hladilni stolpi

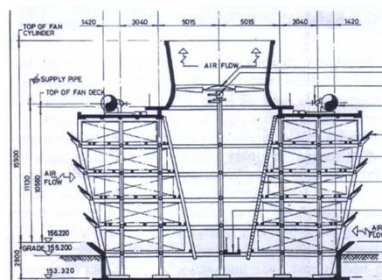
Izvedba hlajenja kondenzatorja v NEK narekujejo omejitve:

- Maksimalno lahko odvzamejo 25% pretoka Save.
- Temperatura v točki mešanja ne sme preseči 28°C.
- Maksimalen porast temperature je lahko 3°C.



V NEK hladijo kondenzatorje na dva načina:

- Vso potrebno vodo vzamejo iz Save in jo v Savo vrnejo.
- Kombinirano hlajenje: del vode iz Save, del pa se pretaka po zaprtem krogu preko hladilnih stolpov



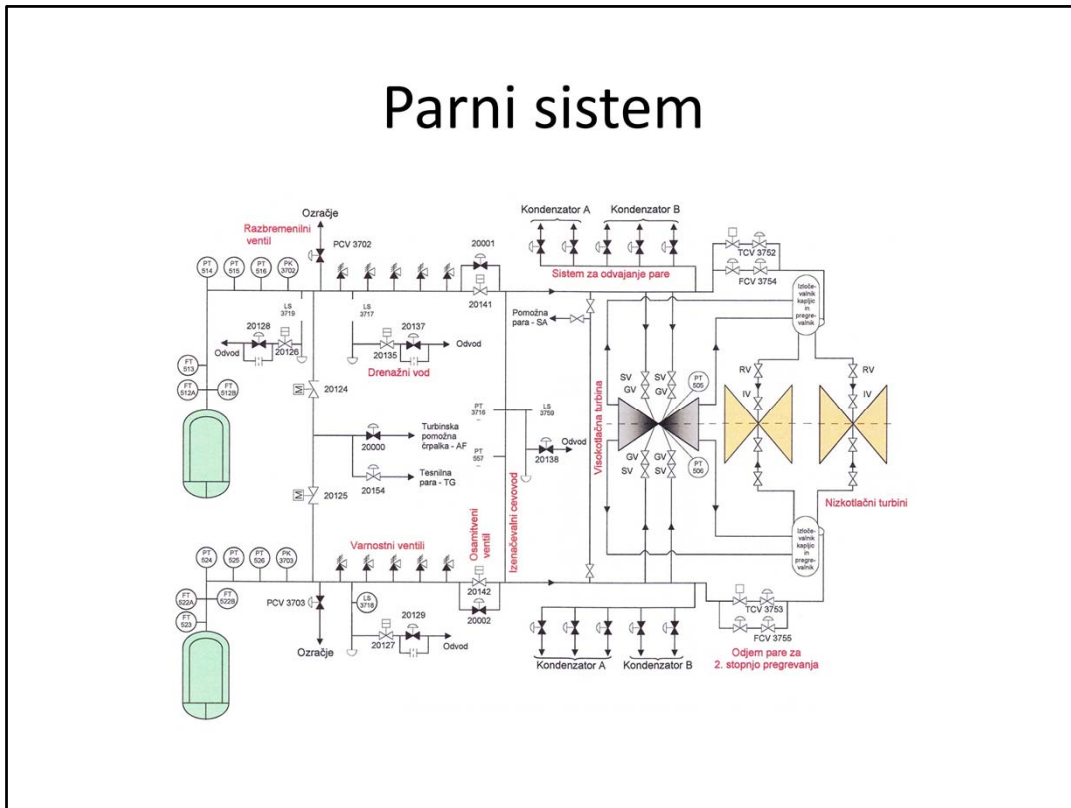
### Proces v stolpih – potek:

- Voda iz kondenzatorja pada z vrha stolpa in se na hladilnih celicah razpršuje.
- Razpršena voda se meša z atmosferskim zrakom, ki ga sesamo proti vrhu stolpov in izpareva.
- Voda se ohlaja in se zbira na dnu stolpov
- Voda izpareva dokler zrak ne doseže nasičene vlažnosti.
- Nasičeno vlažni zrak izhaja pri vrhu stolpov.



Pogled v notranjost hladilnega stolpa.

# Parni sistem



Namen glavnega parovoda je:

- Dovajanje pare iz uparjalnikov k porabnikom (visokotlačna turbina in dve nizkotlačni turbini, sistem pomožne pare, sistem za odvajanje pare, sistem tesnilne pare turbine, turbinska črpalka, 2.stopnja pregrevanja izločevalnika in pregrevanja pare),
- zaščita uparjalnika in parovoda pred nadtlakom,
- omejitev nekontroliranega iztoka pare iz uparjalnikov v primeru zloma parovoda ter
- zajem merilnih signalov za vodenje in varovanje procesov.

## Viri

- [1] T. Skobe, *Toplotni izmenjevalniki*, Institut "Jožef Stefan", Izobraževalni center za jedrsko tehnologijo „Milana Čopiča“, *TJEM06\_FTH9.doc*, Revizija 1, 2006
- [2] T. Skobe, *Uparjalnik*, Institut "Jožef Stefan", Izobraževalni center za jedrsko tehnologijo „Milana Čopiča“, *TJEM06\_FTH10.doc*, Revizija 1, 2006
- [3] Z. Maravič, T. Skobe, *Sistem glavne napajalne vode*, Institut "Jožef Stefan", Izobraževalni center za jedrsko tehnologijo „Milana Čopiča“, *OSM05\_SFW.doc*, NEK/SU, Revizija 5, 2005
- [4] T. Setnikar, T. Skobe, *Kaluženje uparjalnikov*, Institut "Jožef Stefan", Izobraževalni center za jedrsko tehnologijo „Milana Čopiča“, *OSM05\_SBD.doc*, NEK/SU, Revizija 5, 2005
- [5] T. Skobe, *Kondenzator*, Institut "Jožef Stefan", Izobraževalni center za jedrsko tehnologijo „Milana Čopiča“, *TJEM06\_FTH12.doc*, NEK/SU, Revizija 1, 2006
- [6] M. Žvar, T. Skobe, *Parni sistem*, Institut "Jožef Stefan", Izobraževalni center za jedrsko tehnologijo „Milana Čopiča“, *OSM05\_SMS1.doc*, NEK/SU, Revizija 5, 2005
- [7] Z. Maravič, T. Skobe, *Kondenzator in kondenzatni sistem*, Institut "Jožef Stefan", Izobraževalni center za jedrsko tehnologijo „Milana Čopiča“, *OSM05\_SCY.doc*, NEK/SU, Revizija 5, 2005
- [8] [http://www.nek.si/sl/o\\_jedrski\\_tehnologiji/jedrski\\_reaktor](http://www.nek.si/sl/o_jedrski_tehnologiji/jedrski_reaktor)
- [9] <http://www.world-nuclear.org/info/inf32.html>
- [10] [http://www.ucsusa.org/nuclear\\_power/nuclear\\_power\\_technology](http://www.ucsusa.org/nuclear_power/nuclear_power_technology)
- [11] <http://www.euronuclear.org/1-education-training/index.htm>
- [12] <http://www.euronuclear.org>
- [13] <http://science.howstuffworks.com/nuclear-reactor3.htm>
- [14] [http://sl.wikipedia.org/wiki/Tla%C4%8Dnovodni\\_reaktor](http://sl.wikipedia.org/wiki/Tla%C4%8Dnovodni_reaktor)

Hvala za pozornost