

TERMORADIJACIONO SUŠENJE PREMAZA PAPIRA

Razmatraju se osnove termoradijacionog sušenja materijala (papira). Ukazuje se na parametre procesa koji su važni za industrijsko sušenje premaza papira. U industrijskoj praksi termičkog sušenja vlažnih materijala, u zavisnosti od vrste materijala i njihovih fizičko–hemijsko–bioloških osobina, dominiraju konvektivno i konduktivno dovođenje toplote potrebne za isparavanje vlage iz materijala. Kada materijal čini ravnu površ i zahteva se veoma brzo i intenzivno uklanjanje vlage iz površinskog sloja osušenog materijala postupak termoradijacionog sušenja nalazi svoju primenu i opravdanje. Radom je ukazano na osnove tog postupka i parametre koji su od značaja za industrijsku primenu sušenja premaza nanetog na površ papira.

OSNOVE TERMORADIJACIONOG SUŠENJA

Termički postupak sušenja vlažnog materijala podrazumeva da se isparavanje vlage iz materijala ostvaruje zahvaljujući dovedenoj toploti materijala. Postupak dovođenja energije, u obliku toplote, može se ostvariti konvektivnim i konduktivnim mehanizmom, kao i zračenjem energije [1, 2, 3]. Kada se obavlja konvektivno–konduktivna razmena toplote neophodno je da učesnici procesa budu u neposrednom dodiru. Za razliku od toga, tokom dovođenja energije zračenjem – termoradijacijom – učesnici u toj razmeni su međusobno razdvojeni dijatermnom, ili adijatermnom sredinom [2] i dva tela nisu u neposrednom dodiru. Pri tome energija sa zračioca dospeva do grejanog tela putem energijskih kvanta i elektromagnetnih zraka različite talasne dužine [2, 3, 6]. Ta činjenica ukazuje na to da će za termoradijaciono sušenje biti veoma bitan opseg (poželjnih, potrebnih) talasnih dužina zraka pogodnih za efikasno i u kratkom vremenskom periodu ostvareno uklanjanje vlage iz materijala.

Kada je reč o sušenju papira najčešći mehanizam dovođenjem toplote vezan je za kombinaciju konduktivno–konvektivnog postupka [1, 4, 5]. Osušeni, ili delimično osušeni, papir (a najčešće je papir oblika trake) može biti dopunski tehnološki doradivan sa jedne ili obe površi [5].

Jedna vrsta tehnološke dorade papira povezana je sa nanošenjem premaza po površini papira. Sama dorada je proistekla iz najraznovrsnijih potreba uslovljenih primenom, izgledom, funkcionalnim i estetskim osobinama i zahtevima. Premaz, najčešće nastao rastvaranjem

potrebnog sredstva u tečnoj fazi rastvarača (voda, organski rastvarač) često treba veoma brzo ukloniti sa površi papira. Time se dobija proizvod saobražen njegovoj nameni i upotrebi.

Konduktivno–konvektivno dovođenje toplote ima ograničenja u pogledu zahtevanog iznosa tog oblika energije saopštene vlažnom materijalu. Uz vreme sušenja, potrebnu vrednost pogonske sile procesa razmene toplote i uz površinu za razmenu toplote za prijem energije od presudne važnosti su koeficijenti provođenja i prelaženja toplote [1, 2, 3, 7]. Velike vrednosti tih koeficijenata će obezbediti takvu gustinu protoka toplote kojom će se vreme isparavanja vlage svesti na najkraći period trajanja.

Prostriranje toplote. Kod termoradijacionog dovođenja energije vlažnom materijalu gustinu protoka energije (e_1) zračioca određuje izraz za sopstveno zračenje sivog tela [2, 6, 7]. Za koeficijent crnoće (ϵ_1) i temperaturu (T_1) površi zračioca gustina sopstvenog zračenja energije sivog tela biće

$$e_1 = \epsilon_1 C_c \left(\frac{T_1}{100} \right)^4$$

$$\lambda_{\max} T = 2,896 \times 10^{-3} \text{ (mK)}$$

$$C_c = 5,668 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \quad (1)$$

Izrazima (1) se ukazuje na to da će pri porastu temperature (T_1) zračioca gustina protoka energije naglo rasti i biti srazmerna četvrtom stepenu temperature tela. Time se izborom temperature zračioca kao i talasnom dužinom zraka potpuno definišu osobine zračenja izvora energije [2, 7]. Pri tome, λ_{\max} označava onu talasnu dužinu zraka kojoj će odgovarati maksimalan intenzitet zračenja tela temperature T .

Između zračioca energije i (hladnog) vlažnog materijala temperature (T_2) rezultujuća gustina protoka toplote zavisice od veličine i oblika površine ta dva tela, od geometrijskog položaja, međusobnog odnosa i rastojanja površina zračioca (A_1) i materijala ($A_2 > A_1$), apsor-

*Deo rada biće saopšten na 10. međunarodnom simpozijumu iz oblasti celuloze, papira, ambalaže i grafike, 22–25. juna 2004, Hotel Čigota, Zlatibor (Srbija).

Adresa autora: V.J. Valent, Tehnološko–metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Karnegijeva 4, POB 3503, 11120 Beograd
Rad primljen: Juli 7, 2004
Rad prihvaćen: Avgust 31, 2004

pcionih sposobnosti čvrste – tečne površi vlažnog materijala, koeficijenta crnoće (ϵ_1) površi i temperature (T_2) vlažnog materijala. Ako se pretpostavi da je zračilac obuhvaćen sa površi (A_2) vlažnog materijala, to jest da se razmatra razmena toplote između međusobno obojanih površi dva tela, i ako su površi međusobno razdvojene dijatermnom sredinom (u kojoj nema prostiranja toplote prelaženjem) tada je za vremenski interval (Δt), uspostavljenju stacionarnost procesa, između tih površina rezultujući protok toplote [2, 3, 6, 7] od tela više ka telu niže temperature

$$Q_{12} = \frac{Q_{12}}{\Delta t} = \frac{C_c}{\frac{1}{\epsilon_1} + \varphi_{12} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} A_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= A_1 \left\{ C_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \right\} =$$

$$= A_2 \left\{ \varphi_{12} C_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \right\} = A_2 E_2 \quad (2)$$

Za ravan zid i dve međusobno paralelne površi ugaoni koeficijent (zračenja) $\varphi_{12} = 1$. Kod obuhvaćenih ispučeno–udubljenih površi tela ugaoni koeficijent ima vrednost $\varphi_{12} = (A_1/A_2) < 1$.

Ne treba izgubiti iz vida da zračilac energije ponekad mora biti isključen iz procesa, kao i da njegovo tehničko rešenje treba da omogući lako uklanjanje vlage iz gasovitog prostora između zračioca i površine trake koja se intenzivno suši i u okolni prostor predaje isparenu vlagu. Isključenje zračioca iz rada ne znači da će zračilac prestati zračiti energiju, naprotiv, zračenje će se nastaviti. Zbog toga treba uzeti u obzir i planirati rizike koji mogu nastati upotrebom termoradijacije.

Teorija prostiranja toplote [2, 6, 7] poznaje zavisnost prema kojoj su emisiona (ϵ) i apsorpciona sposobnost (a) sivog tela međusobno jednake ($\epsilon_i = a_i$). To znači da će na razmenu toplote zračenjem, prema jednačini (2), značajan uticaj imati apsorpcione sposobnosti površi kako zračioca (a_1) tako i površi (a_2) vlažnog materijala.

Apsorpciona sposobnost površi (a_2) vlažnog materijala (koja u trenutku nanošenja premaza ima osobine tečne suspenzije) zavisi od strukture vlažnog materijala i od osobina nanetog premaza (i u njemu prisutnih – supstancija, materijala) po površi papira. Na prvom mestu to se odnosi na nehomogenost strukture materijala koja će, u zavisnosti dužine vlakana (iz celuloze, ili starog i više puta reciklovanog papira) i drugih čvrstih dodataka, imati značaja na organizovanost natoka suspenzije na filc – nosač suspenzije – i tako doprinositi manjoj ili većoj ujednačenosti svih komponentata čvrste faze po debljini i širini tečnog sloja suspenzije (na filcu). To će učiniti na osobine nastajućeg papira i na prostorni raspored kako vlakana tako i dodataka u delimično osušenom papiru. Pomenuti raspored čvrstih komponentata u

papiru će, sa svoje strane, uslovljavati i ujednačenost vlažnosti materijala i homogenost polja sadržaja vlage u materijalu i sve druge površinske osobine nastalog papira. Na sposobnost apsorpcije zraka utiće i debljina sloja premaza i prisutna hemijska vrsta boje, odnosno pigmentata u suspenziji. Svoj udeo imaće neophodna (za upotrebne, komercijalne, štamparske i druge potrebe) koncentracija boje u tečnom rastvoru, vrsta rastvarača, veličina čestice u suspenziji, nijansa boje, prozračnost – diatermnost sloja suspenzije kao i apsorpcione (i refleksione) osobine čvrste faze već ranije (delimično) osušene trake papira.

Već je rečeno da apsorpciona sposobnost površine vlažnog materijala igra bitnu ulogu za prijem što većeg iznosa dozračene energije. Ta sposobnost apsorpcije određivaće i temperaturno polje u materijalu (bez obzira na činjenicu što je sloj materijala veoma male debljine). To znači da je poželjno da koeficijent apsorpcije vlažnog tela teži maksimalnoj vrednosti. Najveću moć apsorpcije ima apsolutno crno telo; koeficijent apsorpcije crnog tela je jednak jedinici ($a = 1$). Sva siva tela [2, 7] imaju koeficijent apsorpcije manji od jedinice. A koeficijenti apsorpcije sivih tela zavisni su od osobina suspenzije nanete po površi materijala.

Kod čvrstih i tečnih tela dozračena energija se apsorbuje površinskim slojem materijala. Smatra se da se nereflektovan deo dozračene energije apsorbuje u površinskom sloju vlažnog materijala u opsegu debljine $0,001 \div 1$ mm [2, 3, 6, 7, 10]. Pri tome, pošto je tečna faza vode dobar apsorpcioni medijum, može se očekivati da će na početku sušenja vlažnog materijala (u periodu konstantne brzine sušenja papira) kada materijal poseduje mnogo tečne faze vode, biti obezbeđena i dobra apsorpcija dozračene energije.

Unapred zadate ili zahtevane mehaničke i optičke osobine površi papira (ravna, glatka, manje ili više vlažna, odgovarajućeg intenziteta obojenosti i tražene nijanse boje i njene sjajnosti i druge strukturne i mehaničke osobine papira) ukazuju na zahtev organizovanog uticaja stručnjaka na apsorpciju energije i njenu spregu sa osobinama papira. Za povećanu apsorpcionu sposobnost površine bitno je, stoga, odabrati onu talasnu dužinu (λ) zračenja energije (jednačina 1) koja će, za zahtevane tehničko–tehnoške uslove sušenja i zahtevane osobine papira, ta talasna dužina zračenja obezbediti najveću apsorpciju dozračene energije. Orijentaciono posmatrano, opseg talasnih dužina, koji se može očekivati za dobru apsorpciju, pripada intervalu $2 \mu\text{m} < \lambda < 5 \mu\text{m}$ [8, 10]. Iz toga sledi zaključak da će se odabrani zračioci birati tako da obezbede kako selektivnost zračenja energije tako i selektivnost opsega talasnih dužina zrakova potrebnih za sušenje premaza.

Pošto se osobine papira menjaju u zavisnosti od osobina vlakana, punilaca i drugih dodataka kojima se utiče na strukturne, mehaničke, optičke i grafičke osobine papira poželjno je regulacijom temperature površine zračioca energije obezbediti najveću apsorpcionu moć

sušecog materijala. S obzirom na to da se zračenje može u materijalu apsorbovati u različitim opsezima talasnih dužina, ništa nije neobično da se to upravo događa i sa površinom papira i na njemu nanetim slojem premaza.

Uzajamnim sučeljavanjem pomenutih zahteva uočava se da su oni u međusobnoj oprečnosti pri korišćenju zračioca u tehnološkom procesu. Naime, ugradnjom zračioca toplote, za različite uslove tehnološke dorade površine papira, povremena promena osobina zračioca tehno-ekonomski nije opravdana. Stoga se za potrebnu energiju saopštenu telu, kako drugim mehanizmima razmene toplote tako i zračenjem, kao rešenje nameće izbor temperature (T_1) zračioca i to putem regulacije temperature zračioca (jednačina 1). Time se obezbeđuje povećana efikasnost apsorpcije dozračene energije tom površinom papira. To je povezano sa teorijski [2, 6, 7] dokazanim podatkom da se povećana gustina toka energije zračenja javlja pri višoj temperaturi zračioca i da ta gustina zračenja pripada manjoj talasnoj dužini zrakova. Nižoj temperaturi zračenja energije, pak, odgovara manja gustina toplotnog toka, a zračenje se ostvaruje sa većim talasnim dužinama zrakova. Ta spoznaja, uz poželjna eksperimentalna merenja apsorpcionih osobina papira, može biti iskorišćena za regulisanu efikasnost korišćenja raspoloživog dotoka energije sa zračioca. Pri tome, treba imati na umu i jednačine (1) i (2) iz kojih sledi da će pri smanjenju temperature (T_1) zračioca i istovremenom povišenju temperature (T_2) površine vlažnog tela (na koji se energija dozračuje a samim tim i njegova površ, a usled kondukcije toplote i telo, zagreva) protok toplote naglo smanjiti i tako značajno uticati na promenu kinetike isparavanja vlage. Istovremeno to će, zbog promene temperaturnog režima rada, doprinosti potrebi dužeg zadržavanja (trake) papira u zoni zračenja toplote (zbog iznosa energije potrebne za ispravljanje vlage).

Za kvalitetno termoradijaciono sušenje materijala mora se uzeti u obzir kako spektar talasnih dužina koje emituje zračilac, tako i spektar talasnih dužina zračenja koji će biti u najvećoj meri apsorbovan površinom premaza. Znači, rešenje za kvalitetno sušenje će biti kompromis koji sledi iz pomenutih zahteva ponašanja i zračioca i primaoca dozračene energije.

Energija dozračena vlažnom papiru delom se apsorbuje slojem papira a delom se konvektivnim putem predaje okolnom gasovitom agensu – primaocu isparene vlage. Na taj način deo raspoložive energije zračioca i energije apsorbovane vlažnim materijalom biva izgubljen za sušenje. Konvektivni gubici toplote u okolni agens za sušenje zavise od (srednje) temperature (θ_{a1}) gasovitog, okolnog, agensa za sušenje (srednje) temperature površine (θ_2) sloja (sušecog) papira i dinamike kretanja agensa. Za papirnu traku površine A_2 nepoželjni konvektivni protok gubitka toplote sa trake papira na okolni vlažan vazduh će iznositi [2, 7]

$$\dot{Q} = \alpha (\theta_2 - \theta_{a1}) A_2; \theta_{a1} < \theta_2 \quad (3)$$

Koeficijent prelaženja toplote (α) sledi iz teorije sličnosti.

Termoradijaciono sušenje i grejanje vlažnih materijala, obezbeđuje se izborom zračioca. U takve zračiocce potrebnog iznosa energije se ubrajaju: zagrejane metalne ili keramičke površine tela, lampe i drugi infracrveni zračioci [1, 3, 10]. Opseg gustine protoka toplote [1, 10] zračioca doseže vrednosti $4,5 + 11 \text{ kW/m}^2$. Uprave te velike vrednosti gustine protoka toplote, koje su za nekoliko puta veće od iznosa konduktivno-konvektivnih postupaka dovođenja toplote vlažnom materijalu, jesu razlog za primenu termoradijacionog sušenja premaza (po površini papira) i posebne uloge tog oblika dovođenja energije vlažnom materijalu pri finalnoj fazi tehnološke dorade površine papira.

Navedene činjenice ukazuju na to da će na izbor zračioca uticaj imati temperatura zračioca i opseg (za apsorpciju toplote) talasnih dužina zračenja. Zbog toga se mora obratiti pažnja na selektivnost zračenja. Zračilac energije mora biti doveden do potrebnog stepena zagrejanosti kako bi vlažnom papiru saopštio energiju za isparavanje vlage. Kao izvori energije (kojom se zračilac dovodi do potrebne temperature) koriste se: električna energija ili se u zračiocu sagoreva gasovito gorivo [3, 10].

Prenošenje vlage. Za sušenje vlažnog materijala važno je da toplota, definisana jednačinama (1, 2), bude predmeta materijalu i da obezbedi takve uslove procesa kojima će se vlaga iz materijala ukloniti sa što je moguće većom gustinom njenog transportovanja u okolnu (gasovitu) sredinu. Pri sušenju papira tu sredinu čini (nezasićen) vlažan vazduh unapred zahtevanog termodinamičkog stanja [1, 2, 3, 5]. Polazeći od toga da su poznate termodinamičke veličine stanja vlažnog vazduha a time i pritisak vlažnog (p) vazduha, parcijalni pritisak zasićenja ($(p_{H_2O}^z)_{\theta_2}$) vodene pare na temperaturi površinskog sloja papira (θ_2) i parcijalan pritisak vodene pare ($(p_{H_2O})_{\infty}$) u vazduhu i na temperaturi (θ_{a1}) tog vazduha, u periodu konstantne brzine sušenja [1, 3] gustina masenog protoka ($j_{w,1}$) vlage sa trake papira u okolnu (gasovitu) sredinu može se iskazati zavisnošću [1, 4]

$$j_{w,1} = \frac{E_2 - \alpha(\theta_2 - \theta_{a1})}{\Delta h_{1g}} = \frac{k_p}{R_{H_2O} T_{a1}} \frac{p}{p - (p_{H_2O}^z)_{\theta_2}} [(p_{H_2O}^z)_{\theta_2} - (p_{H_2O})_{\infty}] \quad (4)$$

$$\Delta h_{1g} = \Delta h_{1g} + c_{pH_2O}^g (\theta_{a1} - \theta_2)$$

Koeficijent prelaženja vlage (k_p) sledi iz jednačine sličnosti.

Veličina Δh_{1g} predstavlja toplotu fazne transformacije vlage na (srednjoj) temperaturi trake papira. Izobarski toplotni kapacitet vodene pare ($c_{pH_2O}^g$) određuje se kao srednja vrednost za interval temperature θ_{a1} i θ_2 . Pri tome je $\Delta h_{1g} > c_{pH_2O}^g \Delta \theta$. Veličina E_2 predstavlja iznos razmenjene toplote (između dve površine) dat jednačinom (2).

Što je razlika parcijalnih pritisaka vlažioca (vode) veća, saglasno jednačini (4), to je veća intenzivnost isparavanja vlage (to jest sušenja vlažnog materijala). U tom smislu pri malim relativnim vlažnostima vazduha ($\varphi \rightarrow 0$) parcijalan pritisak vodene pare u vazduhu ($p_{H_2O}^\infty = \varphi p_{H_2O}^z$) će biti malene vrednosti; time će biti ispunjen poželjan uslov, prema jednačini (4), za povećanu gustinu masenog toka vlage ka okolnom vazduhu. S tim u vezi stoji i jednačina (3). Naime, iz jednačine (3) sledi da pri uslovu $\theta_{at} < \theta_z$ niska temperatura vazduha (θ_{at}) će doprinositi malim konvektivnim gubicima toplote. To će omogućavati i da vazduh u termoradijacionoj sušnici primi povećanu masu isparene vlage (jednačina 4) i pri tome još bude i male brzine kretanja, čime se konvektivni gubici toplote svode na najmanji iznos.

Tokom sušenja papira površinski sloj premaza očvršćava.

Usled očvršćavanja premaza odtok vlage kroz sloj premaza biva otežavan nastojanjem nove strukture na površi materijala. To dopunski utiče na produžavanje potrebnog (inače kratkog) vremena sušenja premaza. Nastao čvrsti sloj premaza, pak, predstavlja (premda malen) i dodatni termički otpor kondukcije toplote. Stoga taj otpor doprinosi i produženim periodima vremena i sušenja i hlađenja papira. U prilog produžavanja vremena sušenja i hlađenja (već osušenog) papira ide i činjenica da je osušen materijal (zbog smanjenog prisustva vlažioca – tečne faze vode koja je dobar provodnik toplote) lošiji provodnik toplote od tog istog materijala kada je materijal vlažan.

Uopšteno govoreći, na pojavu termičkog sušenja materijala ograničavajuće će uticati kako transportni procesi razmene toplote, tako i kretanje vlage kroz vlažan materijal, kao i prenošenje te vlage sa površi vlažnog materijala u njegovu (gasovitu) okolinu. Povoljno odabrana intenzivnost razmena i dinamika svih učesnika procesa doprineće efikasnosti svih procesa.

Termoradijaciono sušenje premaza po površi višeslojnog kartona primenjeno je u A.D. "Umka", Fabrika kartona, Umka (Srbija) [10]. Karakteristike zračioca, procesa i kvalitet dobijenog kartona potvrđuju tehnološku,

energijsku i ekonomsku opravdanost korišćenja i termoradijacionog postupka sušenja premaza papira [10].

ZAKLJUČAK

Termoradijaciono sušenje obezbeđuje veliku gustinu dotoka toplote vlažnom materijalu. To skraćuje vreme sušenja i pogoduje sušenju tečnih premaza po papiru. Tehnička rešenja zračilaca toplote treba da uvažavaju različite strukturne, apsorpcione i optičke osobine premaza i nastale čvrste faze premaza.

VAŽNIJE OZNAKE

- A_i – površina
- T_i – termodinamička temperatura
- q_{12} – gustina protoka toplote
- ϵ_i – koeficijent crnoće (sivog tela i)
- a_i – koeficijent apsorpcije (sivog tela i)
- λ – talasna dužina zraka
- k_p – koeficijent prelaženja (mase) supstancije
- θ – empirijska temperatura
- p – pritisak ili parcijalan (p_i) pritisak
- α – koeficijent prelaženja toplote
- Δh_{ig} – energija faznog preobražavanja vlage iz tečne (l) u gasovitu fazu (g)

LITERATURA

- [1] V. Valent, Sušenje u procenju industriji, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2001, 41–42, 159–164.
- [2] B. Đorđević, V. Valent, S. Šerbanović, Termodinamika sa termotehnikom, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2003, 519–549.
- [3] K. Kröll, Trocknen und Trocknungsverfahren, Springer Verlag, Berlin 1978, 280–409
- [4] K. Kröll, Trocken und Trocknung in der Produktion, Springer Verlag, Berlin, 1989, 241–280
- [5] M. Križan, Savremena proizvodnja papira, Mrliješ, Beograd, 1997, 131–208, 314–355
- [6] A.A.M. Sayigh, Solar Energy Engineering, Academic Press, New York, 1977, 37–58
- [7] J.P. Holman, Heat Transfer, McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1989, 207–310, 373–458
- [8] H. Pfennig, Verfahrenstechnik 1 (1967), 306–319
- [9] G. Böttger, Melliand Textilberichte, 52 (1971), 588–590
- [10] V. Valent, A.D. Fabrika kartona Umka, Umka, privatno saopštenje, maj 2004

SUMMARY

THERMORADIAL DRYING OF PAPER COATINGS

(Professional paper)

Vladimir J. Valent

Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia

The thermoradial drying of material (paper) was discussed. The basic and most important parameters of the process of industrial drying (paper coatings) were defined.

Key words: Thermoradial drying • Paper coating •
Ključne reči: Termoradijaciono sušenje • Premaz papira •