

FRIGOPLUS

■ ■ ■ NATURAL COOLING & HEATING

PREPORUKE ZA HIDRONIČKE SUSTAVE SA ZRAKOM HLAĐENIM RASHLADNICIMA VODE



SADRŽAJ

1. UVOD

2. STABILNOST PROTOKA KROZ RASHLADNIK VODE

3. BALANSIRANJE HIDRONIČKIH SUSTAVA

3.1 SPREMNIK (BUFFER TANK) KAO STABILIZATOR

3.2 SPREMNIK KAO AKUMULATOR RASHLADNE ENERGIJE?

4. PREPORUČENA RJEŠENJA ZA HIDRONIČKE SUSTAVE

4.1 JEDNOSTAVNI SUSTAV

4.2 KOMPLEKSNI SUSTAV

4.2a RASHLADNIK S PRIMARNOM PUMPOM

4.2b RASHLADNIK S PRIMARNOM PUMPOM PO KRUGU

4.3c PARALELNA KONFIGURACIJA RASHLADNIKA

5. TOPLINSKO BALANSIRANJE SUSTAVA

5.1 MAKSIMALNA TEMPERATURNI RAZLIKA (ΔT)

5.2 MINIMALNA TEMPERATURNI RAZLIKA (ΔT)

5.2a NISKI ΔT SINDROM – RASHLADNIK S PRIMARNOM PUMPOM

5.2b NISKI ΔT SINDROM – RASHLADNIK S PRIMARNOM PUMPOM
PO KRUGU

6. STRATEGIJE TOPLINSKE REGULACIJE

6.1 KONSTANTNI PROTOK – RASHLADNIK SA PRIMARNOM PUMPOM

6.1a BYPASS EFEKT

6.2 STUPNJEVITO PROMJENJIVI PROTOK – RASHLADNIK S PUMPOM PO
KRUGU

6.3 HITNO ISKLJUČIVANJE KOMPRESORA U NUŽDI

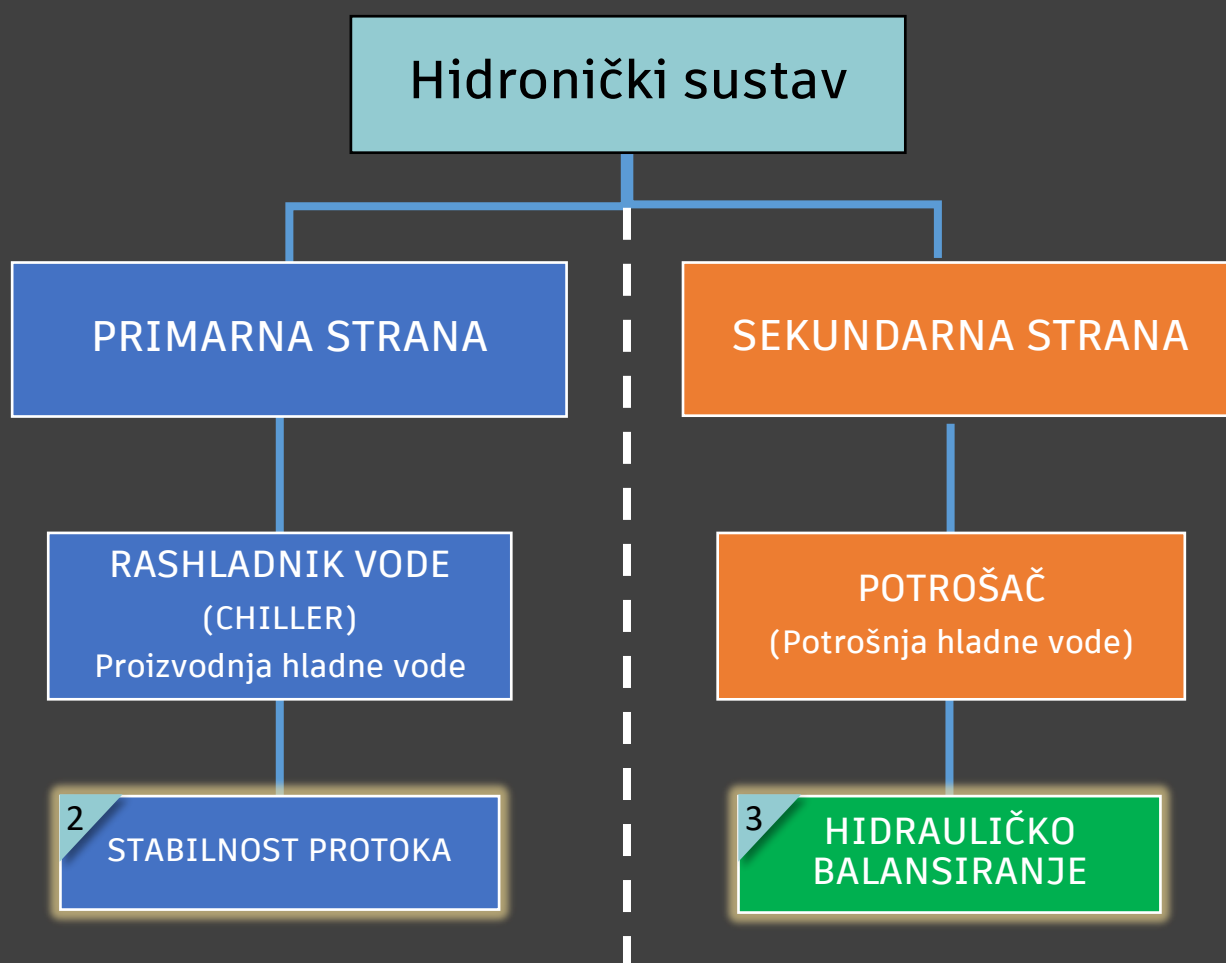
6.4 ZAŠTITA KOMPRESORA OD KRATKOG CIKLIRANJA

7. PREGLED

Ove su preporuke pripremljene s ciljem osiguravanja pravilne hidrauličke i toplinske ravnoteže između rashladnika vode (chillera) i hidroničkog sustava korisnika, a temelje se na više od deset godina praktičnog iskustva u projektiranju, proizvodnji, puštanju u pogon i analizi rada rashladnih sustava. Svrha ovih preporuka je pružiti projektantima, izvođačima, sistem integratorima i investitorima praktične smjernice za odabir optimalne hidroničke konfiguracije sustava te izbjeći najčešće pogreške koje mogu negativno utjecati na pouzdanost, energetska učinkovitost i radni vijek opreme.

Pravilno postignuta hidraulička i toplinska ravnoteža preduvjet je za **pouzdan i stabilan rad sustava, dug radni vijek opreme te maksimalnu energetska učinkovitost cjelokupnog postrojenja.**

Prilikom projektiranja hidroničkog sustava njegovu je konfiguraciju potrebno uskladiti s tehničkim mogućnostima i načinom regulacije odabranog rashladnika vode, budući da različite izvedbe rashladnika nisu jednako prikladne za sve konfiguracije hidroničkih sustava.



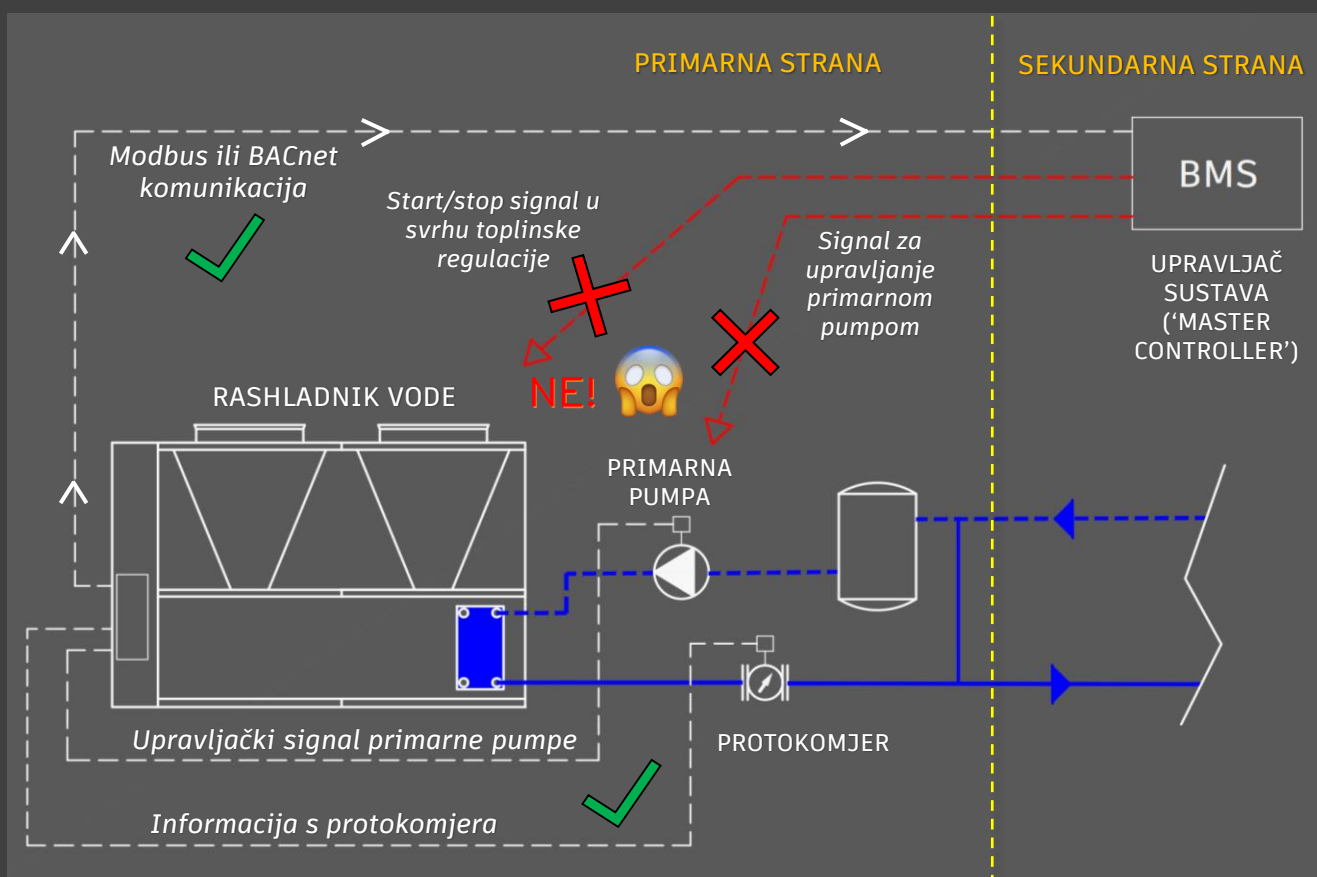
Stabilan protok na primarnoj strani jedan je od ključnih preduvjeta za pouzdan, siguran i energetske učinkovit rad rashladnika vode (chillera) i cjelokupnog hidroničkog sustava. Rashladnik je projektiran za rad pri zadanom nazivnom protoku kroz isparivač (pločasti izmjenjivač topline), zbog čega je potrebno osigurati stabilan protok bez značajnih oscilacija.

Nestabilan ili promjenjiv protok kroz isparivač može narušiti proces prijenosa topline, što pritom znatno smanjuje učinkovitost i performanse rashladnika te može uzrokovati oštećenja ključnih komponenata uređaja.

Regulacija protoka

Regulacija protoka na primarnoj strani ostvaruje se pomoću mjeraca protoka (protokomjera), primarne cirkulacijske pumpe s regulacijom brzine vrtnje i upravljačkog sustava rashladnika.

Na temelju izmjerenog protoka upravljački sustav rashladnika automatski prilagođava brzinu vrtnje primarne pumpe kako bi održao zadani protok kroz isparivač i osigurao optimalne radne uvjete u cijelom radnom području.



Upravljački sustav rashladnika mora imati potpunu kontrolu nad radom primarne pumpe. BMS ne smije upravljati radom rashladnika putem učestalih start/stop naredbi radi regulacije temperature sustava. Sve sekvence pokretanja i zaustavljanja, zaštitne funkcije te radni režimi moraju biti upravljani isključivo logikom upravljačkog sustava rashladnika. Primarna pumpa i/ili protokomjer mogu biti ugrađeni unutar ili izvan kućišta rashladnika.

Glavni ciljevi hidrauličkog balansiranja terminalnih jedinica na potrošačkoj/sekundarnoj strani, kao što su klimatizacijske jedinice (AHU) ili fan-coil jedinice, je osigurati da svaka jedinica dobiva ispravan protok u svim radnim uvjetima te da protok nikad ne prijeđe nazivnu vrijednost. Prekomjerni protok na sekundarnoj strani uzrokuje ne samo povećanu potrošnju energije pumpi, već i porast temperature polazne vode, čime se smanjuje ukupni rashladni kapacitet i učinkovitost sustava.

Ukupni protok u sustavu ne smije biti veći od nazivnog protoka za koji je rashladnik (chiller) projektiran. Hidrauličko balansiranje sustava osigurava pravilnu raspodjelu protoka i sprječava prekomjerni protok.

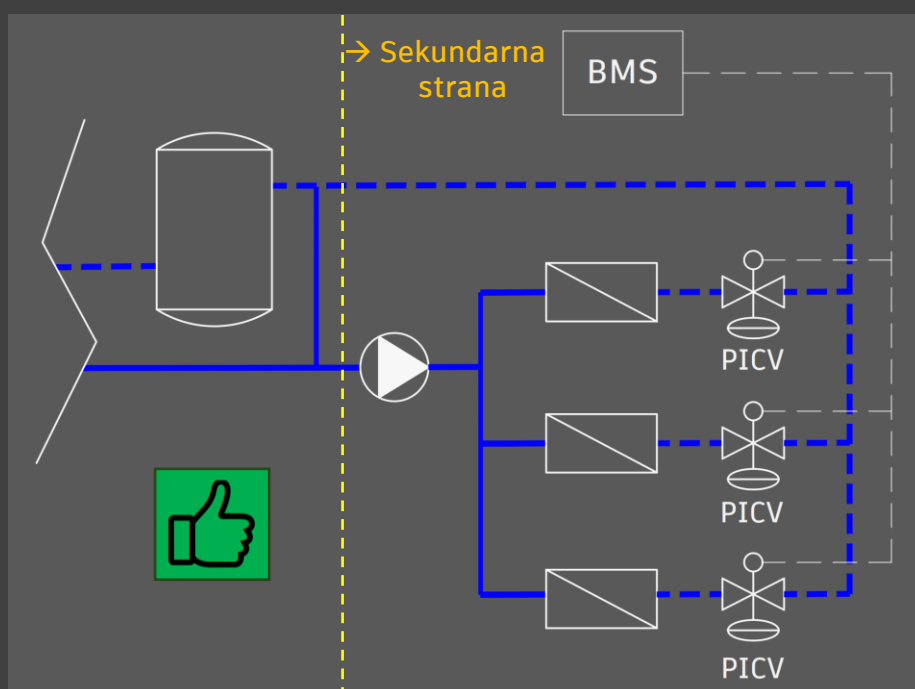
Kako bi se postiglo hidrauličko balansiranje, preporučuje se primjena tlačno neovisnih regulacijskih ventila (PICV) s proporcionalnim ili ON/OFF upravljanjem za svaku terminalnu jedinicu (tj. krajnjeg potrošača), ovisno o projektnoj konfiguraciji sustava.

(Npr. Danfoss AB-QM, Belimo PICV, itd.)

PICV objedinjuje funkcije regulacije i automatskog hidrauličkog balansiranja. Ugrađeni regulator diferencijalnog tlaka održava konstantan diferencijalni tlak preko ventila, čime se protok automatski ograničava na unaprijed podešenu nazivnu vrijednost.

Pravilno odabrani i podešeni PICV ventili sprječavaju pojavu prekomjernog protoka te osiguravaju optimalan protok kroz svaku terminalnu jedinicu, neovisno o promjenama diferencijalnog tlaka u sustavu. Time se održava hidronička ravnoteža sustava pri punom i djelomičnom opterećenju.

Kod sustava s varijabilnim protokom na sekundarnoj strani potrebno je hidraulički razdvojiti primarni (rashladnik) i sekundarni (potrošački) hidronički krug kako bi se osigurao stabilan rad rashladnika neovisan o promjenama protoka na potrošačkoj strani.



Ispravno podešeni PICV:

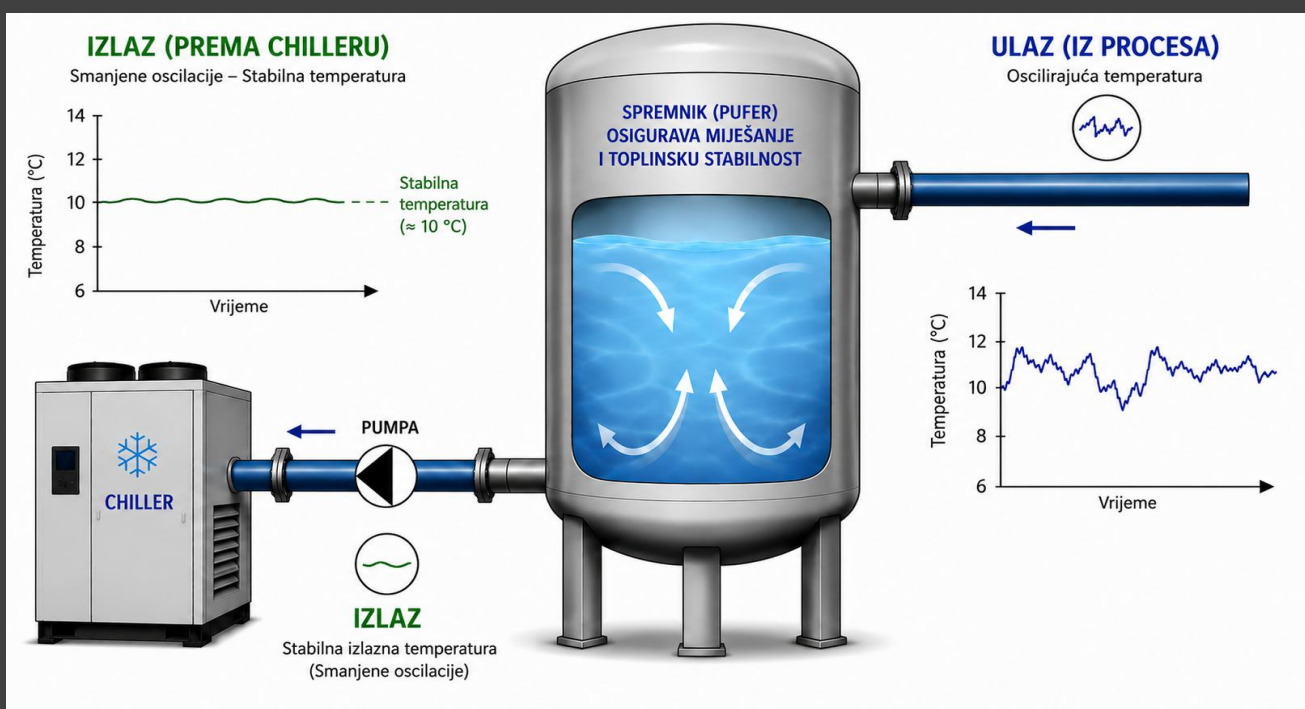
- ✓ Nema prekomjernog protoka zbog ograničenja maksimalnog protoka svake terminalne jedinice
- ✓ Ispravan protok pri svim opterećenjima, neovisno o promjenama tlaka u sustavu
- ✓ Protok na sekundarnoj strani uvijek je manji od protoka na primarnoj strani

Stabilna temperatura povratne vode jedan je od ključnih parametara za pouzdan rad rashladnika jer upravljački sustav na temelju nje procjenjuje trenutno toplinsko opterećenje i regulira rad uređaja.

Iz tog je razloga, s tehničkog aspekta, spremnik vode preporučljivo ugraditi na povratni vod, neposredno prije ulaza u rashladnik, gdje učinkovito prigušuje oscilacije povratne temperature i stabilizira rad sustava.

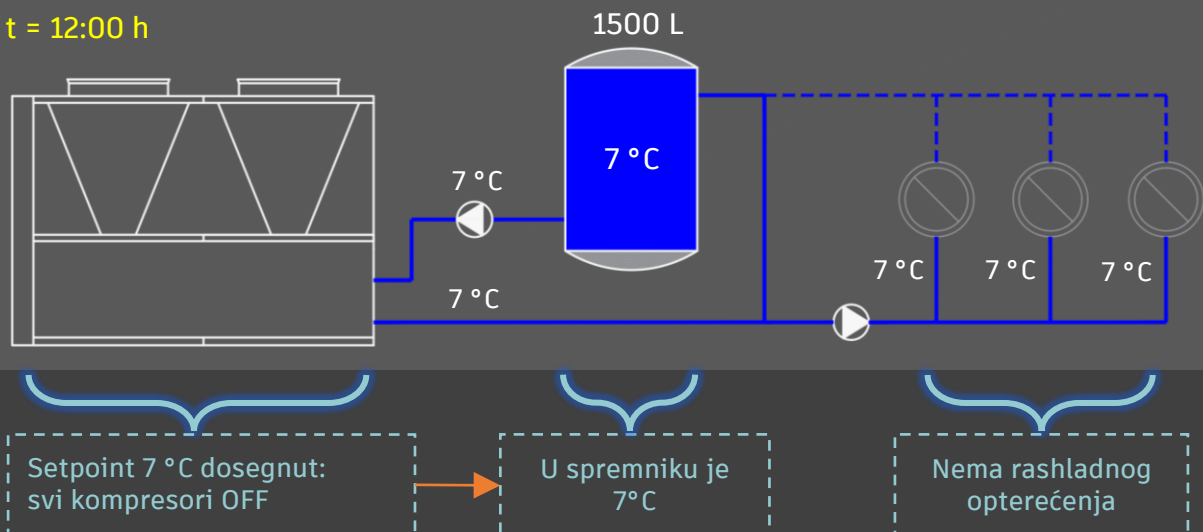
Pravilno dimenzionirani spremnik povećava toplinsku inerciju sustava, smanjuje utjecaj naglih promjena opterećenja na rashladnik te sprječava učestalo cikliranje kompresora.

Dimenzioniranje spremnika treba temeljiti na analizi minimalnog rashladnog kapaciteta rashladnika, minimalnog opterećenja sustava, aktivnog volumena vode, minimalnog potrebnog vremena rada kompresora i potrebnog protoka vode.

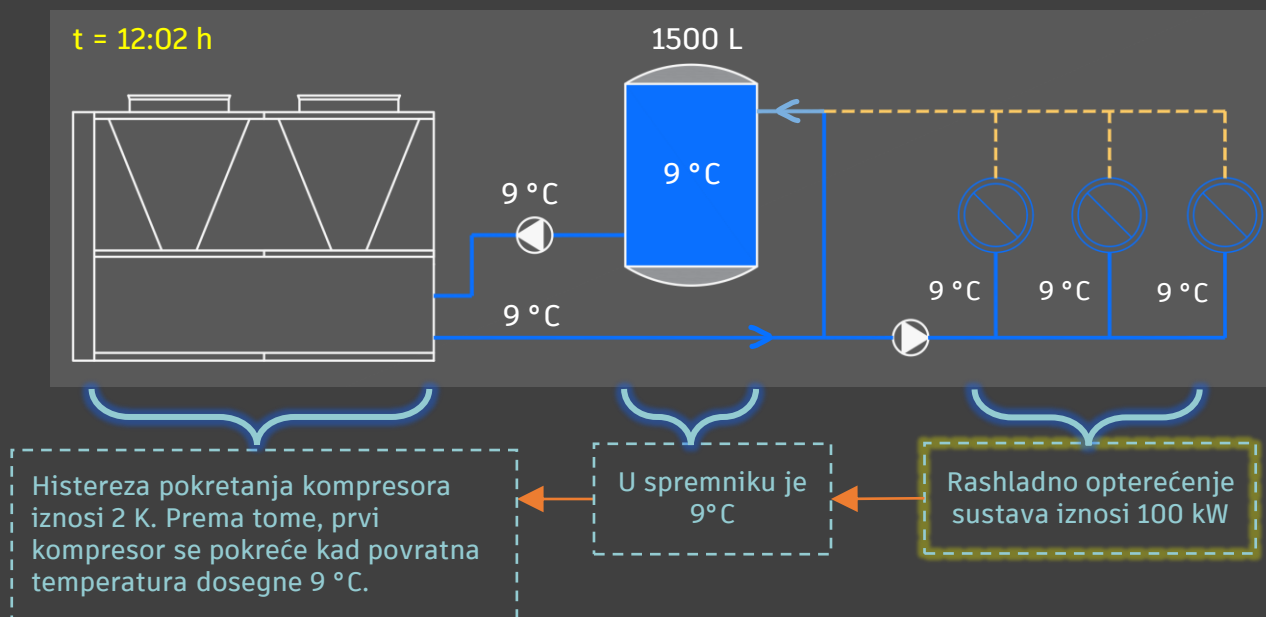


Akumulacijski spremnici koji se uobičajeno ugrađuju u hidroničke sustave općenito su premali da bi osigurali značajno skladištenje rashladne energije zbog niskog specifičnog toplinskog kapaciteta vode. Shodno tome, učinkovito skladištenje rashladne energije zahtijeva znatno veće volumene ili sustave s latentnom toplinom poput leda ili materijala s promjenom faze (PCM). Sljedeći primjer ilustrira problematiku nedostatka volumena spremnika.

t = 12:00 h



t = 12:02 h

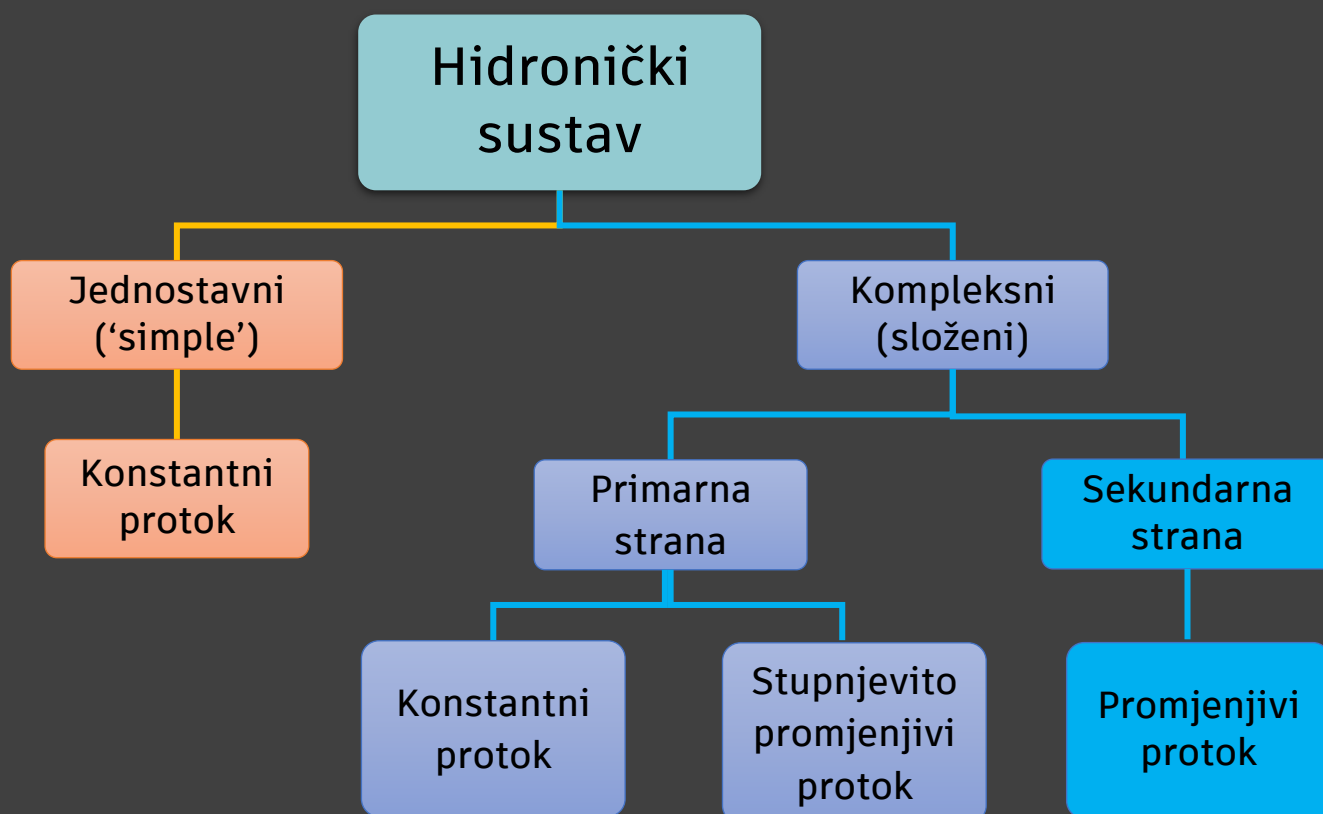


U ovom primjeru sa spremnikom 1500 L i rashladnim opterećenjem sustava od 100 kW, brzina rasta temperature u spremniku je otprilike 1 K/min. Prema tome, uvjet za uključivanje prvog kompresora ispunjen je za otprilike 2 minute.

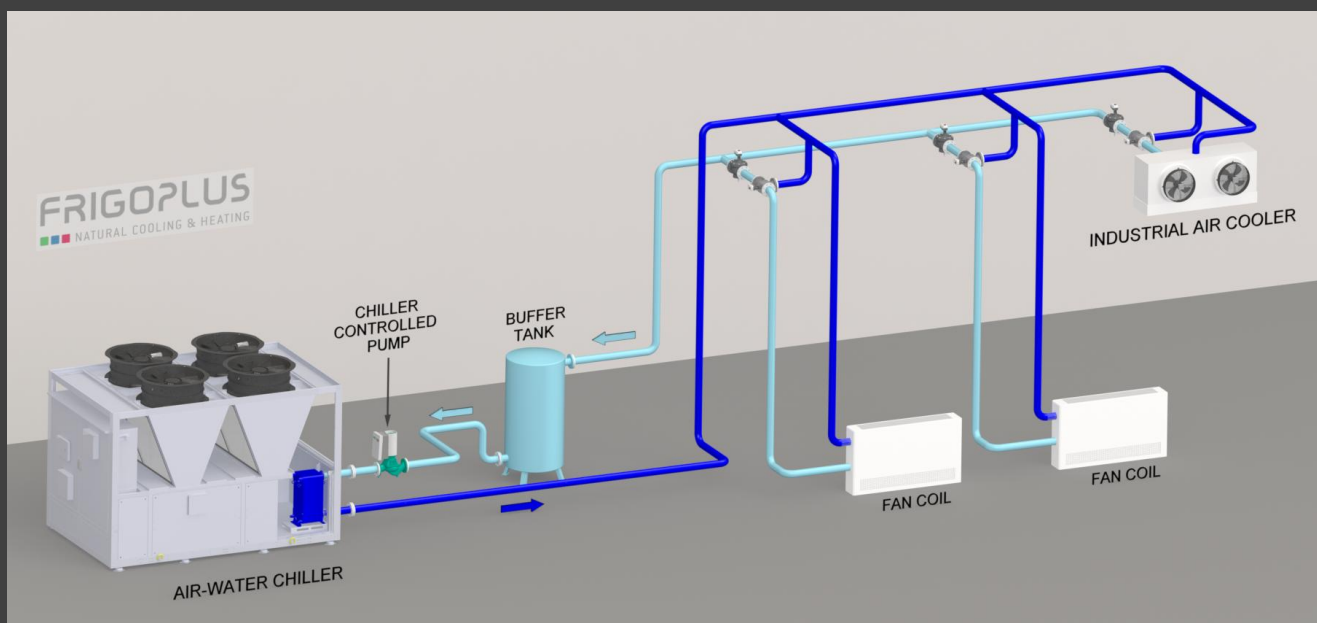
ZAKLJUČAK: Ovaj spremnik **ne može** služiti za akumulaciju rashladne energije zbog nedovoljnog volumena.



PREPORUČENA RJEŠENJA ZA HIDRONIČKE SUSTAVE



Jednostavni sustav temelji se na pretpostavci da rashladnik i potrošačka strana u svakom trenutku rade s **konstantnim protokom**. Sustav se sastoji od zajedničke cirkulacijske pumpe i odgovarajuće dimenzioniranog spremnika na povratnom vodu.



SUSTAV: KONSTANTNI PROTOK

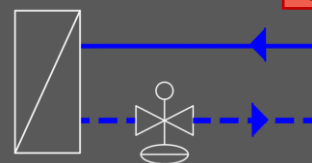
Cirkulacijska pumpa sustava mora biti upravljana od strane rashladnika kako bi se održao konstantan protok.

Dvoputni ventili s ON/OFF ili proporcionalnim upravljanjem (s aktuatorima) **ne smiju** se koristiti jer uzrokuju promjenjivi protok u sustavu!

Međutim, moguća je sljedeća izvedba:

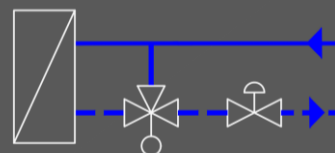
- Balasni ventil za održavanje konstantnog protoka (CFV – Constant Flow Valve) za svaku terminalnu jedinicu, podešen na nazivnu vrijednost protoka terminalne jedinice
- Pravilno podešeni troputni ventili u kombinaciji sa CFV ventilima na svakoj terminalnoj jedinici

NIJE DOPUŠTENO:



Dvoputni ventil
(npr. PICV)

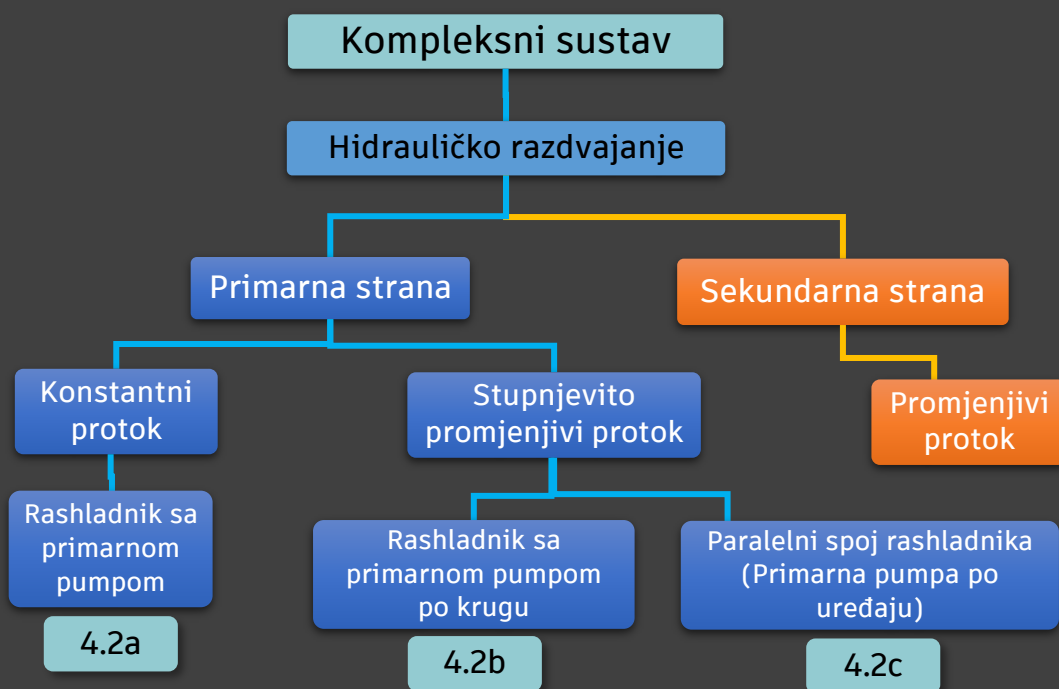
MOGUĆE:



Balasni
ventil (CFV)

Napomena: Ventili konstantnog protoka (CFV) kao balansirajući elementi moraju uvijek biti otvoreni, odnosno nikad potpuno zatvoreni.

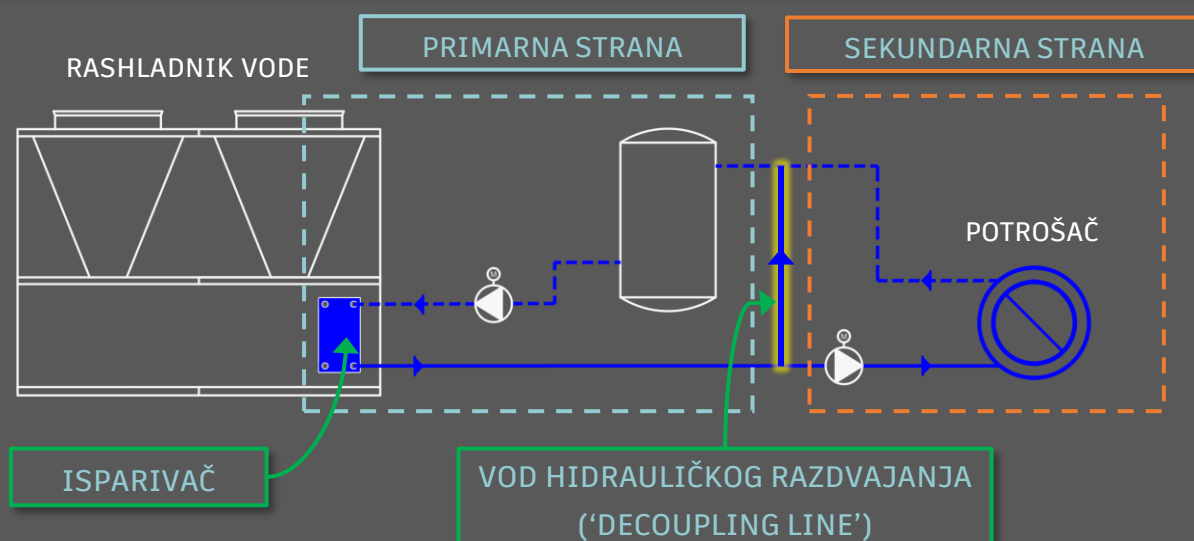
Jednostavan dizajn sustava prikladan je za manje sustave s nižim, ali stabilnim rashladnim opterećenjem, koji se sastoje od relativno malog broja terminalnih jedinica. Preporuka: MINILINE i COMPACT serije rashladnika.



Hidrauličko razdvajanje

Kompleksni sustav podrazumijeva hidrauličko razdvajanje, odnosno separaciju protoka na strani rashladnika (chillera) i protoka na potrošačkoj strani sustava. Hidrauličko razdvajanje ostvaruje se povezivanjem polaznog i povratnog voda dodatnim spojnim vodom, čime se definiraju primarna i sekundarna strana sustava:

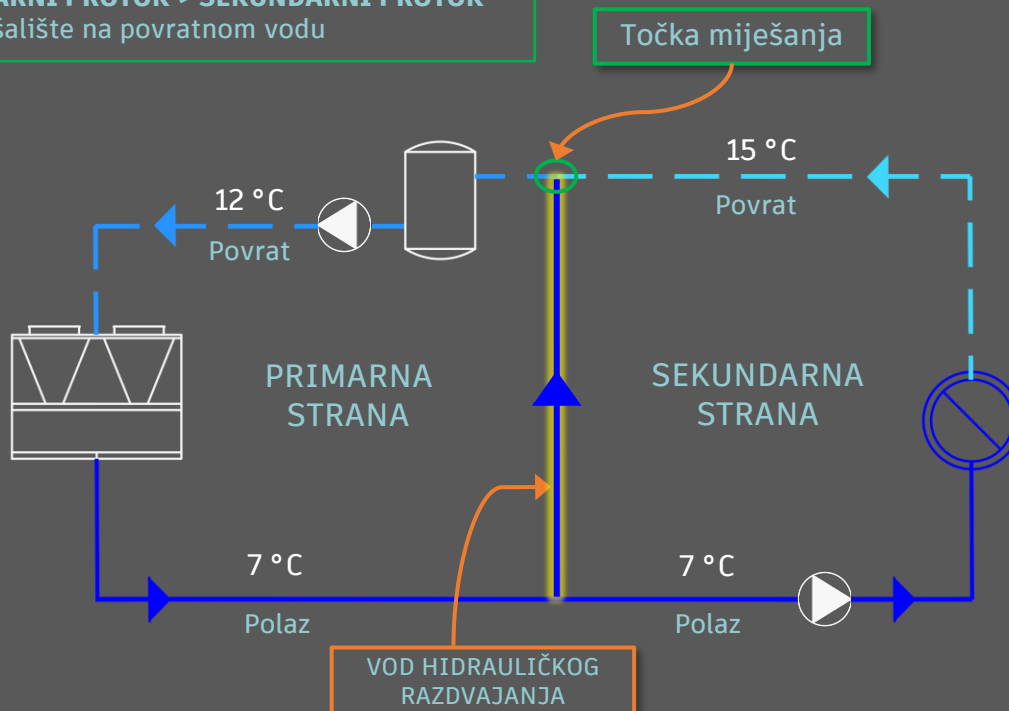
- Primarna strana predstavlja hidronički krug koji je izravno povezan s pločastim izmjenjivačem topline (isparivačem) te osigurava optimalan i stabilan protok potreban za siguran i pouzdan rad rashladnika.
- Sekundarna strana predstavlja hidronički krug koji distribuira rashladni medij (vodu) od rashladnika prema potrošačima, poput ventilokonvektora, klimatizacijskih komora itd.



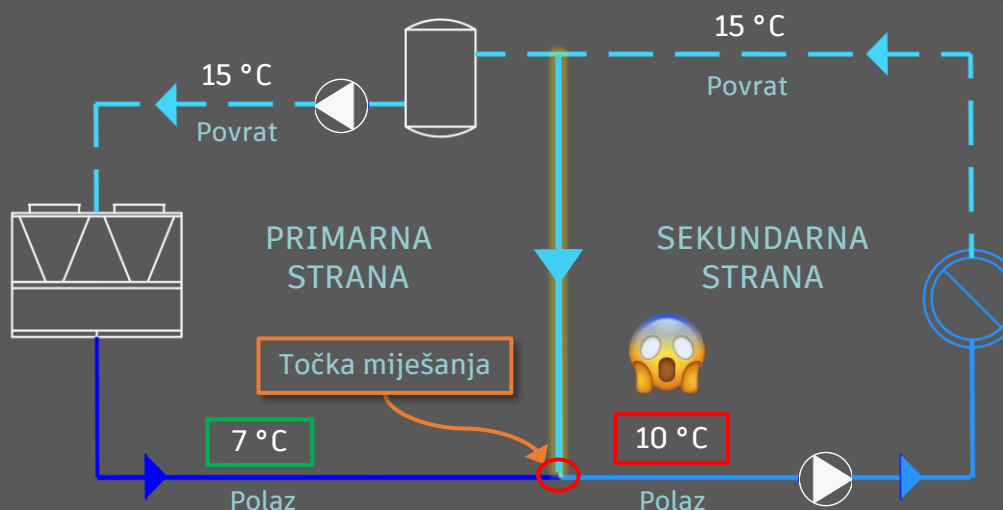
Ako protok na sekundarnoj strani postane veći od protoka na primarnoj strani, miješanje se odvija na polaznom vodu. Posljedica miješanja na polaznom vodu je porast temperature polazne vode, što dovodi do smanjenja raspoloživog rashladnog kapaciteta sustava te se stoga mora izbjegavati u svim radnim uvjetima.

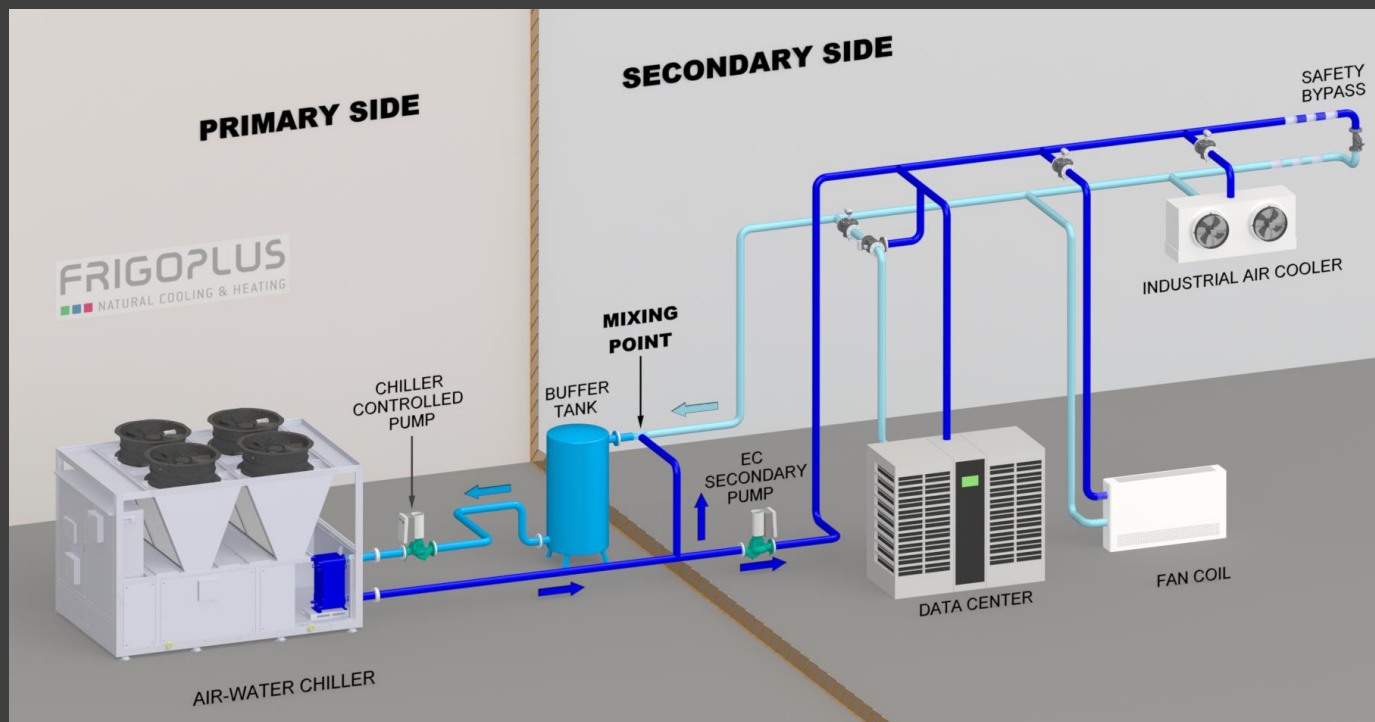
U kompleksnim sustavima protok na primarnoj strani mora biti veći od protoka na sekundarnoj strani. – Na taj se način miješanje odvija isključivo na povratnom vodu, čime se sprječava porast temperature polazne vode.

PRIMARNI PROTOK > SEKUNDARNI PROTOK
= mješalište na povratnom vodu



PRIMARNI PROTOK < SEKUNDARNI PROTOK
= mješalište na polaznom vodu povećava temperaturu polazne vode!





PRIMARNA STRANA: KONSTANTAN, STABILAN PROTOK

- Primarna pumpa mora raditi kontinuirano te biti upravljana od strane rashladnika (chillera) radi regulacije protoka
- Ukupni protok na primarnoj strani mora u svakom trenutku biti veći od protoka na sekundarnoj strani kako bi se osigurao stabilan i pouzdan rad rashladnika
- Vod hidrauličkog razdvajanja koristi se za kompenzaciju razlike u protoku između primarne i sekundarne strane

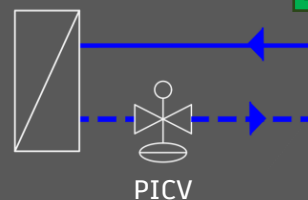
SEKUNDARNA STRANA: PROMJENJIVI PROTOK

Sekundarna pumpa radi u režimu konstantnog diferencijalnog tlaka (const. dP mode).

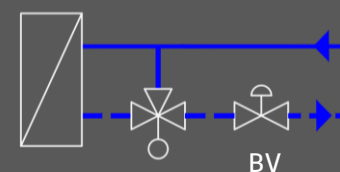
Preporučuje se ugradnja tlačno neovisnog regulacijskog ventila (PICV) na svakoj terminalnoj jedinici radi hidrauličkog balansiranja i ograničenja protoka.

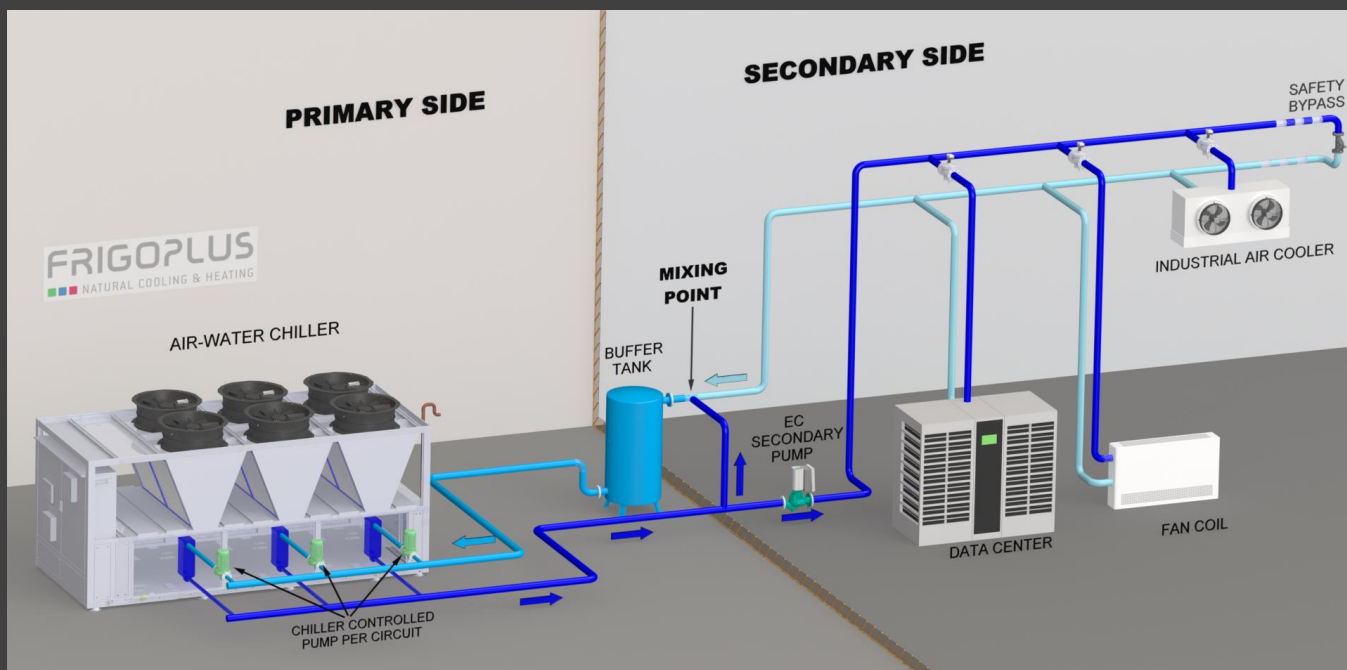
Moguće je, ali nije uvijek preporučljivo, da pojedine terminalne jedinice budu opremljene troputnim ventilom u kombinaciji s balansnim ventilom (BV). U tom slučaju, protok svake terminalne jedinice ne smije biti veći od njezinog nazivnog protoka kako bi se spriječio prekomjerni protok na sekundarnoj strani.

PREPORUČENO:



MOGUĆE:





PRIMARNA STRANA: STUPNJEVITO PROMJENJIVI PROTOK

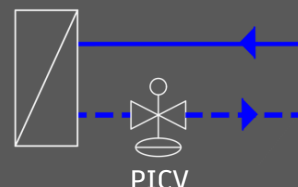
Rashladnik je opremljen zasebnom primarnom pumpom za svaki rashladni krug. Stupnjevito promjenjivi protok ostvaruje se sekvencijalnim uključivanjem i isključivanjem pojedinih rashladnih krugova. Upravljački sustav rashladnika upravlja radom svake primarne pumpe.

- Ukupan protok na primarnoj strani mora u svakom trenutku biti veći od protoka na sekundarnoj strani.
- Minimalni protok na primarnoj strani mora biti veći od minimalnog protoka na sekundarnoj strani.
- Rashladni kapacitet pojedinog rashladnog kruga preporučuje se uskladiti sa najvećim pojedinačnim potrošačkim opterećenjem na sekundarnoj strani (npr. fan-coil jedinici).
- Vod hidrauličkog razdvajanja koristi se za kompenzaciju razlike u protoku između primarne i sekundarne strane.

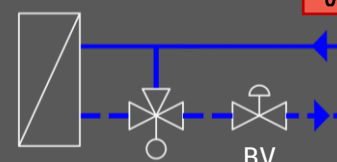
SEKUNDARNA STRANA: PROMJENJIVI PROTOK

- Sekundarna pumpa radi u režimu konstantnog diferencijalnog tlaka (const. dP mode).
- Na svakoj terminalnoj jedinici preporučuje se ugradnja tlačno neovisnog regulacijskog ventila (PICV) u ON/OFF načinu rada, kako bi se regulacija protoka uskladila sa stupnjevito upravljanim protokom na primarnoj strani.
- Troputni ventili ne smiju se koristiti za zaobilaženje (bypass) terminalnih jedinica, jer pri djelomičnom opterećenju uzrokuju prekomjerni protok na sekundarnoj strani sustava!

PREPORUKA:

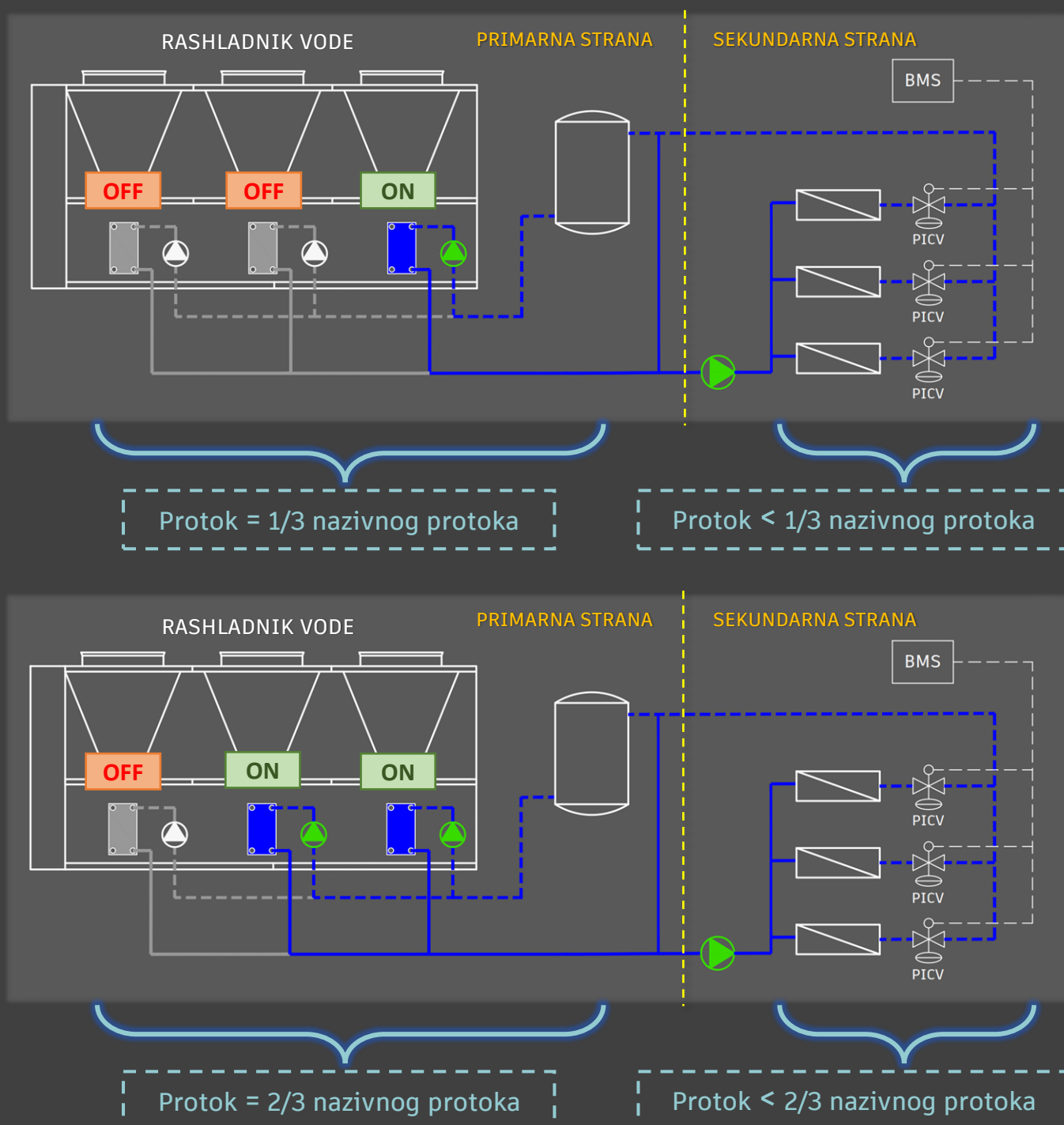


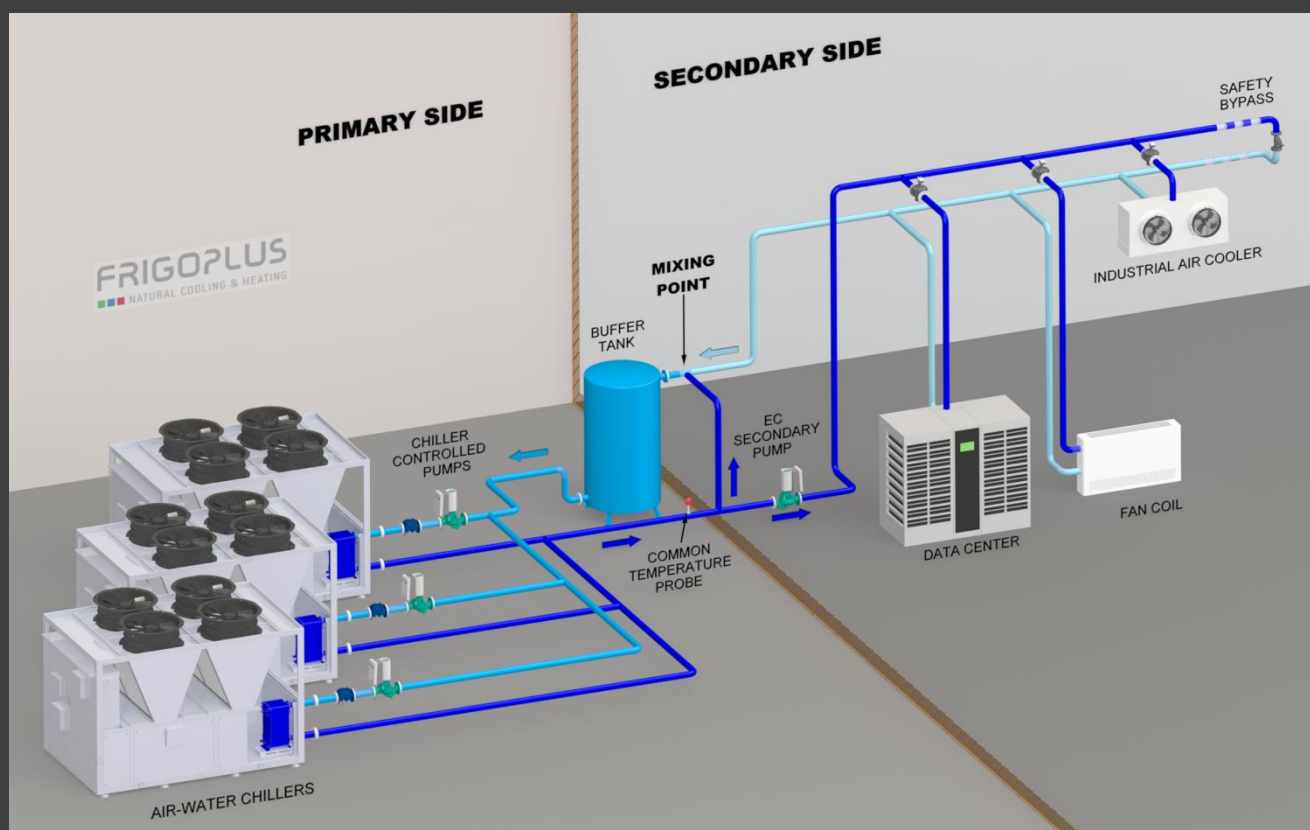
NIJE DOPUŠTENO:



Strategija stupnjevito promjenjivog („varijabilnog”) protoka znači da se protok na primarnoj strani mijenja u **diskretnim koracima** tj. **stupnjevima**, ovisno o broju aktivnih rashladnih krugova ili rashladnika.

U prikazanom primjeru rashladnik je opremljen zasebnom primarnom pumpom za svaki rashladni krug. Pri djelomičnom opterećenju, aktivan je samo jedan od tri rashladna kruga, zbog čega se **raspoloživi** protok na primarnoj strani smanjuje na **jednu trećinu nazivnog protoka**. U tom slučaju protok na sekundarnoj strani mora biti manji ili jednak od protoka na primarnoj strani. Isti princip primjenjuje se kada su aktivna dva od tri rashladna kruga.





PRIMARNA STRANA: STUPNJEVITO PROMJENJIVI PROTOK

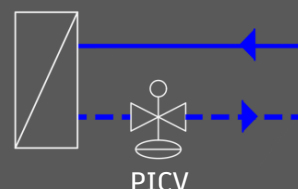
Rashladnici su hidronički povezani u paralelnoj konfiguraciji, s upravljanjem prema principu vodeći–prateći (eng. *leading–following*). Svaki rashladnik ima pripadajuću primarnu pumpu.

- Ukupan protok na primarnoj strani mora u svakom trenutku biti veći od protoka na sekundarnoj strani.
- Upravljački sustav svakog rashladnika mora upravljati radom njegove pripadajuće primarne cirkulacijske pumpe.
- Na zajedničkom polaznomvodu mora biti ugrađena temperaturna sonda.
- Vod hidrauličkog razdvajanja koristi se za kompenzaciju razlike u protoku između primarne i sekundarne strane.

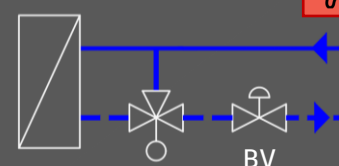
SEKUNDARNA STRANA: VARIJABILNI PROTOK

- Sekundarna EC pumpa radi u režimu konstantnog diferencijalnog tlaka (const. dp).
- Za svaku terminalnu jedinicu preporučuje se ugradnja tlačno neovisnog regulacijskog ventila (PICV) u ON/OFF načinu rada, kako bi se regulacija protoka uskladila sa stupnjevito upravljanim protokom na primarnoj strani.
- Troputni ventili ne smiju se koristiti za zaobilaznje (bypass) terminalnih jedinica, jer će u uvjetima djelomičnog opterećenja uzrokovati prekomjerni protok na sekundarnoj strani sustava!

PREPORUKA:



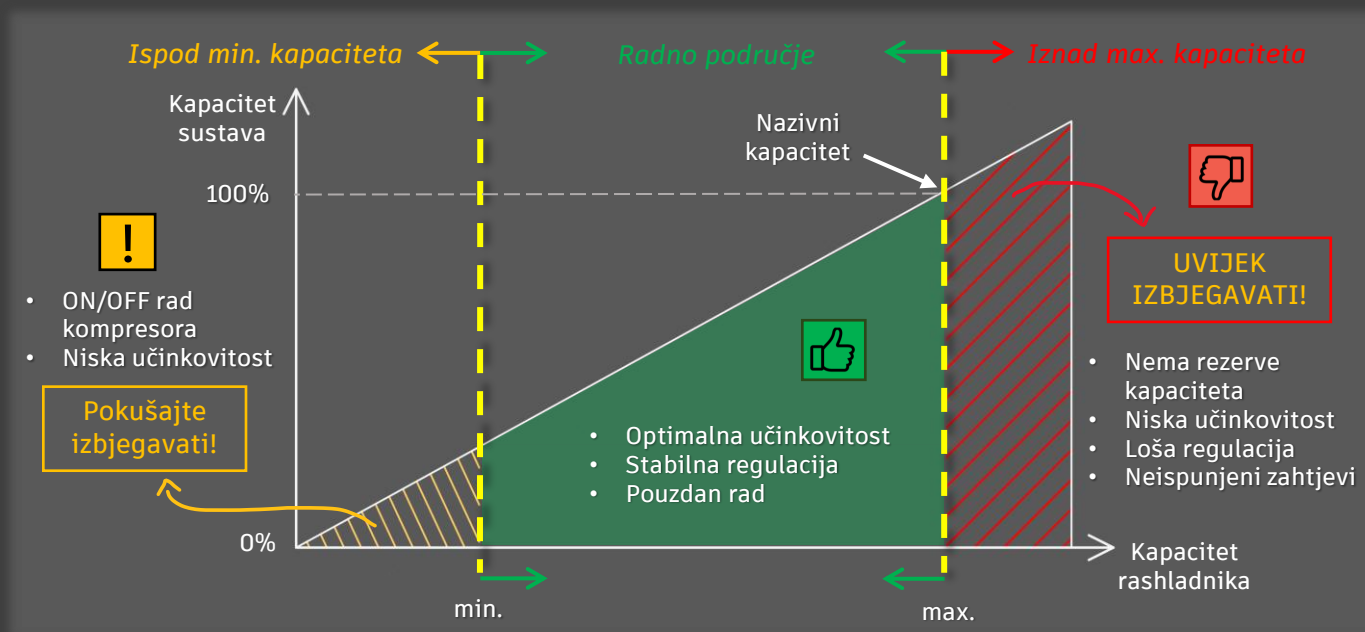
NIJE DOPUŠTENO:



Za pouzdan i visokoučinkovit rad rashladnika (chillera), **sustav mora biti toplinski uravnotežen (balansiran)**. Toplinska ravnoteža postiže se usklađivanjem minimalnog i maksimalnog opterećenja sustava sa radnim područjem rashladnika.

Potrebno rashladno opterećenje svake terminalne jedinice ne smije biti veće od njezinog projektnog rashladnog kapaciteta. → Time se osigurava ravnomjerna raspodjela rashladne energije, stabilan rad sustava i izbjegava nedostatak rashladnog kapaciteta na pojedinim terminalnim jedinicama.

Minimalno rashladno opterećenje sustava ne smije biti niže od minimalnog kapaciteta rashladnika. → Ako rashladno opterećenje sustava padne ispod minimalnog opterećenja rashladnika, može doći do učestalog cikliranja kompresora, što smanjuje radnu učinkovitost i potencijalno narušava pouzdanost rada rashladnika.



Prema standardnoj jednadžbi rashladnog kapaciteta sustava, može se zaključiti da je povratna temperatura iz sustava najvažniji parametar toplinske ravnoteže:

$$Q_{\text{hlađenje}} = q_m \times c_p \times (T_{\text{povrat}} - T_{\text{polaz}})$$

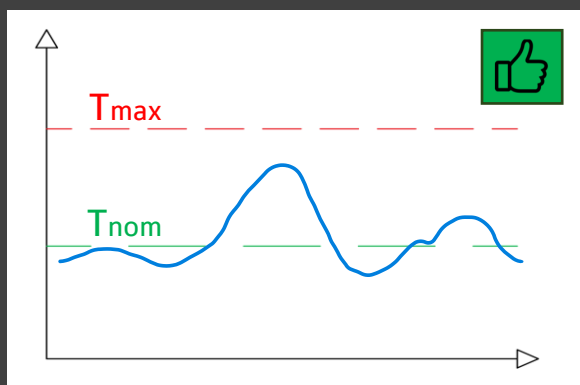
MASENI PROTOK
Ako je sustav balansiran, protok je ograničen (nikad nije veći od nazivnog)

SPECIFIČNI TOPLINSKI KAPACITET rashladnog medija
– relativno konstantna vrijednost

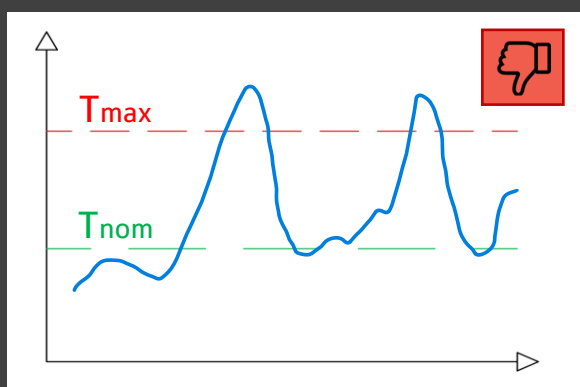
POVRATNA TEMPERATURA
iz sustava. Ključan parametar toplinske regulacije sustava

POLAZNA TEMPERATURA
iz rashladnika prema sustavu. Stabilna u nazivnim uvjetima.

Ako povratna temperatura vode poraste iznad projektirane vrijednosti, povećava se i temperaturna razlika sustava (ΔT). Uz pretpostavku konstantne polazne temperature, veća ΔT od nazivne ukazuje na prevelik zahtjev za hlađenjem na jednoj ili više terminalnih jedinica. U tom slučaju ukupno rashladno opterećenje sustava može premašiti nazivno opterećenje rashladnika (chillera) što ukazuje na problem u regulaciji rada sustava, posebno u sustavima u kojima relativno mali broj terminalnih jedinica preuzima većinu ukupnog opterećenja.

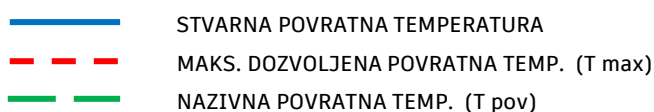


Povratna temperatura vode nalazi se unutar projektiranog radnog područja. Ventil za regulaciju protoka (npr. PICV) održava optimalni protok pri projektnom i djelomičnom opterećenju. Sustav je hidraulički i toplinski uravnotežen.



Povratna temperatura je nestabilna i prelazi maksimalnu dopuštenu vrijednost, što ukazuje na toplinsku neravnotežu unutar sustava.

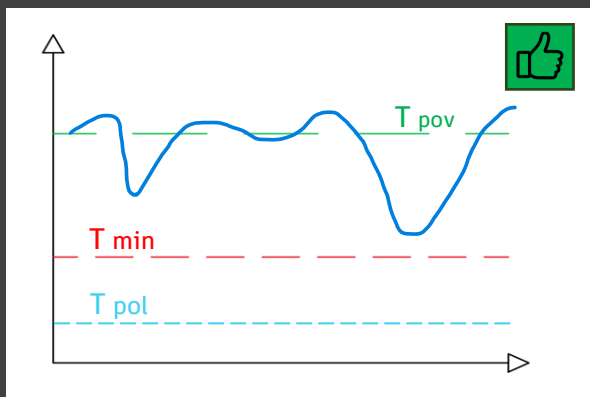
Potrebno je provesti mjere kako bi se takvo stanje spriječilo, npr. postupnim povećanjem rashladnog opterećenja kako bi se izbjegle nagle promjene radnih uvjeta.



Porast povratne temperature iznad maksimalne vrijednosti može se pojaviti pri sezonskim pokretanjima sustava nakon perioda stajanja, kao i u sustavima s izrazito promjenjivim toplinskim opterećenjima ili izraženim vršnim opterećenjima.

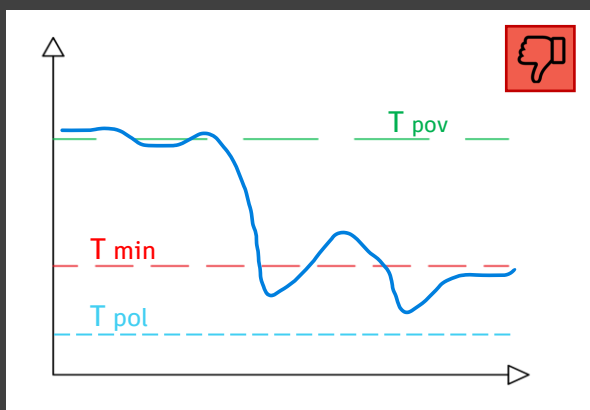
Kada je povratna temperatura niža od nazivne, to ukazuje na uvjete djelomičnog rashladnog opterećenja. Uz pretpostavku konstantne polazne temperature, niža povratna temperatura razultira smanjenjem temperaturne razlike (ΔT).

Rad pri parcijalnom opterećenju je očekivan i normalan. Međutim, ako se protok vode ne smanjuje proporcionalno smanjenom rashladnom opterećenju, može doći do pojave „niskog ΔT sindroma”. Taj se fenomen najčešće javlja kad je protok vode veći od potrebnog u odnosu na trenutno rashladno opterećenje, što dovodi do hidrauličke i toplinske neravnoteže te smanjenja učinkovitosti sustava.



Povratna temperatura iz sustava nalazi se u prihvatljivom rasponu.

Varijacija povratne temperature iz sustava je prihvatljiva, pod uvjetom da ostaje unutar definiranog radnog raspona sustava i da se sustav brzo vraća u stabilnije stanje.



Sustav zahvaćen „niskim ΔT sindromom”

Djelomično rashladno opterećenje rezultiralo je sniženjem povratne temperature jer protok nije proporcionalno smanjen. Temperaturna razlika ΔT postaje preniska (uz pretpostavku konstantne polazne temperature). **Potrebno je provesti tehničke mjere u sustavu kako bi se takvo stanje spriječilo.**

- — — — — POVRATNA TEMPERATURA
- - - - - MIN. DOPUŠTENA POVRATNA TEMP. (T_{min})
- — — — — NAZIVNA POVRATNA TEMP. (T_{pov})
- - - - - NAZIVNA POLAZNA TEMP. (T_{pol})

Potencijalni uzrok „niskog ΔT sindroma”

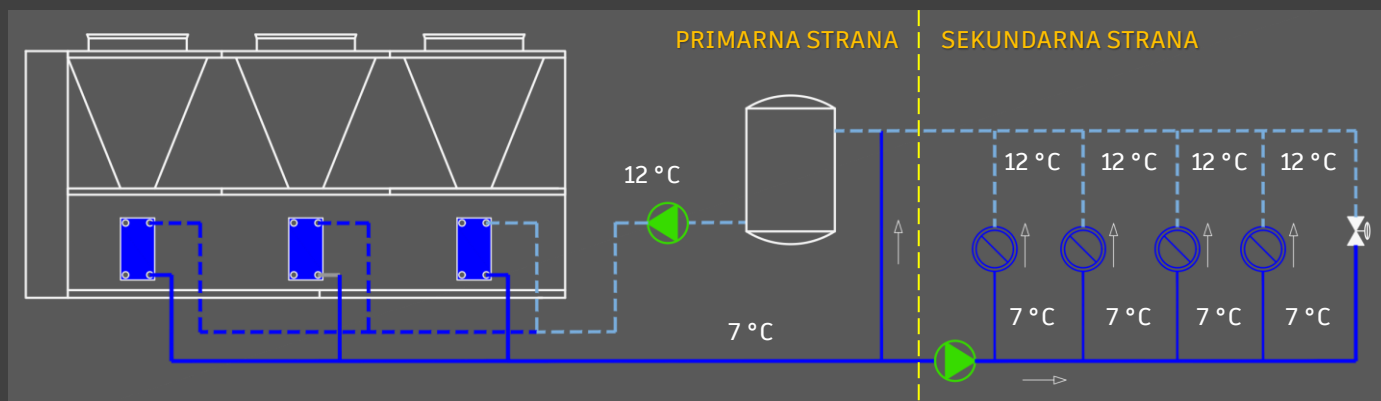
Neodgovarajući odabir / podešavanje regulacijskih ventila

Ako sustav nije pravilno hidraulički uravnotežen, tijekom djelomičnog opterećenja pojedini regulacijski ventili mogu propuštati prevelik protok kroz terminalne jedinice. Kada je protok veći od potrebnog protoka (prema stvarnom opterećenju sustava), smanjuje se porast temperature odnosno ΔT kroz terminalne jedinice i kroz sustav u cjelini. Posljedično, sustav je istovremeno hidraulički i toplinski neuravnotežen.

Jedno od mogućih rješenja je primjena tlačno neovisnih regulacijskih ventila (PICV) s proporcionalnim upravljanjem na svakoj terminalnoj jedinici. Oni eliminiraju pojavu prekomjernog protoka.

Ukoliko sekundarna strana radi s ΔT manjim od nazivnog, uz pretpostavku konstantne temperature polazne vode, to ukazuje na smanjeno rashladno opterećenje sustava. U tom slučaju nije potrebno da svi rashladni krugovi budu aktivni. Kada je rashladnik opremljen jednom primarnom pumpom za sve rashladne krugove, učinci smanjenog ΔT na rad rashladnika općenito su prihvatljivi, odnosno radne karakteristike rashladnika nisu značajno narušene **pod uvjetom da protok na primarnoj strani ostane veći od protoka na sekundarnoj strani**.

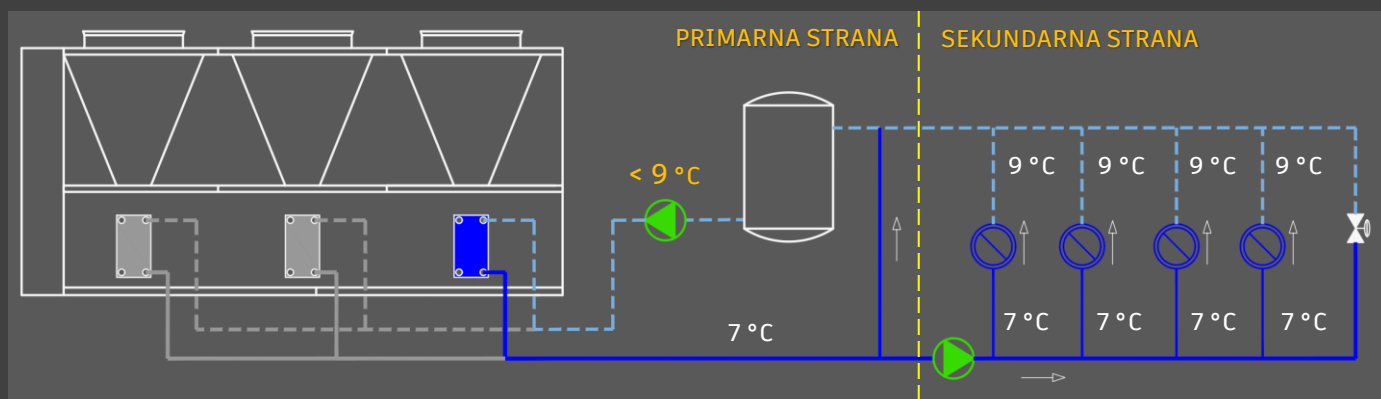
Nazivno rashladno opterećenje → Nazivni uvjeti



• Primarni protok > Sekundarni protok



Djelomično rashladno opterećenje → Manji ΔT od nazivnog

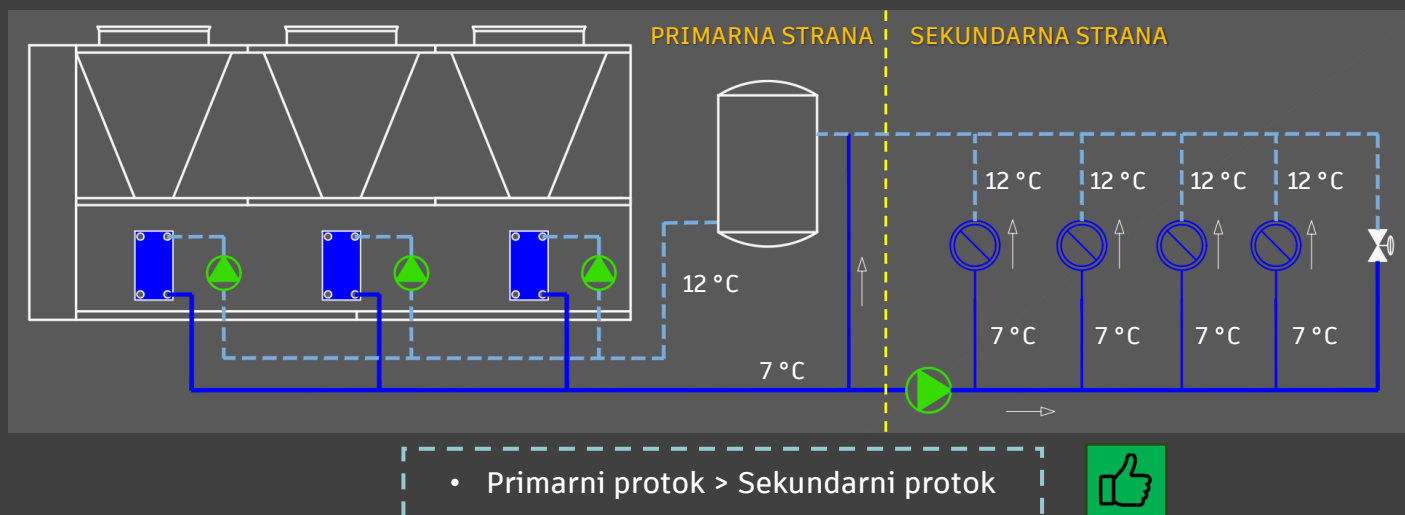


• Primarni protok > Sekundarni protok

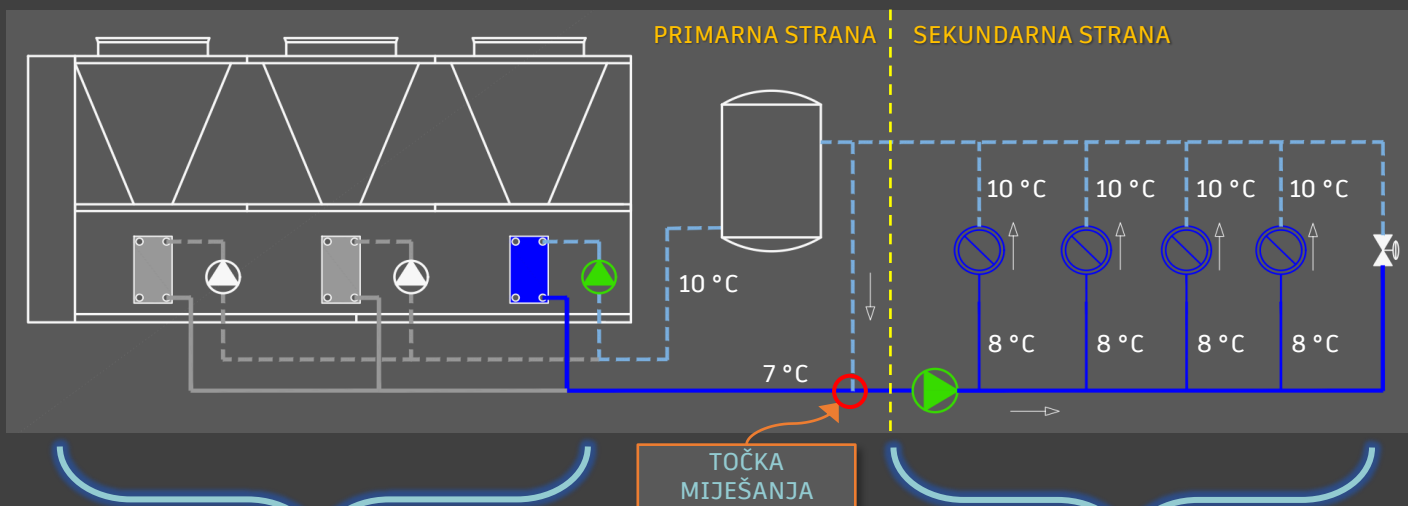


Kada sekundarna strana radi s ΔT manjim od nazivnog, to ukazuje na smanjeno rashladno opterećenje sustava. Zbog toga rashladnik radi sa smanjenim brojem aktivnih rashladnih krugova, a raspoloživi protok na primarnoj strani smanjuje se stupnjevito, kako je opisano u [Poglavlju 4.2b i 4.2c](#). Ako se protok na sekundarnoj strani ne ograniči u skladu sa smanjenim opterećenjem, odnosno raspoloživim protokom rashladnika, dolazi do hidrauličke i toplinske neravnoteže sustava.

Nazivno rashladno opterećenje → Nazivni uvjeti



Djelomično rashladno opterećenje → Manji ΔT od nazivnog



Sustav radi s manjim ΔT zbog prevelikog protoka vode pri djelomičnom opterećenju, što dovodi do pojave Low ΔT sindroma. Chiller u skladu s manjim ΔT isključuje rashladne krugove. Budući da se protok na sekundarnoj strani ne smanjuje, on može lako premašiti **raspoloživi protok na primarnoj strani!**

Ovo poglavlje opisuje strategije toplinske regulacije rashladnika (chillera) u uvjetima toplinski i hidraulički uravnoteženog rada sustava.

Glavni cilj toplinske regulacije je održavanje stabilne temperature polazne vode/glikola. Za postizanje tog cilja potrebno je osigurati da sustav bude istovremeno hidraulički i toplinski izbalansiran.

Napomena: učinkovita toplinska regulacija moguća je **samo uz stabilan i konstantan protok kroz isparivače**.

Kada su ovi uvjeti zadovoljeni, rashladnik (chiller) radi unutar svog projektnog radnog područja, kako je opisano u **Poglavlju 5**. Rad unutar tog područja omogućuje učinkovit i pouzdan rad rashladnika te rezultira stabilnom temperaturom polazne vode.

Prije svega, važno je definirati osnovne principe toplinske regulacije na kojima se temelje strategije regulacije. Ovi principi vrijede kako za jednostavne, tako i za kompleksne (složene) sustave opisane u **Poglavlju 4 – Preporučena hidronička rješenja**).

Zadana vrijednost (set point):

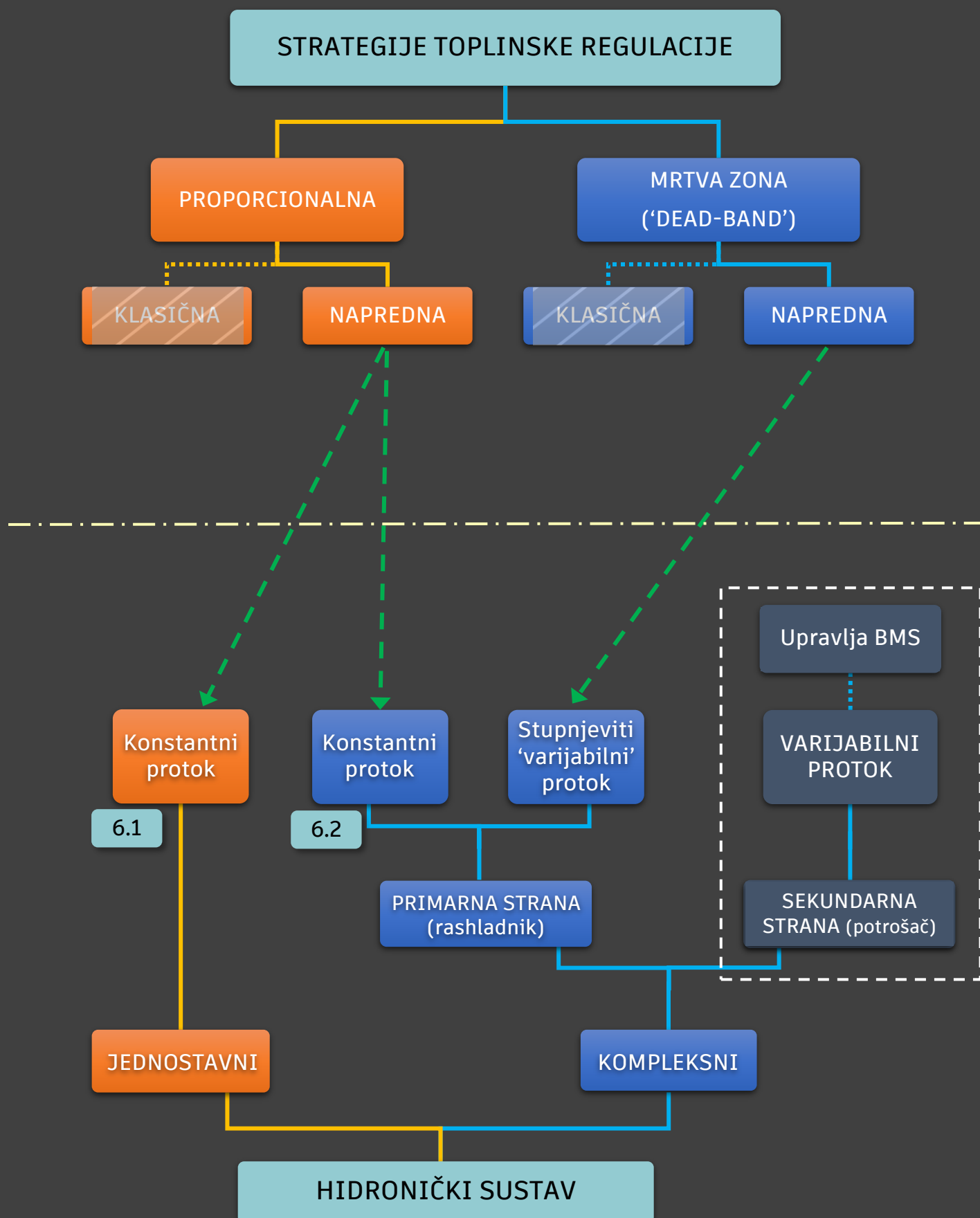
- Izlazna temperatura vode iz chillera (= temperatura polaza)

Start/stop kompresora:

- Kompresori se uključuju i isključuju na temelju ulazne temperature vode (glikola) u rashladnik, koja odgovara povratnoj temperaturi iz sustava

Inverterska regulacija:

- Rad frekvencijskih pretvarača reguliran je na temelju izlazne temperature vode iz rashladnika, odnosno vrijednosti „set pointa”



KONSTANTNI PROTOK – RASHLADNIK S PUMPOM

Ovaj princip toplinske regulacije vrijedi za sljedeće konfiguracije chillera u sklopu sustava:

- Rashladnik ugrađen u jednostavan hidronički sustav s jednom zajedničkom pumpom (Poglavlje 4.1)
- Rashladnik s primarnom pumpom, ugrađen u kompleksni hidronički sustav (Poglavlje 4.2a)

Princip uključivanja kompresora

Početna točka uključivanja prvog kompresora određena je zadanom vrijednosti (set point) polazne vode uvećanom za temperaturni diferencijal kompresora ΔT_{cpr} .

Nema vremenski uvjetovanog odmaka uključivanja (ili isključivanja) bilo kojeg kompresora s obzirom na vrijednost ulazne temperature, ali postoje određeni vremenski uvjeti u logici pokretanja, poput minimalnog vremena rada kompresora.

Ukupni raspoloživi temperaturni diferencijal ΔT raspodjeljuje se na broj kompresora u rashladniku N_{cpr} (od 1 do 4), čime se dobiva diferencijal po kompresoru ΔT_{cpr} :

$$\Delta T_{cpr} = (\Delta T / N_{cpr})$$

Svaki sljedeći kompresor uključuje se kada povratna temperatura iz sustava dosegne:

$$\text{Set point} + (\Delta T_{cpr} \times n) \quad (\text{gdje je } n \text{ broj pojedinog kompresora u sekvenci})$$

Ovaj princip osigurava stupnjevito uključivanje kompresora ovisno o porastu rashladnog opterećenja.

Princip isključivanja kompresora

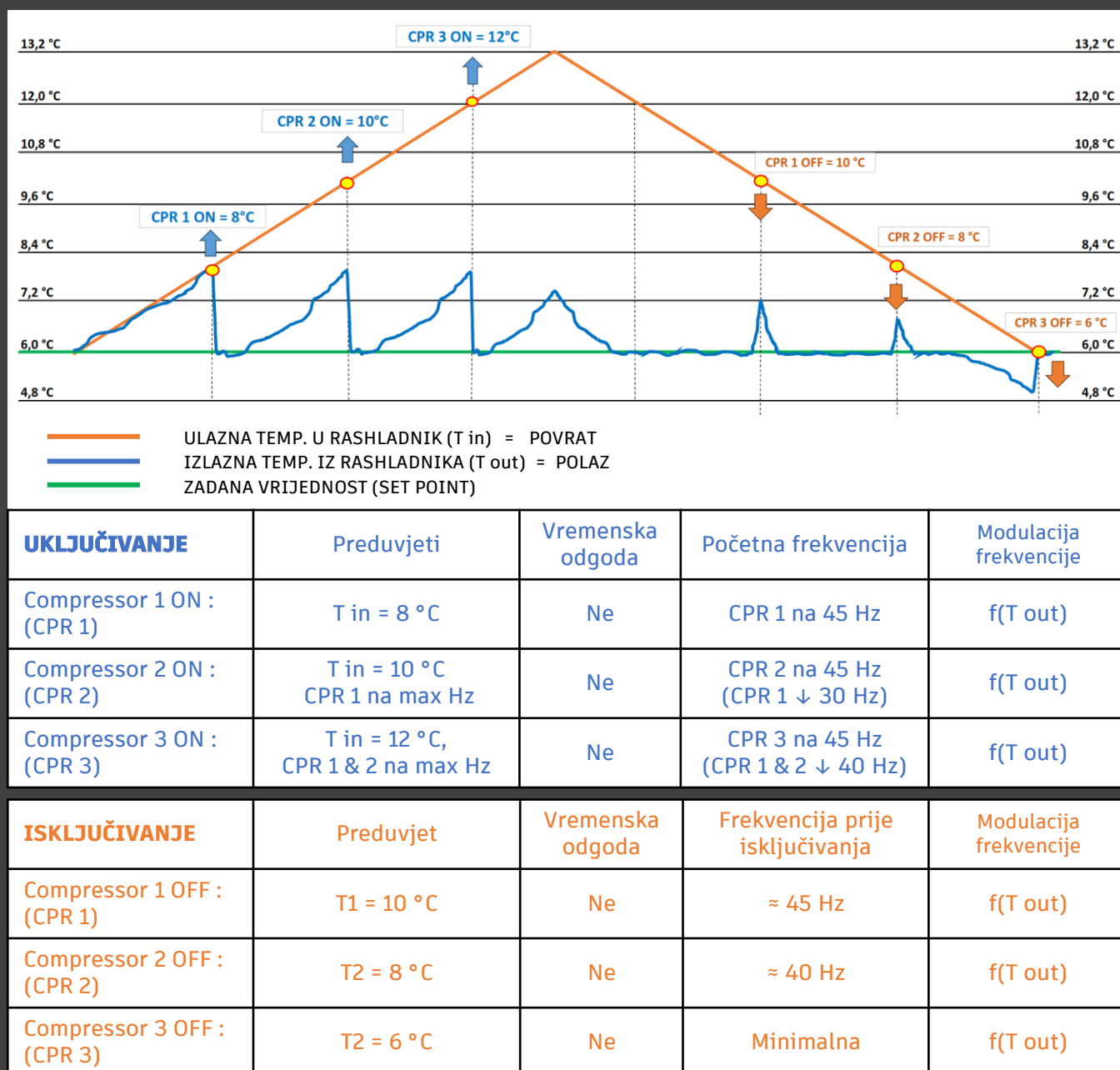
Posljednji kompresor isključuje se kada povratna temperatura dosegne zadanu vrijednost (setpoint). Svaki prethodni kompresor isključuje se pri graničnoj vrijednosti definiranoj izrazom:

$$\text{Setpoint} + (\Delta T_{cpr} \times n) \quad (\text{gdje je } n \text{ broj pojedinog kompresora u sekvenci})$$

Ova logika osigurava stupnjevito rasterećenje (unloading) sustava uz uravnotežen rad kompresora, što se može prikazati na dijagramu na sljedećoj stranici.

Napomena: Svi kompresori moraju biti opremljeni frekvencijskim pretvaračima. ON/OFF kompresori nisu dopušteni u ovakvom tipu regulacije!

Sljedeći primjer prikazuje strategiju toplinske regulacije rashladnika sa 3 nezavisna rashladna kruga ($N_{cpr}=3$). Temperaturni režim je 12/6 °C, što znači $\Delta T=6$ K i **setpoint vrijednost 6 °C**.

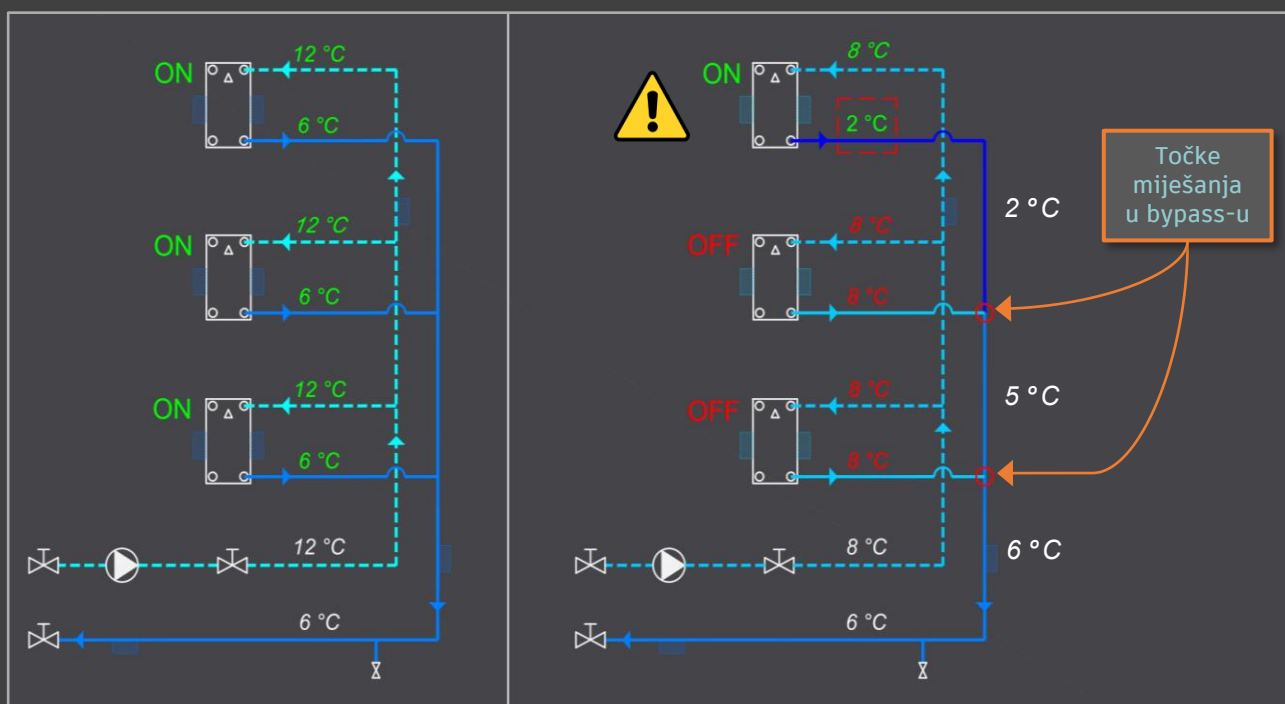


Temperaturni diferencijal uključivanja kompresora iznosi: $\Delta T_{cpr} = (\Delta T / N_{cpr}) = 2\text{ K}$.

Prvi kompresor se pokreće kada ulazna temperatura bude 2 K viša od **vrijednosti setpointa**. Za svako daljnje povećanje **ulazne temperature** od 2 K, pokreće se sljedeći kompresor. Kada ulazna temperatura padne na 10 °C, što ukazuje na smanjenje rashladnog opterećenja, isključuje se prvi kompresor. Drugi kompresor isključuje se pri 8 °C, a posljednji (treći) pri vrijednosti zadane temperature, što označava da više nema rashladnog opterećenja.

Napomena: Stvarni rad može se razlikovati ovisno o temperaturnom režimu, broju kompresora i drugim parametrima sustava.

Efekt zaobilaženja, tzv. „bypass efekt” se javlja tijekom rada rashladnika pri djelomičnom opterećenju kada je smanjeni ΔT , a izražen je tijekom procesa pokretanja i isključivanja kompresora. Kada je kompresor isključen, njegov isparivač ne sudjeluje u prijenosu topline pa voda prolazi kroz njega bez hlađenja i zadržava ulaznu temperaturu. Topliji tok iz neaktivnog isparivača zatim se miješa s ohlađenim tokom iz aktivnih isparivača, što uzrokuje porast temperature polazne vode. Kako bi se kompenziralo to miješanje, aktivni isparivači moraju ohladiti medij na temperaturu **nižu od zadane temperature polaza**.

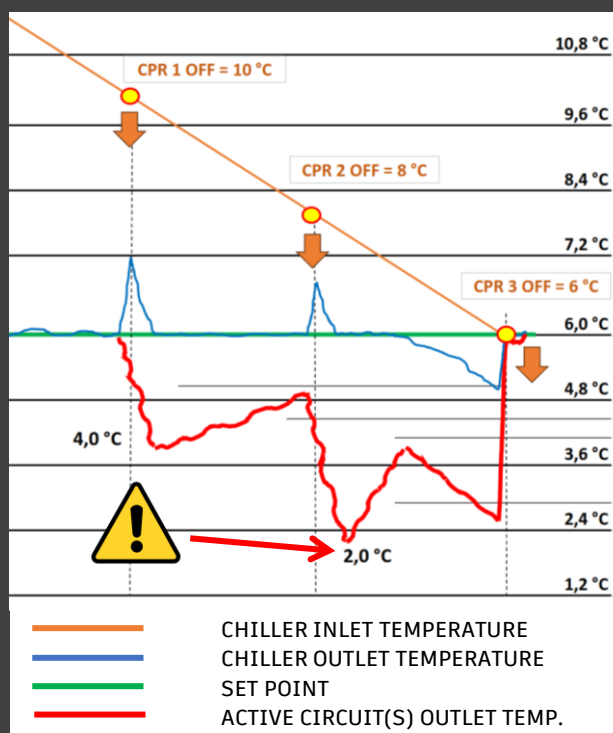


Rashladnik radi pri nazivnom opterećenju i protoku

Parcijalno opterećenje – samo 1 isparivač aktivan, 2 isparivača su neaktivna (u bypass-u)

Primjer: pri temperaturnom režimu 12/6 °C, kada su 2 od 3 kompresora isključena zbog niskog rashladnog opterećenja, jedini preostali aktivni krug tj. isparivač mora ohladiti medij na 2°C (označeno crvenom linijom) kako bi kompenzirao miješanje polazne vode zbog efekta zaobilaženja (bypass) neaktivnih krugova.

Bypass efekt može uzrokovati smrzavanje rashladnog medija unutar isparivača. To je posebno opasno u sustavima koji koriste vodu pri niskom režimu, npr. 10/5°C. Također je opasno kad je protok manji od nazivnog, što dodatno narušava izmjenu topline u samom isparivaču.



– RASHLADNIK S PRIMARNOM PUMPOM PO KRUGU

Ovaj princip toplinske regulacije vrijedi za sljedeće vrste rashladnika vode (chillera) i konfiguracija sustava:

- Rashladnik vode s primarnom pumpom po rashladnom krugu, ugrađen u kompleksni hidronički sustav ([Poglavlje 4.2b](#))
- Paralelna konfiguracija rashladnika vode (s primarnom pumpom po rashladniku), ugrađena u kompleksni hidronički sustav ([Poglavlje 4.2c](#))

U obje konfiguracije, rashladnik vode radi sa stupnjevito promjenjivim protokom. Protok se mijenja u diskretnim koracima ovisno o broju aktivnih kompresora (rashladnih krugova), pri čemu svaki krug ima konstantni protok, neovisan o drugim krugovima. Na taj se način tijekom rada pri djelomičnom opterećenju održava ista temperaturna razlika (ΔT) na svim rashladnim krugovima. Sukladno tome, ako rashladnik ima primarnu pumpu po krugu, nema efekta zaobilaženja opisanog u [Poglavlju 6.1a](#).

Princip uključivanja kompresora

Prvi kompresor se pokreće pri unaprijed definiranoj vrijednosti **ispod** nominalne povratne temperature iz sustava, tj ulazne temperature u rashladnik. Svaki sljedeći kompresor pokreće se kada povratna temperatura dosegne istu vrijednost, ali **iznad** nazivne povratne temperature. Takav koncept zasniva se na principu 'mrtve zone' (dead band), odnosno postoji temperaturna histereza.

Nema vremenskog odmaka pri uključivanju (ili isključivanju) u odnosu na vrijednost povratne temperature. Međutim, primjenjuju se određeni vremenski uvjetovani odmaci pri uključivanju, npr. minimalno potrebno vrijeme rada kompresora na 100% kapaciteta (pri maksimalnoj frekvenciji) kao obvezan preduvjet prije dozvole uključivanja sljedećeg kompresora u rad.

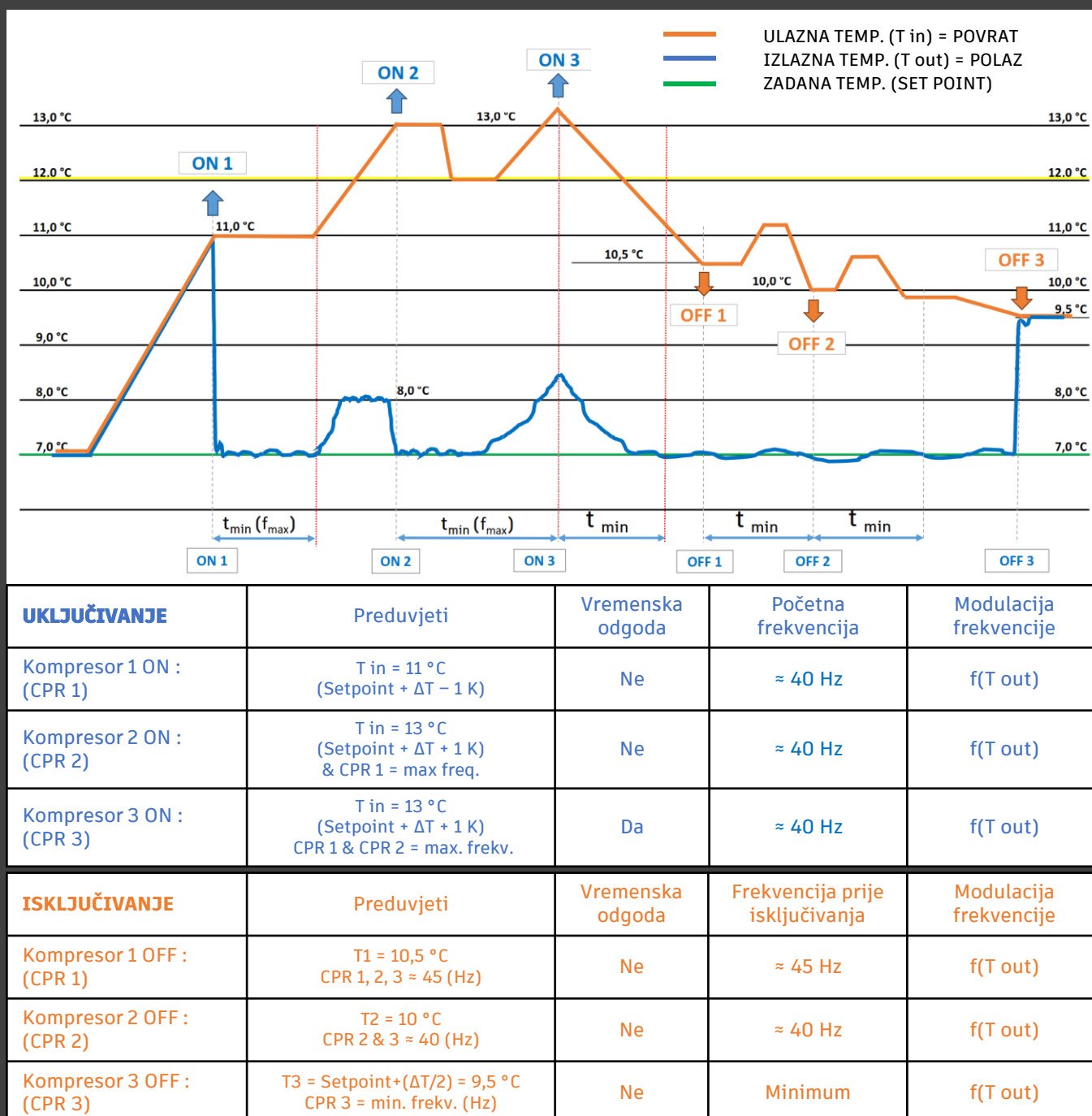
Princip isključivanja kompresora

Kompresori se isključuju prema FIFO (first-in, first-out) principu.

Posljednji kompresor se isključuje kada povratna temperatura dosegne **setpoint + $0,5 \times \Delta T$** . Svaki prethodni kompresor isključuje se pri temperaturnoj diferenciji koja ovisi o ukupnoj ΔT i broju kompresora. Ovaj princip isključivanja osigurava uravnoteženo rasterećenje sustava i može se prikazati na sljedećem grafu.

Napomena: Svi kompresori moraju biti opremljeni frekvencijskim pretvaračima. ON/OFF kompresori nisu dopušteni u ovakvom tipu regulacije!

Sljedeći primjer prikazuje strategiju toplinske regulacije rashladnika sa 3 nezavisna rashladna kruga ($N_{cpr}=3$). Temperaturni režim je 12/7 °C, što znači $\Delta T=5$ K i **set point hlađenja 7 °C**.



U ovom primjeru histereza (dead band) iznosi ± 1 K u odnosu na temperaturu povratne vode od 12 °C. Uključivanje prvog kompresora ovisi isključivo o temperaturi povratne vode.

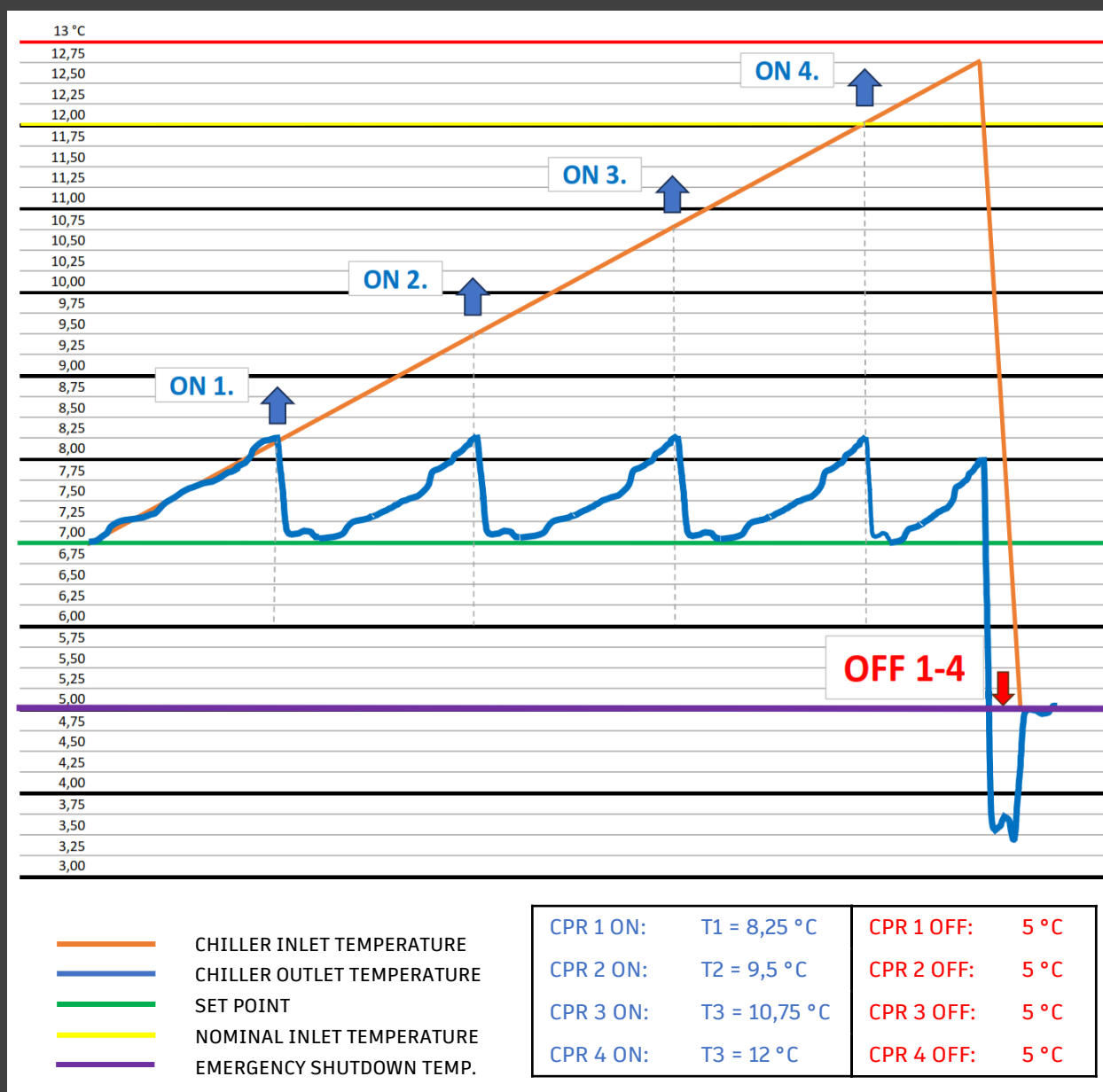
Uključivanje svakog sljedećeg kompresora moguće je tek nakon što prethodno aktivni kompresor dosegne maksimalnu dopuštenu radnu frekvenciju te nakon isteka minimalnog dopuštenog vremena između pokretanja dvaju kompresora. Zbog tih uvjeta prag uključivanja svakog sljedećeg kompresora može biti pomaknut na višu temperaturu povratne vode. Stoga se treći kompresor uključuje pri temperaturi povratne vode nešto višoj od 13 °C. Uvjeti za isključivanje pojedinih kompresora ovise o projektnim karakteristikama sustava, uključujući minimalnu temperaturnu razliku (ΔT) potrebnu za stabilan rad kompresora pri minimalnoj frekvenciji, minimalno dopušteno vrijeme neprekidnog rada te ostale parametre regulacijske strategije.

Ako temperatura na ulazu u rashladnik brzo padne na vrijednost koja je 2 K niža od zadane temperature (setpointa), svi kompresori moraju se istodobno zaustaviti. Postupak je sljedeći:

- Potpuno se zatvaraju elektronički ekspanzijski ventil (EEV) svakog kruga
- Čeka se nekoliko sekundi (unaprijed definirana vrijednost)
- Zaustavljaju se svi kompresori.

Napomena: Frekvencija kompresora u trenutku zaustavljanja može iznositi 50 Hz ili manje.

Sljedeći dijagram prikazuje princip regulacije rashladnika vode (chillera) s četiri neovisna rashladna kruga, pri čemu svaki krug ima jedan kompresor. Temperaturni režim iznosi 12/7 °C, što znači da je polazna temperatura hlađenja (setpoint) 7 °C. Ako temperatura vode na ulazu u rashladnik iznenada padne na 5 °C, aktivira se postupak hitnog zaustavljanja (emergency shutdown) kako bi se zaštitio rashladnik od rada izvan dopuštenih granica.



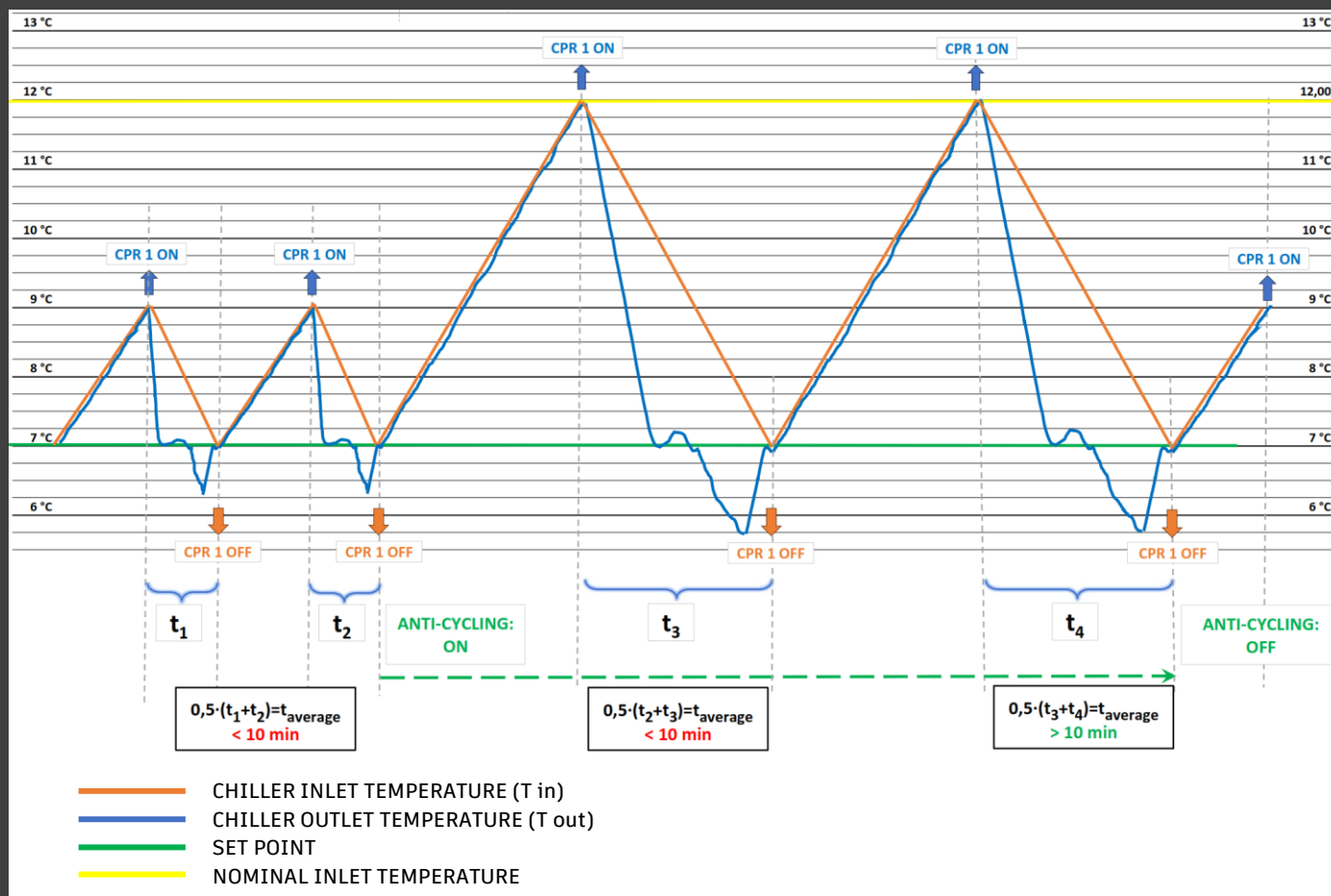
Zaštita od kratkog cikliranja kompresora (eng. anti-cycling) javlja se kada je opterećenje sustava niže od minimalnog kapaciteta jednog kompresora (odnosno rashladnog kruga). Kompresor tada radi u ON/OFF režimu i na minimalnoj frekvenciji.

‘Anti-cycling’ način rada aktivira se ako je tijekom posljednja dva ciklusa kompresor u prosjeku radio kraće od 10 minuta. Kada je anti-cycling način aktiviran, kontroler povećava temperaturni diferencijal uključivanja (ΔT_{cpr}) tog kompresora da bude jednak nazivnoj ΔT vrijednosti.

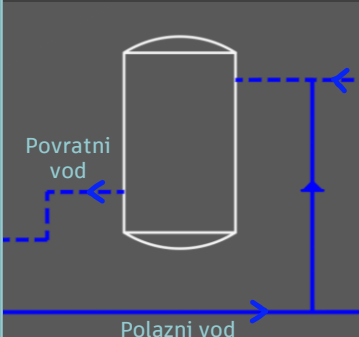
Anti-cycling način rada deaktivira se kada je zabilježen prosječni rad dulji od 10 minuta u zadnja dva ciklusa. Ova logika osigurava:

- ✓ dulje vrijeme rada kompresora
- ✓ pravilnu cirkulaciju ulja i podmazivanje
- ✓ smanjeno trošenje zbog čestog uključivanja i isključivanja
- ✓ produljen vijek trajanja kompresora

Sljedeći dijagram prikazuje primjer pokretanja anti-cycling zaštite. Režim rada je 12/7 °C. Startni diferencijal kompresora iznosi 2 K iznad zadane vrijednosti (set pointa) od 7 °C. Budući da je rashladno opterećenje prenisko, prosječno vrijeme rada kompresora kraće je od 10 minuta u prva dva ciklusa (t_1 i t_2). Kontroler povećava diferencijal pokretanja za 3 K tako da ukupni diferencijal iznosi $\Delta T=5$ K kako bi smanjio cikliranje kompresora. Kad je prosječno vrijeme rada u zadnja dva ciklusa (t_3 i t_4) prešlo 10 minuta, zaštita se deaktivirala.



	PRIMARNA STRANA (CHILLER)		SEKUNDARNA STRANA (POTROŠAČ)	
	Sekundarna pumpa	Hidraulička separacija ('Decoupling')	Troputni ventil 	Dvoputni ventil ili PICV 
Hidronički sustavi				
Jednostavni sustav (jedna zajednička pumpa) 4.1	NE 	NE 	DA 	NE 
Kompleksni sustav (primarna pumpa) 4.2a	DA 	DA 	DA 	DA 
Kompleksni sustav (primarna pumpa po rashladnom krugu) 4.2b	DA 	DA 	NE 	DA 
Kompleksni sustav (Paralelni spoj rashladnika) 4.2c	DA 	DA 	NE 	DA 

Spremnik ugrađen na povratnom vodu	Povećanje toplinske inercije sustava	Stabilizacija povratne temperature	Pohrana rashladne energije
	DA 	DA 	NE 