

# "DRUGA GRANICA HLAĐENJA" (2.GH) U PROCESU HLAĐENJA VAZDUHA ADIJABATSKIH VLAŽENJEM

Nenad Kažić\*

**Ključne riječi:** *Adijabatsko vlaženje vazduha prva i druga granica hladjenja*

## **SAŽETAK:**

U radu je analiziran proces hladjenja vazduha procesom adijabatskog vlaženja. Ovaj po definiciji niskoenergetski proces, posmatran je u 2 varijante: u jednom slučaju hladjenje se odvijalo na uobičajeni način, a u drugom u proces je bila uključena povratna sprega. Dok je u klasičnom procesu granica hladjenja temperatura vlažnog termometra (Prva granica hladjenja), u drugom slučaju je to tačka rose (Druga granica hladjenja). Ova druga granična temperatura je postignuta za slučaj da se u idealnom ovlaživaču cjelokupan vazduh sa izlaza vraća na ulaz uredjaja. Očigledno je da ova *druga granica*, zavisno od stanja ulaznog vazduha, može biti znatno niža u odnosu na *prvu granicu hladjenja*.

## 1. UVOD

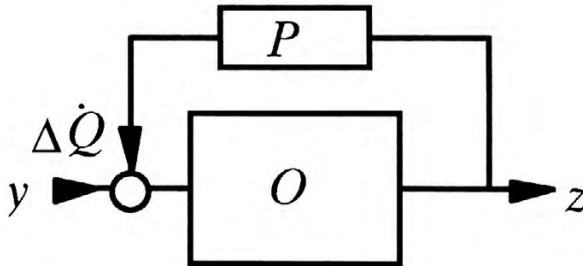
Povratna sprega je uobičajeni izraz koji se srijeće u teoriji upravljanja i po definiciji se odnosi na funkcionalnu vezu u kojoj se dovodjenjem izlazne veličine na ulaz sistema ostvaruje odredjeni efekat regulacije, upravljanja itd. Medjutim, ova vrsta funkcionalne veze, koja se može realizovati kao fizički sistem u raznim varijantama, u Toplotnoj tehnici se naziva *termička povratna sprega (TPS)* (Sl. 1). U radu [1] je analizirano nekoliko tipičnih slučajeva koji se mogu sresti u praksi, počev od najjednostavnijeg grijača sa povratnom spregom [2] pa do složenog procesa sagorijevanja

---

\* Prof. dr Nenad Kažić, Mašinski fakultet u Podgorici, Cetinjski put bb.

generalno TPS proizvodi efekat transformacije "kvantiteta u kvalitet", odnosno povećanje kvaliteta procesa na račun smanjenja kvantiteta željenog efekta.

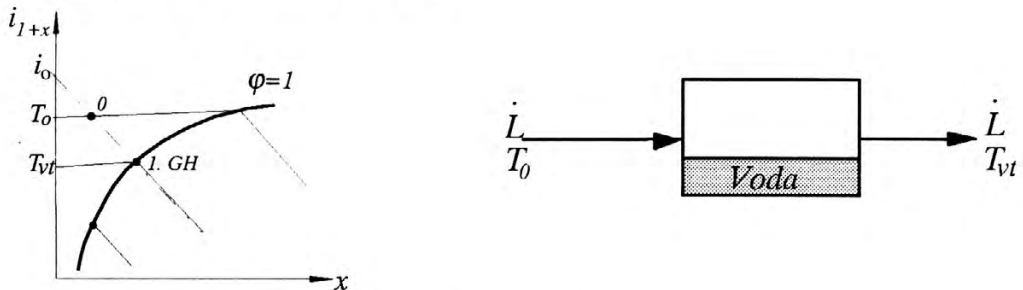
U radu je, između ostalog, obradjivan i slučaj adijabatskog hlađenja vazduha i pokazano je da se granica hlađenja može pomjeriti naniže u odnosu na "temperaturu vlažnog termometra" koja se generalno smatra kao granica hlađenja u procesu adijabatskog vlaženja vazduha. U ovome radu će se malo detaljnije razmotriti ovaj efekat.



Slika 1: Shema termičke povratne sprege

## 2. ADIJABATSKO HLAĐENJE VAZDUHA VLAŽENJEM

Poznato je da se vazduh može hladiti procesom adijabatskog vlaženja [3]. Takozvana "granica hlađenja", odnosno najniža temperatura do koje se može ohladiti vazduh na ovaj način je temperatura "vlažnog termometra" (Sl. 2). U radu [1] je ova temperatura nazvana *prvom granicom hlađenja*. Očigledno je da ovaj proces spada u niskoenergetske procese jer se hlađenje vazduha odvija "samo od sebe", bez trošenja energije spolja za sam proces hlađenja.

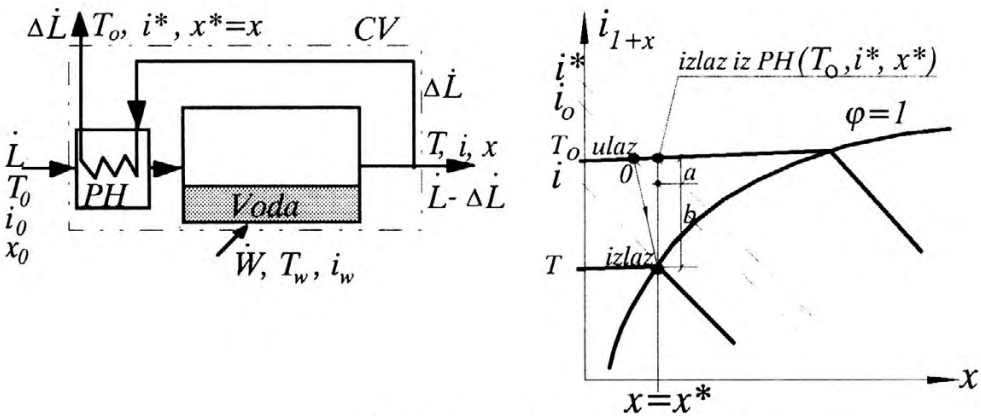


Slika 2: Standardno hlađenje vazduha vlaženjem

Iako vazduh koji izlazi iz procesa je zasićen, on je ohlađen u odnosu na ulazni za nekoliko stepeni pa može biti korišćen u različite namjene. Sa dijagrama sl.2 - lijevo se jasno vidi da temperatura vlažnog termometra puno zavisi od stanja spoljnjeg vazduha: što je vazduh na većoj temperaturi i što mu je relativna vlažnost veća to je temperatura vlažnog termometra viša. Isto tako vidimo da se ulazno i izlazno stanje vazduha nalaze na liniji koja se skoro poklapa sa linijom  $i = \text{const.}$  (isprekidana kosa linija na slici- lijevo). Dakle, tretirajući proces po modelu "black box", vidimo da je 1. granica hlađenja rezultat internog procesa u uređaju. Po definiciji, niža temperatura od ove se ne može postići u adijabatskom ovlaživaču vazduha.

Posmatrajmo sada ovakav jedan proces u koji je uključen i recirkulacioni krug, tj. ciklus sa termičkom povratnom spregom (Sl. 3). Vazduh stanja  $\theta$  ( $T_\theta$   $i_\theta$   $x_\theta$ ) se hladi vlaženjem u kontaktu sa vodom. Na izlazu se odvaja jedan dio vazduha i vraća se u prethladnjak (PH) gdje prima jedan dio toplote ulaznog vazduha. Dakle na taj način se "predhladjuje" vazduh na ulazu.

Posmatrajmo slučaj idealnog procesa, odnosno pretpostavimo da se proces razmjene energije odvija na najbolji mogući način ostvarujući maksimalno moguću razmjenu toplotnih flukseva u aparatu. U skladu sa tim, pretpostavljamo da vazduh iz ovlaživača izlazi potpuno zasićen a u prethladnjaku se razmjenjuje maksimalno moguću toplotni fluks, tako da vazduh iz PH izlazi sa temperaturom ulaznog vazduha  $T_\theta$ . Tokom procesa se dodaje voda ( $\dot{W}$ ), tako da se njena masa u sistemu održava konstantnom.



Slika 3: Proces hlađenja vazduha sa termičkom povratnom spregom

Prvi zakon termodinamike za kontrolisanu zapreminu (CV), u ovom slučaju za stacionarno stanje, ima oblik:

$$\dot{L}i_0 + \dot{W}i_w = (\dot{L} - \Delta\dot{L})i + \Delta\dot{L}i^* \quad (1)$$

Nakon dodavanja i oduzimanja člana  $\Delta\dot{L}i_0$ , dobija se

$$(\dot{L} - \Delta\dot{L})(i_0 - i) - \Delta\dot{L}(i^* - i_0) + \dot{W}i_w = 0 \quad (2)$$

Prema Zakonu o održanju mase, u ovom slučaju vlage važi relacija

$$\dot{W} = \dot{L}(x - x_0) \quad (3)$$

Zamjenjujući (3), izraz (2) postaje

$$\frac{i_0 - i}{i^* - i_0} = \frac{\Delta\dot{L} / \dot{L}}{1 - \Delta\dot{L} / \dot{L}} - \frac{1}{1 - \Delta\dot{L} / \dot{L}} \frac{x^* - x_0}{i^* - i_0} i_w \quad (4)$$

pri čemu je  $x^* = x$ .

Razlika apsolutnih vlažnosti u članu na desnoj strani (4) je relativno mala, pa se ovaj član može zanemariti u odnosu na ostale. Nakon toga, izraz (4) se svodi na oblik:

$$\frac{i_0 - i}{i^* - i_0} = \frac{\Delta\dot{L} / \dot{L}}{1 - \Delta\dot{L} / \dot{L}} \quad (5)$$

Grafička interpretacija ovoga izraza se najbolje vidi sa Sl. 3. : veza između entalpija ulaznog stanja ( $i_0$ ), izlaznog stanja recirkulacionog vazduha ( $i^*$ ) iz PH, entalpije vazduha koji napušta sistem ( $i$ ) i veličina prikazanih na slici je

$$\frac{i_0 - i}{i^* - i_0} = \frac{\Delta\dot{L} / \dot{L}}{1 - \Delta\dot{L} / \dot{L}} = \frac{b}{a} \quad (6)$$

- a. Slučaj bez TPS ( $\Delta\dot{L} = 0$ )

Izraz (6), nakon zamjene  $\Delta\dot{L} = 0$  postaje

$$\frac{i_0 - i}{i^* - i_0} = \frac{\Delta\dot{L} / \dot{L}}{1 - \Delta\dot{L} / \dot{L}} = \frac{b}{a} = 0, \quad i = i_0 \quad (7)$$

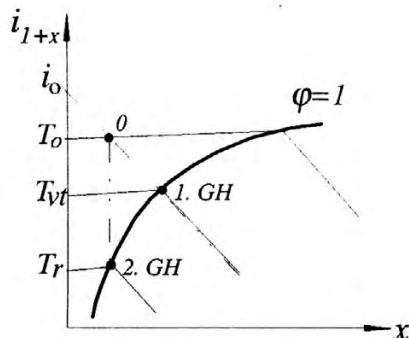
Vidimo da se ovaj slučaj svodi na klasično adijabatsko hladjenje bez Termičke povratne sprege, odnosno izlazna temperatura vazduha je jednaka temperaturi vlažnog termometra ( $T_a = T_{vt}$ ). To je već pomenuta *prva granicu hladjenja* (1. GH =  $T_{vt}$ ).

- b. Slučaj sa TPS pri potpunoj recirkulaciji ( $\Delta\dot{L} = \dot{L}$ )

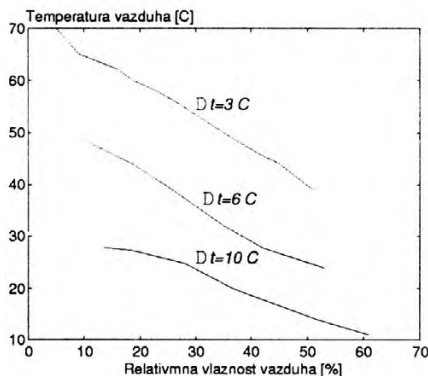
Ovo je granični slučaj rada *termičke povratne sprege* gdje se kompletna fluidna struja vraća na ulaz. Koristeći postupak analogan prethodnom dobija se nakon zamjene  $\Delta\dot{L} = \dot{L}$  u (6)

$$\frac{i_0 - i}{i^* - i_0} = \frac{\Delta\dot{L} / \dot{L}}{1 - \Delta\dot{L} / \dot{L}} = \frac{b}{a} = \infty. \quad (8)$$

Ovaj uslov može biti zadovoljen samo pri  $i^* = i_0$ , tako da se pri približavanju ovoj vrijednosti izlazno stanje iz sistema pomjera ulijevo dok se ne nadje na liniji  $x = x_0$  (Sl. 4). To je istovremeno granica hlađenja ovoga procesa. Dakle vidimo da u slučaju maksimalnog dejstva TPS, granica hlađenja se pomjera naniže, i u graničnom slučaju ona se izjednačava sa "tačkom rose" ulaznog vazduha. Ovu temperaturu nazivimo *druga granica hlađenja* (2. GH =  $T_r$ ).



Slika 4: prva (1. GH) i druga (2. GH) granica hlađenja



Slika 5: Stanja vazduha pri kojima se može postići dodatno hlađenje  $Dt = 2.GH - 1.GH$

Sa slike (Sl. 4) je očigledno da se u slučaju TPS u odnosu na standardno adijabatsko hlađenje vazduha, postiže dodatno smanjenje izlazne temperature vazduha ( $\Delta T$ ) i ono je smješteno između graničnih vrijednosti, tj.

$$0 < \Delta T < T_{vr} - T_r. \quad (9)$$

Na slici 5 prikazana su granična stanja vazduha pri kojima je moguće postići temperatursku razliku između 1. GH i 2.GH za 3, 6 i 10 C. Sa slike se lako vidi da se

stanja vazduha sa temperaturom u domenu 30-40 C teorijski mogu ohladiti u odnosu na 1. GH za 6 C samo za relativne vlažnosti manje od 40 %.

Vidimo da je upotrebom TPS došlo do transformacije "kvantiteta u kvalitet": smanjena je količina dobijenog ohlađenog vazduha ali je na račun toga njegova temperatura snižena.

Dakle, uvodjenje pojma *druge granice hladjenja* je opravdano i u duhu sa uobičajenom praksom: prepuštajući proces u koji je ugrađena TPS samom sebi, on teži da zauzme stanje koje u krajnjem slučaju predstavlja graničnu vrijednost procesa. To je analogno *prvoj, druga granica hladjenja* definisana na već izloženi način.

### 3. ZAKLJUČAK

Uvodjenje pojma *druge granice hladjenja* nije samo značajno samo zbog toga što je moguće upotrebom TPS ohladiti vazduh na nižu temperaturu u odnosu na *prvu granicu hladjenja*. Izvedena analiza nam ukazuje da je *druga granica* prava granična vrijednost jer ispod nje se u adijabatskom slučaju ne može ići. Prema tome ona nam može poslužiti kao pravi orijentir pri ocjeni efikasnosti procesa hladjenja vazduha sa vlaženjem.

### LITERATURA

- [1] N. Kažić, M. Novaković: "Termička povratna sprega", *KGH*, br. 2 1988.
- [2] F.Bošnjaković: "Nauka o toplini II", Zagreb 1950.
- [3] M.Novaković, M.Stefanović i dr.: "Višestruko dizanje i spuštanje temperature povratnom spregom", *ETRAN*, Zlatibor 1996.

#### "SECOND BOUNDARY OF COOLING" (2.GH) IN THE PROCESS OF COOLING AIR BY ADIABATIC MOISTURING

#### ABSTRACT:

In this paper the air cooling by adiabatic saturation process is analyzed. This by definition low energy process is under scope in two case: the first one is the cooling process realized in usual way, and second one was coupled with thermal feed back process. While in first case the wet bulb temperature was reached as temperature limit (1. cooling limit), in the second one process the due temperature appears as 2. cooling temperature limit. This 2. limit is theoretical value realized in an ideal saturator where the complete fluid is backed from outlet to inlet of apparatus. It is obvious that 2. temperature limit could be much more lower than 1. temperature limit.