

PRIKAZ REZULTATA MERENJA VLAŽNOSTI PARE TERMODINAMIČKOM METODOM NA BLOKU TENT A6 KORIŠĆENJEM PATENTIRANOG UREĐAJA

V. Stevanović^{*}, J. Popović^{**}, M. Jovanović^{***}, Milan Petrović^{*}

Univerziteta u Beogradu, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd^{}*

*Zavod za intelektualnu svojinu, Knjeginje Ljubice 5, 11000 Beograd^{**}*

*Termoelektrane „Nikola Tesla“ d.o.o., P. fah25, 11500 Obrenovac^{***}*

Apstrakt: Razvijen je novi uređaj za merenje vlažnosti pare koji je zasnovan na apsolutnoj termodinamičkoj metodi. Metoda merenja je apsolutna u smislu da za njeno korišćenje nije potrebna kalibracija. Tačnost merenja je određena tačnošću merenja pritiska i temperature vlažne i pregrejane pare u okviru samog uređaja tokom termodinamičkih procesa kojima se podvrgava uzorkovana para čija se vlažnost meri. Uređaj se može koristiti za merenje vlažnosti pare čiji je pritisak veći od atmosferskog pritiska. Takođe, konstrukcija uređaja i primenjena metoda omogućavaju merenje vlažnosti pare na visokim pritiscima, bliskim kritičnom pritisku. U radu je prikazana konstrukcija mernog uređaja koja je patentno zaštićena, termodinamički postupak merenja i rezultati merenja vlažnosti pare na izlazu iz separacione boce na parnom kotlu bloka A6 Termoelektrane „Nikola Tesla A“ (TENT A6). Izmerene vrednosti pokazuju zavisnost vlažnosti pare od pritiska i nivoa vode u separacionoj boci. Vlažnost pare na izlazu iz separacione boce je neophodan parametar za određivanje toplotne snage potrebne za pregrevanje pare, odnosno za definisanje potrebne površine pregrejača pare u okviru linije pregrevanja pare na kotlu. Dobijena izmerena zavisnost vlažnosti pare od pritiska u separacionoj boci je korišćena kao podloga za projektovanje rekonstrukcije pregrejača pare na bloku TENT A6.

Ključne reči: *vlažnost pare, merna metoda, generator pare.*

PRESENTATION OF RESULTS OF STEAM MOISTURE MEASUREMENTS WITH A THERMODYNAMIC METHOD AT UNIT TENT A6 WITH THE APPLICATION OF A PATENTED APPARATUS

V. Stevanović^{*}, J. Popović^{**}, M. Jovanović^{***}, Milan Petrović^{*}

Abstract: A new apparatus was developed for the measurement of the steam moisture based on the absolute thermodynamic method. The method is absolute in a sense that it does not require calibration. The measuring accuracy is determined with the accuracy of the pressure and temperature measurements of wet and superheated steam in the apparatus during thermodynamic processes with the sampled steam. The apparatus can be used for the moisture measurements of steam at the pressure higher than the atmospheric pressure. The apparatus design and the applied method enables the steam moisture measurements at high pressures close to the critical pressure. The paper presents the measuring apparatus design that is protected by patent, the thermodynamic measuring method and the results of the steam moisture measurements at the exit of the steam separator in the Unit A6 of the Thermal Power Plant “Nikola Tesla A” (TENT A6). Measured values show a steam moisture dependence on the pressure and water level in the separator. The value of the steam moisture is a necessary parameter for the prediction of the heat power needed for the steam superheating, i.e. for design of heat exchange areas of the steam superheaters in the steam boiler. Obtained measured relation between the steam moisture and the steam separator pressure was a support to a design of the steam superheaters during the reconstruction of Unit TENT A6.

Key words: *steam moisture, measuring method, steam generator.*

1. UVOD

Poznavanje vlažnosti pare na izlazu iz separacionog uređaja parnog kotla, kao što je separaciona boca ili separator u dobošu kotla, značajno je u cilju dimenzionisanja i sagledavanja pogonskog stanja pregrejača pare. Prisustvo kapi u struji pare na izlazu iz separacionog uređaja dovodi do taloženja i isparavanja kapi u pregrejaču pare. Pregrejač pare u tom slučaju radi kao dodatni isparivač, a temperatura pare na izlazu iz isparivača je niža od projektnih vrednosti s obzirom da se toplota apsorbirana u isparivaču ne koristi za pregrevanje pare već za isparavanje kapi. Takođe, kapi sa sobom nose soli i druge primese koje se talože u pregrejaču, tako da se vremenom formira sloj koji predstavlja otpor prolazu toplote. Povećanje toplotnog otpora sa unutrašnje strane cevi pregrejača pogoršava hlađenje zida cevi pregrejača i dovodi do povećanje temperature metala, tako da vremenom može doći do termomehaničkih oštećenja i pucanja cevi. Stoga je na izlazu iz separacione boce ili doboša neophodno obezbediti vlažnost pare u propisanim granicama. U cilju

određivanja stvarne efikasnosti rada separacionih uređaja na kotlu u pogonu, potrebno je sprovesti specifična merenja.

Razvijeno je nekoliko metoda za merenje vlažnosti pare. Apsolutne metode 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. 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 [1, 2, 3]. Nedostaci ovih metoda su visoki troškovi njihovog razvoja i teškoće u primeni nekih od navedenih metoda pri merenju vlažnosti na samom postrojenju i pri visokim pritiscima pare.

U okviru ovog rada je predstavljena termodinamička metoda za merenje vlažnosti pare. Metoda je zasnovana na izentalpskoj ekspanziji vlažne pare visokog pritiska do stanja vlažne pare niskog pritiska, a zatim na izohorskom zagrevanju do stanja pregrevanja pare. Step en suvoće vlažne pare na visokom pritisku se određuje iz zavisnosti termodinamičkih parametara početnog stanja vlažne pare visokih parametara, među stanja vlažne pare i krajnjeg stanja pregrevane pare. Predložena metoda je tačnija i praktičnija od do sada poznatih termodinamičkih metoda za određivanje vlažnosti pare, kao što su metode prigušivanja vlažne pare, zagrevanja i kondenzacije [1]. Napominje se da metodu prigušivanja i nije moguće primeniti pri određivanju vlažnosti pare na izlazu iz separacionog uređaja s obzirom da bi se potrebno krajnje stanje pregrevane pare pri prigušivanju nalazilo u oblasti vakuuma na vrlo niskom apsolutnom pritisku.

2. MERENJE VLAŽNOSTI PARE TERMODINAMIČKOM METODOM SA PRIGUŠIVANJEM I IZOHORSKIM ZAGREVANJEM

Uređaj za merenje vlažnosti pare je šematski prikazan na slici 1. Uređaj je patentiran [4] i njegova primena omogućuje:

- merenje vlažnosti pare različitog nivoa pritiska: visokog pritiska u dobošu ili separacionoj boci kotla, srednjeg nivoa pritiska koji odgovara oduzimanjima vlažne pare iz turbine, do pritiska bliskih atmosferskom,
- prenosivost uređaja na različita merna mesta,
- zadovoljavajuću tačnost merenja vlage,
- relativno lako rukovanje i robusnost pri primeni.

Postupak merenja vlage u pari je zasnovan na adijabatskom prigušivanju vlažne pare, a zatim izohorskom zagrevanju do stanja pregrevanja. Termodinamički procesi na osnovu kojih se određuje

vlažnost pare koja se dovodi uređaju su prikazani u p-v i h-s dijagramu (slike 2 i 3). Vlažna para na visokom pritisku stanja 1 se adijabatski prigušuje na regulacionom ventilu RV do niskog pritiska, protiče kroz posudu mernog uređaja i progrevana je do uspostavljanja stacionarnog stanja 2. 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 pregrejana. Merenjem pritiska 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.

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

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

pri čemu je a koeficijent popravke zbog termičkog širenja, ΔV_t povećanje zapremine posude usled termičkog širenja, V_2 je početna zapremina posude u stanju 2.

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

$$x_2 = \frac{v_2 - v_2'}{v_2 - v_2'} = \frac{a \cdot v_3 - v_2'}{\Delta v_2} \quad (2)$$

Na osnovu stepena suvoće vlažne pare u stanju 2 i entalpija zasićene vode i pare određenih pritiskom p_2 izračunava se entalpija u stanju 2. Imajući u vidu da se pri adijabatskom prigušivanju od stanja 1 do 2 entalpija vlažne pare ne menja ($h_1 = h_2$), može se odrediti traženi stepen suvoće vlažne pare

$$x_1 = \frac{h_1 - h_1'}{r_1} \quad (3)$$

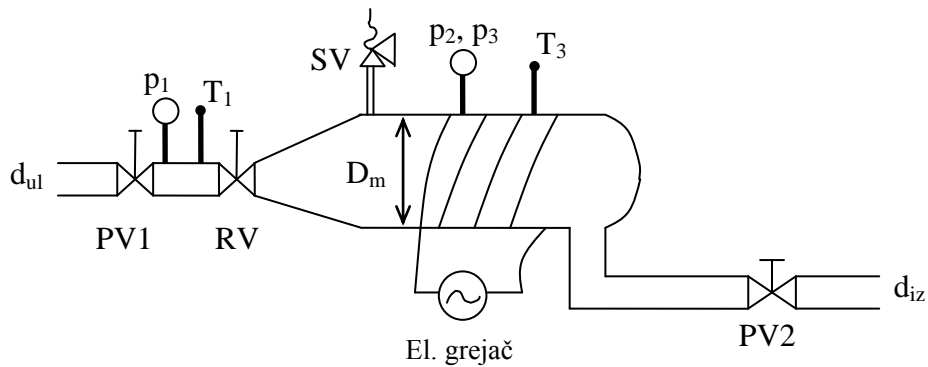
Iz jednačina (1), (2), i (3) dobija se izraz za određivanje stepena suvoće vlažne pare u stanju 1 pri čemu su termodinamičke veličine stanja na desnoj strani jednačine (4) određene izmerenim vrednostima pritiska u stanjima 1, 2 i 3 i temperature u stanju 3, dakle

$$x_1 = \frac{1}{r(p_1)} \cdot \left(h'(p_2) + \frac{a \cdot v(p_3, T_3) - v'(p_2)}{\Delta v(p_2)} \cdot r(p_2) - h'(p_1) \right) \quad (4)$$

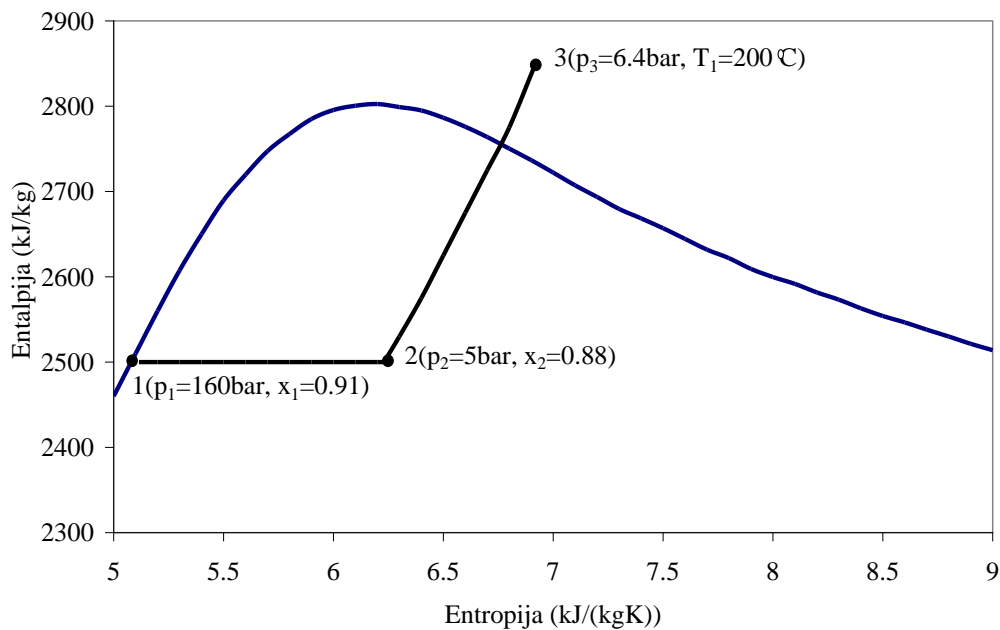
Između sračunatog stepena suvoće i vlažnosti pare važi jednostavna relacija

$$y_1 = 1 - x_1. \quad (5)$$

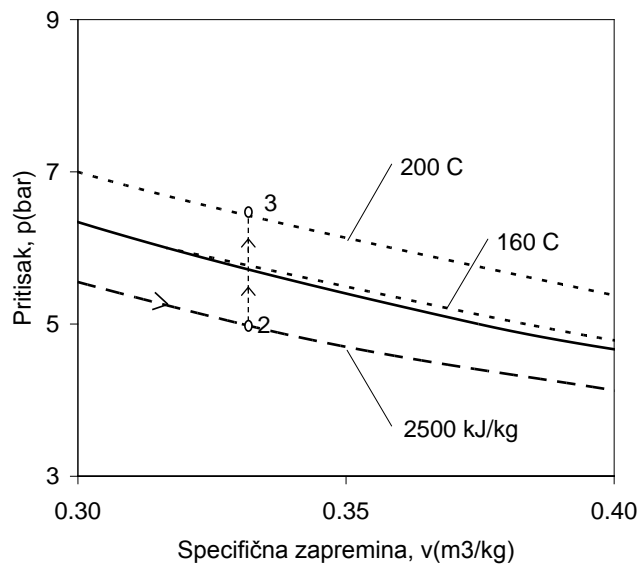
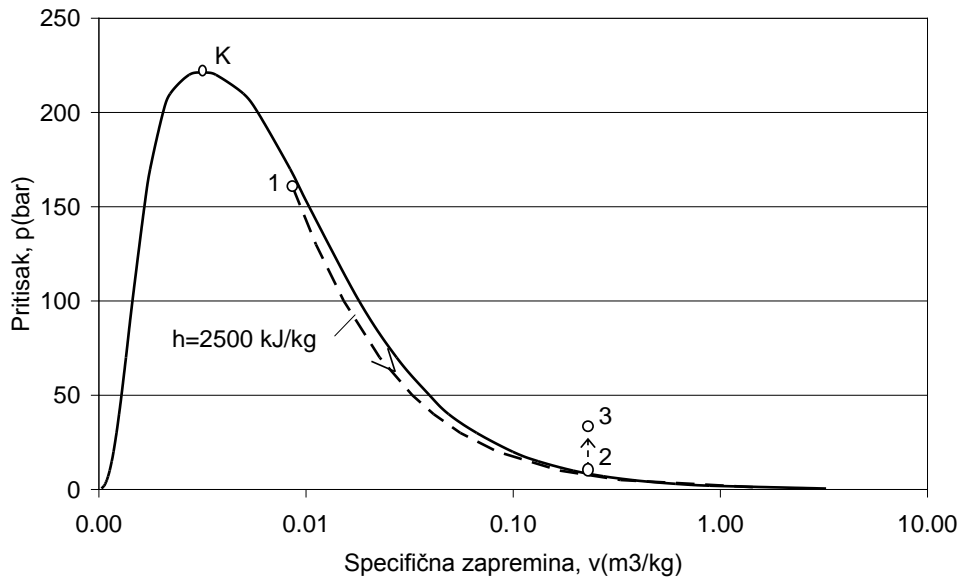
U cilju pouzdanog rada uređaja obezbeđena je dobra toplotna izolacija posude i ulazne i izlazne cevi sa pripadajućom armaturom. Dimenzije uređaja su optimalne. Posuda prima dovoljnu količinu pare, tako da na termodinamički proces tokom merenja praktično ne utiču toplotni gubici u okolinu. Postupak određivanja apsolutne greške merenja je prikazan u radu [5], kao što sledi.



Slika 1 Šematski prikaz uređaja za merenje vlažnosti pare.



Slika 2 Prikaz termodinamičkog procesa za određivanje vlažnosti pare u h-s dijagramu.



Slika 3 Prikaz termodinamičkog procesa za određivanje vlažnosti pare u p-v dijagramu.

Izvedena jednačina (4) pokazuje da je stepen suvoće funkcija izmerenih pritisaka u stanju 1, 2 i 3 i temperature u stanju 3

$$x_1 = x(p_1, p_2, p_3, T_3) \quad (6)$$

Ukoliko su apsolutne greške merenja pritisaka i temperature $\Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p_3, \Delta T_3$, tada se apsolutna greška merenja stepena suvoće pare određuje kao

$$|\Delta x_1| = \left| \frac{\partial x}{\partial p_1} \right| \cdot \Delta p_1 + \left| \frac{\partial x}{\partial p_2} \right| \cdot \Delta p_2 + \left| \frac{\partial x}{\partial p_3} \right| \cdot \Delta p_3 + \left| \frac{\partial x}{\partial T_3} \right| \cdot \Delta T_3 \quad (7)$$

Parcijalni izvodi stepena suvoće x_1 po zavisno promenljivim glase

$$\left| \frac{\partial x}{\partial p_1} \right| = \left| \frac{1}{r_1} \cdot \left[\frac{\partial h_1'}{\partial p_1} + \frac{1}{r_1} \cdot \frac{\partial r_1}{\partial p_1} \cdot \left(h_2' + r_2 \frac{a \cdot v_3 - v_2'}{\Delta v_2} - h_1' \right) \right] \right|, \quad (8)$$

$$\left| \frac{\partial x}{\partial p_2} \right| = \left| \frac{1}{r_1} \cdot \left[\frac{\partial h_2'}{\partial p_2} - r_2 \left(\frac{1}{\Delta v_2} \cdot \frac{\partial v_2'}{\partial p_2} + \frac{a \cdot v_3 - v_2'}{(\Delta v_2)^2} \cdot \frac{\partial (\Delta v_2)}{\partial p_2} \right) + \frac{a \cdot v_3 - v_2'}{\Delta v_2} \cdot \frac{\partial r_2}{\partial p_2} \right] \right|, \quad (9)$$

$$\left| \frac{\partial x}{\partial p_3} \right| = \left| \frac{a \cdot r_2}{r_1 \cdot \Delta v_2} \cdot \frac{\partial v_3}{\partial p_3} \right| \quad (10)$$

$$\left| \frac{\partial x}{\partial T_3} \right| = \left| \frac{a \cdot r_2}{r_1 \cdot \Delta v_2} \cdot \frac{\partial v_3}{\partial T_3} \right|. \quad (11)$$

Greška merenja stepena suvoće je analizirana za različite nivoe pritiska u posudi uređaja nakon adijabatske ekspanzije, a pre izohorskog zagrevanja (stanje 2 na slikama 2 i 3).

Procena termičke dilatacije posude pri zagrevanju od stanja 2 do 3:

$$\alpha = 20 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1}{^{\circ}C} \right), \Delta T \approx 50^{\circ}C \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T = 0,001, \frac{\Delta V_t}{V} \approx 1,003 \quad (13)$$

Popravni koeficijent u relaciji između specifičnih zapremina na početku i kraju približno izohorskog zagrevanja u jed. (1) iznosi $a = 0,997$.

Usvojene apsolutne greške merenja pritiska su 0,1% od mernog opsega instrumenta, a usvojena greška merenja temperature je 1 stepen Celzijusov.

Apsolutne greške merenja stepena suvoće pare su prikazane na slici 7 za različite pritiske nakon adijabatskog prigušenja, odnosno za pritiske na početku približno izohorskog zagrevanja (pritisak p_2 prema slikama 2 i 3). Dobijeni rezultati pokazuju da bi za smanjenje greške merenja pri nižim pritiscima p_2 bilo potrebno povećati tačnost merenja pritiska p_2 i p_3 (pritisak p_3 je pritisak na kraju približno izohorskog zagrevanja). Za usvojenu apsolutnu grešku merenja pritiska od 0,1%, koja odgovara standardnoj instrumentaciji za merenje pritiska, apsolutna greška merenja se ne menja mnogo u opsegu pritiska p_2 od 5 bara do 10 bara. Stoga se za pritisak p_2 nakon adijabatskog prigušivanja preporučuje vrednost od 5 do 7 bara, u okviru koga apsolutna greška merenja ima zadovoljavajuću

vrednost manju od 1,5%. Sa većom tačnošću merenja pritiska smanjila bi se i greška merenja vlažnosti pare, međutim smatra se da za tim nema praktične potrebe.

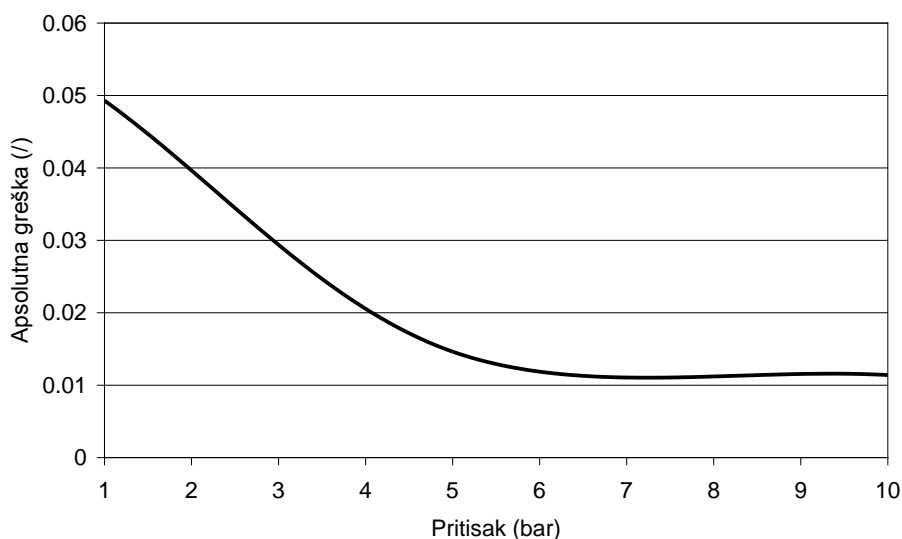
3. REZULTATI MERENJA VLAŽNOSTI PARE

Aparat za merenje vlažnosti pare je priključen neposredno na izlazu iz separacione boce na kotlu bloka A6 Termoelektrane „Nikola Tesla A“ (TENT A6) u Obrenovcu, nominalne snage 308,5 MW, slika 8. Merenja su sprovedena za sledeće uslove:

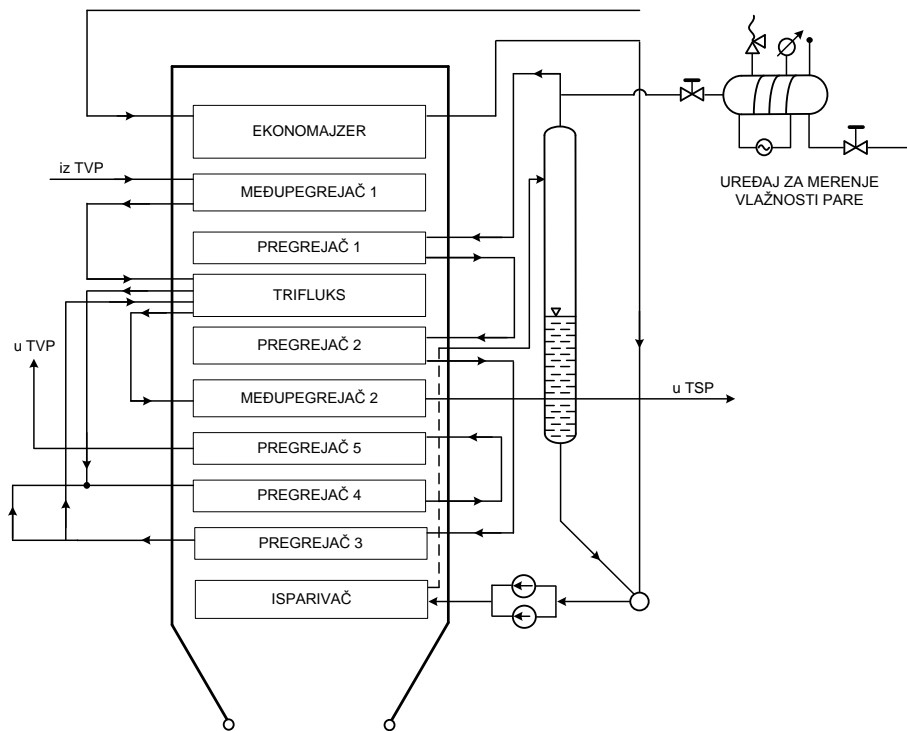
- snaga bloka između 300 MWe i 308 MWe, sa pritiscima u boci od približno 196 bara i 203 bara i nivoom vode u boci od 13 m,
- snaga bloka između između 300 MWe i 308 MWe, sa pritiskom od približno 196 bara i nivoom od 9 m u boci,
- na delimičnom opterećenju bloka od 160 MWe, sa pritiskom od približno 182 bara i nivoom od 13 m, i
- na delimičnom opterećenju bloka od 230 MWe, sa pritiskom od približno 166 bara i nivoom od 13 m.

Rezultati merenja su prikazani na slici 9. Za opseg pritiska u separacionoj boci od 166 bara do 203 bara i za nivo vode u boci od 13 m, izvedena je analitička zavisnost stepena suvoće od pritiska.

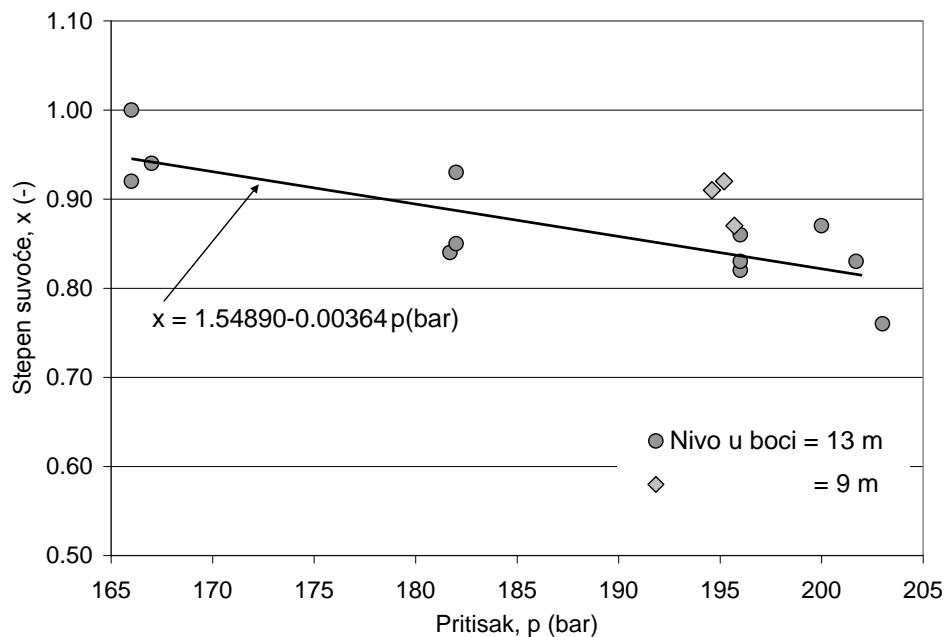
Izmerene vrednosti na slici 5 pokazuju da stepen suvoće pare opada, odnosno vlažnost pare raste sa povećanjem pritiska. Do ovakve zavisnosti dolazi zbog toga što se sa povećanjem pritiska dvofazne mešavine smanjuje razlika gustina između tečnosti i pare. Sa smanjenjem razlike gustina vode i vodene pare smanjuje se i gravitaciono izdvajanje kapi iz struje pare u parnom prostoru



Slika 7 Zavisnost apsolutne greške merenja stepena suvoće pare od pritiska nakon adijabatskog prigušenja (p_2).



Slika 8 Šema kotla TENT A6 sa uređajem za merenje vlažnosti pare.



Slika 9 Izmerene vrednosti stepena suvoće na izlazu iz separacione boce bloka TENT A6 (analitička zavisnost je data za stepene suvoće izmerene pri nivou u boci od 13 m).

separacionog uređaja, tako da se povećava vlažnost pare na izlazu. Rezultati na slici 9 pokazuju da se pri nivou vode u boci od 13 m stepen suvoće pare na izlazu smanjuje od vrednosti 0,95 na pritisku od 165 bar do 0,8 na pritisku od 205 bar. Sa smanjenjem nivoa vode u separacionoj boci povećava se i parni prostor od nivoa dvofazne mešavine do izlaza iz separacione boce. Sa povećanjem visine parnog prostora povećava se i gravitaciono razdvajanje kapi iz struje pare tako

da se vlažnost pare na izlazu smanjuje. Izmerene vrednosti na slici 5 pokazuju da sa smanjenjem nivoa sa 13 m na 9 m dolazi do povećanja stepena suvoće pare sa približno 0,84 na 0,9 na pritisku od približno 195 bar, to jest vlažnost pare se smanjuje za 6%.

4. ZAKLJUČAK

Razvijen je novi uređaj za merenje vlažnosti pare koji je zasnovan na apsolutnoj termodinamičkoj metodi, tako da nije potrebna kalibracija uređaja. Tačnost merenja je određena tačnošću merenja pritiska i temperature vlažne i pregrejane pare u okviru samog uređaja tokom termodinamičkih procesa kojima se podvrgava uzorkovana para čija se vlažnost meri. Uređaj se može koristiti za merenje vlažnosti pare čiji je pritisak veći od atmosferskog pritiska, sve do vrednosti koja je bliska kritičnom pritisku. Izmerene vrednosti vlage pare na izlazu iz separacione boce na bloku A6 Termoelektrane „Nikola Tesla A“ (TENT A6) nominalne snage 308 MW pokazuju zavisnost vlažnosti pare od pritiska i nivoa vode u separacionoj boci. Vlažnost pare na izlazu iz separacione boce je neophodan parametar za određivanje toplotne snage potrebne za pregrevanje pare, odnosno za definisanje potrebne površine pregrejača pare u okviru linije pregrevanja pare na kotlu. Dobijena izmerena zavisnost vlažnosti pare od pritiska u separacionoj boci je korišćena kao podloga za projektovanje rekonstrukcije pregrejača pare na bloku TENT A6.

REFERENCE

- [1] Дейч, М.Е., Филиппов, Г.А., Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования, Энергоатомиздат, Москва, 1987.
- [2] Кемельман, Д.Н., Линейная сепарация влажного пара, Энергоатомиздат, Москва, 1982.
- [3] Moore, M.J., Sieverding, C.H., Two-Phase Steam Flow in Turbines and Separators, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 1976.
- [4] Stevanović, V., Prica, S., Maslovarić, B., Jovanović, M., Milić, M., Urežaj za merenje vlažnosti pare, Patent br. 1172 U, Zavod za intelektualnu svojinu, Republika Srbija, 2011, Beograd.
- [5] Stevanović, V., Prica, S., Maslovarić, B., Merenje vlažnosti pare, Zbornik radova međunarodnog skupa Elektrane 2008, Vrnjačka Banja, 2008.
- [6] Stevanović, V., Prica, S., Maslovarić, B., Glavni projekat za izradu prototipa aparata za određivanje vlažnosti pare na izlazu iz bubnja kotlova blokova A1 i A2 TENT A, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2008, Beograd.
- [7] Stevanović, V., Prica, S., Maslovarić, B., Rezultati merenja vlažnosti pare na izlazu iz separacione boce na kotlu bloka A6 TENT A, Izveštaj, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2009, Beograd.