

VLADIMIR VALENT
MILORAD KRGOVIĆ
SREĆKO NIKOLIĆ

Tehnološko–metalurški fakultet,
Univerzitet u Beogradu,
Beograd

STRUČNI RAD

544.4+66.047+676.064.1:536.7+531.2

KINETIKA SUŠENJA PAPIRA I TERMODINAMIČKE POKRETAČKE SILE*

U radu se razmatra kinetika sušenja papira i njena veza sa termodinamičkim parametrima agensa za sušenje i dinamikom učesnika tehnološkog procesa proizvodnje. Ukazuje se na značaj obezbeđenja povoljnog termodinamičkog stanja agensa za sušenje papira i brzine učesnika procesa na koeficijente prelaženja toplote i vlage u agens za sušenje.

Pod kinetikom sušenja podrazumeva se pojava vezana za vremenski period uklanjanja vlage iz vlažnog materijala. U osnovi postoje različiti postupci sušenja vlažnog materijala [1]. U ovom razmatranju biće reči o termičkom postupku sušenja papira.

Da bi se proces termičkog sušenja papira obavio potrebno je vlažnom materijalu dovesti energiju u obliku toplote. Taj iznos energije daje zavisnost kojom se povezuju parametri grejnog fluida (suvozasicevane vodene pare potrebnog termodinamičkog stanja i neophodnog masenog protoka pare tokom njenog kondenzovanja u sušnim cilindrima postrojenja za sušenje), toplotna provodljivost materijala (λ_i), koeficijenti prelaženja toplote ($\alpha_{\text{vodena para}}$, α_{agens} za sušenje), termodinamičko stanje nezasićenog vlažnog vazduha – primaoca isparene vlage) i brzinu sušenja (N) papira. Ne uzimajući u obzir gubitke toplote, energiju za endotermne procese unutar strukture nastajuće trake papira potreban iznos protoka toplote obuhvata energiju neophodnu za zagrevanje vlažnog materijala (u sušnici) i energiju za isparavanje vlage – tečne faze vode (H_2O) – iz vlažnog materijala:

$$\begin{aligned} \dot{Q} = \dot{Q}_{za} + \dot{Q}_{is} = [\dot{m}_{sm}c_{sm} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}C_{\text{H}_2\text{O}}] (\theta_{m,1} - \theta_{m,0}) + \\ + m_{sm}r_{\text{H}_2\text{O}} \frac{dW_s}{dt} = [\dot{m}_{sm}c_{sm} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}C_{\text{H}_2\text{O}}] (\theta_{m,1} - \theta_{m,0}) + \\ + m_{sm}\Delta h_{g,\text{H}_2\text{O}}N \end{aligned} \quad (1)$$

Da bi se energija razmenila između grejnog fluida i gasovitog agensa za sušenje – vlažnog vazduha

(koji zahvaljujući radu ventilatora struji kroz postrojenje za sušenje i tokom tog strujanja biva obogaćivan isparenom vlagom) i u obliku toplote saopštila vlažnom materijalu, nužno je da bude zadovoljen uslov prostiranja toplote prolaženjem. Iznos te razmenjene energije sledi iz zavisnosti koeficijenta prelaženja toplote (sadržanih u jednačinama sličnosti), (srednje) razlike temperatura ($\Delta\theta_{sr}$), površine (A) za razmenu toplote i izraza:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= k\Delta\theta_{sr}A, \\ k &= f(\alpha_{\text{H}_2\text{O}}, \lambda_{\text{materijal}}, \alpha_{\text{agens}}), \\ Nu &= \frac{\alpha R}{\lambda} f_1(Re, Pr, \dots) \end{aligned} \quad (2)$$

Jednačine (1 i 2) povezuju kinetiku procesa (definisano brzinom sušenja N) i njenu vezu sa koeficijentima prelaženja toplote koji su uslovljeni dinamikom učesnika procesa.

Da bi se sušenje vlažnog materijala obavilo potrebnom brzinom sušenja (koja obuhvata period zagrevanja vlažnog materijala, period konstantne i period opadajuće brzine sušenja [2] i termičkog uklanjanja vlage iz vlažnog materijala – papira) neophodno je da se vlaga transportuje u okolni gasoviti agens za sušenje. Agens za sušenje je nezasićen vlažan vazduh neophodnog termodinamičkog stanja za zahtevani kapacitet proizvodnje osušenog papira. Bilansna jednačina za maseni protok vlage ka agensu za sušenje je definisana razlikom hemijskog potencijala vlage [1,2] na površini (A_i) isparavanja vlage i hemijskog potencijala te vlage u agensu. Tome treba dodati empirijske jednačine za transportne procese a koje sadrže odgovarajuće koeficijente prelaženja vlage (k_p , k_Y), pogonske sile procesa koje su mogu opisati ili parcijalnim pritiscima gasovite faze vode ($p_{\text{H}_2\text{O}}$, $p_{\text{H}_2\text{O}}^\infty$), ili sadržajem gasovite faze vlage (Y^z , Y_∞ , u agensu. Iz

*Rad saopšten na skupu XIII međunarodni simpozijum iz oblasti celuloze, papira, amblaze i grafike, Zlatibor, 2007.

Adresa autora: V. Valent, Tehnološko–metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Karnegijeva 4
E-mail: valent@tmf.bg.ac.yu
Rad primljen: Jun 05, 2007.
Rad prihvaćen: Jul 15, 2007.

tih uslova maseni protok isparene vlage daće teorijski i empirijski definisani izrazi:

$$\begin{aligned} \vec{J}_W &= -\lambda_W \nabla \mu_W = \dots = \frac{\Delta m_{H_2O}}{A_{vm} \Delta t} = k_p (p_{H_2O}^* - p_{H_2O}^o) A_{vm} = \\ &= k_y = k_y (Y^e - Y^o) A_{vm} \\ Sh &= \frac{k_i R}{D_{AB}} = f_2(Re, Sc, Gu, \dots) \end{aligned} \quad (3)$$

Jednačine (1–3) sprežu kinetiku i dinamiku procesa i predmet su razmatranja uzajamnosti tih porcesa.

DISKUSIJA

Tokom proizvodnje papira, brzina kretanje nosača suspenzije (transportnom trakom – poroznim filcom) i rotirajućim cilindrima (u čijoj unutrašnjosti se kondenzuje grejni fluid) a nakon toga i oformljene trake papira je približno konstantna za date tehnološke uslove proizvodnje. U tim uslovima rada sušnice koeficijent preležanje toplote kondenzujućeg grejnog fluida je približno konstantne vrednosti (za date uslove rada kondenzacionih lonaca). Provođenje toplote za metalni sušni cilindar i izabran filc su takođe unapred određeni i za date uslove proizvodnje praktično malo promenljivi. Izuzetak od toga čini vlažan i delimično osušen filc; u filcu sadržaj vlage opada u smeru kretanja trake papira. To ima uticaj na njegovu toplotnu provodljivost (smanjujući je) i na gustinu protoka toplote na suspenziju iz koje nastaje traka papira. Slično važi i za toplotnu provodljivost vodene suspenzije i za toplotnu provodljivost nastale trake papira. U traci papira sadržaj vlage (W_s) se neprestano menja, takođe se smanjuje u smeru kretanja trake papira kroz postrojenje za sušenje. Smanjivanjem vlažnosti trake papira smanjuje se i provodljivost toplote takvog papira. Ako se to ima na umu tada će prostiranje toplote, a time i prenošenje vlage sa vlažnog materijala na agens, biti najviše promenljivo i zavisno od koeficijentata prelaženja toplote i supstancije sa trake papira na okolni gasoviti agens. Kretanje trake papira i usmeravanjem strujanja agensa na papir bitno se utiče na debljinu graničnog sloja gasovite faze koji se formirao na površini papira. Time se, usmernošću tokova fluida, i uz lokalno neuniformno polje sadržaja vlage (W_s) u vlažnom materijalu, bitno narušava i smanjuje debljina termičkog i difuzionog graničnog sloja te gasovite faze. Zahvaljujući tome, turbulencija u sloju te faze, intenzivira konvektivni transportni proces u toj fazi. To doprinosi povećavanju razlike u pogonskim silama bitnih transportnih procesa: prenošenje vlage sa trake papira na okolni agens za sušenja i prelaženje toplote između učesnika procesa. Kada se pod pogodnim uglom usmerava

agens na smer kretanja trake papira obezbeđuje se efikasnija razmena energije i supstancije između učesnika procesa. Time se, pri datoj dinamici procesa, doprinosi poželjnoj energijskoj efikasnosti pri proizvodnji papira.

Da bi se nastala gasovita faza vlage, i u takvom termodinamičkom stanju zahtevanom brzinom sušenja bila predata u okolni agens za sušenje, neophodno je da je termodinamičko stanje vlažnog vazduha takvo da zadovolji uslove pogodne za prijem vlage isparene iz vlažnog materijala. To znači da pogonske sile procesa [1], a koje su definisane razlikom parcijalnih pritisaka ($p_{H_2O}^* - p_{H_2O}^o$) gasovite faze vode u tom vazduhu, ili su određene razlikom sadržaja vlage u vazduhu ($Y^e - Y^o$), moraju biti velikih vrednosti. Ni jedan od pomenutih i tokom sušenja stalno menjajućih parametara vlažnog vazduha nije sam za sebe nezavisna veličina. Naime, parcijalan pritisak suvozasicene vodene pare ($p_{H_2O}^*$) na površini suspenzije, a nakon oformljenja trake papira na površini trake (p_{H_2O} , zavisi od temperature ($\theta_{m,i}$) površine vlažnog materijala i od temperature i termodinamičkog stanja gasovitog agensa za sušenje. Temperatura površine materijala se menja tokom sušenja papira kako to sledi iz podataka u proizvodnji papira*. Na ulazu u postrojenje za sušenje temperatura vlažnog materijala je najmanje vrednosti. Temperatura vlažnog materijala raste usled dovođenja toplote filcu i na njemu prisutnoj suspenziji i dostiže konstantnu vrednost tokom kratkog perioda konstantne brzine sušenja papira. Temperatura trake papira raste tokom perioda opadajuće brzine sušenja papira, jer se papir oformio i oslobođen od filca naizmenično različitim stranama svojih površi, tokom transporta u smeru izlaza iz sušnice, naleže na sušne cilindre postrojenja za sušenje. Na izlazu iz postrojenja za sušenje, traka papira mora biti temperature ($\theta_{m,i}$) i sadržaja vlage (W_s) pogodnih za namotavanje papira, ili za doradu površinskog sloja papira važnu za estetske ili druge upotrebne name ne papira. Time je uslovljena i vrednost pogonske sile transportnog procesa i termodinamičko stanje nezasićenog vlažnog vazduha u kojem parametar odgovarajuće pogonske sile mora biti što je moguće manje vrednosti s ciljem dostizanja maksimalnog učinka pogonske sile procesa. Taj uslov proističe iz jednačine (3). Naime, samo pod tim uslovima kinetika sušenja (N) papira, i tehnoloških procesa, biće povoljno sprengnute sa zahtevanom brzinom odnošenja vlage sa površine isparavanja (A_{vm}) vlažnog materijala.

*Autori rada se zahvaljuju vlasniku i tehničkom osoblju Fabrike kartona Umka, Umka, Srbija za pravo raspolaganja podacima iz proizvodnog procesa, za zajedničku realizaciju obaveza sadržanih u istraživačkom projektu Ministarstva za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije.

Da bi gasoviti agens za sušenje bio pogodnog termodinamičkog stanja i neophodnog masenog protoka, kao i da bi se obezbedila minimalna potrošnja suvog vazduha [1,2] korišćen vazduh mora biti visoke temperature. Taj uslov zadovoljava dve bitne termodinamičke karakteristike vazduha: energijsko stanje vazduha pogodnog za razmenu toplote i veliku udaljenost sadržaja vlage (Y_i) takvog vazduha od stanja termodinamičkog zasićenja vazduha isparenom vlagom. Time se obezbeđuje da je vlažan vazduh udaljen od termodinamičkog stanja bliskog temperaturi rošenja vazduha vlagom i istovremeno se obezbeđuje mala specifična potrošnja suvog vazduha [3,4]. To dokumentuju podaci [4,5]. Ako je svež vazduh pritiska $p_o = 0,10$ MPa vlažen vodenom parom tako da na izlazu iz sušnice bude temperature $\theta_i = 85^\circ\text{C}$, tada je za takav vazduh u intervalu temperature rošenja* $\theta_{mi} = 55 - 65^\circ\text{C}$ u vazduhu sadržaj vodene pare u opsegu vrednosti $Y^z = 0,116 - 0,152$ kgH₂O/(kgsv). Kada je svež vlažan vazduh tog pritiska na ulazu u proces tehnološke pripreme relativne vlažnosti $\phi_o = 50\%$ i početne temperature $\theta_o = 20^\circ\text{C}$ tada se, za naznačena stanja, vlaženje vazduha vodom i njegovu izlaznu temperaturu od $\theta_i = 85^\circ\text{C}$ tokom termičkog (konvektivnog) sušenja trake papira specifična potrošnja suvog vazduha [1,2] nalazi u intervalu [5] $l_{sa} = 9,43 - 5,37$ kgsv/(kgH₂O). To se može označiti kao mala specifična potrošnja suvog vazduha. A maloj specifičnoj potrošnji suvog vazduha odgovara veliki sadržaj vlage u vlažnom vazduhu na izlazu iz sušnice; takav vlažan vazduh je, stoga, velike kapacitativnosti na isparenu vlagu.

S druge tačke gledišta, maloj specifičnoj potrošnji suvog vazduha odgovara mali maseni protok vazduha obogaćenog isparenom vlagom [3-5]. Malom, ili smanjenom protoku suvog vazduha kroz sušnicu odgovara smanjena potrebna snaga kompresora (ventilacionog sistema) kojim se vazduh transportuje kroz postrojenje za sušenje a nakon izlaza iz sušnice usmerava i na rekuperatore i rekuperaciju njegove energije. Treba uočiti, da su u sprezi termodinamički, kinetički i energijski parametri vazduha i efikasnost procesa. Poznavanje te sprege obezbeđuje efikasno sušenje papira, povećanu energijsku efikasnost rada postrojenja za konvektivno sušenje kao i povećanu energijsku efikasnost rada privrednog subjekta.

Iz izloženog se može zaključiti da su kinetički, transportni procesi i termodinamičke pokretačke sile uzajamno povezani i da jedan na drugi značajno utiču.

*Za naznačen vlažan vazduh čija je temperatura rošenja 65°C maksimalna vrednost sadržaja vode u zasićenom vlažnom vazduhu iznosi $Y^z = 0,2074$ kgH₂O/(kgsv).

ZAKLJUČAK

Kinetikom definisan i potreban uslov efikasnog sušenja papira zahteva spregnutost dinamike procesa i termodinamičkog stanja svih učesnika procesa. U tom smislu povišena temperatura suspenzije na ulazu u sušnicu (na natočnom koritu), povišena temperatura agensa za sušenje, efikasno mehaničko uklanjanje tečne faze vode (slobodne vlage) [1] iz suspenzije, dinamika transportne trake i papira, dinamika i usmerenost toka vazduha na traku papira, bitni su za proces i njegovo izvođenje pod odabranim tehničkim, proizvodnim i termodinamičkim uslovima. Time se na meru svodi i optimizuje i energijska efikasnost proizvodnje.

ZAHVALNOST

Autori rada se zahvaljuju Ministarstvu za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije za finansiranje i realizaciju projekta "Racionalizacija toplotne energije u celuložno-papirnoj industriji na primeru Fabrike kartona Umka", Umka, Srbija. Projekat se vodi pod evidencionim brojem EE 232005.

OZNAKE

- \dot{Q} – protok toplote
- \dot{m}_{sm} – mase ili maseni protok suvog materijala
- $c_{p,i}$ – izobarski toplotni kapacitet
- p_i – parcijalni pritisak vlage
- θ_i – empirijska temperatura
- $r_{\text{H}_2\text{O}}$ – toplota fazne transformacije vlage iz tečne u gasovitu fazu
- k_i – koeficijent prolaženja toplote ili prelaženja supstancije
- N – brzina sušenja
- t – vreme
- μ_i – hemijski potencijal vlažioca materijala
- J_w – maseni protok vlage
- Y_i – sadržaj vlage u gasovitom agensu za sušenje
- W_s – sadržaj vlage u vlažnom materijalu
- A_i – površina
- R – geometrijski oblik
- Nu, Sh, \dots – brojevi sličnosti

LITERATURA

- [1] V. Valent, Sušenje u procesnoj industriji, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2001.
- [2] B. Đorđević, V. Valent, S. Šerbanović, Termodinamika sa termotehnikom, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2005.
- [3] V. Valent, M. Krgović, S. Nikolić, Energijski potencijal vlažnog vazduha i temperatura rošenja, 12. Međunarodni simpozijum iz oblasti celuloze, papira, ambalaže i grafike, Zlatibor 20.23. jun 2006., Zbornik radova, str. 83-90.

- [4] V. Valent, M. Krgović, S. Nikolić, Analiza energijskog potencijala vlažnog vazduha tokom sušenja trake papira. *Hem. ind.* **60** (7–8) (2006) 188–194.
- [5] V. Valent, M. Krgović, Uticaj temperature vlažnog vazduha na termodinamičke uslove rada stvarne sušnice, 7. Jugoslovenski simpozijum iz oblasti celuloze, papira, ambalaže i grafike (sa međunarodnim učesćem), Zlatibor, 20.–22. jun 2001., Zbornik radova, str. 49–54.

SUMMARY

KINETICS OF PAPER DRYING AND THERMODYNAMIC DRIVING FORCES

(Professional paper)

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

Kinetics of paper drying, its relation with thermodynamic drying agent parameters and dynamics of technological process participants was analyzed. The importance of thermodynamic states of drying agents, rate of the participants versus heat transfer and wet transfer coefficients to drying agents were discussed.

Key words: Drying kinetics •
Thermodynamic driving forces •

Ključne reči: Kinetika sušenja •
Termodinamičke pokretačke sile •