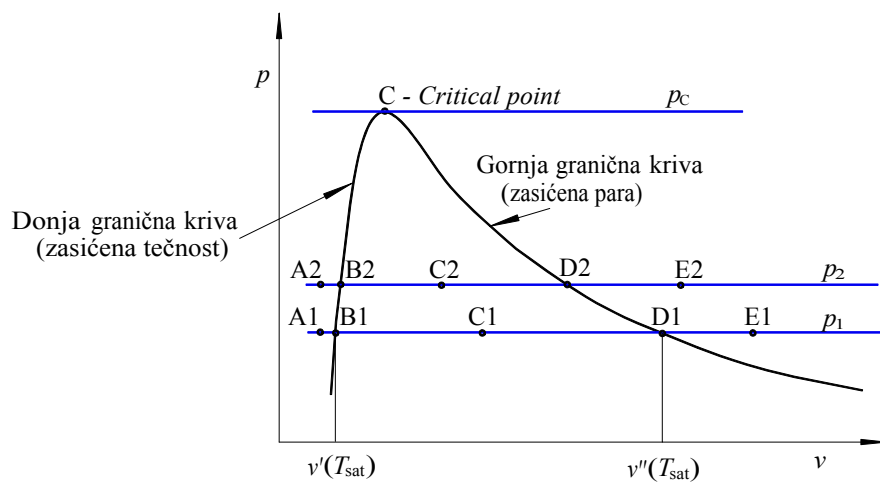
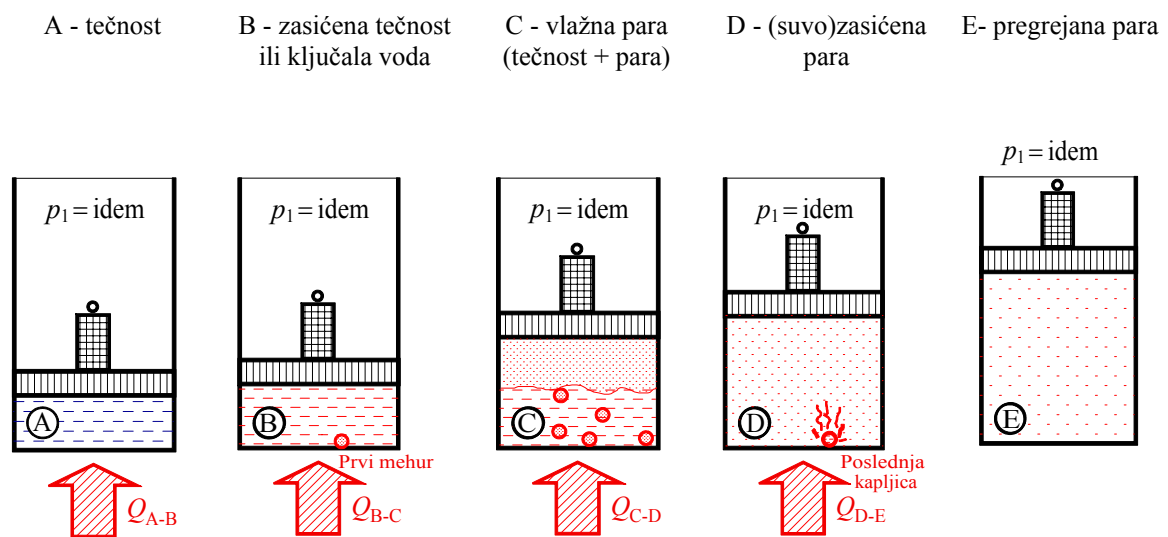


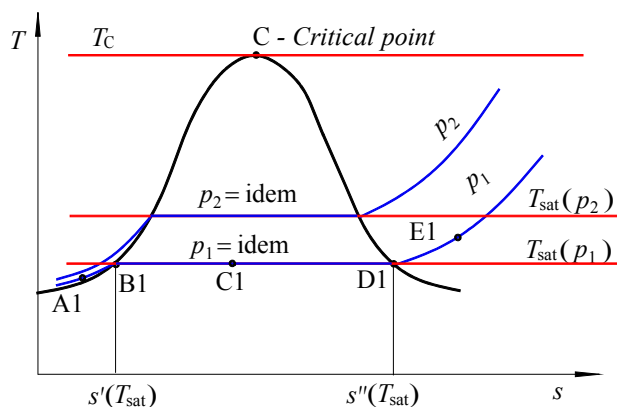
## 12. Jednokomponentne realne radne supstancije

### 12.1 Uvod

- Pre svega odnosi se na vodu-vodenu paru i rashladne fluide ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , ...freoni)
- Osnovna osobenost realnih radnih supstancija je da mogu da menjaju agregatno stanje
- Da bi se uočilo tipično ponašanje jednokomponentnih realnih radnih supstancija, analiziraće se proces zagrevanja vode koja se nalazi u cilindru koji je hermetički zatvoren sa pokretnim klipom.

### 12.2 Dijagram stanja jednokomponentnih realnih radnih susptancija

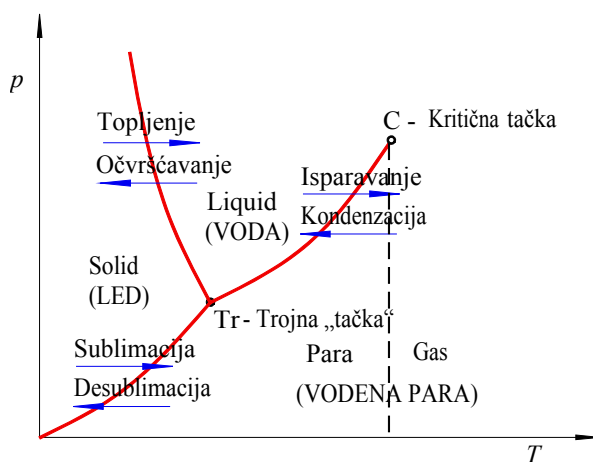




- Postoji direktna veza između temperature i pritiska ključanja  $p_{\text{sat}} = f_1(T)$ , tj.  $T_{\text{sat}} = f_2(p)$
- Pojava prelaska iz tečnog u gasovito stanje može se objasniti na molekularnom nivou. Dovođenjem energije tečnosti (toplote), oscilovanje molekula i njihove kinetičke energije postaju sve veće. U jednom momentu, kinetičke energije su toliko velike da dolazi do raskida međumolekularnih veza koje karakterišu tečno stanje, i molekuli počinju samostalno da se kreću prelazeći tako u gasovito stanje (važi i obrnuto).

### Dijagram faznih stanja za vodu-vodenu paru-led ( $p-T$ dijagram)

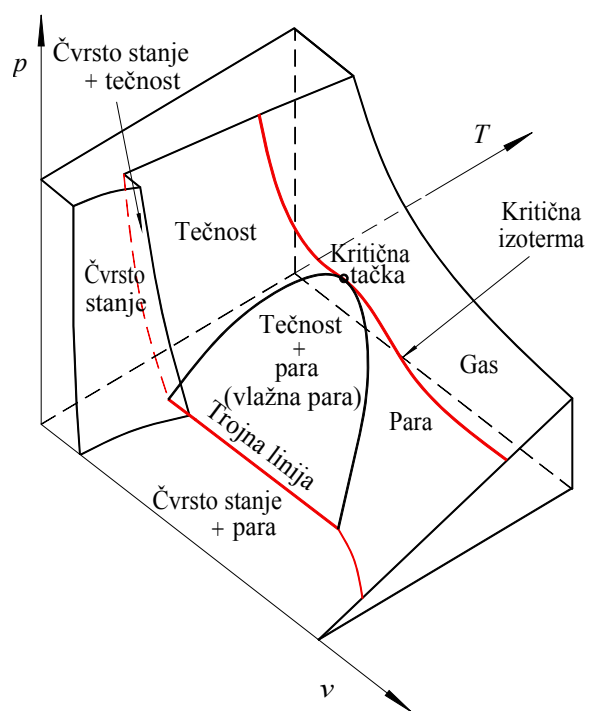
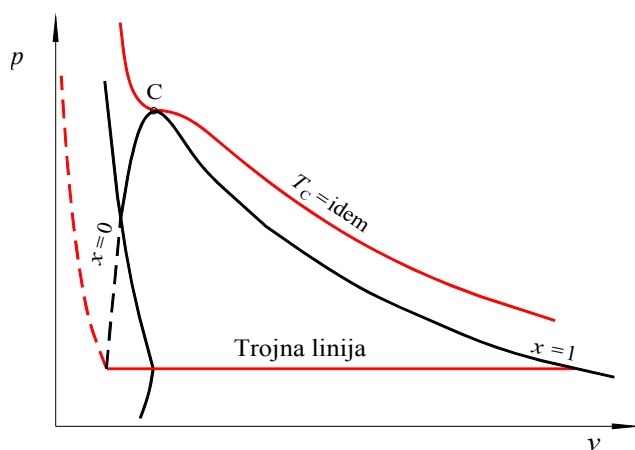
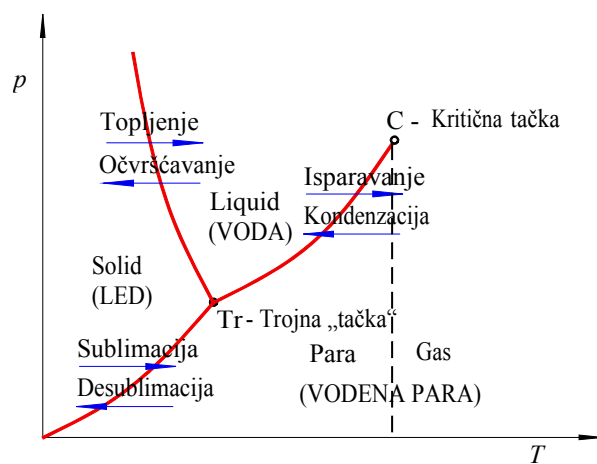
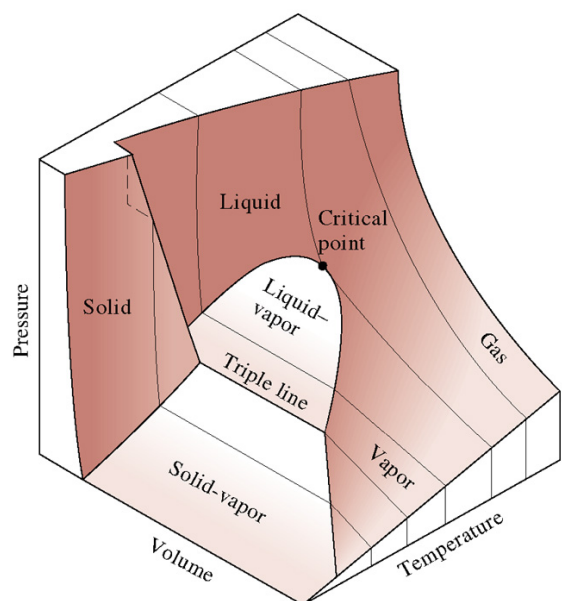
– (slični dijagrami, oblikom, za gvožđe, bizmut)



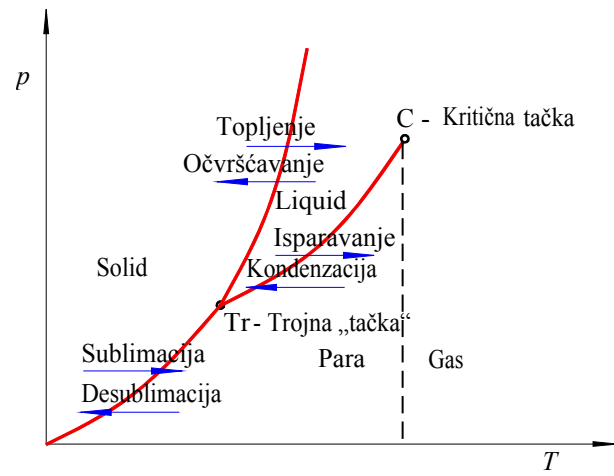
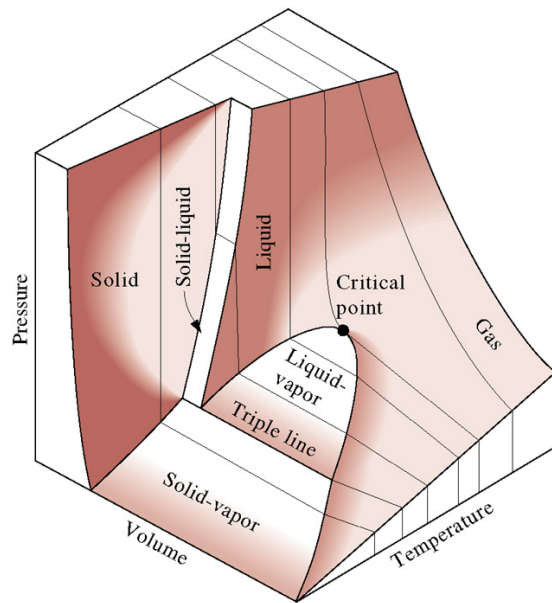
- Trojna „tačka“ (linija)
  - $T_{\text{Tr}} = 273,16 \text{ K}$
  - $p_{\text{Tr}} = 611,2 \text{ Pa}$
- Kritična tačka
  - $T_C = 647,24 \text{ K}$
  - $p_C = 22,115 \text{ MPa}$
  - $\vartheta_C = 374,12^\circ\text{C}$
  - $v' = v'' = 0,003147 \text{ m}^3/\text{kg}$
  - $h' = h'' = 2095,7 \text{ kJ/kg}$

## Trodimenzijski dijagram stanja realnih radnih supstancija

H<sub>2</sub>O (led – voda – vodena para)



CO<sub>2</sub> (ugljen-dioksid u čvrstom – tečnom –  
gasvitom stanju)



## Veze između količina stanja

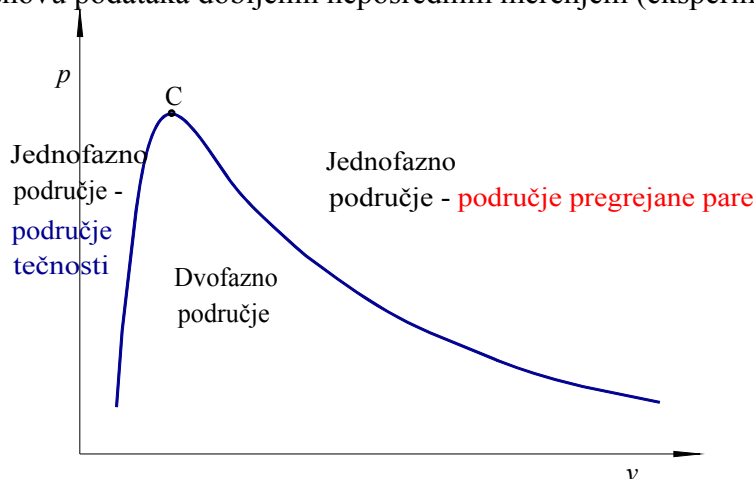
- Termička jednačina stanja  $f(p, T, v) = 0$  - Van der Waals jednačina,
- Energetske jednačine stanja  

$$f(u, p, T) = 0$$

$$f(h, p, T) = 0$$

## • Tablično

Promene stanja realne radne supstancije (fluida), najčešće se analiziraju pomoću "tabličnih" jednačina stanja. Tabele stanja se za svaku radnu supstanciju formiraju posebno, na osnovu podataka dobijenih neposrednim merenjem (eksperimentlnim putem).



## Jednofazno područje (Priručnik, tab. 4.4.8)

Tabela 4.4.8. VELIČINE STANJA ZA POTHLADENU VODU [  $p_{tr} < p < p_{cr} = 22,115 \text{ MPa}$ ,  $\vartheta_{liq}(p) < \vartheta < \vartheta_{sat}(p)$  ], PREGREJANU VODENU PARU [  $p < p_{cr}$ ,  $\vartheta_{sat}(p) < \vartheta < \vartheta_{cr} = 374,12^\circ\text{C}$  ] I REALNI GAS (  $p < p_{cr}$ ,  $\vartheta > \vartheta_{cr}$  ), A U ZAVISNOSTI OD PRITISKA I CELZIJUSOVE TEMPERATURE [31, 40]

Pritisak pothlađene vode i pregrijane vodene pare	$p = 1 \text{ kPa}$			$p = 5 \text{ kPa}$			$p = 10 \text{ kPa}$		
Temp.zasićenja	$\vartheta_{sat} = 6,982^\circ\text{C}$			$\vartheta_{sat} = 32,90^\circ\text{C}$			$\vartheta_{sat} = 45,83^\circ\text{C}$		
Veličine stanja vode i njene pare u stanju termodinamičke ravnoteže (zasićenja)	$v' = 0,001000 \text{ m}^3/\text{kg}$ ; $v'' = 129,208 \text{ m}^3/\text{kg}$ ; $h' = 29,33 \text{ kJ/kg}$ ; $h'' = 2513,8 \text{ kJ/kg}$ ; $s' = 0,1060 \text{ kJ/(kg K)}$ ; $s'' = 8,9756 \text{ kJ/(kg K)}$			$v' = 0,0010052 \text{ m}^3/\text{kg}$ ; $v'' = 28,196 \text{ m}^3/\text{kg}$ ; $h' = 137,77 \text{ kJ/kg}$ ; $h'' = 2561,2 \text{ kJ/kg}$ ; $s' = 0,4762 \text{ kJ/(kg K)}$ ; $s'' = 8,3952 \text{ kJ/(kg K)}$			$v' = 0,0010102 \text{ m}^3/\text{kg}$ ; $v'' = 14,676 \text{ m}^3/\text{kg}$ ; $h' = 191,84 \text{ kJ/kg}$ ; $h'' = 2584,4 \text{ kJ/kg}$ ; $s' = 0,6493 \text{ kJ/(kg K)}$ ; $s'' = 8,1505 \text{ kJ/(kg K)}$		
$\vartheta$ $^\circ\text{C}$	$v$ $\text{m}^3/\text{kg}$	$h$ $\text{kJ/kg}$	$s$ $\text{kJ/(K kg)}$	$v$ $\text{m}^3/\text{kg}$	$h$ $\text{kJ/kg}$	$s$ $\text{kJ/(K kg)}$	$v$ $\text{m}^3/\text{kg}$	$h$ $\text{kJ/kg}$	$s$ $\text{kJ/(K kg)}$
0	0,0010002	-0,0412	0,000154	0,0010002	0,0	-0,0001	0,0010001	0,0	-0,0001
10	130,60	2519,5	8,9956	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
20	135,23	2538,1	9,0604	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963
30	139,85	2556,8	9,1230	0,0010043	125,7	0,4365	0,0010043	125,7	0,4365
40	144,47	2575,5	9,1837	28,86	2574,6	8,4385	0,0010078	167,4	0,5721
50	149,09	2594,2	9,2426	29,78	2593,4	8,4977	14,87	2592,3	8,1752
60	153,71	2613,0	9,2997	30,71	2611,1	8,5552	15,34	2610,3	8,2331
70	158,33	2631,8	9,3552	31,64	2631,1	8,6110	15,80	2630,3	8,2892
80	162,95	2650,6	9,4093	32,57	2651,1	8,6652	16,27	2650,3	8,3437
90	167,57	2669,4	9,4619	33,49	2668,9	8,7180	16,73	2668,3	8,3968
100	172,19	2688,3	9,5132	34,42	2687,9	8,7695	17,20	2687,2	8,4484

Specifična unutrašnja energija:

$$u = h - pv$$

## Dvofazno područje – područje vlažne pare

- Vlažne para predstavlja smešu zasićene vode (tečne faze) i zasićene vodene pare (gasne faze).
- U području vlažne pare izoterme i izobare se poklapaju
- Veličine stanja na donjoj graničnoj krivi (zasićena tečnost) “nose” oznaku “prim“ ( $v'$ ,  $h'$ ,  $u'$ ,  $s'$ ), veličine stanja na gornjoj graničnoj krivi oznaku “sekund“ ( $v''$ ,  $h''$ ,  $u''$ ,  $s''$ ),

Priručnik, Tab.4.4.5 i Tab.4.4.6. po temperaturi zasićenja ( $\vartheta_{\text{sat}}$ )  
i Tab.4.4.7, po pritisku zasićenja ( $p_{\text{sat}}$ )

**Tabela 4.4.5. VELIČINE STANJA ZA VODU I NJENU ZAPREMINSKI RAZVIJENU PARU U STANJU TERMODINAMIČKE RAVNOTEŽE, PRI RAVNOJ POVRŠI RAZDVAJANJA FAZA, A U ZAVISNOSTI OD CELZIJSOVE TEMPERATURE [31, 40]**

Za stanje vode, pri  $\vartheta_0 = 0,01^\circ\text{C}$  i  $p_0 = 611,2\text{ Pa}$ , uzeto je da masena (specifična) Helmholtzeva funkcija [maseni (specifični) izohomo–izotemperaturni termodinamički potencijal] i masena (specifična) entropija iznose:  $f_0 = f'_0 = u'_0 - T_0 s'_0 = 0\text{ kJ/kg}$  i  $s_0 = s'_0 = 0\text{ kJ/(K kg)}$ , pa je i  $u_0 = u'_0 = 0\text{ kJ/kg}$ , dok je  $h_0 = h'_0 = u'_0 + p_0 v'_0 = 0,000\,614\text{ kJ/kg}$ .

Temperatura		Pritisak	Specifična zapremina		Specifična entalpija		Specifična količina toplote pri isparavanju	Specifična entropija		Specifična termodinamička (unutrašnja) energija	
			vode	pare*	vode	pare		vode	pare	vode	pare
$\vartheta$ °C	$T$ K	$p_{\text{sat}}$ MPa	$v'$ m <sup>3</sup> /kg	$v''$ m <sup>3</sup> /kg	$h'$ kJ/kg	$h''$ kJ/kg	$(h'' - h') = T_{\text{sat}}(s'' - s')$ kJ/kg	$s'$ kJ/(kg K)	$s''$ kJ/(kg K)	$u'$ kJ/kg	$u''$ kJ/kg
0,00**	273,15	0,000 610 8	0,001 000 2	206,321	− 0,04	2 501,0	2 501,0	− 0,000 2	9,156 5	− 0,040 6	2 374,98
0,01	273,16	0,000 611 2	0,001 000 2	206,175	0,000 614	2 501,0	2 501,0	0,000 0	9,156 2	0,000 0	2 374,99
5	278,15	0,000 871 8	0,001 000 0	147,167	21,01	2 510,2	2 489,2	0,076 2	9,025 8	21,01	2 381,90
10	283,15	0,001 227 1	0,001 000 3	106,419	41,99	2 519,4	2 477,4	0,151 0	8,900 9	41,99	2 388,81
15	288,15	0,001 704 1	0,001 000 8	77,970	62,94	2 528,6	2 465,7	0,224 3	8,781 5	62,94	2 395,73
20	293,15	0,002 336 8	0,001 001 7	57,833	83,86	2 537,7	2 453,8	0,296 3	8,667 4	83,86	2 402,56
25	298,15	0,003 166 3	0,001 002 9	43,999	104,77	2 546,8	2 442,0	0,367 0	8,558 3	104,77	2 409,39
26	299,15	0,003 360 0	0,001 003 2	41,031	108,95	2 548,6	2 439,6	0,381 0	8,537 0	108,95	2 410,74
27	300,15	0,003 563 9	0,001 003 4	38,811	113,13	2 550,4	2 437,3	0,394 9	8,515 9	113,13	2 412,08
28	301,15	0,003 778 5	0,001 003 7	36,726	117,31	2 552,3	2 435,0	0,408 8	8,495 0	117,31	2 413,53
29	302,15	0,004 004 3	0,001 004 0	34,768	121,48	2 554,1	2 432,6	0,422 7	8,474 3	121,48	2 414,88
30	303,15	0,004 241 7	0,001 004 3	32,929	125,66	2 555,9	2 442,0	0,436 5	8,453 7	125,66	2 416,23
31	304,15	0,004 491 3	0,001 004 6	31,199	129,84	2 557,7	2 427,9	0,450 3	8,433 4	129,84	2 417,58
32	305,15	0,004 753 6	0,001 004 9	29,572	134,02	2 559,5	2 425,5	0,464 0	8,413 2	134,02	2 418,93
33	306,15	0,005 029 0	0,001 005 3	28,042	138,20	2 561,4	2 423,2	0,477 7	8,393 2	138,19	2 420,38

**Tabela 4.4.7. VELIČINE STANJA ZA VODU I NJENU ZAPREMINSKI RAZVIJENU PARU U STANJU TERMODINAMIČKE RAVNOTEŽE, PRI RAVNOJ POVRŠI RAZDVAJANJA FAZA, A U ZAVISNOSTI OD PRITISKA [31, 40]**

Za stanje vode, pri  $\vartheta_0 = 0,01^\circ\text{C}$  i  $p_0 = 611,2\text{ Pa}$ , uzeto je da masena (specifična) Helmholtzeva funkcija [maseni (specifični) izohomo–izotemperaturni termodinamički potencijal] i masena (specifična) entropija iznose:  $f_0 = f'_0 = u'_0 - T_0 s'_0 = 0\text{ kJ/kg}$  i  $s_0 = s'_0 = 0\text{ kJ/(K kg)}$ , pa je i  $u_0 = u'_0 = 0\text{ kJ/kg}$ , dok je  $h_0 = h'_0 = u'_0 + p_0 v'_0 = 0,000\,614\text{ kJ/kg}$ .

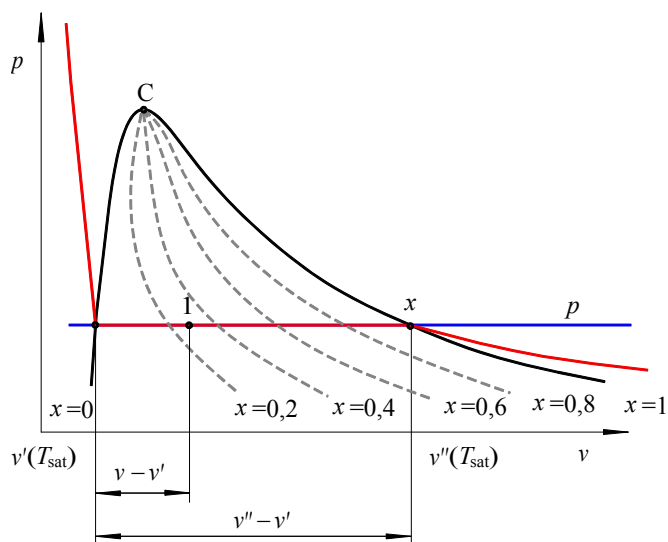
Pritisak	Temperatura		Specifična zapremina		Specifična zapremina		Specifična količina toplote pri isparavanju	Specifična entropija		Specifična termodinamička (unutrašnja) energija	
			vode	pare*	vode	pare		vode	pare	vode	pare
$\frac{p}{\text{MPa}}$	$\frac{\vartheta_{\text{sat}}}{^{\circ}\text{C}}$	$\frac{T_{\text{sat}}}{\text{K}}$	$\frac{v'}{\text{m}^3/\text{kg}}$	$\frac{v''}{\text{m}^3/\text{kg}}$	$\frac{h'}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{h''}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{(h'' - h') = T_{\text{sat}}(s'' - s')}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{s'}{\text{kJ/(kg K)}}$	$\frac{s''}{\text{kJ/(kg K)}}$	$\frac{u'}{\text{kJ/kg}}$	$\frac{u''}{\text{kJ/kg}}$
0,001 0	6,982	280,132	0,001 000 1	129,208	29,33	2 513,8	2 484,5	0,106 0	8,975 6	29,33	2 384,6
0,001 5	13,034	286,184	0,001 000 6	87,982	54,71	2 525,0	2 470,3	0,195 6	8,827 8	54,71	2 393,0
0,002 0	17,511	290,661	0,001 001 2	67,006	73,45	2 533,2	2 459,8	0,260 6	8,723 6	73,45	2 399,2
0,002 5	21,094	294,244	0,001 002 0	54,256	88,44	2 539,7	2 451,3	0,341 9	8,613 1	88,44	2 404,1
0,003 0	24,098	297,248	0,001 002 7	45,668	101,00	2 545,2	2 444,7	0,354 3	8,577 6	101,00	2 408,2
0,003 2	25,178	298,328	0,001 002 9	42,967	105,51	2 547,2	2 441,7	0,369 5	8,554 5	105,51	2 409,7
0,003 4	26,200	299,350	0,001 003 2	40,575	109,78	2 549,0	2 439,2	0,383 8	8,532 7	109,78	2 411,0
0,003 5	26,692	299,842	0,001 003 3	39,480	111,84	2 549,9	2 438,1	0,390 7	8,522 4	111,84	2 411,7
0,003 6	27,172	300,322	0,001 003 5	38,443	113,84	2 550,8	2 437,0	0,397 3	8,512 3	113,84	2 412,4
0,003 8	28,097	301,247	0,001 003 7	36,530	117,71	2 552,5	2 434,8	0,410 2	8,493 0	117,71	2 413,7
0,004 0	28,981	302,131	0,001 004 0	34,803	121,41	2 554,1	2 432,7	0,422 4	8,474 7	121,41	2 414,9
0,004 2	29,828	302,978	0,001 004 3	33,237	124,94	2 555,6	2 430,7	0,434 1	8,457 3	124,94	2 416,0
0,004 4	30,640	303,790	0,001 004 5	31,810	128,34	2 557,1	2 428,8	0,445 3	8,440 7	128,34	2 417,1
0,004 6	31,420	304,570	0,001 004 8	30,503	131,60	2 558,5	2 426,9	0,456 0	8,424 9	131,60	2 418,2
0,004 8	32,172	305,322	0,001 005 0	29,303	134,74	2 559,9	2 425,2	0,466 3	8,409 7	134,74	2 419,2
0,005	32,90	306,05	0,001 005 2	28,196	137,77	2 561,2	2 423,4	0,476 2	8,395 2	137,76	2 420,2

- Odnos mase zasićene pare ( $m_p$  ili  $m''$ ) i mase vlažne pare (zbir masa zasićene pare i zasićene tečnosti ( $m_p + m_t$  ili  $m'' + m'$ )) naziva se stepen suvoće vlažne pare i označava sa slovom  $x$ :

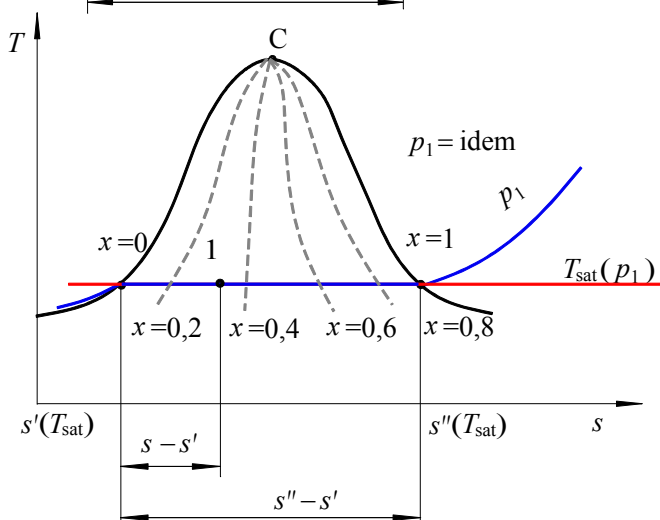
$$x = \frac{m_p}{m_t + m_p} = \frac{m''}{m' + m''}.$$

- Zasićena para ima stepen suvoće jednak jedinici  $x = 1$ , a zasićena tečnost stepen suvoće jednak nuli  $x = 0$ .
- Između pojedinih veličina stanja i stepena suvoće pare, u odgovarajućim stanjima vlažne pare, postoje međusobne zavisnosti:

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'} \Rightarrow v = v' + x(v'' - v')$$



$$x = \frac{s - s'}{s'' - s'} \Rightarrow s = s' + x(s'' - s')$$



Na isti način

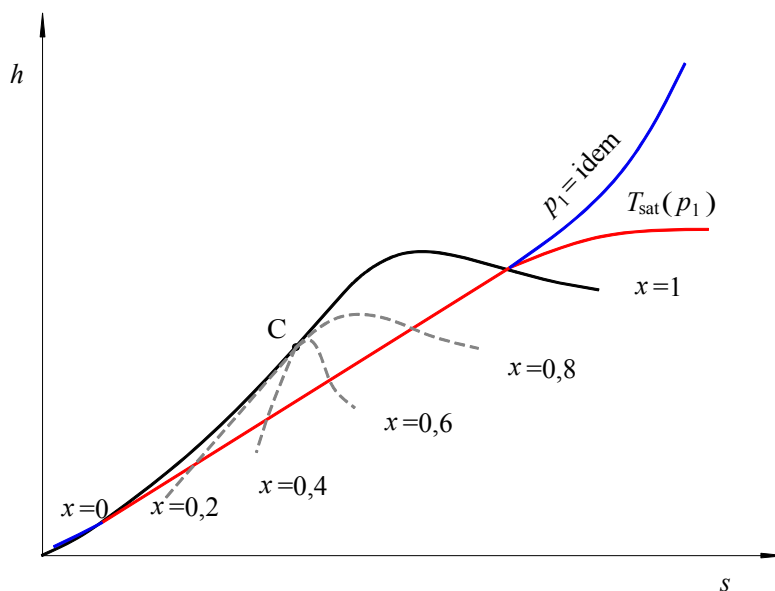
$$x = \frac{h - h'}{h'' - h'}$$

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

i

$$x = \frac{u - u'}{u'' - u'}$$

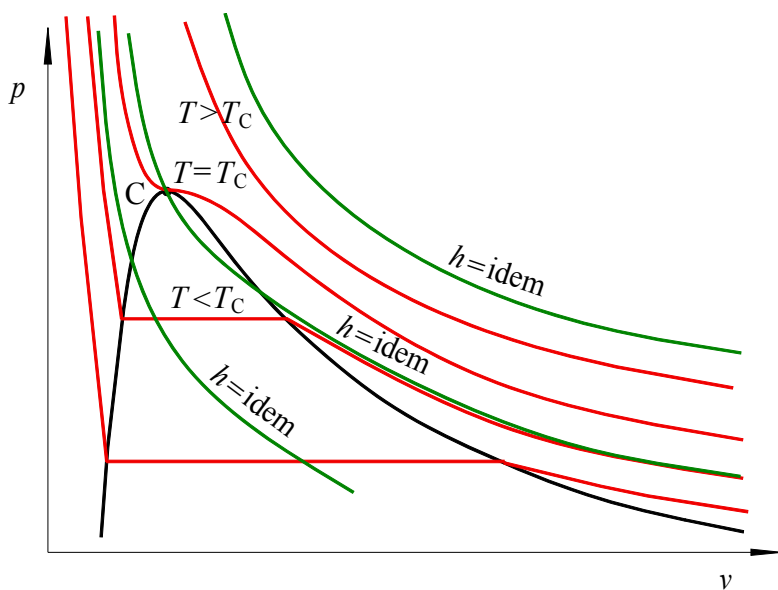
$$u = u' + x(u'' - u')$$



## Dijagrami stanja vode-vodene pare

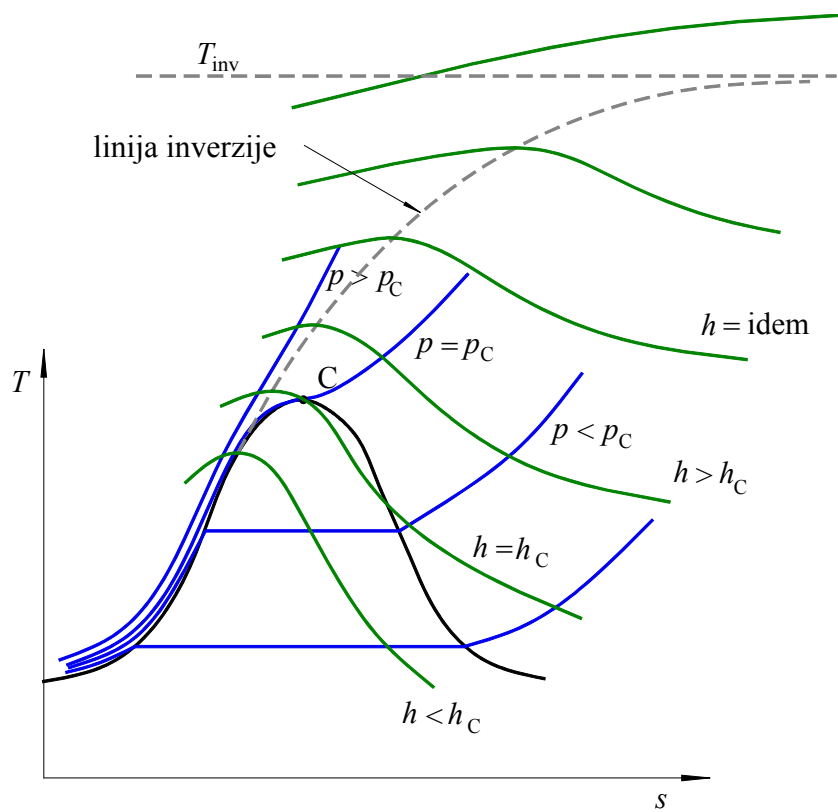
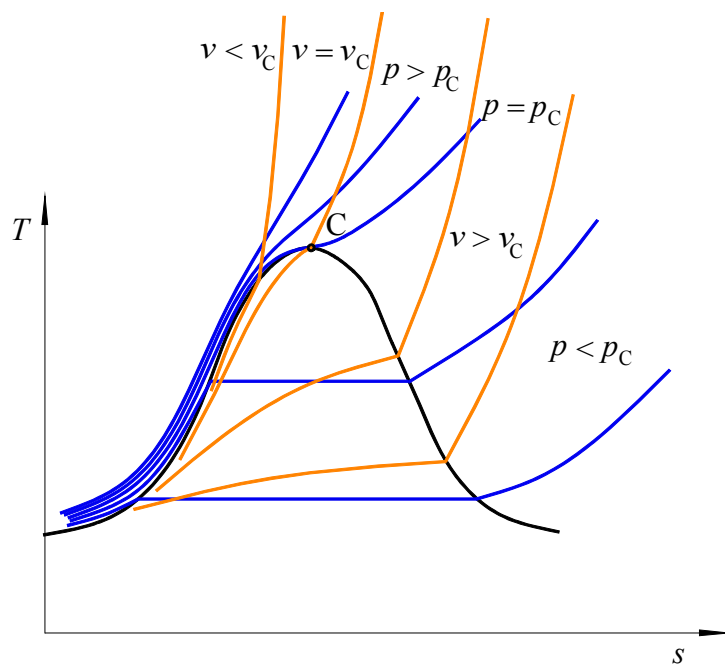
- Promene stanja realne radne supstancije (fluida), najlakše se analiziraju pomoću "grafičkih" jednačina stanja, takozvanih dijagrama stanja. Dijagrami stanja se za svaku radnu supstanciju formiraju posebno, na osnovu eksperimentalno dobijenih podataka.

### 1. Klajperonova (Clapeyron) ravan ( $p-v$ koordinantni sistem) – priručnik str. 43, Slika 4.3.1.





2. Belperova (*Belpaier*) ravan ( $T-s$  koordinatni sistem) – priručnik str.43, Slika 4.3.2.



3. Molierova (Mollier) ravan -  $h-s$  koordinatni sistem – priručnik str. 44, Slika 4.3.3.

1.

