

Usporedba direktnog i indirektnog sustava hlađenja objekta

Kodba, Davor

Undergraduate thesis / Završni rad

2010

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:420575>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-26**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

dr. sc. Vladimir Soldo

Davor Kodba

Zagreb, 2010.

SAŽETAK

Komercijalno hlađenje objekta, zadane neto površine 5000 m², može se realizirati na više načina. Razmatrani sustavi hlađenja za ovaj rad su direktni VRF sustav i indirektni sustav sa rashladnikom vode. Potrebno je napraviti usporedbu dvaju sustava, koja sadržava usporedbu učinkovitosti i potrošnje energije pojedinih sustava, investicijske troškove, troškove izvedbe sustava, i utjecaj pojedinog sustava na okoliš.

Usporedba učinkovitosti podrazumijeva proračun pojedinog rashladnog procesa, određivanje faktora hlađenja za pojedina opterećenja sustava, radi detaljnijeg izračuna potrošnje električne energije za svaki sustav. Važnost tog izračuna je u tome da se usporedi koliko će svaki sustav okvirno trošiti energije godišnje. Utrošak energije i investicijski troškovi pojedinog sustava jedni su do glavnih parametara za optimalni odabir sustava.

Utjecaj sustava na okoliš danas je predmet nezaobilaznog razmatranja, pa je zato od velike važnosti procijeniti kako će pojedini sustav i u kojoj mjeri pridonijeti neželjenom efektu globalnog zagrijavanja.

IZJAVA STUDENTA

Završni rad sam u potpunosti radio samostalno. Od velike pomoći bili su mi savjeti, upute za izradu završnog rada i izvori literatura koje mi je dao mentor dr.sc. Vladimir Soldo, kojemu se ovim putem posebno zahvaljujem.

SADRŽAJ

1. UVOD	7
1.1. Direktni sustav hlađenja – VRF (variable refrigerant flow)	7
1.1.1. Prednosti VRF sustava	7
1.1.2. Nedostaci VRF sustava	9
1.2. Indirektni sustav hlađenja vodom	10
1.2.1. Rad indirektnog sustava hlađenja	11
1.2.2. Prednosti indirektnog sustava	12
1.2.3. Nedostaci indirektnog sustava	12
1.3. Termodinamička usporedba direktnog i indirektnog sustava	13
2. TEHNIČKI OPIS SUSTAVA	14
2.1. Tehnički opis VRF sustava direktnog hlađenja	14
2.2. Tehnički opis indirektnog sustava hlađenja vodom	19
2.3. Rashladnici kapljevina sa stapnim kompresorom	24
2.4. Rashladnici kapljevina sa centrifugalnim kompresorom	26
2.5. Rashladnici kapljevina s vijčanim kompresorom	29
2.6. Rashladnici kapljevina sa rotacijskim, spiralnim „scroll“ kompresorom	32
2.7. Usporedba spiralnih i vijčanih kompresora u rashladnoj tehnici	34
2.8. Usporedba rashladnika vode sa zrakom hlađenim kondenzatorom i vodom hlađenim kondenzatorom	35
3. PRORAČUN DIREKTOG I INDIREKTOG RASHLADNOG PROCESA	36
3.1. Proračun direktnog rashladnog procesa	36
3.2. Proračun indirektnog rashladnog procesa	37
4. ANALIZA POTROŠNJE ENERGIJE POJEDINIH SUSTAVA – SMJERNICA EUROVENT	39
4.1. Podaci o rashladnim uređajima	39
4.2. Usporedba modela potrošnje energije	41
5. INVESTICIJSKI TROŠKOVI INDIREKTOG I DIREKTOG SUSTAVA HLAĐENJA	43
5.1. VRF sustav	43
5.2. Sustav vodenog hlađenja	43
5.3. Period povrata investicije direktnog VRF sustava	44
6. PRORAČUN CJEVOVODA	45
6.1. Proračun cjevovoda indirektnog sustava	45
6.2. Proračun cjevovoda direktnog sustava	47
7. UTJECAJ SUSTAVA NA OKOLIŠ	49
8. ZAKLJUČAK	52
9. LITERATURA	53

POPIS SLIKA, TABLICA, I PRILOGA

SLIKE:

Slika 1. Usporedba inverterske i obične klimatizacijske jedinice	8
Slika 2. Vanjska jedinica sa jednim inverter kompresorom	8
Slika 3. Vanjska jedinica sa jednim inverter kompresorom i jednim „on/off“ kompresorom.....	8
Slika 4. Vanjska jedinica sa jednim inverter kompresorom i dva „on/off“ kompresora.....	9
Slika 5. VRF sustav hlađenja	9
Slika 6. Primjer sheme rashladnog agregata.....	10
Slika 7. Hidraulička shema zrakom hlađenog rashladnog agregata za komfornu primjenu [8]	12
Slika 8. Zrakom hlađeni rashladni agregat.....	12
Slika 9. Usporedba procesa direktnog i indirektnog sustava hlađenja [9]	13
Slika 10. Shema direktnog rashladnog sustava	14
Slika 11. Zrakom hlađena kondenzacijska jedinica VRF sustava	15
Slika 12. Shema indirektnog rashladnog sustava	19
Slika 13. Raspon korištenja rashladnika vode prema vrsti kompresora [3]	20
Slika 14. Usporedba radnih karakteristika kompresora	25
Slika 15. Radna karakteristika stapnog kompresora sa tri koraka rasterećenja	25
Slika 16. Stapni kompresor	26
Slika 17. Tipična karakteristika centrifugalnog kompresora pri konstantnoj brzini vrtnje	28
Slika 18. Tipična karakteristika centrifugalnog kompresora sa varijabilnom brzinom vrtnje	28
Slika 19. Centrifugalni kompresor.....	29
Slika 20. Tipična karakteristika potrošnje energije rashladnika sa vijčanim kompresorom pri djelomičnim opterećenjima	30
Slika 21. Vijčani kompresor	31
Slika 22. Ušteda električne energije rotacijskog kompresora u odnosu na stapne kompresore [10]	32
Slika 23. Rotacijski „scroll“ kompresor za rashladnike kapljevine	33
Slika 24. Zrakom hlađeni i vodom hlađeni rashladnik vode	35
Slika 25. Proces direktnog hlađenja u T-s dijagramu	36
Slika 26. Proces indirektnog hlađenja u T-s dijagramu	37
Slika 27. Usporedni dijagram učinkovitosti indirektnog i direktnog sustava hlađenja	42

TABLICE:

Tablica 1: Karakteristične točke direktnog procesa.....	36
Tablica 2: Karakteristične točke indirektnog procesa.....	38
Tablica 3. Učinkovitost rashladnika vode (podaci iz software-a).....	40
Tablica 4. Model potrošnje električne energije indirektnog sustava.....	40
Tablica 5. Model potrošnje električne energije direktnog sustava.....	41
Tablica 6. Usporedba članova jednadžbe TEWI faktora za pojedini sustav.....	51

PRILOZI:

Crtež 1: Shema spajanja i regulacije indirektnog sustava (Format A3)

Crtež 2: Shema spajanja i regulacije direktnog sustava (Format A3)

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Jedinica	Značenje
T	°C	Temperatura
p	bar	Tlak
h	kJ/kg	Entalpija
s	kJ/kgK	Entropija
q_o	kJ/kg	Specifični rashladni učinak
q_k	kJ/kg	Specifični učinak kondenzacije
w	kJ/kg	Specifični rad
ε	kg/kg	Faktor hlađenja
m	kg	Masa
$\dot{m}_{RT}$	kg/s	Protočna masa radne tvari
w_i	m/s	Brzina
v_i	m ³ /kg	Specifični volumen
q_v	m ³ /s	Protočni volumen
A	m ²	Površina

1. UVOD

U radu je zadano da se uspoređi direktni VRF sustav hlađenja i indirektni sustav hlađenja na objektu od 5000 m². Uvodno će se općenito obraditi ova dva sustava.

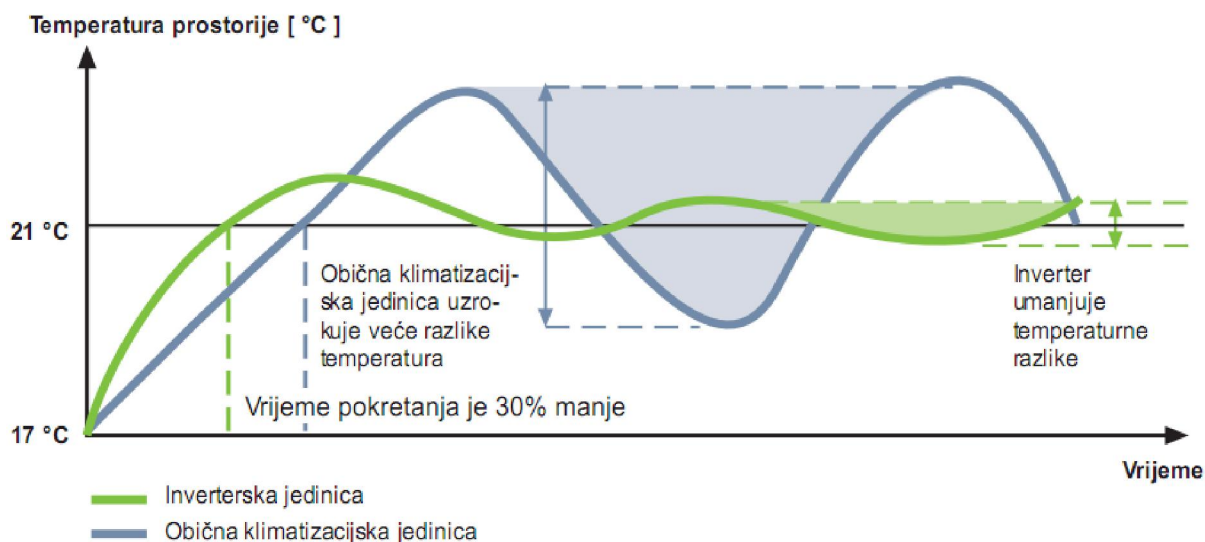
1.1. Direktni sustav hlađenja – VRF (variable refrigerant flow)

Osnovna karakteristika VRF sustava je da se sastoji od većeg broja unutarnjih jedinica (isparivača) spojenih na jednu vanjsku kondenzacijsku jedinicu (kondenzator + kompresor i ostale komponente) – tzv. inverter. Broj isparivača ide i do 50 ili čak i više. Ovi sustavi predviđeni su za srednje velike i velike zgrade u kojima se ugrađuje jedan ili, modularno, više neovisnih podsustava. Osim što se cijeli sustav može koristiti kao uređaj za hlađenje ili grijanje prostora, moguć je i način rada pri kojem se neke prostorije hlade, a druge zagrijavaju toplinom odvedenom iz onih prvih čime se preraspodjeljuje postojeća energija unutar sustava i znatno štedi električna energija. VRF sustav je prilagodljiv – uz jednu vanjsku jedinicu moguće je kombinirati različite unutarnje jedinice – kazetne s dvosmjernim ili četverosmjernim istrujavanjem (za ugradnju u spuštene stropove), parapetne, stropne, kanalne ili zidne. Rad pojedinačnih unutarnjih jedinica moguće je kontrolirati izravno – u prostoriji gdje su ugrađene, ili centralnom kontrolnom jedinicom (računalom).

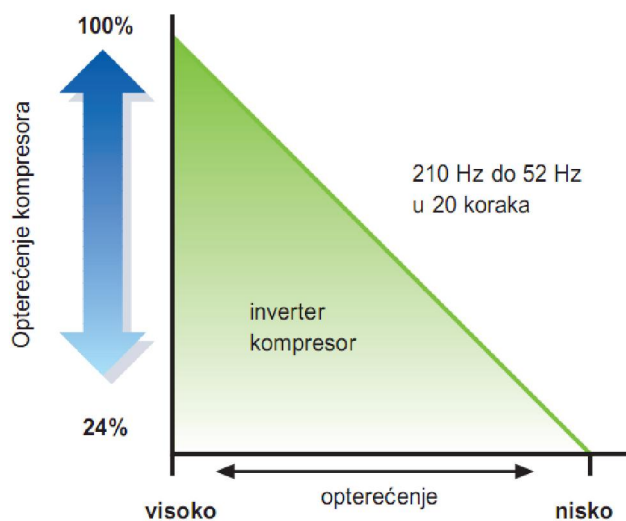
Termin VRF (ili VRV), varijabilni protok radne tvari (freona) odnosi se na sposobnost sustava na upravljanje količinom radne tvari koja struji u isparivače, te se na taj način u svakoj pojedinoj zoni hlađenja posebno može mijenjati kapacitet isparivača tj. individualno regulirati razina komfora.

1.1.1. Prednosti VRF sustava

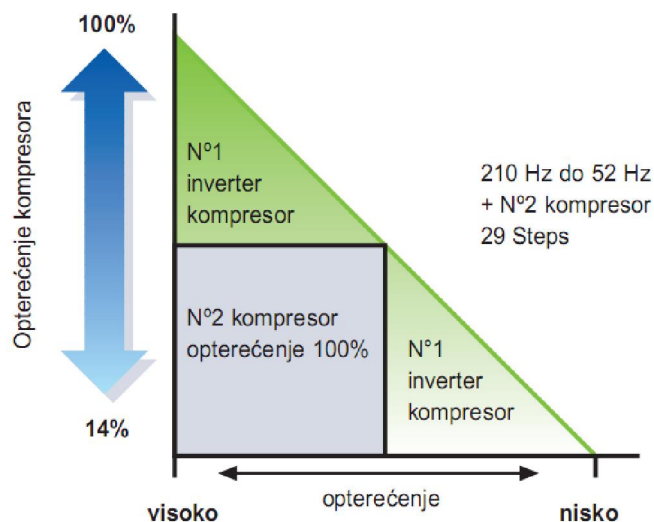
1. Lagana montaža
 - VRF jedinice su relativno lagane i modularne
 - potrebno manje instalacijskog prostora
 - male dimenzije cijevnog razvoda – brža i lakša ugradnja
2. Fleksibilnost
 - jedna kondenzacijska jedinica spojena na više unutarnjih jedinica različitih kapaciteta
 - laka prilagodba sustava na proširenje ili rekonfiguraciju prostora, koji onda može zahtijevati dodatni kapacitet
3. Održavanje
 - niski pogonski troškovi, jer svaka zona ima vlastito upravljanje
 - održavanje se uglavnom sastoji od mijenjanja filtera i čišćenja izmjenjivača
4. Komfor
 - individualna regulacija temperature za svaku pojedinu zonu
 - zbog varijabilnog broja okretaja kompresora VRF sustav može održavati preciznu temperaturu hlađenog prostora u granicama $\pm 0,6$ °C (prema literaturi proizvođača). (Slika 1.)
5. Energetska učinkovitost
 - tipični VRF sustav ima 2-3 kompresora od kojih je jedan inverterski, sa promjenom broja okretaja, a ostali su „on/off“ kompresori, što nam omogućuje široku promjenu kapaciteta, pri čemu se dobije na uštedi energije (Slike 2., 3., 4.)



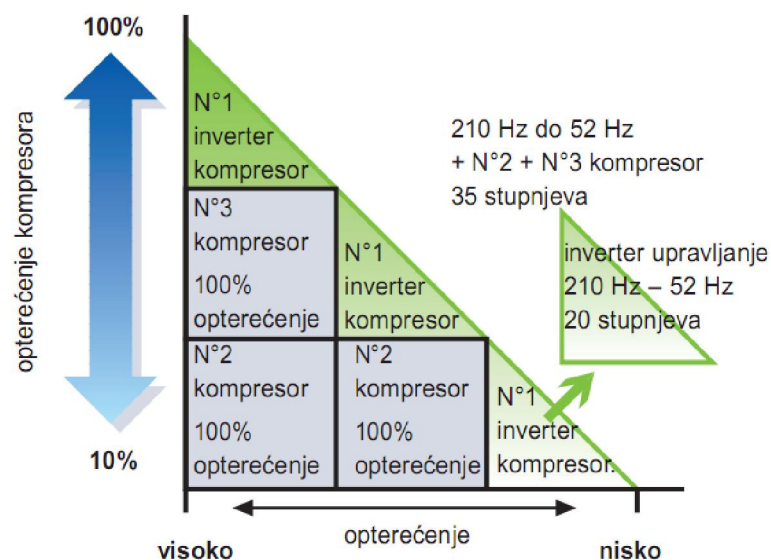
Slika 1. Usporedba inverterske i obične klimatizacijske jedinice



Slika 2. Vanjska jedinica sa jednim inverter kompresorom



Slika 3. Vanjska jedinica sa jednim inverter kompresorom i jednim „on/off” kompresorom



Slika 4. Vanjska jedinica sa jednim inverter kompresorom i dva „on/off“ kompresora

Slike 2, 3, i 4 pokazuju kako na regulaciju utječu dodatni „on/off“ kompresori. Inverter upravljanje nam pruža mogućnost regulacije rashladnog učinka u 20 stupnjeva. Sa jednim kompresorom više dobije se 29, a sa dva, 35 stupnjeva regulacije. Povećanjem toplinskog opterećenja i/ili povećanjem potrebe za rashladnom energijom, postepeno se prvo uključuje prvi dodatni kompresor, a ako i dalje raste opterećenje, uključuje se i dodatni drugi kompresor.

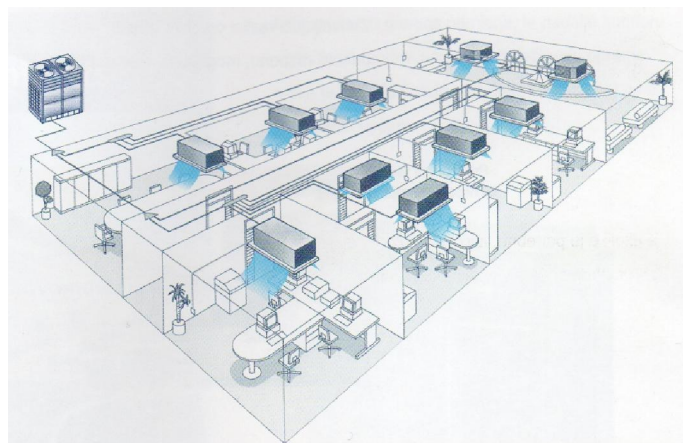
1.1.2. Nedostaci VRF sustava

1. Cjevovodi

- opasnost od ispuštanja freona – veliko punjenje freona u sustavu, dugačak cijevni razvod, teško pronalaženje i popravak mjesta eventualnog oštećenja cijevi, naročito u teško dostupnim prostorima
- dugačak cijevni razvod može poremetiti pravilno vraćanje ulja u kompresor

2. Investicijski troškovi

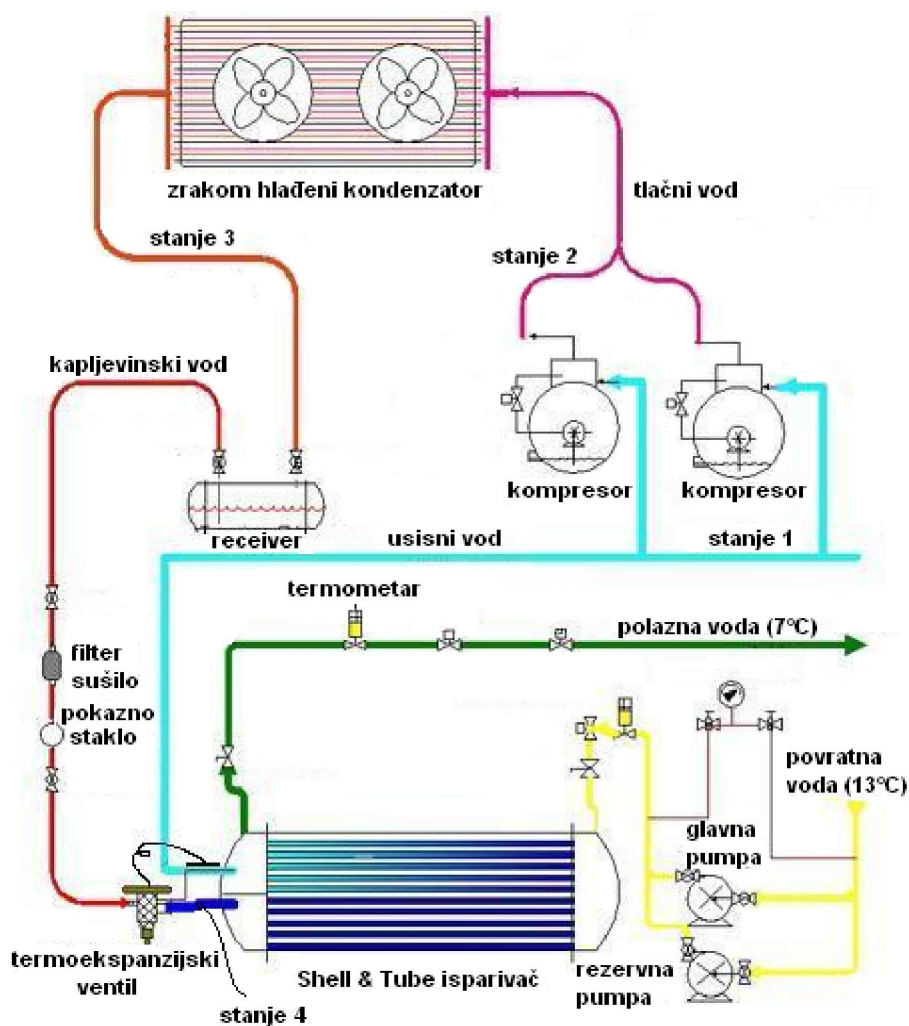
- u mnogo slučajeva su početni troškovi VRF sustava veći nego kod indirektnog sustava hlađenja vodom
- vlasnici zgrada često nemaju poticaja da bi prihvatili veće investicijske troškove, iako je povrat investicije kratak



Slika 5. VRF sustav hlađenja

1.2. Indirektni sustav hlađenja vodom

Za razliku od direktnog sustava hlađenja, gdje je jedini prijenosnik energije radna tvar (freon), ovdje se koristi dodatni izmjenjivač topline, pri kojemu se odvija izmjena topline sa posrednog prijenosnika energije na radnu tvar koja isparava. Posredni prijenosnik energije je uvijek kapljevina koja ne mijenja agregatno stanje (u ovom slučaju voda). Hladnjak posrednog prijenosnika energije je isparivač radne tvari. Kao izvor rashladnog učina pri indirektnom sustavu hlađenja, tj. za hlađenje vode koriste se rashladnici vode (eng. „chillers“). Jedan takav rashladni agregat je prikazan na slici 6. Sastoji se od osnovnih dijelova rashladnog uređaja – isparivača, kompresora, kondenzatora i prigušnog ventila koji mogu biti u zajedničkom kućištu (paketna jedinica) ili razdvojeni, u tzv. „split“ izvedbi.



Slika 6. Primjer sheme rashladnog agregata

1.2.1. Rad indirektnog sustava hlađenja

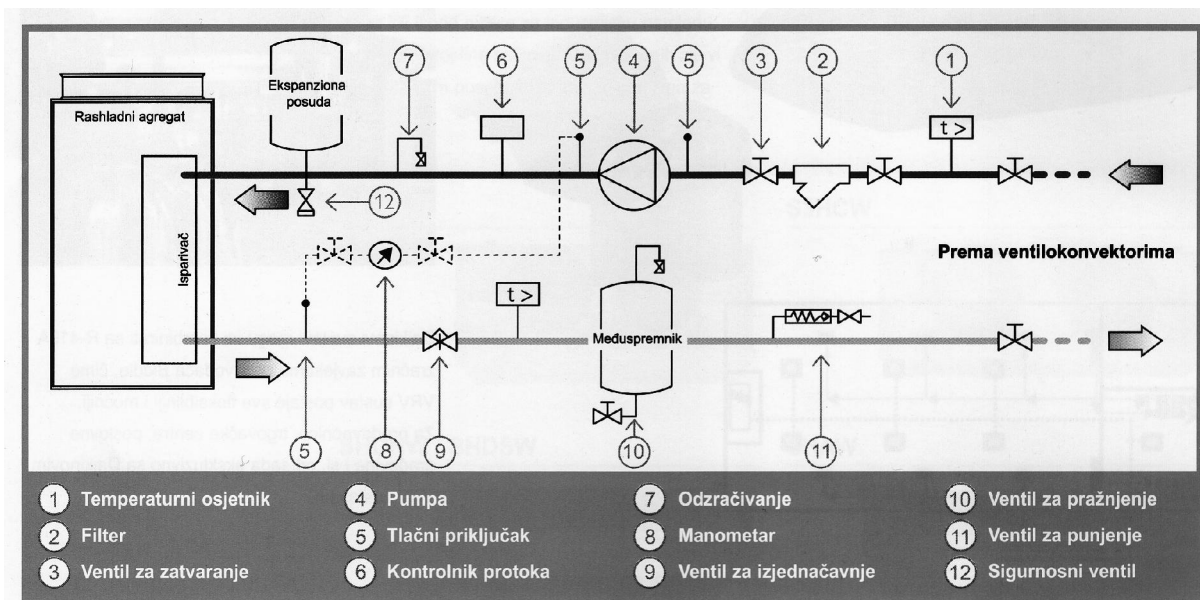
Posredni prijenosnik energije, voda, ulazi u isparivač, gdje se hladi, predajući toplinu kapljevitoj radnoj tvari koja isparava pri niskom tlaku i niskoj temperaturi (stanje 4 – 1). Isparenu radnu tvar usisava kompresor i komprimira je, pri čemu joj naraste tlak i temperatura (stanje 2). Temperatura koju postiže radna tvar na kraju kompresije mora biti veća od temperature okoliša da bi ona mogla predati toplinu okolišu i tako kondenzirati u kondenzatoru. Kondenzirana radna tvar (stanje 3) tada ide prema isparivaču, kroz ekspanzijski ventil, gdje se prigušuje na tlak isparavanja (stanje 4), prilikom čega ona ulazi u zasićeno područje, gdje joj je temperatura tada jednaka temperaturi isparavanja. Nadalje, radna tvar opet isparava, i preuzima toplinu od vode koja se hladi i cijeli taj ljevokretni proces se ponavlja.

Voda za hlađenje je u cirkulaciji pomoću pumpe, koja tu vodu šalje na izmjenjivače topline, ventilokonvektore (eng. „fan coils“), gdje se ventilatorom ostvaruje prisilno strujanje zraka iz prostora preko izmjenjivačkih površina, čime se taj zrak hladi. Ta voda struji u zatvorenom krugu, polazni vod – ventilokonvektor – povratni vod – rashladni agregat. U ovom radu zadan je temperaturni režim 13/7°C. Ulazna temperatura vode u rashladni agregat ili izlazna temperatura iz ventilokonvektora je 13°C, a izlazna temperatura iz rashladnog agregata ili ulazna temperatura koja ulazi u ventilokonvektor je 7°C. Shema jednog takvog zatvorenog kruga strujanja vode od rashladnika do ventilokonvektora, s polaznim i povratnim cjevovodom i sa svim elementima opreme prikazana je na slici 7.

Ventilokonvektori se izvod kao cijevni s lamelama (Cu-Al izmjenjivač). Cjevovodi su najčešće bakreni, ali se u posljednje vrijeme koriste i višeslojne cijevi s gotovim spojnim i prijelaznim elementima. Ventilokonvektori se na cjevovod najčešće spajaju fleksibilnim spojem, pri čemu se ugrađuju i ventili kako bi se omogućio popravak uređaja (postoji mogućnost odvajanja uređaja bez ispuštanja vode i pražnjenja instalacije).

Sustav može biti dvocijevni ili četverocijevni. Kod dvocijevnog se sustava postavljaju dvije cijevi – polazni i povratni vod, čime se ostvaruje cirkulacija tople ili hladne vode u zatvorenom krugu. Instalacija tada služi za sezonski rad: kada je potrebno hlađenje kroz cjevovod struji hladna voda, a kada je potrebno grijanje – topla voda. Ventili, razdjelnici i ostala oprema koja omogućava prebacivanje sustava sa zimskog na ljetni način rada uobičajeno se nalazi u strojarnici ili kotlovnici.

Ventilokonvektori koji služe za rad u dvocijevnom sustavu imaju samo jedan izmjenjivač topline kroz koji struji hladna ili topla voda. Četverocijevni sustavi imaju četiri cijevi – dva polazna voda i dva povratna voda, tj. poseban par vodova za toplu i hladnu vodu. U takvom je sustavu po želji moguće hlađenje ili grijanje jer postoje dva izmjenjivača topline: jedan za toplu, a drugi za hladnu vodu. Takva instalacija i uređaji su, naravno, skuplji, ali pružaju potpunu ugodnost.



Slika 7. Hidraulička shema zrakom hlađenog rashladnog agregata za komfornu primjenu [8]

1.2.2. Prednosti indirektnog sustava

1. Sigurnost
 - u slučaju propuštanja, radna tvar ne može doći u dodir s osobama u prostoru
2. Malo punjenje
 - za veće razgranate sustave općenito potrebno manje radne tvari u sustavu

1.2.3. Nedostaci indirektnog sustava

1. Pogonski troškovi
 - veći pogonski troškovi od troškova direktnog sustava
2. Faktor hlađenja
 - zbog dodatnog izmjenjivača topline radna tvar – voda, manji je faktor hlađenja nego kod direktnog sustava



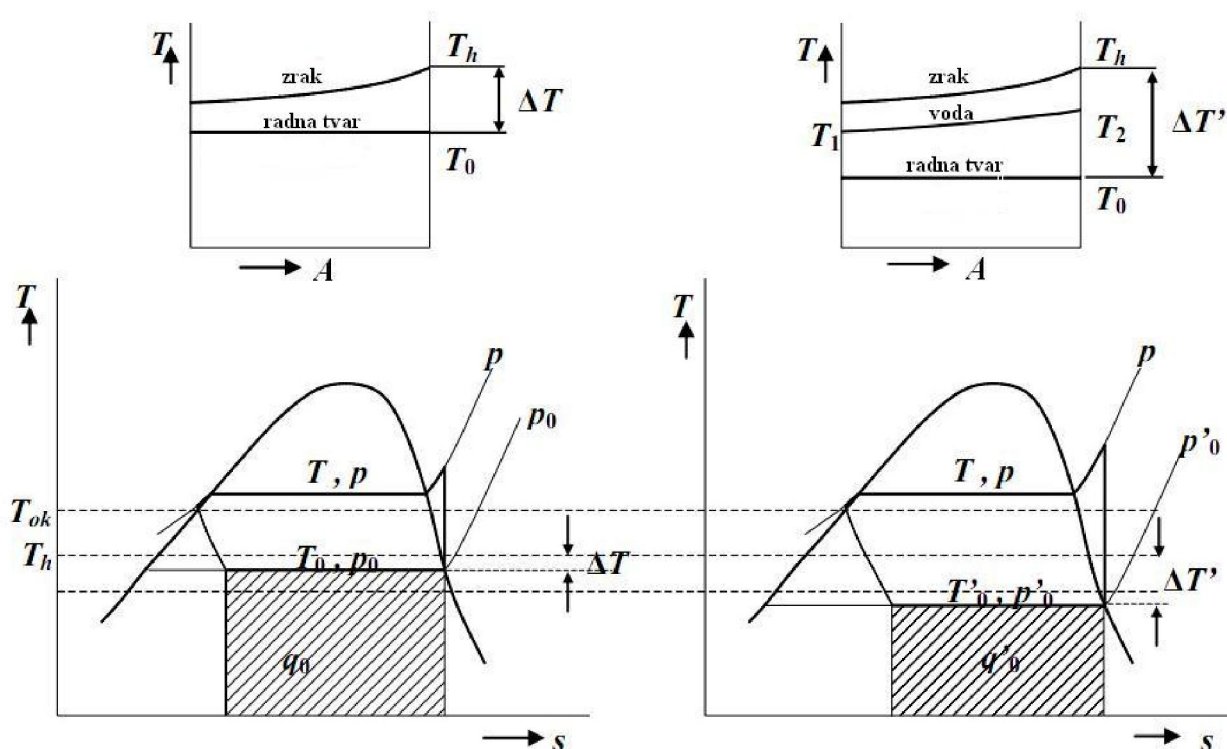
Slika 8. Zrakom hlađeni rashladni agregat

1.3. Termodinamička usporedba direktnog i indirektnog sustava

Na slici 9. prikazana je usporedba ovih dvaju procesa u T -s i T -A dijagramu. U T -s dijagramu se vidi da je termodinamički bolji direktni sustav, jer je za iste uvjete veći rashladni učinak nego kod indirektnog, $q_0 > q'_0$. Uz pretpostavku da se koristi ista radna tvar i da su temperature hlađenog prostora i okoliša jednake za oba dva sustava, temperatura isparivanja bit će kod indirektnog sustava niža, a temperatura kondenzacije viša; što znači da pada faktor hlađenja a dimenzije rashladnog uređaja rastu.

U T -A dijagramu prikazan je tijek temperatura po površini izmjenjivača:

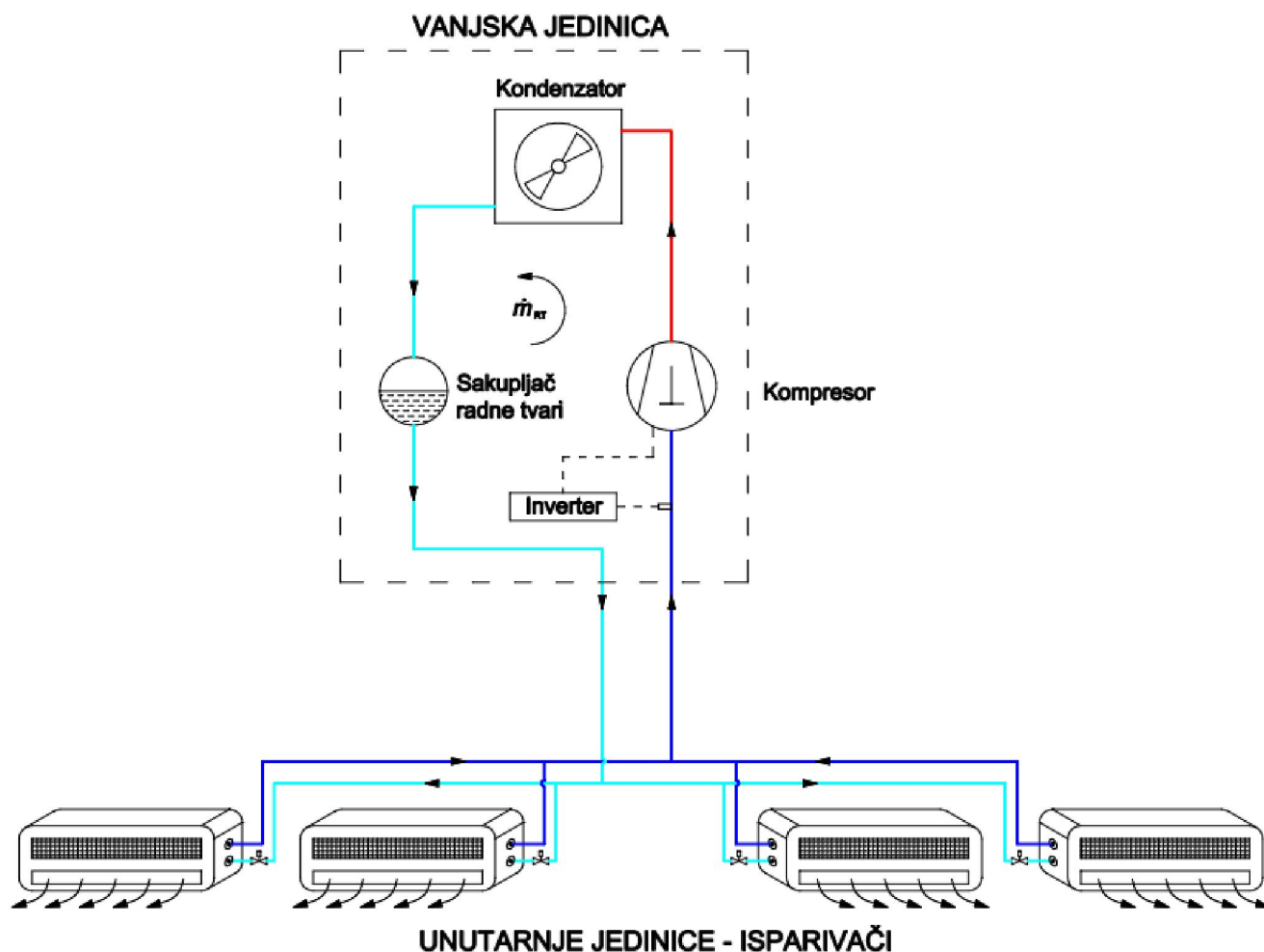
- radna tvar – zrak kod direktnog sustava (lijevo)
- radna tvar – voda i voda – zrak izmjenjivač (ventilokonvektor), kod indirektnog sustava (desno).



Slika 9. Usporedba procesa direktnog i indirektnog sustava hlađenja [9]

2. TEHNIČKI OPIS SUSTAVA

2.1. Tehnički opis VRF sustava direktnog hlađenja



Slika 10. Shema direktnog rashladnog sustava

Ovaj sustav sastojat će se od velikog broja unutarnjih jedinica, tj. isparivača, u kojima će isparavati radna tvar R410A. Unutarnje jedinice se spajaju sa cjevovodima na vanjsku kondenzacijsku jedinicu. Cjevovodi mogu biti ukupne duljine 1000 metara, maksimalna duljina pojedine dionice do 175 m, visinska razlika između vanjske i unutarnje jedinice do 90 m, a najveći razmak između unutarnjih jedinica do 15 m. [8]

Kondenzacijska jedinica koja se ovdje koristi je zrakom hlađena, slika 11. Ona se sastoji od kondenzatora, kompresora, sakupljača radne tvari („receivera“) i ostalih elemenata. Kompresor ima invertersku regulaciju, što znači da određeni elektronički elementi reguliraju, pretvaraju frekvenciju dobivenu od izvora električne energije, koji koristimo pri pogonu kompresora, u frekvenciju koja je potrebna za trenutni broj okretaja kompresora, koje regulacija sustava zahtjeva u odnosu na trenutno toplinsko opterećenje prostorije. Promjenjivim brojem okretaja kompresora, mijenja se protok radne tvari kroz sustav, a time i ukupni rashladni učinak.



Slika 11. Zrakom hlađena kondenzacijska jedinica VRF sustava

Glavna prednost ovog sustava je sposobnost odgovora na fluktuacije toplinskog opterećenja prostorije. Za usporedbu, konvencionalni sustavi s direktnom ekspanzijom nude ograničenu ili nikakvu modulaciju kao odgovor na promjene uvjeta u prostoriji. Problem je veći kada su konvencionalni sustavi s direktnom ekspanzijom predimenzionirani ili kad sustav radi s djelomičnim opterećenjem. VRF sustav omogućava svakom pojedinom termostatu regulaciju njegove unutarnje jedinice preko odgovarajućeg elektronskog ekspanzijskog ventila te se na taj način održava temperatura prostora.

U odlučivanju da li je VRF sustav izvediv za projekt, treba uzeti u obzir karakteristike zgrade; potrebu za rashladnom energijom i toplinskom energijom, vršno opterećenje, zahtjevi za istodobno grijanje i hlađenje, potrebe za svježim zrakom, zahtjevi oko pristupa, minimalne i maksimalne vanjske temperature, trajnost, i zvučne karakteristike.

Karakteristike zgrade

Iako proizvođači stalno povećavaju maksimalnu dozvoljenu duljinu cjevovoda, što su cjevovodi dulji to su investicijski i pogonski troškovi veći.

Geometrija zgrade mora se pažljivo proučiti. Sustav se ne bi trebao razmatrati ako očekivane duljine cjevovoda ili razlike u visini premašuju vrijednosti koje proizvođač propisuje u katalogu. U zgradama gdje je na raspolaganju više vanjskih lokacija za instalaciju vanjskih jedinica, kao što su krov, pod, svaka kondenzacijska sekcija treba biti smještena što bliže moguće unutarnjim jedinicama koje serviraju. Fizička veličina vanjske sekcije tipičnog VRF sustava je nešto veća od konvencionalne direktno ekspanzijske kondenzacijske sekcije, s visinom do 1,8 m.

Profil opterećenja zgrade

Kombiniranje kapaciteta hlađenja unutarnjih jedinica može odgovarati, premašivati, ili biti niže od kapaciteta vanjske sekcije spojene na njih. Inženjer može specificirati vanjsku jedinicu sa kapacitetom koja se sastoji bilo gdje između 70% i 130% kapaciteta unutarnjih

jedinica. Inženjer mora predvidjeti profil opterećenja za zgradu tako da je svaka vanjska jedinica dimenzionirana na vršno opterećenje svih unutarnjih jedinica u bilo koje vrijeme. Zbrajanjem vršnog opterećenja za svaku unutarnju jedinicu i korištenjem toga ukupnoga broja za dimenzioniranje vanjske jedinice vjerojatno će rezultirati nepotrebno predimenzioniranom vanjskom sekcijom. Iako je predimenzionirana vanjska jedinica u VRF sustavu sposobna za rad pri nižem kapacitetu, treba izbjegavati predimenzioniranje osim ako je za neki projekt tako zahtijevano.

Trajnost

Posebna značajka sustava je njegova visoka učinkovitost u usporedbi s konvencionalnim dizalicama topline. Pri djelomičnim opterećenjima VRF sustav koristi manje električne energije u usporedbi s konvencionalnim uređajima, zbog varijabilnog broja okretaja kompresora i ventilatora na vanjskim sekcijama. Inženjer treba uzeti u obzir još neke faktore za povećanje učinkovitosti sustava i trajnosti. Na primjer, dimenzioniranje se treba pažljivo procijeniti a predimenzioniranje treba izbjegavati. Trebaju se specificirati radne tvari koje su ekološki prihvatljive, kao recimo R410A.

Zahtjevi za svježim zrakom.

Jedan od najizazovnijih aspekata dizajniranja VRF sustava je potreba za osiguranjem odvojenog vanjskog dobavnog zraka prema svakoj unutarnjoj jedinici, prema ANSI/ASHRAE Standard 62.1, *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Većina proizvođača nudi dodatnu vanjsku opremu za spajanje na vanjski priključak zraka. Posebni vanjski ventilator i kontrolni sustav se generalno koriste za veće zgrade. U vlažnim klimama, dobava kondicioniranog vanjskog zraka prema svakoj unutarnjoj jedinici osigurava dobru kvalitetu zraka u prostoru.

Istodobno grijanje i hlađenje

Neki proizvođači nude VRF sustav koji je sposoban za istodobno grijanje i hlađenje. U takvim sustavima neke unutarnje jedinice mogu pružati grijanje, dok ostale mogu hladiti, iako je puno unutarnjih jedinica spojeno na jednu vanjsku. Cijene za takve uređaje i njihove instalacije su veće od uređaja koji pružaju samo grijanje ili samo hlađenje. Katkad se može postići više ekonomičnih dizajna sustava, s kombiniranjem zona sa sličnim potrebnim opterećenjima za grijanje i hlađenje. Kada su zone s različitim grijanje/hlađenje zahtjevima spojene na jednu vanjsku jedinicu, treba razmatrati uređaje s mogućnošću istodobnog grijanja i hlađenja.

Primjer zona koje mogu zahtijevati istodobno grijanje i hlađenje, recimo kada se kombiniraju unutarnje i vanjske zone, vanjske zone sa različitim izlaganjem, i zone koje zahtijevaju komforno hlađenje sa prostorijama koje zahtijevaju preciznu regulaciju.

Minimalna vanjska temperatura zraka

Korištenjem VRF dizalice topline za grijanje i hlađenje može povećati energetske efikasnost zgrade. Većina VRF jedinica pri niskim temperaturama okoline pruža veće kapacitete grijanja od konvencionalnih dizalica topline sa direktnom ekspanzijom. Inženjer mora prema vanjskoj projektnoj temperaturi procijeniti toplinsko opterećenje pojedine unutarnje jedinice. Proizvođači ukazuju na kapacitete grijanja prema kataloškoj minimalnoj vanjskoj temperaturi, prema kojima je katkad u opciji navedena i dodatna oprema za niske temperature okoline. Kada vanjska temperatura padne ispod temperature navedene u katalogu, kapacitet grijanja dizalice topline se smanjuje. Kada je kapacitet grijanja VRV sustava ispod vrijednosti kapaciteta koji je potreban za grijanje zgrade, moraju se razmatrati dodatni sustavi grijanja.

Izbor jedinica i raspored sustava

Kompletna specifikacija VRF sustava treba se pažljivo planirati. Svaka unutarnja sekcija je odabrana sukladno vrijednosti toplinskog ili rashladnog opterećenja za pojedine zone koje opslužuju. U hladnim klimama gdje se VRF sustav koristi kao primarni izvor grijanja neke unutarnje jedinice moraju se dimenzionirati prema zahtjevima grijanja. Jednom kad se dimenzioniraju sve unutarnje jedinice, vanjska jedinica se odabire prema profilu opterećenja zgrade. Kada su unutarnje jedinice previše predimenzionirane funkcija modulacije ekspanzijskih ventila se smanjuje ili potpuno izgubi. Većina proizvođača nudi programski paket za odabir komponenata sustava i tako ostvaruje lakšu optimizaciju sustava.

Instalacija

Instalater mora biti upoznat sa svim komponentama sustava i instalacijskim zahtjevima. Cijevi koje razvode radnu tvar moraju biti čiste, suhe, i neoštećene. Pri zavarivanju cijevi mora se koristiti inertni plin dušik radi zaštite od oksidacije unutarnjih površina cijevi. Priručnik za instalaciju mora se detaljno proučiti. Instalater bi trebao biti upoznat i sa kontrolnim opcijama dostupnim za VRF sustav. Na primjer, svaka pojedina unutarnja jedinica može biti regulirana sa programabilnim termostatom ili može sustav s više unutarnjih jedinica koje opslužuju istu zonu biti reguliran s istim termostatom. Većina proizvođača VRF sustava nudi centraliziranu kontrolnu opciju, koja priključuje korisnika na monitor, te se kontrola cijelog sustava vrši s jedne lokacije ili preko internetske mreže.

Proizvođači u puno slučajeva nude i tečajeve za instalatere, koji se tiču instalacije sustava, no nažalost razlike u instalaciji variraju od proizvođača do proizvođača, tako da instalateri moraju biti dobro upoznati sa svakim sustavom.

Puštanje sustava u rad

Neke procedure moraju biti dodane tipičnom planu puštanja u rad prema zahtjevu za jedinstvene klimatizacijske sustave i sustave sa dizalicama topline:

- Potvrda o pravilnom radu elektronskog ekspanzijskog ventila
- Osiguranje sposobnosti termostata za potpunu modulaciju unutarnjih jedinica
- Sposobnost vanjske jedinice za isporuku adekvatnog toplinskog i rashladnog učinka pri specificiranim vršnim opterećenjima
- Sposobnost vanjske jedinice za isporuku toplinskog i rashladnog učinka pri ekstremnim vanjskim temperaturama

Ograničenja VRF sustava

VRF sustavi nisu prikladni za sve aplikacije.

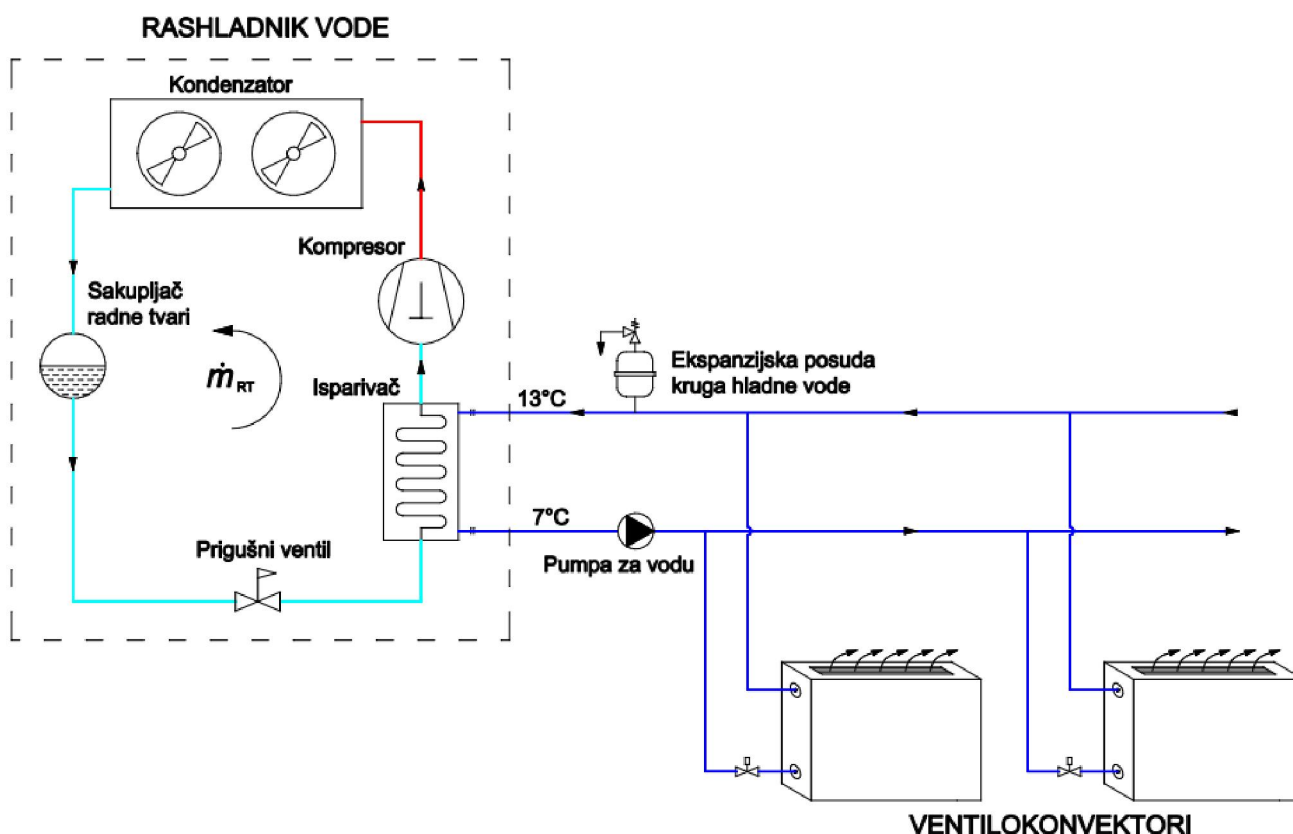
Navedena su neka ograničenja.

- Ograničenje minimalne i maksimalne temperature ulaznog zraka, suhog i vlažnog termometra, koje čini sustav neprikladnim za aplikacije sa 100% vanjskog zraka, naročito u vrućim i vlažnim klimama.
- Rashladni učinak koji je na raspolaganju na unutarnjim sekcijama je smanjen pri niskim vanjskim temperaturama. To limitira korištenje ovog sustava u vrlo hladnim klimama, kad je sustav u cjelogodišnjem režimu hlađenja.

2.2. Tehnički opis indirektnog sustava hlađenja vodom

Rashladnik vode (rashladni agregat) glavni je element indirektnog sustava hlađenja. Za razliku od direktnog sustava hlađenja u kojem se radna tvar razvodi po objektu, u njemu se odvija cjelovit ljevokretni rashladni proces sa radnom tvari (R410A). Na isparivaču rashladnika vode, radna tvar dobiva toplinu od vode koja se hladi. Ohlađena voda u temperaturnom režimu 7°C polaz / 13°C povrat, prisilnom cirkulacijom struji prema ventilokonvektorima, gdje preuzima toplinu od zraka. Usisani zrak iz prostorije prisilno struji kroz ventilokonvektor, hladi se, ulazi ponovo u prostoriju, miješa se sa zrakom iz prostorije i tako ga pothlađuje. S druge strane izmjenjivača u ventilokonvektoru, zagrijana voda (13°C), vraća se prema rashladniku vode na ponovno hlađenje (7°C).

Rashladni sustavi sa rashladnicima vode koji se koriste u komercijalne svrhe, često imaju centralno postrojenje smješteno u podrumu, na krovu, ili na katu zgrade koja je namijenjena za smještaj opreme.



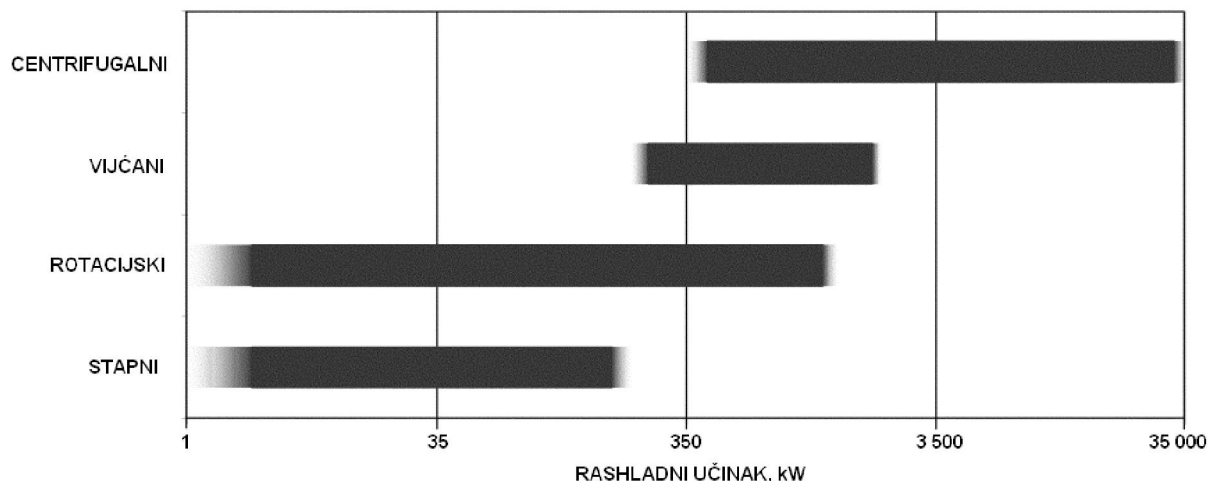
Slika 12. Shema indirektnog rashladnog sustava

Obično je poželjno imati približno konstantni protok u isparivaču rashladnika vode radi izbjegavanja velikih padova temperatura u rashladniku i za suzbijanje smrzavanja vode pri smanjenom protoku, pri djelomičnom opterećenju. Konstantni protok rashladne vode u rashladniku isto pridonosi i regulaciji kapaciteta.

ASHRAE/IESNA Standard 90.1-1999 navodi da vodeni sustavi koji premašuju ukupnu snagu pumpi 7,5 kW moraju imati kontrolne ventile za regulaciju koji omogućavaju varijabilni

protok vode radi uštede energije. Protok vode kod vodenih sustava trebao bi se moći smanjiti na 50 % nazivnog protoka ili manje.

Kompresori koji se koriste u rashladnim agregatima mogu biti: stapni, rotacijski, vijčani, centrifugalni. Na slijedećoj strani na slici 13. prikazane su vrste kompresora u odnosu na primjenu za pojedine rashladne učinke.



Slika 13. Raspon korištenja rashladnika vode prema vrsti kompresora [3]

Upravljanje

Temperaturni senzor rashladne vode, šalje stlačeni zrak (kod pneumatskog upravljanja) ili električni signal (kod elektroničkog upravljanja) prema kontrolnom krugu, koji tada regulira kapacitet kompresora, što ima za posljedicu promjenu povratne ili polazne vode.

Podešavanje kapaciteta kompresora se ostvaruje različito u odnosu na vrstu rashladnika:

Stapni rashladnici vode koriste kombinaciju rasterećenja pojedinih cilindara, i on/off regulaciju jednog ili više kompresora.

Centrifugalni rashladnici, pogonjeni sa elektromotorima, standardno koriste promjenu kuta lopatica sa rotacijom, koje su katkad kombinirane sa pomičnim difuzorima. Turbine, motorni pogoni i električni motori sa inverterom i varijabilnom brzinom dopuštaju kontrolu brzine dodatno sa rotacijom lopatica, smanjujući tako potrošnju energije pri parcijalnim opterećenjima.

Rashladnici vode sa vijčanim kompresorom imaju jedan razvodni ventil sa kojim se mijenja duljina kompresijskog puta. Inverterski upravljani elektromotori sa promjenjivom brzinom vrtnje mogu ovdje također mijenjati brzinu vrtnje prema kapacitetu.

U aplikacijama klimatizacije, većina rashladnika sa centrifugalnim i vijčanim kompresorima može mijenjati raspon snage od 10 % - 100 %. Iako relativno neučinkovito, obilazni vod sa vrućim plinom može se koristiti u svrhu smanjenja kapaciteta na približno 0 %.

Stapni rashladnici vode su dostupni sa jednostavnom on/off regulacijom kompresora u postrojenjima sa manjim kapacitetima i sa više koraka smanjenja opterećenja do 12,5 % u

većim multi-kompresorskim jedinicama. Najviše uređaja sa srednjim kapacitetima daju smanjenje opterećenja u koracima 50, 33, 25 % kapaciteta. Obilaznim vodom sa vrućim plinom može se opterećenje smanjiti na približno 0 %.

Temperaturni vodeni upravljač je termostatski uređaj koji smanjuje opterećenja promjenom broja okretaja, ili uključivanjem/isključivanjem kompresora, kada padne potreba za rashladnom energijom ispod minimalne vrijednosti.

Na rashladnicima sa centrifugalnim ili vijčanim kompresorima, limitator struje limitira kapacitet kompresora prilikom moguće visoke potrošnje energije, radi toga da spriječi veliku poteznu struju koja premašuje nazivnu vrijednost.

Kontrolni elementi

Kondenzatorska rashladna voda može imati potrebu za kontrolom radi regulacije tlaka kondenzacije. Obično, izlazna temperatura iz rashladnog tornja može biti upravljana sa ventilatorima, prigušivačima, ili obilaznim vodom vode oko tornja. Obilazni vod oko tornja dopušta da se održava brzina vode kroz cijevi kondenzatora, što sprečava da brzina bude preniska.

Regulator protoka je drugi uobičajeni element regulacije. Promjena protoka ventila mijenja se u odnosu tlak kondenzacije. Na primjer, smanjenje u tlaku smanjuje protok vode, koji zauzvrat podiže tlak kondenzacije na željeni minimalni nivo.

Za zrakom hlađene evaporativne kondenzatore, tlak kondenzacije može biti reguliran brzinom vrtnje ventilatora, isključenjem krugova, ili potapljanjem isparivača sa radnom tvari, što ima za posljedicu smanjenja intenziteta izmjene topline.

Stapni rashladnici često imaju termoekspanzijski ventil, koji zahtijeva propisani raspon tlakova, radi izbjegavanja praznog isparivača (pri niskom tlaku).

Rashladnici sa vijčanim kompresorima obično imaju ekspanzijski ventil. Voda rashladnog tornja smije padati sa padom opterećenja od nazivne vrijednosti do preporučenih minimalnih vrijednosti propisanih od proizvođača.

Rashladnici sa vijčanim kompresorima iznad 500 kW mogu koristiti potopljene isparivače, a regulacija protoka radne tvari je slična sustavima koji koriste centrifugalne kompresore.

Termoekspanzijski ventil može kontrolirati centrifugalni rashladnik pri nižim kapacitetima, dok uređaji sa visokim kapacitetima rade sa ventilima s plovkom na niskotlačnoj i visokotlačnoj strani. Ovakvi drugi tipovi regulacije protoka radne tvari dopuštaju relativno manji tlak kondenzacije, osobito pri djelomičnim opterećenjima. Također, centrifugalni uređaji mogu prijeći u nestabilni rad ako se ne smanji tlak, s padom rashladnog opterećenja. Dodatno, niski tlak smanjuje potrošnju električne energije i razinu buke. Zbog ovih razloga, i instalaciji s centrifugalnim kompresorima, voda rashladnog tornja treba padati prirodno sa smanjenjem rashladnog opterećenja i smanjenjem temperature vlažnog termometra.

Sigurnosni uvjeti

- **Visoki tlak kondenzacije.** Presostat visokog tlaka isključuje iz rada, ako je tlak radne tvari na izlazu iz kompresora veći od propisanog. (ASHRAE *Standard* 15)
- **Niski tlak (temperatura) radne tvari.** Presostat niskog tlaka isključuje iz rada, ako je tlak u isparivaču (ili temperatura) postigla minimalnu sigurnosnu vrijednost.
- **Visoka temperatura mazivog ulja.** Ovaj uređaj štiti kompresor, ako se smanji hlađenje ulja ili ako oštećenje ležaja prouzroči generira prilično povećanje topline.
- **Visoka temperatura motora.** Ako je smanjeno hlađenje motora ili ako je motor preopterećen, zbog zakazivanja kontrolnih uređaja, ovaj uređaj isključuje uređaj iz rada. Može se sastojati od bimetalnih termostata, termistora, ili drugih senzora. Postavlja se na tlačni vod kompresora.
- **Preopterećenje motora.** Neki mali, stapni hermetički kompresori koriste direktno upravljanje preopterećenje preko ožičenja električne energije motora. Veći motori koriste pilot upravljanje preopterećenje. Centrifugalni i vijčani kompresori generalno koriste limitator struje kao zaštitu od preopterećenja.
- **Niska temperatura mazivog ulja u mirovanju.** Ova sklopka se koristi kako za zaštitu kada zakaže grijač maziva, tako i za sprječavanje pokretanja uređaja, nakon što uređaj dugo nije bio u radu. Pokretanje može početi nakon što grijač mazivog ulja, zagrije mješavinu ulja i radne tvari, i nakon što se izdvoji radna tvar koja se otopila u ulju.
- **Niski tlak mazivog ulja.** Za zaštitu od začepljenih filtara ulja, blokiranih prolaza ulja, gubitaka ulja, ili kvara uljne pumpe. Sklopka isključuje kompresor iz rada kada tlak ulja padne ispod minimalne sigurnosne vrijednosti ili ako se ne dobavlja dovoljna količina ulja za podmazivanje ubrzo nakon starta kompresora.
- **Elektro sigurnosna sklopka protoka rashladne kapljevine.** Ova sklopka ne isporučuje se uvijek sa paketom rashladnika vode, ali je neophodna u eksternom cijevnom sustavu radi zaštite od smrzavanja isparivača u slučajevima kada protok kapljevine stane.
- **Elektro sigurnosna sklopka protoka kondezatorske vode.** Ovaj uređaj, sličan elektro sigurnosnoj sklopki protoka rashladne kapljevine, je ponekad korištena u eksternom cijevnom sustavu.
- **Niska temperatura rashladne kapljevine.** Ponekad zvana „zaštita od smrzavanja“, ova sklopka radi sa minimalnom izlaznom temperaturom rashladne kapljevine radi zaštite isparivača od smrzavanja u slučaju kada se pokvare kontrolni uređaji.

Održavanje sustava

Sljedeće specifikacije o održavanju odnose se na stapne, centrifugalne, i vijčane kompresore. Oprema ne bi trebala biti zanemarena, što se tiče održavanja, ali i ne bi trebala biti previše održavana. Treba se uspostaviti preventivni raspored održavanja. Sljedeća lista je samo kao vodič, u svakom slučaju preporučeno je slijediti specifikacije proizvođača.

Periodički pregledi:

- pregled propuštanja
- sadržaj vlage u sustavu
- nivo mazivog ulja
- pad tlaka na filtru ulja
- nivo i kvaliteta radne tvari
- tlakovi i temperature u sustavu
- protoci vode
- rad ekspanzijskih uređaja

Redovni raspored održavanja:

- čišćenje kondenzatora i mazivog ulja
- čišćenje isparivača (otvoreni sustavi)
- podešavanje tlaka, temperature, i protoka
- pritezanje žica i električnih instalacija
- stezanje ventila vrućeg plina
- mijenjanje filtra ulja i sušila
- ispitivanje nivoa vibracije sustava

2.3. Rashladnici kapljevina sa stapnim kompresorom

- hermetički zavareni, do 90 kW kapaciteta rashladnika
- poluhermetički, do 700 kW kapaciteta rashladnika
- direktni pogon, otvoreni, do 1600 kW kapaciteta rashladnika

Kondenzatori mogu biti, evaporativni, zrakom ili vodom hlađeni. Vodom hlađeni mogu biti sa cijevima u plaštu, cijev u cijevi, ili pločasti izmjenjivači topline. Većinom svi izmjenjivači sa cijevima u plaštu mogu biti popravljani, dok ostali moraju biti zamijenjeni ako se dogodi propust radne tvari.

Zrakom hlađeni kondenzatori su mnogo više uobičajeni nego evaporativni kondenzatori. Zrakom hlađeni kondenzatori zahtijevaju manje održavanje.

Isparivači su obično sa direktnom ekspanzijom, u kojima radna tvar isparava u cijevima, a hlađena voda se hladi na vanjskim površinama cijevi, „Shell & Tube“ izmjenjivača. Potopljeni isparivači održavaju nivo radne tvari sa strane plašta isparivača, dok se voda hladi u cijevima.

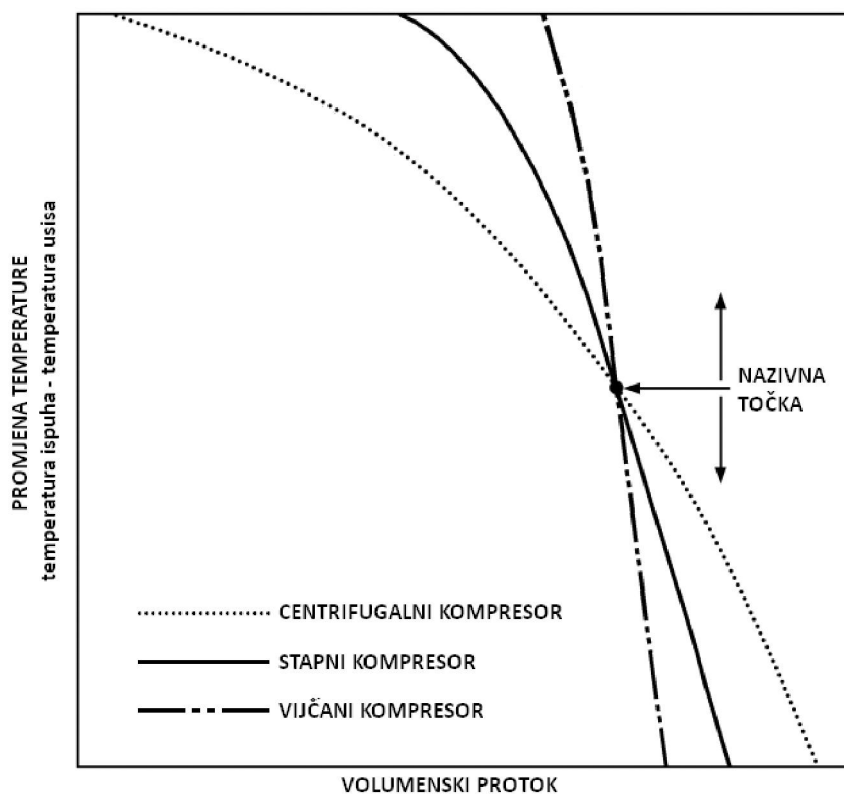
Termoekspanzijski ventil, ili drugi ekspanzijski uređaj, regulira protok radne tvari od kondenzatora do isparivača i održava konstantno pregrijanje, radi zaštite da neisparena kapljevita radna tvar uđe u kompresor i time ga ošteti. Pretjerano visoke temperature pregrijanja moraju se izbjeći, da se ne smanji kapacitet rashladnika.

Radne karakteristike i problemi pri radu

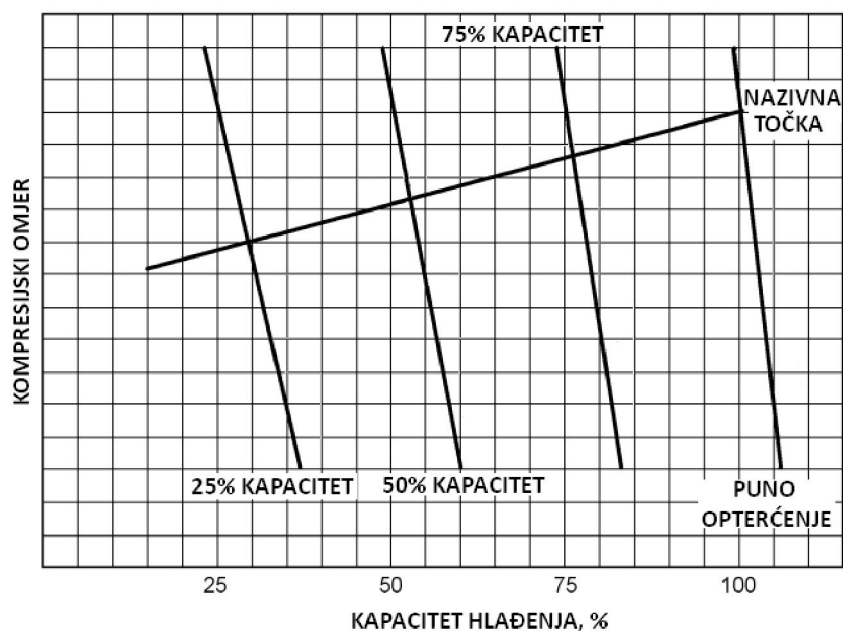
Rast tlaka ima samo mali utjecaj na volumni protok kompresora, i zbog toga rashladnici sa stapnim kompresorima zadržavaju približno konstantni puni kapacitet hlađenja, čak i iznad nazivne vrijednosti vlažnog termometra. Vrlo je dobro prilagođen za zrakom hlađene kondenzatore koji rade sa niskim temperaturama hlađenja. Tipična radna karakteristika stapnog kompresora („reciprocating“) je prikazana na slici 14., i uspoređena je sa centrifugalnim („centrifugal“) i vijčanim („screw“) kompresorima. Na apscisnoj osi dan je volumni protok radne tvari, a na ordinatnoj osi promjena temperature.

Metode kontrole kapaciteta:

- rasterećenje kompresorskih cilindara (jedan po jedan, ili u paru)
- uključivanje/isključivanje pojedinih kompresora
- obilazni vod vrućeg plina
- promjena broja okretaja kompresora
- kombinacija navedenih metoda

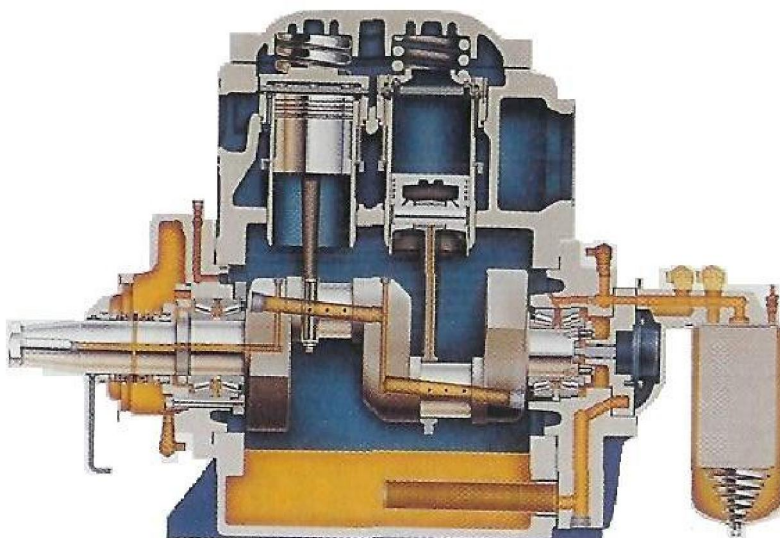


Slika 14. Usporedba radnih karakteristika kompresora



Slika 15. Radna karakteristika stapnog kompresora sa tri koraka rasterećenja

Dijagram prikazuje karakteristiku sustava pri različitim opterećenjima. Daje ovisnost kompresijskog omjera u odnosu na kapacitet hlađenja. Na apscisnoj osi je kapacitet hlađenja, a na ordinatnoj osi je kompresijski omjer.



Slika 16. Stapni kompresor

2.4. Rashladnici kapljevina sa centrifugalnim kompresorom

Kondenzatori su im generalno vodom hlađeni, sa kondenzacijom radne tvari sa vanjske strane cijevi. Zrakom hlađeni kondenzatori mogu se koristiti sa jedinicama koje koriste više tlakove, ali sa znatnim povećanjem nazivne potrošnje energije svake jedinice. Pogonski troškovi usporedivi su sa sustavima koji koriste rashladne tornjeve, sa cirkulacijskim pumpama za vodu. Centrifugalne paketne jedinice su raspoložive od oko 280 kW do preko 14 MW pri nominalnim uvjetima od 7 °C izlaza vode iz rashladnika, i 35 °C izlaza vode iz kondenzatora.

Zrakom hlađeni sustavi

Dvije vrste zrakom hlađenih kondenzatora centrifugalnih rashladnika vode prevladavaju. Jedan se temelji na vodom hlađenom kondenzatoru centrifugalnom paketu sa zatvorenom petljom kondenzatorskog kruga vode. Kondenzatorska voda je hlađena u voda/zrak izmjenjivaču topline. Rezultat toga je veća temperatura kondenzacije i povećanom potrošnjom energije. Dodatno, rad zimi zahtijeva korištenje glikola u krugu kondenzacijske vode, što smanjuje koeficijent prijelaza topline pojedine jedinice.

Druga vrsta jedinica je direktno hlađena zrakom eliminira srednji izmjenjivač topline i pumpe kondenzatorske vode, što rezultira nižom potrošnjom energije. Zbog toga što će centrifugalni uređaj raditi nestabilno ako je podvrgnut kondenzacijskom tlaku koji je veći od nazivnog, zrakom hlađeni kondenzator mora biti tako izrađen da odvede određenu toplinu. U praksi, odabiranje stapnih zrakom hlađenih jedinica se bazira na vanjskoj temperaturi suhog termometra koja premašuje 5 % od ukupnog vremena rada. Centrifugalni rashladnik možda neće moći raditi tako dugo vrijeme zbog nestabilnog rada, jedino ako se proporcionalno povisi i temperatura vode koja polazi iz rashladnika. Stoga, impeleri kompresora i/ili brzina vrtnje trebaju biti odabrani za maksimalnu temperaturu suhog

termometra da se osigura održanje željene temperature polazne vode iz rashladnika cijelo vrijeme.

Zrakom hlađeni centrifugalni rashladnik vode treba dopustiti da temperatura kondenzacije pada prirodno do otprilike 21 °C kroz hladnije vrijeme. Rezultirajuće smanjenje u potrošnji energije kompresora je veće nego kod stapnih sustava kontroliranih sa termoekspanzijskim ventilima.

Za vrijeme zimskih isključenja, mora se oprezno postupiti radi zaštite od smrzavanja vode u isparivaču prouzročeno sa efektom besplatnog hlađenja zrakom hlađenog kondenzatora. Sustav će od smrzavanja zaštititi termostatski upravljani grijač u isparivaču zajedno sa presostatom niskog tlaka radne tvari za pokretanje pumpi hlađene vode.

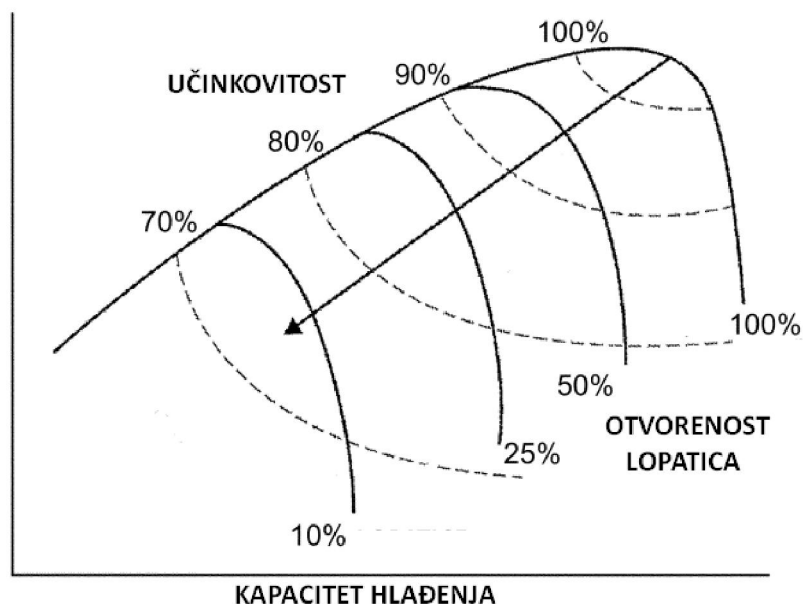
Rad i održavanje sustava

Na uređajima koji rade sa tlakovima nižim od atmosferskog tlaka događa se da zrak i vlaga ulaze u sustav, što povećava tlak kondenzacije. Kontinuirani ulaz zraka i vlage u sustav dovodi do promjena svojstava radne tvari i mazivog ulja i dovodi do korozije. Propuštanja uređaja koji rade na tlakovima višim od atmosferskog tlaka mogu ispuštati štetnu radnu tvar u okoliš. Regulative zahtijevaju da godišnje ispuštanje ne prelazi postotak punjenja radne tvari u sustav. Dobra praksa je naći i popraviti sva propuštanja.

Periodičkom analizom punjenja ulja i radne tvari može isto biti parametar za identificiranje kontaminacije sustava. Visoki tlak kondenzacije i čest rad postojećih uređaja indiciraju da se radi o propuštanju koje se mora ispraviti što prije. Sa pozitivnim radnim tlakovima propuštanje rezultira gubitkom radne tvari i problem sa niskim tlakom isparavanja u isparivaču. Kontrola propuštanja treba biti uključeno u prepariranje, kod dužeg vremena isključenja.

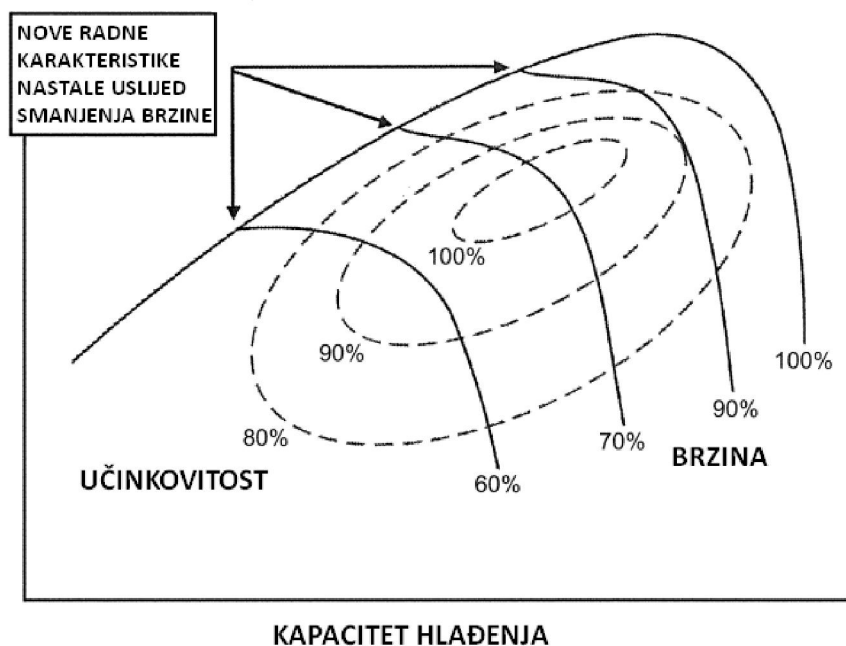
Normalno održavanje treba uključivati periodičko mijenjanje filtara mazivog ulja i radne tvari, prema preporuci proizvođača. Svi sigurnosni kontrolni uređaji periodički se trebaju provjeravati, da se osigura pravilna zaštita uređaja.

Čišćenje površina unutar cijevi, ovisno o tretiranju vode, može se zahtijevati nakon nekog vremena. Cijevi kondenzatora mogu samo trebati godišnje čišćenje, ako se radi o pravilnom tretiranju vode. Cijevi isparivača, u svakom slučaju, trebaju manje čišćenja, ako je krug rashladne vode, zatvorena petlja.

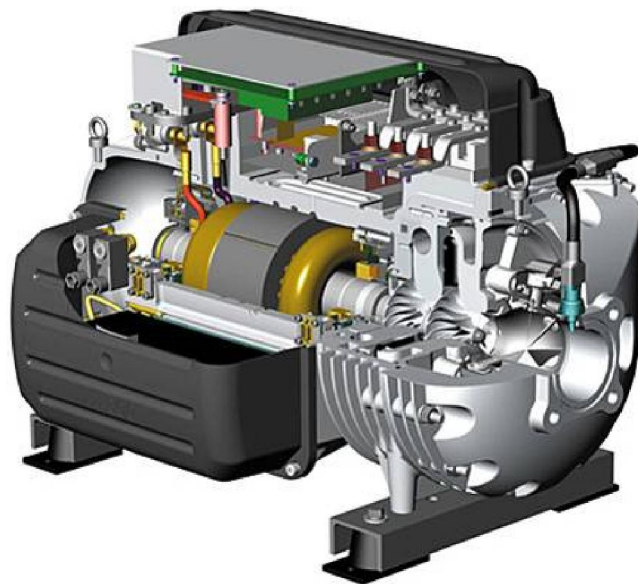


Slika 17. Tipična karakteristika centrifugalnog kompresora pri konstantnoj brzini vrtnje

Slika 17. prikazuje učinak kompresora pri konstantnoj brzini vrtnje sa varijabilnim postavkama lopatica kompresora. Sljedeća slika 18. prikazuje učinak kompresora pri varijabilnoj brzini okretaja u kombinaciji sa promjenom postavki lopatica. Kapacitet se modulira pri konstantnoj brzini automatskim prilagođavanjem rotacije lopatica koje kovitlaju radnu tvar u stanju pare prema središtu impelera. Taj efekt se očituje kao translacija karakteristike prema dolje i lijevo, prema slici 17.



Slika 18. Tipična karakteristika centrifugalnog kompresora sa varijabilnom brzinom vrtnje



Slika 19. Centrifugalni kompresor

2.5. Rashladnici kapljevina s vijčanim kompresorom

Isparivač može biti potopljeni ili sa direktnom ekspanzijom. Nema posebnih prednosti u cijeni. Potopljeni isparivač je više osjetljiv na smrzavanje, zahtijeva više radne tvari u sustavu, i zahtijeva precizniju kontrolu tlaka isparavanja, ali njegove performanse su lake za predvidjeti, a i može se čistiti. Isparivač sa direktnom ekspanzijom zahtijeva preciznu regulaciju protoka, manje je osjetljiv na smrzavanje, i povrat ulja u kompresor je brz.

Izmjenjivač topline – plin na usisu/kapljevina na visokom tlaku, katkad je uključen u sustav radi pothlađenja radne tvari na ulazu u termoekspanzijski ventil, što rezultira smanjenom potrošnjom energije.

Vijčani rashladnici vode su dostupni kao tvorničke pakirane jedinice od 100 kW do 4400 kW. I otvoreni i hermetički tipovi se proizvode. Paketi bez vodom ili evaporativno hlađenog kondenzatora, sa sakupljačima radne tvari, su napravljeni za korištenje sa zrakom hlađenim kondenzatorom ili evaporativno.

Radne karakteristike

Budući da je vijčani kompresor, kompresor pozitivnog pomaka, on radi stabilno. Dobava je u području blizu nazivnog omjera kompresije bez većih pulsacija, gotovo kontinuirana. Izvan nazivnog režima rada troše nepotrebne količine energije pri visokim tlakovima kondenzacije.

Vijčani kompresor pruža stabilni rad preko širokog područja opterećenja. Raspon rada je velik jer je temperatura nakon kompresije niska. Kompresor može raditi sa visokim kompresijskim omjerima.

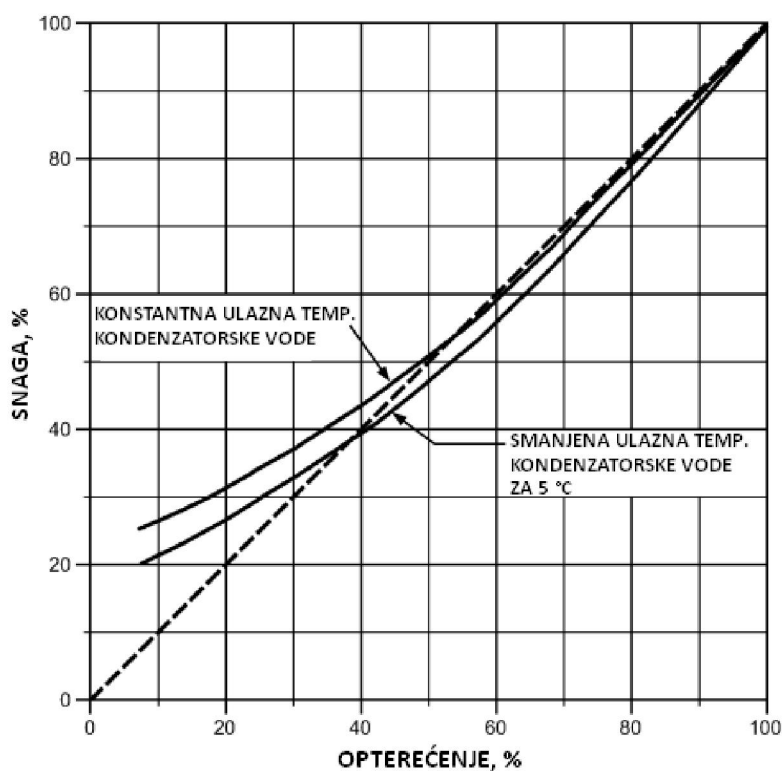
Separatori ulja moraju biti dimenzionirani prema veličini kompresora, tipu sustava, radnoj tvari, i tipu isparivača. Isparivači sa direktnom ekspanzijom imaju nešto manje strože

zahtjeve odvajanja ulja, od potopljenih isparivača. U sustavima sa direktnom ekspanzijom, radna tvar isparava u cijevima, što znači da se brzina drži dovoljno velikom da se ulje brzo vraća u kompresor. U potopljenima isparivačima, radna tvar je s vanjske strane cijevi, i zato su potrebni neki dodatni vanjski uređaji za minimiziranje koncentracije ulja u isparivaču.

Posebne izvedbe

Zbog niske cijene ovih kompresora i stabilne radne karakteristike, rashladnici sa vijčanim kompresorima koriste se za mnoge specijalne aplikacije.

- Instalacije sustava povrata topline
- Zrakom hlađeni
 - „split“ sustavi
 - tvorničke krovne paketne jedinice
- Rashladnici rasolina za procesno hlađenje
- Rashladnici za banke leda



Slika 20. Tipična karakteristika potrošnje energije rashladnika sa vijčanim kompresorom pri djelomičnim opterećenjima

Slika 20., pokazuje kako se smanjuje potrošnja energije vijčanih kompresora, smanjenjem temperature kondenzatorske vode s padom opterećenja sustava.

Održavanje sustava

Vodom hlađeni kondenzatori moraju biti čišćeni periodično. Ako se kondenzatorska voda ujedno koristi i za hlađenje ulja, to treba biti uzeto u obzir i programu tretiranja. Moguće je da će hladnjak ulja biti više servisiran od kondenzatora, jer radi na višim temperaturama i nižim protocima.

Zbog velikog protoka ulja u dijelu sustava vijčanog kompresora, pad tlaka na filtru ulja potrebno je pomno nadzirati i elemente mijenjati periodički. To je posebno važno za rad kroz prvi mjesec rada tvornički proizvedenih paketa. Kako su sustav hlađenja i sustav podmazivanja spojeni na kompresor, prljavština i sitni zagađivači u sustavu nekako mogu dospjeti u karter ulja, te se tamo uklanjaju preko filtra ulja. Slično, pad tlaka i vlažnost na filter sušilo treba nadzirati od početnog starta i regularno nakon toga.

Dobra je praksa periodično provjeriti i kiselost ulja, korištenjem komercijalnih testova na kiselinu. Mazivo ulje se ne treba mijenjati osim ako je kontaminirano sa vodom, kiselinom, ili metalnim česticama. Uzorak ulja treba se analizirati barem jednom godišnje radi utvrđivanja kvalitete i stanja.

Moraju se slijediti određene procedure, godišnje ili kroz regularno isključenje sustava iz rada. To uključuje provjeru i kalibraciju svih operacijskih i sigurnosnih kontrola, stezanjem svih električnih priključaka i vodova, provjeru električnih kontakata, provjeru izolatora hermetičkih i otvorenih motora.

Testiranje propuštanja jedinice mora se provoditi redovito. Vodom hlađeni paket za hlađenje ljeti treba testirati na propuštanje jednom godišnje. Sustavi s potopljenim isparivačem, sa više radne tvari u sustavu za cjelogodišnje hlađenje, trebaju se testirati na propuštanje svakih 4 – 6 mjeseca. Zrakom hlađeni sustavi namijenjeni za cjelogodišnje hlađenje 24 sata na dan trebaju se testirati svakih 1 – 3 mjeseca.



Slika 21. Vijčani kompresor

2.6. Rashladnici kapljevine sa rotacijskim, spiralnim „scroll“ kompresorom

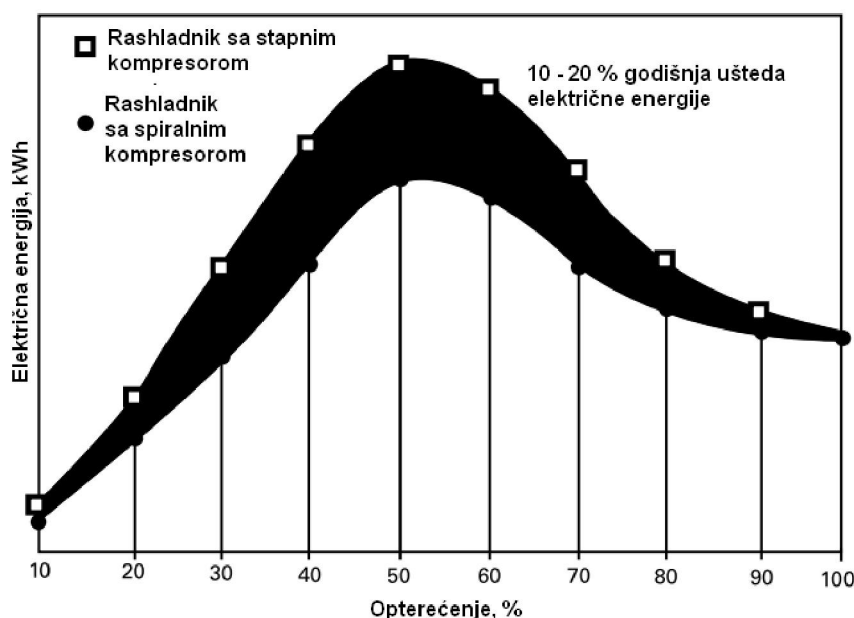
U ovom radu rashladnik vode koristi spiralni („scroll“) kompresor. Ovakav tip kompresora koristi se do čak 1300 kW rashladnog učinka. Rade vrlo smireno sa niskom razinom buke i sa visokom učinkovitosti. Većina takvih kompresora su hermetičkog tipa, što praktički ne zahtjeva posebno održavanje.

Efikasnost

Energetska efikasnost spiralnih kompresora se očituje u smislu niske potrošnje energije, nižim od bilo koje druge vrste rashladnika. Efikasnost pri maksimalnom opterećenju je poboljšana čak i iznad stapnih kompresora. Spiralni kompresori su u potpunosti hermetički.

Postoje dva načina pogleda na učinkovitost kompresora; a) individualni – termodinamička učinkovitost jednog samog kompresora; b) učinkovitost kompresora prema ponašanju u sustavu. Prvi način je korisna mjera za konstruktore kompresora, a drugi način ima veće značenje za vlasnike zgrada i inženjere GViK sustava.

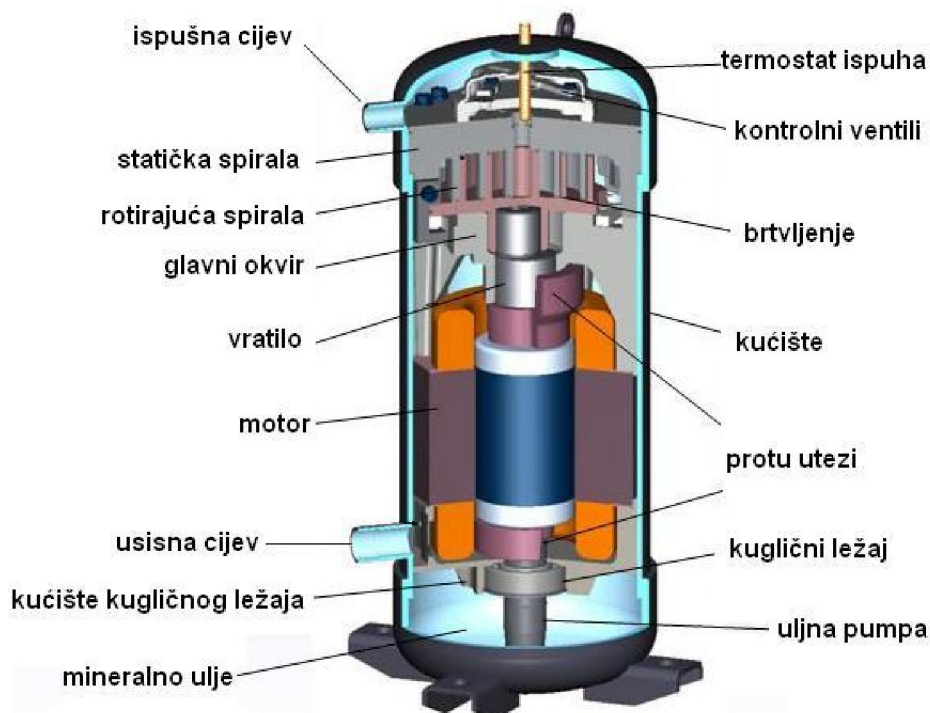
Konstruktori kompresora prilagođavaju spiralne kompresore za svaku pojedinu radnu tvar. Varijacije u geometriji rotacije, izradi bubnja, odabiru ulja i drugih značajki optimiziraju kombinaciju radne tvari i kompresora.



Slika 22. Ušteda električne energije rotacijskog kompresora u odnosu na stapne kompresore [10]

Važne značajke rotacijskih spiralnih kompresora:

- cjelovita, jednostavna i robusna konstrukcija
- postojanost kompresije osigurava nisku potrošnju
- visoka učinkovitost zbog nedostatka volumetričke povratne ekspanzije
- niska razina buke
- niska razina struje pokretanja



Slika 23. Rotacijski „scroll“ kompresor za rashladnike kapljevine

Radna svojstva

„Scroll“ tehnologija ima prednosti u radnim svojstvima iz više razloga. Veliki usisni i tlačni priključak smanjuju padove tlaka koji se javljaju na usisnoj strani i tlačnoj strani. Također, fizičko odvajanje tih dvaju procesa smanjuje izmjenu topline prema usisnoj strani. Nedostatak ventila i reekspanzijskih volumena i proces kontinuiranog toka rezultira sa visokom volumetričkom iskoristivošću preko širokog pojasa radnih uvjeta. Rotacijski kompresori imaju ravnomjerniji kapacitet u odnosu na stapne kompresore, pri određenim vanjskim uvjetima, što znači da se oni mogu jako precizno približiti unutarnjim zahtjevima prostorije.

Kontrola kapaciteta

Rotacijski kompresor s varijabilnom brzinom okretaja – koristi inverter za konvertiranje konstantne frekvencije struje u onu sa promjenjivim naponom i frekvencijom, koja omogućuje varijaciju brzine vrtnje motora.

Rotacijski kompresor sa varijabilnim pomakom

Modulacija širine pulsa – mehanizam modulira aksijalni tlak koji održava brtvljenje između spiralnih vrhova i spiralnih baza.

2.7. Usporedba spiralnih i vijčanih kompresora u rashladnoj tehnici

Prednosti kompresora

SPIRALNI KOMPRESORI	VIJČANI KOMPRESORI
Vrlo dobra učinkovitost punog i djelomičnog opterećenja	Vrlo dobra učinkovitost punog i djelomičnog opterećenja
Rashladnici rade sa više kompresora na uobičajenom rashladnom procesu – daju bolju učinkovitost pri djelomičnom i punom opterećenju od jednog vijčanog kompresora velikog kapaciteta	Jako malo pokretnih dijelova (3 ili više)
Jako malo pokretnih dijelova (3)	Dokazana pouzdanost
Dokazana pouzdanost	Kontinuirani proces kompresije bez pulsacija ili vibracija
Kvar jednog kompresora u multi kompresorskom sustavu rezultira gubitkom kapaciteta, ali rashladnik je i dalje u pogonu	Moduliranje kapaciteta između minimalnog i maksimalnog kapaciteta
Jako tihi rad	Jako niska razina vibracija
Jako niska razina vibracija	
Kontinuirani proces kompresije bez pulsacija ili vibracija	
Precizna fina mehanika dozvoljava brtvljenje između bokova kompresora sa jako tankim filmom ulja	

Nedostaci kompresora

SPIRALNI KOMPRESORI	VIJČANI KOMPRESORI
Kompresor ne može biti rastavljen zbog održavanja na mjestu pogona	Veća razina buke nego kod rotacijskih kompresora
U multi kompresorskim sustavima kontrola kapaciteta dodavanjem	Zahtijeva potapljanje uljem za brtvljenje između resa kompresora
	Zahtijeva prigušivač na izlazu i odvajač ulja
	Kvar jednog kompresora u rashladniku sa jednim kompresorom rezultira trenutnim potpunim gubitkom hlađenja

2.8. Usporedba rashladnika vode sa zrakom hlađenim kondenzatorom i vodom hlađenim kondenzatorom

Zrakom hlađeni kondenzatori koriste okolišni zrak koji se ventilatorom uvodi preko površine izmjenjivača, gdje s druge strane radna tvar koja dolazi iz tlačnog voda kondenzira. Za konstantni površinu izmjenjivača i konstantni protok zraka kapacitet zrakom hlađenog kondenzatora varira sa temperaturom kondenzacije radne tvari, koja je funkcija ulazne temperature zraka suhog termometra

Vodom hlađeni kondenzatori koriste vodu kao medij za kondenzaciju radne tvari, i koriste pumpu za cirkulaciju vode od kondenzatora gdje ta voda preuzima toplinu od radne tvari koja kondenzira, i odlazi u rashladni toranj gdje predaje toplinu okolišu.

Pogonski troškovi su jedan od primarnih faktora kada se odlučuje između ovih dvaju vrsta kondenzatora. Sustavi sa zrakom hlađenim kondenzatorima imaju niže troškove investicije i održavanja, budući da oni ne trebaju rashladni toranj, pumpe za vodu, i kemijsku pripremu vode. Pogonski pak troškovi idu u prilog vodom hlađenim kondenzatorima, zbog toga jer oni mogu iskoristiti prednost u nižim temperaturama kondenzacije radne tvari.

Prednosti zrakom hlađenih rashladnika:	Prednosti vodom hlađenih rashladnika:
Manji investicijski troškovi	Viša iskoristivost
Brža dostupnost	Slobodan izbor u većim veličinama
Nema rashladnog tornja, nema pumpe	Sposobnost velikih opterećenja
Manje održavanja	Smještaj rashladnika unutar zgrade
Nije potrebna strojarnica	Duži vijek trajanja

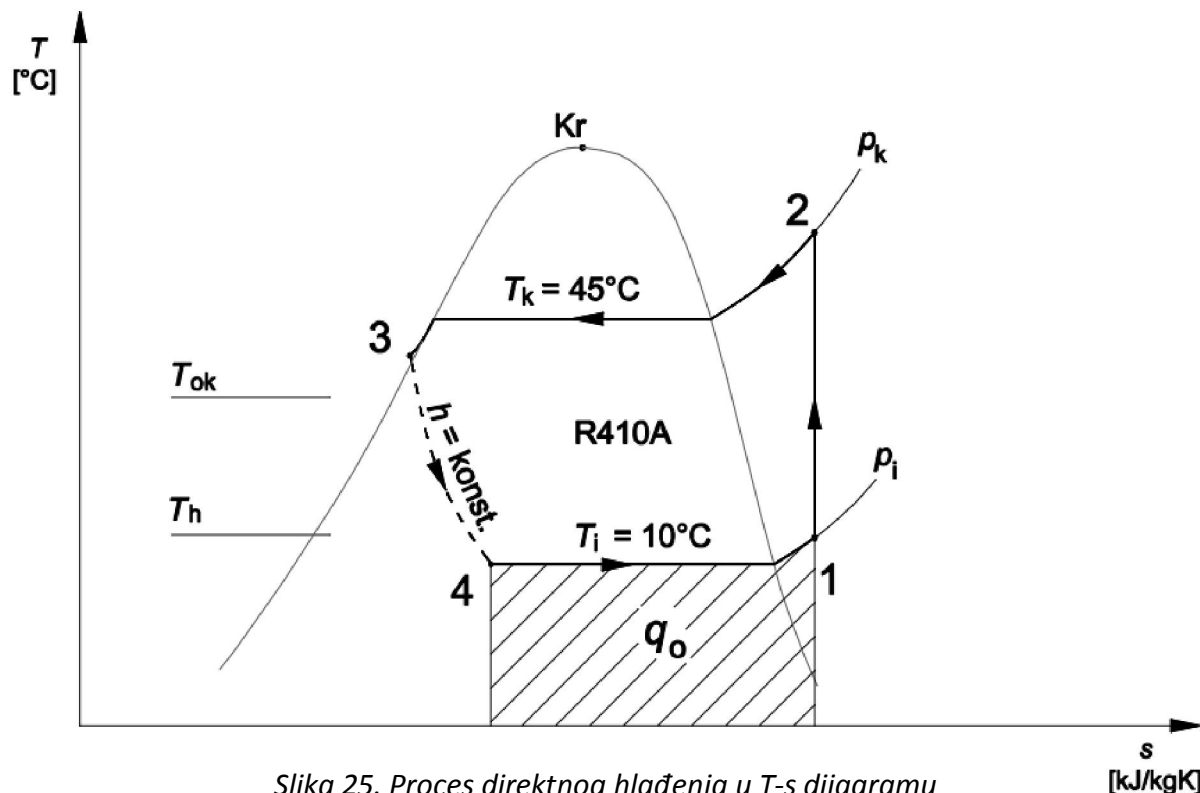


Slika 24. Zrakom hlađeni i vodom hlađeni rashladnik vode

Zrakom hlađeni kondenzatori često se koriste u sustavima gdje se zahtijeva cjelogodišnji režim hlađenja. Oni imaju sposobnost rada pri temperaturama nižim od 0 °C, i mogu tako raditi bez problema zaštite od smrzavanja povezanih sa rashladnim tornjevima u takvim uvjetima. Rashladni tornjevi često zahtijevaju grijač za sigurni rad sustava kod vremena kad su temperature okoline ispod 0 °C. Za procesne aplikacije kao što su računalni centri, koji zahtijevaju cjelogodišnji režim hlađenja, zrakom hlađeni kondenzatori imaju određenu prednost u odnosu na vodom hlađene kondenzatore.

3. PRORAČUN DIREKTNOG I INDIREKTNOG RASHLADNOG PROCESA

3.1. Proračun direktnog rashladnog procesa



Slika 25. Proces direktnog hlađenja u T-s dijagramu

Projektna okolišna temperatura iznosi 35°C.

Odabrani temperaturni uvjeti za odvijanje procesa sa radnom tvari R410A:

- temperatura kondenzacije $T_k = 45^\circ\text{C}$
- pothlađenje radne tvari na izlazu iz kondenzatora $\Delta T_{\text{pothl}} = 3^\circ\text{C}$
- temperatura isparavanja $T_i = 10^\circ\text{C}$
- pregrijanje radne tvari na izlazu iz isparivača $\Delta T_{\text{pregr}} = 5^\circ\text{C}$

Na osnovu ovih podataka, određuju se karakteristične točke procesa.

	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Entalpija (kJ/kg)	Entropija (kJ/kgK)
1	15	10,817	212,68	-0,1675
2	66,6	27,014	238,25	-0,1675
3	42	27,014	53,85	-----
4	10	10,817	53,85	-----

Tablica 1. Karakteristične točke direktnog procesa

Nakon što su određene karakteristične točke procesa može se odrediti specifični rashladni učinak q_o , razlikom entalpija radne tvari na izlazu iz isparivača (točka 1) i radne tvari nakon prigušenja pri ulasku u isparivač (točka 4):

$$q_o = h_1 - h_4 = 212,68 - 53,85 = 158,83 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Specifični učinak kondenzacije q_k dobije se razlikom entalpija radne tvari nakon kompresije (točka 2) i radne tvari stanja nakon kondenzacije i pothlađenja (točka 3):

$$q_k = h_2 - h_3 = 238,25 - 53,85 = 184,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

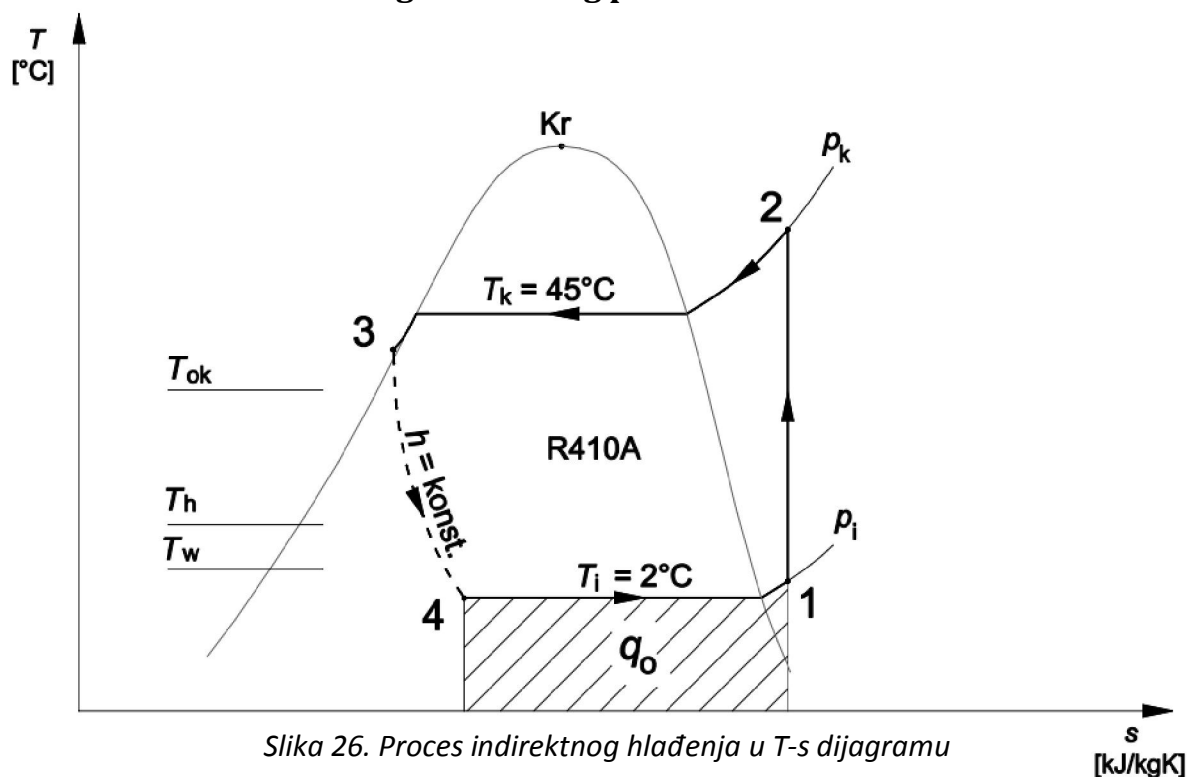
Razlika učinka kondenzacije i rashladnog učinka daje vrijednost utrošenog specifičnog rada w , koji je potreban za odvijanje procesa:

$$w = q_k - q_o = 184,4 - 158,83 = 25,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Nakon prethodno izračunatih veličina, određuje se faktor hlađenja ε za direktni rashladni proces:

$$\varepsilon = \frac{q_o}{w} = \frac{158,83}{25,57} = 6,2$$

3.2. Proračun indirektnog rashladnog procesa



Slika 26. Proces indirektnog hlađenja u T-s dijagramu

Projektna okolišna temperatura iznosi 35°C.

Odabrani temperaturni uvjeti za odvijanje procesa sa radnom tvari R410A:

- temperatura kondenzacije $T_k = 45^\circ\text{C}$
- pothlađenje radne tvari na izlazu iz kondenzatora $\Delta T_{pothl} = 3^\circ\text{C}$
- temperatura isparavanja $T_i = 2^\circ\text{C}$
- pregrijanje radne tvari na izlazu iz isparivača $\Delta T_{pregr} = 5^\circ\text{C}$

Na osnovu ovih podataka, određuju se karakteristične točke procesa.

	Temperatura (°C)	Tlak (bar)	Entalpija (kJ/kg)	Entropija (kJ/kgK)
1	7	8,501	211	-0,155
2	70,3	27,014	242,5	-0,155
3	42	27,014	53,85	-----
4	2	8,501	53,85	-----

Tablica 2. Karakteristične točke indirektnog procesa

Nakon što su određene karakteristične točke procesa može se odrediti specifični rashladni učinak q_o , razlikom entalpija radne tvari na izlazu iz isparivača (točka 1) i radne tvari nakon prigušenja pri ulasku u isparivač (točka 4):

$$q_o = h_1 - h_4 = 211 - 53,85 = 157,15 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Specifični učinak kondenzacije q_k dobije se razlikom entalpija radne tvari nakon kompresije (točka 2) i radne tvari stanja nakon kondenzacije i pothlađenja (točka 3):

$$q_k = h_2 - h_3 = 242,5 - 53,85 = 188,65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Razlika učinka kondenzacije i rashladnog učinka daje vrijednost utrošenog specifičnog rada w , koji je potreban za odvijanje procesa:

$$w = q_k - q_o = 188,65 - 157,15 = 31,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Nakon prethodno izračunatih veličina, određuje se faktor hlađenja ε za indirektni rashladni proces:

$$\varepsilon = \frac{q_o}{w} = \frac{157,15}{31,5} = 5$$

Budući da je proračun temeljen na termodinamičkom ljevokretnom rashladnom procesu sa radnom tvari R410A, izentropska promjena 1-2, izobarna promjena 2-3, prigušivanje 3-4, izobarna promjena 4-1, potrebno je navesti da su izračunati faktori hlađenja po jedinici sustava samo teorijski ostvarivi.

4. ANALIZA POTROŠNJE ENERGIJE POJEDINIH SUSTAVA – SMJERNICA EUROVENT

Certifikacijski program smjernice EUROVENT-a odnosi se na standardne rashladnike vode koji se koriste za klimatizaciju ili hlađenje. Vrijedi za sve tipove kompresora rashladnika vode koji koriste električni pogon. Sve radne tvari su uzete u obzir, a rashladnici mogu biti zrakom hlađeni, vodom hlađeni ili evaporativno hlađeni.

Aplikacije sustava hlađenja i klimatizacije koje pokriva ovaj standard se odnose na temperature polazne vode iz rashladnika od +2 °C do +15 °C.

Za modeliranje godišnje potrošnje pogonske energije za hlađenje potrebno je procijeniti vrijeme rada sustava kroz cijelu godinu. Pretpostavit će se da sustav radi 10 sati na dan kroz cijeli 6., 7., i 8. mjesec u godini, drugu polovicu 5-og mjeseca i prvu polovicu 9-og mjeseca. Ukupni iznos rada sustava u godini je 1200 sati.

Smjernica navodi:

- sustav sa 100 % učinka radi 3 % pogonskih dana u godini
- sustav sa 75 % učinka radi 33 % pogonskih dana u godini
- sustav sa 50 % učinka radi 41 % pogonskih dana u godini
- sustav sa 25 % učinka radi 23 % pogonskih dana u godini

Zadani podatak od 5000 m² neto površine objekta kojega treba hladiti, iskoristit će se za procjenu rashladnog učinka potrebnog za hlađenje za pojedini sustav.

Za indirektni rashladni sustav odabran je rashladnik vode, kao proizvod, nominalnog učinka hlađenja od 359,4 kW.

Za direktni rashladni sustav odabrano je 7 vanjskih jedinica, kao proizvod, ukupnog nominalnog učinka $50,4 \text{ kW} \times 7 = 352,8 \text{ kW}$.

4.1. Podaci o rashladnim uređajima

Rashladnik vode:

Naziv: 30RB0372
Tip kondenzatora: zrakom hlađeni
Tip kompresora:spiralni (scroll)
Radna tvar: R410A
Broj koraka promjene kapaciteta: 6
Minimalni kapacitet:15 %
Kapacitet hlađenja:359,4 kW
Ukupna snaga kompresora:118,1 kW
Ukupna snaga ventilatora:9,52 kW
Snaga pumpe:8,43 kW
Faktor hlađenja: 2,82
Posredni prijenosnik energije: voda
Izlazna temperatura:7°C
Ulazna temperatura:13 °C
Ulazna temperatura zraka: 35 °C

Postotak kapaciteta hlađenja, %	100	75	50	25
Postotak kapaciteta snage, %	100	57,2	32,9	15,1
Kapacitet hlađenja, kW	358,5	268,9	179,3	89,6
Ukupna električna snaga uređaja, kW	127,5	73,7	42,4	19,4
Faktor hlađenja	2,81	3,65	4,22	4,62

Tablica 3. Učinkovitost rashladnika vode (podaci iz software-a)

Vanjska jedinica VRF sustava:

Naziv:ARUN60LT2
 Tip kondenzatora: zrakom hlađeni
 Tip kompresora: spiralni (scroll)
 Radna tvar: R410A
 Kapacitet hlađenja: 50,4 kW
 Ukupna snaga kompresora: 13,33 kW
 Faktor hlađenja: 3,78
 Ulazna temperatura zraka: 35 °C

Za VRF sustav navedene vanjske jedinice faktori hlađenja dobiveni su od strane proizvođača iz tablica kapaciteta hlađenja, pri različitim unutarnjim temperaturama, pri vanjskoj okolišnoj temperaturi od 35°C i prema određenim opterećenjima.

Faktori hlađenja za opterećenja od 25, 50, 75 i 100 % za VRF sustav:

- za učinak od 25 % $\varepsilon = 5,39$
- za učinak od 50 % $\varepsilon = 4,86$
- za učinak od 75 % $\varepsilon = 4,31$
- za učinak od 100 % $\varepsilon = 3,78$

Sukladno tome modelirana je potrošnja energije prema tablici 4. i tablici 5.

Cijena električne energije iznosi 0,71 kn/kWh.

Izvor: „HEP“, kategorija – poduzetništvo, tarifni model – PLAVI

Tablica 4. Model potrošnje električne energije indirektnog sustava

Nazivni učinak hlađenja, kW	Parcijalno opterećenje, %	Parcijalno opterećenje, kW	Vrijeme parcijalnog opterećenja, %	Vrijeme rada sustava, h/god.	Parcijalno opterećenje, h/god.	Rashladna energija, kWh/god.	Faktor hlađenja, ε	Električna energija, kWh/god.	Cijena električne energije, kn/kWh	Električna energija, kn/god.
359,4	100	358,5	3	1 200	36	12 906	2,81	4 593	0,71	3.261,03
	75	268,9	33		396	106 484	3,65	29 174		20.713,54
	50	179,3	41		492	88 216	4,22	20 904		14.841,84
	25	89,6	23		276	24 730	4,62	5 353		3.800,63

INDIREKTNI SUSTAV UKUPNO: 42.617,04 kn/god.

Tablica 5. Model potrošnje električne energije direktnog sustava

Nazivni učinak hlađenja, kW	Parcijalno opterećenje, %	Parcijalno opterećenje, kW	Vrijeme parcijalnog opterećenja, %	Vrijeme rada sustava, h/god.	Parcijalno opterećenje, h/god.	Rashladna energija, kWh/god.	Faktor hlađenja, ε	Električna energija, kWh/god.	Cijena električne energije, kn/kWh	Električna energija, kn/god
352,8	100	352,8	3	1 200	36	12 700	3,78	3359,8	0,71	2.385,46
	75	264,6	33		396	104 782	4,31	24 311,4		17.261,09
	50	176,4	41		492	86 789	4,86	17 857,8		12.679,04
	25	88,2	23		276	24 343	5,41	4 499,6		3.194,72

DIREKTNI SUSTAV UKUPNO: 35.520,31 kn/god.

❖ Napomena:

- Sve cijene su navedene bez PDV-a.

4.2. Usporedba modela potrošnje energije

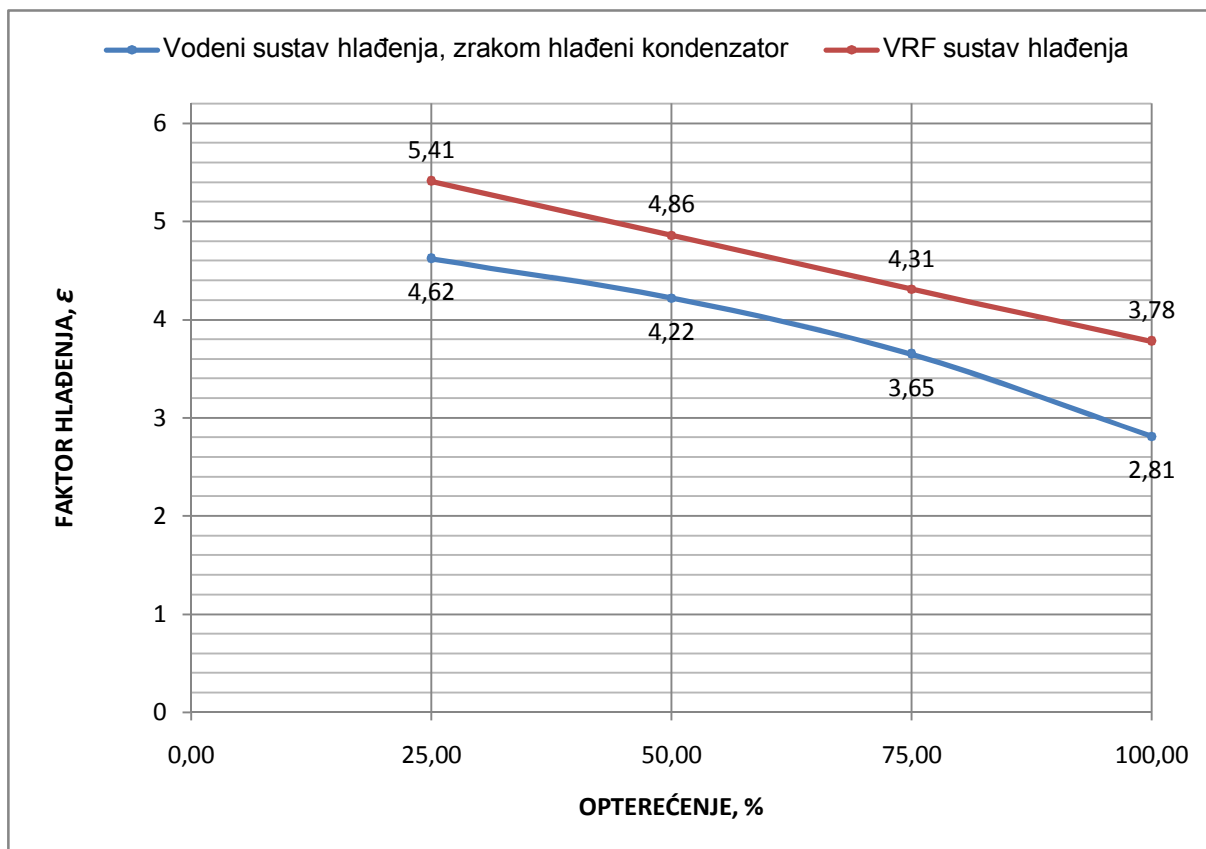
Analizom je utvrđeno da je za indirektni rashladni proces, za koji su prema pojedinom djelomičnom opterećenju, određeni faktori hlađenja, ukupna potrošnja električne energije 60 024 kWh/god., što ukupno iznosi 42.617,04 kn/god.

Direktni VRF sustav hlađenja imao bi pri istim uvjetima rada, uz određene faktore hlađenja za pojedina djelomična opterećenja, potrošnju električne energije u iznosu od 50 045,3 kWh/god., što ukupno iznosi 35.520,31 kn/god.

Razlika u cijeni potrošnje električne energije indirektnog sustava i direktnog sustava je 7.096,73 kn/god., što znači da su pogonski troškovi indirektnog sustava hlađenja veći za približno 20 % od pogonskih troškova direktnog VRF sustava.

Na slici 27. prikazana je ovisnost faktora hlađenja o stupnju opterećenja sustava, gdje se vidi da porastom opterećenja faktor hlađenja pada. Kod VRF hlađenja pad faktora hlađenja praktički je linearan u odnosu na porast opterećenja.

Nešto drugačije pada faktor hlađenja kod indirektnog sustava s rashladnikom vode, kao što je prikazano na dijagramu. Dijagram još pokazuje i razliku između vrijednosti faktora hlađenja kod direktnog VRF sustava i indirektnog sustava.



Slika 27. Usporedni dijagram učinkovitosti indirektnog i direktnog sustava hlađenja

Temperaturni uvjeti kod vodenog hlađenja:

- temperatura zraka na ulazu u rashladnik vode: 35 °C
- temperatura vode na ulazu u rashladnik vode: 13 °C
- temperatura vode na izlazi iz rashladnika vode: 7 °C

Temperaturni uvjeti kod VRF hlađenja:

- temperatura zraka na ulazu u zrakom hlađeni kondenzator: 35 °C
- temperatura zraka u prostoru: 27 °C – suhi termometar
- temperatura zraka u prostoru: 19 °C – vlažni termometar

5. INVESTICIJSKI TROŠKOVI INDIREKTOG I DIREKTOG SUSTAVA HLAĐENJA

Za procjenu investicijskih troškova pojedinog sustava odabire se oprema, prema broju zona hlađenja i prema ukupnom rashladnom opterećenju, iznosa 360 kW, za hlađenje objekta od 5000 m² neto površine.

5.1. VRF sustav

Za VRF sustav odabrana je slijedeća oprema:

Opis proizvoda	Rashladni učinak, kW	Cijena, kn/kom	Broj komada	Ukupna cijena, kn
Vanjska jedinica, kao proizvod, LG ARUN180LT2	50,4	70.000,00	7	490.000,00
Unutarnja jedinica zidna, kao proizvod, LG ARNU07GSEL2	2,2	3.000,00	220	660.000,00

Ukupno oprema bez PDV-a: 1.150.000,00 kn

Procjena troškova izvedbe sustava ≈30% od cijene opreme (bez PDV-a): 345.000,00 kn

SVEUKUPNO bez PDV-a: 1.495.000,00 kn

5.2. Sustav vodenog hlađenja

Za indirektni sustav odabrana je slijedeća oprema:

Opis proizvoda	Rashladni učinak, kW	Cijena, kn/kom	Broj komada	Ukupna cijena, kn
Rashladnik vode, kao proizvod, Carrier 30RB 372	359,4	328.000,00	1	328.000,00
Ventilokonvektor zidni, kao proizvod, Carrier 42WHE 028	2,1	2.550,00	220	561.000,00

Ukupno oprema bez PDV-a: 889.000,00 kn

Procjena troškova izvedbe sustava ≈50% od cijene opreme (bez PDV-a): 444.500,00 kn

SVEUKUPNO bez PDV-a: 1.333.500,00 kn

❖ Napomena:

- Sve cijene su navedene bez PDV-a.
- U komplet rashladnika vode spada: hidraulički modul (sa vodenom pumpom i ostalom armaturom), zaštita od smrzavanja u zimskom periodu, „vitaulic“ spojnice za spajanje rashladnika na cjevovod, bočni paneli, glavna sklopka za isključivanje rashladnika.
- U komplet ventilokonvektora spada: stražnji panel na kojemu su troputni on/off motorni ventili za regulaciju rada ventilokonvektora na vodenoj strani, upravljač koji se postavlja na zid.

5.3. Period povrata investicije direktnog VRF sustava

	INVESTICIJSKI TROŠKOVI [kn]	POGONSKI TROŠKOVI [kn/god.]
INDIREKTNI SUSTAV	1,333.500,00	42.617,04
DIREKTNI VRF SUSTAV	1,495.000,00	35.520,31

Period povrata investicije računa se preko karakteristične veličine ROI :
(„Return of Investment“)

$$ROI = \frac{\text{investicijski troškovi}}{\text{godišnja ušteda energije} - \text{troškovi održavanja}}$$

$$ROI = \frac{\text{razlika u investicijskim troškovima}}{\text{razlika u godišnjoj potrošnji energije}}$$

$$ROI = \frac{1\,495\,000 - 1\,333\,500}{42\,617,04 - 35\,520,31} \approx 23 \text{ godine}$$

6. PRORAČUN CJEVOVODA

6.1. Proračun cjevovoda indirektnog sustava

$m_{rt} := 2.287 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$	- protočna masa radne tvari
$w_u := 11 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	- preporučena brzina u usisnom vodu
$w_t := 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	- preporučena brzina u tlačnom vodu
$w_k := 0.65 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	- preporučena brzina u kapljevinskom vodu
$v_u := 0.032 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	- specifični volumen radne tvari u usisnom vodu
$v_t := 0.01082 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	- specifični volumen radne tvari u tlačnom vodu
$v_k := 0.001079 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	- specifični volumen radne tvari u kapljevinskom vodu

Usisni vod:

Protočni volumen:

$$q_{vu} := m_{rt} \cdot v_u \qquad q_{vu} = 0.073 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Poprečni presjek:

$$A_u := \frac{q_{vu}}{w_u} \qquad A_u = 6.653 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Promjer cijevi:

$$d_u := \sqrt{\frac{4 \cdot A_u}{\pi}} \qquad d_u = 92.038 \cdot \text{mm}$$

Odabrana cijev usisnog voda: **DN 100; $\phi 108 \times 4$ mm**; materijal: Č. 1212

Tlačni vod:

Protočni volumen:

$$q_{vt} := m_{rt} \cdot v_t \qquad q_{vt} = 0.025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Poprečni presjek:

$$A_t := \frac{q_{vt}}{w_t} \qquad A_t = 1.65 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Promjer cijevi:

$$d_t := \sqrt{\frac{4 \cdot A_t}{\pi}} \qquad d_t = 45.831 \cdot \text{mm}$$

Odabrana cijev tlačnog voda: **Cu $\phi 54 \times 2$ mm**

Kapljevinski vod:

Protočni volumen:

$$q_{vk} := m_{rt} \cdot v_k \qquad q_{vk} = 2.468 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Poprečni presjek:

$$A_k := \frac{q_{vk}}{w_k} \qquad A_k = 3.796 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Promjer cijevi:

$$d_k := \sqrt{\frac{4 \cdot A_k}{\pi}} \qquad d_k = 69.525 \cdot \text{mm}$$

Odabrana cijev kapljevinskog voda: **DN 65; $\phi 76,1 \times 2,9$ mm; materijal: Č. 1212**

6.2. Proračun cjevovoda direktnog sustava

$m_{rt} := 0.3173 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$	- protočna masa radne tvari
$w_u := 11 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	- preporučena brzina u usisnom vodu
$w_t := 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	- preporučena brzina u tlačnom vodu
$w_k := 0.65 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	- preporučena brzina u kapljevinskom vodu
$v_u := 0.02535 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	- specifični volumen radne tvari u usisnom vodu
$v_t := 0.01053 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	- specifični volumen radne tvari u tlačnom vodu
$v_k := 0.001 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	- specifični volumen radne tvari u kapljevinskom vodu

Usisni vod:

Protočni volumen:

$$q_{vu} := m_{rt} \cdot v_u \qquad q_{vu} = 8.044 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Poprečni presjek:

$$A_u := \frac{q_{vu}}{w_u} \qquad A_u = 7.312 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Promjer cijevi:

$$d_u := \sqrt{\frac{4 \cdot A_u}{\pi}} \qquad d_u = 30.513 \cdot \text{mm}$$

Odabrana cijev usisnog voda: **Cu $\phi 35 \times 1,5$ mm**

Tlačni vod:

Protočni volumen:

$$q_{vt} := m_{rt} \cdot v_t \qquad q_{vt} = 3.341 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Poprečni presjek:

$$A_t := \frac{q_{vt}}{w_t} \qquad A_t = 2.227 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Promjer cijevi:

$$d_t := \sqrt{\frac{4 \cdot A_t}{\pi}} \qquad d_t = 16.841 \cdot \text{mm}$$

Odabrana cijev tlačnog voda: **Cu $\phi 22 \times 1$ mm**

Kapljevinski vod:

Protočni volumen:

$$q_{vk} := m_{rt} \cdot v_k \qquad q_{vk} = 3.173 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Poprečni presjek:

$$A_k := \frac{q_{vk}}{w_k} \qquad A_k = 4.882 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Promjer cijevi:

$$d_k := \sqrt{\frac{4 \cdot A_k}{\pi}} \qquad d_k = 24.931 \cdot \text{mm}$$

Odabrana cijev kapljevinskog voda: **Cu $\phi 28 \times 1,5$ mm**

7. UTJECAJ SUSTAVA NA OKOLIŠ

Kriteriji za vrednovanje radne tvari

- Potencijal razgradnje ozona – **ODP** (Ozone Depletion Potencial)
Funkcija sposobnosti oslobađanja klora (Cl) i broma (Br), te vremenske postojanosti u atmosferi. Ovaj je faktor posljedica svih potencijalnih djelovanja na ozon, koja traju do potpune razgradnje. Fluorirani ugljikovodici (HFC) ne sadrže klor, te stoga ne razaraju ozon, ODP = 0.
- Potencijal globalnog zagrijavanja – **GWP** (Global Warming Potencial)
Potencijal globalnog zagrijavanja neke tvari oslobođene u atmosferu je broj koji govori koliki je relativni utjecaj te tvari na stvaranje efekta staklenika u odnosu na utjecaj CO₂. CO₂ trajno ostaje u atmosferi, te je stoga uvijek potrebno navesti za koji vremenski period je izražen.
- Totalni ekvivalentni utjecaj na globalno zagrijavanje – **TEWI** (Total Equivalent Warming Impact)
Proračunska metoda koja daje numeričku vrijednost relativnog utjecaja na globalno zagrijavanje (relativno prema CO₂) jednog postrojenja u pogonu. U obzir se uzimaju svi globalni parametri jednog rashladnog sustava.

Izraz za izračun TEWI vrijednosti:

$$TEWI = (GWP \cdot L \cdot n) + [GWP \cdot m \cdot (1 - \alpha_{rec})] + (n \cdot E_{god} \cdot \beta) \quad [\text{kg CO}_2] \quad [4]$$

Prvi član na desnoj strani jednadžbe odnosi se na propuštanje radne tvari iz postrojenja, drugi član se odnosi na gubitke radne tvari u okoliš tijekom reciklaže, gdje je faktor recikliranja α_{rec} udio radne tvari koja se izgubi u atmosferu prilikom vađenja, pročišćavanja, i ponovnog povratka u postrojenje. Prva dva člana uzimaju u obzir direktni utjecaj postrojenja na globalno zagrijavanje, dok treći član uzima u obzir indirektni utjecaj na globalno zagrijavanje.

L – godišnje propuštanje radne tvari iz postrojenja [kg/god.]

n – rad postrojenja u godinama, [god.]

m – količina radne tvari u postrojenju [kg]

E_{god} – godišnji utrošak energije [kWh/god.]

α_{rec} – faktor recikliranja

β – emisija CO₂ za proizvedenu energiju, [kg/kWh]

Radna tvar: R410A

ODP = 0

GWP = 1890 (izraženo za vremenski period od 100 g.) [7]

Emisija CO₂ za proizvedenu električnu energiju: $\beta = 530 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$

Rad postrojenja: $n = 20$ god.

Faktor recikliranja: $\alpha_{rec} = 0,2$

TEWI vrijednost indirektnog rashladnog sustava

Punjenje radne tvari R410A rashladnika vode **Carrier 30RB 372**:

$$m = 45 \text{ kg [6]}$$

Godišnja potrošnja električne energije indirektnog vodenog sustava hlađenja:

$$E_{god} = 60\,024 \frac{\text{kWh}}{\text{god.}}$$

Godišnje propuštanje radne tvari iz postrojenja (15%):

$$L = 0,15 \cdot 45 = 6,75 \frac{\text{kg}}{\text{god.}}$$

$$\begin{aligned} TEWI &= (1890 \cdot 6,75 \cdot 20) + [1890 \cdot 45 \cdot (1 - 0,2)] + (20 \cdot 60024 \cdot 0,530) = \\ &= 959\,444,4 \text{ kg CO}_2 \end{aligned}$$

TEWI vrijednost direktnog rashladnog sustava

Punjenje radne tvari R410A vanjske jedinice **LG ARUN180LT2**:

$$m = 12,5 \cdot 7 = 87,5 \text{ kg [11]}$$

Godišnja potrošnja električne energije VRV sustava hlađenja:

$$E_{god} = 50\,045,3 \frac{\text{kWh}}{\text{god.}}$$

Godišnje propuštanje radne tvari iz postrojenja (15%):

$$L = 0,15 \cdot 87,5 = 13,125 \frac{\text{kg}}{\text{god.}}$$

$$\begin{aligned} TEWI &= (1890 \cdot 13,125 \cdot 20) + [1890 \cdot 87,5 \cdot (1 - 0,2)] + (20 \cdot 50045,3 \cdot 0,530) = \\ &= 1\,158\,905,2 \text{ kg CO}_2 \end{aligned}$$

Iz izračuna *TEWI* faktora za svaki sustav vidi se da je za okoliš više prihvatljiv indirektan sustav hlađenja, tj. indirektni sustav pridonosi manjoj emisiji ugljičnog dioksida (CO₂). On bi kroz 20 godina rada u okoliš direktno i indirektno utjecao na emisiju od 959,4 tona ugljičnog dioksida, dok bi direktni VRF sustav za isto vrijeme rada utjecao na emisiju od 1158,9 tona ugljičnog dioksida. To je velikim dijelom zbog toga jer je manje punjenje sustava pa je manje propuštanja radne tvari u okoliš što znači da je manji utjecaj radne tvari na stvaranje efekta staklenika što se može zaključiti iz tablice 6. Ona pokazuje kako pojedini članovi u izrazu za izračun *TEWI* faktora utječu na ukupni iznos emisije CO₂. Direktni VRF sustav ima samo jedan član u kojem ima najmanji iznos emisije, to je član jednadžbe koji govori koliko potrošnja energije utječe na emisiju. Budući da su kod VRV sustava manji pogonski troškovi, tj. potrebno je manje električne energije iz npr. elektrane, što indirektno znači da će elektrana emitirati manje CO₂.

TEWI [kg CO ₂]	PROPUŠTANJE	GUBICI U RECIKLAŽI	UTROŠAK ENERGIJE	Σ
	DIREKTNI UTJECAJ		INDIREKTNI UTJECAJ	
Indirektni sustav	255 150	68 040	636 254,4	959 444,4
Direktni sustav	496 125	132 300	530 480,2	1 158 905,2

Tablica 6. Usporedba članova jednadžbe TEWI faktora za pojedini sustav

8. ZAKLJUČAK

Vanjske jedinice kod VRF sustava ili rashladnici vode kod indirektnog sustava moraju se dimenzionirati tako da odgovaraju vršnom opterećenju objekta koji se u ovom slučaju hladi, a ne smiju se dimenzionirati kao zbroj pojedinih vršnih opterećenja zona hlađenja unutarnjih jedinica. Pravilnim dimenzioniranjem smanjuje se kapacitet vanjske jedinice ili rashladnika vode. Takvim pristupom uzimamo u obzir da neće sve unutarnje jedinice raditi u isto vrijeme sa maksimalnim učinkom hlađenja. Neke zone potrebno je manje hladiti od ostalih, ovisno o položaju objekta prema Suncu, unutarnjeg rasporeda prostorija, toplinskih dobitaka od ljudi, rasvjete, električnih uređaja u pojedinim zonama i sl.

Kad se razmatra godišnji utrošak električne energije i investicijski troškovi pojedinog sustava, zaključuje se da će direktni VRF sustav biti više isplativ ako radi puno ili stalno, jer su pogonski troškovi niži od onih kod indirektnog sustava, no kako kod većih objekata raste potrebno rashladno opterećenje to su potrebni veliki investicijski troškovi VRF sustava, za razliku od investicijskih troškova indirektnog sustava. Većinom se tada kod većih objekata može koristiti indirektni sustav, koji dobiva prednost ispred VRF sustava, tamo gdje možda neće biti potrebno cjelogodišnje hlađenje.

9. LITERATURA

- [1] ASHRAE Journal, April 2007: „*Variable Refrigerant Flow Systems*“
- [2] ASHRAE Journal, June 2008: „*Designing VRF Systems*“
- [3] ASHRAE Handbook: *HVAC Systems and Equipment 2008*
- [4] Ćurko T., Mudrinić S.: „*Radne tvari u tehnici hlađenja: R410A*“, FSB, Zagreb, 2000.
- [5] Ćurko T.: „*Hlađenje i dizalice topline*“, Radni udžbenik, FSB, Zagreb, 2006.
- [6] Katalog proizvođača „Carrier“
- [7] <http://www.comfort.uk.com/refrigerants.htm>
- [8] Katalog proizvođača „Daikin“
- [9] Pavković B., Božunović A.: „*Tehnika hlađenja*“, RITEH, Rijeka
- [10] Katalog proizvođača „Trane“
- [11] Katalog proizvođača „LG“

