

**TERMORADIJACIONO SUŠENJE
PREMAZA PAPIRA**

Razmatraju se osnove termoradijacionog sušenja materijala (papira). Ukazuje se na osnovne parametre procesa koji su važni za industrijsko sušenje papira.

U industrijskoj praksi termičkog sušenja vlažnih materijala, u zavisnosti od vrste materijala i njihovih fizičko-hemijskih-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 materijalu. Postupak dovođenja energije, u obliku toplote, može se ostvariti konvektivnim i konduktivnim mehanizmom kao i zračenjem energije [1–3]. 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 [2–4]. 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 dovođenja toplote vezan je za kombinaciju konduktivno

– konvektivnog postupka [1,5,6]. Osušen, ili delimično osušen, papir (a najčešće je papir oblika trake) može biti dopunski tehnološki doradivan sa jedne ili obe površi [6].

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 (vode) 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 [1–3,7]. Velike vrednosti tih koeficijenta će obezbediti takvu gustinu protoka toplote kojom će se vreme isparavanja vlage svesti na najkraći period trajanja.

Prostiranje 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

$$e_1 = \epsilon_1 C_c \left(\frac{T_1}{100} \right)^4; \quad \lambda_{\max} T = 2,896 \times 10^{-3} \text{ (mK)};$$

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

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 ($A_2 > A_1$), apsorpcionih sposobnosti čvrste – tečne površi vlažnog materijala, koeficijentata crnoće (ϵ_i) 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 obuhvaćenih površi dva tela, i ako su površi međusobno razdvojene dijatermnom sredinom (u kojoj nema prostiranja toplote prelaženjem) tada je za vremenski interval (Δt), uspostavljenu stacionarnost procesa, između tih površina rezultujući protok toplote [2–4,7] od tela više ka telu niže temperature

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

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

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

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

Teorija prostiranja toplote [2,4,7] poznaje zavisnost prema kojoj su emisiona (ϵ) i apsorpciona sposobnost (a) sivog tela međusobno jednake ($\epsilon = a$). To znači da će na razmenu toplote zračenjem, prema jednačini (2), značajan uticaj imati apsorpcione sposobnosti površi zračioca (a_1) i površi (a_2) vlažnog materijala.

Apsorpciona sposobnost (a_2) površi vlažnog materijala (koja u trenutku nanošenja premaza ima osobine tečne suspenzije) zavisi od strukture premaza, to jest od osobina tečnog premaza po površi papira. Na tu sposobnost uticaće debljina sloja premaza i prisutna hemijska vrsta boje, odnosno pigmentata u suspenziji. Svoj udeo imaće neophodna koncentracije boje u tečnom rastvoru, vrsta rastvarača, veličina čestice u suspenziji, nijansa boje, prozračnost – dijaternost sloja suspenzije kao i apsorpcione 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. 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 zavisi su od osobina suspenzije nanete po površi materijala.

Kod čvrstih i tečnih tela dozračena energija apsorbuje se 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 [2–4,7].

Unapred zadate mehaničke i optičke osobine površi papira (ravna, glatka, manje ili više vlažna, odgovarajućeg intenziteta obojenosti i tražene nijanse boje i njene sjajnosti) 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 – tehnološke uslove sušenja i zahtevane osobine površine papira, ta talasna dužina zračenja obezbediti najveću apsorpciju dozračene energije. Orijentaciono posmatrano opseg talasnih dužina, koji se može očekivati za dobru apsorpciju, pripada intervalu $2 \mu\text{m} < \lambda < 5 \mu\text{m}$. Iz toga sledi zaključak da će se odabrani zračioci birati tako da obezbede kako selektivnost zračenja energije tako i neophodnog opsega talasnih dužina zrakova potrebnih za sušenje 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, promena osobina zračioca tehnički nije opravdana. Stoga se za potrebnu energiju saopštenu telu 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 dokazanim podatkom da se povećana gustina toka energije javlja pri višoj temperaturi zračenja i da ta gustina zračenja pripada manjoj talasnoj dužini zrakova. Nižoj temperaturi zračenja energije odgovara manja gustina toplotnog toka, a zračenje se ostvaruje sa većim talasnim dužinama zrakova [2,4,7]. Ta spoznaja, uz 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 zagreva) protok toplote naglo smanjiti i tako značajno uticati na promenu kinetike isparavanja vlage. Istovremeno to će doprinositi dužem zadržavanju (trake) papira u zoni zračenja toplote. Uz predaju vlage gasovitom agensu to će se suštinski odraziti na proizvodnost – kapacitet postrojenja za sušenje. Tehničko ishodište, dakle, mora uzeti u obzir kompromisno rešenje koje sledi iz pomenutih

oprečnih zahteva i ponašanja i zračioca i primaoca do zračene energije.

Energija dozračena vlažnom papiru delom se apsorbuje slojem papira a delom se konvektivnim putem predaje okolnom gasovitom agensu. Na taj način deo raspoložive energije biva izgubljen za sušenje. Konvektivni gubici toplote u okolni agens za sušenje zavise od njegove (srednje) temperature (θ_{a1}), (srednje) temperature (θ_z) površine sloja (sušećeg) papira i dinamike kretanja agensa. Za papirnu traku površine A_2 nepoželjni konvektivni gubitak toplote sa trake na okolni vlažan vazduh će iznositi [2,7]

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

Koeficijent prelaženja toplote (α) sledi iz teorije sličnosti i korelacija koje se primenjuju na traku papira.

Termoradijaciono sušenje i grejanje vlažnih materijala, obezbeđuje se izborom zračioca energije. U takve zračiocce se ubrajaju: zagrejane metalne ili keramičke površine tela, lampe i drugi infracrveni zračioci [1,3]. Opseg gustine protoka toplote [1] zračioca doseže vrednosti $4,5 \div 11 \text{ kW/m}^2$. Upravo 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].

Prenošenje vlage. Za sušenje vlažnog materijala je važno da toplota, data jednačinama (1,2), bude predata 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 [1–3]. Polazeći od toga da su poznate termodinamičke veličine stanja vlažnog vazduha a time i pritisak vlažnog (p) vazduha, parcijalni pritisak zasićenja ($p_{H_2O}^z$) vodene pare na temperaturi sloja papira (θ_z) 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_{w1}) vlage sa trake papira u okolnu (gasovitu) sredinu može se iskazati zavisnošću [1,5]

$$j_{w1} = \frac{E_2 - \alpha (\theta_z - \theta_{a1})}{\Delta h_{1g}} = \frac{k_p}{R_{H_2O} T_{a1}} \frac{p}{p - (p_{H_2O}^z)_{\theta_z}} [(p_{H_2O}^z)_{\theta_z} - (p_{H_2O}^\infty)]$$

$$\Delta h_{1g} = \Delta h_{1g} + c_{pH_2O}^g (\theta_{a1} - \theta_z) \quad (4)$$

Koeficijent prelaženja vlage (k_p) sledi iz jednačine sličnosti.

Veličina Δh_{1g} predstavlja toplotu fazne transformacije vlage na (srednjoj) temperaturi trake papira. Izobarški toplotni kapacitet vodene pare ($c_{pH_2O}^g$) određuje se kao srednja vrednost za interval temperature θ_{a1} i θ_z . 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 ($\phi \rightarrow 0$) parcijalan pritisak vodene pare u vazduhu ($p_{H_2O}^\infty = \phi p_{H_2O}^z$) 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 $\theta_{a1} < \theta_z$ niska temperatura vazduha (θ_{a1}) 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 takav sloj biva otežavan nastajanjem te, nove, strukture. To dopunski utiče na produžavanje potrebnog (inače kratkog) vremena sušenja premaza. Nastao čvrsti sloj premaza, pak, predstavlja (premda malen) termički otpor kondukciji toplote. Stoga taj otpor dodatno doprinosi i produženim periodima vremena i sušenja i hlađenja papira.

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). Karakteristike zračioca, procesa i kvalitet dobijenog kartona potvrđuju tehnološku, energijsku i ekonomsku opravdanost korišćenja termoradijacionog postupka sušenja premaza papira.

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 uvažuje 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_{lg} – energija faznog preobražavanja vlage iz tečne (l) u gasovitu fazu (g)

LITERATURA

- [1] V. Valent, Sušenje u procesnoj industriji, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2001, 41–42, 159–1642.
- [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] A.A.M. Sayigh, Solar Energy Engineering, Academic Press, New York (1977) 37–58
- [5] K. Kröll, Trocken und Trocknung in der Produktion, Springer Verlag, Berlin (1989) 241–280
- [6] M. Križan, Savremena proizvodnja papira, Mrlješ, Beograd (1997) 131–208, 314–355
- [7] J.P. Holman, Heat Transfer, McGraw-Hill Book Company, Singapore (1989) 207–310, 373–458

SUMMARY**THERMORADIAL DRYING OF PAPER COATINGS**

(Professional paper)

Vladimir J. Valent
 Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade

The thermoradial drying of material (paper) was discussed. The basic and most important parameters of the process of industrial drying were defined. Thermoradial drying provides a relatively large heat flux to the wetted material. It shortens the time of drying and is advantageous for drying liquid coatings on the surface of the paper. The technical solution of the irradiation method must be defined taking into account the structural, absorptive and optical characteristics of the formed solid phase of the coating.

Key words: Drying • Coated paper •

Ključne reči: Sušenje • Premazni papir •