



# AKUMULATORI TOPLOTE U SISTEMIMA DALJINSKOG GREJANJA

Treće savetovanje – Hotel Panorama - Zlatar  
1.4. и 2.4.2019. godine



This project is funded by the EU's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement N°784966, and lasts from April 2018 to September 2020.

This project receives co-funding from the German Federal Ministry of Economic Cooperation and Development.



# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Uvodne napomene:

Akumulacija energije – čuvanje odgovarajućeg vida energije u željenom vremenskom periodu sa ciljem njegovog naknadnog korišćenja.

Svrha akumulacije termičke energije:

1. Povećanje energetske efikasnosti sistema
2. Obezbeđivanje sigurnosti rada sistema

**Akumulatori toplote (AT)** – uređaji u kojima se akumulira termička energija

Naziv AT je neadekvatan – toplota je energija u kretanju, i postoji samo tokom procesa razmene energije između tela različitih temperatura.

Adekvatniji naziv – akumulator termičke energije ( na engleskom *thermal energy storage* . TES)

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

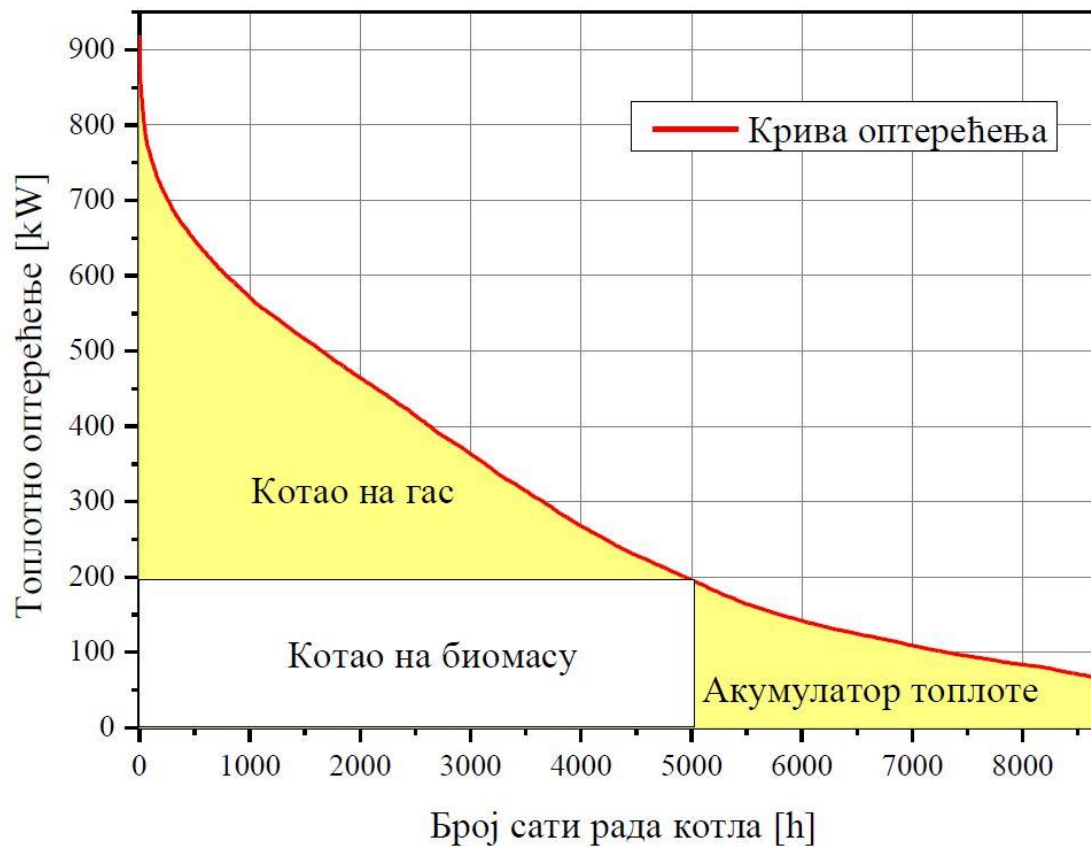
## Uvodne napomene:

### Korišćenje AT:

- Kada postoji neusklađenost između potrebe za toplotom i njene dostupnosti
- U sistemima gde postoji mogućnost korišćenja neiskorišćene (otpadne) toplote raznih procesa
- Za smanjenje nominalne snage uređaja za proizvodnju energije
- U velikim energetske sistemima kako bi obezbedili sigurnost snabdevanja energijom
- U sistemima za hlađenje
- U zgradarstvu

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Uvodne napomene:



# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Uvodne napomene:

### Podela AT:

1. AT u kojima se akumulacija toplote odvija **promenom temperature** radnog medijuma (ATPT).
2. AT u kojima se akumulacija toplote odvija **promenom faze** radnog medijuma – AT sa fazno promenljivim materijalom (ATPF).
3. Termohemijski AT iskorišćava toplotu uskladištenu u **reverzibilnim hemijskim reakcijama** (THAT)
4. Sorpcioni AT koristi toplotu **adsorpcije ili apsorpcije** kombinacije materijala (npr. silikatni mineral zeolit i voda – adsorpcija ili voda i litijum bromid – apsorpcija)

U zavisnosti od vremenskog perioda u kome se vrši skladištenje akumulacija je:

- dnevna
- nedeljna
- mesečna
- sezonska

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## ATPT

Princip skladištenja toplote se zasniva na promeni temperature radnog medijuma usled dovođenja toplote. Količina toplote koja se uskladišti u radnom medijumu zavisi od ostvarene temperaturske razlike, gustine, specifičnog toplotnog kapaciteta i zapremine radne materije. Za slučaj izobarske promene stanja radne materije uskladištena količina toplote je data izrazom:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mc_p dT$$

$m = \rho V$  - masa skladišnog medijuma,  $c_p$  - specifični toplotni kapacitet radne materije pri konstantnom pritisku,  $T_1$  - početna temperatura radne materije,  $T_2$  - krajnja temperatura radne materije.

**Za inženjerske proračune:**

$$Q = m\overline{c_p}(T_2 - T_1)$$

$\overline{c_p}$  - srednji toplotni kapacitet radne materije na temperaturskom intervalu  $T_1$ -  
 $T_2$ .

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## ATPF

Zasniva se na toploti promene faze koja se apsorbuje u toku promene faze radne materije. Moguće je uskladištiti i do 14 puta više energije u odnosu na AT iste zapremine ispunjenog vodom.

Materijali koji koriste procese topljenja imaju energetske gustine od oko 100 kWh/m<sup>3</sup>, dok materijali za skladištenje senzibilne toplote imaju oko 25 kWh/m<sup>3</sup>.

**Dodatna prednost:** razmena toplote se odvija na određenoj temperaturi, tj. U određenom temperaturskom opsegu, pa se razmena toplote odvija pri manjoj temperaturskoj razlici.

$$Q = m \cdot x_m \cdot r_m$$

$x_m$  - maseni udeo istopljenog materijala u ukupnoj masi FPM,  $r_m$  - toplota promene faze FPM.

$$Q = \int_{T_1}^{T_m} mc_p dT + m \cdot r_m + \int_{T_m}^T mc_p dT$$

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## ATPF

Materijali sa promenom agregatnog stanja (PCM) koji su zasnovani na bazi hidrata ili masnih kiselina imaju toplotnu promenu prilikom menjanja agregatnog stanja reda veličine kao i ceo kapacitet vode koja se koristi za skladištenje. Ako bi se dodala senzibilna toplota kapacitet AT koji koristi ovaj PCM bi se približno udvostručio.

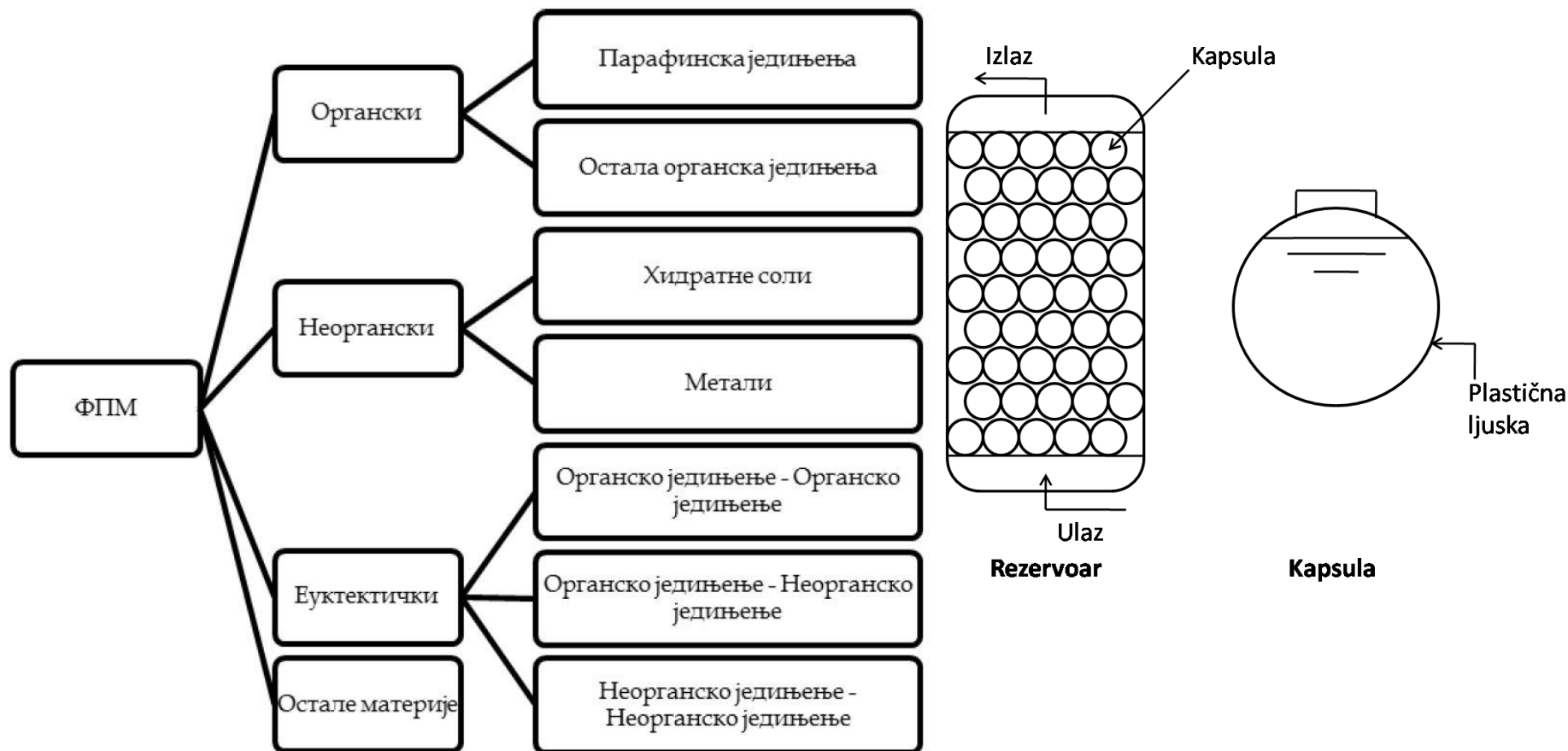
Kod izbora PCM razmatraju se njihove:

- Termičke osobine
- Fizičke osobine
- Hemijske osobine
- Kinetičke osobine
- Ekonomski kriterijumi



# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## ATPF



# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Poređenje ATPT i ATPF

### Prednost ATPT u odnosu na ATPF :

- Niža cena.
- Jednostavnija konstrukcija.
- Jednostavnije upravljanje, odnosno kontrola procesa akumulacije toplote.

Glavni nedostatak ovog tipa AT je vremenski promenljiva razlika temperature skladišnog medijuma i fluida koji prima/predaje toplotu.

### Prednosti ATPF u odnosu na ATPT:

- Manja promena temperature FPM, jer se glavni deo energije apsorbuje u toku procesa promene faze. Ovo omogućava opremi i uređajima koji se sprežu sa AT da rade u nominalnim radnim uslovima.
- Veća akumulacija energije po jedinici zapremine

Nedostatak ATPF predstavlja mala provodljivost generalno svih FPM, što uzrokuje otežano prenošenje toplote kroz FPM i produženje procesa promene faze, a takođe i pregrevanje i pothlađivanje FPM, što uzrokuje njegovu degradaciju i smanjuje mu radni vek.

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

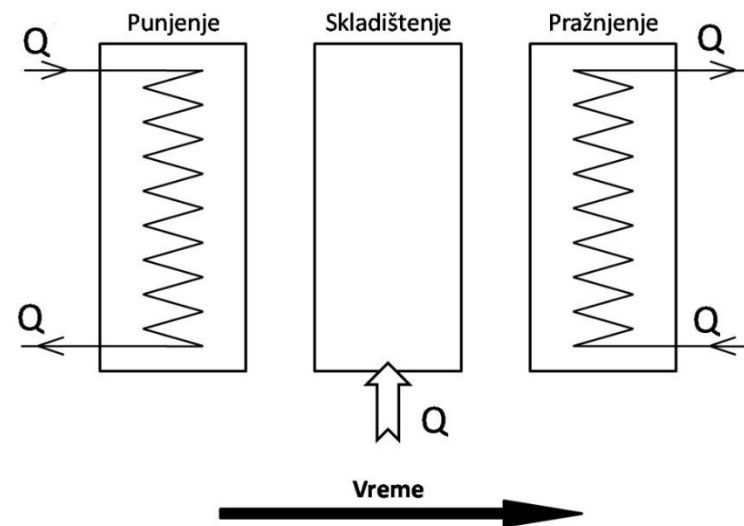
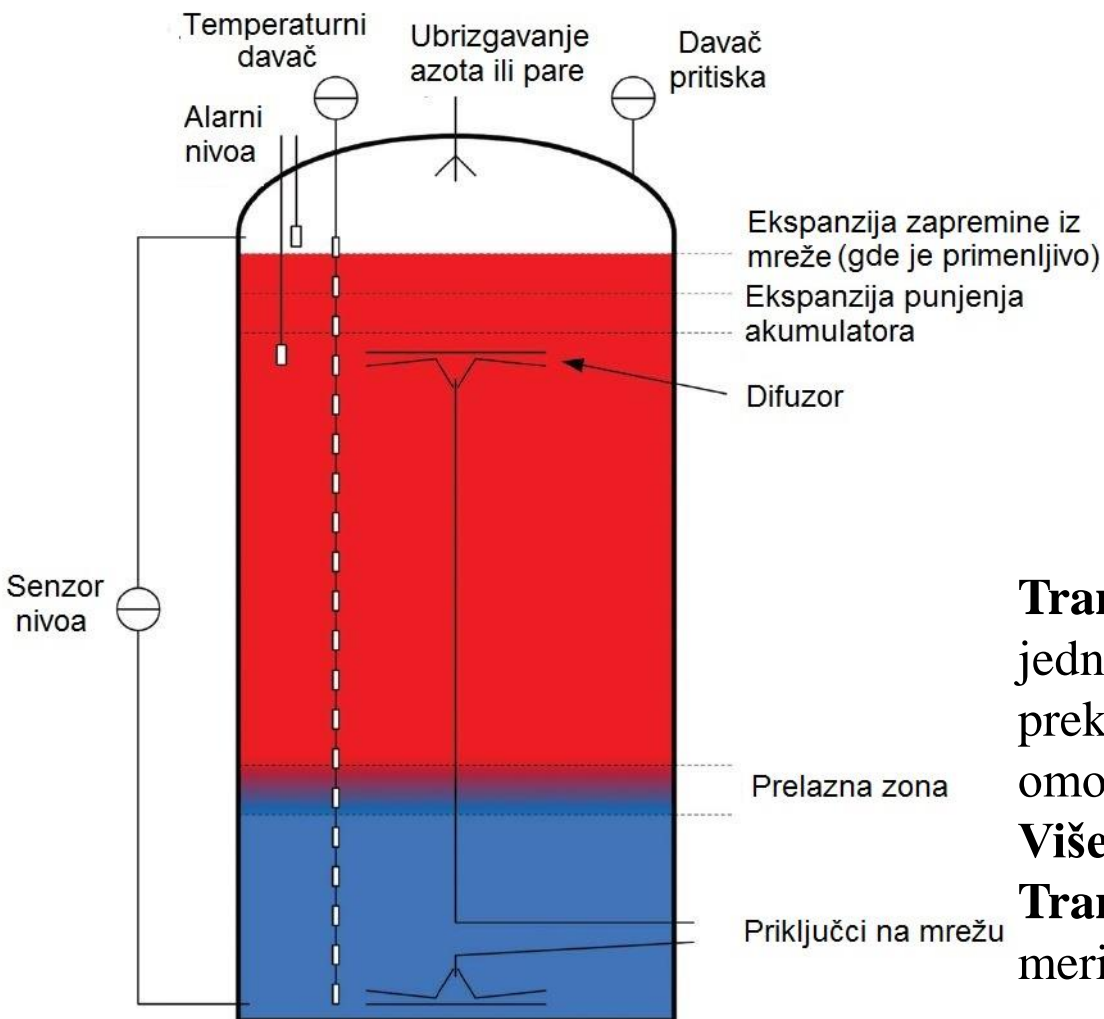
## THAT

- Skladištenje toplote se postiže preko sposobnosti nekih hemijskih jedinjenja da tokom građenja/kidanja hemijskih veza apsorbuju ili oslobađaju energiju (endotermne ili egzotermne hemijske reakcije).
- Količina apsorbovane/oslobođene toplote je reda veličine MJ/kg, što je znatno više u odnosi i na ATPF i na ATPT.
- Metalni hidrati – vodonik se apsorbuje u metalnu strukturu čime se oslobađa toplota, uklanjanje vodonika oslobađa toplotu.
- Međutim, zbog problema koji se javljaju tokom projektovanja ovih reaktora, toksičnosti i agresivnosti radnih materija AT ovog tipa, zahteva u pogledu radnog pritiska, hemijske stabilnosti, itd., primena AT ovog tipa je još uvek na niskom i ograničenom nivou.

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

- Akumulatori toplote (AT) se u sistemima daljinskog grejanja u svetu koriste već nekoliko decenija. U poslednje vreme se u svetu sve više koristi novi vid skladištenja toplote, tzv. Sezonsko skladištenje toplote, kod koga je toplota uskladištena više nedelja, pa čak i meseci.
- Odluka da se u sistem DG implementira AT je manje tehničko, a više ekonomsko pitanje.
- U izlaganju se razmatra skladištenje toplote u akumulatorima sa vrelom vodom, koji se koriste u sistemima daljinskog grejanja.
- Pod akumulacijom toplote se tradicionalno podrazumeva kratkoročno skladištenje toplotne energije bazirano na vodi kao radnom medijumu.
- Voda se nalazi u velikim izolovanim tankerima – akumulatorima, koji mogu biti direktno povezani sa energetskeim izvorom, ili integrisani u distributivnu mrežu.

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja



**Transmiteri temperature** – ugrađeni na jednakim intervalima, nalaze se unutar prekrivke od nerđajućeg čelika, da bi se omogućila zamena bez da se prazni AT.

**Višekanalni termometar**

**Transmiter diferencijalnog pritiska** – meri se visina vodenog stuba

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Kako funkcioniše skladištenje toplote

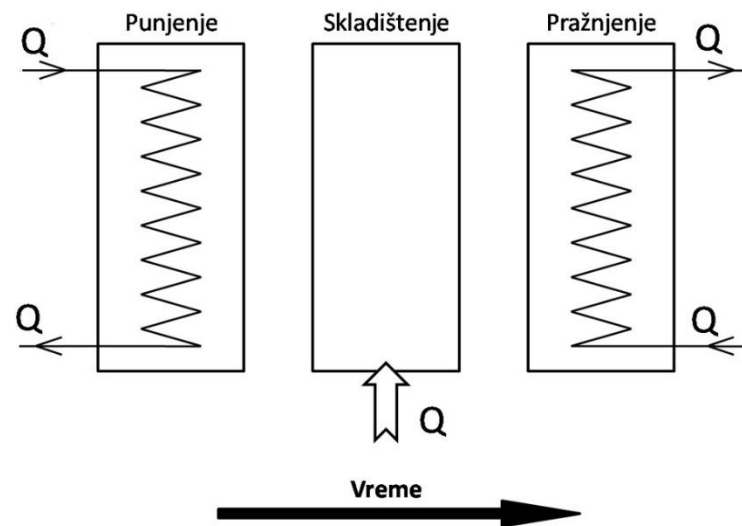
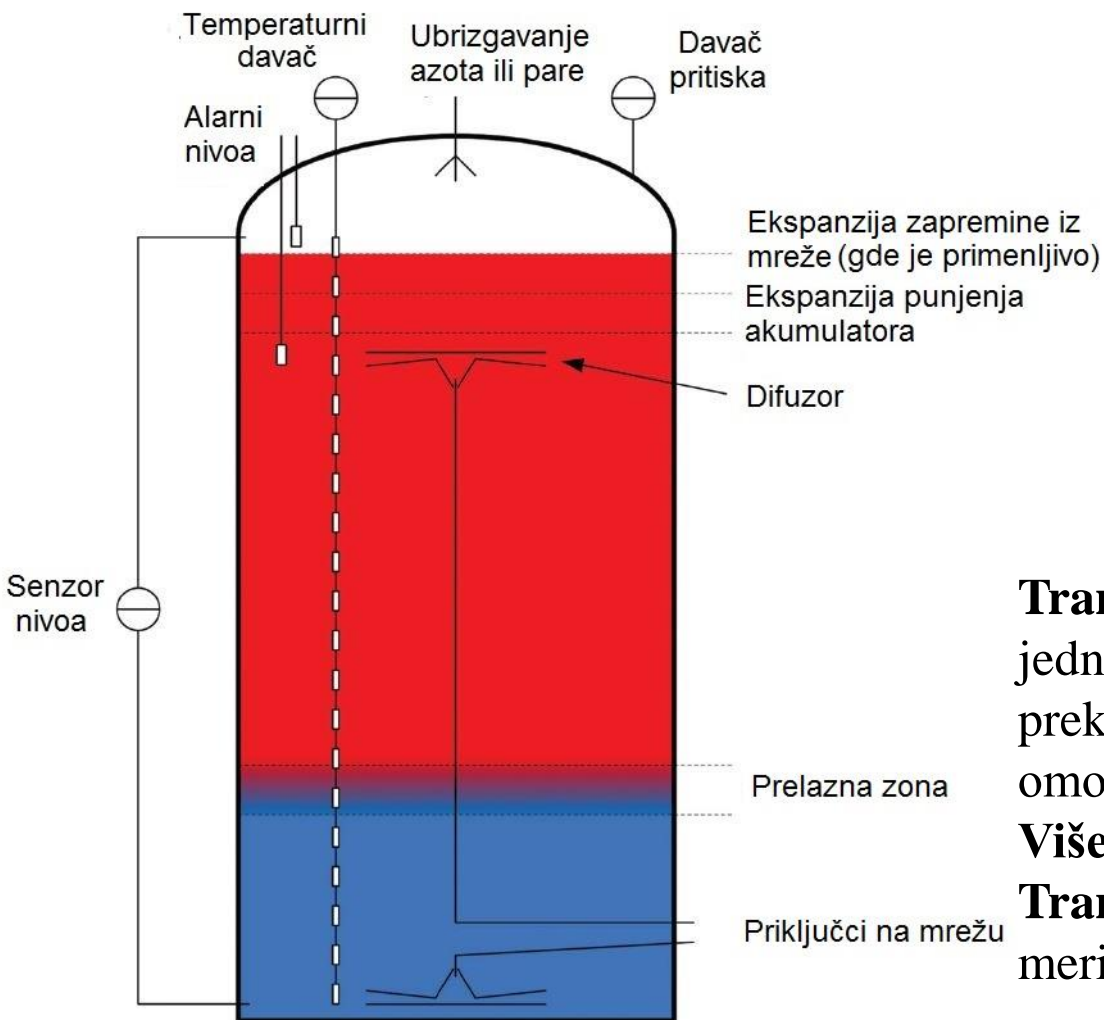
- Osnovni princip je da se voda u istom akumulatoru nalazi na različitim temperaturama po visini – stratifikacija, i da nema mešanja. Na taj način se količina uskladištene toplote može menjati bez promene ukupne mase vode u akumulatoru. Radni uslovi u AT sa stratifikacijom su za istu količinu energije bolji bolji nego u AT sa mešanjem.
- Vrela voda će se zbog svoje manje gustine u odnosu na hladnu vodu nalaziti u gornjem delu, a hladna u donjem delu AT. Između ove dve zone na vrhu i dnu AT postoji prelazna zona ili razdvajajući sloj, u kome postoji toplotni gradijent od hladne ka toploj vodi. Visina ovog sloja je obično oko 1 m.
- AT u mreži daljinskog grejanja se prilikom dovodenja toplote smatra potrošačem, a prilikom odvođenja toplote – pražnjenja, proizvodnom jedinicom toplote.

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Kako funkcioniše skladištenje toplote

- Kada se u procesu produkcije toplota dovodi u AT vrela voda se upumpava na vrh AT, uz istovremeno ispumpavanje iste mase hladne vode na dnu. Usled razlike u gustini topla i hladna voda i dalje ostaju razdvojene, a prelazna zona se pomera ka dnu AT.
- Kada se AT prazni, vrela voda se ispumpava sa vrha AT, uz istovremeno upumpavanje hladne vode na dnu, a prelazna zona se pomera naviše. Voda se u AT upumpava ili ispumpava kroz pločaste difuzore na vrhu i dnu AT.
- Toplotni kapacitet AT je definisan količinom tople vode koja se može zameniti hladnom, i obrnuto.
- Težinski sadržaj vode u AT treba da bude konstantan i nezavisan od količine toplote - energetske sadržaja.

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja



**Transmiteri temperature** – ugrađeni na jednakim intervalima, nalaze se unutar prekrivke od nerđajućeg čelika, da bi se omogućila zamena bez da se prazni AT.

**Višekanalni termometar**

**Transmiter diferencijalnog pritiska** – meri se visina vodenog stuba



# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Stratifikacija

- Efikasnost sistema ATPT u toku ciklusa dovođenje/odvođenje toplotne energije umnogome zavisi od mogućnosti razdvajanja tople i hladne vode u AT (stratifikacija).
- Izuzetno je važno da u toku protoka vode kroz AT ne dođe do mešanja vode po visini AT. To predstavlja ključan faktor za termodinamičku raspoloživost uskladištene energije.
- Mogući su različiti sistemi za razdvajanje tople i hladne vode, kao npr. razdvajanje tople i hladne vode u više različitih AT, ugrađivanje dijafragme u AT, lavirintski AT i sl.
- Ipak, zbog svoje jednostavnost i niske cene, jedan AT u kome postoji stratifikacija je u najvećem broju slučajeva i najprihvatljiviji.
- Rađen je veliki broj studija koje su razmatrale efikasnost ovakvog AT, i on je ispitivan kako eksperimentalno tako i teorijski, uz pomoć numeričkih matematičkih modela.

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Stratifikacija

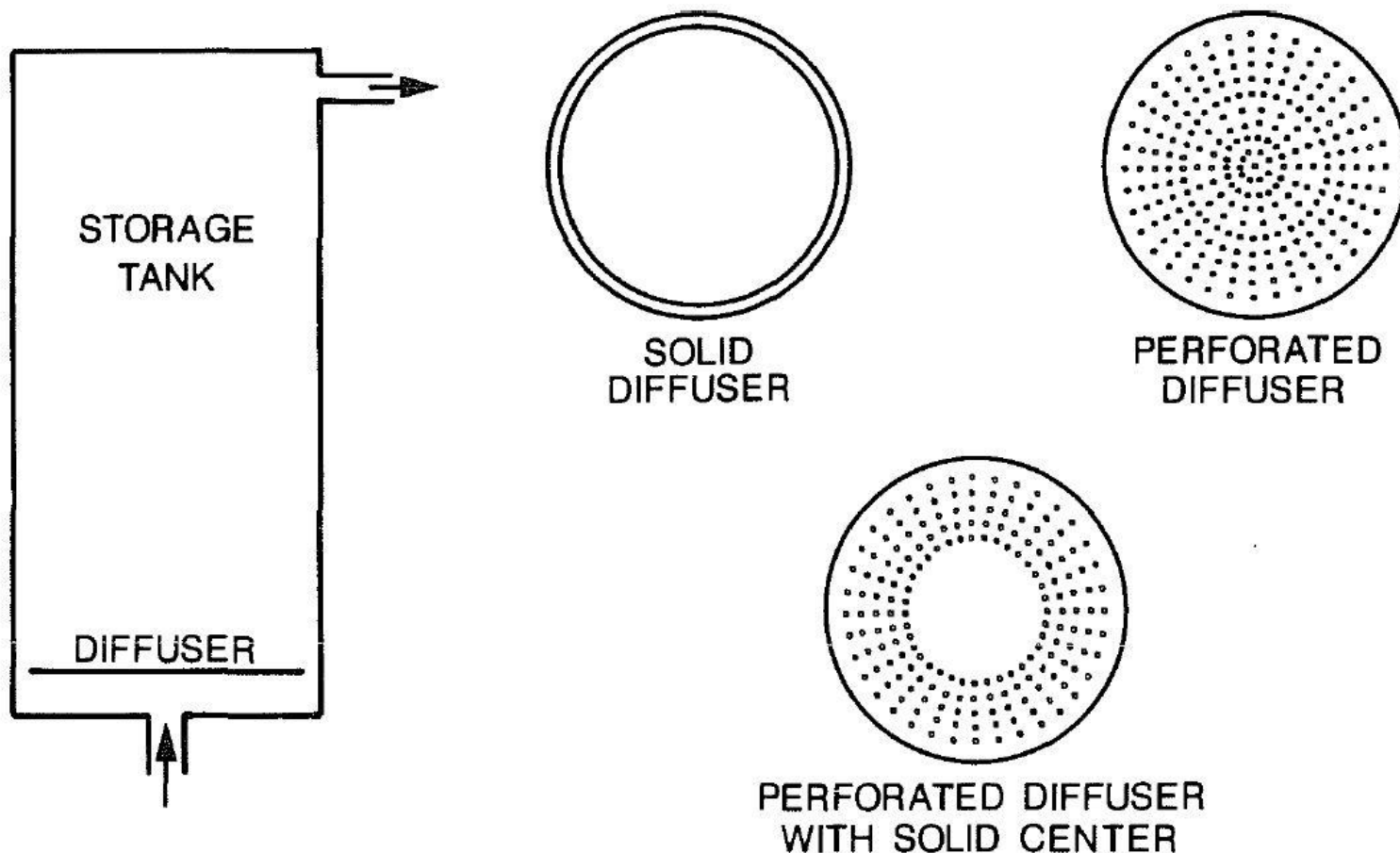
Debljina prelazne zone je od velike važnosti za performanse AT. Treba da bude što tanja. Uobičajena debljina u standardnim AT je oko 1m, a zavisi od više faktora:

- Strukture strujanja na ulazu u AT
- Intenziteta uzgonskih sila u tečnosti
- Provođenja toplote kroz zidove AT
- Gubitaka u okolinu

**Najvažniji faktor: strujanje vode oko ulaza/izlaza hladne vode**

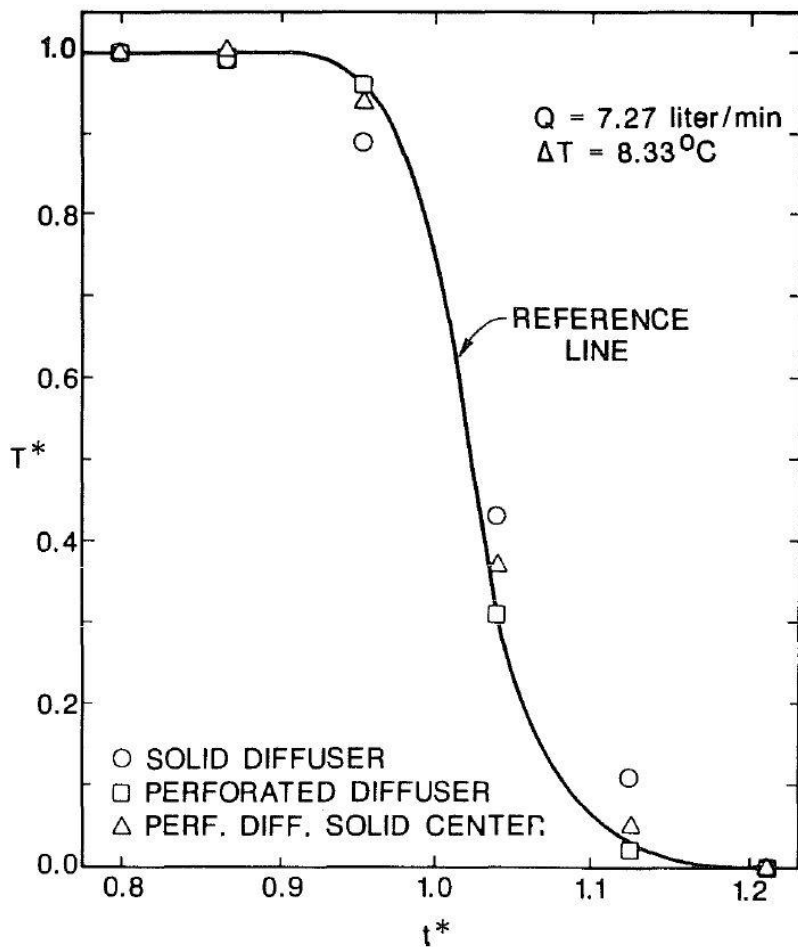
# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Vrste difuzora na ulazu u AT



# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Temperaturski profil u prelaznoj zoni u zavisnosti od difuzora



- Brzina vode kroz difuzor ~ 0,04 m/s.
- Spoljašnji prečnik difuzora ne manji od trećine prečnika AT.
- Način uvođenja mora da omogući ravnomernu raspodelu protoka i minimalnu turbulenciju.
- Prečnik cevi povezane sa difuzorom treba proračunati na osnovu maksimalnog nominalnog protoka kroz AT.
- Cevi povezane sa difuzorom moraju biti izolovane, da bi se sprečio uticaj na temperaturski profil u AT.
- Postoji razlika između stvarne i efektivne zapremine AT.
- Postoje konstrukcije gde difuzor tople vode pluta na površini. Iskorišćenje AT je bolje, ali je konstrukcija komplikovanija.

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Dimenzionisanje AT i radni parametri

- Kada je statički pritisak sistema do cca. 6 bar, a temperatura za napajanje ispod  $100^{\circ}\text{C}$  koriste se rezervoari koji nisu pod pritiskom.
- Kod sistema čija je temperatura napajanja ispod  $100^{\circ}\text{C}$  rezervoar se održava pod pritiskom, a kod sistema čija je temperatura napajanja preko  $100^{\circ}\text{C}$  on mora biti konstruisan kao posuda pod pritiskom.
- AT se konstruišu sa najvećim mogućim temperaturskim razlikama u AT koje se mogu postići. Ta temperaturska razlika bi trebalo da bude od  $30^{\circ}\text{C}$  do  $40^{\circ}\text{C}$  u slučaju da AT nije pod pritiskom, a  $50^{\circ}\text{C}$  do  $55^{\circ}\text{C}$  u slučaju kada jeste. Temperatura tople vode je određena temperaturom primarnog izvora energije, a hladne vode temperaturom u sistemu daljinskog gejanja.
- Rezervoari pod manjim pritiscima se konstruišu na osnovu standarda za vertikalne rezervoare nafte i vodene rezervoare, a oni koji su pod većim pritiskom na osnovu standarda za posude pod pritiskom.

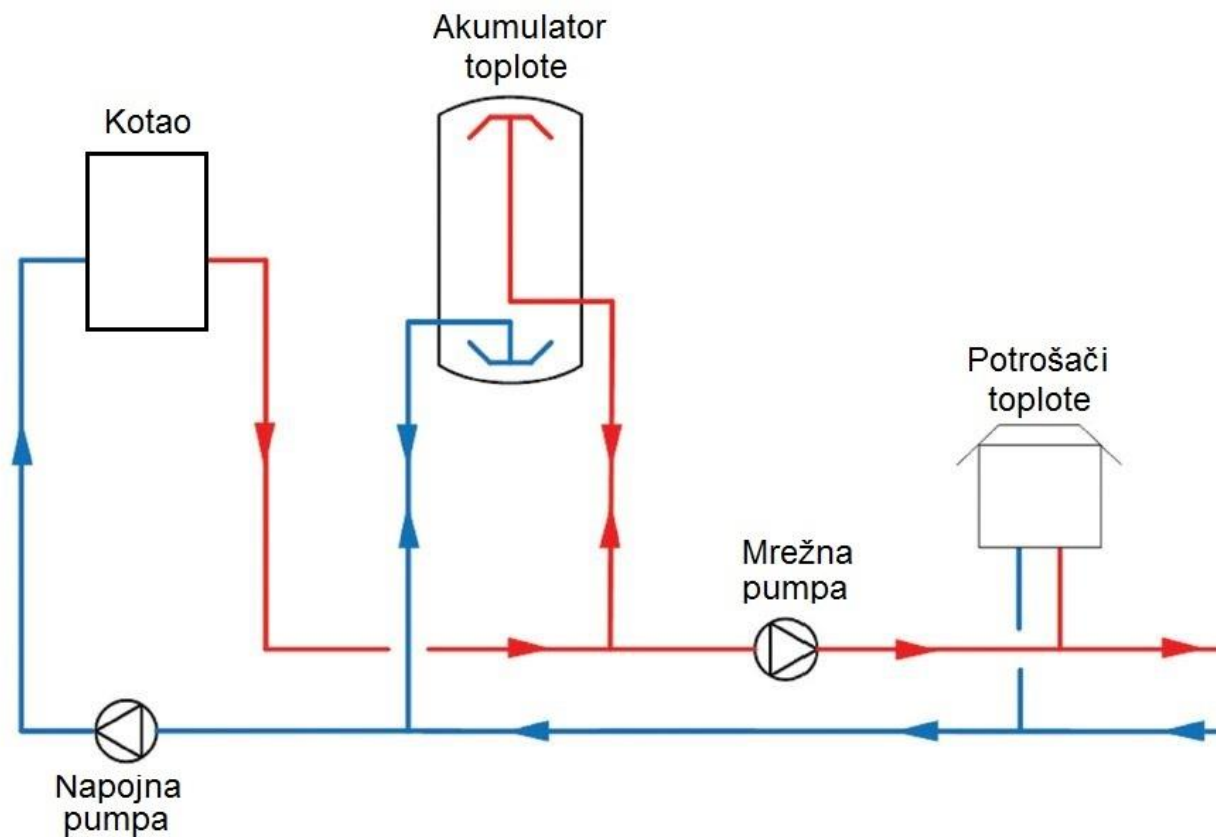
# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Dimenzionisanje AT i radni parametri

- Dimenzionisanje AT se bazira na cost-benefit analizi koja uključuje kako tačno definisane parametre ( na primer cena investicije) tako i one za koje postoji stepen neodređenosti ( na primer cena energenta i isporučene toplote u budućnosti).
- Proračun aktivne zapremine omeđene kolektorima treba da se bazira na energetskom sadržaju u toj zapremini, temperaturske razlike između tople i hladne vode, kao i konstrukcije difuzora. Izbor temperature je veoma značajan, jer direktno utiče na dimenzije AT.
- Treba računati da je visina prelazne, nekorisne zone koja razdvaja toplu i hladnu vodu oko 1m.
- Odnos visine i prečnika AT je značajan parametar. Sa jedne strane, gubitke u okolinu treba minimizirati, što znači minimiziranje površine AT u odnosu na zapreminu. Sa druge strane, treba minimizirati i zapreminu prelazne, nekorisne zone, što se postiže konstruisanjem visokog AT relativno malog prečnika.
- Konstruktori tradicionalno uzimaju da je odnos između visine i prečnika 1,5, da bi minimizirali zapreminu neaktivne prelazne zone.

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## AT direktno povezani sa sistemom daljinskog grejanja



# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## AT direktno povezani sa sistemom daljinskog grejanja

Pošto se u rezervoaru uvek javlja određeno širenje i skupljanje vode, kao posledica promene temperature u mreži daljinskog grejanja, potrebno je da se sistem neprekidno prazni ili puni da bi potreban nivo pritiska bio održan. U slučaju da nijedan toplotni rezervoar nije povezan za sistem, nivo pritiska se najčešće održava pomoću posude pod pritiskom u kojoj se nalazi gas određene zapremine koja se povezuje za ostatak sistema. Ova posuda se koristi tako što se u nju voda iz sistema prazni ako pritisak postane visok, a sistem biva punjen od strane posude ako pritisak sistema postane previše nizak. U slučaju kada je rezervoar hidraulički povezan za sistem, akumulator može da se koristi za održavanje pritiska u sistemu. U tom slučaju je potrebno da dimenzije rezervoara omogućavaju dodatnu zapreminu za širenje vode. Pritisak se određuje na osnovu nivoa vode na vrhu rezervoara na mestima gde je rezervoar povezan sa sistemom. Ovo je dovoljno za sisteme koji su manjih dimenzija, ako je površina na kojoj se nalaze objekti kojima se isporučuje toplota približno ravna, ili u slučaju kada se rezervoar za akumulaciju toplote nalazi na visokoj lokaciji u okviru sistema.



# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## **AT direktno povezani sa sistemom daljinskog grejanja**

Napojnom pumpom se određuje količina generisane toplote koja se uvodi u SDG, odnosno količina toplote koja se odvodi iz kotla.

Mrežna pumpa omogućava zadovoljenje potreba za toplotom u svim delovima mreže, putem održavanja potrebnog diferencijalnog pritiska.

Važna karakteristika ovog tipa skladištenja toplotne energije je i ta što se punjenje i pražnjenje AT može odvijati bez dodatne kontrole sistema i potrebe za dodatnom kontrolnom opremom. Punjenje i pražnjenje AT se ostvaruje varijacijom diferencijalnog pritiska između tople i hladne prirubnice na AT.

**U ovakvom sistemu može da postoji samo jedan AT.**

U slučaju potrebe za više AT, svi sem jednog moraju biti hidraulički odvojeni od mreže.

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## AT sa odvajanjem pritiska od SDG

Ovakav koncept je daleko složeniji od koncepta sa AT povezanim sa SDG. Koristi se:

- U slučajevima kada je konfiguracija terena takva da postoje velike visinske razlike.
- Kada je neophodno da se sistem za akumulaciju toplote instalira u mrežu višeg pritiska (npr. 16-25 bar), gde bi onda bilo skupo instalirati sistem za akumulaciju toplote koji je povezan sa SDG.

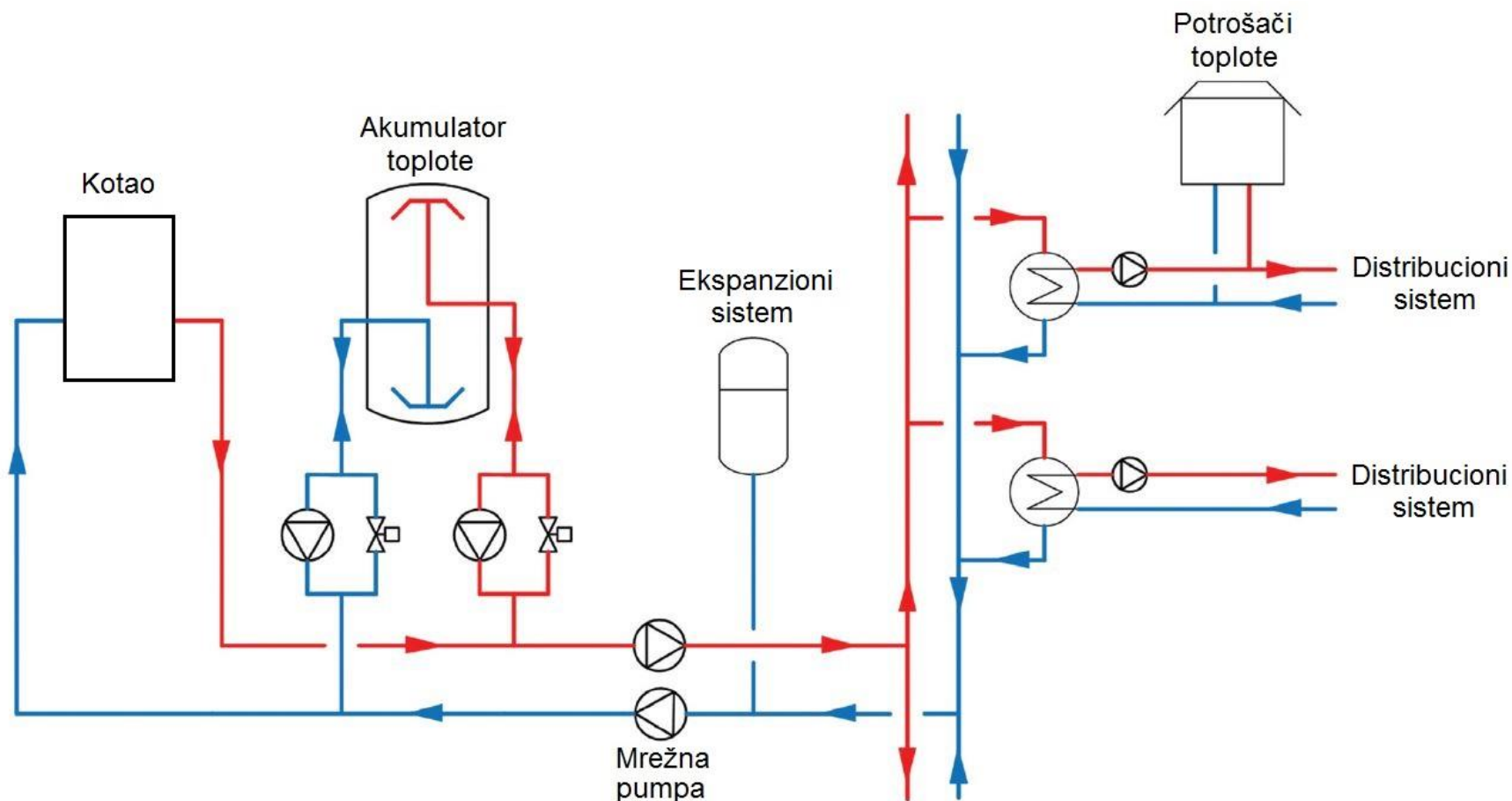
**Prednost ovog koncepta:** mogućnost implementacije više sistema za akumulaciju toplotne energije u jedan SDG.

Kod ovog koncepta AT je povezan sa SDG tako što je statički pritisak u njemu razdvojen od statičkog pritiska u mreži. To se postiže ugradnjom odvojenog ekspanzionog sistema i dodatnim ventilima za održavanje pritiska. Strujanjem kroz AT se upravlja dodatnim kontrolerima. Upravljanjem protoka na jednoj konekciji se obezbeđuje konstantna masa (ne zapremina) vode u AT. Upravljanjem protoka na drugoj konekciji se reguliše punjenje/praznjenje AT toplotnom energijom.

Odvajanje pritiska u AT od SDG je moguće i instaliranjem razmenjivača toplote umesto sistema pumpi i ventila, ali to rezultira smanjenjem kapaciteta za skladištenje toplote usled niže temperature vode u razmenjivaču toplote i otežanim kontinualnim upravljanjem sistemom za akumulaciju toplote.

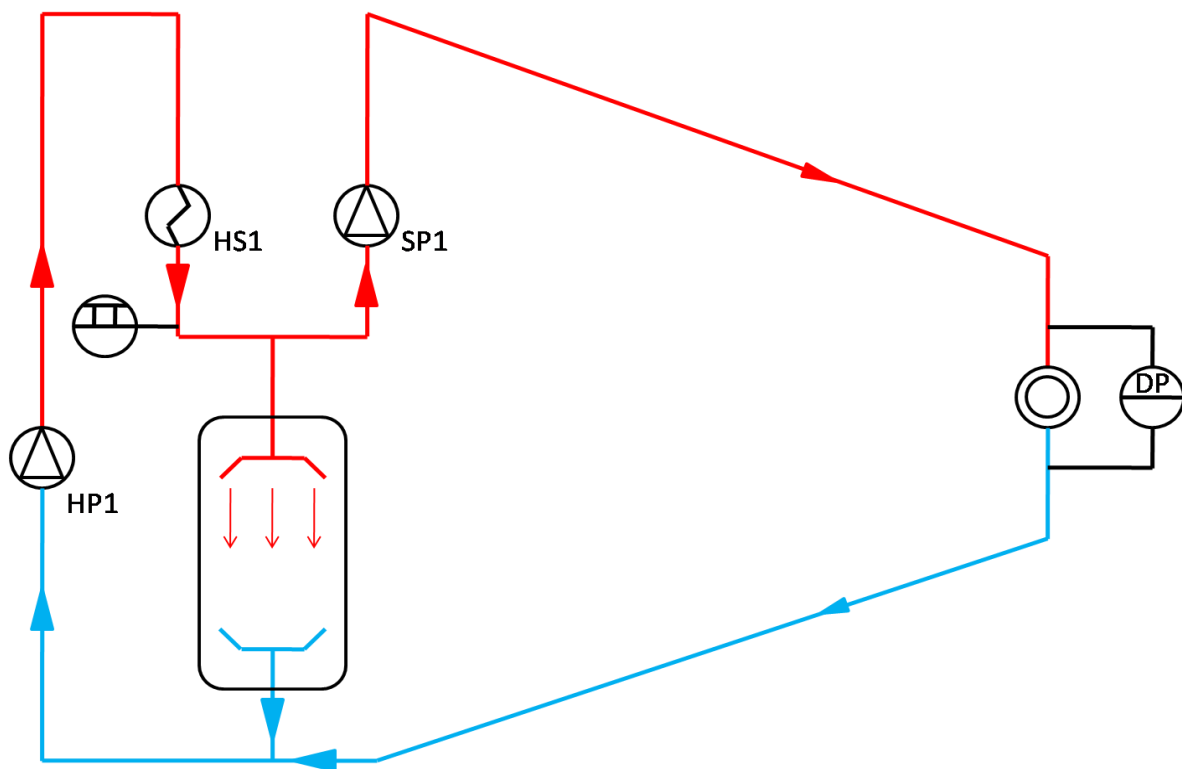
# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## AT sa odvajanjem pritiska od SDG



# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

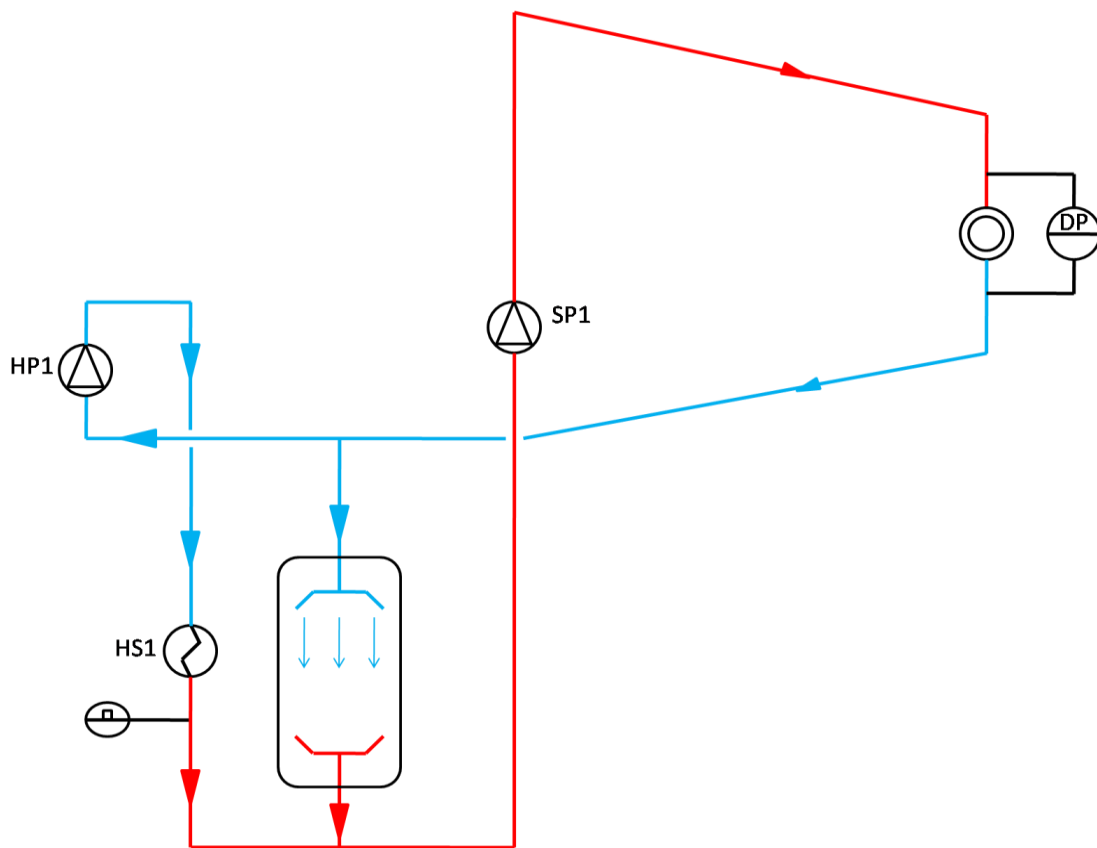
## Punjenje AT direktno povezanog na SDG



Napojna pumpa HP1 obezbeđuje protok kroz izvor toplote HS1, a protok je regulisan transponderom TT. Pumpa SP1 obezbeđuje potreban protok kroz mrežu, na osnovu diferencije pritiska koji se meri senzorom DP smeštenog kod kritičnog potrošača u mreži.

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

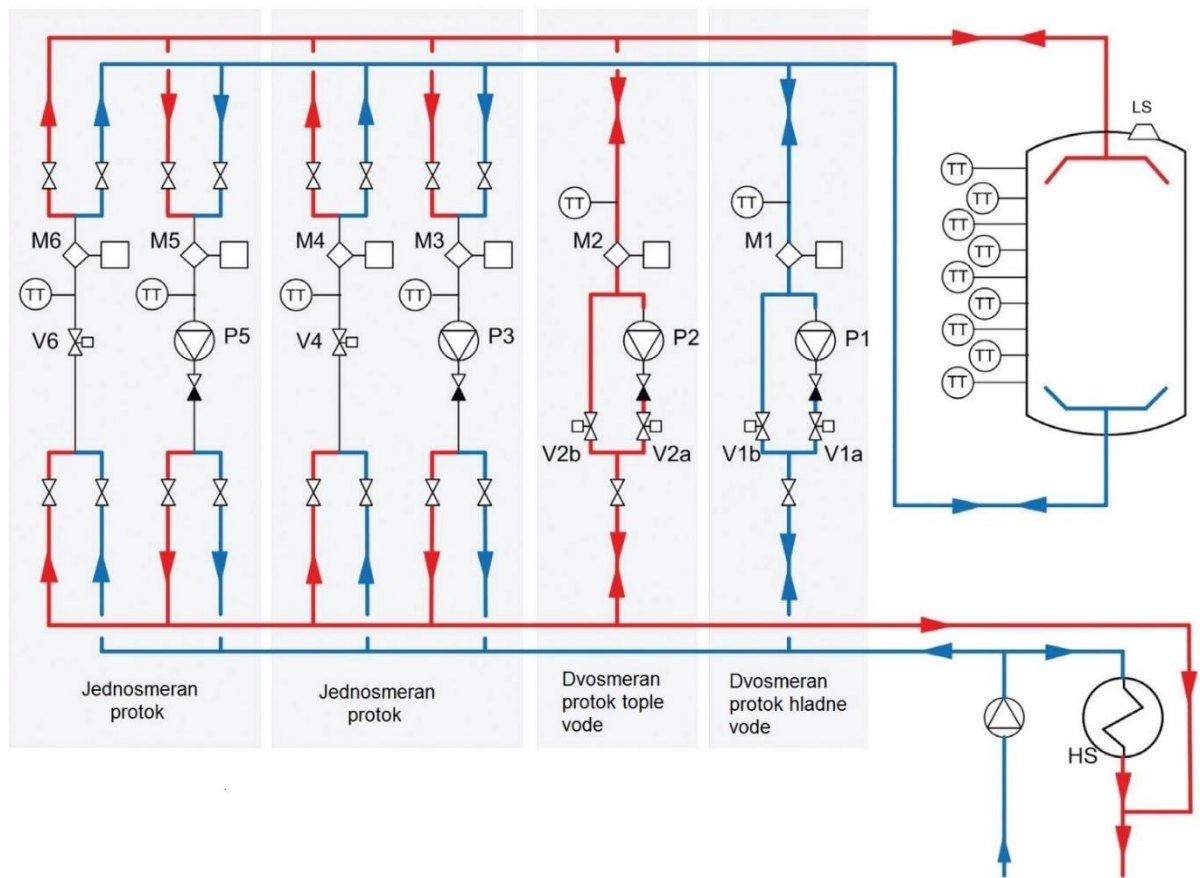
## Pražnjenje AT direktno povezanog na SDG



Napojna pumpa HP1 obezbeđuje protok kroz izvor toplote HS1, a protok je regulisan transmitemom TT. Pumpa SP1 obezbeđuje potreban protok kroz mrežu, na osnovu diferencije pritiska koji se meri senzorom DP smeštenog kod kritičnog potrošača u mreži.

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Regulacija masenog protoka



- Kontrolna jedinica za regulaciju masenog protoka mora da obezbedi da se masa vode u AT ne menja.
- Protok određuje operater
- Ako je AT decentralizovan protok se kontroliše radi održavanja definisane razlike pritiska tamo gde je AT postavljen.
- Povećanje razlike pritiska-indikacija viška energije u mreži, i tada treba povećati protok kroz AT, i obrnuto.

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## AT u sistemu za grejanje plastenika u PKB-u

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## AT u sistemu za grejanje plastenika u PKB-u







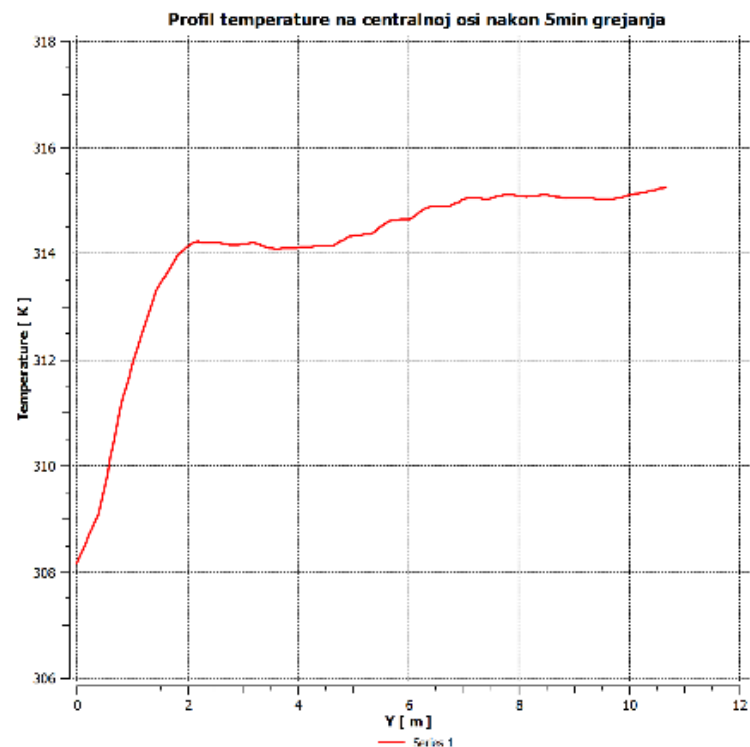
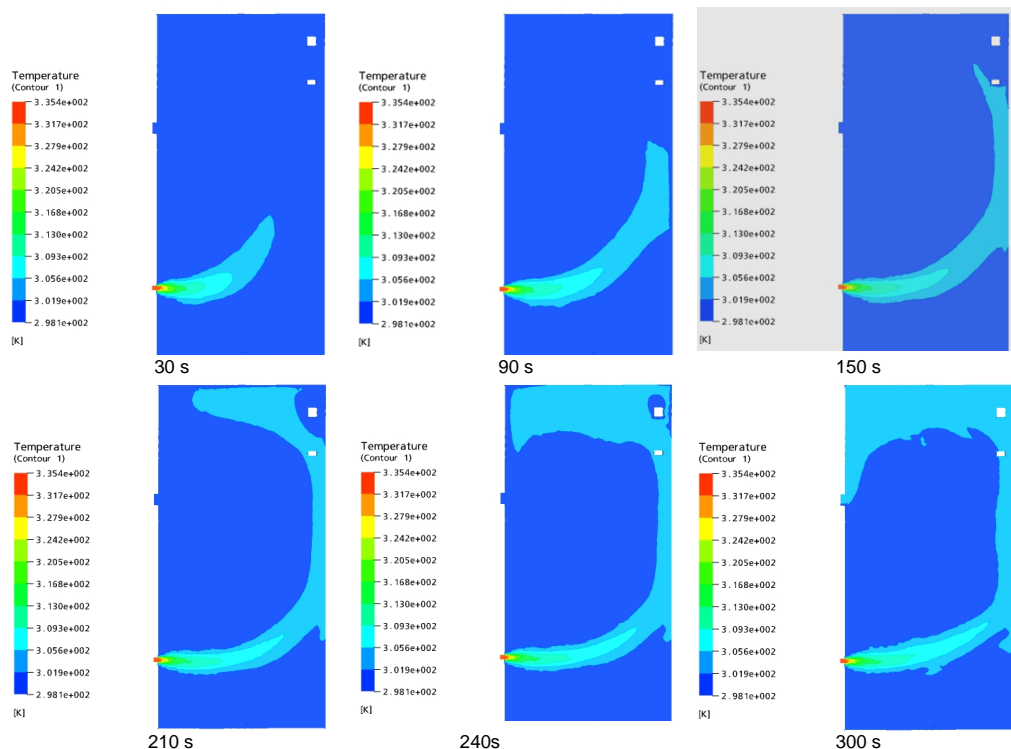
# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## AT u sistemu za grejanje plastenika u PKB-u

Početna temperatura u AT: 27°C

Ulazna temperatura tople vode: 53°C

Maseni protok: 11 kg/s



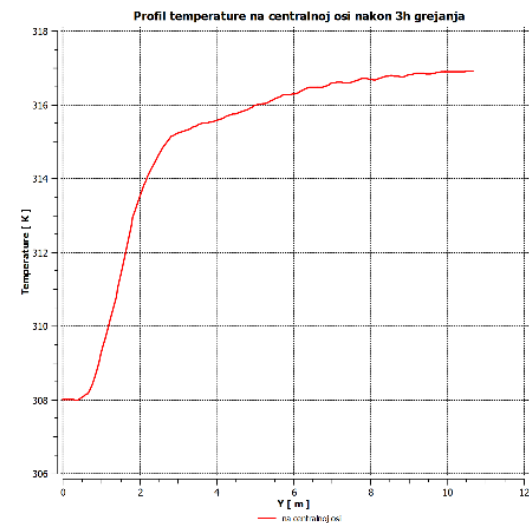
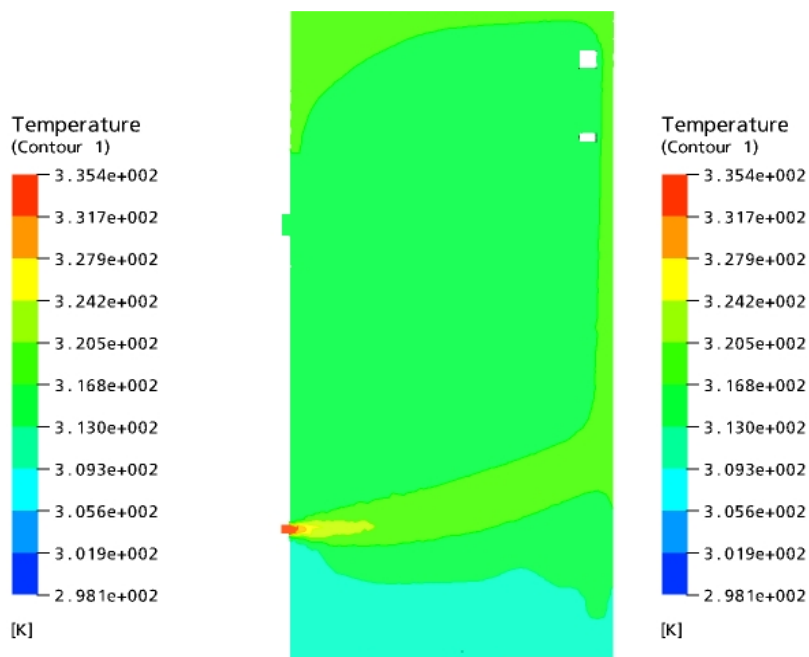
# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## AT u sistemu za grejanje plastenika u PKB-u

Početa temperatura u AT: 27°C

Ulazna temperatura tople vode: 53°C

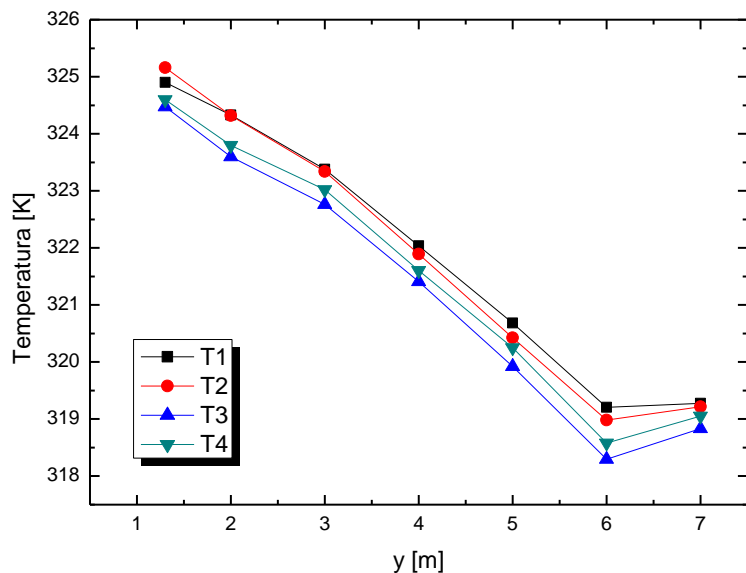
Maseni protok: 11 kg/s



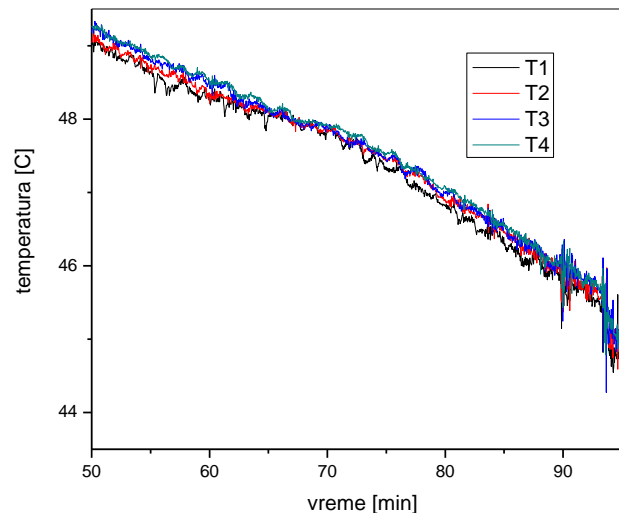
# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## AT u sistemu za grejanje plastenika u PKB-u Merenje temperature u AT

Stacionaran režim



Nestacionaran režim



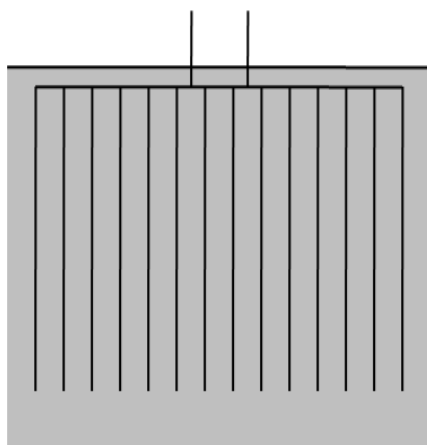
# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Sezonski AT

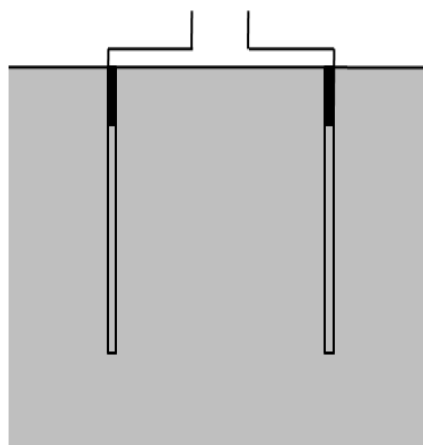
Potreba je uslovljena znatno manjom potražnjom za toplotnom energijom tokom leta u odnosu na hladnije mesece tokom godine.

Tri tipa:

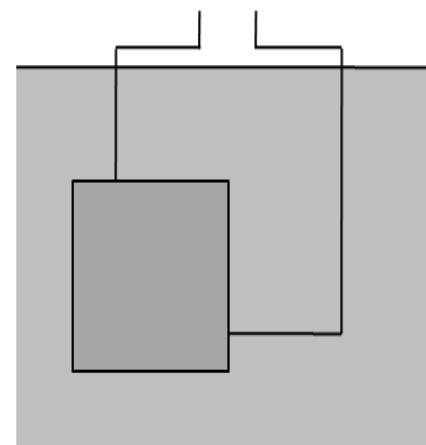
- Bušotine
- Vodonosnici
- Jame



Skladište bušotine



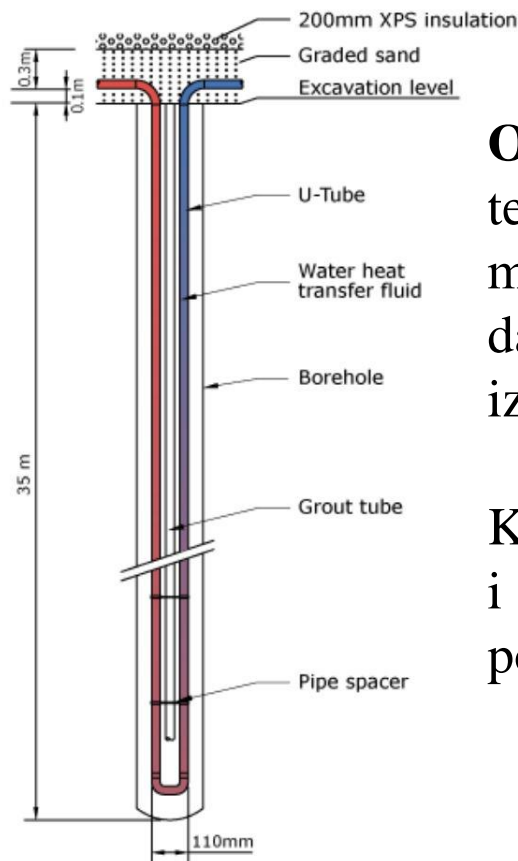
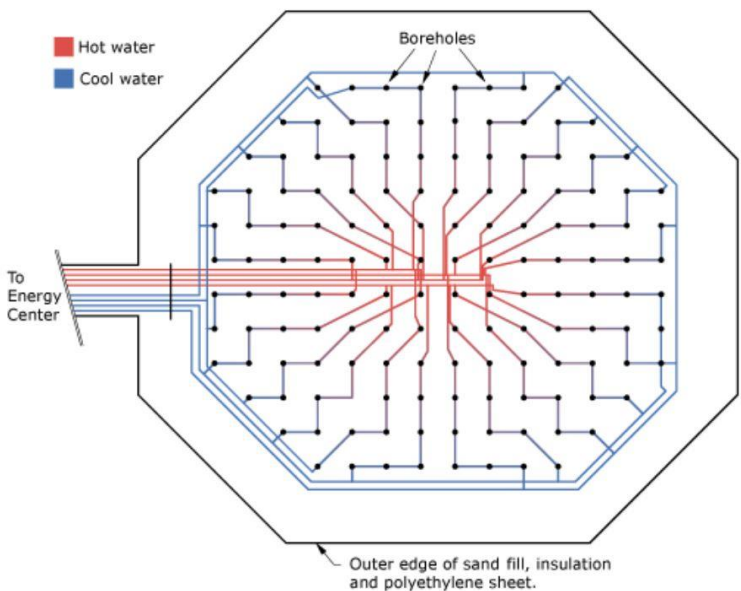
Skladište u vodonosniku



Skladište u jami

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Sezonski AT - bušotine



### Ograničenje:

temperatura vode koja se može skladištiti, obzirom da zemlja predstavlja izolacioni materijal.

Kod vodonosnika postoji i problem prodiranja podzemnih voda

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja

## Sezonski AT – jame

- Jame, koje su takođe poznate i kao jezera ili bazeni za skladištenje mogu biti deo većeg sistema za DG.
- Skladišta sa velikim kapacitetom, tj. 75.000 m<sup>3</sup> ili 100.000 m<sup>3</sup> prave se u najvećem broju slučajeva ispod parkirališta, sportskih objekata, ili na mestima koja se koriste za izgradnju velikih infrastrukturnih objekata.
- Eksperimentalno je utvrđeno da topla voda od 90-95°C može sa jako malim toplotnim gubicima biti uskladištena i nekoliko meseci.
- Što je veće skladište, to je manji gubitak toplote, i iznosi cca. 1°C nedeljno ili čak i mesečno, u zavisnosti od veličine i konstrukcije jame.
- Voda se greje do potrebne temperature i onda se upumpava u izolovanu jamu dok se potpuno ne napuni.
- Jama je obično 10-15 m duboka, sa kosim zidovima. Pošto je jama plitka nema stratifikacije.

# Akumulatori toplote u sistemima daljinskog grejanja



Avedore – Danska: 2 x 24.000 m<sup>3</sup>



**HVALA NA PAŽNJI!**