

## 2. METODE ZA MERENJE VLAŽNOSTI PARE

### 2.1 Merenje vlažnosti prigušivanjem

Ovo je dobro poznat i jednostavan način za merenje vlažnosti pare. Vlažna para na izmerenom pritisku  $p_1$  se u dobro izolovanom cevovodu sa prigušnicom prigušuje do stanja pregrevanja u kome se mere pritisak  $p_2$  i temperatura  $T_2$ . Ukoliko se zanemere promene kinetičke energije struje vlažne i pregrevane pare, između entalpija ispred i iza prigušnice se može uspostaviti veza

$$h_1(p_1, y) = h''(p_1) - y_1 r(p_1) = h_2(p_2, T_2) + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} \quad (2.1)$$

gde je  $\dot{Q}$  snaga toplotnih gubitaka u okolinu,  $\dot{m}$  je maseni protok pare,  $r(p_1)$  je latentna toplota isparavanja na pritisku vlažne pare  $p_1$ ,  $h''(p_1)$  je entalpija suvozasićene pare na pritisku  $p_1$ , indeks 1 označava stanje ispred prigušnice, a 2 iza. Iz jednačine (2.1) se dobija izraz za određivanje vlažnosti pare na osnovu izmerenih parametara

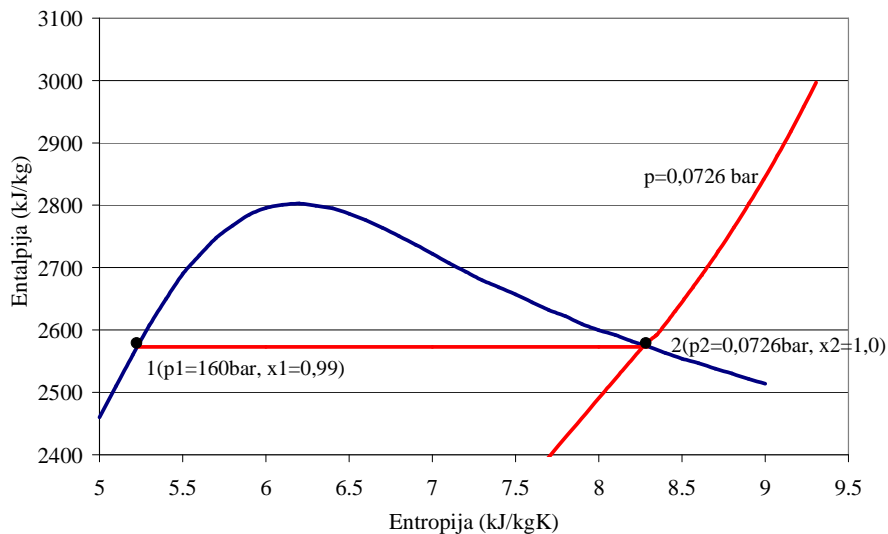
$$y_1 = \frac{h''(p_1) - h_2(p_2, T_2) - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}}}{r(p_1)} \quad (2.2)$$

Nedostaci ovog metoda, koji dovode do povećane greške merenja vlažnosti, su teškoća u određivanju gubitaka toplote u okolinu  $\dot{Q}$ , potreba za merenjem masenog protoka  $\dot{m}$  (ukoliko se gubici toplote ne mogu svesti na zanemarljivu vrednost odgovarajućom izolacijom) i teškoće u uspostavljanju termodinamičke ravnoteže između pare i kapi nakon prigušivanja. U cilju uspostavljanja termodinamičke ravnoteže između pare i kapi, potrebno je tako dimenzionisati ekspanzionu komoru da se obezbedi dovoljno vremena i strujnih uslova za uspostavljanje ravnoteže između faza. Međutim, pored ovih nepogodnosti, merenje vlažnosti prigušivanjem ima i praktično ograničenje u nekim slučajevima, zato jer se pregrevanje pare postiže tek pri izrazito niskim pritiscima, odnosno temperaturama. Tako, na primer, ukoliko bi se merila vlažnost pare pritiska od 160 bara, tada bi za vlažnost od 0,05 (5%) bilo potrebno prigušiti paru do pritiska od 0,02 bar, dok za vlažnost od 0,1 (10%) postupak uopšte ne bi bio moguć jer bi se prigušivanjem vlažna para prevela u dvofaznu mešavinu pare i leda. Na slici 2.1 je prikazana izentalpa pri prigušivanju vlažne pare stepena suvoće 0,99 i pritiska 160 bar do stanja suvozasićene pare, kojoj odgovara pritisak od 0,0726 bar.

### 2.2 Kalorimetarski metod

Uređaj za merenje vlažnosti pare putem njenog pregrevanja do stanja pregrevane pare je prikazan na slici 2.2. Vlažna para temperature  $T_1$  se prvim električnim grejačem 1 u potpunosti suši i pregreva do temperature  $T_2$ . Zatim se pomoću drugog grejača 2 pregreva do temperature  $T_3$ . Energetski bilans toka pare ispred i iza električnog grejača 1 glasi

$$\dot{Q}_1 = y\dot{m} + c_p \dot{m}(T_2 - T_1) + \dot{Q}_{g1} \quad (2.3)$$



Slika 2.1 Prigušivanje vlažne pare u h-s dijagramu

dok se za grejač 2 može napisati

$$\dot{Q}_2 = c_p \dot{m} (T_3 - T_2) + \dot{Q}_{g2} \quad (2.4)$$

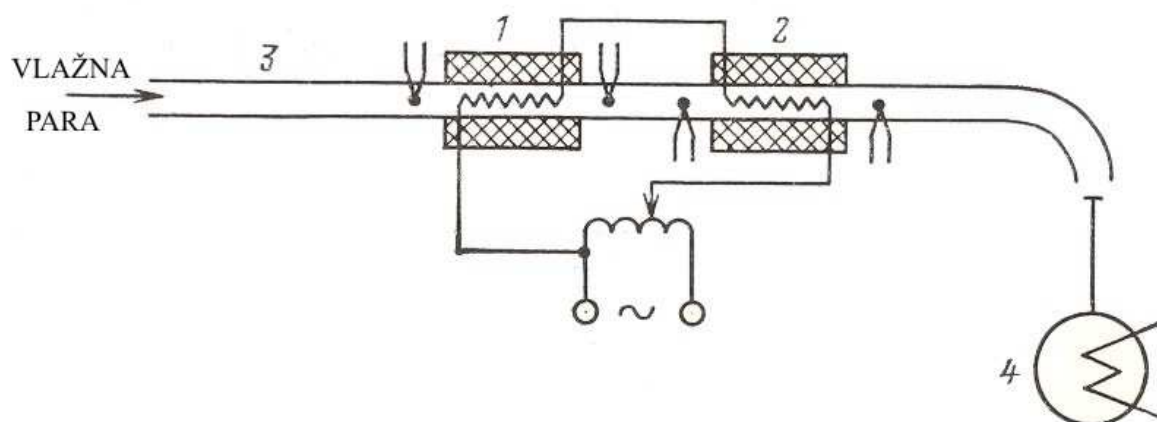
gde je  $\dot{Q}$  snaga grejača,  $\dot{m}$  je maseni protok pare,  $r$  je latentna toplota isparavanja,  $c_p$  je specifični toplotni kapacitet suve pare,  $T_1, T_2, T_3$  su sledstveno temperature ispred grejača 1, između grejača 1 i 2 i iza grejača 2, a  $\dot{Q}_g$  je snaga gubitaka toplote parovoda na delu grejača jedan i grejača 2.

Ukoliko se rad grejača podesi tako da je  $\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$  i ukoliko je  $\dot{Q}_{g1} = \dot{Q}_{g2}$  tada se vlažnost pare na ulazu u kalorimetar određuje kao

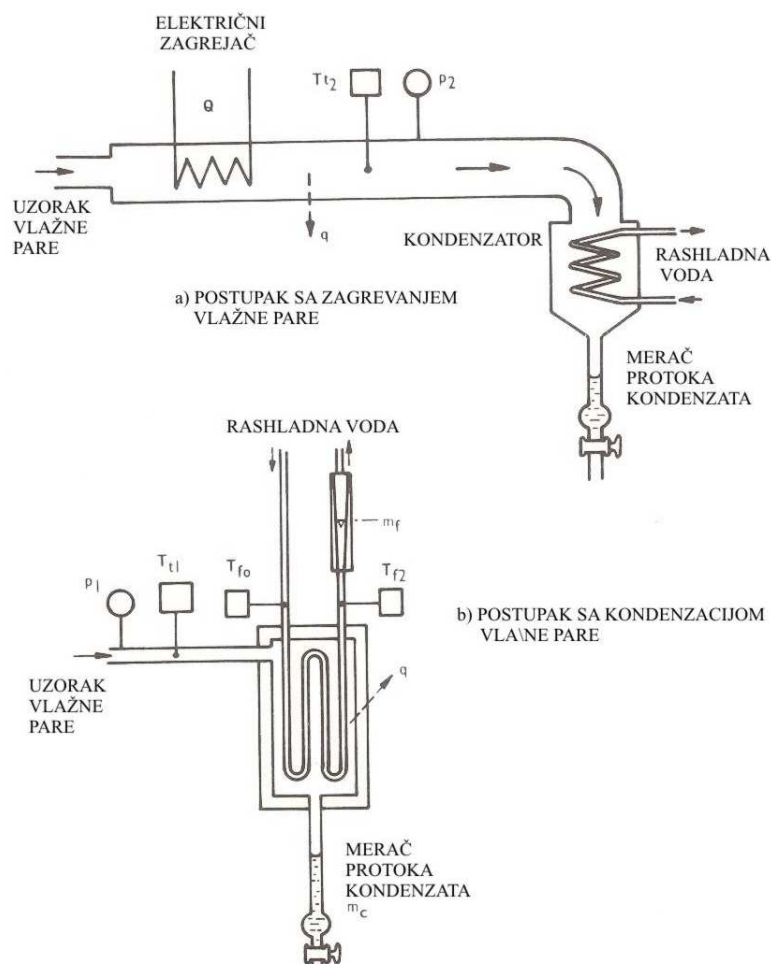
$$y = \frac{c_p [(T_3 - T_2) - (T_2 - T_1)]}{r} \quad (2.5)$$

Pogodnost ovog metoda je u tome što ne zahteva merenje protoka pare, s obzirom da je tačnost merenja protoka manja od tačnosti merenja pritiska i temperature. Nedostatak metode je u tome što je teško kontrolisati uslove pri kojima su jednake toplotne snage koje se predaju pari  $\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$  i gubici toplote u okolinu  $\dot{Q}_{g1} = \dot{Q}_{g2}$ . Uspostavljanje stacionarnog stanja pri merenju kalorimetrskim meračem je do 5 minuta (Kemeljman, 1982). Ovaj metod se koristi za merenje vlažnosti pare u turbini niskog pritiska. Procenjena apsolutna greška merenja je oko 2% (Deič i Filipov, 1987).

Na slici 2.3 su prikazani i kalorimetrski metodi merenja vlažnosti sa zagrevanjem vlažne pare do stanja pregrejanja, kao i sa potpunom kondenzacijom vlažne pare (Moore i Sieverding, 1976). Međutim, kod ovih postupaka je potrebno izmeriti protoke kondenzata, tako da je njihova



Slika 2.2 Kalorimetar za merenje vlažnosti pare



Slika 2.3 Kalorimetarski metodi sa merenjem protoka kondenzata

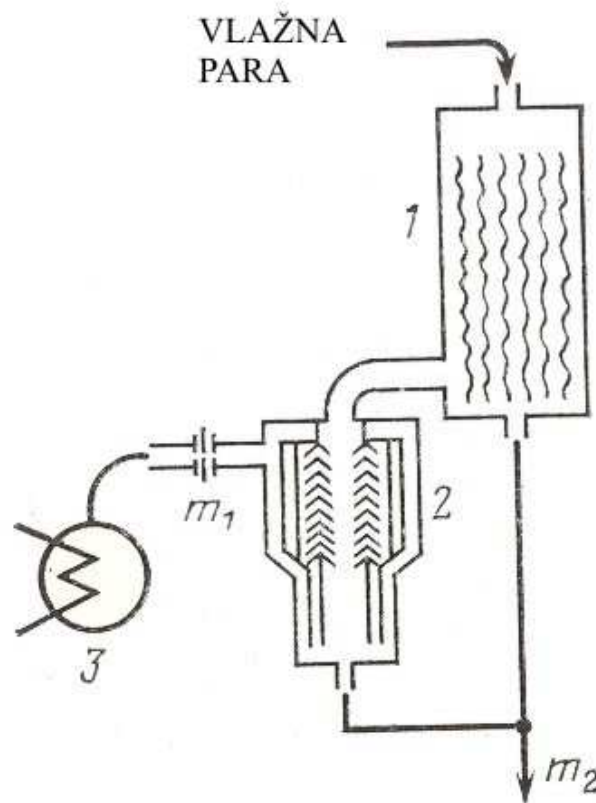
tačnost manja od tačnosti prethodno navedenog kalorimetarskog metoda. Procenjena relativna greška merenja vlažnosti pare u turbini niskog pritiska postupkom zagrevanja je 0,016 (1,6%), dok je kod postupka sa kondenzacijom pare relativna greška 0,087 (8,7%).

### 2.3 Separacioni metod

Separacioni metod (slika 2.4) je jednostavan i koristi se za merenje vlažnosti pare u turbini niskog pritiska (Deič i Filipov, 1987). Uređaj se sastoji od separatora sa vertikalnim 1 i talasastim 2 limovima u kojima se kapi vlage izdvajaju iz pare. Meri se protok kondenzata  $m_2$  i protok pare  $m_1$  tako da se vlažnost direktno određuje kao

$$y = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \quad (2.6)$$

Apsolutna greška merenja vlažnosti ovim postupkom je 0,025 (2,5%). Potrebno vreme za jedno merenje iznosi oko 10 minuta.



Slika 2.4 Uređaj za merenje vlažnosti pare postupkom separacije kapi

## 2.4 Određivanje vlažnosti pare postupkom merenja koncentracije soli

Ovaj postupak se koristi za merenje vlažnosti pare visokih pritisaka kod generatora pare. U kotlovsku vodu se rastvara so ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ), koja se zatim sa kapima uključuje u struju pare. Rastvaranje soli u suvoj pari je znatno manje od rastvaranja u vodi, tako da se merenjem koncentracije soli u kondenzatu vlažne pare određuje sadržaj vlage u pari koja je uzorkovana. Vlažnost se određuje izrazom

$$y = \frac{\left( \frac{C_{vp}}{C_v} - a \right)}{1 - a} \quad (2.7)$$

gde je  $C_{vp}$  koncentracija soli u kondenzatu vlažne pare,  $C_v$  je koncentracija soli u vodi, popravni koeficijent  $a$  se uvodi zato što postoji mala rastvorljivost soli i u suvoj pari, pri čemu je

$$a = \frac{C_p}{C_v} \quad (2.8)$$

$C_p$  je koncentracija soli u suvoj pari i povećava se sa povećanjem pritiska.

Ovaj metod za merenje vlažnosti se primenjuje za širok opseg vlažnosti pare, odnosno udela pare u dvofaznoj mešavini vode i pare, i njime se postiže zadovoljavajuća tačnost (Kemeljman, 1982).

## 2.5 Metodi za merenje vlažnosti pare koji zavise od kalibracije

Do sada navedeni postupci za merenje vlažnosti pare omogućuju direktno utvrđivanje vlage u pari i zasnovani su na termodinamičkim metodama (prigušivanje pare, kalorimetarske metode), mehaničkom odvajanju vlage (separacioni uređaj) i na merenju koncentracije soli u vodi i vlažnoj pari. Ove metode se nazivaju i apsolutne metode za merenje vlažnosti. Pored ovih, koriste se metode koje su zasnovane na indirektnom merenju vlažnosti i kalibraciji merene veličine u odnosu na sadržaj vlage u pari. Primeri ovih metoda su radioaktivno prozračivanje, optičke metode, merenje provodljivosti vlažne pare. Razvoj ovih metoda zahteva složeniji laboratorijski rad, pri čemu je potrebno obezbediti neki od apsolutnih metoda za kalibraciju (Deič i Filipov, 1987, Kemeljman, 1982, Moore i Sieverding, 1976). S obzirom na složenost razvoja metoda koje zahtevaju kalibraciju, znatno veće troškove njihovog razvoja i teškoće u primeni nekih od ovih metoda pri merenju vlažnosti na samom postrojenju i pri visokim pritiscima pare, ove metode se neće razmatrati.

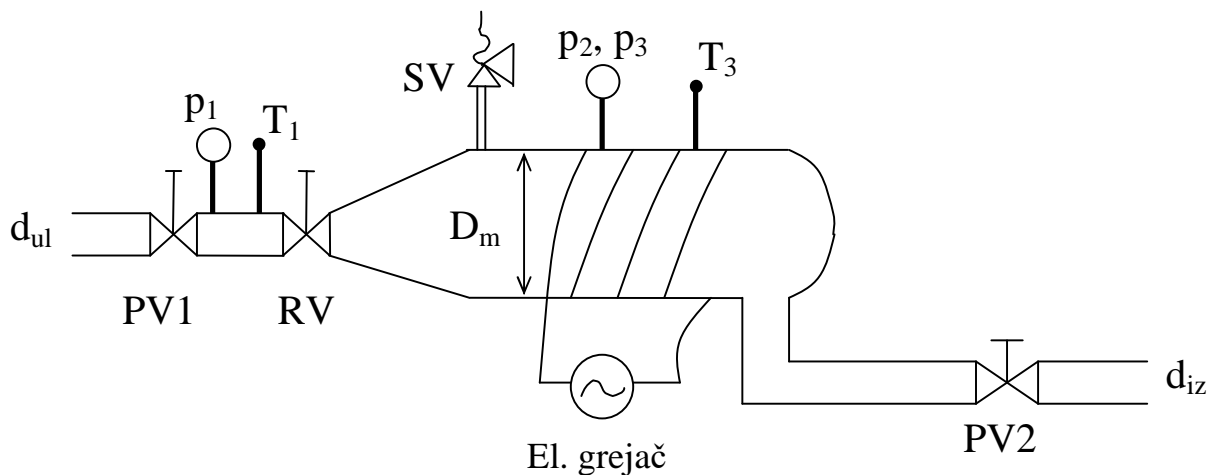
### 3 MERENJE VLAŽNOSTI PARE TERMODINAMIČKIM METODOM SA PRIGUŠIVANJEM I IZOHORSKIM ZAGREVANJEM

#### 3.1 Idejno rešenje postupka za merenje vlažnosti pare

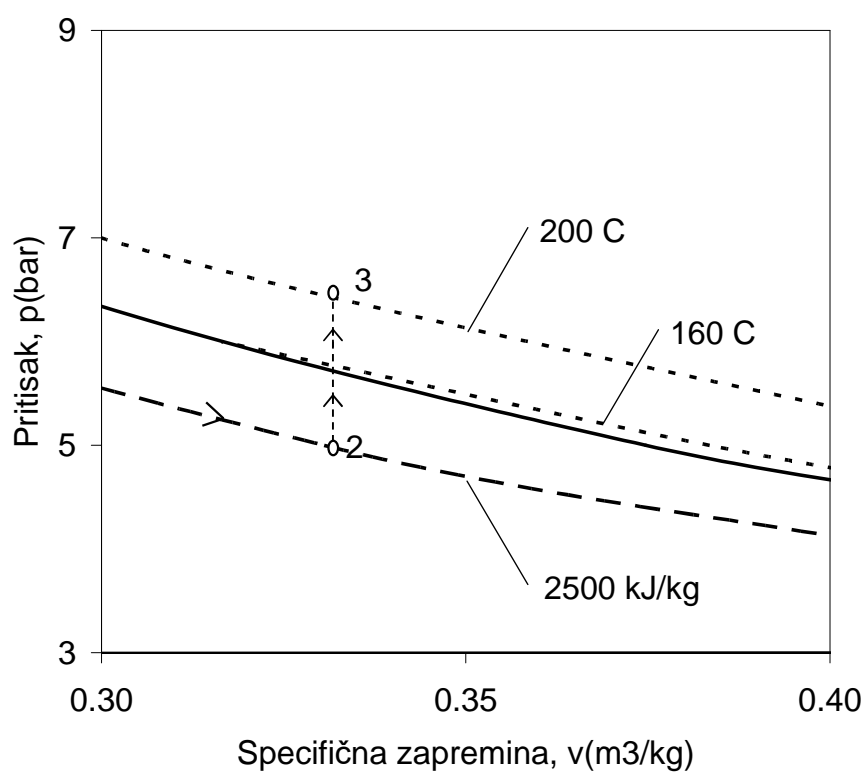
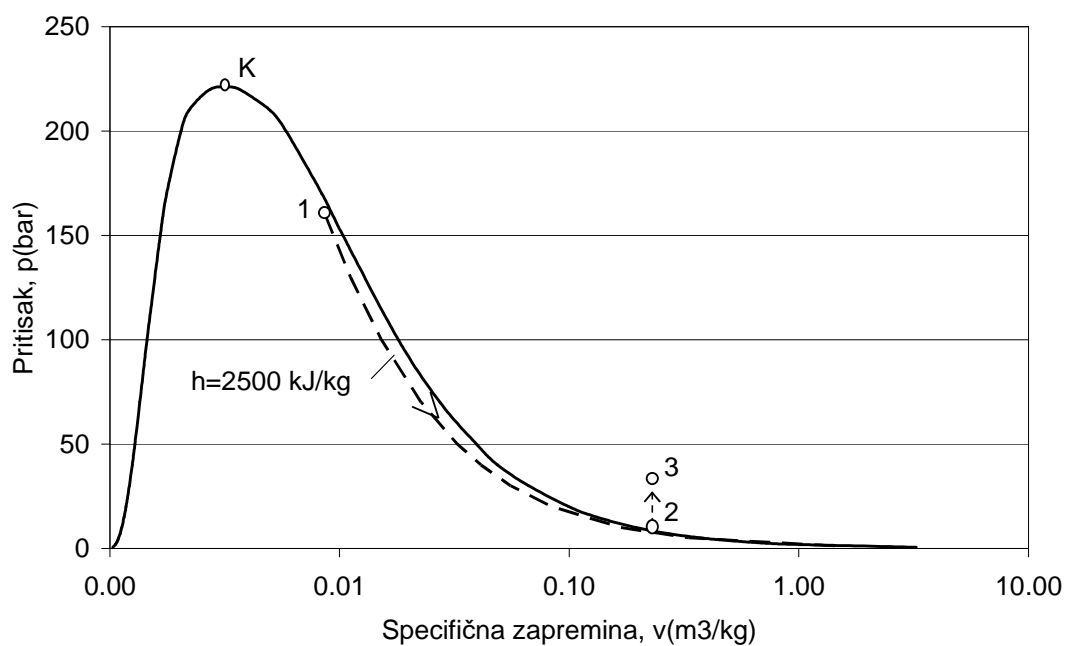
Odabrani postupak merjenja vlage u pari je zasnovan na adijabatskom prigušivanju vlažne pare, a zatim izohorskom zagrevanju do stanja pregrevanja. Uređaj za merenje vlažnosti pare je šematski prikazan na slici 3.1, a termodinamički procesi na osnovu kojih se određuje vlažnost pare koja se dovodi uređaju su prikazani u p-v i h-s dijagramu slike 3.2 i 3.3. Vlažna para na visokom pritisku stanja 1 (na primer  $p_1=160$  bar i stepena suvoće  $x=0,91$ ) se adijabatski prigušuje na regulacionom ventilu RV do niskog pritiska, protiče kroz posudu mernog uređaja i progreva je do uspostavljanja stacionarnog stanja 2 (na primer na pritisku od 5 bara). Para iz posude kroz izlazni cevovod i pregradni ventil PV2 ističe u atmosferu. Nakon uspostavljanja konstantnog pritiska, odnosno temperature u posudi, zatvaraju se pregradni ventili PV1 i PV2 i regulacioni ventil RV i posuda sa parom se zagreva izohorski do uspostavljanja novog stacionarnog stanja 3 u kome je para pregrevana (na primer na pritisku od približno 6,4 bara i temperaturi od  $T_3=200$  °C). Merenjem pritisaka  $p_1$ ,  $p_2$  i  $p_3$  i temperature  $T_3$  može se utvrditi stepen suvoće, odnosno vlažnost pare na ulazu u merni uređaj sledećim proračunom.

Specifična zapremina pregrevane pare je određena izmerenim vrednostima pritiska i temperature:

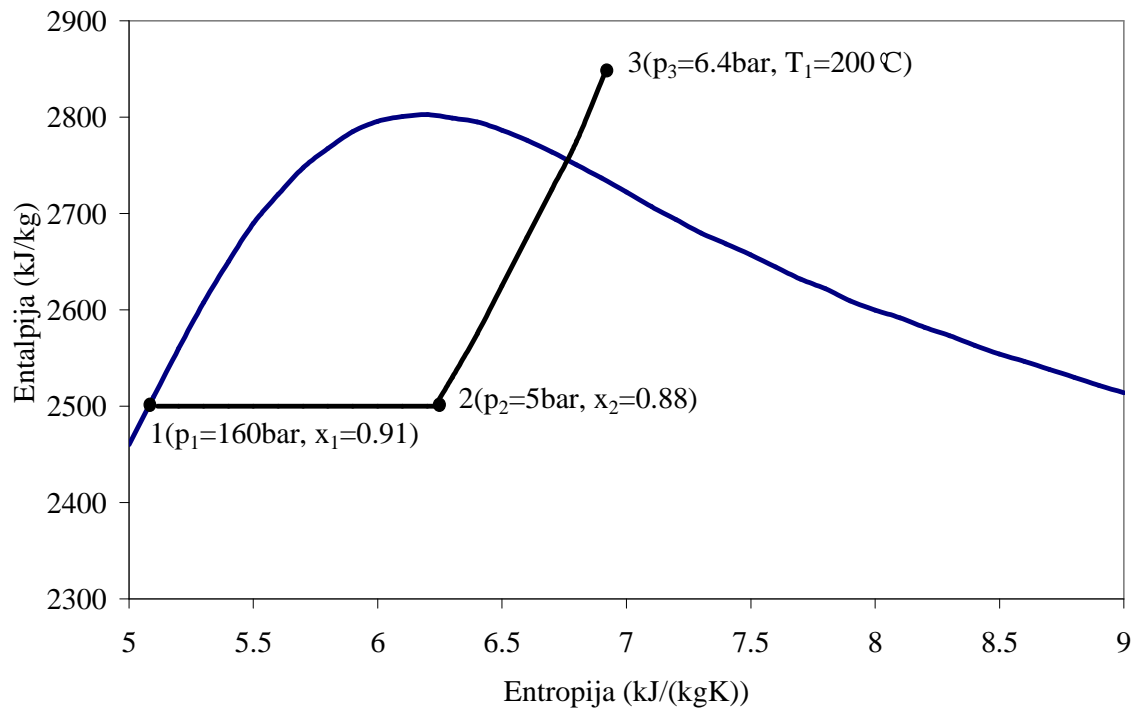
$$v_3 = v(p_3, T_3) \quad (3.1)$$



Slika 3.1 Šematski prikaz uređaja za merenje vlažnosti pare



Slika 3.2 Prikaz termodinamičkog procesa za određivanje vlažnosti pare u p-v dijagramu



Slika 3.3 Prikaz termodinamičkog procesa za određivanje vlažnosti pare u h-s dijagramu

S obzirom da se zagrevanje od stanja 2 do 3 obavlja pri zatvorenim ventilima na ulazu i izlazu iz posude (ventili RV i PV2) može se uspostaviti sledeća relacija koja uzima u obzir termičko širenje metalne posude pri zagrevanju

$$v_2 = \frac{v_3}{1 + \frac{\Delta V_t}{V_2}} = a \cdot v_3 \quad (3.2)$$

pri čemu se koeficijent popravke zbog termičkog širenja određuje kao

$$a = \frac{1}{1 + \frac{\Delta V_t}{V_2}} \quad (3.3)$$

gde je  $\Delta V_t$  povećanje zapremine posude usled termičkog širenja

$$\Delta V_t = V_3 - V_2 \quad (3.4)$$

$V_2$  je početna zapremina posude u stanju 2, a  $V_3$  je zapremina posude na kraju zagrevanja u stanju 3.



Stepen suvoće vlažne pare u stanju 2, na početku približno izohorskog zagrevanja u zatvorenoj posudi, može se odrediti kao

$$x_2 = \frac{v_2 - v_2'}{v_2 - v_2'} = \frac{a \cdot v_3 - v_2'}{\Delta v_2} \quad (3.5)$$

pri čemu su specifične zapremine zasićene vode i pare određene pritiskom  $p_2$

$$v_2' = v'(p_2), v_2'' = v''(p_2), \Delta v_2 = v_2'' - v_2' \quad (3.6)$$

Specifična entalpija u tački 2 se određuje kao

$$h_2 = h_2' + x_2 \cdot r_2 \quad (3.7)$$

gde je specifična entalpija zasićene vode određena pritiskom u stanju 2

$$h_2' = h'(p_2) \quad (3.8)$$

kao i latentna toplota isparavanja

$$r_2 = r(p_2) \quad (3.9)$$

Pri adijabatskom prigušivanju od stanja 1 do 2 entalpija vlažne pare se ne menja, tako da je

$$h_1 = h_2 \quad (3.10)$$

Na osnovu vrednosti entalpije u stanju 1 može se odrediti traženi stepen suvoće vlažne pare

$$x_1 = \frac{h_1 - h_1'}{r_1} \quad (3.11)$$

gde su specifična entalpija zasićene vode i latentna toplota isparavanja određene pritiskom u stanju 1

$$h_1' = h'(p_1), r_1 = r(p_1) \quad (3.12)$$

Uvodeći (3.5) u (3.7) dobija se

$$h_2 = h_2' + \frac{a \cdot v_3 - v_2'}{\Delta v_2} \cdot r_2 \quad (3.13)$$

Iz jednačina (3.10), (3.11) i (3.13) dobija se izraz za određivanje stepena suvoće vlažne pare u stanju 1

$$x_1 = \frac{1}{r_1} \cdot (h_2' + x_2 \cdot r_2 - h_1') = \frac{1}{r_1} \cdot \left( h_2' + \frac{a \cdot v_3 - v_2'}{\Delta v_2} \cdot r_2 - h_1' \right) \quad (3.14)$$

pri čemu su termodinamičke veličine stanja na desnoj strani jednačine (3.14) određene izmerenim vrednostima pritiska u stanjima 1, 2 i 3 i temperature u stanju 3, dakle

$$x_1 = \frac{1}{r(p_1)} \cdot \left( h'(p_2) + \frac{a \cdot v(p_3, T_3) - v'(p_2)}{\Delta v(p_2)} \cdot r(p_2) - h'(p_1) \right) \quad (3.15)$$

Između sračunatog stepena suvoće i vlažnosti pare važi jednostavna relacija

$$y_1 = 1 - x_1 \quad (3.16)$$