

RASHLADNI SUSTAVI KONTEJNERA

**OSNOVE RASHLADNIH SUSTAVA
KONTEJNERA**

Dr. sc. Predrag Kralj

- 1. Osnove rashladne tehnike**
 - 1.1. osnove termodinamike**
 - 1.2. promjena faza i dvofazno strujanje**
 - 1.3. rashladni ciklusi (p-T, T-s, p-h)**
 - 1.4. rashladni množilac (COP)**
 - 1.5. karakteristike radnih fluida i ulja**
 - 1.6. promjena faze čiste tvari i smjese**
 - 1.7. zeotropne i azeotropne smjese**
 - 1.8. ekologija i međunarodna pravila**

1.1. Osnove termodinamike

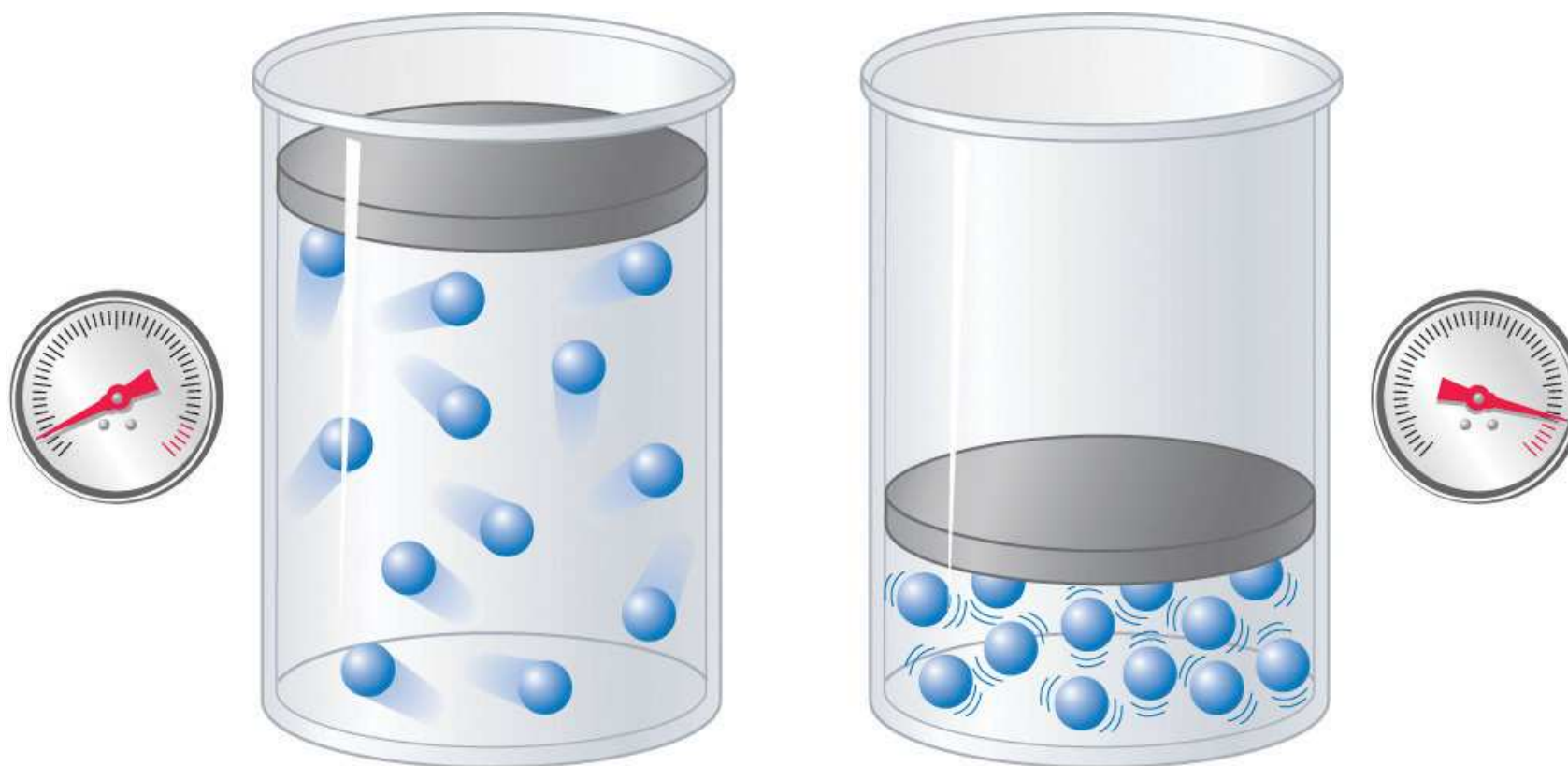
Osnovni pojmovi



- tlak
 - toplina i temperatura
 - faze (agregatna stanja)
 - temperatura i tlak zasićenja
 - granična stanja (vrela tekućina, suhozasićena para)
 - pregrijana para
 - pothlađen kondenzat
-

Tlak

TLAK JE POSLJEDICA UDARANJA MOLEKULA TVARI NA STJENKU POSUDE U KOJOJ SE NALAZI. KAKO JE NA SLICI b ISTA KOLIČINA TVARI U MANJEM VOLUMENU MOLEKULE SE ČEŠĆE SUDARAJU MEĐUSOBNO I SA STJENKOM POSUDE.

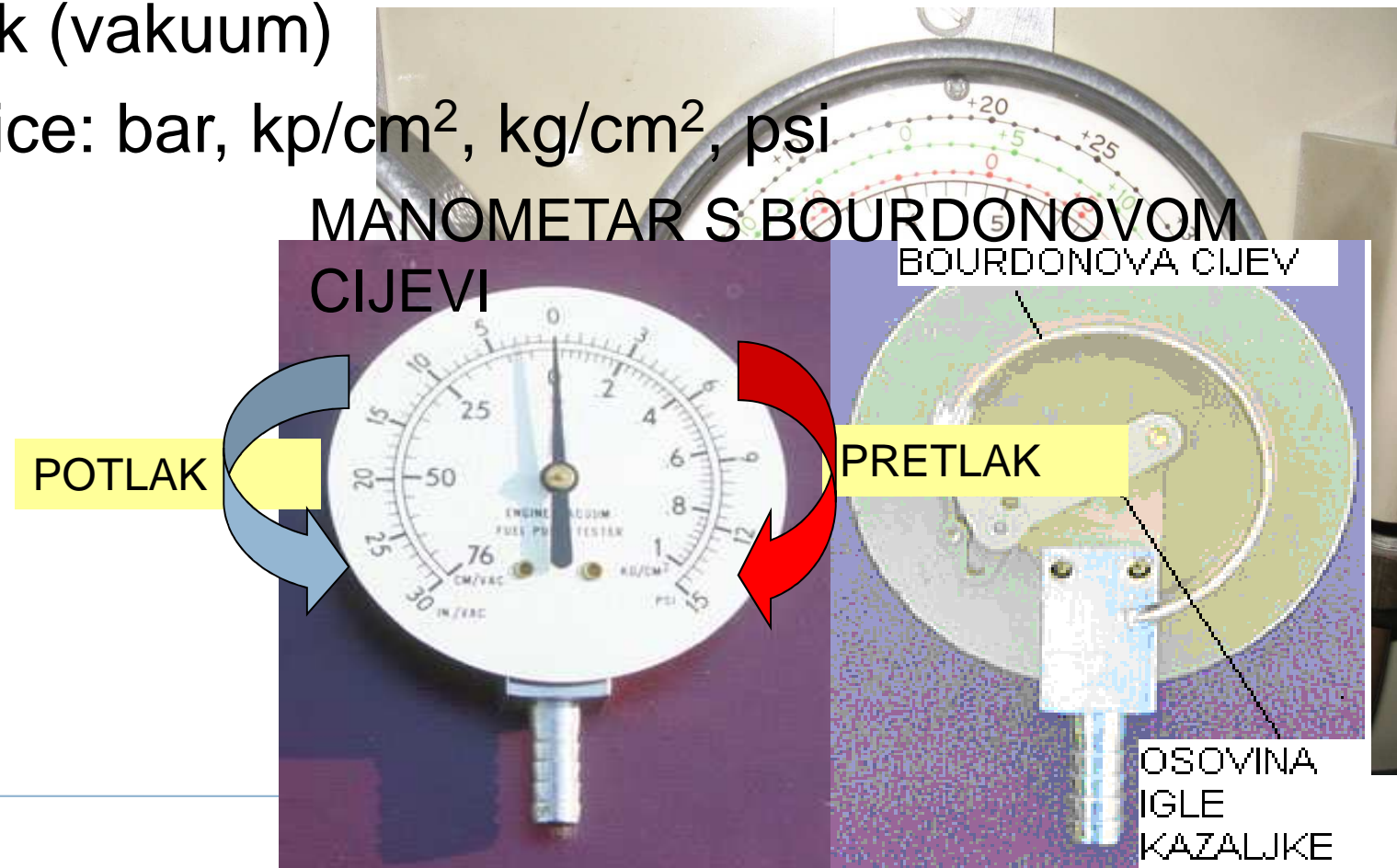


(a) NISKI TLAK

(b) VISOKI TLAK

Mjerenje tlaka

- pretlak – manometarski tlak
- potlak (vakuum)
- jedinice: bar, kp/cm^2 , kg/cm^2 , psi



Toplina i temperatura

Temperatura se može definirati kao relativna zagrijanost tvari, uspoređena s nekim fiksnim stanjem na mjernoj skali. Celzijusova skala područje između dva karakteristična stanja, ledišta i vrelišta slatke vode pri atmosferskom tlaku, dijeli na 100 dijelova ($^{\circ}$), gdje je ledište 0°C , a vrelišta 100°C . Fahrenheitova na 180, pri čemu je ledište na 32°F , a vrelišta na 212°F . Mjerni uređaji u rashladnoj tehnici mogu imati jednu ili čak obje skale.

Pretvorba se izvodi prema izrazu

$$t_{\circ C} = \frac{5}{9}(t_{\circ F} - 32)$$

Temperatura je posljedica kinetičke energije atoma i molekula tvari. Ukoliko je gibanje čestica brže temperatura je viša i obrnuto. Na apsolutnoj nuli ($T=0\text{K}$ ili $t=-273,15^{\circ}\text{C}$) svo gibanje prestaje.

Uređaji za mjerenje temperature: s tekućinom (živa, alkohol), s bimetalnom trakom, pneumatski (tlačni), termoelektrični, optički.

Senzibilna i latentna toplina

Molekule u krutini imaju ograničenu slobodu i samo vibriraju oko fiksnog položaja. Molekule tekućine imaju veću slobodu, dok je sloboda molekula plinovite tvari neograničena.

Kada se toplina dodaje tvari može doći do:

- povećanja temperature
- taljenja ili isparavanja
- promjene specifičnog volumena i boje
- povećanja tlaka

Obrnuto se dešava kod oduzimanja topline.

Senzibilna toplina vezana je uz promjenu temperature tvari kojoj se dodaje ili oduzima toplina, a posljedica je promjene kinetičke energije molekula.

Latentna toplina vezuje se uz promjenu faze (agregatnog stanja) bez ikakve promjene u temperaturi, pa stoga postoji latentna toplina taljenja i isparavanja, tj obrnuti proces – latentna toplina skrućivanja i kondenzacije.

Temperatura i tlak zasićenja

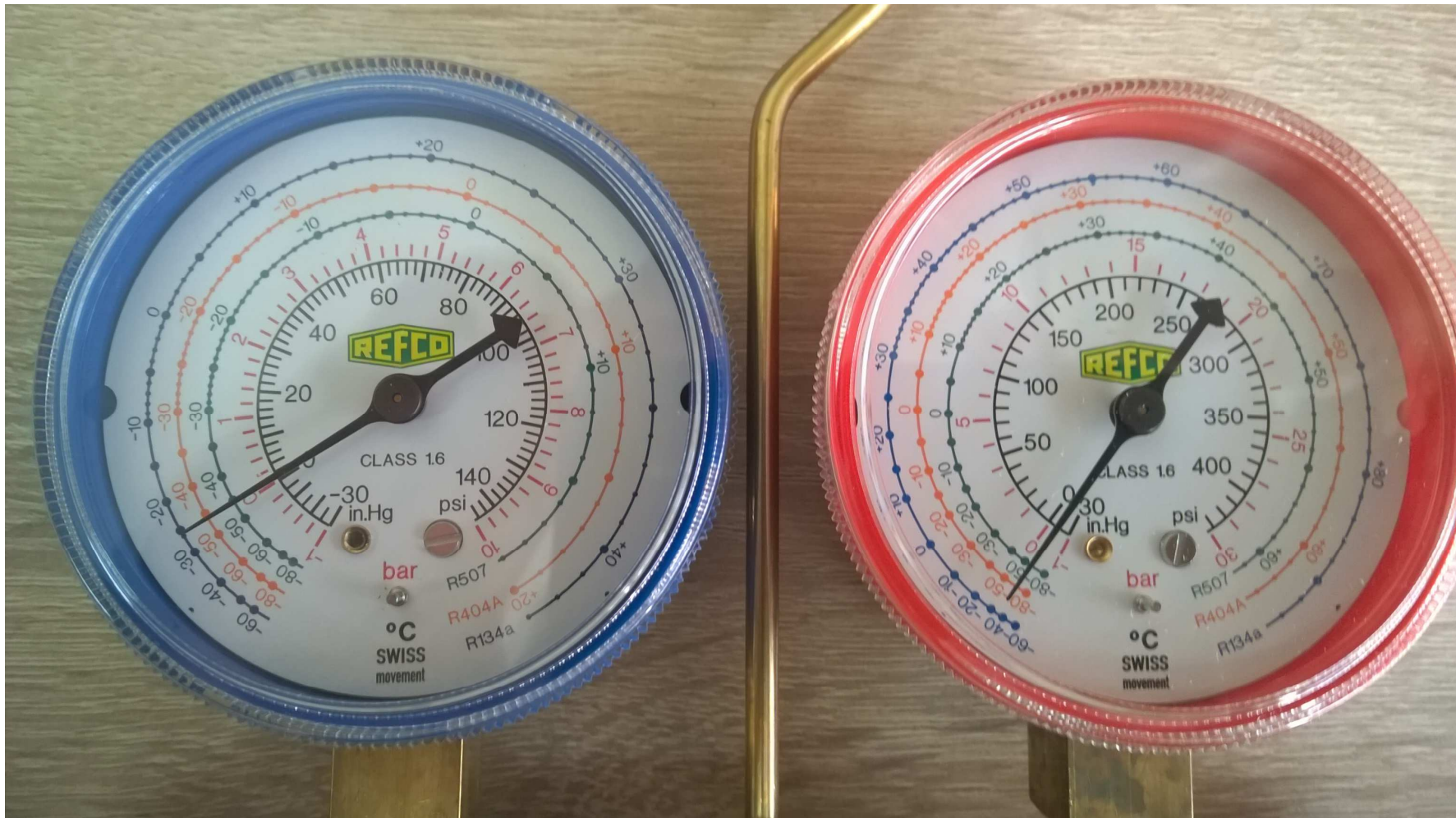


Temperatura zasićenja, znana još i kao temperatura isparavanja i temperatura kondenzacije jest temperatura pri kojoj se dešava promjena faze. Ovisi o tlaku i za sve tehničke fluide postoje tablični podaci ili toplinski dijagrami odnosa temperature i tlaka zasićenja.

Temperatura i tlak zasićenja jednoznačno se međusobno određuju.

Mjerni uređaji za tlak (manometri) često imaju naznačene temperaturne skale koje se koriste za očitavanje temperatura zasićenja umjesto tablica.

Temperatura i tlak zasićenja



Pregrijavanje i pothlađivanje

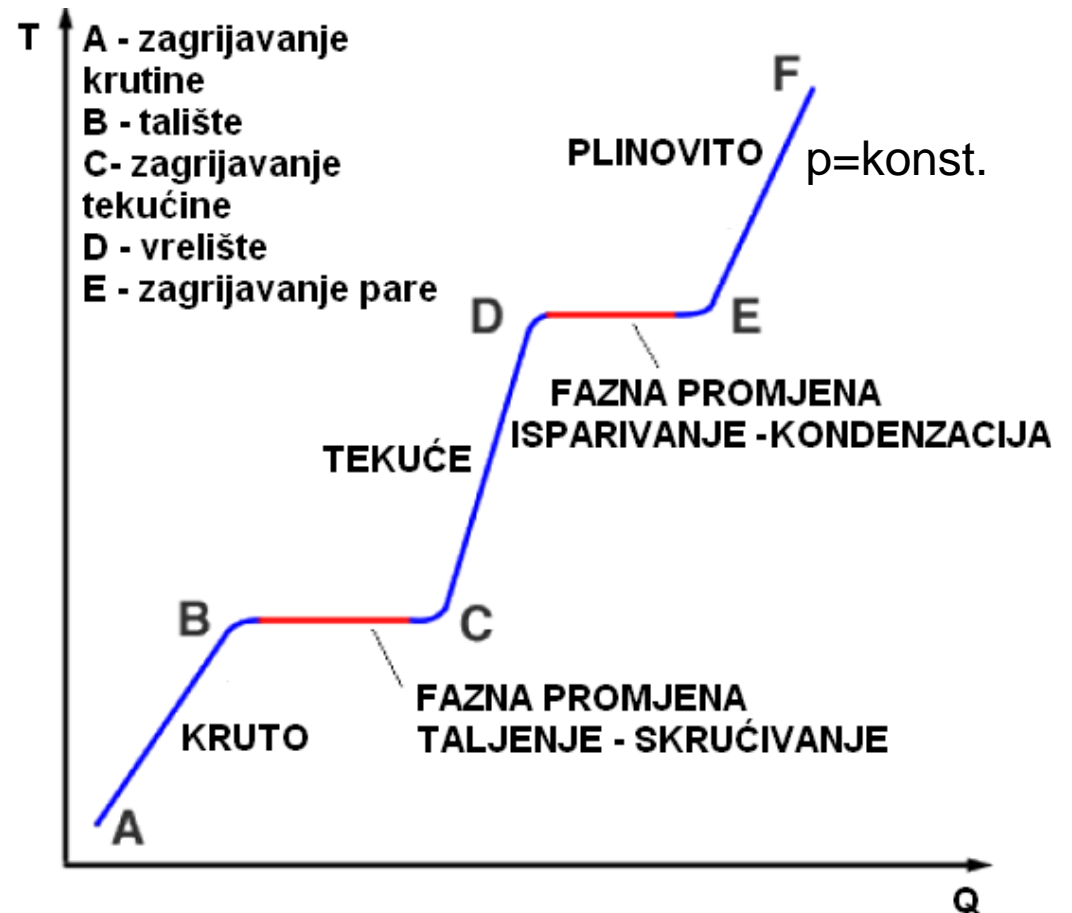


Stanje koje se postiže kada para primi ukupnu količinu latentne topline isparavanja (potpuno ispari) zove se suhozasićena para. Ukoliko se takvoj pari i dalje dovodi toplina (a što se u rashladnim uređajima dešava iz više razloga) ona se pregrijava te ju nazivamo pregrijana para.

Kada se para u kondenzatoru hladi dolazi najprije do pada temperature te zatim do kondenzacije. Odvođenjem ukupne latentne topline kondenzacije postiže se stanje vrele tekućine. Daljnjim odvođenjem topline, bilo u samom kondenzatoru ili u dodatnom rashladniku, dolazi do pothlađivanja kondenzata. Kondenzat se hladi ispod temperature zasićenja koja odgovara datom tlaku. Veći rashladni uređaji imaju pothlađivač kondenzata kako bi se povećao rashladni učin.

Fazni dijagram T-Q

- A - B senzibilna toplina, temperatura krutine raste
- B – početak taljenja
- B - C latentna toplina taljenja, temperatura je konstantna
- C – početak zagrijavanje tekućine
- C – D senzibilna toplina, temperatura raste
- D – vrelište
- D – E latentna toplina isparivanja, temperatura je konstantna
- E – sve je isparilo, pregrijavanje pare
- F – pregrijana para



Entropija i entalpija



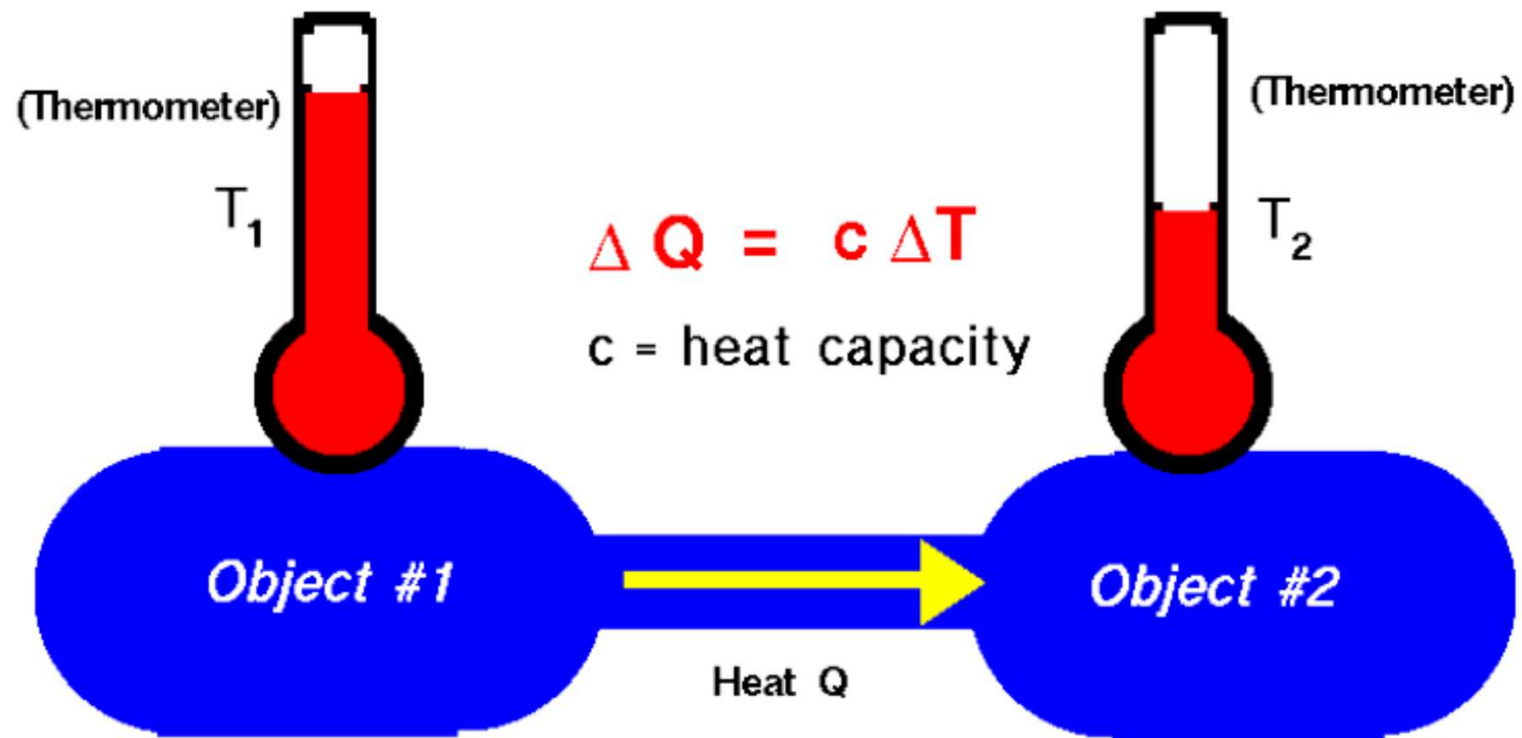
Entropija je termodinamička veličina koja ukazuje na protok energije kroz termodinamički proces. Mjera je povrativosti pojedinog procesa. Kompresija je teoretski povrativ proces, jer se ekspanzijom postiže prvobitno stanje. Stoga je entropija takvog procesa konstantna. Prigušivanje je nepovrativ proces te entropija raste.

Entalpija ili sadržaj topline pokazuje ukupnu toplinsku energiju tvari. Uključuje energiju rada (p, V) i pokazuje sposobnost tvari da izvrši rad te unutarnju energiju tvari. Dovođenjem topline se povećava, a hlađenjem smanjuje.

Prirodni (termodinamički) zakoni

- izmjena topline postoji ukoliko postoji temperaturna razlika: $q \sim \Delta T$
 - 'strujanje' topline s više temperature k nižoj
 - postoji sve dok se temperature ne izjednače
 - cilj rashladne tehnike: sniziti temperaturu (prostora, fluida u prostoru ili koji protječe...) ispod temperature okoline i održati tu temperaturu
 - suprotnost s prirodnim zakonom
 - treba uključiti proces
-

Strujanje topline i temperatura

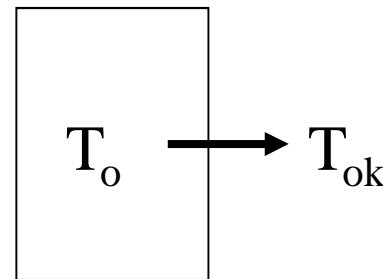


TOPLINA STRUJI IZ PROSTORA VIŠE
TEMPERATURE K NIŽOJ

Prirodno strujanje topline

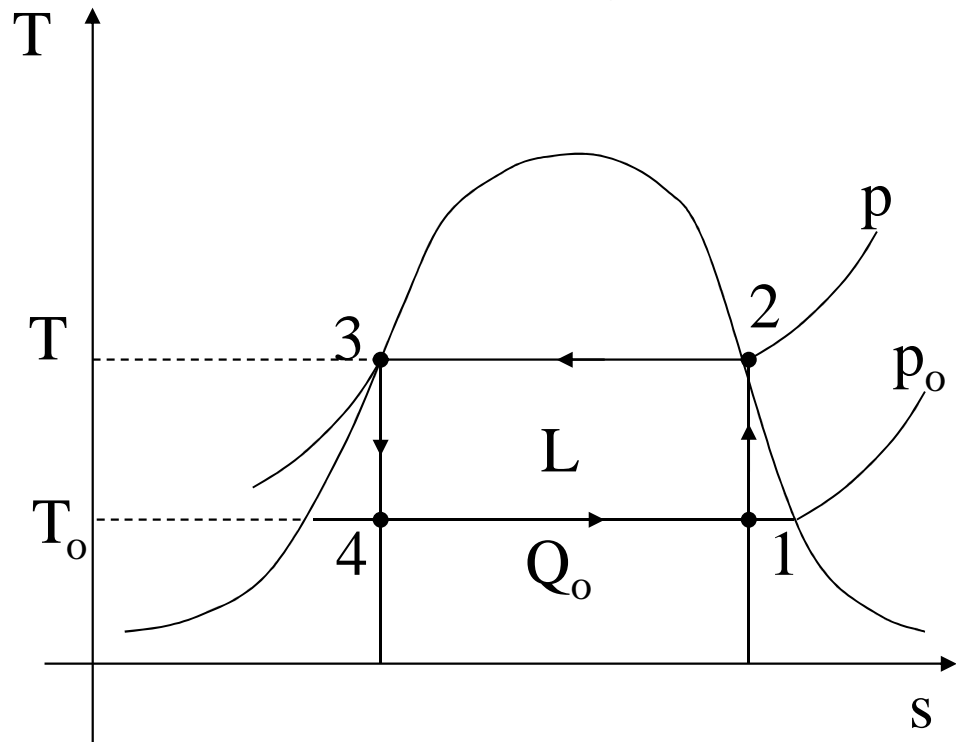
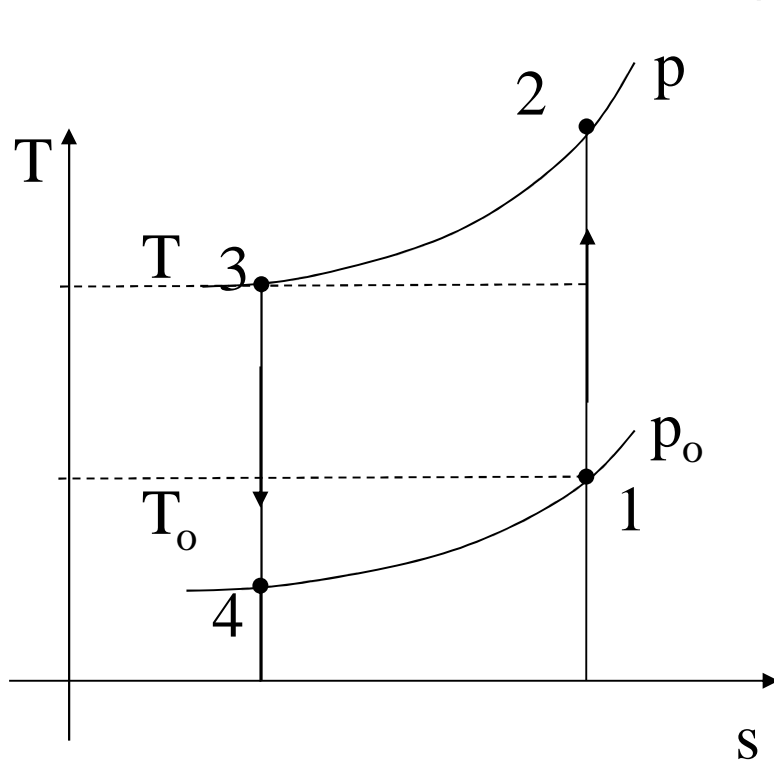
Ukoliko vrijedi $T_o < T_{ok}$ toplina struji iz okoline u izolirani prostor, sve dok postoji temperaturna razlika.

Svrha je rashladne tehnike postići temperaturu nižu od okolišne i održati je, a za to je potreban tehnološki proces.



Jednostavni rashladni procesi

→ zračni vs. Carnot (lijevokretni ili obrnuti)



Izmjena topline

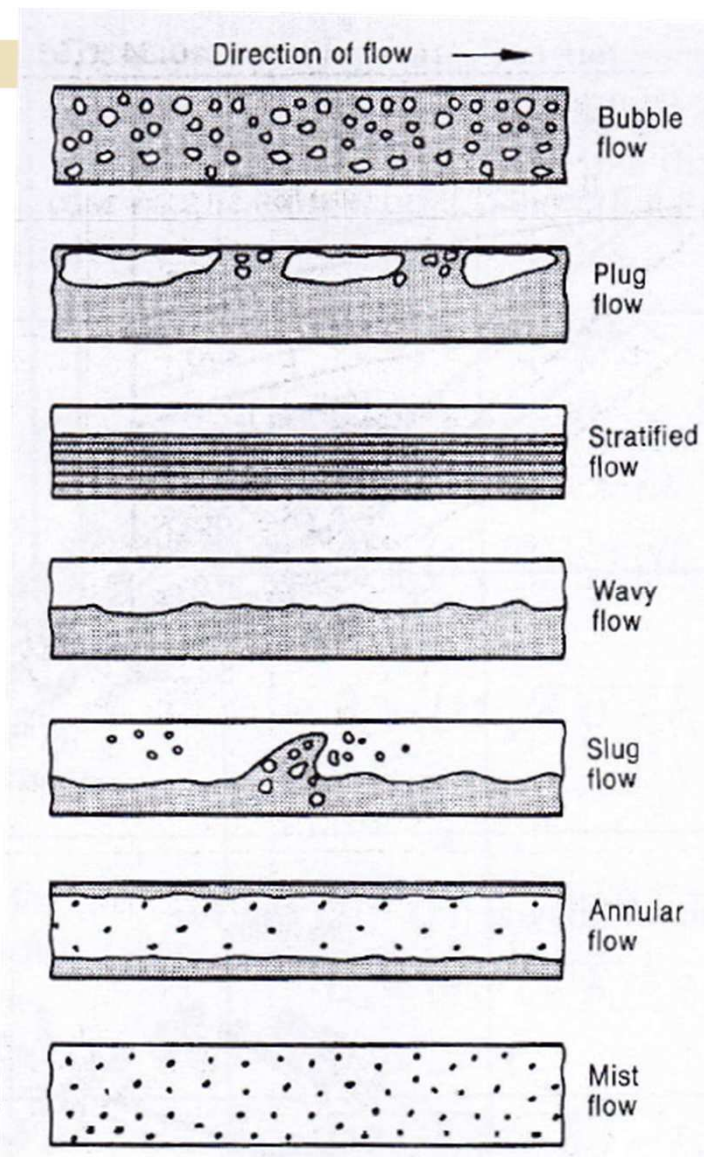
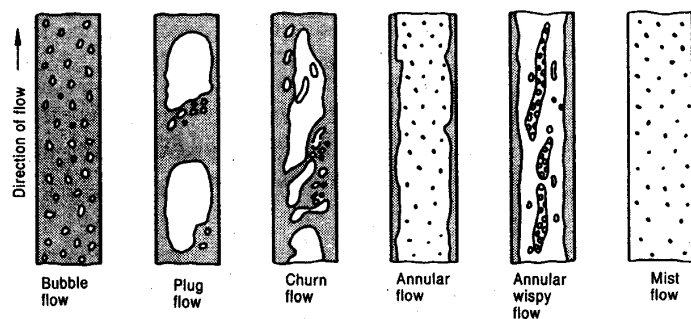


- izmjenjivači topline
 - koeficijent prolaza topline
 - ✦ konstrukcija
 - ✦ promjenjivi uvjeti tijekom eksploatacije
 - senzibilna i latentna toplina
 - kondenzacija – isparavanje
 - oblik strujnog kanala, svojstva fluida i stjenke, brzina strujanja...
-

1.2. Promjena faza i dvofazno strujanje

Promjena faze u cijevi izmjenjivača topline

- isparavanje – kondenzacija
- strujanje kroz cijevi, cijevni izmjenjivači topline
- **horizontalne** i vertikalne cijevi
- ulje i druge tvari

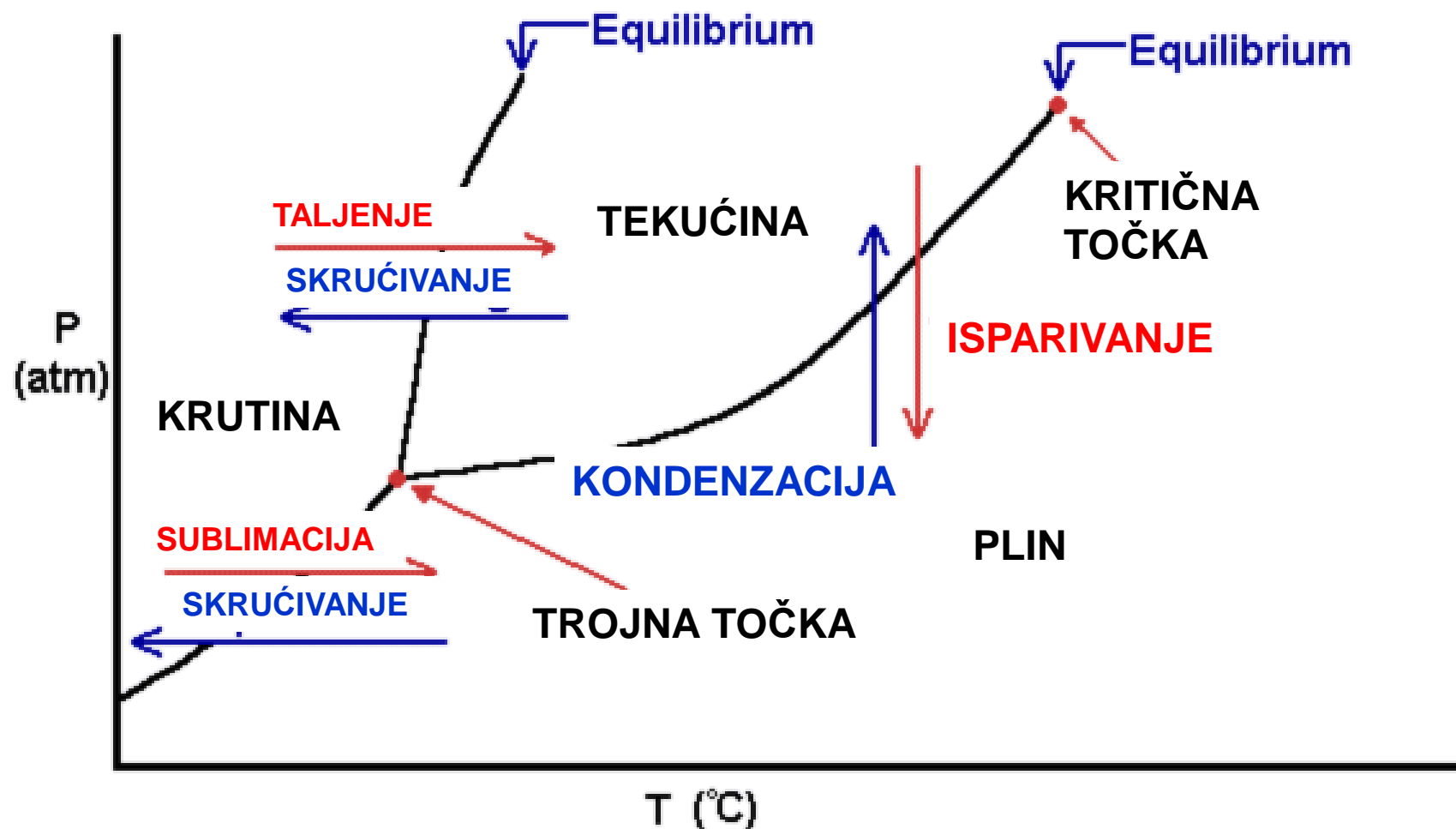


1.3. Rashladni ciklusi (procesi)

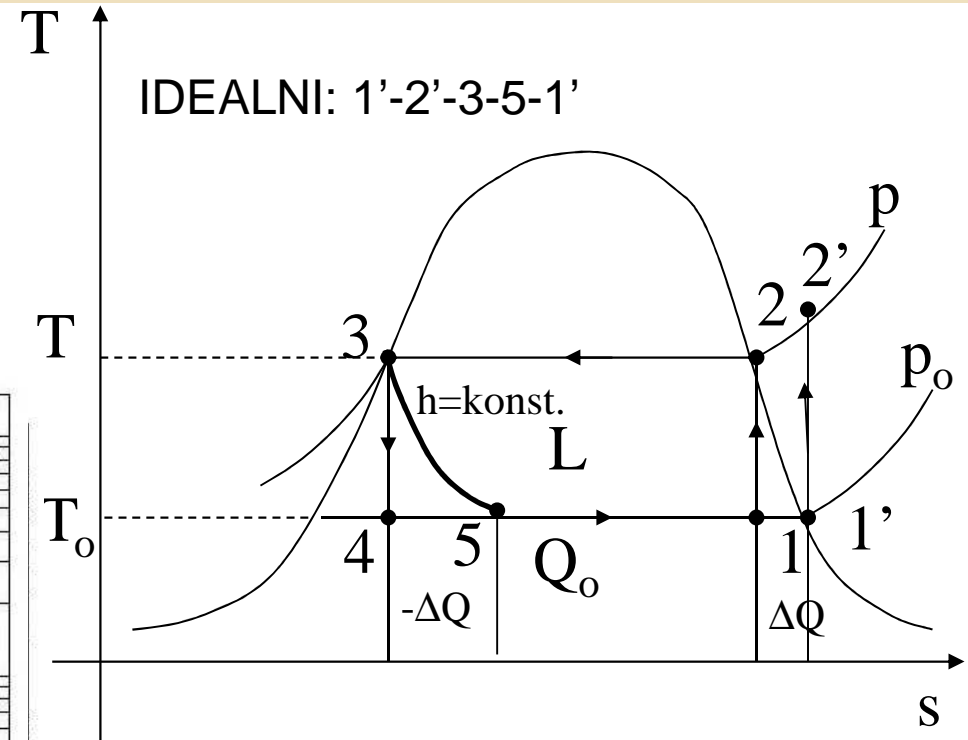
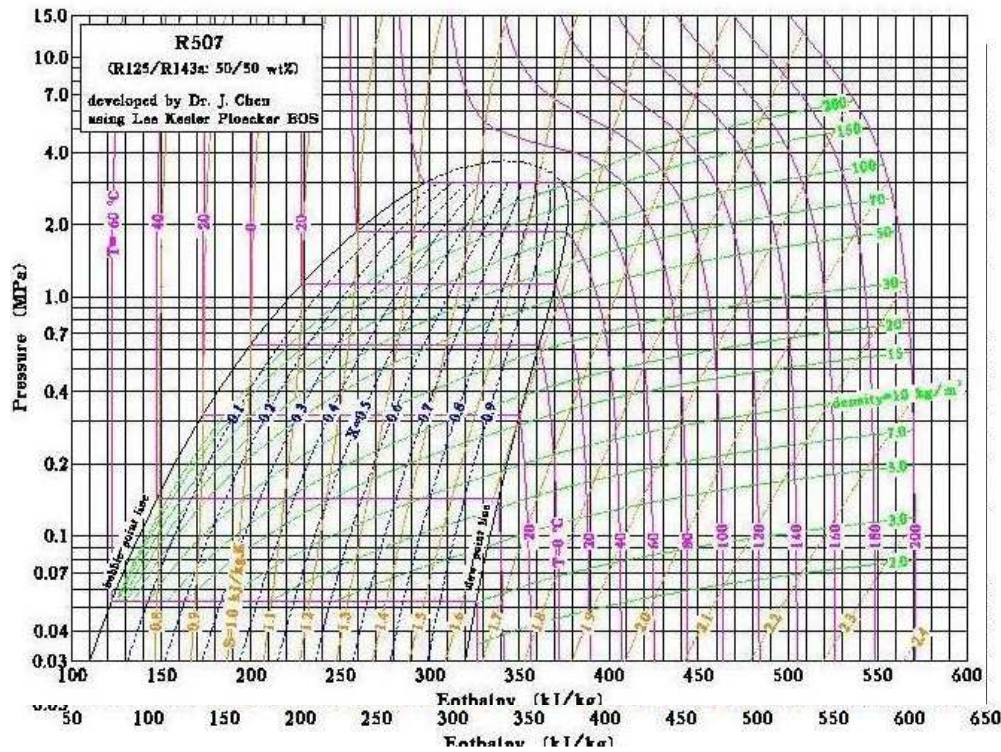
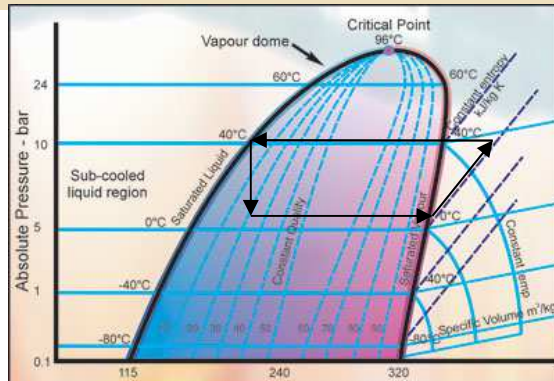
Kompresijski - apsorpcijski

- kompresijski – zrak: senzibilna toplina, mali toplinski kapacitet, glomaznost, loša iskoristivost
 - parno-kompresijski od XIX st.: etileter ⇒ dimetileter ⇒ NH_3 ⇒ CO_2 ⇒ SO_2 ⇒ N_2O ⇒ etan (etilen, propan, izobutan) ⇒ klorometan, brodski uređaji - CO_2 i NH_3 ⇒ FREONI (R-12, R-22) ⇒ R-134a, R-143a, R-410A, R-507...
 - apsorpcijski uređaji za rad trebaju uglavnom toplinu i na brodovima se rijetko koriste
-

Fazni dijagram p-T



Toplinski dijagrami rashladnih procesa



Stvarni proces – odstupanje od teoretskog

- primjenjuje se TEV pa je para na izlazu iz isparivača malo pregrijana
 - para se može malo zagrijavati od isparivača do kompresora, a dolazi i do pada tlaka
 - pada tlak prilikom strujanja kroz usisni ventil
 - zagrijavanje prilikom usisa
 - kompresija je politropska s promjenjivim eksponentom
 - pri izlazu kroz tlačni ventil pada temperatura i tlak
 - pada tlak od kompresora do kondenzatora, a i u kondenzatoru
 - pothlađivanje se može desiti i u kondenzatoru, a ako postoji pothlađivač mijenja se i iznos pregrijanja pare na izlazu iz isparivača
 - dolazi do pada tlaka pri strujanju kroz isparivač

 - potvrda: SIMULATOR
-

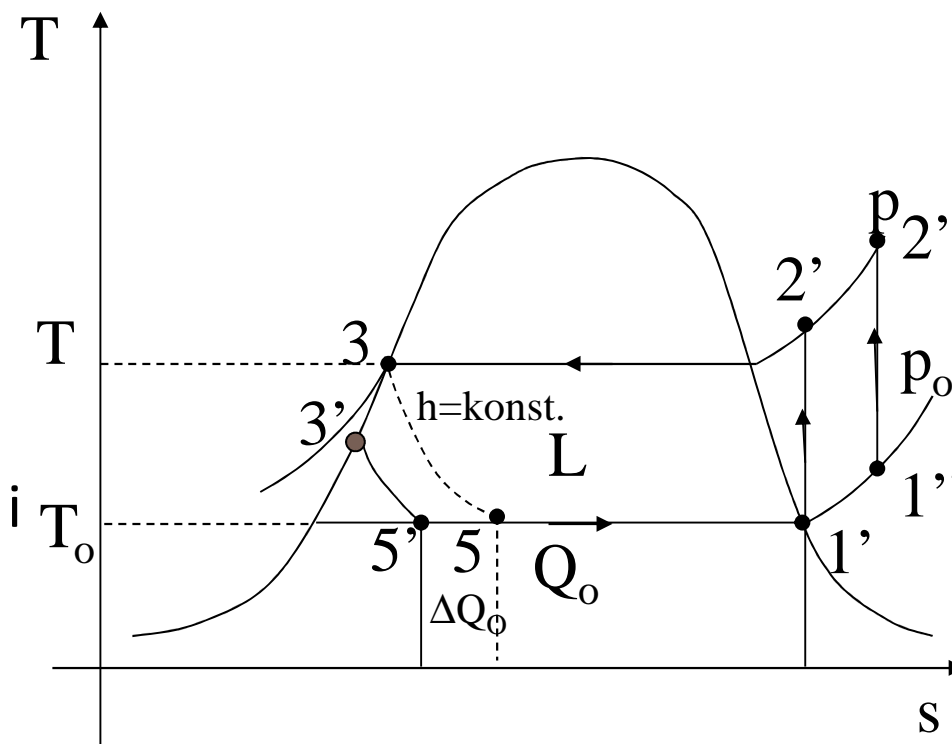
1.4. Rashladni množilac

Efikasnost PK rashladnog uređaja

- pokazuje efikasnost p-k uređaja
 - rashladni množilac (COP) $\varepsilon = Q_o / L$
 - nije usporediv s toplinskim stup. iskoristivosti η_t
 - poboljšanja procesa
 - ✦ pothlađivanjem kondezata
 - ✦ dvostepenom ili višestepenom kompresijom
 - svojstva radnog fluida
-

Poboljšanja

- dvostepena kompresija se ne radi ukoliko nije potrebna
- pothlađivanje kondenzata
- hladna para pothlađuje kondenzat
- povećava se rashladni učin i rashladni množilac



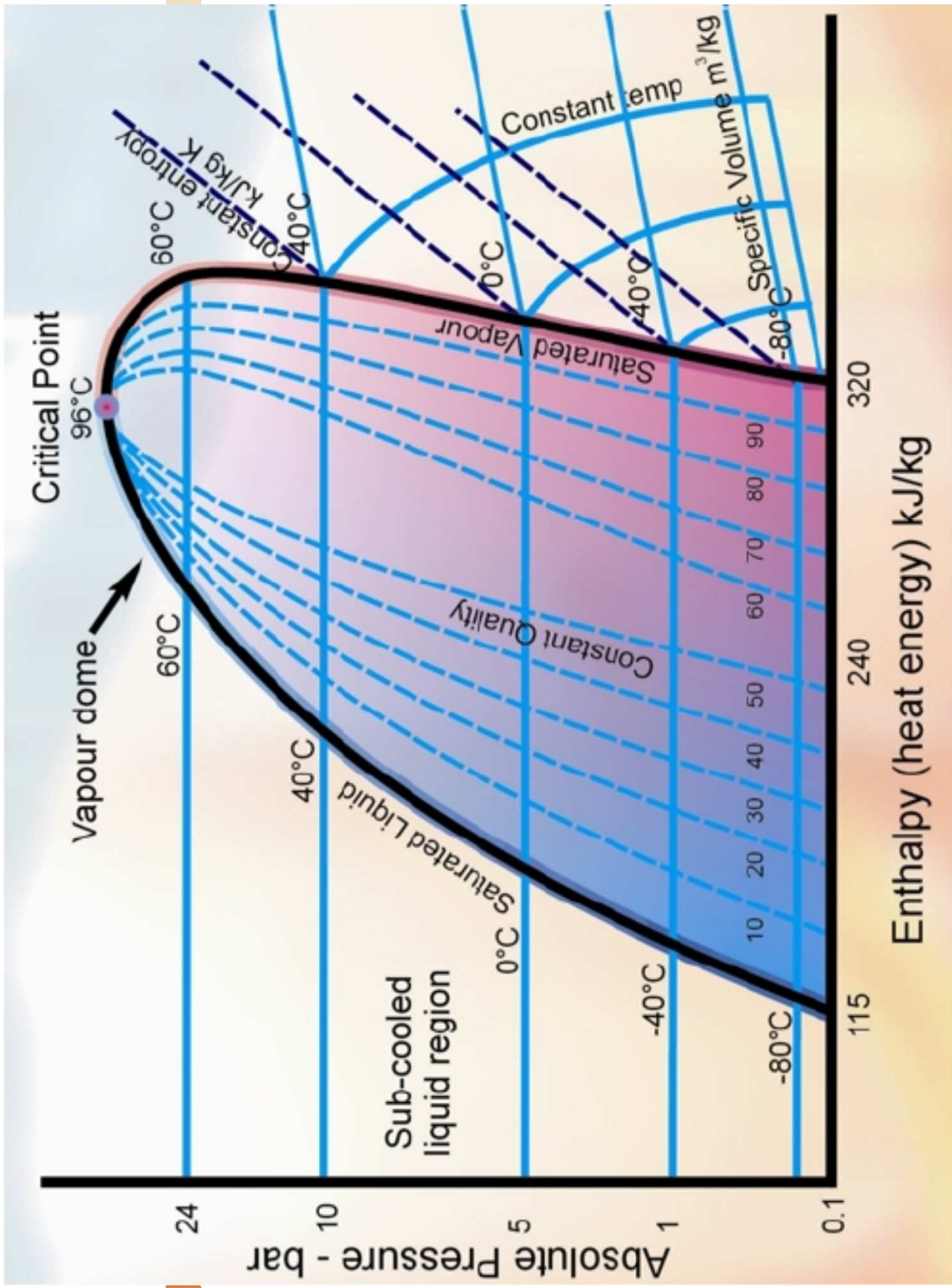
1.5. Karakteristike radnih fluida i ulja

Što je rashladno sredstvo (engl. refrigerant)?



Rashladna tvar (fluid, medij) je radna tvar koja apsorbira, prenosi i otpušta toplinu iz prostora koji treba rashladiti. Obično se to dešava uz promjenu faze radne tvari (barem u kompresijskim uređajima).

Nešto preciznija definicija bila bi: rashladna tvar je fluid koji se koristi za izmjenu tvari u rashladnom uređaju na način da apsorbira toplinu tijekom procesa isparivanja pri niskom tlaku i temperaturi, a otpušta je u okolinu tijekom procesa kondenzacije pri višem tlaku i temperaturi.



Primarne i sekundarne radne tvari



Primarne radne tvari su one koje se koriste u parno-kompresijskim radnim uređaji i tijekom procesa prolaze kroz promjene: kompresija, hlađenje i kondenzacija, (pothlađivanje), prigušivanje, isparivanje, (pregrijavanje).

Sekundarne su one koje se koriste za izmjenu topline između primarnih tvari i onog što se u biti rashlađuje (teret u skladištima, zrak u klima jedinicama i dr.). Radi se o vodi, vodenim i drugim otopinama.

Svojstva radnih tvari PK rashl. uređ.

- toplinska svojstva
 - ✦ veliki rashladni učin
 - ✦ umjereni radni tlakovi, ali viši od atmosferskog
 - fizikalna svojstva
 - kemijska svojstva
 - ✦ nekorozivni, inertni
 - ✦ biološki razgradivi, neškodljivi za okoliš
 - sigurnosna svojstva
 - ✦ zapaljivost i toksičnost
 - ekonomski kriteriji
-

Toplinska svojstva



Kritična temperatura treba biti što viša u odnosu na temperaturu kondenzacije, a koja ovisi o temperaturi rashladnog sredstva kondenzatora.

Kritični tlak trebao bi biti umjeren, dovoljno visok iznad radnog tlaka, ali ne previsok.

Specifična toplina tekuće faze što manja (bolji efekt kondenzacije, veće pothlađivanje, manji gubici kod prigušivanja), no specifična toplina pare što veća.

Entalpija isparivanja treba biti što veća zbog toplinske iskoristivosti uređaja – jer za isti ukupni rashladni učin treba manji protok radnog fluida.

Koeficijent toplinske vodljivosti što veći zbog izmjene topline u kondenzatoru i isparivaču.

Toplinska svojstva



Tlakovi kondenzacije i isparivanja trebaju biti iznad atmosferskog jer u protivnom postoji opasnost od ulaska zraka u sustav, ali s druge strane nije poželjno imati previsoke tlakove u sustavu što je povezano sa sigurnosnim aspektima rada.

Volumetrijski toplinski kapacitet što veći kako bi za isti ukupni rashladni učin uređaj trebao raditi s manje sredstva. Za rashladne fluide većih kapaciteta koriste se stapni (klipni) kompresori dok se za one manjih kapaciteta potrebni turbo (centrifugalni) kompresori.

Gustoća što veća kako bi se smanjile dimenzije kompresora i lakše postigao potreban radni tlak kondenzacije.

Temperatura kompresije što niža. Kompresijom se svakom fluidu povećava temperatura što iziskuje hlađenje kompresora, dvo ili višestepenu kompresiju i kvalitetnija i skuplja ulja za podmazivanje kompresora.

Fizikalna svojstva



Prisustvo mirisa ili neko drugo svojstvo kojim bi se moglo otkriti propuštanje u sustavu. Koriste se detektori propuštanja.

Ne bi se trebala topiti s kompresorskim uljima, jer se time slabe svojstva ulja.

Što niži kinematički viskozitet kako bi se smanjili gubici trenja pri strujanju fluida kroz sustav i time smanjila snaga potrebna za rad kompresora.

Kemijska svojstva



Sredstva trebaju biti kemijski stabilna tj. inertna pri svim tlakovima i temperaturama. Ne bi trebala kemijski reagirati niti s kojom tvari u sustavu: metalima iz kojih je izveden sustav, gumama ili raznim plastikama za brtvljenje, sredstvima za sušenje radnog fluida, vodom, zrakom, uljima.

Ne smiju biti otrovna, posebno kada se radi o čuvanju prehrambenih proizvoda.

Ne bi smjeli biti zapaljivi. Ugljični dioksid je s te strane jako dobar, dok je amonijak vrlo loše rješenje.

Sigurnosna svojstva




Promatraju se zapaljivost, otrovnost (toksičnost), utjecaj na prehrambene proizvode te sposobnost za stvaranje eksplozivne smjese ukoliko dođu u doticaj sa zrakom. Sredstva bi trebala biti nezapaljiva, neotrovnost, ne bi smjela imati utjecaj na hranu niti bi trebala reagirati sa zrakom. Grupiraju se prema zapaljivosti i otrovnosti.

Sigurnosne oznake

JAKO ZAPALJIVO	A3	B3
SLABO ZAPALJIVO	A2	B2
NEZAPALJIVO	A1	B1
	NISKA OTROVNOST	VISOKA OTROVNOST

Oznaka	Naziv	Sastav ili kemijska formula	Sigurnosna oznaka
		(maseni udjeli)	
Anorganske tvari			
R-717	amonijak	NH ₃	B2
R-718	voda	H ₂ O	A1
R-744	uglični dioksid	CO ₂	A1
Organske tvari			
Ugljikovodici			
R-290	propan	CH ₃ CH ₂ CH ₃	A3
R-600	butan	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃	A3
R-600a	izobutan	CH(CH ₃) ₂ CH ₃	A3
R-1270	propilen	CH ₃ CH=CH ₂	A3
Fluorouglikovodici (HFC)			
R-32	difluormetan	CH ₂ F ₂	A2
R-125	pentafluoretan	CHF ₂ CF ₃	A1
R-134a	1,1,1,2-tetrafluoroetan	CH ₂ FCF ₃	A1
R-143a	1,1,1-trifluoroetan	CH ₃ CF ₃	A2
R-152a	1,1-difluoroetan	CH ₃ CHF ₂	A2
Azeotropne smjese			
R-502		R22/R115 (48.8/51.2)	A1
R-507		R125/R143a (50/50)	A1
Zeotropne smjese			
R-404A		R125/R143a/R134a (44/52/4)	A1
R-407C		R32/R125/R134a (23/25/52)	A1
R-410A		R32/R125 (50/50)	A1

Sigurnosna oznaka smjese



Definira se prema oznaci najgoreg sastojka, tj. pretpostavlja se najgori scenario kada u uređaju preostane upravo taj sastojak.

Ekonomski kriteriji



Naravno, poželjna je što niža cijena rashladnog sredstva. Na ukupnu cijenu utječe dostupnost na tržištu te način skladištenja. Sredstva koja se mogu prenositi u malim spremnicima s nižim tlakovima, koja su nezapaljiva i neotrovna te ne zahtijevaju za smještaj spremnika posebno ventilirane prostore očito su povoljnija.

Kemijski sastav rashladnih sredstava

- halogenirani ugljikovodici
 - ugljikovodici (zasićeni i nezasićeni, ciklički)
 - neorganske tvari (dušik, kisik, helij, vodik...)
 - zeotropne i azeotropne smjese
 - sekundarni: vodene otopine soli
-

Identifikacija rashladnih tvari Rxx

- $xx + 90 = XYZ$, gdje je X – broj C atoma, Y – broj H atoma, Z – broj F atoma, $2X - Y - Z + 2$ – broj Cl atoma
 - ako je Cl=0 radi se o HFC spoju
 - malo slovo označava različite izomere (isti broj atoma, ali različita struktura)
 - primjer R-134a: $134 + 90 = 224$; C=2; H=2; F=4; Cl=0 \Rightarrow C H₂F – CF₃, tetrafluoretan (HFC 134a)
 - ciklički ugljikovodici (R-316, R-317 i R-318)
 - razni ugljikovodici (serija 600, npr. izobutan je R-600a)
 - nezasićeni ugljikovodici kao etilen, propilen i dr.(serija od 1000)
-

Ostala sredstva

- ASHRAE standard 34 -2004 i ISO 817: zeotropne smjese - serija brojeva 400; azeotropne smjese - serija brojeva 500
 - brojevi se dodjeljuju prema kronološkom redu odobravanja od strane ASHRAE
 - velika slova označavaju iste sastojke u smjesi, ali s različitim udjelima (R-407A R32/125/134a (20/40/40), R-407B R32/125/134a (10/70/20), R-407C R32/125/134a (23/25/52), R-407D R32/125/134a (15/15/70), R-407E R32/125/134a (25/15/60))
 - anorganske tvari
 - oznaka=700+molekularna masa
 - $m_{\text{NH}_3}=17$ (R-717), m_{CO_2} (R-744), $m_{\text{H}_2\text{O}}$ (R-718)
 - neki indirektni rashladni sustavi kao radni fluid sekundarnog sustava koriste vodu ili, za niže radne temperature, binarne smjese ili vodene otopine soli
-

Stanje na tržištu (kontejnerski sustavi)



- R134a
 - R404A
 - R407C, R407D
 - R410A
 - R413A
 - R507A
-

Ulja za podmazivanje kompresora

- u skladu s preporukama proizvođača kompresora
 - svojstva:
 - ✦ mali udio parafinskih komponenata koje mogu izazivati začepljenja u sustavu
 - ✦ termička stabilnost kako na toplim površinama (tlačni ventili kompresora) ne bi stvarali taloge
 - ✦ ne smiju kemijski reagirati
 - ✦ nisko stinište kako bi čak i kod najnižih temperatura u sustavu ostala tekuća
 - ✦ sposobnost miješanja i topivost s radnim fluidom zbog povrata u kompresor
 - ✦ visok indeks viskoziteta znači dovoljnu mazivost kod niskih, ali i dovoljan viskozitet kod najviših temperatura
-

Na tržištu



- mineralna ulja – koristila su se uz CFC spojeve
 - alkil benzenska ulja (AB)
 - poliol esterska ulja (POE)
 - polialfa olefinska ulja (PAO)
 - polialkil glikolna ulja (PAG)
 - HFC spojevi trebaju sintetička ulja
-

Danas

Refrigerant	Appropriate Lubricant				
	Mineral Oil (MO)	Alkyl benzene (AB)	Polyol Ester (POE)	Poly alpha olefin (PAO)	Poly alkyl glycol (PAG)
CFC-11	✓	✗	□	□	✗
CFC-12	✓	✓	□	□	✗
R-502	✓	✓	□	□	✗
HCFC-22	✓	✓	□	□	✗
HCFC-123	✓	✓	□	□	✗
HFC-134a	✗	✗	✓	✗	□
HFC-404A	✗	✗	✓	✗	□
HFC-407C	✗	✗	✓	✗	□
HFC-410A	✗	✗	✓	✗	□
HFC-507A	✗	✗	✓	✗	□
HC-600a	✓	□	✓	✓	□
IIC 290	✓	□	✓	✓	□
R 717 (NH ₃)	✓	□	✗	✓	□
R 744 (CO ₂)	□	□	✓	✓	✓

✓: Good Suitability □: Application with limitations ✗: Not Suitable

1.6. Promjena faze čiste tvari i smjese

Izmjena topline uz promjenu faze



- čista (jednostavna) tvar: isparava uz konstantan tlak i temperaturu
 - smjesa: isparava uz promjenu temperature te sastava (mijenja se sastav tekuće i plinovite faze)
 - utjecaj na rad: kod propuštanja uređaja mijenja se sastav (engl. composition shift) te uređaj radi lošije (engl. temperature shift)
 - nadopunjavanjem se stanje popravlja, ali ne u potpunosti
-

1.7. Smjese

Smjesa vs. čista tvar



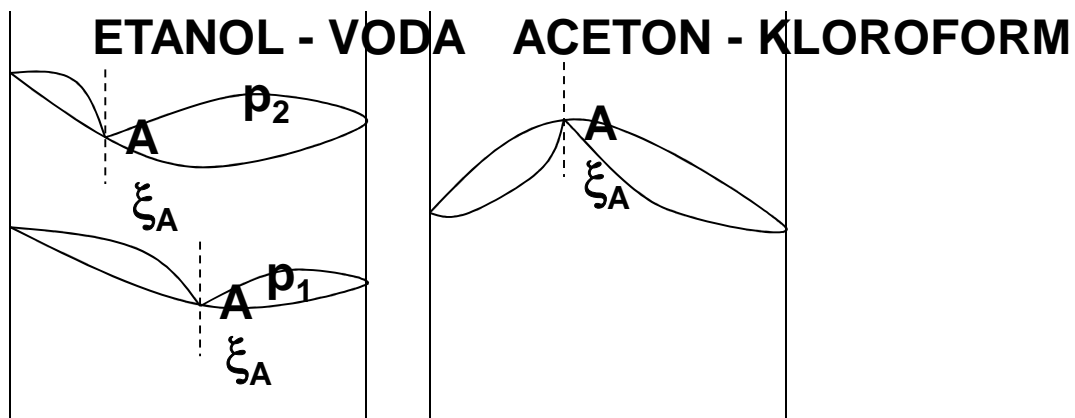
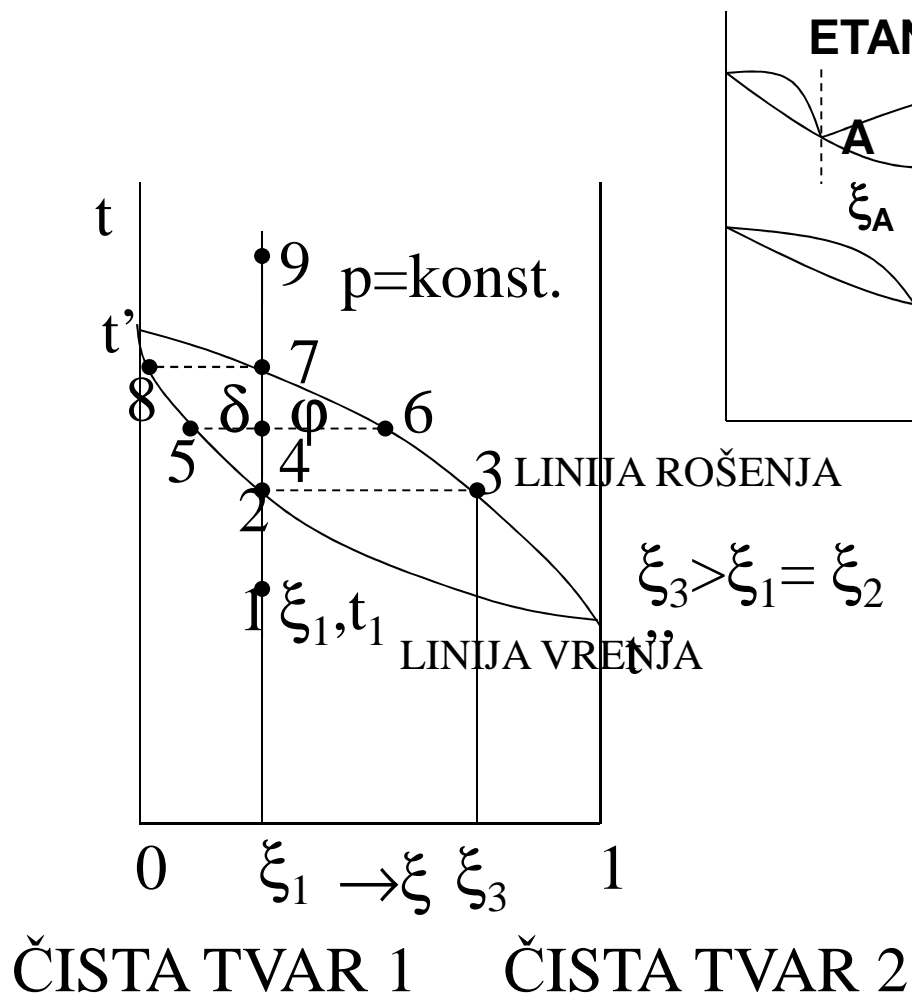
Čista (jednostavna) tvar mijenja fazu pri konstantnom tlaku i temperaturi.

Smjese mogu biti homogene i heterogene. Kod homogenih smjesa u svakom dijelu je isti sastav i ne može se odvojiti na sastojke bez uloženog rada. Kod heterogenih je smjesa to suprotno.

Promjena faza kod smjesa odvija se na drukčiji način nego što je to slučaj s čistom tvari. Tijekom procesa promjene faze mijenja se sastav smjese te temperatura. U slučaju isparivanja para koja nastaje bogatija je sastojkom koji lakše isparava, a preostaje tekuća faza koja je siromašnija tim sastojkom.

Zeotropne i azeotropne smjese razlikuju se po tome što azeotropne imaju koncentraciju (točku) pri kojoj se smjesa ponaša kao čista tvar.

Zeotropne i azeotropne smjese



Koji se eksploatacijski problem javlja kod uređaja koji rade sa smjesama?

Uslijed propuštanja u sustavu gubi se radni fluid, no kako je riječ o smjesi dvije ili više tvari, ne gubi se jednak maseni udio svih sastojaka. Većim se dijelom gubi lakše isparljiva komponenta. Prilikom nadopune sustava originalnom smjesom ne postiže se u sustavu potrebna koncentracija!

1.8. Ekologija i međunarodna pravila

Utjecaj na okoliš

- ozon + zatopljenje atmosfere
 - halogenirani ugljikovodici (CFC i HCFC spojevi), CO₂, CH₄, N₂O i dr.
 - Montrealski protokol
 - ✦ 1987, uz izmjene i dopune u Londonu 1990, Copenhagen 1992, Beč 1995, Montreal 1997 i Peking 1999
 - Kyoto protokol usvojen 1997 stupio na snagu 2005
 - Evropske konvencije
 - prilog VI MARPOL konvencije
 - dužnost operatera rashladnog uređaja što manje ispuštanja u okoliš
 - danas se koriste HFC spojevi (nema klora)
-

Praktične vježbe na simulatoru Carrier

- elementi sustava
 - normalan rad s TEV
 - određivanje pregrijanja TEV-a
 - manjak radnog sredstva
 - TEV
 - ✦ predimenzioniran
 - ✦ otpušten bulb
 - prijav kondenzator
 - led na isparivaču
-



HVALA
