

KLIMATIZACIJA

Tema:

- EVAPORATIVNO HLAĐENJE

- ODBACIVANJE TOPLINE

Doc.dr.sc. Igor BALEN

Evaporativno hlađenje

- proces koji koristi isparavanje tekuće vode za neposredno ili posredno hlađenje struje zraka, tako da krajnja temperatura suhog termometra ili temperature suhog i vlažnog termometra struje zraka koja se hladi, budu niže od onih prije provođenja evaporativnog procesa.
- sustav klimatizacije evaporativnim hlađenjem je sustav u kojem se više od 50 % ukupnog hlađenja kroz godinu dobije evaporacijom.
- tri vrste procesa evaporativnog hlađenja:
 - (1) direktno evaporativno hlađenje
 - (2) indirektno evaporativno hlađenje
 - (3) direktno-indirektno (kombinirano) evaporativno hlađenje

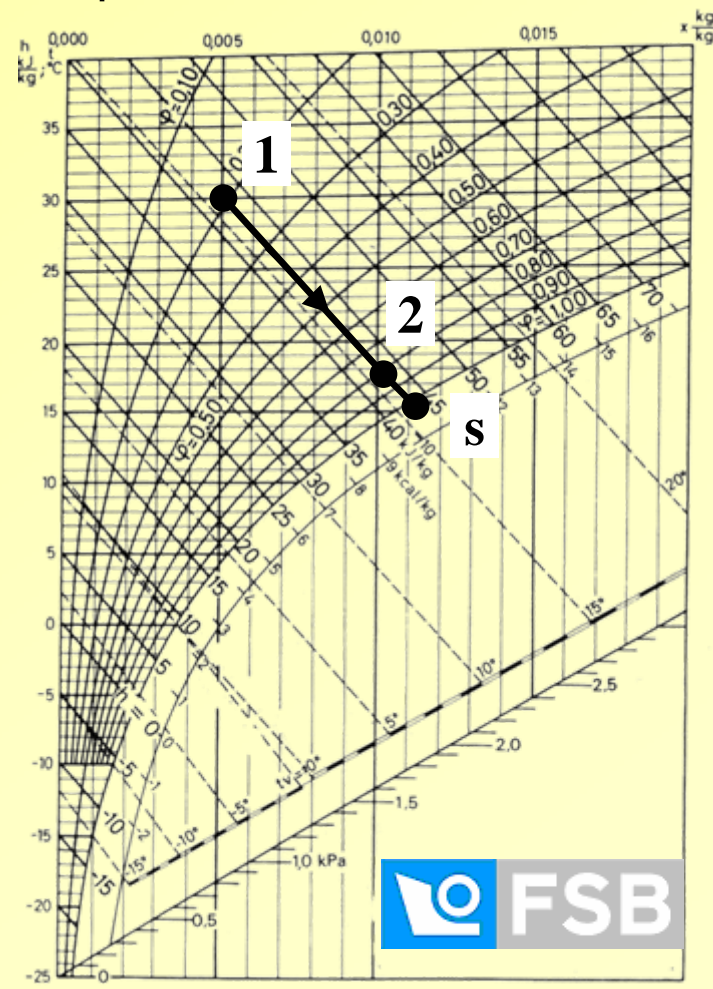
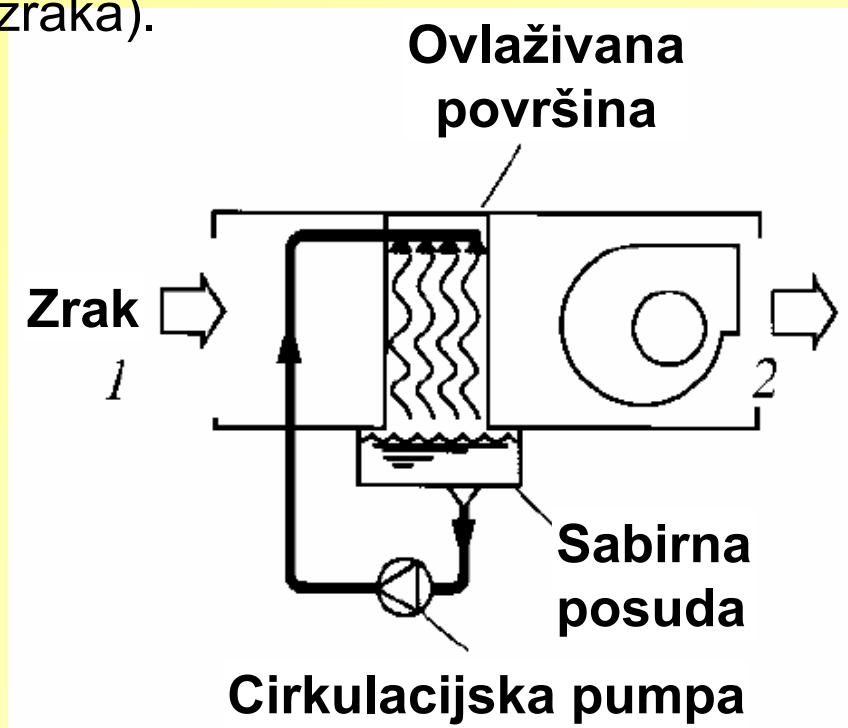
Evaporativno hlađenje

- prednosti evaporativnog sustava klimatizacije uključuju:

- Znatne energetske i materijalne uštede
- Smanjena vršna potreba za energijom
- Poboljšana kvaliteta unutarnjeg zraka
- Iskoristivost troškova tijekom vijeka trajanja
- Jednostavna ugradnja u postojeće sustave
- Dostupnost raznovrsne opreme
- Omogućuje ovlaživanje i odvlaživanje, prema potrebi
- Upotreba direktne digitalne regulacije (eng. DDC)
- Smanjenje emisije štetnih tvari u okoliš
- Ne koriste se klorofluorouglijci (CFC)

Direktno evaporativno hlađenje

- voda ishlapljuje neposredno u struji zraka, smanjujući temperaturu suhog termometra uz povećanje vlažnosti zraka.
- uređaji s direktnim ishlapljivanjem hlade zrak neposrednim dodirom s vodom preko velike ovlaživane površine (kao u kompaktnim hladnjacima zraka) ili raspršivanjem pomoću sapnica (kao u uređajima za pranje zraka).



Direktno evaporativno hlađenje

- za ocjenu djelovanja evaporativnog hladnjaka s neposrednim isparavanjem koristi se **učinkovitost direktnog zasićenja**:

$$\varepsilon_{sat} = \frac{t_{ae} - t_{al}}{t_{ae} - t_{ae}^*}$$

t_{ae} – temperatura suhog termometra zraka koji ulazi u evaporativni hladnjak s direktnim isparavanjem (točka 1) [°C]

t_{al} – temperatura suhog termometra zraka koji izlazi iz evaporativnog hladnjaka s direktnim isparavanjem (točka 2) [°C]

t_{ae}^* – temperatura vlažnog termometra ulaznog zraka (točka s) [°C]

- ako su t_{ae} i ε_{sat} poznati, t_{al} se može odrediti iz h,x dijagrama.
- učinak evaporativnog hlađenja:

$$Q_{ev,c} = \rho_a w_a A_a c_{pa} (t_{ae} - t_{al}) \quad [\text{W}]$$

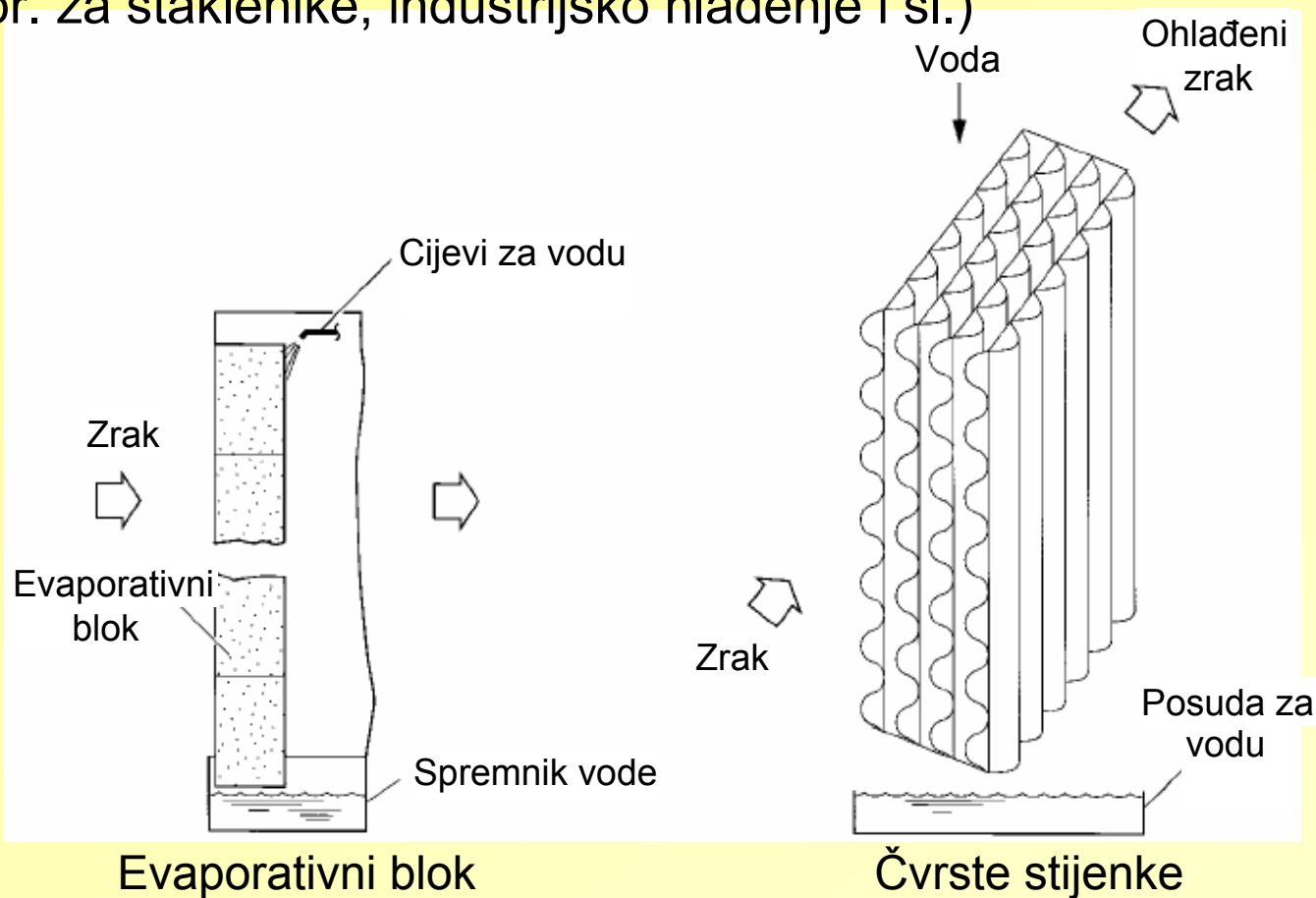
Nastrujna površina hladnjaka

Direktno evaporativno hlađenje

- u procesu direktnog evaporativnog hlađenja obično se koristi recirkulacija vode radi uštede vode, što je često isplativije.
- temperatura recirkulirajuće vode se postupno približava temperaturi vlažnog termometra hlađenog zraka. Recirkulacija zraka se ne koristi.
- budući je zrak u dodiru s vlažnom površinom, direktno evaporativno hlađenje provodi i određeno pročišćavanje zraka. No, kada hlađeni zrak sadrži više prašine ili drugih čestica, potrebno je koristiti dodatni filter da bi se spriječilo začepljivanje ovlaživane površine ili sapnica.
- za komfornu klimatizaciju brzina nastrujavanja ne treba biti veća od 3.0 m/s da bi se spriječilo prenošenje kapljica vode. U suprotnom treba ugraditi eliminator kapljica, što povećava pad tlaka na strani zraka.
- učinkovitost zasićenja za evaporativne hladnjake s neposrednim ishlapljivanjem kreće se u rasponu od 0.80 do 0.95.

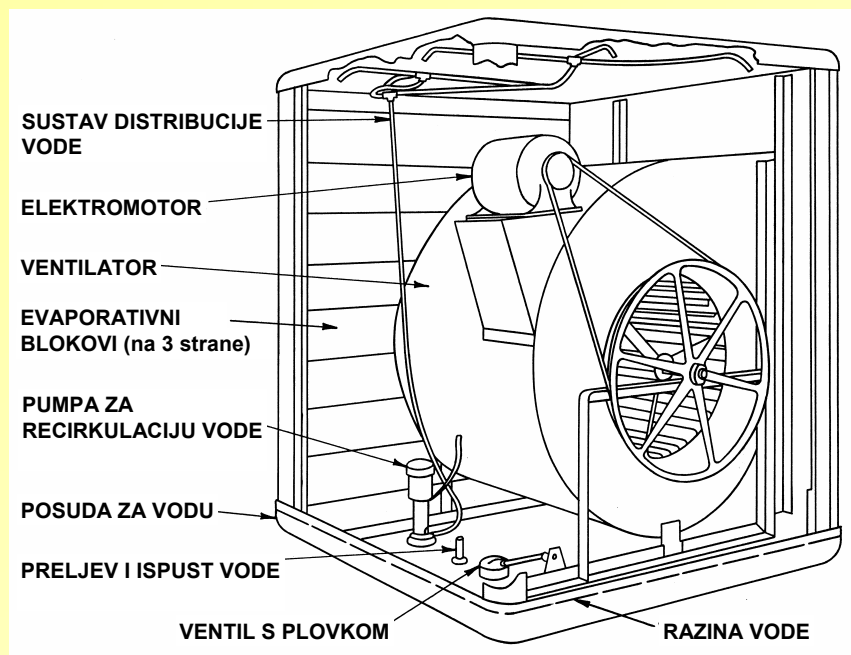
Direktno evaporativno hlađenje

- direktno evaporativno hlađenje je jednostavno i jeftino, a nedostatak mu je da, ako je temperatura vlažnog termometra u prostoru veća od 21°C , rashladni učinak nije dovoljan za komforno hlađenje unutarnjeg prostora; međutim, tada je hlađenje zadovoljavajuće za manje zahtjevne primjene (npr. za staklenike, industrijsko hlađenje i sl.)



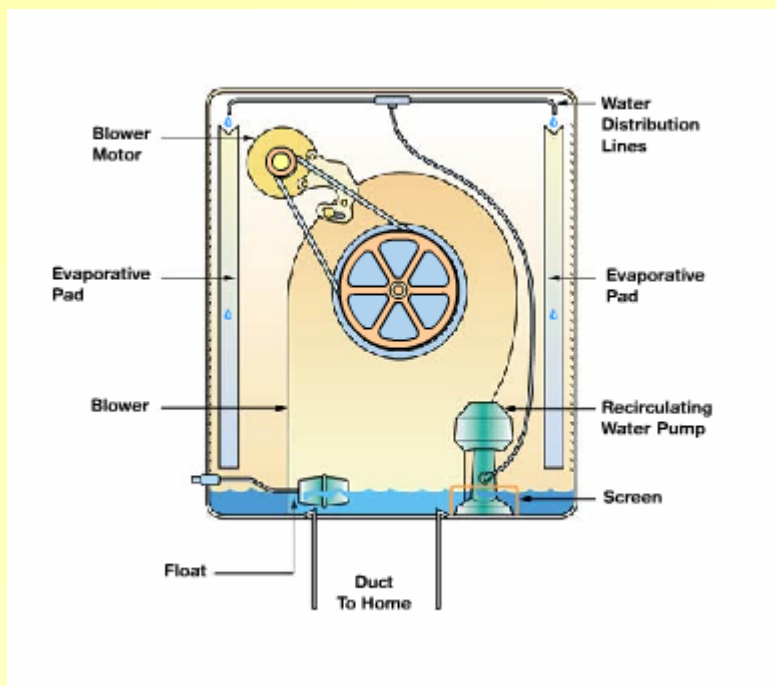
Direktno evaporativno hlađenje

- **evaporativni blok.** Uglavnom se radi od vlakana bijele topole, debljine 50 mm, uz potrebnu kemijsku pripremu i aditive za povećanje ovlaživosti i sprječavanje razvoja mikroorganizama, ili od apsorpcijskih plastičnih vlakana/pjene. Evaporativni blokovi se ugrađuju u pomične okvire od galvaniziranog čelika ili plastike.



Direktno evaporativno hlađenje

- blok zahtjeva relativno niske brzine strujanja (do 1.3 m/s)
- u samostalnom evaporativnom hladnjaku s direktnim isparavanjem u koji je ugrađen centrifugalni ventilator, evaporativni blokovi se često ugrađuju na tri stranice kućišta ventilatora radi povećanja površine.
- komercijalni hladnjaci zraka s raznim materijalima rade s učinkovitošću od približno 80% i iz zraka uklanjaju čestice veličine 10 μm i veće.
- standardnih evaporativnih hladnjaka kanalske izvedbe ima u veličinama od 7.500 do 30.000 m^3/h .

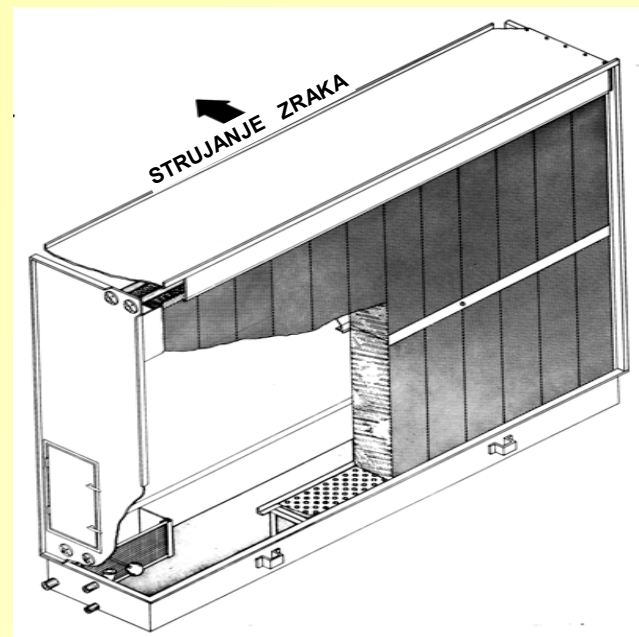


Direktno evaporativno hlađenje

- **čvrste stijenke.** Čvrste valovite ploče od plastike, impregnirane celuloze ili staklenih vlakana. Horizontalni kanali za strujanje zraka i vertikalni kanali za protok vode se križaju između dviju valovitih ploča. Uobičajena dubina medija u smjeru strujanja zraka je 300 mm. Podnose relativno visoke brzine strujanja (2 do 3 m/s), uz manji pad tlaka zraka (25 Pa), i imaju nešto veću učinkovitost zasićenja (do 95%) od evaporativnih blokova.

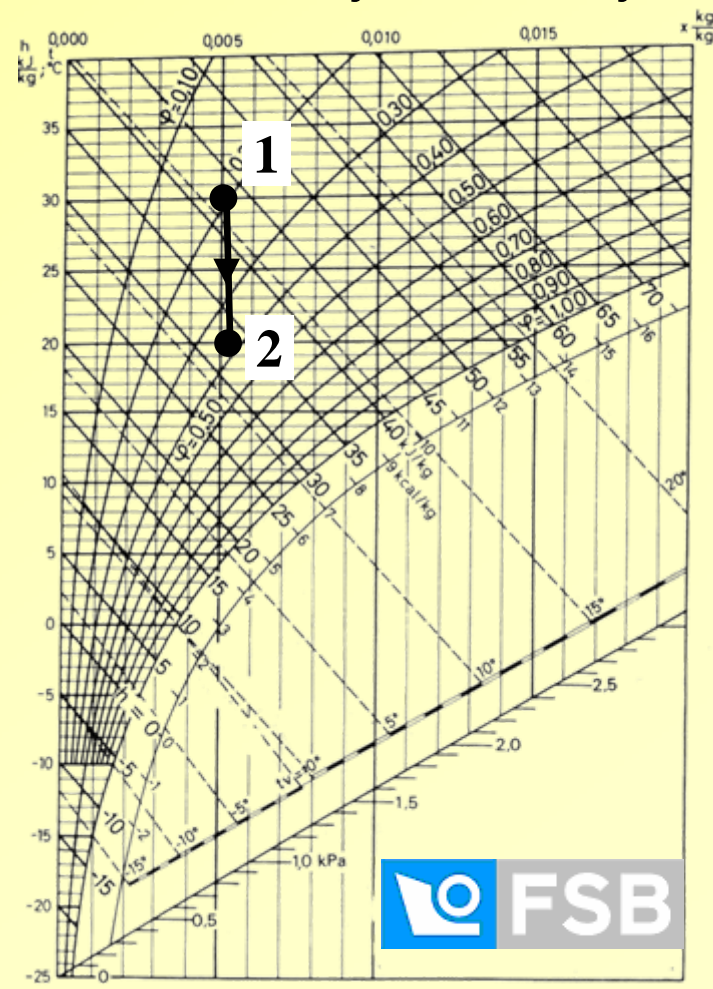
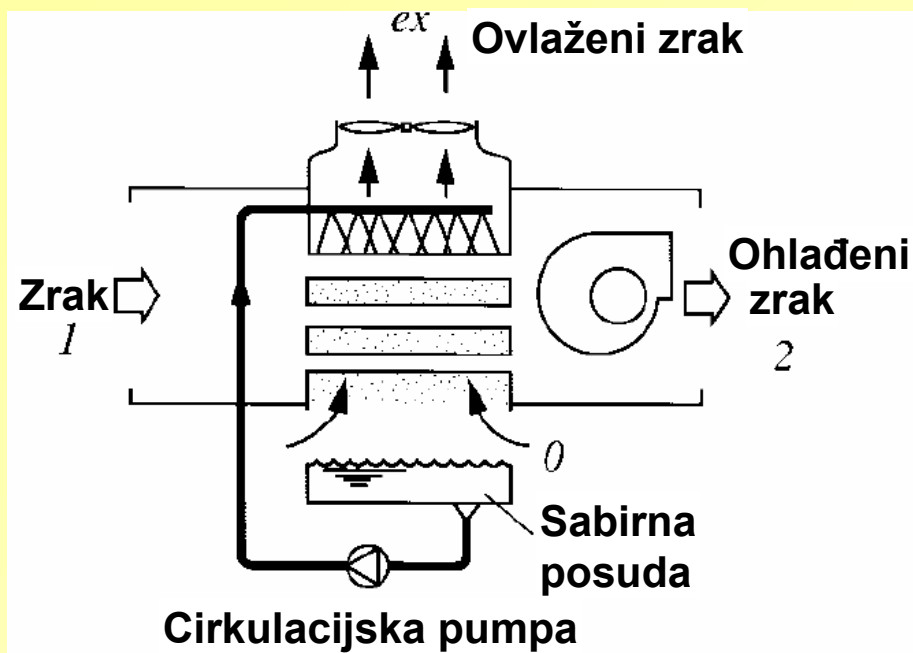
- hladnjaci zraka s čvrstim stijenama se proizvode za protoke zraka i do 1.000.000 m³/h, s ili bez ventilatora.

- dobro projektiran evaporativni hladnjak s direktnim ishlapljivanjem može smanjiti potrebu za električnom energijom i potrošnju rashladnog sustava za 10 do 30%.



Indirektno evaporativno hlađenje

- vanjski zrak ili istrošeni zrak iz klimatiziranog prostora prolazi s jedne strane izmjenjivača topline. Taj zrak (sekundarna struja) se hladi ishlapljivanjem, a primarna struja zraka (klimatizirani zrak koji se dobavlja u prostor) se hladi osjetno preko površina izmjenjivača topline.



Indirektno evaporativno hlađenje

- dobavni (primarni) zrak može biti recirkulirajući zrak iz prostorije, vanjski zrak ili mješavina tih dviju struja.
- iskoristivost indirektnog evaporativnog hlađenja je povezana sa smanjenjem temperature vlažnog termometra sekundarnog zraka ispod temperature suhog termometra ulaznog primarnog zraka. Izlazna temperatura suhog termometra primarnog zraka uvijek je iznad ulazne temperature vlažnog termometra sekundarne struje.
- budući da se evaporativno hladi sekundarna struja zraka, a ne primarna, indirektno evaporativno hlađenje je učinkovito u skoro svim primjenama klimatizacije, neovisno o geografskoj lokaciji.
- omjer protoka sekundarnog (ovlaženog) zraka i primarnog (ohladenog) zraka može biti u rasponu od ispod 0.3 do iznad 1.0 što utječe na pogonske karakteristike sustava.

Indirektno evaporativno hlađenje

- kada se evaporativni hladnjak s posrednim ishlapljivanjem ugradi u seriju (uz struju zraka) s konvencionalnim hladnjakom, smanjuje se osjetno opterećenje hladnjaka i rashladnog sustava. Time se, za postojeći sustav hlađenja i klimatizacije može povećati ukupna iskoristivost, budući se smanjuju energetske potrebe i troškovi pogona.
- kod novih sustava se može dimenzionirati manji rashladnik, čime se:
 - (1) smanjuje nabavna cijena sustava
 - (2) smanjuju pogonski troškovi i vršna snaga.
- indirektno evaporativno hlađenje može smanjiti i ukupno vrijeme trajanja pogona rashladne opreme tijekom godine (u dijelu godine dovoljno je samo evaporativno hlađenje).

Indirektno evaporativno hlađenje

- učinkovitost indirektnog evaporativnog hlađenja:

$$\varepsilon_{IE} = \frac{t_{a1} - t_{a2}}{t_{a1} - t_s^*}$$

t_{a1} – temperatura suhog termometra na ulazu primarnog zraka (t.1) [°C]

t_{a2} – temperatura suhog termometra na izlazu primarnog zraka (t.2) [°C]

t_s^* – temperatura važnog termometra na ulazu sekundarnog zraka [°C]

- komercijalna oprema za indirektno evaporativno hlađenje nudi se u rasponu učinkovitosti od 40 do 80%.

- učinak indirektnog evaporativnog hlađenja:

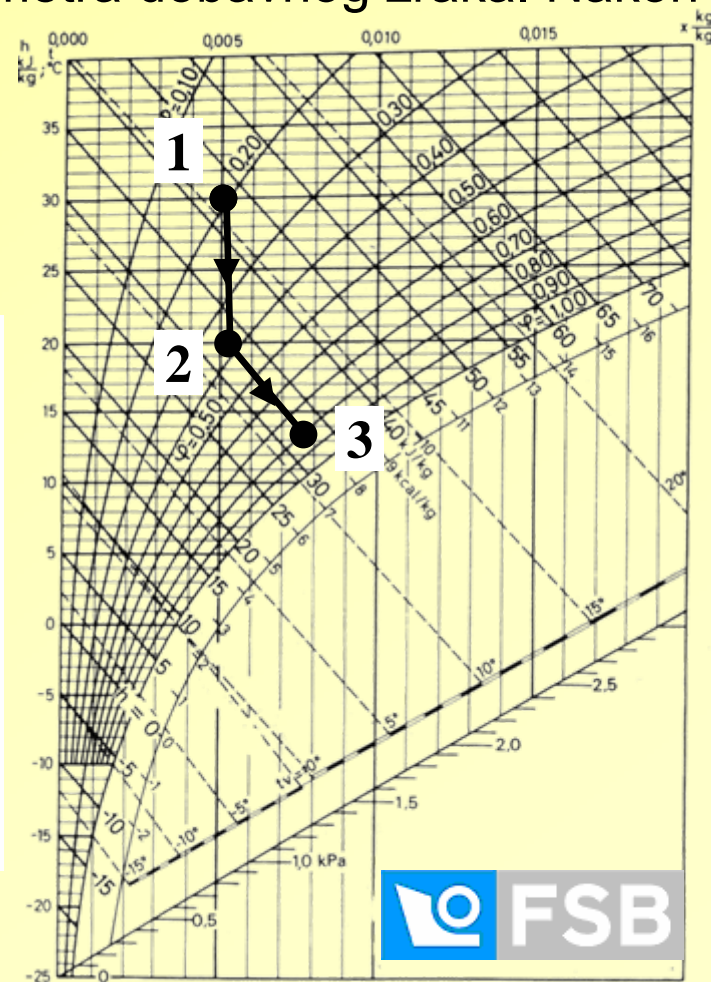
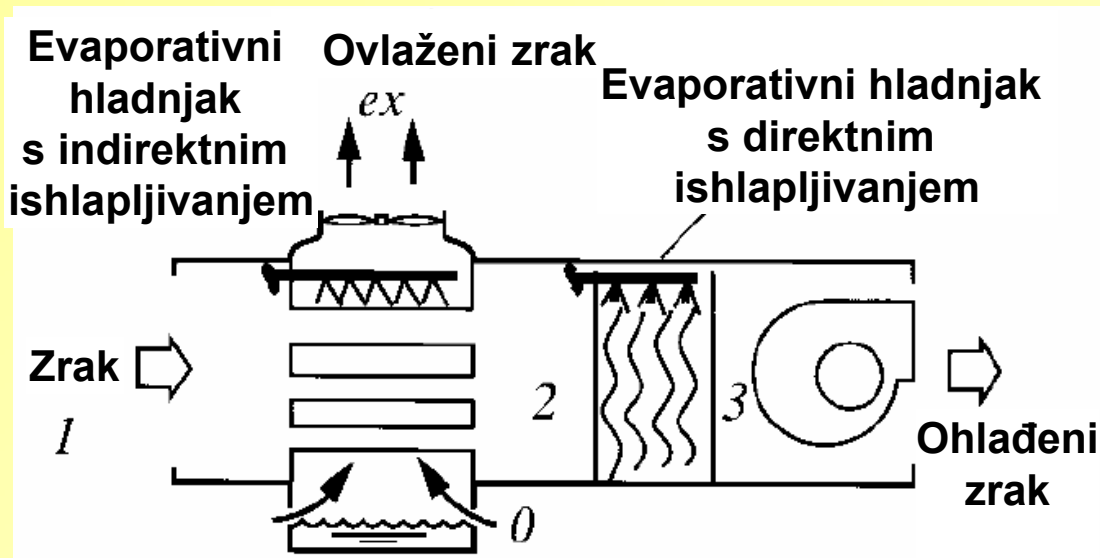
$$Q_{ev,c} = \dot{V}_a \rho_a c_{pa} \varepsilon_{IE} (t_{a1} - t_s^*) \quad [\text{W}]$$

Indirektno evaporativno hlađenje

- uobičajena brzina strujanja ohlađenog zraka kroz prolaze u uređaju je od 2 do 5 m/s. Važno je ograničiti brzinu strujanja sekundarnog (vlažnog) zraka zbog sprječavanja odnošenja kapljica vode (gubici vode).
- učinkovitost evaporativnog hladnjaka s indirektnim ishlapljivanjem se obično kreće od 60% pri padu tlaka na strani zraka oko 50 Pa do 80% pri padu tlaka oko 250 Pa.
- pad tlaka na strani ohlađenog zraka u evaporativnim hladnjacima s indirektnim ishlapljivanjem se kreće od 50 do 375 Pa, ovisno o brzinama strujanja u izmjenjivaču topline i razvodnim kanalima. Pad tlaka na strani sekundarnog ovlaženog zraka se kreće od 125 do 250 Pa. Omjer volumenskih protoka primarnog ohlađenog i sekundarnog ovlaženog zraka se mijenja u rasponu od 0.85 do 1.7.

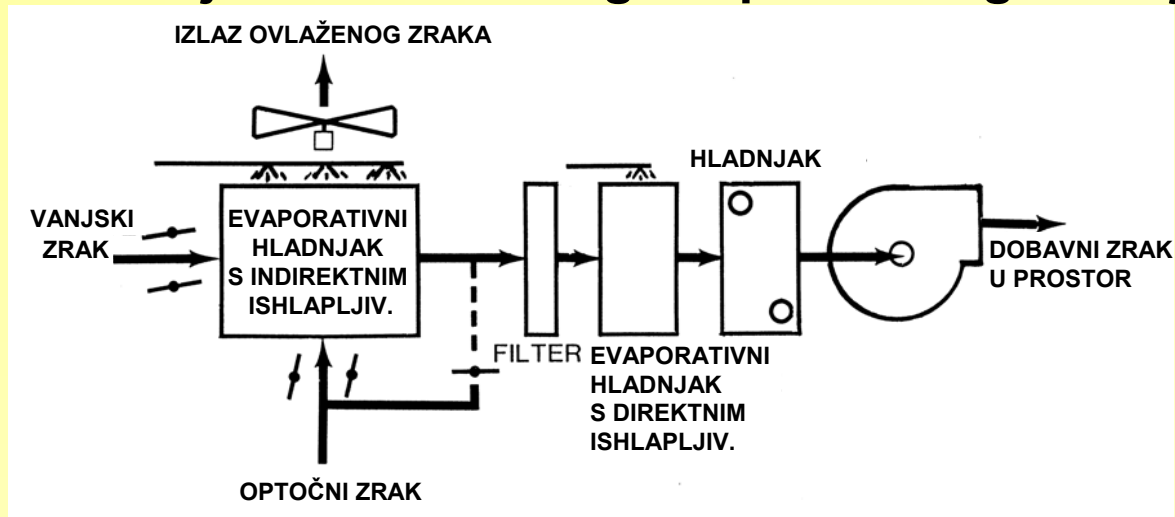
Direktno-indirektno evaporativno hlađenje

- u dvostupanjskom evaporativnom hladnjaku s neposrednim i posrednim ishlapljivanjem, u prvom stupnju se indirektnim evaporativnim hladnjakom smanjuju temperature suhog i vlažnog termometra dobavnog zraka. Nakon toga dobavni zrak u drugom stupnju prolazi kroz direktni evaporativni hladnjak.



Direktno-indirektno evaporativno hlađenje

- za suhi vanjski okoliš, direktno-indirektno evaporativno hlađenje se obično projektira za dobavu 100% vanjskog zraka u klimatizirane prostore.
- u područjima s visokom projektnom temperaturom vlažnog termometra, odnosno gdje proračun traži da temperatura dobavnog zraka bude niža nego što je ostvarivo korištenjem direktno-indirektnog evaporativnog hlađenja, može se ugraditi i treći stupanj hlađenja. Taj stupanj može biti hladnjak s direktnom ekspanzijom ili **hladnjak** s rashladnom vodom **smješten** uz ili niz struju od direktnog evaporativnog hladnjaka, ali **uvijek niz struju od indirektnog evaporativnog hladnjaka**.



Direktno-indirektno evaporativno hlađenje

- kao izvor sekundarnog zraka može se koristiti vanjski zrak ili povratni zrak iz građevine, ovisno o tome koji ima nižu temperaturu vlažnog termometra. Vanjski zrak je uglavnom lakše ohladiti, a u slučajevima kada je izlaz istrošenog zraka previše udaljen od mjesta pripreme zraka, vanjski zrak je i jedini izbor. Ako se istrošeni zrak iz zgrade može iskoristiti, time se dobiva mogućnost povrata topline tijekom hladnog vremena.
- elementi sustava kojima se može upravljati uključuju:
 - Zaklopke za omjer miješanja vanjskog i optočnog zraka
 - Sekundarne ventilatore i recirkulacijske pumpe u stupnju indirektnog evaporativnog hlađenja
 - Recirkulacijske pumpe u stupnju direktnog evaporativnog hlađenja
 - Čelne i obilazne zaklopke u kanalima u stupnju indirektnog evaporativnog hlađenja
 - Protok rashladne vode ili radne tvari u stupnju konvencionalnog hlađenja
 - Pojedine distributere ili cijeli sustav s promjenom protoka zraka s VAV ventilima, zakretanje lopatica ventilatora ili ventilator s varijatorom brzine.

Direktno-indirektno evaporativno hlađenje

- u usporedbi s jednostupanjskim indirektnim evaporativnom hladnjakom, dvostupanjski direktno-indirektni evaporativni hladnjak značajno smanjuje temperaturu u prostoru. Veća relativna vlažnost ohlađenog dobavnog zraka je uglavnom prihvatljiva kada dobavni zrak preuzima osjetno toplinsko opterećenje prostora i održava željenu relativnu vlažnost u prostoru tijekom ljetnih vrućina.
- prednosti rashladnog sustava s dvostupanjskim direktno-indirektnim evaporativnim hladnjakom su sljedeće:
 - evaporativno hlađenje zamjenjuje sav potreban rashladni učinak i održava unutarnji okoliš u granicama toplinske ugodnosti ljeti (prema ASHRAE) ako je stanje vanjskog zraka odgovarajuće.
 - može se uzeti više vanjskog zraka za ventilaciju čime se poboljšava kvaliteta unutarnjeg zraka.
 - u sezoni grijanja moguća je bolja regulacija relativne vlažnosti unutarnjih prostora koja tada može biti vrlo niska.
- učinkovitost indirektnih evaporativnih hladnjaka je oko 60%, a učinkovitost zasićenja direktnih evaporativnih hladnjaka je oko 90%.

Evaporativno hlađenje

- **Priprema vode.** Učinkovita kemijska priprema i program biocida za rashladne tornjeve nije uvijek pogodan za evaporativne hladnjake. Direktni evaporativni hladnjaci i rashladni tornjevi se značajno razlikuju po tome što su evaporativni hladnjaci direktno povezani sa strujom dobavnog zraka. Mora se uzeti u obzir učinak koji biocidi mogu imati na evaporativni medij (i kod direktnih i kod indirektnih sustava), kao i potencijalna agresivna i/ili štetna ishlapljenja.
- najbolje je da postupak predpripreme dobavne vode kemikalijama propiše stručnjak specijalist.
- kao alternativa standardnoj pripremi vode kemijskim biocidima koriste se sustavi za proizvodnju ozona.

- **Kamenac.** S uređaja koji imaju izmjenjivače topline s površinama koje se potpuno ovlažuju i koje su od materijala kojima kemikalije ne štete, kamenac se može uklanjati periodički primjenom komercijalnih sredstava za uklanjanje kamenca i ispiranjem.

Evaporativno hlađenje

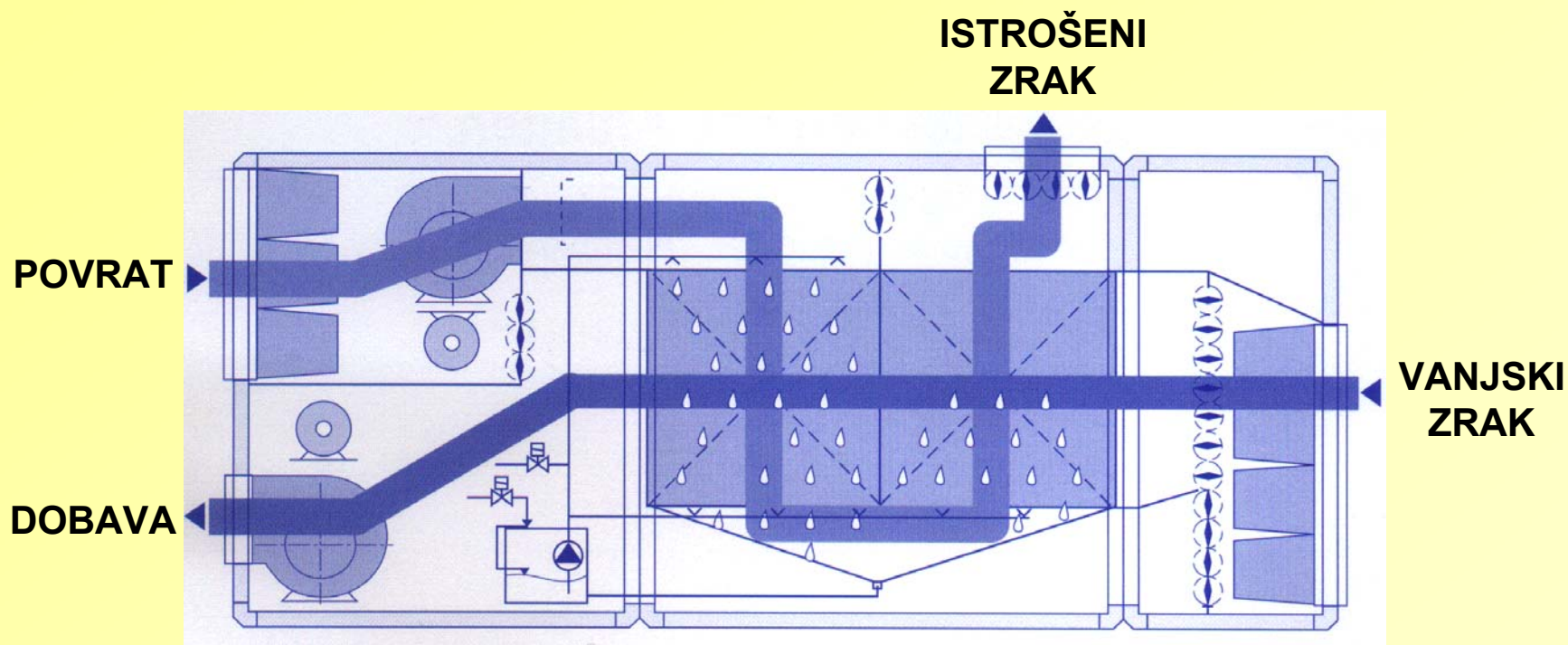
- **Zaštita od smrzavanja.** U hladnijim klimatskim poručjima, evaporativni se hladnjaci moraju zaštititi od smrzavanja. To se uglavnom radi sezonski jednostavnim ispuštanjem tekućine iz hladnjaka i dobavnog cjevovoda za vodu pomoću solenoidnih ventila. Taj postupak često pokreću osjetnici temperature vanjskog zraka.
- **Legionarska bolest.** Legionarskom bolešću osoba se može zaraziti udisanjem vodenog aerosola (1 do 5 μm u promjeru) koji sadrži dovoljnu količinu bakterija *Legionella pneumophila* u donji dio dišnog sustava. Evaporativni hladnjaci ne pružaju uvjete pogodne za razvoj te bakterije i uglavnom ne otpuštaju aerosol.

Primjena evaporativnog hlađenja

- **Hlađenje zraka.** Evaporativno hlađenje se koristi u skoro svim klimatskim područjima. Temperatura vlažnog termometra ulazne struje zraka ograničava direktno evaporativno hlađenje. Temperatura vlažnog termometra sekundarne struje zraka ograničava indirektno evaporativno hlađenje. Zato u nekim klimatskim područjima može postojati potreba za konvencionalnim hlađenjem tijekom dijela godine.
- u usporedbi s pogonskim troškovima samo konvencionalnog hlađenja, direktno evaporativno hlađenje uz dodatno konvencionalno hlađenje smanjuje troškove eksploatacije za 25 do 40%.
- indirektno evaporativno hlađenje može uštedjeti od 60 do 75% ukupnih troškova eksploatacije čistog konvencionalnog hlađenja pri ostvarivanju istog rashladnog učinka.

Primjena evaporativnog hlađenja

- primjer povrata topline kod indirektnog evaporativnog hlađenja:



Primjena evaporativnog hlađenja

- **Ovlaživanje.** Na tri načina:

- (1) upotrebom recirkulirajuće vode bez prethodne pripreme zraka
 - (2) predgrijavanjem zraka i upotrebom recirkulirajuće vode za ovlaživanje
 - (3) zagrijavanjem recirkulirajuće vode
- na izlazu iz evaporativnog hladnjaka koji se koristi kao ovlaživač, zrak će imati znatnu zasićenost vlagom tijekom rada uređaja. Razlika između temperatura suhog i vlažnog termometra na izlazu može biti manja od 1°C.
- u uređaj za ovlaživanje s direktnim ishlapljivanjem, zrak ne bi smio ulaziti s temperaturom suhog termometra nižom od 4°C; u suprotnom je znatan rizik od smrzavanja.

- **Pranje zraka.** Sve vrste evaporativnih hladnjaka s neposrednim ishlapljivanjem barem djelomično vrše “pranje” zraka. Direktni evaporativni hladnjaci s čvrstim stijenkama efikasno uklanjaju čestice veličine od 1 µm. Uređaji za pranje zraka uklanjaju čestice veličine od 10 µm. Direktni evaporativni hladnjaci vrše funkciju škropnih prečistača i djelomično uklanjaju plinovite zagađivače iz vanjskog zraka.

Primjena evaporativnog hlađenja

- razmatranja glede vanjskog zraka:
- iskoristivost direktnog i indirektnog evaporativnog hlađenja ovisi o termodinamičkom stanju ulaznog zraka.
- u slučajevima kada se vanjski zrak koristi za direktno evaporativno hlađenje, na projekt znatno utječu prevladavajuće lokalne temperature suhog i vlažnog termometra vanjskog zraka, kao i namjena sustava.
- u slučajevima kada se optočni zrak koristi kao sekundarni zrak za indirektno evaporativno hlađenje, na projekt manje utječu lokalni vanjski vremenski uvjeti, što evaporativno hlađenje čini primjenjivim u toplom i vlažnom vanjskom okolišu.
- ukupni zahtjevi za konvencionalnim hlađenjem mogu se smanjiti za 40 do 85% godišnje ovisno o lokaciji, konfiguraciji sustava i karakteristikama opterećenja.

Primjena evaporativnog hlađenja

- primjer:

Potrebno je proračunati evaporativni hladnjak s indirektnim ishlapljivanjem za jednokatnu poslovnu zgradu veličine 15 x 24.4 m, visinom stropa 3 m i ravnim krovom. Za proračunske vanjske uvjete se uzima temperatura 35°C suhog i 18.3°C vlažnog termometra. Sljedeći toplinski dobici se moraju uzeti u proračunu:

(1) ukupno osjetno toplinsko opterećenje 48.1 kW

(2) ukupno latentno toplinsko opterećenje 6.2 kW

Odredite potrebnu količinu zraka, temperaturu i sadržaj vlage na izlazu iz hladnjaka (dobavni zrak za prostoriju) i sadržaj vlage zraka na izlazu iz prostorije.

Pretpostavljena temperaturna razlika između temperature u prostoriji i temperature dobavnog zraka je 5°C, a iskoristivost uređaja je 80%.

Rješenje:

$$\dot{V}_{AC} = \frac{q_{s,\max}}{\rho c_p \Delta t_{AC}} = 48.1 / (1.2 \times 5) = 8.0 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t_{a2} = t_{a1} - \varepsilon_{IE} (t_{a1} - t_s^*) = 35 - 0.8(35 - 18.3) = 21.6 \text{ }^\circ\text{C}$$

- iz Mollierovog h,x dijagrama: $x_{a1} = 11.85 \text{ g/kg}$

$$x_r = x_a + \frac{q_{l,\max}}{\rho r_0 \dot{V}_{AC}} = 11.85 + 6.2 / (3 \times 8) = 12.11 \text{ g/kg.}$$

Odbacivanje topline

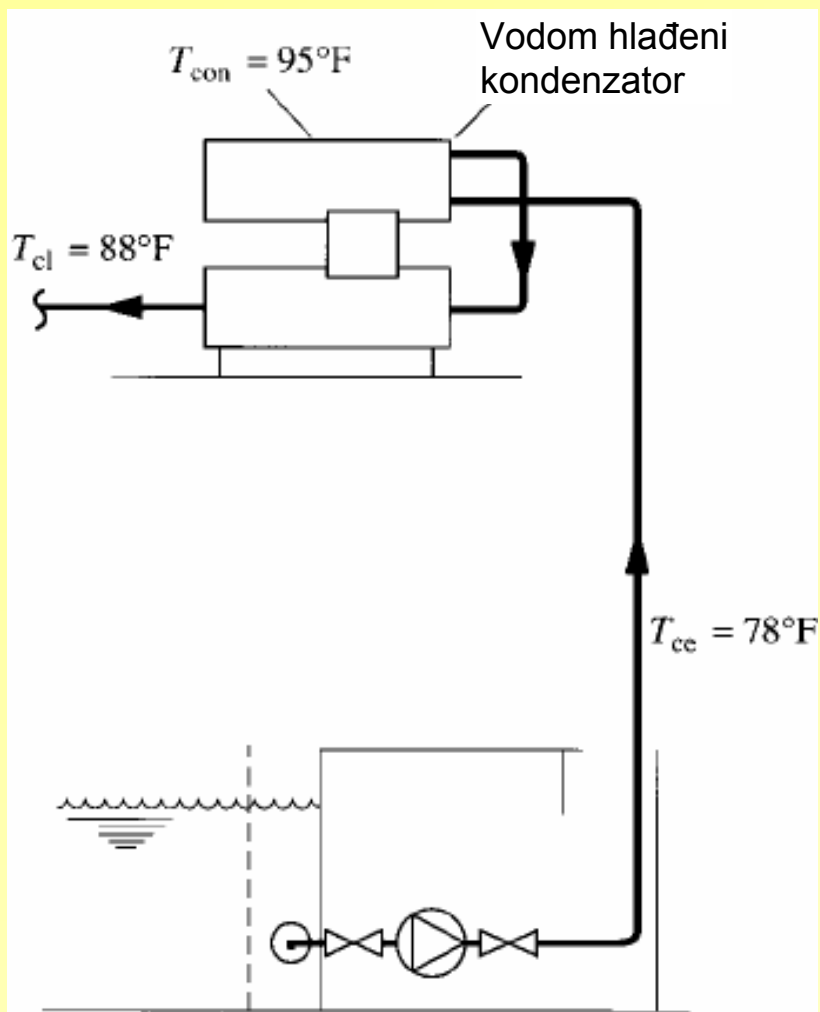
- sustav za odbacivanje topline odvodi toplinu kondenzacije od rashladnog sredstva u kondenzatoru te je djelomično ili potpuno koristi za grijanje zimi i u druge svrhe ili je predaje u toplinski ponor (najčešće okolišnji zrak ili površinska voda).

- uobičajene su četiri vrste sustava odbacivanja topline koji se koriste u kompresorskim rashladnim sustavima:

1. Vodom hlađeni kondenzatori koji neposredno koriste jezersku, riječnu, podzemnu ili morsku vodu
2. Vodom hlađeni kondenzatori koji koriste recirkulacijsku vodu iz rashladnih tornjeva
3. Zrakom hlađeni kondenzatori
4. Evaporativni kondenzatori koji odvedu toplinu kondenzacije iz izmjenjivača pomoću efekta evaporativnog hlađenja.

Odbacivanje topline

1. Vodom hlađeni kondenzatori koji neposredno koriste jezersku, riječnu, podzemnu ili morsku vodu



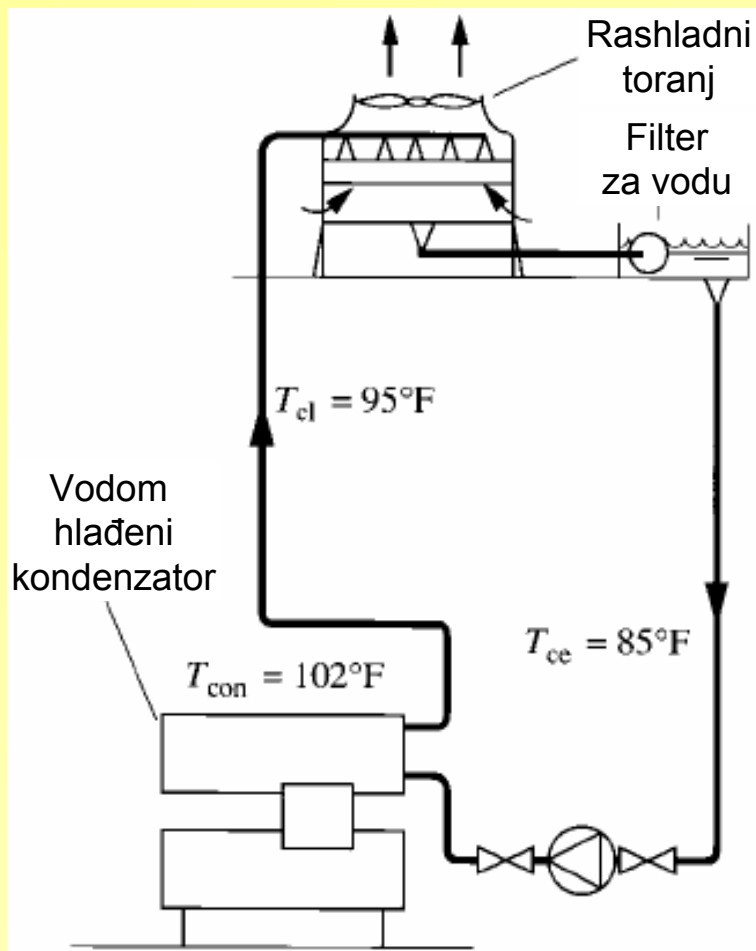
- često je potrebno ugraditi uređaj za filtraciju vode kako bi se spriječilo onečišćenje cijevi kondenzatora. Ovisno o kvaliteti rashladne vode, može se tražiti priprema vode.

- korištenje riječne, jezerske, morske ili podzemne vode je metoda jednog prolaska, jer ta voda ne može recirkulirati i ponovno se koristiti u kondenzatoru.

- morska voda je korozivna za mnoge metale. Za kondenzatore hlađene morskom vodom često se koriste cijevi od legura bakra i nikla, nehrđajući čelik i titan.

Odbacivanje topline

2. Vodom hlađeni kondenzatori koji koriste recirkulacijsku vodu iz rashladnih tornjeva

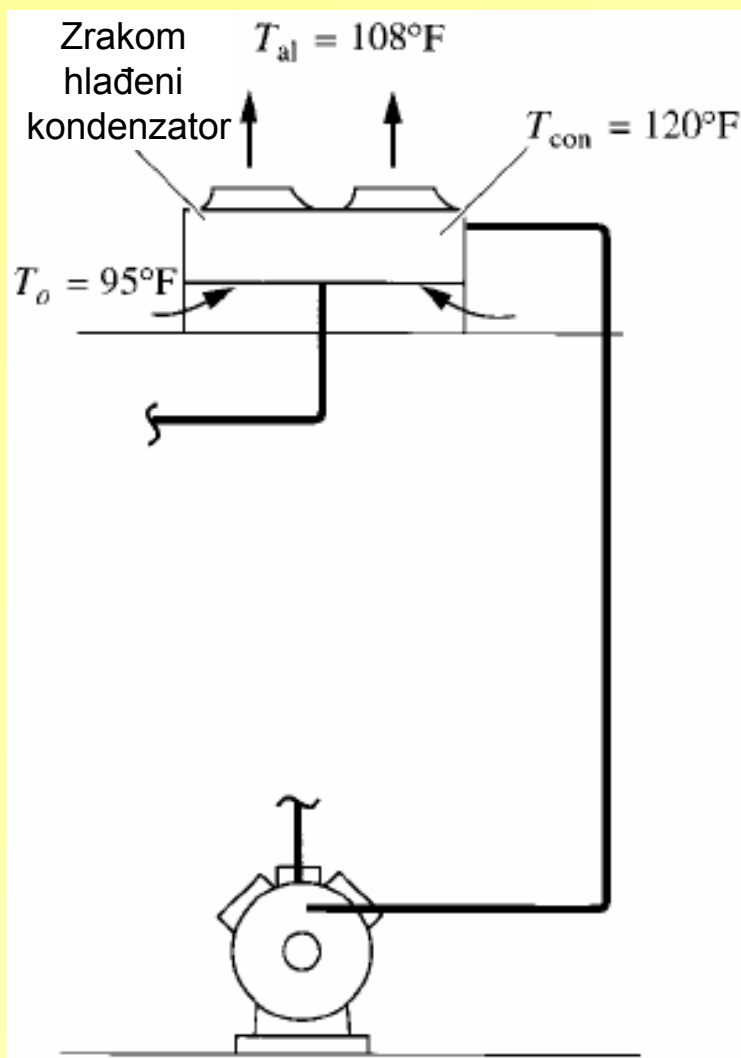


- često se upotrebljavaju u velikim rashladnim postrojenjima za poslovne građevine.

- voda izlazi iz kondenzatora i ulazi odozgo u rashladni toranj te se raspršuje preko ispune rashladnog tornja pri čemu se hladi na nižu temperaturu efektom ishlapljivanja. Voda zatim prolazi kroz odvajač nečistoće i kemijski se obrađuje. Na kraju se ta voda recirkulacijskom pumpom ponovo tjera kroz vodom hlađeni kondenzator.

Odbacivanje topline

3. Zrakom hlađeni kondenzatori

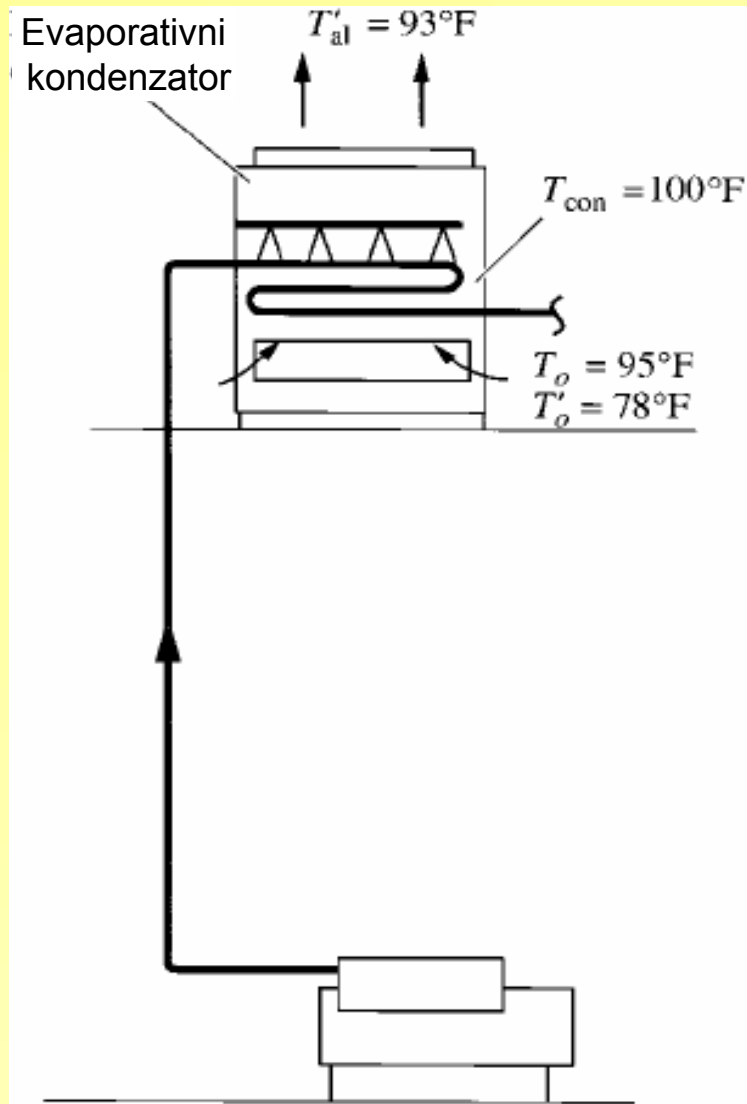


- često se upotrebljavaju u rashladnim postrojenjima manjih i srednjih kapaciteta te na lokacijama gdje na raspolaganju nema dovoljno vode.

- pregrijana para radne tvari iz kompresora ulazi u kondenzator pri vrhu uređaja. Kako se količina kondenzata povećava, dijelovi kondenzacijske površine se mogu koristiti za pothlađivanje ukapljene radne tvari. Rashladni zrak se povlači kroz izmjenjivač aksijalnim ventilatorima smještenim na izlazu iz izmjenjivača kako bi se osiguralo ravnomjerno strujanje zraka preko izmjenjivačke površine.

Odbacivanje topline

4. Evaporativni kondenzatori koji odvođe toplinu kondenzacije iz izmjenjivača pomoću efekta evaporativnog hlađenja



- koriste ishlapljivanje raspršene vode za odvođenje latentne topline od rashladnog sredstva tijekom kondenzacije.

- voda se raspršuje preko vanjske površine kondenzatora. Toplina se, usljed ishlapljivanja vode, odvodi preko ovlažene površine izmjenjivača. Ostatak raspršene vode padne na dno uređaja gdje se skuplja u sabirnu posudu. Ulaz zraka je smješten neposredno iznad sabirne posude. Zrak struji protustrujno uvis preko kondenzatora, sapnica za vodu i eliminatora kapljica; izbacuje ga ventilator kroz vrh uređaja u vanjski okoliš.

Vodom hlađeni kondenzator

- potrebna odvedena toplina može se precizno izračunati zbrajanjem rashladnog učinka isparivača i toplinskog ekvivalenta stvarne snage potrebne za kompresiju (koja se može pronaći u katalogu proizvođača kompresora/rashladnika).
- volumenski protok kondenzatorske vode može se izračunati iz izraza:

$$\dot{V}_a = \frac{Q_{rej}}{\rho_w c_w (t_{wl} - t_{we})} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Q_{rej} – odvedena toplina [W]

t_{we} – temperatura vode na ulazu u kondenzator [°C]

t_{wl} – temperatura vode na izlazu iz kondenzatora [°C]

ρ_w – gustoća vode [kg/m³]

c_w – specifični toplinski kapacitet vode [J/(kgK)]

Vodom hlađeni kondenzator

- najčešći tipovi vodom hlađenih kondenzatora:

- (1) s cijevima u bubnju
- (2) s orebrenim cijevnim snopom u bubnju
- (3) cijev u cijevi
- (4) lemljeni pločasti

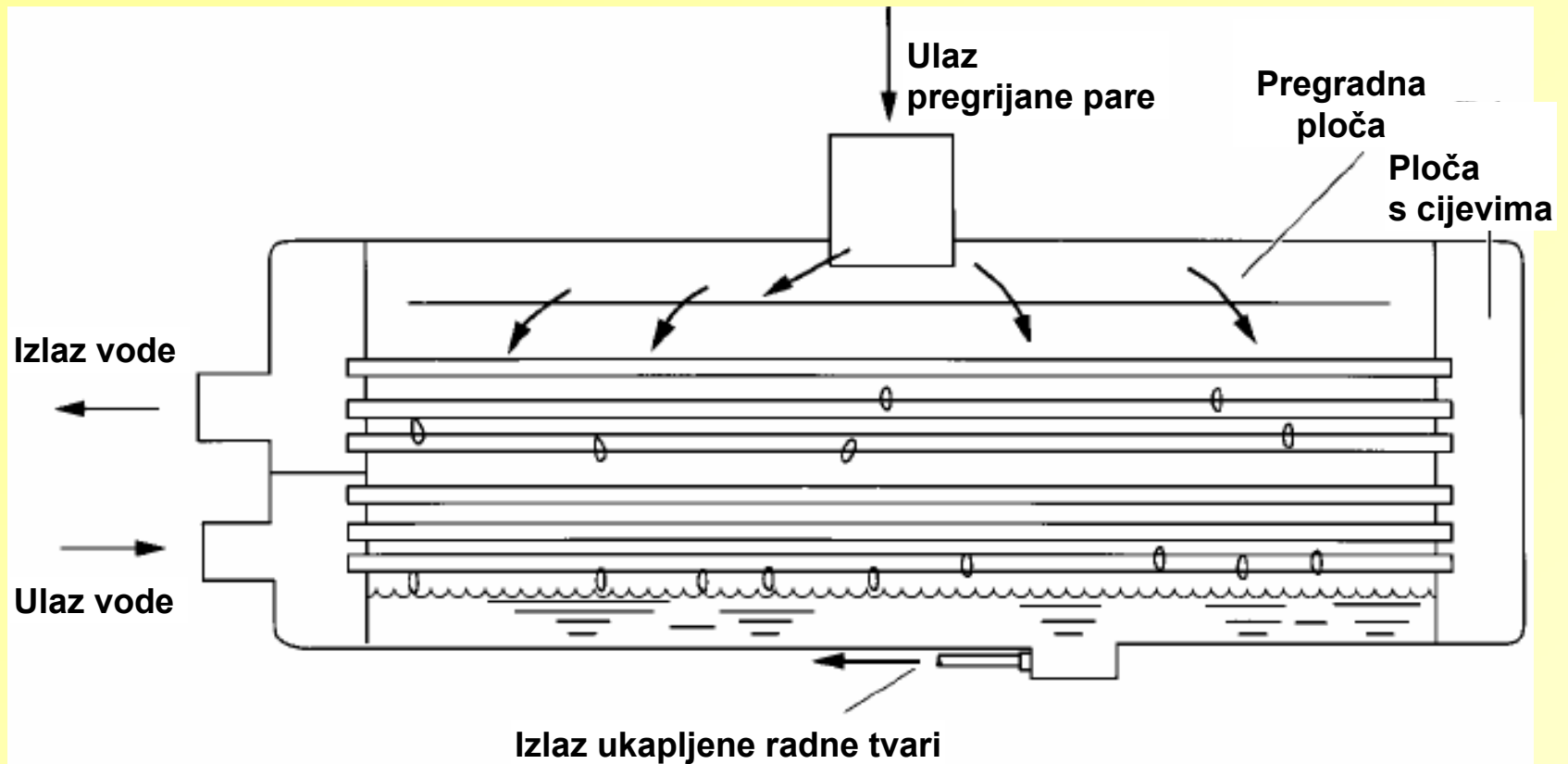
Odabir tipa ovisi o toplinskom opterećenju, rashladnom sredstvu, kvaliteti i temperaturi dostupne rashladne vode, količini vode u cirkulaciji, smještaju i raspoloživom prostoru, traženim radnim tlakovima (na strani vode i na strani radne tvari) te troškovima i potrebama održavanja.

Minimalni tlak na strani radne tvari trebao bi biti tlak zasićenja pri 41°C ili 103 kPa (pretlak), ovisno koja je od te dvije vrijednosti veća.

Uobičajeni projektni tlak na strani vode je 1.0 MPa (pretlak), a u višim zgradama može biti potreban i pretlak od 2.0 MPa.

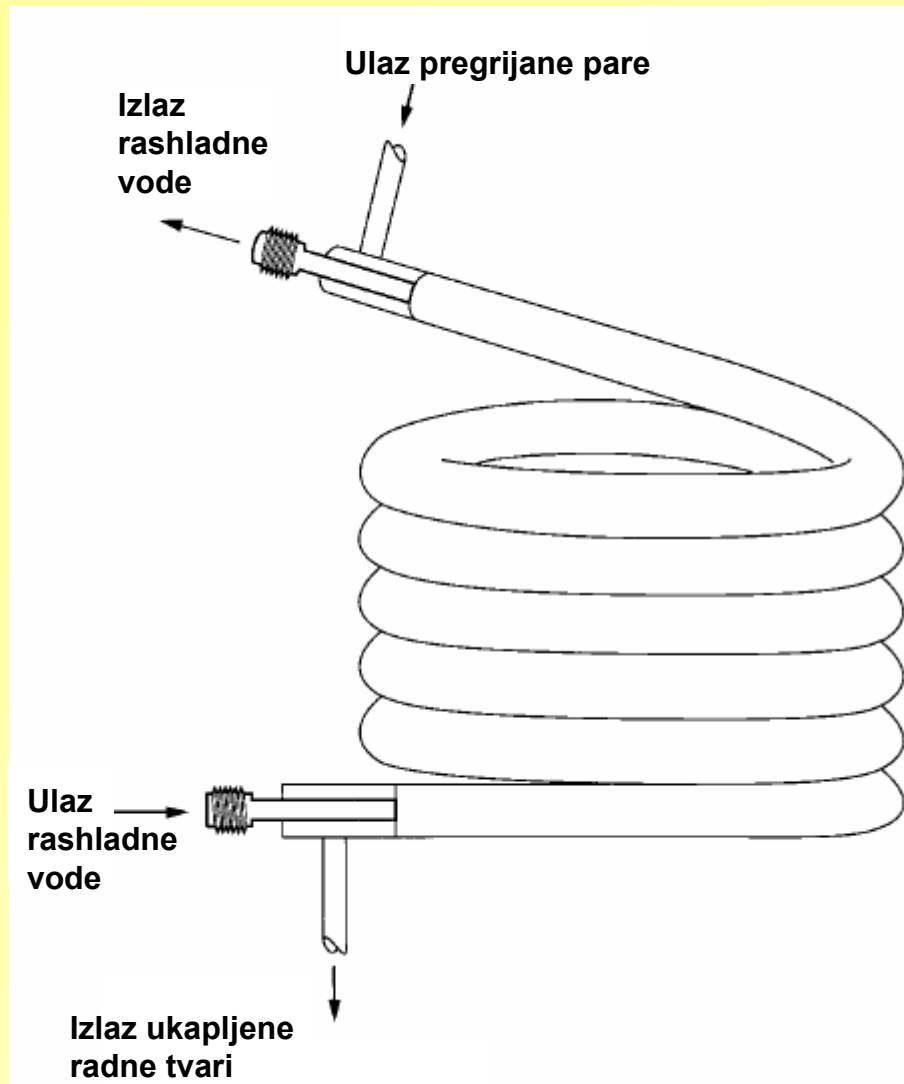
Vodom hlađeni kondenzator

- kondenzator s cijevima u bubnju s dva prolaza vode:



Vodom hlađeni kondenzator

- kondenzator cijev u cijevi:



- lemljeni pločasti kondenzator:



Zrakom hlađeni kondenzator

- ovaj tip kondenzatora može se projektirati za unutarnji ili vanjski pogon, a izbacivanje zraka može biti okomito (na vrhu) ili vodoravno (sa strane).
- kondenzator se cirkulacijskim cjevovodom povezuje s kompresorom.
- može biti smješten uz kompresor ili udaljen od kompresora.

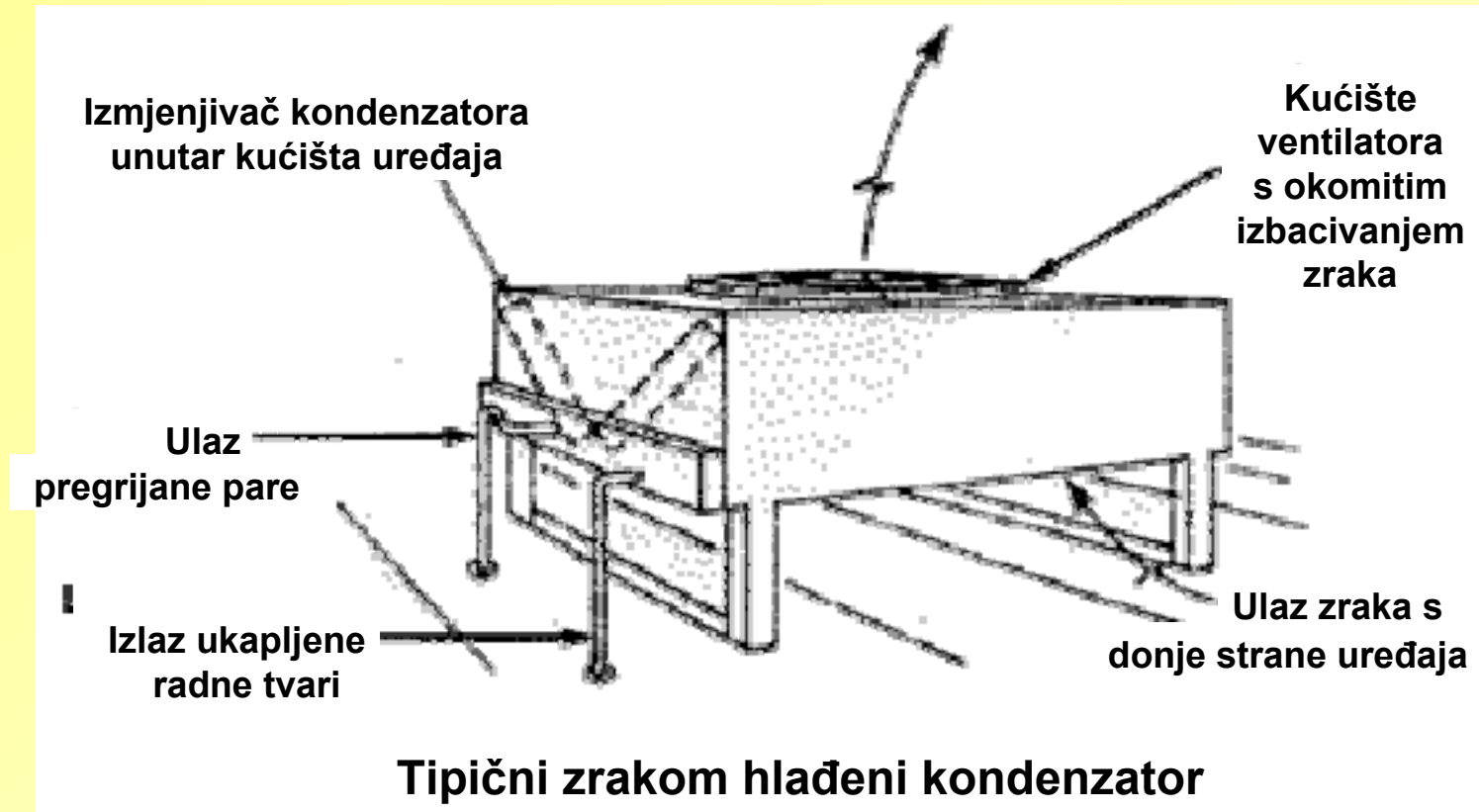
- uobičajene vrijednosti protoka zraka su 80 do 160 L/s po kW učinka pri 2 do 4 m/s. Temperaturna razlika pri normalnim uvjetima hlađenja između radne tvari i ulaznog zraka je u rasponu od 6 do 18 K. Kondenzator s manjom temperaturnom razlikom (npr. 8°C) ima veću površinu od kondenzatora s većom temperaturnom razlikom (npr. 16°C). Uobičajene potrebne električne snage ventilatora su u rasponu od 20 do 40 W/kW.

- većina izvedbi osigurava odgovarajuću površinu izmjene topline uz pripadajući pad tlaka, tako da se radna tvar pothladi za oko 1 do 3 K prije izlaza iz kondenzatora.

- ako je kondenzator montiran na krovu, na vanjsku ljetnu projektanu temperaturu treba dodati 2 do 3°C.

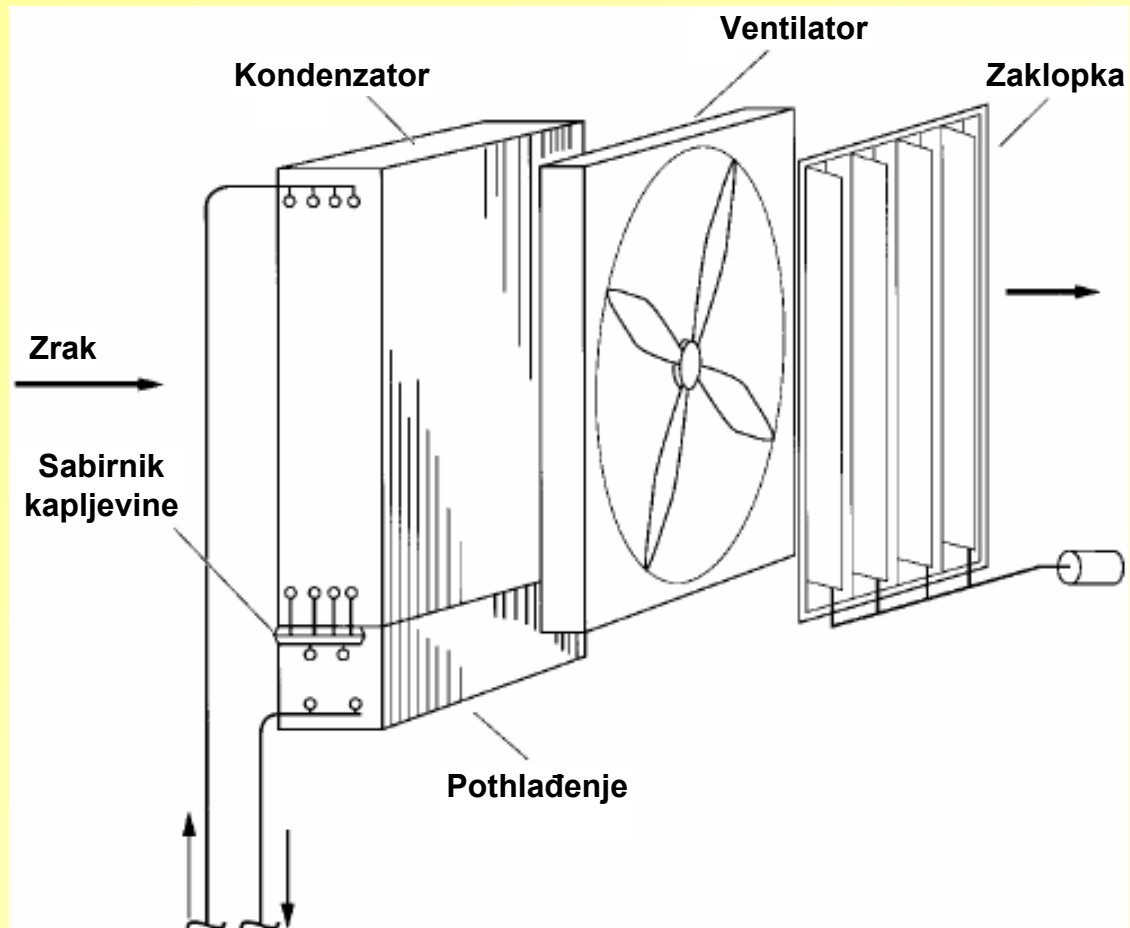
Zrakom hlađeni kondenzator

- kondenzator s okomitim izbacivanjem zraka:



Zrakom hlađeni kondenzator

- kondenzator s vodoravnim izbacivanjem zraka:



Evaporativni kondenzator

- smanjuje potrebu za kemijskom pripremom vode i snagu pumpe za vodu u usporedbi sa sustavom rashladnog tornja, odnosno vodom hlađenog kondenzatora.
- u usporedbi sa zrakom hlađenim kondenzatorom, evaporativnom kondenzatoru je potrebna **manja površina izmjenjivača i manji protok zraka** za odvođenje iste količine topline, ili se alternativno može postići **veća učinkovitost** radom pri nižim temperaturama kondenzacije. Evaporativni kondenzatori su najkompaktnije izvedbe za određeni rashladni kapacitet.
- evaporativni kondenzator može raditi pri nižim temperaturama kondenzacije nego zrakom hlađeni kondenzator, jer je zrakom hlađeni kondenzator ograničen temperaturom suhog termometra okoliša. U evaporativnom kondenzatoru je odvođenje topline ograničeno temperaturom vlažnog termometra okoliša, koja je obično 8 do 14 K niža od temperature suhog termometra.

Evaporativni kondenzator

- svi evaporativni kondenzatori trebaju se kemijski tretirati kako bi se ograničilo razvoj mikroorganizama, a uz to i smanjilo taloženje kamenca i korozija uređaja.
- usljed ishlapljivanja recirkulacijske vode u kondenzatoru, potrebno je dodavati svježiu vodu, a ona sadrži otopljene krute tvari. Neprestano povećavanje koncentracije tih tvari može dovesti do problema s kamencem i/ili korozijom. Uz to se recirkulacijska voda često zagadi i zrakom nošenim nečistoćama te biološkim zagađivačima.
- odvedena toplina ovisi o pogonskim uvjetima, ali se može procijeniti na 1.2 kW/kW hlađenja u klimatizaciji. Količina ishlapljene vode se kreće u rasponu od 0.5 do 0.6 ml/s po kW hlađenja. Uz to se gubi manja količina vode i odnošenjem kapljica kroz eliminator (do 0.2%). S dobrom, kvalitetno pripremljenom vodom, gubici vode usljed odmuljivanja su do polovice količine vode koja ishlapi, a ukupna potrošnja vode kreće se od 0.7 ml/s po kW hlađenja u klimatizaciji do 0.9 ml/s po kW hlađenja u rashladnoj tehnici.

Evaporativni kondenzator

- regulacija učinka uključuje:

(1) diskontinuirani pogon ventilatora

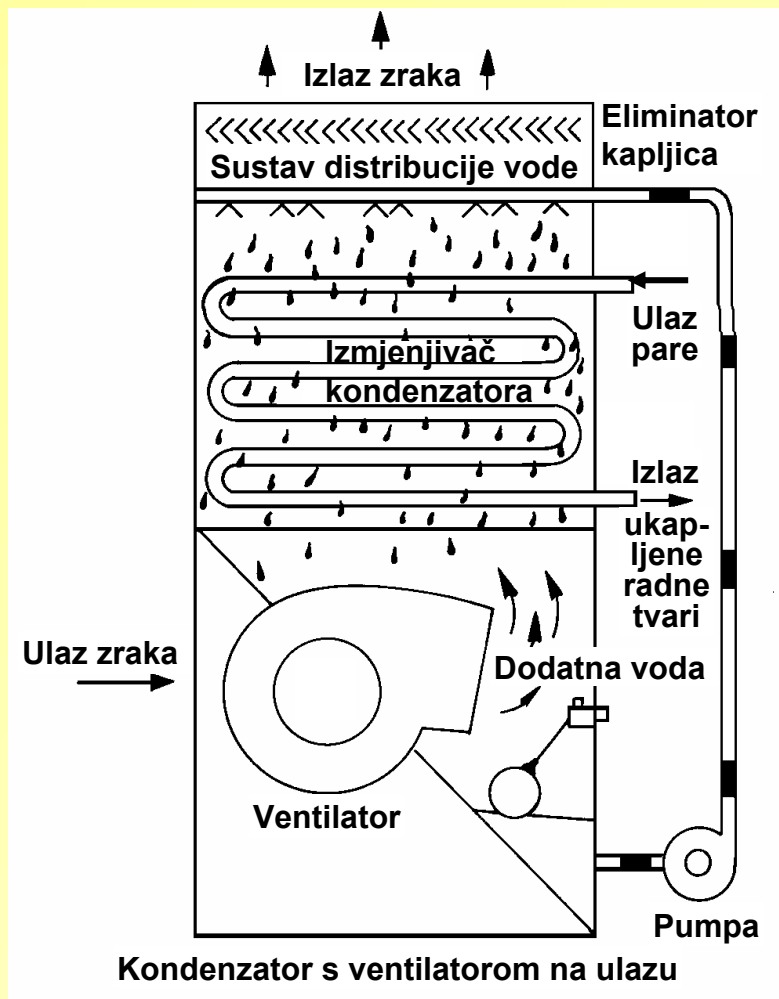
(2) modulirajuću zaklopku u struji zraka za smanjenje protoka zraka (samo kod uređaja sa centrifugalnim ventilatorom)

(3) regulaciju brzine vrtnje ventilatora korištenjem motora i/ili pogona s frekventnim regulatorom, dvobrzinskih motora ili dodatnih “poni” motora niže snage (malih modularnih motora na istom vratilu).

- dvobrzinski motori za ventilatore najčešće rade pri 100% i 50% brzine vrtnje, čime se ostvaruje 100%, odnosno oko 60% kapaciteta kondenzatora. Pri isključenim ventilatorima, a uz rad pumpe za vodu, kapacitet kondenzatora je približno 10%.

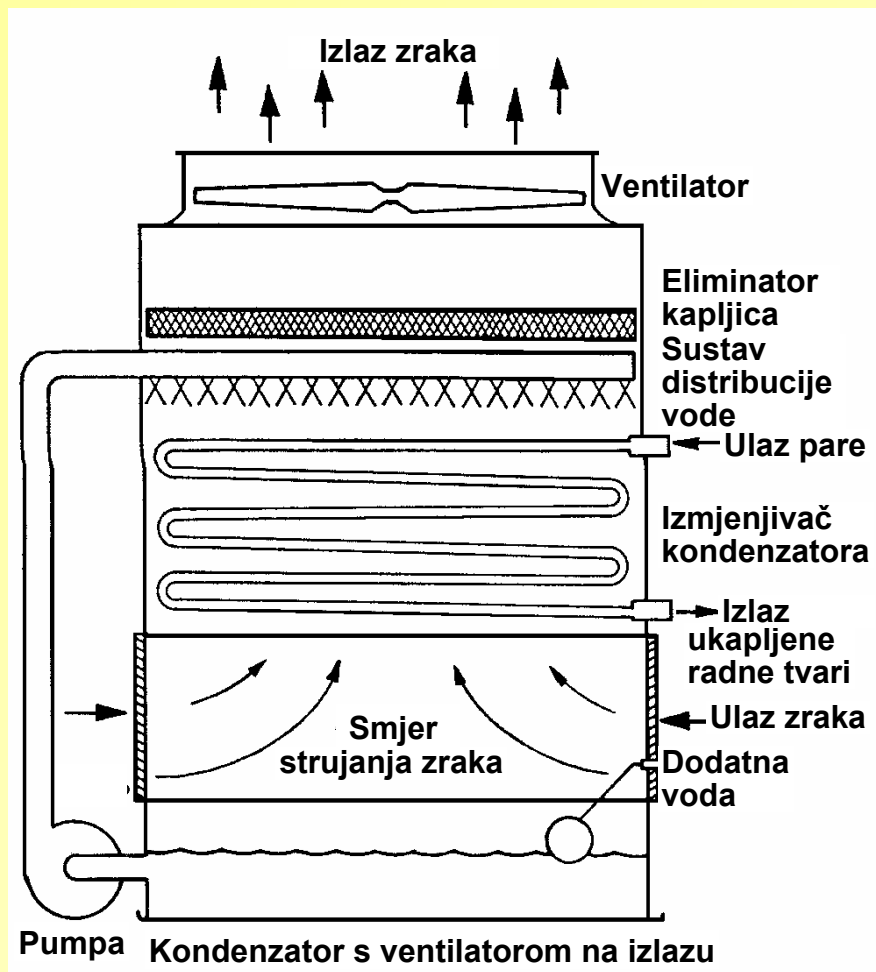
Evaporativni kondenzator

- kondenzator s centrifugalnim ventilatorom na ulazu:



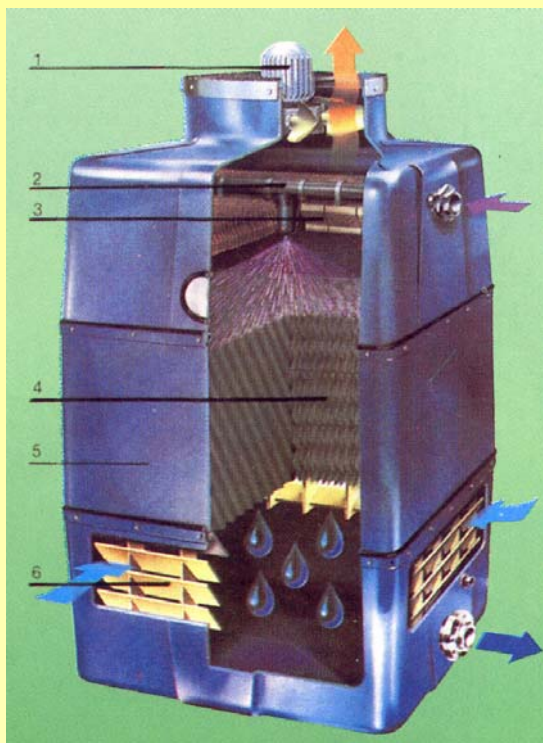
Evaporativni kondenzator

- kondenzator s aksijalnim ventilatorom na izlazu:



Rashladni toranj

- najčešće se koristi za odbacivanje topline kod vodom hlađenog kondenzatora sustava hlađenja, klimatizacije i sustava u procesnoj industriji.
- potrošnja vode u rashladnom tornju je samo oko 5% potrošnje u sustavima s jednim prolazom, što ovaj sustav čini najjeftinijim za rad s vodom koja se plaća. Dodatno, gubici zagrijane vode (odmuljivanje) su vrlo mali, čime se znatno smanjuje negativne posljedice za okoliš. Uz to, rashladni



tornjevi mogu ohladiti vodu na 2-3°C iznad temperature vlažnog termometra okoliša ili na oko 20°C niže temperature nego što to mogu zrakom hlađeni sustavi prihvatljivih dimenzija.

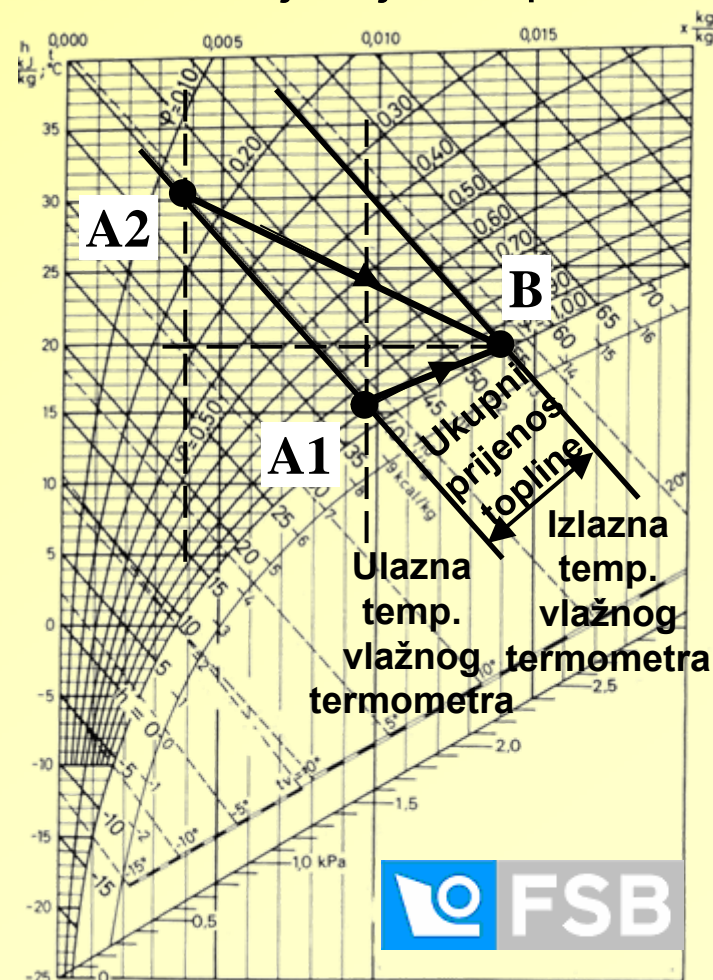
- rashladni tornjevi s prisilnim strujanjem za KGH mogu se svrstati u sljedeće kategorije:
 - Protusmjerni s induciranim strujanjem
 - Križni s induciranim strujanjem
 - Protusmjerni s tlačnim strujanjem

Rashladni toranj

- toplinski učinak rashladnog tornja prije svega ovisi o temperaturi vlažnog termometra ulaznog zraka. Temperatura suhog termometra i relativna vlažnost ulaznog zraka uzeti neovisno, imaju neznatan utjecaj na toplinski učinak rashladnih tornjeva s prisilnim strujanjem, ali utječu na količinu ishlapljene vode unutar rashladnog tornja.

- zagrijavanje zraka može se podijeliti na osjetni dio i na latentni dio topline koju zrak preuzima hlađenjem vode.

- ako se ulaznom zraku poveća temperatura suhog termometra uz nepromijenjenu temperaturu vlažnog termometra, ukupna izmjena topline ostaje ista, ali se mijenja omjer izmjenjene osjetne i latentne topline.



Rashladni toranj

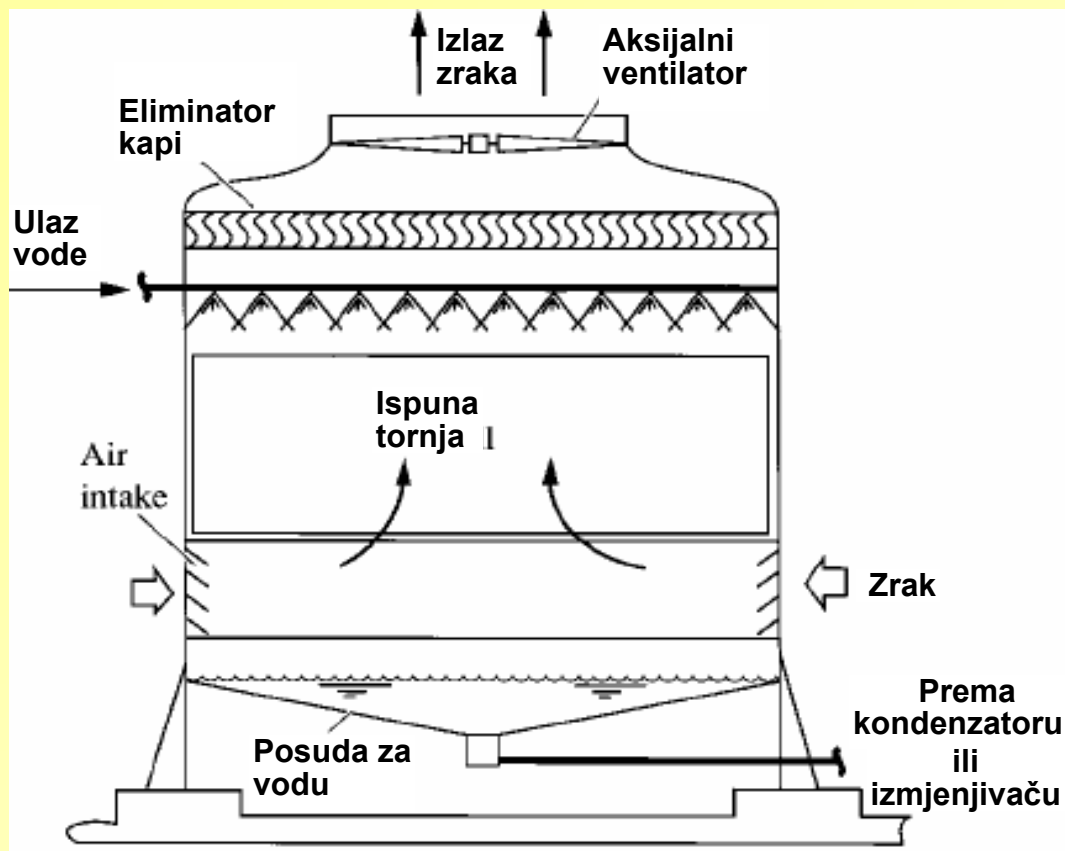
- količina ishlapljivanja za tipične projektne uvjete približno je 1% protoka vode za svakih 7 K promjene temperature vode.
- toplinski kapacitet rashladnog tornja koji se koristi za klimatizaciju može se izraziti kao nazivni kapacitet koji se temelji na odvođenju topline od 1.25 kW po kW učinka isparivača.
- nazivni kapacitet definira se kao hlađenje 54 ml/s vode s 35°C na 29.4°C uz temperaturu vlažnog termometra ulaznog zraka od 25.6°C. Pri ovim se uvjetima na rashladnom tornju odvodi 1.25 kW po kW učinka isparivača.
- uobičajena ulazna temperatura rashladne vode u toranj kreće se u rasponu od 27°C do 33°C, a promjena temperature vode je od 4°C do 7°C.

Rashladni toranj

- protusmjerni rashladni toranj s induciranim strujanjem:
- ventilator je smješten niz struju zraka u odnosu na ispunu tornja, na izlazu zraka pri vrhu uređaja.
- zbog ishlapljivanja male količine kondenzatorske vode (oko 1% protoka), temperatura vode se postupno smanjuje tijekom njenog slijevanja kroz ispunu tornja protusmjerno od zraka. Nastala vodena para se apsorbira u struju zraka. Veće kapljice vode nošene strujom zraka odvajaju se na eliminatoru kapi. Struja zraka izlazi pri vrhu tornja i ispušta se u okoliš. Voda ohlađena ishlapljivanjem pada u sabirnu posudu odakle se odvodi prema kondenzatoru.
- u protusmjernom rashladnom tornju s induciranim strujanjem najsuši zrak je u kontaktu s najhladnijom vodom.

Rashladni toranj

- protusmjerni rashladni toranj s induciranim strujanjem:

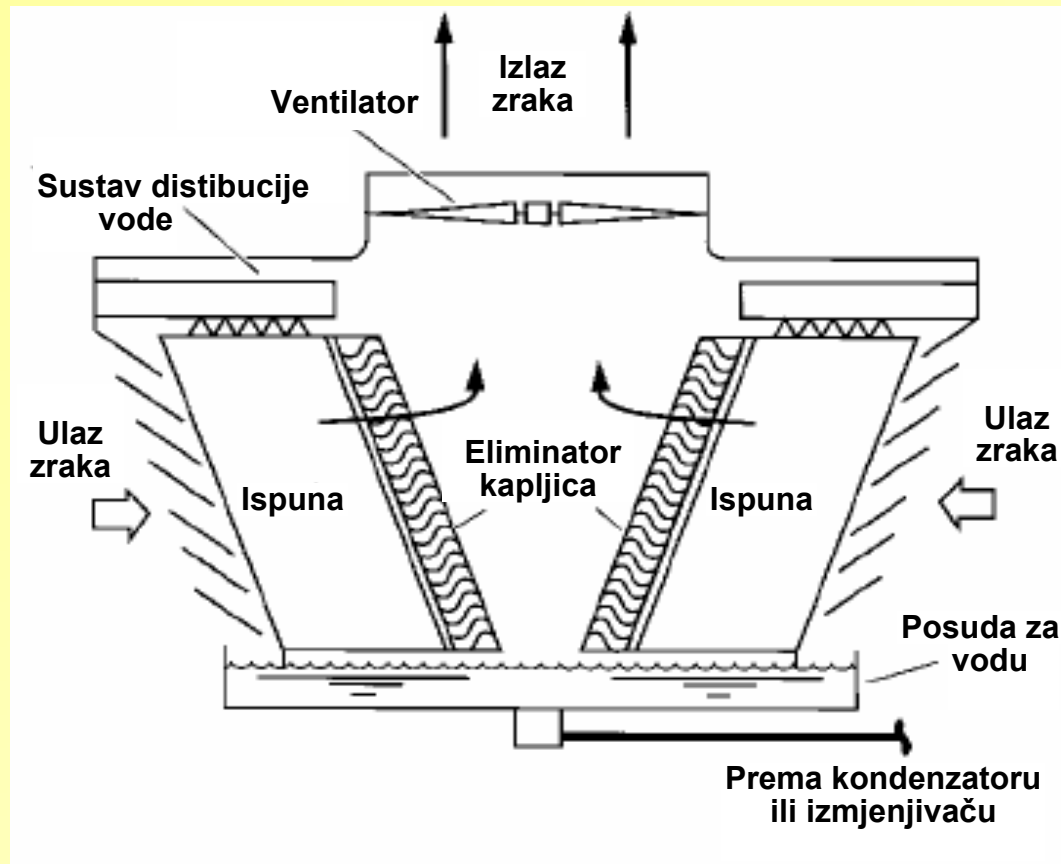


Rashladni toranj

- križni rashladni toranj s induciranim strujanjem:
- ventilator je smješten niz struju zraka u odnosu na ispunu tornja, na izlazu zraka pri vrhu uređaja.
- ispuna se nalazi u razini s ulazima zraka. Zrak ulazi u toranj kroz bočne žaluzije i struji vodoravno kroz ispunu i eliminator kapi. Zrak se zatim usmjerava prema gore i izlazi pri vrhu uređaja. Voda se raspršuje iz sapnica, pada preko ispune i dolazi do križnog strujanja vode i struje zraka.
- križni rashladni toranj s induciranim strujanjem ima povećanu površinu za ulaz zraka. Usljed križnog strujanja, ovakav toranj može biti znatno niži od protusmjernog tornja. Negativna strana te izvedbe je povećan rizik od recirkulacije istrošenog zraka iz tornja.

Rashladni toranj

- križni rashladni toranj s induciranim strujanjem:



Rashladni toranj

- protusmjerni rashladni toranj s tlačnim strujanjem:
- ventilator je smješten na ulazu zraka pri dnu uređaja tj. uz struju zraka u odnosu na ispunu tornja.
- radne karakteristike su slične onima kod protusmjernog rashladnog tornja s induciranim strujanjem.

Prednosti:

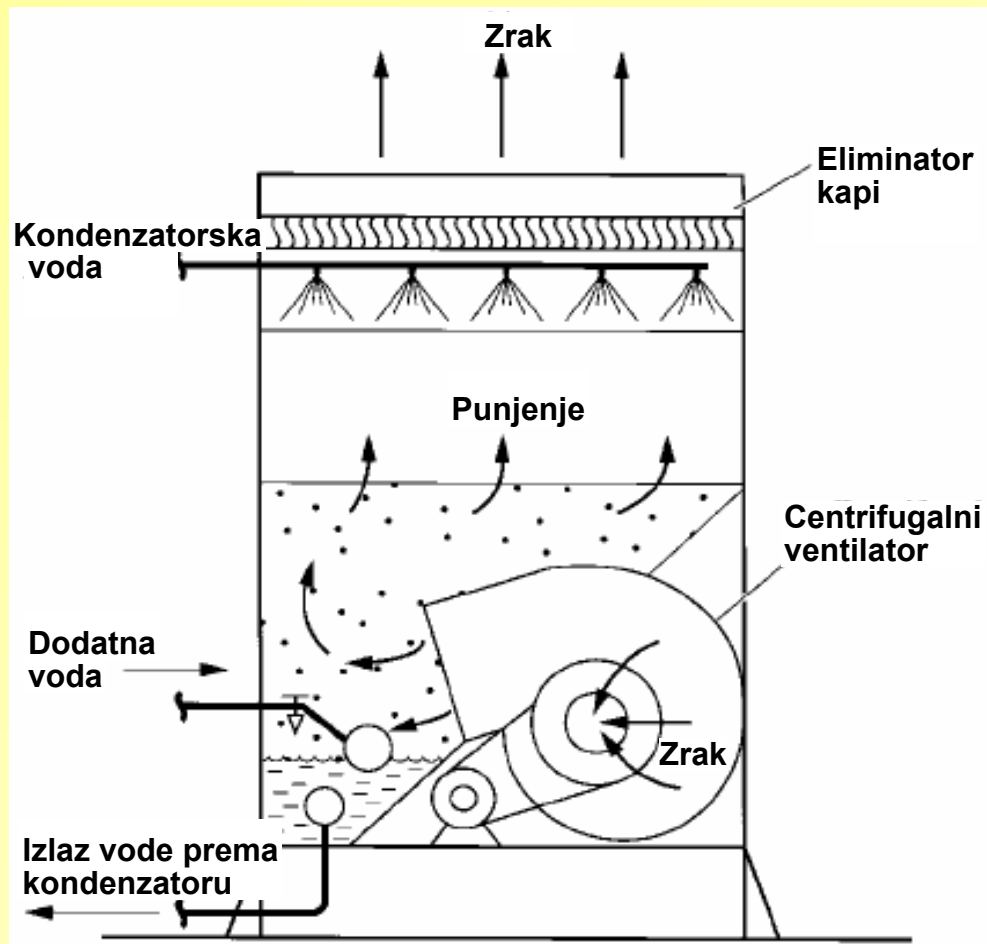
- vibracije su manje u usporedbi s tornjem s induciranim strujanjem, jer se ventilator nalazi bliže tlu.
- ako centrifugalni ventilator puše prema površini vode, bolji je efekt ishlapljivanja iz posude za vodu.

Nedostatci:

- nejednolika raspodjela struje zraka kroz ispunu tornja usljed puhanja tlačnog ventilatora.
- usljed velike brzine ulaznog zraka može doći do prijenosa dijela toplog i vlažnog istrošenog zraka.
- protusmjerni rashladni tornjevi s tlačnim strujanjem se uglavnom koriste kod malih i srednje velikih postrojenja.

Rashladni toranj

- protusmjerni rashladni toranj s tlačnim strujanjem:



Rashladni toranj

- teorija rashladnog tornja:

V = Volumen ispune

a = Omjer površine ispune tornja i volumena

\dot{m}_w = Maseni protok vode

\dot{m}_a = Maseni protok zraka

t = Temperatura vode koja se slijeva

t' = Srednja temperatura graničnog sloja zasićenog zraka

h' = Entalpija graničnog sloja zasićenog zraka

g' = Sadržaj vlage graničnog sloja zasićenog zraka

t_a = Temperatura zraka izvan graničnog sloja

h_a = Entalpija zraka izvan graničnog sloja

g_a = Sadržaj vlage izvan graničnog sloja

K_s = Koeficijent prijelaza osjetne topline između graničnog sloja i struje zraka

K_m = Koeficijent prijenosa tvari konvekcijom između graničnog sloja i struje zraka

Rashladni toranj

- teorija rashladnog tornja:

Razmatra se rashladni toranj sljedećih karakteristika:

Prijelaz osjetne topline s graničnog sloja prema struji zraka dan je izrazom:

$$dQ_s = K_s adV(t' - t_a) \text{-----}(1)$$

Maseni prijenos vodene pare konvekcijom s graničnog sloja u struju zraka dan je izrazom:

$$dm = K_m adV(g' - g_a) \text{-----}(2)$$

Rashladni toranj

- teorija rashladnog tornja:

Uz pretpostavku da je latentna toplina isparavanja h_{fg} konstantna tijekom procesa prijenosa topline i tvari, prijenos latentne topline isparavanja vode u graničnom sloju dan je izrazom:

$$dQ_e = h_{fg} d\dot{m} = h_{fg} K_m adV (g' - g_a) \text{-----(3)}$$

Ukupni prijelaz topline s vode na granični sloj može se dati izrazom:

$$dQ_w = dQ_s + dQ_e = \dot{m}_w c_{pw} dt_w = [K_s (t' - t_a) + h_{fg} K_m (g' - g_a)] adV \text{-----(4)}$$

gdje je c_{pw} = specifični toplinski kapacitet vode (4.2kJ/kgK - konstantna vrijednost)

Rashladni toranj

- teorija rashladnog tornja:

Koeficijent prijenosa tvari konvekcijom izražava se kao:

$$K_m \approx \frac{K_s}{c_{pa}} \text{-----} (5)$$

gdje je c_{pa} = specifični toplinski kapacitet zraka

Uvrštavanjem izraza (5) u izraz (4) dobivamo:

$$\begin{aligned} \dot{m}c_{pw}dt &= [c_{pa}(t'-t_a) + h_{fg}K_m(g'-g_a)]K_m adV \\ &= [(c_{pa}t' + h_{fg}g') - (c_{pa}t_a + h_{fg}g_a)]K_m adV \text{-----} (6) \end{aligned}$$

Rashladni toranj

- teorija rashladnog tornja:

Budući da je: $c_{pa} = c_{pd} + g \cdot c_{ps}$

gdje su c_{pd} i c_{ps} specifični toplinski kapaciteti suhog zraka i vodene pare, a g je sadržaj vlage.

Entalpija sloja zasićenog zraka h' se može izračunati iz izraza:

$$h' = c_{pa}t' + h_{fg}g' \text{-----} (7)$$

Entalpija struje zraka h_a je:

$$h_a = c_{pa}t_a + h_{fg}g_a \text{-----}(8)$$

Uvrštavanjem izraza (7) i (8) u jednadžbu (6) dobivamo:

$$\dot{m}c_{pw}dt = (h' - h_a)K_m adV \text{-----}(9)$$

Rashladni toranj

- teorija rashladnog tornja:

Integriranjem od temperature izlazne vode t_{w1} do temperature ulazne vode t_{w2} dobiva se:

$$\int_{t_{w1}}^{t_{w2}} \frac{dt}{(h' - h_a)} = \int_0^V \frac{K_m a dV}{\dot{m}_w c_{pw}} \text{-----(10)}$$

Uzme li se za ukupni koeficijent prijenosa topline $K_a = \frac{K_m}{c_{pw}}$, dobiva se:

$$\int_{t_{w1}}^{t_{w2}} \frac{dt}{(h' - h_a)} = \frac{K_a V}{\dot{m}_w} \text{-----(11)}$$

Korištenjem numeričke integracije, koeficijent učinka tornja za protustrujni rashladni toranj je:

$$\frac{K_a V}{\dot{m}_w} = \frac{(t_{w2} - t_{w1})}{(h' - h_a)}$$

$\frac{K_a V}{\dot{m}_w}$ je broj prijenosnih jedinica NTU rashladnog tornja ili koeficijent učinka tornja.

Rashladni toranj

Koeficijent učinka tornja

Za protusmjerni toranj, koeficijent učinka je funkcija omjera vode i zraka (npr. \dot{m}_w / \dot{m}_a) (eksperimentalni rezultati) i izvedbe ispune, a direktno je proporcionalan visini ispune H.

Međusobni odnosi se mogu izraziti sljedećom jednažbom:

$$\frac{KaV}{\dot{m}_w} = C + H\dot{m}_w^n + \dot{m}_a^m$$

Gdje je $-0.65 < n < -0.55$, uobičajeno $n = -0.6$

m je pozitivna vrijednost, po apsolutnim vrijednostima nešto veća od n.

Toplinska bilanca na strani zraka i na strani vode u protusmjernom tornju (ako se zanemari isparavanje vode) glasi:

$$\dot{m}_a dh_a = \dot{m}_w c_{pw} dt$$

Rashladni toranj

- uobičajene brzine strujanja zraka su oko 1.5 do 3.6 m/s kod protusmjernog i oko 1.8 do preko 4 m/s kod križnog strujanja.
- **raspon** je razlika između temperature kondenzatorske vode na ulazu u toranj i temperature vode na izlazu iz tornja.
- **prilaz** određuje temperaturu kondenzatorske vode na izlazu iz tornja u ovisnosti o lokalnoj projektnoj vanjskoj temperaturi vlažnog termometra. Ako su raspon i odvedena toplina konstantni, bliži prilaz uvijek znači nižu temperaturu kondenzatorske vode na izlazu iz tornja te niže tlakove i temperature kondenzacije radne tvari.
- za sustave klimatizacije, gustoća masenog protoka vode kreće se obično između 4800 i 10000 kg/(hm²), a omjer masenih protoka vode i zraka može varirati između 0.7 i 1.5. Za cirkulaciju vode od 0.19 L/s po toni učinka kondenzatora i uz $m_w/m_a=1$, protok zraka je oko 170 L/s po toni učinka kondenzatora.

Rashladni toranj

- **Zaštita od smrzavanja.** Na lokacijama gdje vanjska temperatura može pasti ispod 0°C, potrebno je osigurati zaštitu tornja od smrzavanja kako bi se izbjeglo stvaranje leda na dijelovima uređaja (poput usisnih žaluzija) što može značajno smanjiti protok zraka.
- za zaštitu od smrzavanja, obično se u sabirnu posudu za vodu uroni električni grijač.
- u neaktivnim tornjevima ventilator ne smije raditi, a dotok vode treba biti zatvoren. Kondenzatorska voda može zaobići ispunu tornja i biti distribuirana neposredno preko unutarnje površine usisnih žaluzija pomoću posebnog rasporeda cijevi. Time se uklanja sloj leda s površine žaluzija.
- **Magljenje.** Najpraktičnije rješenje za magljenje tornja je smještanje tornja na lokaciju na kojoj, ukoliko se i stvore vidljivi oblaci, neće biti pritužbi zbog toga.

Rashladni toranj

- problemi:

1. Mogući razvoj mikroorganizama i ulaz u sustav cirkulacije kondenzatorske vode.
2. Povećana koncentracija otopljenih tvari može povećati potrebu za održavanjem sustava zbog začepijivanja mrežica i odvajača nečistoće.
3. Manje čestice mogu se nataložiti na površine za izmjenu topline u sustavu (obložiti ih i time smanjiti učinkovitost prijenosa topline).
4. Lebdeće krute čestice također povećavaju potrebu za korištenjem kemijskih sredstava, jer velika količina čestica smanjuje učinkovitost kemikalija za uklanjanje kamenca, bakterija i ukupno otopljenih krutina.
5. Mala brzina protoka vode u sifonu tornja uzrokuje sedimentarne naslage pogodne za razvoj bakterija.

Rashladni toranj

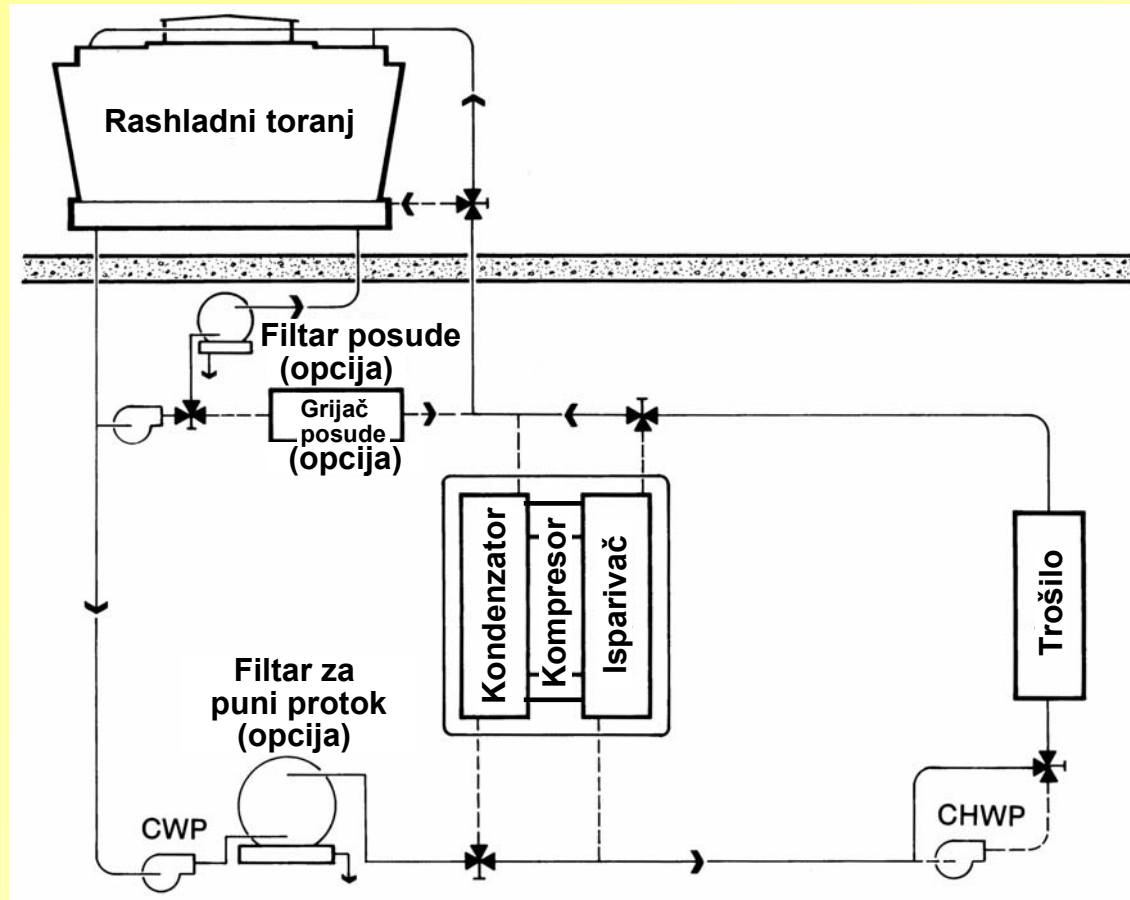
- održavanje:

1. U vodu za rashladne tornjeve dodaju se kemikalije poput klora, sulfatne kiseline, fosfora i spojeva cinka kako bi se kontroliralo biološki rast (“biofilm”) i spriječilo taloženje minerala (kamenca).
2. Kako bi se koncentracija zagađivača održala na prihvatljivoj razini, voda se povremeno ispušta iz tornja kroz proces koji se naziva odmuljivanje.
3. Ispuštena voda i voda koja se izgubi ishlapljivanjem te odnošenjem kapljica nadomještaju se sa svježom pitkom vodom (koja također sadrži minerale i razne nečistoće).

Pretjerano doziranje kemikalija povećava mogućnost pojave korozije i drugih neželjenih posljedica.

Rashladni toranj

- primjer slobodnog hlađenja međuspajanjem cjevovoda:



Rashladni toranj

- korištenjem rashladnog tornja za slobodno hlađenje tijekom smanjenog toplinskog opterećenja i/ili smanjenih zahtjeva na ugodnost u prostoru može se značajno smanjiti potrošnja energije.
- u određenim uvjetima, temperatura vode će biti čak dovoljno niska da potpuno preuzme toplinsko opterećenje, tako da se rashladnik može isključiti.
- maksimalno iskorištenje slobodnog hlađenja ostvaruje se kada pad vanjske temperature smanjuje potrebu za odvlaživanjem. Stoga se tijekom razdoblja slobodnog hlađenja mogu prihvatiti više temperature u krugu rashladne vode, što je povoljno za ogrijevnu i rashladnu bilancu sustava. U režimu slobodnog hlađenja, rashladnoj se vodi dozvoljava porast temperature polaza s uobičajenih 7 na 13°C ili više.
- glavni nedostatak sustava slobodnog hlađenja je što se dozvoljava da “prljava” kondenzatorska voda zagadi “čistu” rashladnu vodu kruga rashladnika. Korištenjem rashladnih tornjeva sa zatvorenim cirkulacijskim krugom (indirektna izmjena) uklanja se problem onečišćenja.