

# RASHLADNI PROCESI

PREDRAG KRALJ

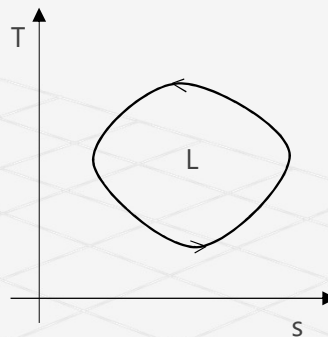
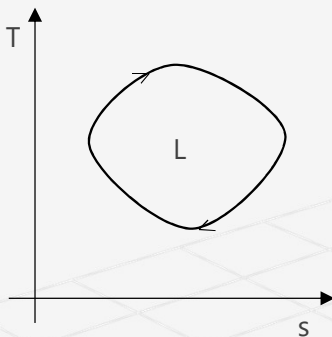
*Parno-kompresijski rashladni procesi*

## Desnokretni i lijevokretni procesi

---

U okviru razmatranja procesa s vodenom parom kao radnom tvari obrađeni su osnovni **desnokretni** procesi. Desnokretni procesi, samo za podsjetnik, dio uložene topline pretvaraju u mehanički rad, a zovu se prema smjeru odvijanja procesa kao u smjeru kretanja kazaljke sata.

**Ljevokretni** su procesi suprotni u smjeru odvijanja, ali prije svega u namjeni. Kod njih dolazi do utroška rada. Rezultat uloženog rada jest podizanje topline s niske temperaturne razine na višu temperaturnu razinu te se zovu dizalice topline ili toplinske pumpe. Dijagrami dvaju proizvoljnih procesa, desnokretnog i lijevokretnog, prikazani su na slici dolje. Površina unutar zatvorene krivulje, u slučaju desnokretnog procesa, predstavlja dobiveni rad, dok u slučaju lijevokretnog procesa predstavlja utrošeni rad. Ta bi se površina izračunala integriranjem (određivanjem površine) ispod gornje i donje krivulje te izračunavanjem razlike.



# Carnot-ov proces

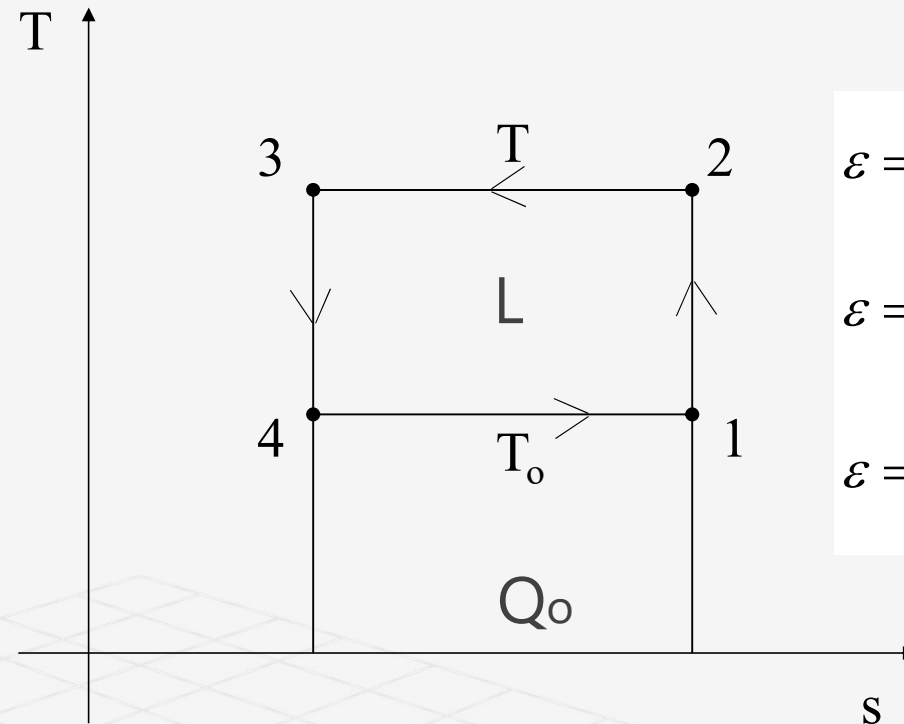
Idealni je proces Carnot-ov proces, koji se odvija između dvije adijabate 1 – 2 i 3 – 4 te dvije izoterme 2 – 3 i 4 – 1.

U prethodnim ste razmatranjima obradili desnokretni, no sad se radi o lijevokretnom Carnotovom ciklusu.

Površina pravokutnika 1 - 2- 3- 4 – 1 predstavlja, kao što znamo, uloženi rad  $L$ , dok površina ispod izoterme 4 – 1 predstavlja ostvareni rashladni učin.

Promotrimo efikasnost procesa shematski prikazanog na slici desno. Nepraktično je i neispravno analizirati efikasnost ovog procesa pomoću toplinskog stupnja iskoristivosti ( $\eta_t$ ) kako se to činilo kod desnokretnih procesa.

**Sadi Carnot**, in full **Nicolas-léonard-sadi Carnot**, (born June 1, 1796, [Paris](#), Fr.—died Aug. 24, 1832, Paris), French scientist who described the [Carnot cycle](#), relating to the theory of heat engines.



$$\varepsilon = \frac{Q_o}{L}$$
$$\varepsilon = \frac{T_o \cdot \Delta s}{(T - T_o) \Delta s}$$
$$\varepsilon = \frac{T_o}{T - T_o}$$

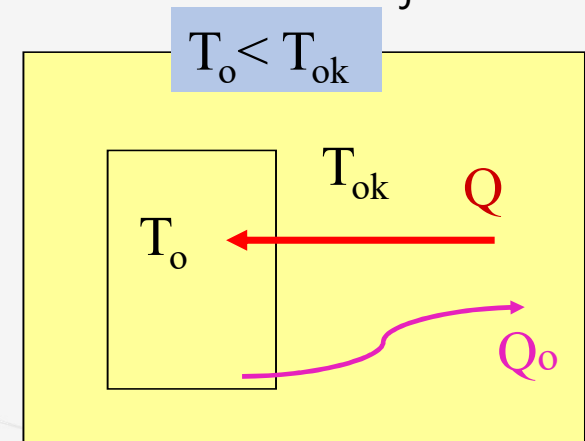
## Efikasnost lijevokretnog Carnotovog ciklusa

Efikasnost se procjenjuje omjerom dobivenog i uloženog pa je, imajući u vidu svrhu rashladnog procesa, definirana kao omjer ostvarenog rashladnog učina  $Q_o$  i za to uloženog rada  $L$ . Tako definirani omjer zove se **rashladni množilac**, a u stručnoj će se literaturi često pojaviti pod oznakom COP (od engl. Coefficient of Performance). Budući da se izmjena toplina kod ovog ciklusa odvija izotermno, lako je izračunati površine pravokutnika ispod izoterme 2 – 3 i 4 – 1 pa se rashladni množilac može napisati i drugačije.

Konačni nam izraz za rashladni množilac lijevokretnog Carnotovog ciklusa ukazuje kako ovisi samo o dvije temperature  $T$  i  $T_o$  i, čisto teoretski gledano, može ga se 'popraviti' smanjivanjem razlike između te dvije temperature. Postoje li tu ograničenja?

Na slici desno prikazan je slučaj kada postoji prostor ograničenog volumena temperature  $T_o$  koji se nalazi u 'okolini', izoliranoj od ostataka svijeta, temperature okoline  $T_{ok}$ . Temperatura okoline je viša te bi u slučaju toplinskog kontakta, prema prije utvrđenim zakonima prirode, toplina  $Q$  morala 'teći' u smjeru crvene strelice, sve dok se ne postigne toplinska ravnoteža, tj. temperature se ne izjednače.

Međutim, svrha je rashladne tehnike postići upravo suprotno, kako to pokazuje ljubičasta strelica: **postići temperaturu nižu od okolišne i održati je!**



(nastavak)

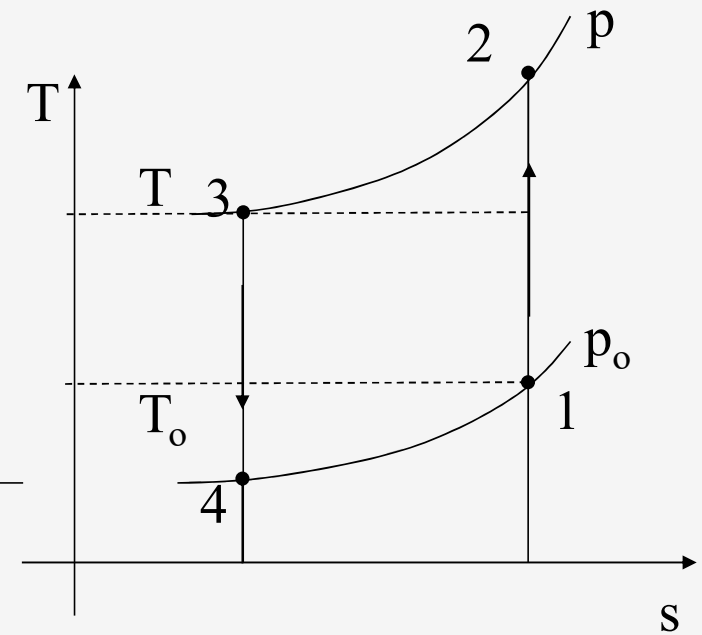
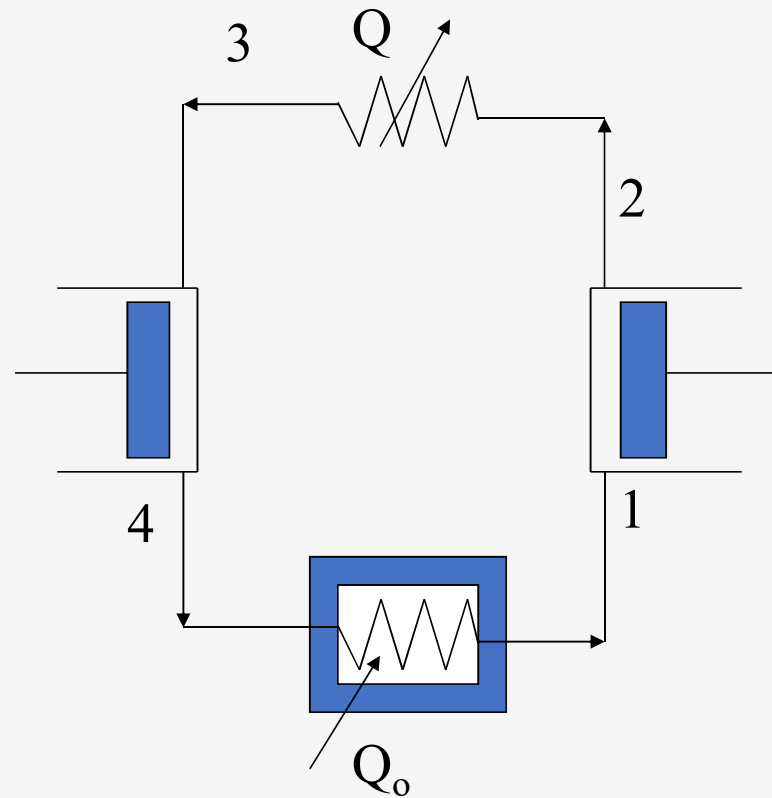
---

Dakle, primjenom parno-kompresijskih rashladnih uređaja (procesu) 'izigrava' se prirodni zakon jer odvodimo toplinu niže temperature i predajemo ju okolini koja je više.

To je, nažalost, ograničavajuće kada želimo poboljšati rashladni množilac. Iako cijelim procesom izigravamo prirodu, to ne možemo učiniti kod procesa 4 – 1 i 2 – 3. Kako god se ta izmjena topline odvijala (izotermno, politropski, latentna ili senzibilna) temperatura radnog fluida mora kod 2 – 3 biti viša od sredstva koje treba preuzeti toplinu  $Q$ . Također, njegova temperatura kod 4 – 1 mora biti niža od sredstva kojemu se želi oduzeti toplinu  $Q_0$ . **Iz ovoga slijede, poznavajući karakteristike radnog fluida, radni tlakovi kompresora!**

# Zračni rashladni proces

Ovaj se proces koristio u početku razvoja rashladne tehnike, kada još nisu bili poznati procesi ukapljivanja plinova niti razvijeni plinovi koji bi prema svojim svojstvima bili pogodni za primjenu u rashladnim uređajima.



Nedostaci:

1. Carnot
2. toplinski kapacitet
3. iskoristivost

Poboljšanje: dvostepenom kompresijom

(nastavak)

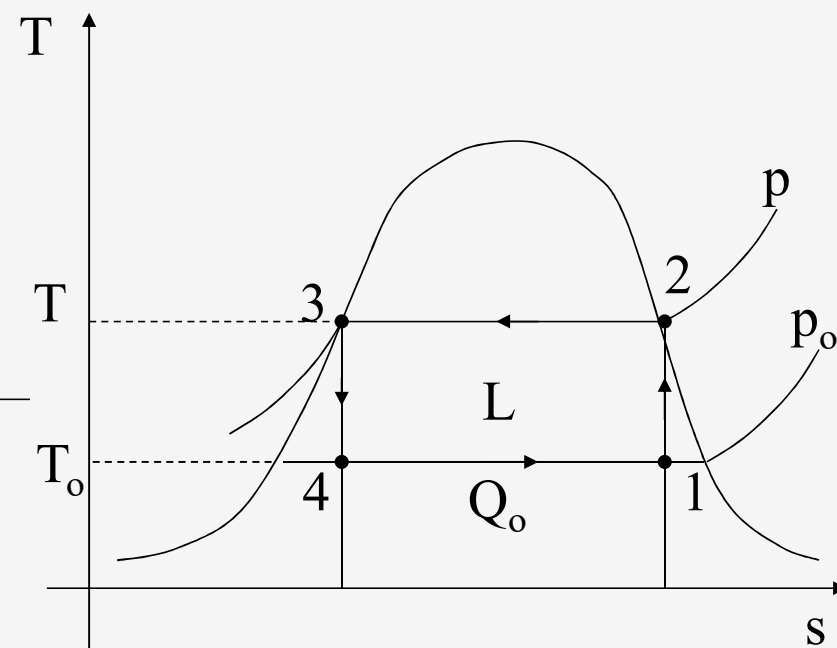
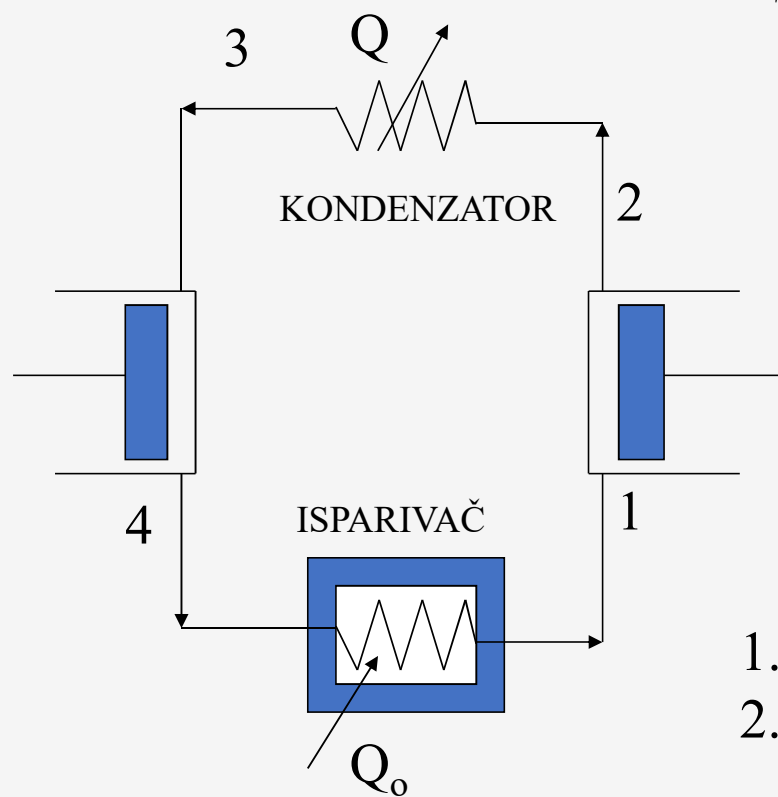
---

Zračni rashladni sustav s prethodne stranice sastoji se od kompresijskog cilindra koji komprimira zrak s niže na višu temperaturnu razinu od 1 do 2, izmjenjivača topline koji toplinu  $Q$  predaje okolini od 2 do 3, 'ekspanzijskog cilindra' (ili zračne turbine) koji vraća sav uloženi rad kompresije od 3 do 4 te izmjenjivač topline koji ostvaruje rashladni učin  $Q_o$  od 4 do 1. Na  $T - s$  dijagramu pored sheme vide se promjene stanja zraka koje se događaju u odgovarajućim elementima sustava, a isprekidanim su linijama označene izoterme Carnotovog procesa.

Lako je uočiti da se izmjene toplina (2 – 3 i 4 – 1) ne odvijaju izotermno. To je, naravno, zbog 'prirode' zraka. Zbog svojstava plinova koji čine zrak, mora se raditi o senzibilnoj toplini pa ukoliko se želi na kraju promjene 2 – 3 postići temperaturu  $T=T_3$ , tada nakon kompresije temperatura zraka mora biti viša –  $T_2$ . Također, ukoliko je nakon preuzete topline u rashladniku potrebno postići stanje zraka  $T_o=T_1$ , tada na početku preuzimanja topline stanje mora biti  $T_4$ . Ukoliko je Carnotov proces idealan, **tada se udaljavanjem od njega mora smanjivati rashladni množilac. Dokažimo da je tako!**

Osim toga zračni rashladni sustav ima još dva bitna nedostatka: prvo, glomazan je jer za ostvarivanje prihvatljivih vrijednosti rashladnih učina sustavom mora cirkulirati velika količina zraka budući ima mali specifični toplinski kapacitet i drugo, zbog mehaničkih gubitaka ekspanzijom se ne ostvaruje povrat cijelog uloženog rada, a uređaj se nepotrebno komplicira.

## Parni (u zasićenom području)



1. Carnot
2. veći toplinski kapacitet



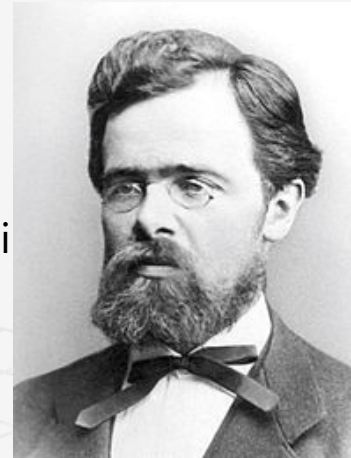
(nastavak)

---

Proces prikazan na prethodnoj slici, ima sve elemente kao i zračni, no radni fluid mijenja agregatno stanje pa je za razliku od zračnog ciklusa kod kojeg se radi o senzibilnoj toplini, ovdje riječ o latentnoj. Izmjenjivači topline su stoga kondenzator i isparivač.

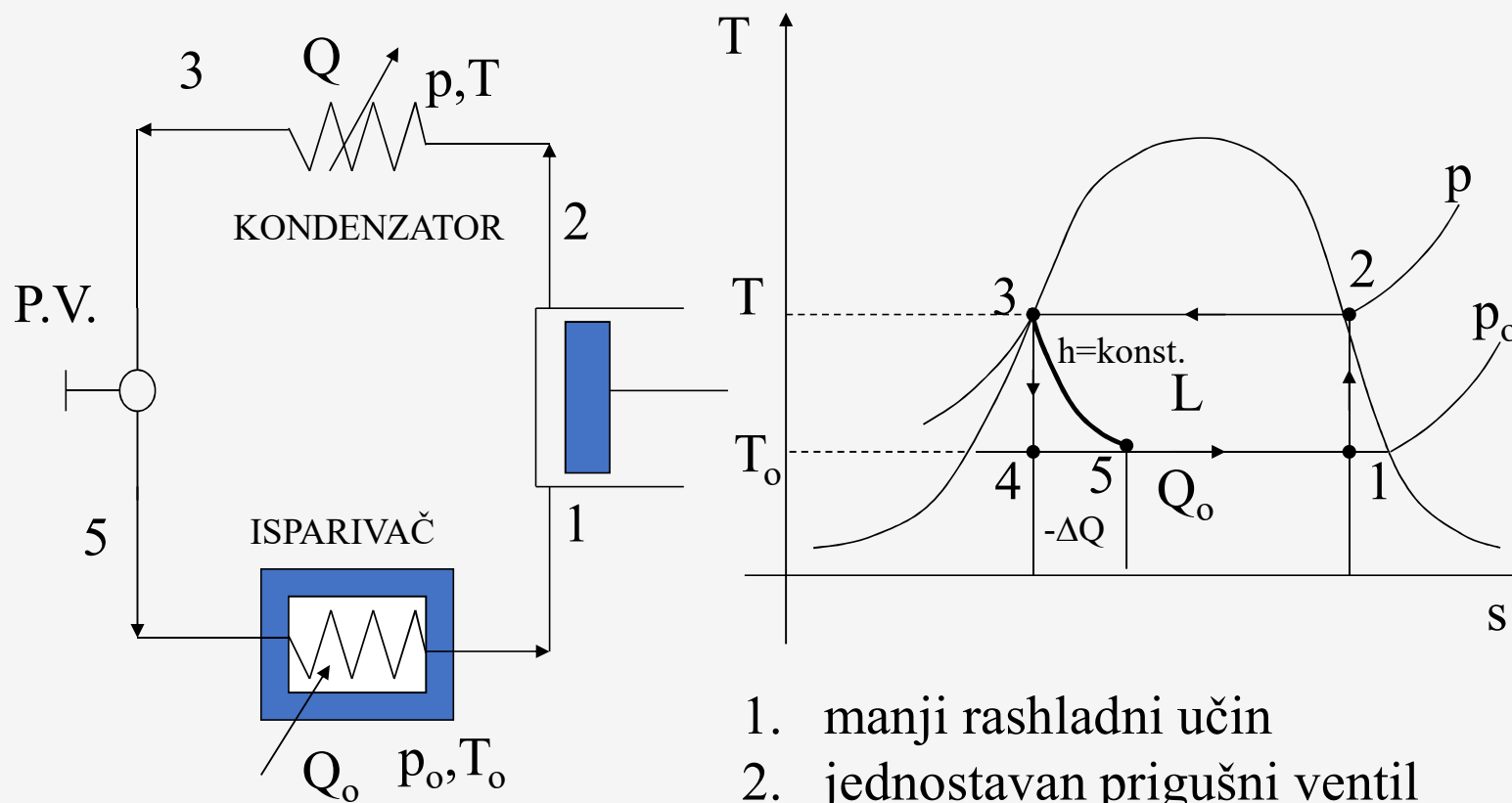
Ovakav je proces postao moguć kada su razvijeni procesi u uređaji za ukapljivanje plinova te sintetiziranje novih. Ukapljivanje plinova razvija se s atomskom teorijom tvari, a u drugoj polovici 19-tog stoljeća razvijaju se procesi i uređaji koji to omogućuju, npr. Linde-ov proces.

Prvi rashladni procesi koriste amonijak, sumporni dioksid, metil klorid ili propan. U prvoj polovici 20-tog stoljeća proizvedena su sredstva koja su imala izvrsna svojstva za primjenu u rashladnoj tehnici – Freoni (zaštićeno ime nekadašnje tvrtke DuPont). Naziv se koristi za sve CFC, HCFC i HFC spojeve. Danas se osim njih koriste u HC te anorganske tvari (ugljični dioksid i amonijak).



**Carl von Linde**, punim imenom **Carl Paul Gottfried Linde** ([Berndorf](#), 11. lipnja 1842. – [München](#), 16. studenog 1934.), njemački [inženjer](#), industrijalac i [izumitelj](#). Bio je [profesor](#) primijenjene [termodinamike](#) u Münchenu. Konstruirao je [rashladni stroj](#) s [amonijakom](#) (1876.) te razvio postupak za [ukapljivanje plinova](#) zasnovan na Joule-Thomsonovu učinku (1895.), poslije po njemu nazvan Lindeov postupak. Izumio je i načine za dobivanje čistoga [kisika](#) (1902.) i čistoga [dušika](#) (1903.). Godine 1879. osnovao je dioničko društvo *Gesellschaft für Linde's Eismaschinen*, koje se bavilo proizvodnjom rashladnih strojeva, a danas posluje pod nazivom *Linde*.

## Parni (s prigušnim ventilom)



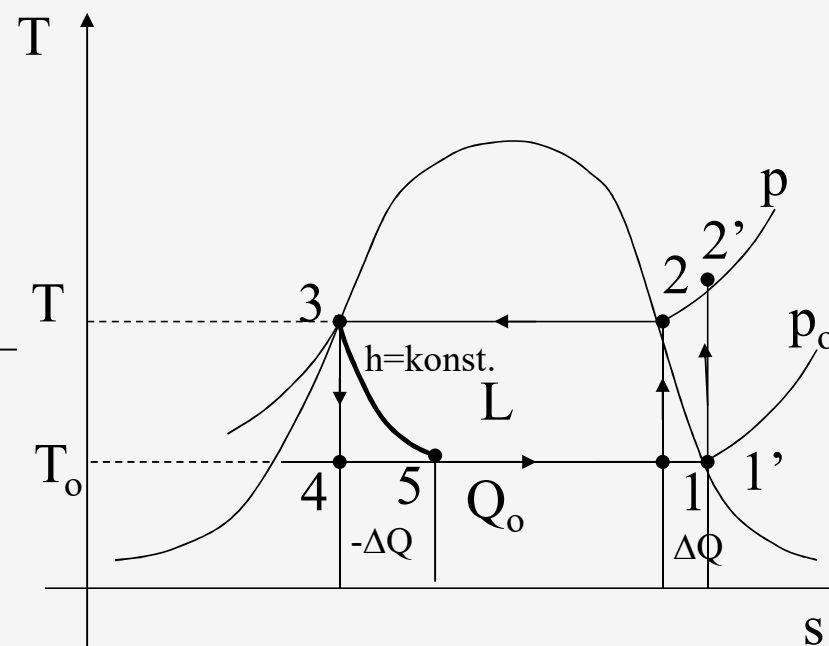
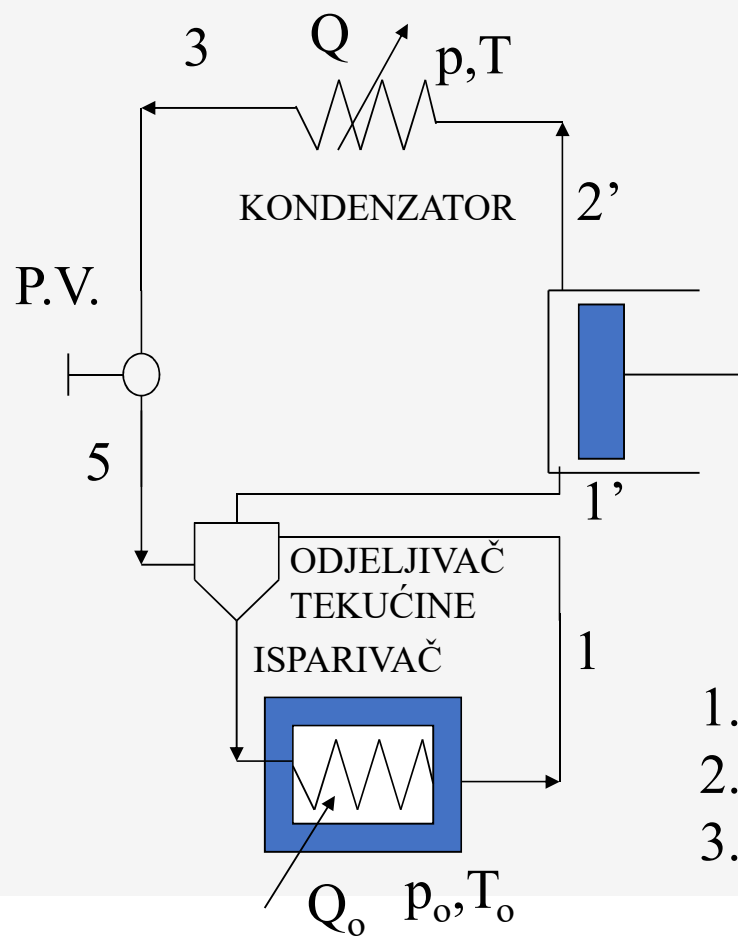
(nastavak)

---

Jedan od prethodno spomenutih nedostataka riješen je izvedbom sustava kao na prethodnoj slici. Ekspander je zamijenjen elementom u kojem se dešavala promjena koju zovemo prigušivanje pa se proces ne odvija više po liniji konstantne entropije 3 – 4, već od 3 - 5. Može se raditi o ventilu kako je navedeno na prethodnoj stranici, ali se može raditi o bilo kojem elementu cjevovoda u kojem se ostvaruje prigušivanje: prigušnica ili dijafragma, kapilara. O toj je promjeni stanja bilo govora i kod vodene pare, a odvija se pri konstantnoj entalpiji. Doduše, rashladni se učin nešto smanjuje ( $\Delta Q$  je površina ispod izoterme 4 do 5), ali je cijeli uređaj jednostavniji. Budući se radi o jednakom radu i smanjenom rashladnom učinku, jasno je da ovaj proces ima i manji rashladni množilac od prethodnog.

Oba do sada obrađena procesa imaju još jedan nedostatak – kompresor usisava mokru paru sadržaja x. Takav rad može dovesti do hidrauličkih udara u cilindrima kompresora pa se elementi kompresora moraju znatno predimenzionirati i u kompresor ugraditi zaštitne elemente koji trebaju spriječiti takve havarije.

# Parni (u pregrijanom području)



1. veći utrošeni rad
2. veći rashladni učin
3. suhi usis

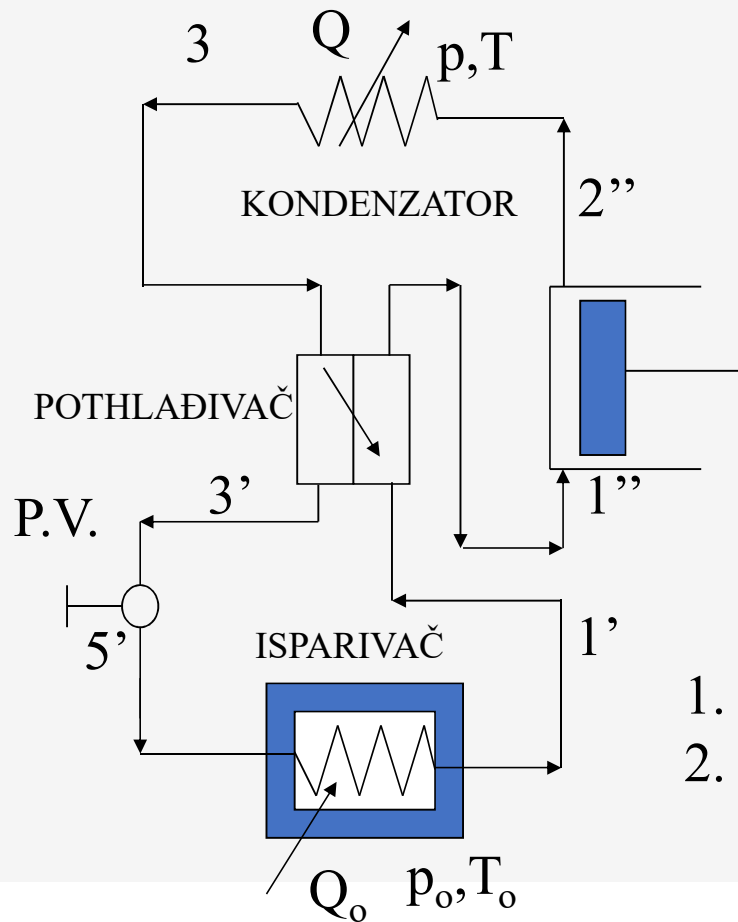
(nastavak)

---

S ovim je rješenjem otklonjen problem s usisom mokre pare. Između isparivača i kompresora ugrađen je odjeljivač kapljica. Iz njega se u isparivač slijeva vrela tekućina niskog tlaka (podsjećam kako pojam vrela tekućina označava stanje na donjoj, tj. lijevoj graničnoj krivulji, no nikako da bi se radilo o tekućini visoke temperature). Čak i ako se u isparivaču ne postigne stanje suhozasićene ili pregrijane pare, ona se vraća u odjeljivač, tekuća se faza sakuplja zbog veće gustoće na dnu i vraća ka isparivaču, a plinovitu usisava kompresor. Na taj je način mehaničkim putem spriječeno da kompresor usisava mokru paru stanja 1 pa sada usisava suhozasićenu stanja 1'. Ujedno je povećan i rashladni učin za drugi  $\Delta Q$  koji je određen površinom ispod dijela izoterme  $T_0$  od 1 do 1'. Iako nebitno za velike brodske sustave, ovakav se element (odjeljivač kapljica) ugrađuje u manje uređaje (ne one najmanje) koji imaju kapilaru kao prigušni element i zove se usisni akumulator.

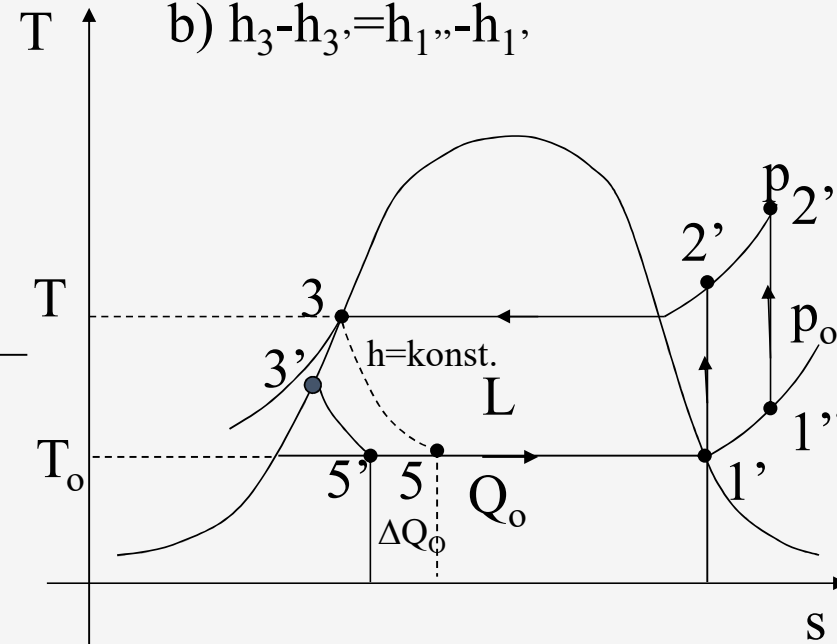
Rashladni je množilac lošiji od Carnotovog, ali je uređaj pojednostavljen i time, jeftiniji. Ciklus 1' – 2' – 3 – 5 – 1' odgovara modernom ciklusu parno-kompresijskog rashladnog uređaja, iako se postiže na nešto drugačiji način.

# Parni (s pothlađivačem kondenzata)



Napomena: a) 3' na krivulji

b)  $h_3 - h_{3'} = h_{1''} - h_{1'}$



1. povećanje rashladnog učina
2. još veće udaljavanje od Carnota

(nastavak)

---

Svi rashladni ciklusi većih rashladnih učina odvijaju se kao na prethodnoj slici. Ugrađen je element kojega zovemo **pothlađivač kondenzata**. To je jednostavan protustrujni izmjenjivač topline. U jednom smjeru struji topli kondenzat iz kondenzatora, dok u suprotnom smjeru ide hladna para iz isparivača prema usisu kompresora. Dakle, prema prije usvojenim zakonima topline struji s više temperature k nižoj. Nebitno je agregatno stanje, ali je bitno da je kondenzat višeg tlaka i posljedično više temperature te on predaje toplinu pari, koja je niskog tlaka i posljedično niske temperature. Na dijagramu nije nacrtano, ali ona je čak i malo pregrijana. Sto opet ne znači visoku temperaturu. Kondenzatu pada temperatura pa kažemo da se pothlađuje.

Kako to utječe na proces? Očito je s dijagrama da proces prigušivanja više ne ide po liniji  $h = \text{konst.}$  od 3 do 5 već po liniji  $h = \text{konst.}$  od 3' do 5' (na dijagramu se točka 3' nalazi na izobari  $p$ , no kao i kod vodene pare zanemarujemo to i uobičajeno je crtamo na graničnoj krivulji). Time se povećava rashladni učin za  $\Delta Q$  što je površina ispod 5' do 5. Para se po izlasku iz isparivača pregrijava (od topline primljene od kondenzata) s 1' do 1". Taj dio topline (ispod izobare od 1' do 1") ne predstavlja rashladni učin. **Važno je znati kako zbog brzine procesa vrijedi  $h_3 - h_{3'} = h_1 - h_{1'}$** , ili riječima, koliko se kondenzat pothladi, toliko se para pregrije.

S jedne je strane to pregrijavanje poželjno jer predstavlja dodatno osiguranje kako kompresor ne bi usisao mokru paru, no negativno je zbog postizanja još viših temperatura nakon kompresije (2"). Lako je dokazati kako uređaji s pothlađivačem kondenzata imaju veći rashladni množilac u odnosu na procese koji pothlađivač nemaju (a rade s jednakim režimima – tlakovima, temperaturama).

## Primjeri i izračuni

---

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'}; x = \frac{h - h'}{h'' - h'}; x = \frac{u - u'}{u'' - u'}; x = \frac{s - s'}{s'' - s'}$$

### Stanja mokre pare

$$v = v' + x(v'' - v')$$

$$h = h' + x(h'' - h') = h' + xr; r = h'' - h'$$

$$u = u' + x(u'' - u')$$

$$s = s' + x(s'' - s')$$

$$P = D(h_{iz,komp} - h_{ul,komp})$$

$$Q_o = D(h_{iz,isparg} - h_{ul,isparg})$$

$$h_{iz,isparg} = h_{ul,komp}$$

$$Q = D(h_{ul,kond} - h_{iz,kond})$$

$$h_{iz,komp} = h_{ul,kond}$$

Iako ćemo za prikaz procesa i nadalje koristiti  $T - s$  dijagram, za očitavanje toplinskih stanja rashladnih tvari korisniji je  $p - h$  dijagram.

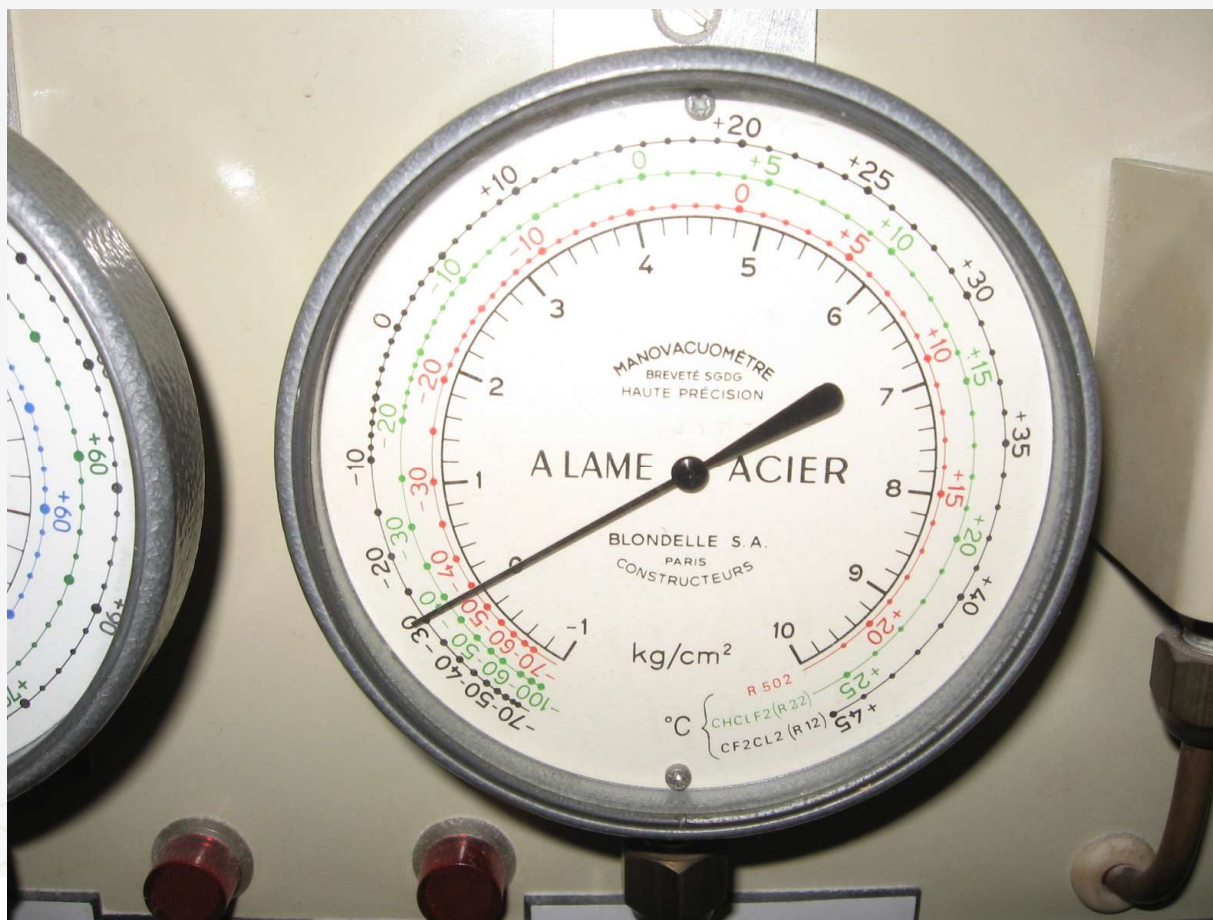


Očitajte iz toplinskih tablica temperature zasićenja za R-12 i R-22  
za tlakove 0,2 MPa i 0,7 MPa!

---

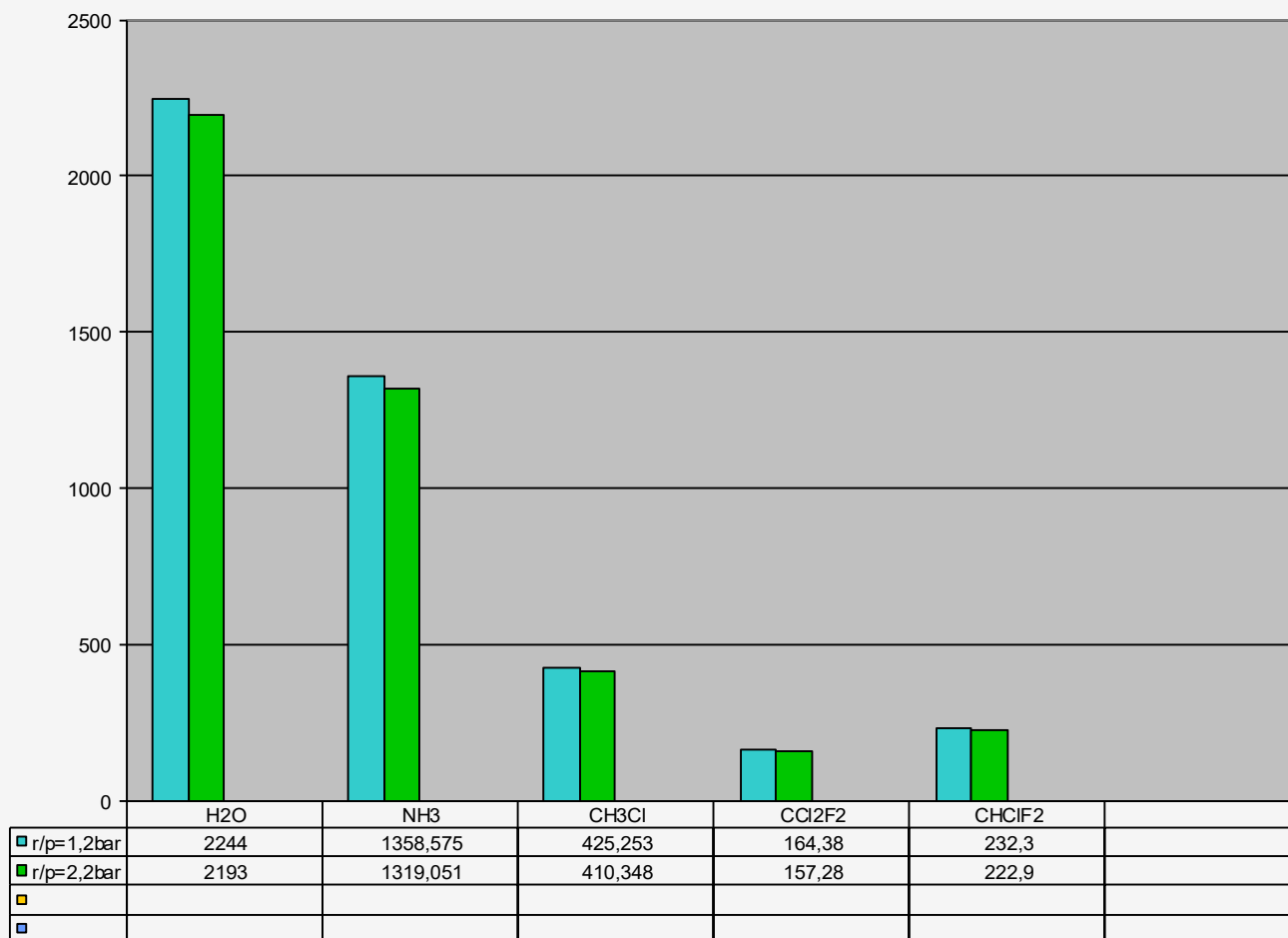
Očitajte pomoću skala na instrumentu temperature zasićenja R-12 i R-22 za iste tlakove!

---



ODGOVARAJU LI  
VRIJEDNOSTI ONIMA  
U TABLICAMA?

# Odnosi toplina isparivanja



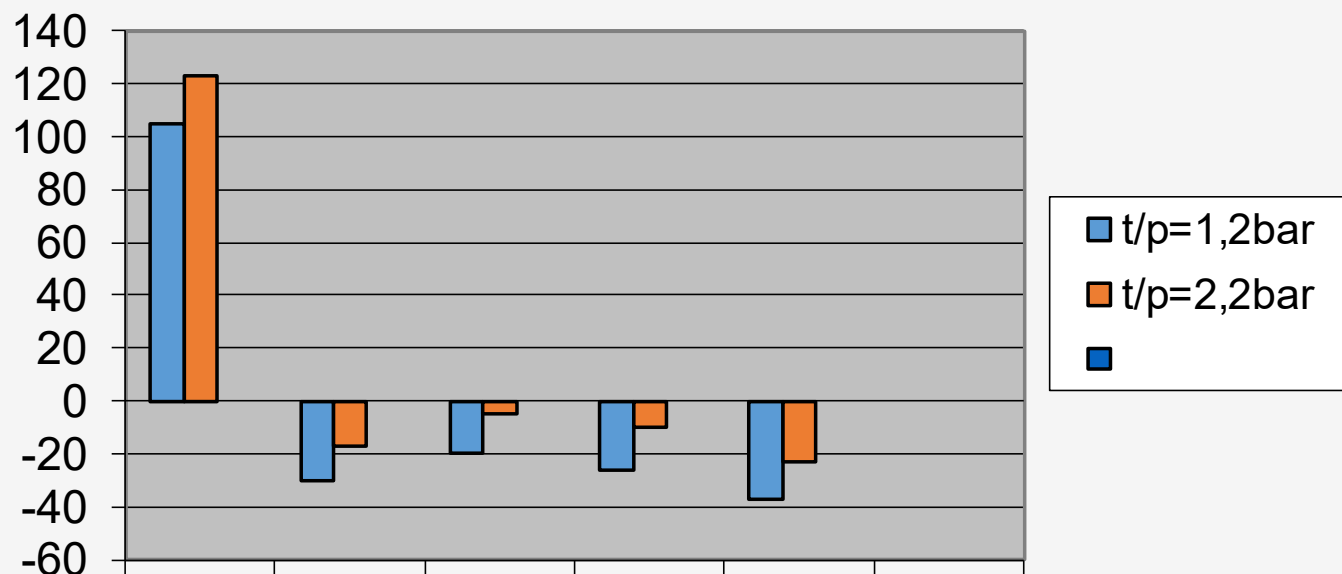
Što nam pokazuje ovaj dijagram?  
Voda je odlično hladilo!

Amonijak je samo malo lošiji!

Freon 12, koji se do 80-tih godina prošlog stoljeća koristio u 95% brodskih rashladnih sustava je najlošiji! Zašto je bio tako dobro prihvaćen?

Kada se 80-tih godina izbacivao R12, kao prva je zamjena bio R22. Sustav nije trebalo puno mijenjati: TXV, instrumente, ali budući ima veću toplinu isparivanja (bolje hladi) trebalo je smanjiti kapacitet kompresora (broj okretaja).

## Usporedbe temperatura isparivanja



t/p=1,2bar	104,8	-30	-20	-26	-37
t/p=2,2bar	123,3	-17	-5	-10	-23

Voda je nepraktična za hlađenje jer bi trebala biti pod velikim potlakom za temperature koje su u brodskim rashladnim sustavima potrebne.

Freon 12 zadovoljava temperaturama kod vrlo prihvatljivih tlakova!

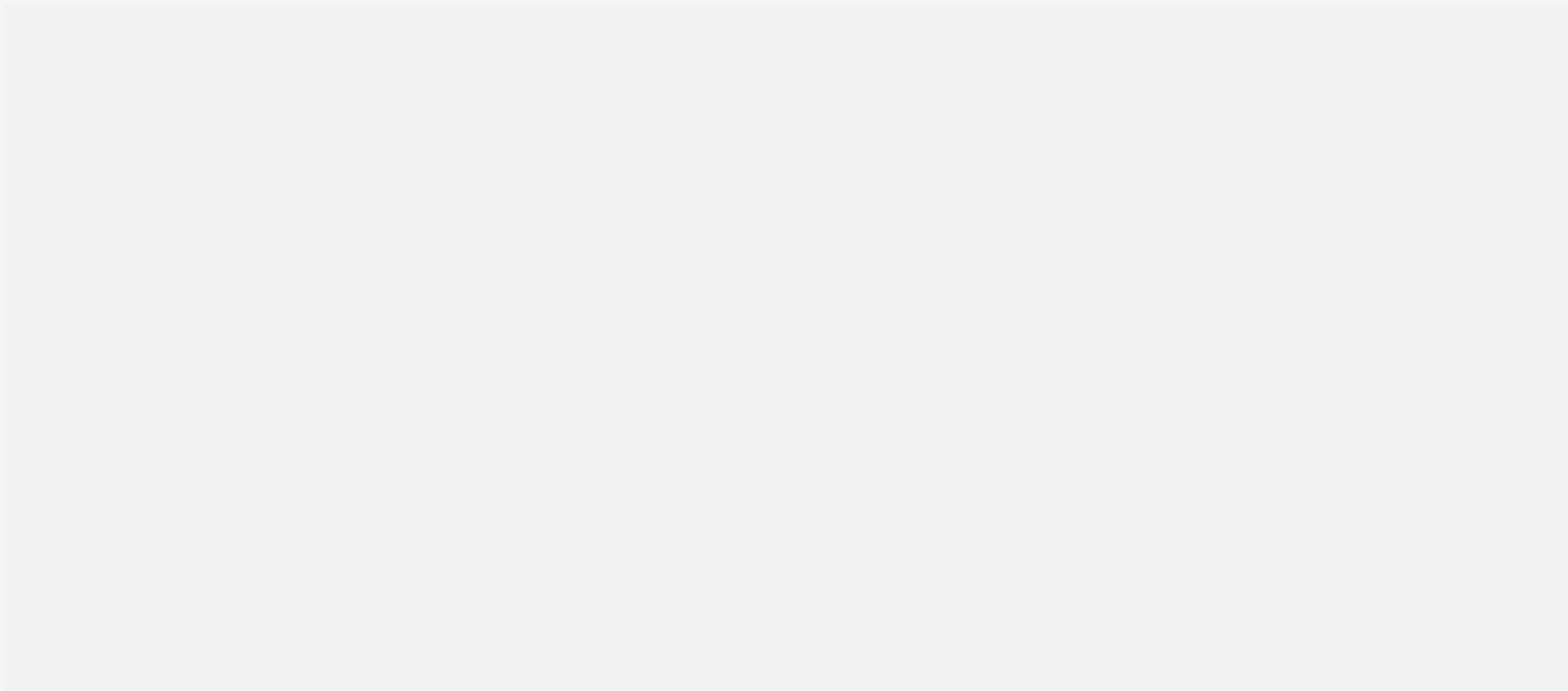
# Određivanje stanja pomoću $p$ - $h$ dijagrama i tablica

---

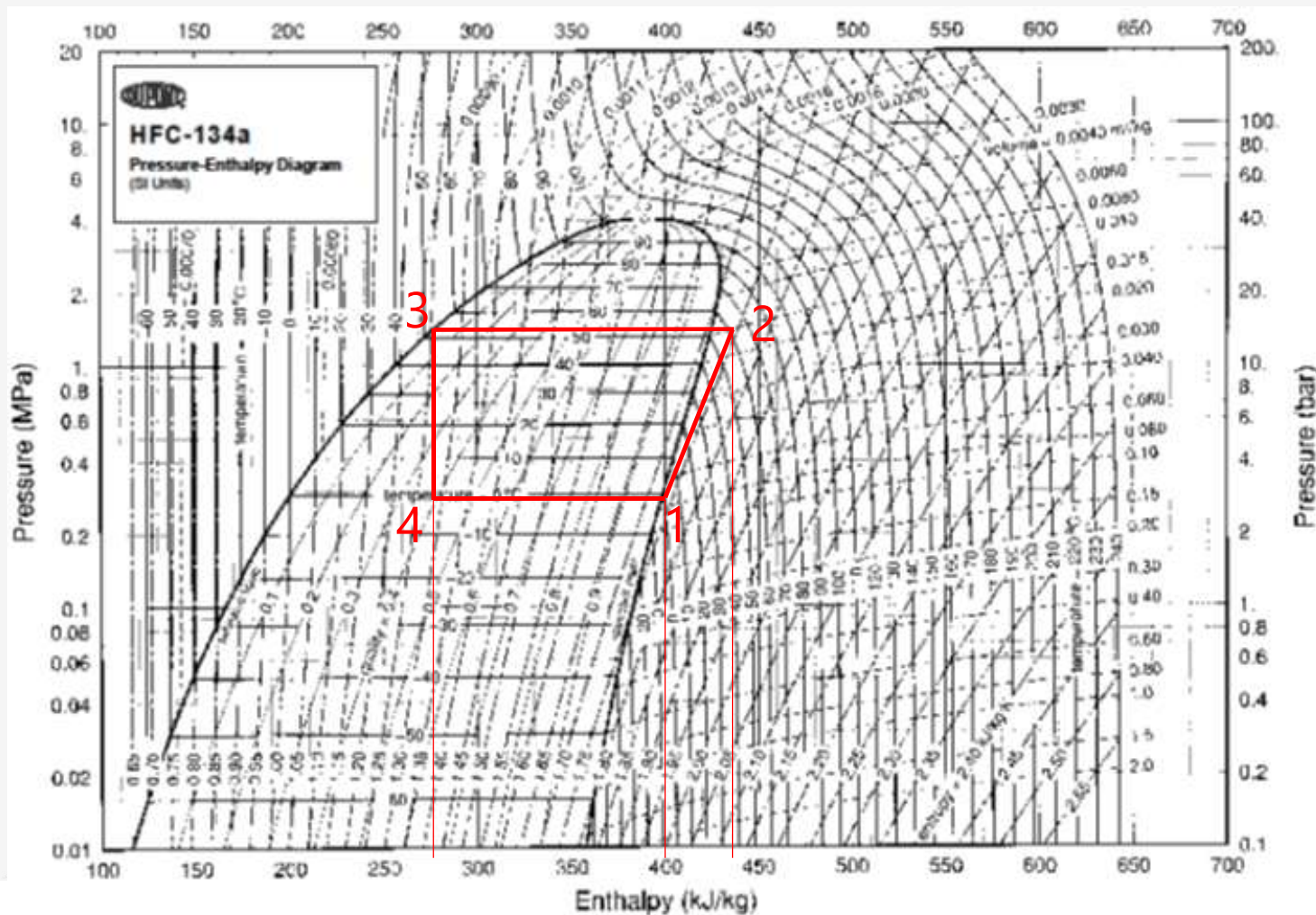
1. Usporedi specifične volumene suhozasićene pare R12 za  $p=0,15$  MPa i  $0,8$  MPa. Što nam to pokazuje?
2. Usporedi temperature zasićenja za R12 i R22 za tlak  $p=8$  MPa
3. Očitaj s dijagrama entalpiju vrele tekućine R134a za  $t=0^\circ\text{C}$
4. Očitaj s dijagrama entalpiju pregrijane pare R134a za  $t=60^\circ\text{C}$  i  $p=1,4$  MPa
5. Očitaj s dijagrama entropiju pregrijane pare R134a za  $t=25^\circ\text{C}$  i  $p=0,6$  bar
6. Očitaj s dijagrama specifični volumen pregrijane pare R134a  $t=20^\circ\text{C}$  i  $p=1$  bar
7. Očitaj s dijagrama entalpiju zasićene pare R134a za  $p=1,6$  bar i  $x=0,9$

# Rješenja

---



## Jednostavan ciklus u $p - h$ dijagramu



- Za ciklus prikazan crvenom linijom, očitajte entalpije karakterističnih točaka za sustav s 20 kg/s protoka rashladnog sredstva pa izračunajte:
- jedinični i ukupni rashladni učin
  - jediničnu i ukupnu količinu topline koja se preda morskoj vodi u kondenzatoru
  - jedinični i ukupni rad kompresora
  - rashladni množilac
  - potreban kapacitet pumpe morske vode

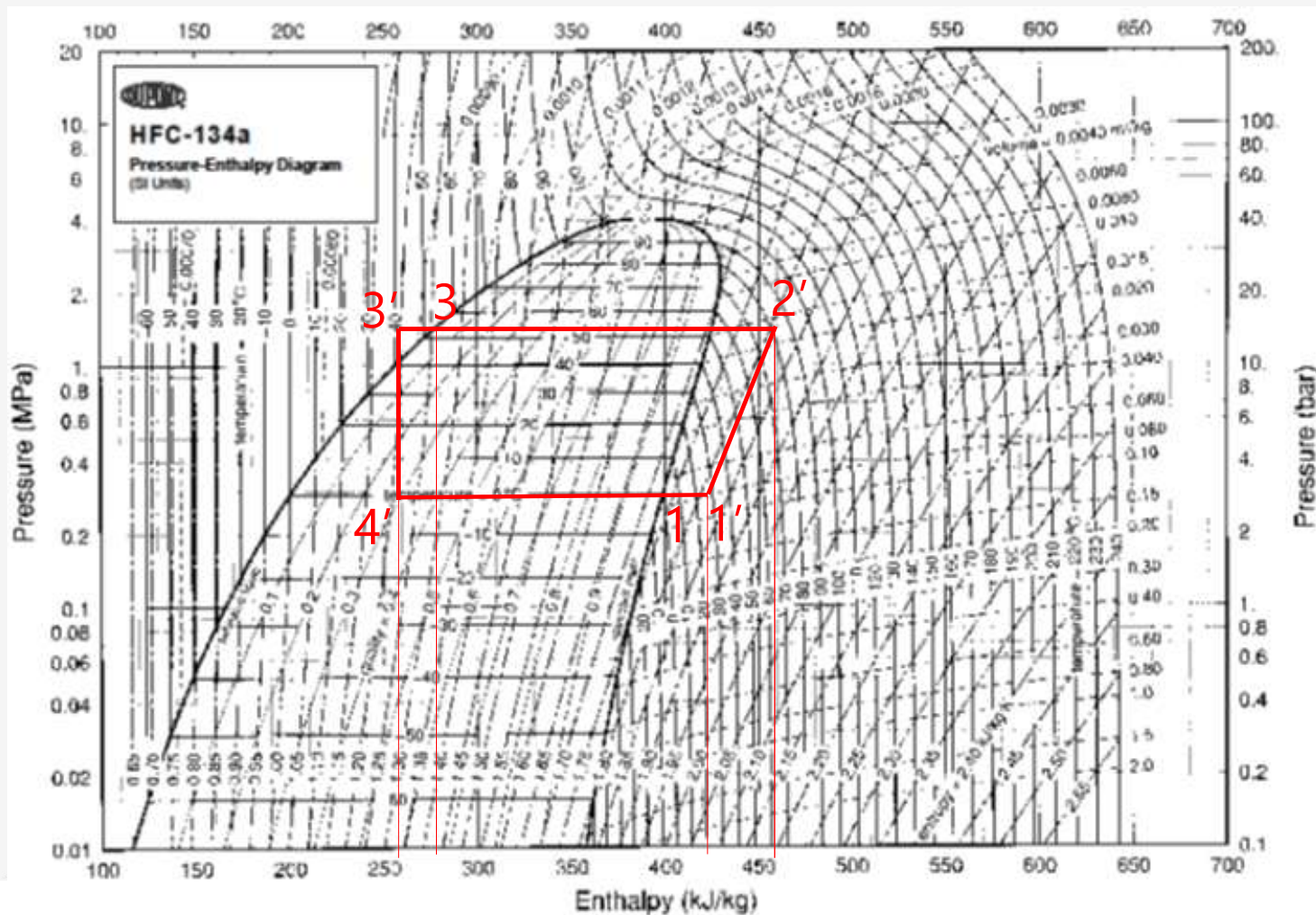
## Rješenje primjera

---





## Povećanje efikasnosti primjenom pothlađivača kondenzata



- Za ciklus prikazan crvenom linijom, očitajte entalpije karakterističnih točaka za sustav s 20 kg/s protoka rashladnog sredstva pa izračunajte:
- jedinični i ukupni rashladni učin
  - jediničnu i ukupnu količinu topline koja se preda morskoj vodi u kondenzatoru
  - jedinični i ukupni rad kompresora
  - rashladni množilac
  - potreban kapacitet pumpe morske vode

## Rješenje primjera

---



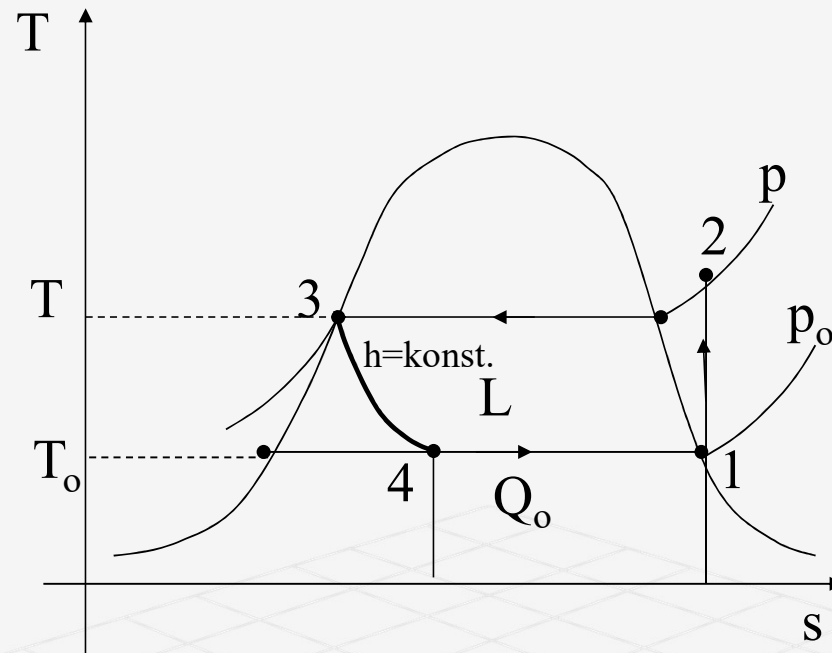
# Poboljšanja

---

- dvostupanjska kompresija s međuhlađenjem
- dvostupanjska kompresija s odjeljivačem i jednim prigušnim ventilom
- dvostupanjska kompresija s odjeljivačem i dva prigušna ventila
- dvostupanjska se kompresija ne radi osim ako nije potrebno
- zamjena ekološki štetnih tvari, ekološki prihvatljivim

# Teoretski vs. stvarni proces

---



## Primjeri pitanja

---

1. Potvrdite ili demantirajte (računski) tvrdnje proizvođača i distributera da parno-kompresijski uređaj koji radi prema Carnot-ovom ciklusu između temperatura kondenzacije  $T=340\text{ K}$  i isparivanja  $T_0=260\text{ K}$  ostvaruje rashladni učin od  $1950\text{ W}$  uređaj pri čemu troši samo  $600\text{ W}$ !
2. Za jedan je rashladni uređaj poznato sljedeće: entalpija vrele tekućine na izlazu iz kondenzatora iznosi  $275\text{ kJ/kg}$ , u pothlađivaču se entalpija kondenzata smanjuje na  $250\text{ kJ/kg}$ , na izlazu iz isparivača entalpija suhozasićene pare (u stvarnosti je malo pregrijana, no to se zanemaruje) iznosi  $400\text{ kJ/kg}$  i u pothlađivaču se suhozasićena para pregrijava. Koliko iznosi jedinični rashladni učin? Ukoliko sustavom cirkulira  $10\text{ kg/s}$  rashladnog sredstva, koliko iznosi ukupni rashladni učin?