VLADIMIR VALENT
MILORAD KRGOVIĆ
SREĆKO NIKOLIĆ

Tehnološko–metalurški fakultet,
Univerzitet u Beogradu,
Beograd, Srbija

NAUČNI RAD

676.026.5+621.6.022:536.658

# ANALIZA ENERGIJSKOG POTENCIJALA VLAŽNOG VAZDUHA TOKOM SUŠENJA TRAKE PAPIRA

*Razmatra se energijski potencijal vlažnog vazduha na izlazu iz sušnice postrojenja za sušenje trake papira. Termodinamičko stanje vazduha definisano je temperaturom vazduha na izlazu iz sušnice i temperaturom rošenja vazduha. Za temperaturu na izlazu iz sušnice (55–85°C) i odabranu temperaturu rošenja (45–65°C) utvrđena je specifična potrošnja suvog vazduha. Za odabranu kinetiku sušenja papirne trake, 10–35 kg$H_2O$/(m$^2$h) određuje se promena energijskog potencijala vazduha u funkciji temperature vazduha na izlazu iz sušnice i temperature rošenja vazduha. Protok vazduha kroz sušnicu se dovodi u vezu sa radom ventilacionog sistema i rekuperacijom energije.*

Termičko sušenje [1] u industrijskoj proizvodnji papira ukazuje na to da je za isparavanje vlage potrebno koristiti značajne iznose energije kako za uklanjanje vlage iz papira, tako i za pogon svih agregata, kontrolne sisteme rada, praćenje i registrovanje tehničko–tehnoloških parametara za sušenje [2]. Ispareni vlažilac, u industriji papira to je tečna faza vode ($H_2O$), se predaje primaocu vlage – gasovitom agensu za sušenje. U industrijskoj proizvodnji papira agens za sušenje je atmosferski vazduh (početnog pritiska $p_o$, temperature $\theta_o$, relativne vlažnosti $\varphi_o$ i sadržaja vlage $w_o$).

Tehničko–tehnološkim merama vazduh se priprema za rad postrojenja za sušenje papira.

Termodinamičko stanje vlažnog vazduha [1,3] biva menjano tako da pripremljen vlažan vazduh obezbedi efikasno preuzimanje isparene vlage iz vlažnog materijala. Pri tome je bitna kako kinetika sušenja [1] tako i dinamika svih učesnika procesa.

Sušnica postrojenja za sušenje trake papira može biti otvorenog, poluotvorenog i zatvorenog tipa. Tom tehničkom rešenju je prilagođen ventilacioni, odsisni i sistem za rekuperaciju energije u postrojenju za sušenje papira.

Ovlažen vazduh se iz sušnice uklanja posredstvom ventilacionog sistema.

## OSNOVE TERMODINAMIČKE ANALIZE POJAVA I PROCESA

S ciljem utvrđivanja energijskog potencijala vlažnog vazduha na izlazu iz sušnice postrojenja za sušenje neophodno je definisati osnove termodinamičkih pretpostavki za izračunavanje tog potencijala. U tom smislu za procenu energijskog potencijala vlažnog vazduha usvaja se da je definisana temperatura rošenja vazduha ($\theta_{R,i}$) na izlazu iz sušnice. Za sadržaj vlage u vazduhu ($w_i$), koji odgovara toj temperaturi rošenja, tehničko–tehnološki uslovi termičkog sušenja predodređuju pogodnu temperaturu ($\theta_i$) vazduha na izlazu iz sušnice. Time je temperaturni režim rada sušnice jednoznačno definisan. Za proračune sadržaja vlage u vazduhu [1–3] koristiti će se izraz

$$w_i = 0{,}622\,\frac{\varphi_i\, p^z_{H_2O,i}}{p_o - \varphi_i\, p^z_{H_2O,i}}\left[\frac{\text{kg}H_2O}{\text{kg suvog vazduha}}\right] \qquad (1)$$

S obzirom na radnu temperaturu ($\theta_i$) vlažnog vazduha na izlazu iz sušnice, cilj je da sadržaj vlage bude velike vrednosti ($w_i > w_o$). Za efikasno sušenje ovlažen vazduh, početnog termodinamičkog stanja ($p_o$, $\theta_i$, $\varphi_i$, $w_o$), treba dovesti blizu stanja zasićenja vlažiocem materijala. Razlog takvom zahtevu treba tražiti u tehnološkim uslovima sušenja, kao i u specifičnoj potrošnji suvog vazduha [1,3]

$$l_{sa,i} = \frac{1}{w_i - w_o}\left[\frac{\text{kg suvog vazduha}}{\text{kg}H_2O}\right];\ w_i - w_o > 0 \qquad (2)$$

Malim vrednostima specifične potrošnje suvog vazduha ($l_{sa,i}$) odgovaraju mali protoci vlažnog vazduha kroz sušnicu. Saglasno tome, potrebna snaga ventilacionog sistema (za transport vazduha kroz sušnicu) biće srazmerna takvim iznosima tih protoka vazduha.

Isparena vlaga ($\Delta\dot{m}_{H_2O}$) iz vlažnog materijala promeniće sve termodinamičke veličine stanja vlažnog vazduha ($p_o$, $\theta_o$, $\varphi_o$, $w_o$) posle njegovog ulaza u sušnu grupu papir mašine (postrojenja za sušenje). Tokom sušenja odabrane vrste papira (i promene sadržaja vlage u vlažnom materijalu) masa isparene vlage uslovićе iznose sadržaja vlage u vazduhu i odrediće specifičnu potrošnju suvog vazduha (jednačina 2).

Adresa autora: V. Valent, Tehnološko–metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Karnegijeva 4, 11120 Beograd, Srbija
E–mail: valent@tmf.bg.ac.yu
Rad primljen: Maj 12, 2006
Rad prihvaćen: Jul 12, 2006

Poželjno je da je specifična potrošnja suvog vazduha ($l_{sa,i}$) što je moguće manjeg iznosa. Zahtev proizlazi iz činjenice da velika vrednost specifične potrošnje suvog vazduha* podrazumeva velik protok mase vazduha kroz sušnicu. Nakon toga sledi takav tok vazduha i kroz ventilacioni sistem. To znači da je za transportovanje vazduha potrebna značajna snaga ventilatora za odsisavanje i transport toplog i isparenom vlagom obogaćenog fluida u uređaje za rekuperaciju njegove energije. Drugi, takođe, važan razlog sadržan je u nužnosti dogrevanja svežeg vazduha do radne temperature vazduha koja je neophodna za tehnološki potrebnu kinetiku sušenja papira. Nadalje, velikoj masi svežeg vazduha, saglasno teoriji [1,3], potrebno je dovesti odgovarajuće (velike) iznose energije [2]. Konačno, u zavisnosti od temperature i sadržaja vlage u takvom (bogatom na vlažioca) vazduhu uslediće i kontrola rada tog dela sušnice i (moguća) pojava kondenzata isparene vlage (u haubi sušnice). A pojava kondenzata isparene vlage zavisi od temperature rošenja vazduha; taj termodinamički parametar vlažnog vazduha je veoma bitan za tehnološki, poželjan, rad sušnice.

Moguće je da se vazduh obogaćen isparenom vlagom direktno odvoditi u okolinu postrojenja za sušenje; tada se ne obavlja rekuperacija njegove energije. Neposredno predavanje vlažnog vazduha okolini prouzrokuje njeno termičko zagađivanje. Nekorišćenje energije vazduha ima za posledicu smanjivanje energijske i ekonomske efikasnosti rada postrojenja i privrednog subjekta.

Za bilansiranje tokova mase i energije koriste se iskazi bilansa mase i energije otvorenog termodinamičkog sistema [3]. Naime, sušnica se može posmatrati kao otvoren termodinamički sistem. U bilansima energije takvog sistema može se zanemariti promena makroskopske kinetičke i geodezijske energije fluida koji protiču kroz takav sistem, kao i dopunska entalpija mešanja ($h^E$) realnih fluida [3]. Ako se prihvati pretpostavka da tokom rada (industrijske) sušnice dominira uslov stacionarnosti procesa tada se bilansi svode na pojednostavljene oblike koji su poznati u teoriji [1,3] i koji će biti i primenjeni tokom proračuna energijskog potencijala vlažnog vazduha.

Energijski potencijal vlažnog vazduha sledi iz bilansa energije za otvoren termodinamički sistem. Uz naznačena pojednostavljenja taj potencijal je određen promenom entalpije vlažnog vazduha od ulaza do izlaza iz sušnice. Za rad sušnice koji definiše kinetika termičkog sušenja (intenzitetom isparavanja vlage iz vlažnog materijala – $l_{isp,vm}$) i temperaturni režim, energijski potencijal vlažnog vazduha na izlazu iz sušnice sledi iz izraza

$$\Delta E_{R,i} = l_{isp,vm}\, l_{sa,i}\, [(h_{1+w,i} - h_{1+w_i,R,i}] \left[\frac{kJ}{m^2 h}\right] \qquad (3)$$

*U tehničkoj praksi se taj vazduh označava i pojmom: svež vazduh.

Specifična entalpija vlažnog vazduha [1,3,4] sledi iz jednačine

$$h_{1+w_i} = c_{p,sv}\theta_i + w_i\,(r_{ig} + c^g_{\beta,H_2O}\,\theta_i) \left[\frac{kJ}{kg\ suvog\ vazduha}\right] \qquad (4)$$

Iz jednačine (4) se može izračunati specifična entalpija kako nezasićenog vazduha radne temperature ($\theta_i$), tako i zasićenog vlažnog vazduha temperature rošenja ($\theta_{R,i}$).

Za poznatu specifičnu potrošnju suvog vazduha ($l_{sa,i}$), a bez uzimanja u obzir kondenzacije vlage (na temperaturi rošenja), raspoloživi iznosi energije vazduha će biti

$$(\Delta H_{max})_i = l_{sa,i}\,(h_{1+w_i} - h_{ref,i}) \left[\frac{kJ}{kg\ H_2O}\right]$$

$$\Delta H_{1+w_i,R,i} = l_{sa,i}\,(h_{1+w_i} - h_{1+w_i,R,i}) \left[\frac{kJ}{kg\ H_2O}\right] \qquad (5)$$

$$h_{ref,i}\,(p_o, \theta_o, \varphi_o) = c_{p,sv}\,\theta_o + w_o(r_{ig} + c^g_{pH_2O}\,\theta_o) =$$

$$= 50{,}6\ kJ\,/\,kgsv = const$$

Najvećim iznosom energije ($\phi_i$, $\Delta H_{max})_i$ moglo bi se raspolagati kada bi se vlažan vazduh tekućeg stanja ($p_o$, $\theta_i$, $j_i$) reverzibilnim procesom [3] doveo u termodinamičku ravnotežu sa vazduhom stanja okoline ($p_o$, $\theta_o$, $\varphi_o$).

Evidentno je da će, shodno jednačini (4), izračunata vrednost energijskog potencijala vazduha zavisiti od usvojenog referentnog stanja i pripadajuće vrednosti specifične entalpije vlažnog vazduha u takvom referentnom, stanju. Ako se taj potencijal određuje iz razlike tekuće specifične entalpije ($h_{1+wi}$) = $f_i(w_i, \theta_i, \varphi_i < 1)$ nezasićenog vlažnog vazduha temperature na izlazu iz sušnice i specifične entalpije ($h_{1+w,R,i}$) zasićenog vazduha temperature rošenja i sadržaja vlage $w_{R,i} = w_i(\theta_i > \theta_{R,i}, \varphi_i < 1)$ tada se radi o potencijalu koji se rekuperacijom energije tehnički lako ostvaruje. Termodinamički opravdaniji je slučaj kada se energijski potencijal vlažnog vazduha određuje iz razlike tekuće entalpije vazduha (radne temperature $\theta_i$) i entalpije koja odgovara referentnom stanju tog vazduha i njegovoj termodinamičkoj ravnoteži sa svojom (lokalnom) okolinom. Ovim, drugim, postupkom analize energijskog potencijala vazduha u potpunosti bi bio iskorišćen njegov potencijal energije. Taj, drugi, slučaj je poželjan ali se praktično ne realizuje jer nema ekonomsku isplativost i tehničku opravdanost u procesu proizvodnje papira [2].

Za procenu energijskog potencijala vazduha i njegovu vezu sa temperaturom rošenja može poslužiti i relativan odnos $(\Delta H_{1+wi,R,i})/(\Delta H_{max})_i$. Tim relativnim odnosom se u ovoj analizi ustanovljava da će se samo pri idealizovanim termodinamičkim uslovima moći iskoristiti (raspoloživi) celokupan iznos energije vlažnog vazduha.

Temperatura rošenja ($\theta_{R,i}$) je važna termodinamička i tehničko–tehnološka veličina za nesmetan rad sušnice i celog postrojenja za sušenje. Njena vrednost za dato stanje ovlaženog vazduha ($p_o$ = const, $\theta_i > \theta_{R,i}$ i $\varphi_i < 1$), obezbeđuje da se po zidovima sušnice, u postro-

jenju za sušenje i u građevinskom objektu, ne obrazuje tečan kondenzat vlažioca. Odsustvo kondenzata vlage bitno je kako za letnji tako i za zimski period proizvodnje papira. Pri tome, sa dostizanjem velikih vrednosti sadržaja vlage ($w_i$) u vazduhu stvaraju se pogodni termodinamički uslovi za nastajanje kondenzata vlage.

Tokom zimskog perioda rada sušnice temperatura radnog prostora u hali, odsisnom delu (haubi i vodovima ventilacionog sistema) i građevinskom objektu može biti u opsegu vrednosti pri kojima su obezbeđeni uslovi kondenzacije termički uklonjenog vlažioca iz nastajuće trake (vlažnog) papira. Zasićen vlažan vazduh ($\varphi_i$ = 1) je uzročnik ponovnog vlaženja osušenog (higroskopnog) proizvoda kao i odsustva kapacitativnosti vazduha na isparenu vlagu. Usled pojave kondenzata vlage mora se povećati potrošnja suvog vazduha (videti izraz 2) radi obezbeđenja sušenja vlažnog materijala.

Pojava kondenzata po zidovima sušnice i unutar građevinskog objekta dovodi do problema korozije armature i otežanog rada ventilatora zbog prisustva heterofaznog toka (tečnost – gas) fluida. Zasićen vlažan vazduh dovodi i do promena mikro klime unutar postrojenja za sušenje kao i mikro klime u građevinskom objektu u kojem se nalazi postrojenje za sušenje.

Obrazovanje kondenzata vlage je posledica termodinamičkog stanja vazduha. Za dati sadržaj vlage u vazduhu do kondenzovanja gasovite faze vlažioca dolazi usled snižavanja temperature vazduha tokom neizbežne razmene toplote kroz zidove odsisnog sistema i zidove hale (prisustvo hladnih mostova) u kojoj se nalazi postrojenje za sušenje. Iako nepoželjna, pojava kondezacije isparenog vlažioca se može očekivati i pored svih mera termičke izolacije i zaptivenosti uređaja i prostorija.

U zimskom periodu pojava kondenzata je izvesnija. Kondenzacija gasovite faze vlažioca je povezana i sa dovođenjem veoma hladnog atmosferskog vazduha, iz okoline privrednog subjekta, s ciljem termodinamičkog regulisanja mikro klime kao i neizbežne ventilacije proizvodne hale.

Raspoloživ iznos energije (jednačina 5), bez veće greške, se može izračunati za izobarske uslove rada postrojenja za sušenje na $p_o$ = 1 bar i to za dva pretpostavljena slučaja rada postrojenja za termičko sušenje papira. U prvom slučaju raspoloživi iznos energije vazduha se može odrediti u odnosu na referentnu specifičnu entalpiju ($h_{ref,i}$) vlažnog vazduha pritiska $p_o$ = 1 bar, temperature $\theta_o$ = 25°C i relativne vlažnosti $\varphi_o$ = 50%.

U drugom slučaju, jednačina 5 (a zatim jednačina 3) se koristi za nalaženje iznosa energije ($\Delta H_{1+wi,R,i}$) za radno (tekuće) stanje vlažnog vazduha na izlazu iz sušnice. Taj, uslovno rečeno, raspoloživi iznos energije zavisi od poželjnog sadržaja vlage u vazduhu za temperaturu $\theta_i$. Iznos energije vazduha je uslovljen vrednošću sadržaja vlage u vazduhu $w_i = w_{R,i}$ ($\theta_i > \theta_{R,i}$, $\varphi_i$). Tim sadržajem vlage predodređeno je i termodinamičko stanje vazduha temperature rošenja ($\theta_{R,i}$).

Treba uočiti da je specifična entalpija zasićenog vlažnog vazduha zavisna od promena temperature rošenja ($\theta_{R,i}$) vazduha. Specifična entalpija vazduha je uslovljena toj temperaturi pripadajućim sadržajem vlage ($w_{R,i}$) u vazduhu.

Za analizu efekata procesa usvojiće se intenzitet isparavanja vlage ($I_{isp,vm}$) definisan masom isparenog vlažioca sa jedinice površine trake papira i u jedinici vremena (tabela 1). Cilj je da se za četiri odabrana intenziteta isparavanja vlage ($I_{isp,vm}$) ustanovi energijski potencijal vlažnog vazduha.

Energijski potencijal pri hlađenju vazduha od radne temperature ($\theta_i$) do temperature rošenja vazduha ($\theta_{R,i}$), a pri uslovu $w_i = w_{R,i}$, će iznositi

$$\Delta E_{R,i} = I_{isp,vm}\, I_{sa,i}\, [(h_{1+w,i} - h_{1+w_i,R,i}] \left[\frac{kJ}{m^2h}\right] \qquad (6)$$

Pri intenzitetu ($I_{isp,vm}$) isparavanja vlage iz vlažne trake papira, neophodan maseni protok suvog vazduha zagrejanog** do potrebne temperature procesa, će biti

$$\dot{m}_{sv} = I_{isp,vm} I_{sa,i} \left[\frac{\text{kg suvog vazduha}}{m^2h}\right] \qquad (7)$$

Nesumnjivo je da se raspoloživi energijski potencijal vlažnog vazduha povećava ako se u taj iznos uračuna i energija kondenzovanja njegove vlage. Takođe, zbog racionalnog korišćenja (svih) izvora energije, a naročito sekundarnih izvora energije kakav izvor je i ovlaženi vazduh, energijski i ekonomski je nužno i opravdano realizovati rekuperaciju njegove energije.

Energijski potencijal ovlaženog vazduha (u sušnici iskorišćenog a po svojim tehničko–tehnološki karakteristikama i otpadnog vazduha) se može koristiti sistemom za rekuperaciju energije. Rekuperacijom energije iz otpadnog vazduha se mogu obezbediti izvori energije i zahtevi za dogrevanje svežeg vazduha, potrebe za zagrejanom tehnološkom i sanitarnom vodom i za druge ekonomski isplative potrebe proizvodnog procesa i rada privrednog subjekta [2].

## DISKUSIJA REZULTATA

Termodinamički proračun energijskog potencijala vazduha obavljen je za temperature rošenja $\theta_{R,i}$ = 45–65°C. Te temperature vazduha se mogu očekivati u procesima industrijskog sušenja trake papira.

Temperatura vazduha na izlazu iz sušnice je definisana vrednostima $\theta_i$ = 55–85°C. Odabrane temperature se susreću u procesima industrijskog sušenja papira.

Za sadržaj vlage zasićenog vlažnog vazduha ($w_{R,i}$) temperature rošenja, pri uslovu zadovoljenja izohigre ($w_{R,i} = w_i$), i za odabranu radnu temepraturu ($\theta_i$) izračunate su vrednosti specifične entalpije vazduha (prema jednačini 4). Na osnovu toga određen je energijski potencijal vazduha (prema jednačini 3).

**U tehničkoj praksi se često koristi i termin: vruć vazduh.

Intenzitet isparavanja vlage iz trake papira – kartona, je usvojen da bude u opsegu ($I_{isp,vm}$) = 10–35 $kgH_2O/(m^2h)$. Te vrednosti ($I_{isp,vm}$) bi mogle zadovoljiti neophodnu kinetiku industrijskog sušenja papira (kartona).

Za ovu analizu, deo rezultata i proračuna je sabran u tabeli 1.

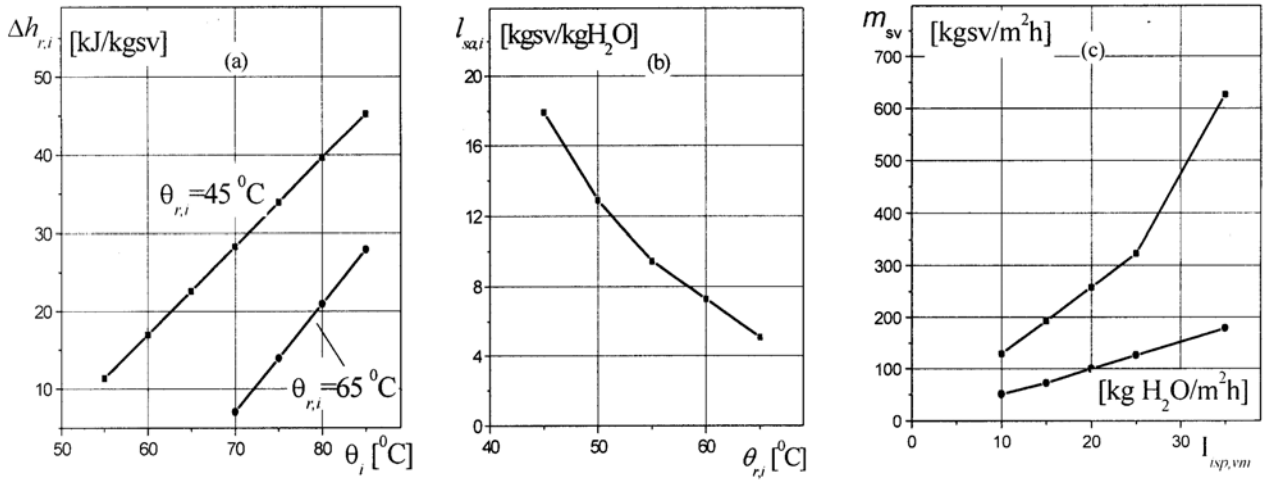
Uticaj radne temperature ($\theta_i$) ovlaženog vazduha na iznos njegove raspoložive energije je pokazan na slici 1a. Podaci se odnose na izoterme rošenja $\theta_{R,i}$ = 45°C i $\theta_{R,i}$ = 65°C.

Prema podacima datim u tabeli 1 sa porastom radne temperature vazduha ($\theta_i$) na izlazu iz sušnice, relativna vlažnost ($\varphi_i$) vazduha opada (krivolinijski) pri $\theta_{R,i}$ = const. Najveće opadanje te veličine je prisutno za najnižu temperaturu rošenja ($\theta_{R,i}$ = 45°C). Najmanje opadanje relativne vlažnosti vazduha javlja se za najvišu temperaturu rošenja ($\theta_{R,i}$ = 65°C). Takve promene relativne vlažnosti vazduha su u saglasnosti sa teorijom [1,3].

Za analizirani opseg temperature rošenja zavisnost specifične potrošnje suvog vazduha ($l_{sa,i}$) od temperature rošenja ($\theta_{R,i}$) vazduha data je na slici 1b. Međusobna povezanost masenog protoka suvog vazduha ($\dot{m}_{sv}$) i odabranog intenziteta isparavanja vlage iz kartona ($I_{isp,vm}$) data je na slici 1c. Raspoloživ ($\Delta E_{R,i}$) energijski

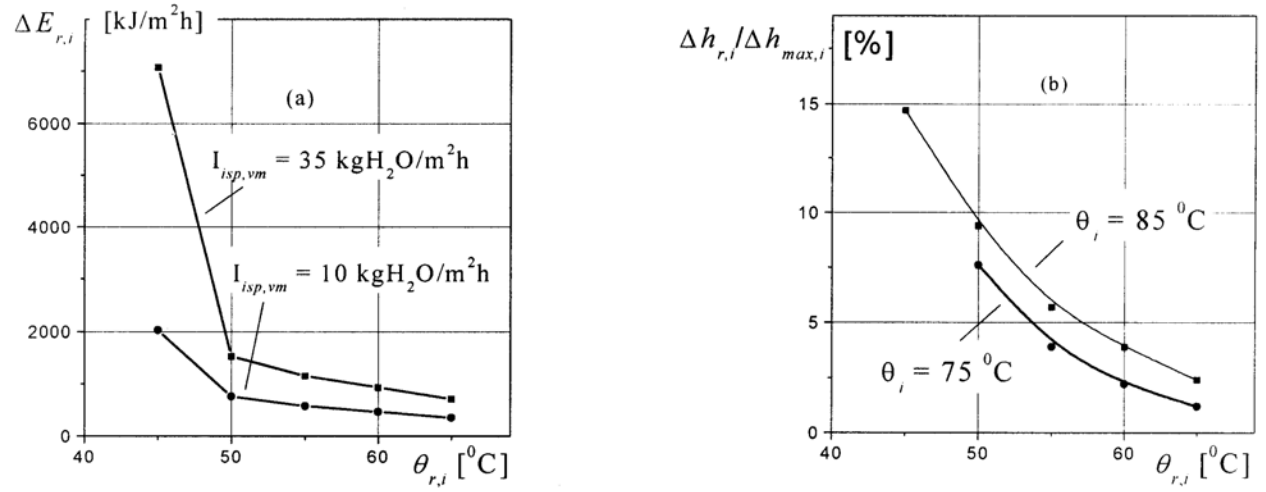
*Tabela 1. Termodinamičke veličine stanja vlažnog vazduha i veze sa energijskim potencijalom vazduha*
*Table 1. Thermodynamic state of the moist air and the relation with the air energy potential*

| Redni broj | Radna temperatura vazduha $\theta_i$ | Relativna vlažnost vazduha $\varphi_i$ | Relativan odnos $\Delta h_{R,i}/\Delta h_{max,i}$ | Specifična potrošnja suvog vazduha $l_{sa,i}$ | Maseni protok suvog vazduha lisp.vm | | Energijski potencijal vlažnog vazduha na izlazu iz sušnice lisp.vm | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 10 | 35 | 10 | 35 |
| | | | | | $kgH_2O/(m^2h)$ | | $kgH_2O/(m^2h)$ | |
| | | | | | $m_{sv}$ | | $\Delta E_{R,i}$ | |
| | °C | % | % | kgsv/(kgH2O) | kgsv/(m2h) | | kJ/(m2h) | |
| $\theta_{R,i}$ = 45°C | | | | | | | | |
| 1 | 55 | 60,9 | 6,4 | 17,9 | 179 | 626,5 | 2022,7 | 7079,5 |
| 2 | 60 | 48,8 | 9,3 | | | | 3043,0 | 10650,5 |
| 3 | 65 | 38,3 | 12,0 | | | | 3938,0 | 13780,3 |
| 5 | 70 | 30,7 | 14,7 | | | | 5065,7 | 17730,0 |
| 6 | 75 | 24,9 | 17,0 | | | | 6068,1 | 21238,4 |
| 7 | 80 | 20,2 | 19,4 | | | | 7088,4 | 24809,4 |
| 8 | 85 | 16,6 | 21,5 | | | | 8090,8 | 28317,8 |
| $\theta_{R,i}$ = 50°C | | | | | | | | |
| 9 | 55 | 78,4 | 2,5 | 12,9 | 129 | 451,5 | 761,1 | 2663,8 |
| 10 | 60 | 61,9 | 5,0 | | | | 1548,6 | 5419,7 |
| 11 | 65 | 49,3 | 7,6 | | | | 2270,4 | 7946,4 |
| 12 | 70 | 39,6 | 9,4 | | | | 3018,6 | 10565,1 |
| 13 | 75 | 32,0 | 11,4 | | | | 3779,7 | 13220,0 |
| 14 | 80 | 26,0 | 13,3 | | | | 4489,7 | 15714,0 |
| 15 | 85 | 21,3 | 15,5 | | | | 5248,8 | 18371,1 |
| $\theta_{R,i}$ = 55°C | | | | | | | | |
| 16 | 60 | 79,0 | 1,9 | 9,43 | 95,3 | 333,6 | 575,2 | 2013,2 |
| 17 | 65 | 62,9 | 3,9 | | | | 1141,0 | 3993,5 |
| 18 | 70 | 50,5 | 5,7 | | | | 1735,1 | 6072,3 |
| 19 | 75 | 40,1 | 7,7 | | | | 2310,3 | 8086,0 |
| 20 | 80 | 33,2 | 9,6 | | | | 2885,6 | 10099,6 |
| 21 | 85 | 27,2 | 10,8 | | | | 3460,8 | 12112,8 |
| $\theta_{R,i}$ = 60°C | | | | | | | | |
| 22 | 65 | 79,6 | 1,6 | 7,27 | 72,7 | 254,4 | 465,3 | 1628,6 |
| 23 | 70 | 63,8 | 3,1 | | | | 872,4 | 3053,4 |
| 25 | 75 | 51,7 | 4,6 | | | | 1395,8 | 4885,3 |
| 26 | 80 | 42,0 | 6,1 | | | | 1861,8 | 6513,8 |
| 27 | 85 | 34,4 | 7,7 | | | | 2326,4 | 8142,4 |
| $\theta_{R,i}$ = 65°C | | | | | | | | |
| 28 | 70 | 80,2 | 1,2 | 5,07 | 50,7 | 177,4 | 354,9 | 1242,1 |
| 29 | 75 | 64,9 | 2,4 | | | | 704,7 | 2466,4 |
| 30 | 80 | 52,8 | 3,6 | | | | 1059,6 | 3708,6 |
| 31 | 85 | 43,7 | 4,9 | | | | 1414,5 | 4950,7 |




*Slika 1. Uticaj radne temperature, $\theta_i$ na energiju vazduha (slika 1a). Veza temperature rošenja, $\theta_{R,i}$ i specifične potrošnje suvog vazduha, $l_{sa,i}$ (slika 1b). Odnos između potrošnje suvog vazduha, $l_{sa,i}$ i intenziteta isparavanja, $I_{isp,vm}$ (slika 1c)*

*Figure 1. The influence of working temperature, $\theta_i$ on the energy of air (Fig. 1a). Correlation of the dew temperature, $\theta_{R,i}$ with the specific consumption of dry air, $l_{sa,i}$ (Fig. 1b). Correlation of the consumtion of dry air, $l_{sa,i}$ with the intensity of vaporisation, $l_{sa,i}$ (Fig. 1c).*




*Slika 2. Zavisnost energijskog potencijala vlažnog vazduha u funkciji temperature rošenja, $\theta_{R,i}$ (slika 2a). Uticaj temperature rošenja, $\theta_{R,i}$ na veličinu $(\Delta h_{1+w_iR})/(\Delta h_{max})_i$ (slika 2b).*

*Figure 2. Energy potential of moist air as a function the dew temperature, $\theta_{R,i}$ (Fig. 2a). The influence of dew temperature, $\theta_{R,i}$ on the value of $(\Delta h_{1+w_iR})/(\Delta h_{max})_i$ (Fig. 2b).*

potencijal vlažnog vazduha u funkciji temperature rošenja ($\theta_{R,i}$) je pokazan na slici 2a. Zavisnost relativnog odnosa $(\Delta h_{1+wi,R})/(\Delta h_{,ax})$ od temperature rošenja ($\theta_{R,i}$) vazduha je data na slici 2b.

Prema podacima iz tabele 1 i grafičkim prikazima datim na slikama 1 i 2, iz proračuna se mogu izvesti različiti zaključci. Ukazaće se samo na neke činjenice.

Saglasno jednačini 2 sa porastom radne temperature vazduha linearno raste energijski potencijal ($\Delta h_{R,i}$) vazduha (slika 1a). Takođe, sa porastom sadržaja vlage u vazduhu njegov potencijal se povećava. Za temperaturu rošenja $\theta_{R,i}$ = 45°C sadržaj vlage zasićenog vazduha iznosi $w^z_{R,45°C}$ = 0,0659 kgH$_2$O/(kgsv). Za povišenu temperaturu rošenja vrednosti $\theta_{R,i}$ = 65°C, sadržaj vlage zasićenog vazduha se značajno promenio i ima vrednost $w^z_{R,45°C}$ = 3,15 $w^z_{R,45°C}$ kgH$_2$O/(kgsv).

Za izotermu rošenja $\theta_{R,i}$ = 45°C (slika 1a) specifična entalpija ($\Delta h_{R,i}$) vlažnog vazduha se povećava za iznos 1,13 kJ/(°CkgH$_2$O).

Temperatura rošenja ($\theta_{R,i}$) vazduha bitno i krivolinijski utiče na promenu potrošnje ($l_{sa,i}$) suvog vazduha (slika 1b). Sa porastom temperature rošenja specifična potrošnja suvog vazduha naglo opada. Sličan trend krive zavisnosti od temperature rošenja javlja se i na slici 2b za relativan odnos $(\Delta h_{1+wi,R})/(\Delta h_{max})_i = f(\theta_{R,i})$.

Razlog opadanja potrebe za suvim vazduhom sadržan je u tome što se sa povišenjem temperature rošenja naglo povećava sadržaj vlage zasićenog vazduha. Saglasno jednačini 2, to mora biti praćeno smanjivanjem

$I_{sa,i}$ veličine. Povećavanje sadržaja vlage u vazduha je poželjno jer se time povećava kapacitativnost vazduha na isparenu vlagu. Istovremeno, zahvaljujući tome opada potreba za velikim protocima suvog vazduha kroz sušnicu. Usled toga se smanjuje i potrebna energija za zagrevanje svežeg vazduha kao i potrebna snaga ventilatora sušnice (odsisnog sistema).

Povećavanje intenziteta isparavanja vlage ($I_{isp,vm}$) iz vlažne trake papira (sl. 2a) prati krivolinijski porast potrebe za povećanim protokom suvog vazduha kroz sušnicu. To je neizbežna posledica bilansa mase isparene vlage tokom procesa. Naime, usled povećavanja mase isparene vlage iz vlažne trake papira, za zadate termodinamičke parametre vazduha koji se pri tome ne sme zasititi isparenim vlažiocem, mora voditi ka povećanoj potrebi za suvim vazduhom. Saglasno tome, i dopremanje vazduha u sušnicu mora pratiti povećavanje energije potrebne za rad ventilatora i za transportovanje te mase vazduha na uređaje za rekuperaciju energije.

Prema podacima u tabeli 1 (i grafičkom prikazu na slika 2b), uočljivo je da je energijski potencijal vlažnog vazduha relativno, i prividno, nevelikog iznosa (slika 2a). Brojčani iznos pri korišćenju energije vlažnog vazduha ($\Delta h_{R,i}$), u odnosu na maksimalnu raspoloživu energiju vazduha, datu veličinom $(\Delta h_{max})_i$, se nalazi u opsegu 1,2–4,8% za izotermu rošenja $\theta_{R,i}$ = 65°C. Za izotermu rošenja $\theta_{R,i}$ = 45°C, interval promene raspoložive energije izlaznog vazduha je u opsegu 6–21,5% i znatno je veći nego za izotermu $\theta_{R,i}$ = 65°C. Pri porastu temperature rošenja vlažnog vazduha, opada (relativnim odnosom) iskazan energijski potencijal vazduha (slika 2b).

Relativno najmanji iznos raspoložive energije poseduje vazduh najviše temperature rošenja (slika 2b). Objašnjenje pojave je vezano za termodinamičke zavisnosti između radne temperature vazduha ($\theta_i$), sadržaja vlage ($w_i$) u vazduhu i temperature rošenja ($\theta_{R,i}$) pri velikim sadržajima vlage u vazduhu. Pri takvim uslovima kapacitativnost vazduha na isparenu vlagu se značajno smanjuje. Radi efikasnog sušenja to će zahtevati izvor energije unutar sušnice [1]; izvor će obezbediti potrebne radne uslove za sušenja papira.

Pri razmatranju energijskog potencijala vazduha ($\Delta E_{R,i}$) ne treba zaboraviti da je pri sušenju trake papira ta površina papira velika. Uz to, na ulazu u sušnicu sadržaj vlage u vlažnom materijalu (nastajućem kartonu) zavisi od njenog mehaničkog uklanjanja iz vlažnog materijala. Zbog toga se iz papira, tokom termičkog sušenja, mora ukloniti ogromna masa vlažioca – tečne faze vode. Takvom iznosu protoka mase vazduha pripada i odgovarajući iznos njegove energije.

I pored tehničkog napretka, mehaničko uklanjanje vlage iz buduće trake kartona, ostavlja veliki iznos tečne faze vlage (sadržaj vlage u vlažnom materijalu je velike vrednosti). To uzrokuje potrebu za velikim protocima suvog vazduha kroz sušnicu. Protocima vazduha se obezbeđuje uklanjanje isparene vlage iz kartona – trake papira. Na to ukazuje i ovo istraživanje. Iz dobijenih podataka neposredno sledi da pri temperaturama rošenja vazduha u opsegu $\theta_{R,i}$ = 45–65°C, potreban maseni protok suvog vazduha je ogroman. Iznosi potrebnog protoka suvog vazduha (tabela 1) se kreću od minimalne vrednosti od 50,7 kgsv/(m$^2$h) za najmanji intenzitet isparavanja vode $I_{isp,vm}$ = 10 kg$H_2O$/(m$^2$h) i za najvišu temperaturu rošenja $\theta_{R,i}$ = 65°C, do maksimalne vrednosti protoka suvog vazduha od 626,5 kgsv/(m$^2$h) za $I_{isp,vm}$ = 35 kg$H_2O$/(m$^2$h) i, u ovom radu usvojenu, najnižu temperaturu rošenja vazduha $\theta_{R,i}$ = 45°C.

U toku jedne kalendarske godine retko se prekida rad sušnice. Prekidi u radu su prisutni tokom remonta, nužnih zastoja i drugih tehničko–tehnoloških i proizvodno–ekonomskih razloga. Kada se sve činjenice, i neizbežnosti, uzmu u obzir jasno je da vlažan vazduh (na izlazu iz sušnice) predstavlja energijski i tehnološki zanimljiv i značajan sekundarni izvor energije [2,5].

Sa stanovišta radne temperature izlaznog vazduha ($\theta_i$), da se zaključiti da je takav vazduh upotreban samo za niskotemperaturne procese. U te procese spadaju: dogrevanje radnih i drugih fluida unutar ili/i izvan proizvodnog sistema. S druge strane, dugovremeni rad postrojenja za sušenje ukazuje na to da se raspoloživ iznos energije, u takvom vazduhu, ne sme prenebregavati [2,5]. Naprotiv, termodinamički parametri tog vazduha i tehničko–tehnološki razlozi ukazaće i na to da je energijski potencijal vazduha ($\Delta E_{R,i}$), rekuperacijom energije potrebno iskoristiti do najnižeg termodinamički i ekonomski opravdanog minimuma [1].

S obzirom na temperaturni nivo sekundarnog izvora energije, potrebu korišćenja rekuperatora energije (po mogućnosti uređaja nevelikih geometrijskih razmera), na razvijenu površinu dodira grejnog (vlažan vazduh) i grejanih fluida, ili i neposredan dodir grejnog i grejanih fluida, iskorišćavanje kako energije tako i vlage vlažnog vazduha nametnuće potrebu posebne analize tog, sekundarnog, izvora energije. Analiza će biti specifična za svaki privredni subjekat i tehničko–tehnološke karakteristike postrojenja za sušenje. Ne bi smelo biti dvoumljenja da li će se rekuperacijom energije, iz sekundarnih izvora, povećavati termička, energijska i ekonomska efikasnost proizvodnog procesa, rada postrojenja pa i samog privrednog subjekta. Zbog toga, ako to ekonomska isplativost i dobit obezbeđuju, ne treba odustati od rekuperacije energije iz bilo kog sekundarnog izvora.

## ZAKLJUČAK

Analizom termodinamičkog stanja vlažnog vazduha na izlazu iz sušnice i izračunavanjem njegovog energijskog potencijala utvrđeno je da sa porastom temperature rošenja vazduha opada njegov energijski potencijal. Pri intenzitetu isparavanja $I_{vm,isp}$ = 10 kg$H_2O$/(m$^2$h) opadanje iznosi 6%. Za $I_{vm,isp}$ = 35 kg$H_2O$/(m$^2$h) opadanje energijskog potencijala vazduha je mnogo veće i iznosi 21,6%. Sa porastom temperature rošenja opadaju (krivolinijski) specifična potrošnja suvog vazduha i relativna vlažnost vazduha.

**ZAHVALNOST**

Autori rada se zahvaljuju za finansijsku podršku Republike Srbije, Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine, Beograd za realizaciju istraživačkog projekta pod evidencionim brojem ugovora: EE–232005. Istraživanja se realizuju u okviru nacionalnog programa energetske efikasnosti.

**OZNAKE**

$l_{sa,i}$ – specifična potrošnja suvog vazduha
$w_i$ – sadržaj vlage u vlažnom vazduhu
$p$ – pritisak
$p^z_{H_2O}$ – parcijalan pritisak suvozasićene vodene pare
$h_{1+wi}$ – specifična entalpija vlažnog vazduha
$c_p$ – izobarski toplotni kapacitet
$r_{lg}$ – toplota fazne transformacije tečnost – gas
$l_{isp,vm}$ – intenzitet isparavanja vlage sa trake papira
$\theta_i$ – radna temperatura vlažnog vazduha
$\theta_{R,i}$ – temperatura rošenja vazduha
$\varphi_i$ – relativna vlažnost vazduha

**LITERATURA**

[1] V. Valent, Sušenje u procesnoj industriji, Tehnološko–metalurški fakultet, Beograd, 2001.

[2] Kolektiv autora, Editor M. Krgović, Studija razvoja celulozno–papirne, ambalažne i grafičke industrije u Jugoslaviji do 2005. Tehnološko–metalurški fakultet, Beograd, 1999.

[3] B. Đorđević, V. Valent, S. Šerbanović, Termodinamika sa termotehnikom, Tehnološko–metalurški fakultet, Beograd, 2005.

[4] B. Đorđević, V. Valent, S. Šerbanović, Termodinamika sa termotehnikom, Zbirka zadataka, Tehnološko–metalurški fakultet, Beograd, 2005.

[5] V. Belić, Diplomski rad, Tehnološko–metalurški fakultet, Beograd, 2002.

**SUMMARY**

AN ANALYSIS OF MOIST AIR ENERGY POTENTIAL DURING THE PROCESS OF PAPER BAND DRYING

(Scientific paper)

Vladimir Valent, Milorad Krgović, Srećko Nikolić
Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Serbia

The energy potential of moist air venting from the dryer of the installation for drying paper bands was analysed. The thermodynamic state of air is defined by the air temperature at the outlet of the dryer and the dew temperature of the air. For the temperature at the outlet of the dryer (55–85 °C) and selected dew temperatures (45–65 °C), the specific consumption of dry air was determined. For selected kinetics of paper band drying, 10–35 $kgH_2O/(m^2h)$, the modification of energy potential of the air as a function of air temperature at the outlet of the dryer and the temperature of dew air was specified. The air flow through the dryer was also correlated with the operation of the ventilation system and recuperation of energy.
An analysis of the thermodynamic state of moist air venting from the dryer and the calculation of its energy potential confirmed that increase of the dew temperature of the air decreases its energy potential. With the intensity of vaporization $l_{vm,isp}$ = 10 $kgH_2O/(m^2h)$, the decrease is 6%. With $l_{vm,isp}$ = 35 $kgH_2O/(m^2h)$, the decrease is much greater and amounts to 21.6%. With increasing dew temperature, the specific consumption of dry air decreases, as well as the relative humidity of the air.

Key words: Paper drying • Energy potential • Moist air • Dew temperature •

Ključne reči: Sušenje papira • Energijski potencijal • Vlažan vazduh • Temperatura rošenja •