

**SUŠENJE**, tehnološka operacija kojom se voda, a rjeđe i druge kapljevine, npr. organska otapala, uklanjaju iz tvari u kojima se nalaze u razmjerno malim količinama. Pod sušenjem se u prvom redu misli na uklanjanje vode iz čvrstih tvari, dakle na dobivanje čvrstog proizvoda u suhom stanju, pa se na taj način opisuje u ovom članku.

Pri sušenju plinova i kapljevine, osim fizikalnih operacija (adsorpcija, apsorpcija, sublimacija), primjenjuju se i kemijski procesi (npr. reakcije metala i oksida s vodom), koje se ne nazivaju sušenjem. Sušenjem se ne smatraju ni druge tehnološke operacije za uklanjanje kapljevine (filtracija, isprešavanje), jer se tu radi o sustavima koji sadrže velike količine kapljevine s obzirom na čvrstu tvar, pri čemu se čvrsta tvar ne dobiva u suhom stanju.

Sušenje je vrlo česta operacija procesne tehnike u različitim privrednim granama. Ono može biti pripremna operacija, kad materijal treba osušiti za dalju preradbu, ili pak završni stupanj preradbe u mnogim tehnološkim postupcima u kemijskoj, farmaceutskoj i prehrambenoj tehnologiji, gdje često bitno utječe na kvalitetu proizvoda i ukupan učinak proizvodnje. Primjenjuje se i radi smanjenja mase različitim materijalima da bi se uštedjeli troškovi oko manipulacije.

Sušenje se u principu odvija u dva koraka: u prvom se kapljevine iz vlažnog materijala prevodi u paru, a u drugome para odvodi. Sušenje se obično pospješuje zagrijavanjem materijala. Iznimka je sušenje sublimacijom, gdje se vlaga u materijalu prvo smrzne, a zatim se uklanja sublimacijom pod sniženim tlakom. Prevođenje kapljevine u paru pri temperaturi materijala nižoj od vrelišta kapljevine u njemu, uz odvođenje pare strujom nekog plina koji nije zasićen tom parom, naziva se *ishlapljivanjem*. Za razliku od toga, *isparivanjem* se naziva prevođenje kapljevine u paru pri temperaturi materijala koja odgovara vrelištu kapljevine u njemu pri normalnom ili pri sniženom tlaku.

Materijal se za sušenje može zagrijavati konvekcijom, kondukcijom ili radijacijom, pa se prema tome razlikuju i metode sušenja.

Prilikom *konveksijskog sušenja* materijal se zagrijava strujom prikladnog vrućeg plina koji ujedno odnosi i paru izašlu iz materijala. To je najčešće vrući zrak, a može biti i koji drugi inertni plin, dimni plinovi i sl. Pri *konduksijskom sušenju* materijalu se toplina dovodi kroz zagrijanu ogrjevnu plohu koja je s njime u kontaktu. Pri *radijacijskom sušenju* materijal se zagrijava energijom koju prima u obliku elektromagnetskog zračenja.

U svim se metodama sušenja, osim kad se radi pod sniženim tlakom u vakuumskom sušioniku, para koja izlazi iz materijala odvodi strujom plina kroz sušionik. Taj je plin gotovo uvijek zrak.

### VLAŽNI ZRAK

U većini se postupaka sušenja iz materijala uklanja voda, a kao plin za dovođenje topline i odvođenje vodene pare služi zrak. To je smjesa plinova i vodene pare u kojoj se omjer pojedinih plinova može smatrati približno konstantnim. Međutim, udio se vodene pare u zraku jako mijenja jer ovisi o tlaku i temperaturi, što je povezano s pojavom da svaki plin koji je u kontaktu s kapljevinom sadrži određenu količinu njezine pare. Smjesa zraka i vodene pare naziva se *vlažnim zrakom*, a zrak koji ne sadrži vodene pare naziva se *suhim zrakom*.

Ako je parcijalni tlak vodene pare u zraku manji od njezina ravnotežnog tlaka, tj. tlaka zasićenja za danu temperaturu, para se neće kondenzirati i zrak se neće zamagliti, orositi. Tada se vlažni zrak ponaša kao obična smjesa suhih plinova, približno kao idealni plin. U tehničkoj je praksi parcijalni tlak vodene pare obično nizak, mnogo niži od standardnog tlaka.

U toku sušenja količina je suhog zraka stalna, dok se voda kondenzira ili isparuje, pa se udio vodene pare mijenja, a s time i količina vlažnog zraka. Zato je kao osnovu za računanje količine prikladno odabrati nepromjenljivi suhi, a ne vlažni zrak.

*Vlažnost zraka* (sadržaj vlage u zraku) omjer je između mase vode u zraku (vodene pare)  $m_v$  i mase suhog zraka  $m_{sz}$ :

$$x = \frac{m_v}{m_{sz}} \quad (1)$$

Pri nekoj temperaturi i tlaku vlažnost zraka može rasti samo do određene vrijednosti od  $x$ , do koje smjesa zraka i vodene pare ostaje homogena. Zrak s takvom maksimalnom vlažnošću jest *zasićeni zrak* (zrak zasićen vodenom parom). *Parcijalni tlak takva zasićenog zraka* naziva se *ravnotežnim parcijalnim tlakom* vodene pare u zraku (*parcijalnim tlakom zasićenja zraka vodenom parom*)  $p'_v$ . Svaki će se višak vlage u ravnotežnom sustavu vode i zraka kondenzirati i ostat će u kapljevitom stanju, pa će se zrak zamagliti, orositi.

*Relativna vlažnost* zraka omjer je stvarnog parcijalnog tlaka vodene pare  $p_v$  i ravnotežnog parcijalnog tlaka vodene pare  $p'_v$  pri istoj temperaturi i tlaku:

$$\varphi = \frac{p_v}{p'_v} \quad (2)$$

Relativna vlažnost može se izraziti i u postocima. Za  $\varphi = 0$  zrak je suh, a za  $\varphi = 1$ , odnosno  $\varphi = 100\%$ , zrak je zasićen vodenom parom.

Vlažnost zraka može se iskazati i pomoću parcijalnih tlakova:

$$x = \frac{M_v}{M_{sz}} \cdot \frac{p_v}{p_{sz}} = \frac{M_v}{M_{sz}} \cdot \frac{p_v}{p - p_v} = \frac{18,02}{28,96} \cdot \frac{p'_v \varphi}{p - p'_v \varphi} = 0,622 \frac{p'_v \varphi}{p - p'_v \varphi} \quad (3)$$

gdje je  $p_{sz}$  parcijalni tlak suhog zraka,  $p$  ukupni tlak, a  $M_v$  i  $M_{sz}$  molarne mase vodene pare i suhog zraka.

Kad je parcijalni tlak vodene pare jednak parcijalnom tlaku zasićenja na istoj temperaturi, vlažnost je zasićenog zraka:

$$x' = 0,622 \frac{p'_v}{p - p'_v} \quad (4)$$

U anglosaksonskoj literaturi upotrebljava se i *stupanj zasićenja*, što je omjer stvarne vlažnosti zraka i vlažnosti zasićenog zraka na istoj temperaturi.

Ako se u problemima u vezi sa sušenjem računa s množinom tvari ( $n$ ), onda se definira *množinska vlažnost*:

$$X = \frac{n_v}{n_{sz}} = \frac{m_v / M_v}{m_{sz} / M_{sz}} \quad (5)$$

Između vlažnosti (definirane masenim omjerom) i množinske vlažnosti zraka postoji veza:

$$x = 0,622 X, \text{ odnosno } X = 1,61 x. \quad (6)$$

U smjesi idealnih plinova množinski je omjer jednak omjeru parcijalnih tlakova vodene pare i zraka, pa je

$$x = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v}, \text{ odnosno } X = \frac{p_v}{p - p_v} \quad (7)$$

To vrijedi samo za vodenu paru u smjesi, a ne i za kapljevinu koja je možda prisutna u obliku magle. Kad je parcijalni tlak vodene pare u zraku jednak parcijalnom tlaku zasićenja na promatranoj temperaturi, množinska je vlažnost zasićenog zraka

$$X' = \frac{p'_v}{p - p'_v} \quad (8)$$

**Entalpija zraka.** U toku sušenja promjena se stanja zraka prati pomoću promjena njegove vlažnosti i entalpije (v. *Termodinamika*). Specifična je entalpija (entalpija mase 1 kg) suhog zraka:

$$h_{sz} = c_{sz} T, \quad (9)$$

gdje je  $c_{sz}$  specifični toplinski kapacitet suhog zraka pri stalnom tlaku. Specifična je entalpija vodene pare:

$$h_{vp} = c_{vp} T + r_0, \quad (10)$$

gdje je  $c_{vp}$  specifični toplinski kapacitet vodene pare pri stalnom tlaku, a  $r_0$  specifična entalpija isparivanja vode na  $0^\circ\text{C}$ .

U području u kojem se vodena para može smatrati idealnim plinom njezina entalpija ne ovisi o tlaku, a to vrijedi uglavnom za sve probleme s vlažnim zrakom.

Entalpija vlažnog zraka zbroj je entalpije suhog zraka te umnoška vlažnosti zraka i entalpije vodene pare:

$$h_{vz} = h_{sz} + x h_{vp} = c_{sz} T + x(c_{vp} T + r_0) = (c_{sz} + x c_{vp}) T + x r_0 = c_{vz} T + x r_0, \quad (11)$$

gdje je  $c_{vz}$  specifični toplinski kapacitet vlažnog zraka pri stalnom tlaku.

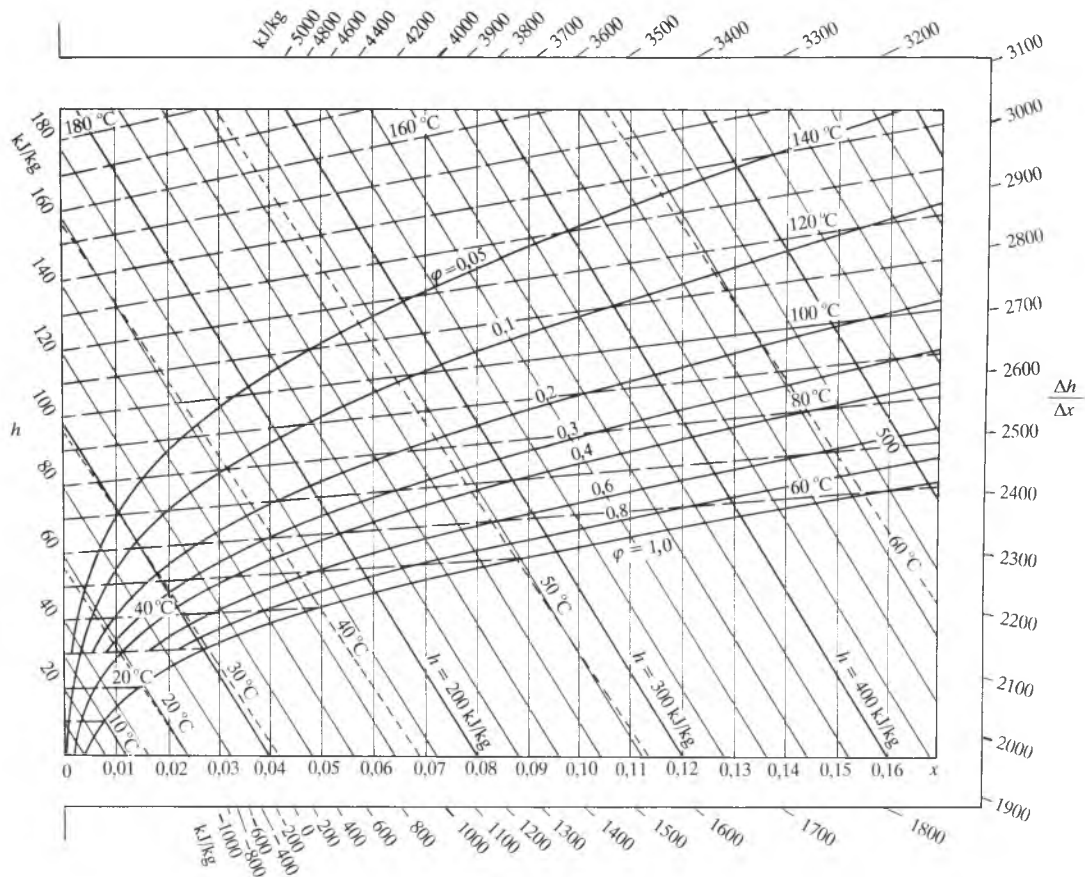
Entalpija je zasićenog zraka:

$$h' = h_{sz} + x' h_{vp} = c_{sz} T + x'(c_{vp} T + r_0). \quad (12)$$

**Dijagram vlažnosti.** Za praćenje promjena parametara vlažnog zraka u toku sušenja često se upotrebljava kosokutni

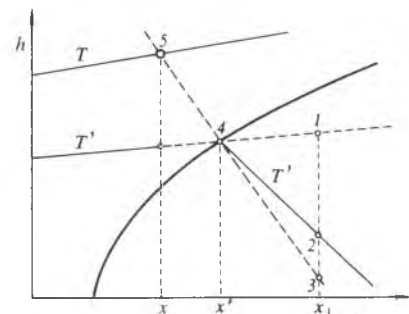
Iz Mollierova se dijagrama može očitati jedna od triju veličina (temperatura, sadržaj vlage, relativna vlažnost) ako su poznate druge dvije. Može se, dakle, pratiti kako se mijenja stanje vlažnog zraka prilikom primanja ili oduzimanja topline, odnosno prilikom adijabatskog primanja ili oduzimanja vodene pare.

**Određivanje vlažnosti zraka psihrometrom.** Vlažnost zraka može se odrediti mjerenjem temperature zraka zasićenog vodenom parom (tzv. temperatura mokrog termometra,  $T'$ ) i temperature zraka koji nije zasićen vodenom parom (tzv. temperatura suhog termometra,  $T$ ), a uređaj za mjerenje naziva se *psihrometrom* (v. *Meteorološki uređaji*, TE 8, str. 487). Na temelju tih podataka može se stanje zraka jednostavno definirati pomoću  $h, x$ -dijagrama. Na pojednostavnjenom dijagramu (sl. 2) potraže se izoterme  $T$  i  $T'$ , poznate na osnovi rezultata mjerenja. Ordinata bilo koje vlažnosti  $x_1$  daje na produljenoj liniji izoterme  $T'$  točku 1, a na pripadnoj izotermi magle točku 2. Točka 3 dobiva se produljenjem dužine  $\overline{T2}$  u dužinu  $\overline{T3}$  (množenjem sa  $k \cdot c_{vz}/\alpha$ , gdje je  $k$  koeficijent prijelaza mase s površine vlažne tvari u zrak ili koeficijent ishlapljivanja koji ovisi o vlažnosti zraka, a  $\alpha$



Sl. 1. Mollierov  $h, x$ -dijagram za vlažni zrak pri tlaku  $0,1 \text{ MPa}$ .  $h$  entalpija zraka,  $x$  vlažnost zraka (definirana prema suhom zraku),  $\varphi$  relativna vlažnost zraka

Mollierov  $h, x$ -dijagram (sl. 1). On grafički pokazuje međusobnu ovisnost temperature, sadržaja vlage u zraku, relativne vlažnosti i specifične entalpije vlažnog zraka za konstantni tlak od 1 bar. Na ordinati su nanese vrijednosti specifične entalpije, a na apscisi sadržaj vlage (vlažnost zraka). Ravnotežna krivulja zasićenja ( $\varphi = 1$ ) spaja sve točke rosišta i dijeli područje nezasićenog vlažnog zraka od područja magle. Vlažni zrak u području magle, osim vlage u obliku pare, sadrži i vlagu u kapljevitom ili u čvrstom stanju, ili u oba ta stanja. U nezasićenom području izoterme su ravne linije koje se blago podižu prema gornjem desnom dijelom dijagrama. Na ravnotežnoj se krivulji izoterme lome, pa su u području magle gotovo paralelne s izentalpijama (pravcima konstantne entalpije).



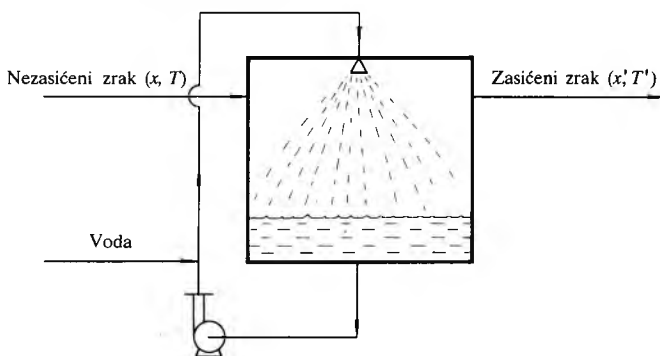
Sl. 2. Određivanje vlažnosti zraka na temelju podataka izmjerenih psihrometrom

koeficijent prijelaza topline). Spojnica točke 3 s točkom 4 produlji se zatim do izoterme  $T$ , na kojoj daje traženu točku stanja zraka 5 s vlažnosti  $x$ .

Točnost određivanja vlage pomoću psihrometra ovisi o pouzdanosti mjerenja temperatura mokrog i suhog termometra, te o točnosti vrijednosti kvocijenta  $k \cdot c_{vz} / \alpha$ , koji se za vlažni zrak i za turbulentno strujanje ne razlikuje mnogo od jedan. Pri malim razlikama temperatura  $T$  i  $T'$  kvocijent je približno jednak 1. Tada je postupak na sl. 2 jednostavniji pa, da bi se našlo stanje vlažnog zraka u točki 5, treba u sjecištu izoterme  $T'$  i krivulje zasićenja potražiti odgovarajuću liniju entalpije i naći njezino sjecište s izotermom  $T$ .

**Promjene stanja vlažnog zraka.** Pomoću  $h, x$ -dijagrama mogu se lako pratiti promjene stanja vlažnog zraka: adijabatsko vlaženje zraka, odvlaživanje zraka hlađenjem i miješanje zračnih struja.

**Adijabatsko vlaženje zraka.** Prilikom vlaženja zrak u kontaktu s raspršenom vodom preuzima vodenu paru i odnosi je sa sobom iz uređaja za vlaženje. Vlažnost i temperatura zraka poprimaju na izlazu iz uređaja nove vrijednosti, a proces je adijabatski. Voda cirkulira kroz uređaj ne mijenjajući svoja osnovna svojstva.



Sl. 3. Adijabatsko vlaženje zraka

Ako je kontakt zraka s raspršenim kapljicama vode dovoljan, ostvaruje se ravnotežno stanje. Zrak poprima temperaturu adijabatskog zasićenja  $T'$  i ravnotežnu vlažnost  $x'$  (sl. 3). Kako je vlaženje teklo adijabatski, entalpija zraka na ulazu uređaja za vlaženje i izlazu iz njega bit će jednaka, pa će toplinska bilanca biti:

$$c_{vz} T + x r_0 = c_{vz} T' + x' r_0, \quad (13)$$

odnosno

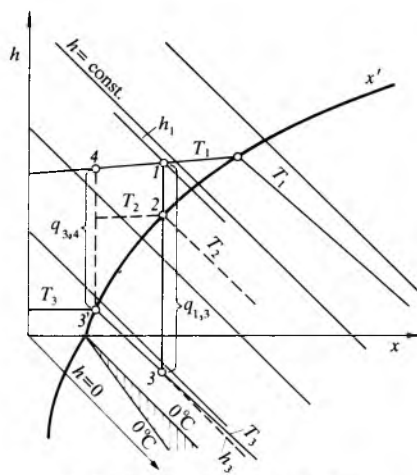
$$\frac{x - x'}{T - T'} = -\frac{c_{vz}}{r_0}. \quad (14)$$

To je jednadžba adijabatskog vlaženja, a opisuje pravac na sl. 2 koji prolazi točkom 4 ( $x', T'$ ) na krivulji zasićenja i točkom 5 ( $x, T$ ). Nagib je tog pravca  $-(c_{vz}/r_0)$ .

**Odvlaživanje zraka hlađenjem.** Ako se vlažni zrak hladi od početnog stanja 1 ( $h_1, x_1$ ), vlažnost se zraka  $x_1$  ne mijenja dok se ne postigne stanje koje odgovara točki 2 na liniji rošenja (sl. 4). Daljim se hlađenjem zrak zamagli, a stijenke posude orose. Hlađenjem do temperature  $T_3$  dostiže se stanje (točka 3) u zamagljenom području (smjesa zasićenog zraka stanja 3' i vodenih kapljica temperature  $T_3$ ). Ako se odstrani voda, a preostala smjesa (točka 3') ugrije na početnu temperaturu  $T_1$  (stanje u točki 4), proveden je jednostavan postupak za odvlaživanje zraka stanja 1. Količina izmijenjene topline može se očitati iz  $h, x$ -dijagrama. Pri grijanju i hlađenju uz konstantan tlak specifična je toplina

$$q_{1,2} = h_1 - h_2; \quad q_{1,3} = h_1 - h_3; \quad q_{3,4} = h_4 - h_3. \quad (15)$$

**Miješanje zračnih struja bez dovođenja topline.** U prostoru bilo kojeg oblika s dva ulaza i jednim izlazom mogu se pri konstantnom tlaku miješati dvije struje zraka s ulaznim masenim protocima  $\dot{m}_1$  i  $\dot{m}_2$ . Tada je izlazni protok smjese jednak zbroju ulaznih protoka. Ako se ne dovodi toplina i



Sl. 4. Odvlaživanje zraka hlađenjem

ne obavlja vanjski rad, bilanca je topline:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h, \quad (16)$$

pa je entalpija dobivene smjese:

$$h = \frac{\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}. \quad (17)$$

Slično je za bilancu vode:

$$\dot{m}_1 x_1 + \dot{m}_2 x_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) x. \quad (18)$$

Odatle se može odrediti vlažnost nastale smjese:

$$x = \frac{\dot{m}_1 x_1 + \dot{m}_2 x_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}. \quad (19)$$

Eliminiranjem veličina  $\dot{m}_1$  i  $\dot{m}_2$  iz jednadžbi (17) i (19) dobiva se

$$\frac{h_2 - h}{x_2 - x} = \frac{h - h_1}{x - x_1}. \quad (20)$$

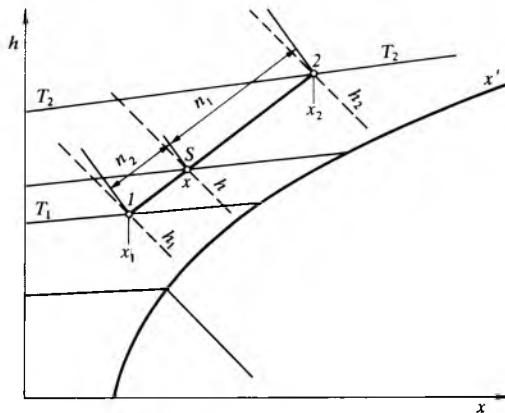
U  $h, x$ -dijagramu (sl. 5) stanje nastale smjese  $S(x, h)$  može se naći na spojnici točaka 1 ( $x_1, h_1$ ) i 2 ( $x_2, h_2$ ) polaznih struja zraka, jer se tako zadovoljava linearna veza prikazana u jednadžbi (20). Udio je protoka dviju struja u konačnoj smjesi:

$$n_1 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}; \quad n_2 = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}. \quad (21)$$

Budući da je  $n_1 + n_2 = 1$ , iz (18) i (21) slijedi:

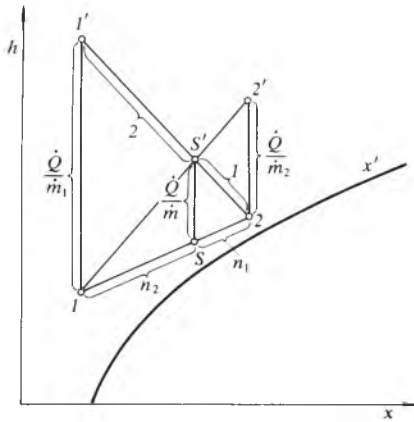
$$n_1 = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} = \frac{h_2 - h}{h_2 - h_1}; \quad n_2 = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{h - h_1}{h_2 - h_1}. \quad (22)$$

Prema pravilu miješanja točka  $S$  dijeli pravac miješanja u omjeru  $n_1/n_2$ . Za poznate numeričke vrijednosti masenih protoka  $\dot{m}_1$  i  $\dot{m}_2$  može se stanje nastalo miješanjem naći tako



Sl. 5. Miješanje zračnih struja bez dovođenja topline

da se dužina između točaka 1 i 2 razdjeli u omjeru  $n_1/n_2$  prema jednadžbi (22) i da se iz dijagrama očitaju vrijednosti entalpije i vlažnosti tog stanja.



Sl. 6. Miješanje zračnih struja uz dovođenje topline

**Miješanje zračnih struja uz dovođenje topline.** Ako se prilikom miješanja zračnih struja dovodi toplina  $Q$ , povećat će se entalpija smjese  $S$  za  $Q/\dot{m}$  po 1 kg suhog zraka. Time se od stanja  $S$  postiže stanje  $S'$  (sl. 6). Isto se postiže ako se toplina, umjesto smjesi, dovodi svakoj struji posebno. Grijanjem zračne struje masenog protoka  $\dot{m}_1$  povećava joj se entalpija  $h_1$  pri  $x = \text{const.}$  do entalpije u stanju  $1'$ , pri čemu je  $Q/\dot{m}_1 = h_1' - h_1$ . Miješanjem stanja  $1'$  i 2 dobiva se smjesa sa stanjem  $S'$  na spojnici  $1'2$ . Slična je situacija ako se toplina dovodi struji 2.

### VLAGA U MATERIJALU

Vlaga je na površini čvrste tvari vezana privlačnim silama koje postoje između molekula vode i atoma ili iona čvrste tvari. Na temelju takve fizikalne adsorpcije (v. *Adsorpcija*, TE 1, str. 1) najjače je uz površinu vezan prvi, monomolekulni sloj vode, dok su ostali slojevi vode na površini vezani sve slabijim silama, koje konačno postanu jednake privlačnim silama među molekulama slobodne vode kao kapljevine. Parcijalni tlak vodene pare nad površinom materijala ne razlikuje se tada od takva tlaka nad slobodnom površinom vode iste temperature. Tako je velik dio vlage slabo vezan uz materijal i može se ukloniti sušenjem materijala, a i drugim operacijama za razdvajanje kapljevine od čvrste faze.

Zadržavanje i putovanje vlage u unutrašnjosti materijala ovisi o njegovoj strukturi, pa se po tome razlikuju dvije vrste materijala.

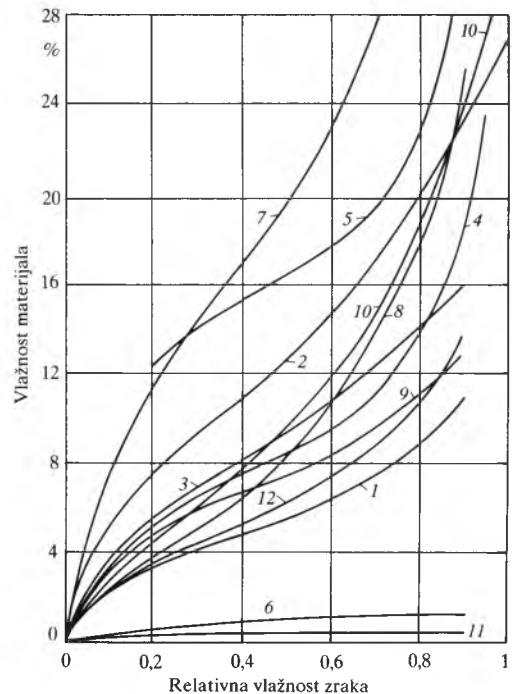
U prvu vrstu idu materijali zrnate ili kristalne strukture, kakve su većinom anorganske čvrste tvari. Ti materijali zadržavaju vlagu u prostoru između čestica i u razmjerno širokim i plitkim površinskim porama. Vlaga se u takvim materijalima giba kapilarnim mehanizmom zbog kombiniranog djelovanja gravitacije i površinske napetosti. Kako vlaga ne utječe mnogo na materijal, to se on ni sušenjem bitno ne mijenja. U drugu vrstu materijala ubraja se većina organskih tvari, koje uglavnom mogu biti amorfne, vlaknate ili s gelnom strukturom. U njima se vlaga zadržava unutar vlakana ili finih unutrašnjih pora i sporo se giba difuzijom. Uklanjanje vlage iz takvih materijala bitno utječe na njihov izgled i svojstva. Pri većoj brzini sušenja nastaju velike razlike u količini vlage u pojedinim dijelovima materijala, što može uzrokovati njegovu deformaciju, pojavu pukotina, lom i sl.

U navedenoj se podjeli ne nalaze materijali u kojima je voda kemijski vezana vrlo jakim silama (kemisorpcija) ili je ugrađena u kristalnu rešetku. Uklanjanje vode iz takvih materijala ne smatra se sušenjem jer oni pritom bitno mijenjaju svoja svojstva, a najčešće se i razgrađuju.

**Ravnatežna vlažnost materijala.** Vlažnost materijala  $y$  izražava se omjerom mase vode prema masi suhe tvari. Sušenjem na zraku koji nije zasićen vodenom parom uklanja se slobodna vlaga, tj. prvo vlaga s površine, pa vlaga iz većih

pora, a zatim i iz sitnijih. Nakon nekog vremena uspostavlja se ravnoteža između vlage u materijalu i vlage u zraku, pa prestaje uklanjanje vlage, tj. sušenje materijala. Vlažnost materijala u ravnoteži s vlažnošću zraka naziva se *ravnatežna vlažnost materijala*  $y'$ , a ovisi u prvom redu o njegovoj strukturi. *Nehigroskopni materijali* nemaju uskih pora u svojoj unutrašnjosti (makroporozni materijali), pa razmjerno malo vlage vežu jakim adsorpcijskim silama. Zbog toga se takvi materijali mogu vrlo dobro osušiti, tj. njihova je ravnotežna vlažnost niska. Međutim, *higroskopni materijali* ne mogu se dobro osušiti jer je u njihovim uskim porama vlaga čvrsto vezana, što se očituje nižim parcijalnim tlakom vodene pare nad njihovom površinom u usporedbi s parcijalnim tlakom nad slobodnom površinom vode pri istoj temperaturi (mikroporozni materijali). Njihova je ravnotežna vlažnost visoka.

Ovisnost vlažnosti materijala o relativnoj vlažnosti zraka grafički se prikazuje ravnatežnom krivuljom, ustvari krivuljom izotermne ravnoteže (sl. 7). Pri upotrebi dijagrama treba znati da li je krivulja izrađena prema eksperimentalnim podacima prilikom sušenja ili prilikom vlaženja materijala, jer to daje dvije različite krivulje, tj. pojavljuje se histereza. Dakako, za sušenje je uvijek mjerodavna krivulja dobivena prilikom sušenja. Sl. 7. prikazuje takve krivulje; materijal će se sušiti ako se, s obzirom na svoju vlažnost i vlažnost zraka, nađe u stanju koje odgovara području iznad ravnatežne krivulje. Obratno, materijal će se vlažiti kad je u stanju koje odgovara području ispod ravnatežne krivulje. Razumljivo je da je, s obzirom na apscisu, ravnatežna krivulja higroskopnih materijala strmija od krivulje nehigroskopnih materijala.



Sl. 7. Ovisnost ravnatežne vlažnosti nekih materijala o relativnoj vlažnosti zraka. 1 novinski papir, 2 vuna, 3 celulozni nitrat, 4 svila, 5 štavljena koža, 6 kaolin, 7 list duhana, 8 sapun, 9 tutkalo, 10 drvo, 11 staklena vuna, 12 pamuk

Promjene su ravnatežne vlažnosti materijala s porastom temperature malene, pa se često i zanemaruju. Ovisnost ravnatežne vlažnosti materijala o temperaturi pri danoj relativnoj vlažnosti zraka jest

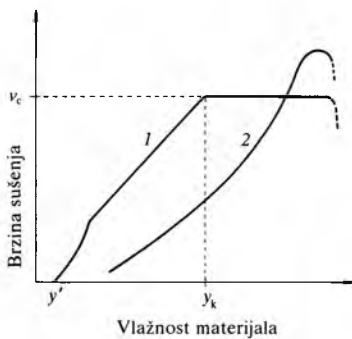
$$\frac{\partial y'}{\partial T} = -A y', \quad (23)$$

gdje je  $A$  koeficijent kojemu je vrijednost  $0,005 \dots 0,01 \text{ K}^{-1}$  za relativnu vlažnost zraka između 0,1 i 0,9 te za vlažne materijale.

Sl. 7 prikazuje ovisnost ravnotežne vlažnosti nekih materijala o relativnoj vlažnosti zraka pri temperaturi 25 °C. Netopljivi i neporozni materijali kao staklena vuna i kaolin imaju relativno niske ravnotežne vlažnosti, dok porozni i šupljikavi materijali kao što su biološki, posebno celulozni materijali, imaju visoke vrijednosti ravnotežne vlažnosti.

**SUŠENJE MATERIJALA**

Mehanizam je sušenja najjednostavniji kad je sva granična površina mokrog materijala pokrivena neprekinutim vodenim slojem. Voda prelazi s površine materijala u zrak i stalno se nadoknađuje dotjecanjem vode iz unutrašnjosti materijala. Tada se sušenje odvija konstantnom brzinom (sl. 8) pri konstantnoj temperaturi (temperatura tzv. mokrog termometra). Brzina je sušenja konstantna jer ne ovisi o prirodi materijala, nego samo o temperaturi, tlaku i strujanju zraka, te o vrijednostima koeficijenta prijelaza topline i mase. To je, dakle, *period konstantne brzine sušenja*, koji za materijale s difuzijskim mehanizmom putovanja vlage može biti vrlo kratak i slabo izražen.



Sl. 8. Ovisnost brzine sušenja o vlažnosti materijala. 1 materijali zrnate i kristalne strukture, 2 amorfn i vlaknati materijali,  $v_c$  konstantna brzina sušenja,  $y_k$  kritična vlažnost,  $y'$  ravnotežna vlažnost

Nakon nekog se vremena vlažnost materijala toliko smanji da se neprekinuti granični vodeni sloj počinje kidati i povlačiti s površine materijala, a na njoj se pojavljuju prva suha mjesta. Tada se upravo završava period konstantne brzine, a započinje *period opadajuće brzine sušenja*. Vlažnost materijala na kraju perioda konstantne brzine sušenja naziva se *kritična vlažnost materijala* (sl. 8). Brzina se sušenja počinje smanjivati jer brzina dotjecanja vode iz unutrašnjosti postaje manja od brzine kojom voda prelazi s površine u zrak. Istodobno temperatura materijala na suhom dijelu površine raste, pa se toplina prenosi u unutrašnjost.

Kad se cijela površina materijala osuši i voda s nje sasvim povuče, brzina se sušenja još više smanjuje jer tada postaje dominantnim procesom sušenja prijenos vlage i topline kroz suhe površinske slojeve materijala. Put se vlage do površine sve više produljuje, vlažnost se površinskih slojeva smanjuje, a temperatura im raste i približava se temperaturi zraka nad površinom. Voda u materijalu postaje diskontinuirana faza, a s približavanjem kraju sušenja brzina teži nuli, koju dostiže u trenutku kad vlažnost materijala dostigne svoju ravnotežnu vlažnost. Sušenje tada prestaje, a može se nastaviti samo ako se ravnoteža na neki način poremeti, npr. ako se smanji vlažnost zraka.

Opisani tok sušenja grafički se prikazuje krivuljama sušenja, kojima oblik ovisi o vrsti materijala. Krivulje opisuju ovisnost vlažnosti materijala o trajanju sušenja ili, nakon deriviranja, ovisnost brzine sušenja o vlažnosti materijala (sl. 8).

**Određivanje trajanja i brzine sušenja.** Određivanjem vlažnosti materijala u toku sušenja može se odrediti brzina sušenja, koja je definirana izrazom:

$$v = - \frac{m_{sm} dy}{A dt}, \tag{24}$$

gdje je  $m_{sm}$  masa suhog materijala,  $y$  vlažnost materijala,  $A$  površina isparivanja, a  $t$  trajanje sušenja.

Pri sušenju konstantnom brzinom  $v_c$ , kad su početna i konačna vlažnost ( $y_1$  i  $y_2$ ) u nekom promatranom vremenu veće od kritične vlažnosti, integriranjem jednadžbe (24) dobiva se izraz za trajanje sušenja:

$$t = \frac{m_{sm}}{A v_c} (y_1 - y_2). \tag{25}$$

Vlažni se materijal suši prijelazom vodene pare s površine vlažnog materijala u sredstvo za sušenje, što je najčešće zrak. Uklanjanje pare s vlažne površine materijala ovisi o brzini prijelaza topline sa zraka na površinu materijala. U stacionarnim uvjetima brzina se prijelaza topline uravnotežuje s brzinom prijelaza mase.

Pri nižim temperaturama zraka može se zanemariti prijelaz topline zračenjem i prolaz topline kondukcijom kroz stijenu spremnika u kojem se suši vlažan materijal, pa se pretpostavlja da toplina prelazi od toplog zraka na površinu materijala samo konvekcijom (v. *Termodinamika*). Tada je toplinski tok

$$\dot{Q} = \alpha(T - T')A, \tag{26}$$

gdje je  $\alpha$  ( $WK^{-1}m^{-2}$ ) koeficijent prijelaza topline konvekcijom od toplog zraka temperature  $T$  na površinu materijala, a  $T'$  je temperatura površine vlažnog materijala prilikom isparivanja.

Tok vodene pare od vlažne površine materijala u zrak iznosi

$$v_n = k_y(X' - X), \tag{27}$$

gdje je  $k_y$  ( $mols^{-1}m^{-2}$ ) koeficijent prijelaza pare od površine materijala u zrak, a  $X$  i  $X'$  množinska vlažnost nezasićenog zraka, odnosno zraka zasićenog vodenom parom. Kombiniranjem jednadžbi (1), (5) i (27) dobiva se izraz

$$v_n = k_y \frac{M_{sz}}{M_v} (x' - x). \tag{28}$$

Toplinski tok koji treba dovesti na površinu materijala da bi se osigurao tok vodene pare od vlažne površine u zrak može se definirati izrazom

$$\dot{Q} = M_v v_n A r_v = v_c A r_v, \tag{29}$$

gdje je  $r_v$  entalpija isparivanja vode pri temperaturi  $T'$ .

Uzimajući u obzir jednadžbe (26), (28) i (29) izlazi da je brzina sušenja konvekcijom topline u stacionarnom periodu sušenja

$$v_c = \frac{\dot{Q}}{A r_v} = \frac{\alpha(T - T')}{r} = k_y M_{sz} (x' - x), \tag{30}$$

a uvrštenjem tog izraza za brzinu u jednadžbu (25) dobiva se izraz za trajanje sušenja u stacionarnom periodu sušenja:

$$t = \frac{m_{sm} r_v (y_1 - y_2)}{A \alpha (T - T')} = \frac{m_{sm} (y_1 - y_2)}{A k_y M_{sz} (x' - x)}. \tag{31}$$

Prilikom sušenja pri višim temperaturama zraka toplina se prenosi na vlažni materijal ne samo konvekcijom nego i zračenjem i kondukcijom (v. *Termodinamika*), pa je ukupni toplinski tok ( $\dot{Q}_{uk}$ ) zbroj toplinskih tokova pojedinih mehanizama sušenja. Toplinski tok konvekcijom definiran je slično jednadžbi (26)

$$\dot{Q}_{kv} = \alpha_{kv}(T - T_p)A, \tag{32}$$

gdje je  $\alpha_{kv}$  koeficijent prijelaza topline konvekcijom, a  $T_p$  temperatura površine materijala. Tako je i toplinski tok zračenjem određen jednadžbom

$$\dot{Q}_{zr} = \alpha_{zr}(T_{zr} - T_p)A, \tag{33}$$

gdje je  $\alpha_{zr}$  koeficijent prijelaza topline zračenjem od neke vruće površine temperature  $T_{zr}$  na površinu materijala temperature  $T_p$ .

Prijelaz topline kondukcijom ostvaruje se kroz metalnu stijenku na kojoj leži vlažni materijal i kroz taj materijal, ali se metalna stijenka mora prvo zagrijati vrućim zrakom koji struji ispod nje, dakle opet konvekcijom. Zato je u jednadžbi za toplinski tok kondukcijom

$$\dot{Q}_{kd} = k(T - T_p)A \quad (34)$$

koeficijent prolaza topline ( $k$ ) zapravo određen jednadžbom

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{kv}} + \frac{d_s}{\lambda_s} + \frac{d_m}{\lambda_m}}, \quad (35)$$

gdje je  $d_s$  debljina stijenke,  $\lambda_s$  njezin koeficijent toplinske vodljivosti,  $d_m$  debljina sloja vlažnog materijala i  $\lambda_m$  njegov koeficijent toplinske vodljivosti.

Brzina sušenja dobiva se uvrštenjem jednadžbi (32), (33) i (34) u jednadžbu (30):

$$v_c = \frac{\dot{Q}_{uk}}{A r_p} = \frac{(\alpha_{kv} + k)(T - T_p) + \alpha_{zr}(T_{zr} - T_p)}{r_p}, \quad (36)$$

gdje je  $r_p$  toplota isparivanja vode na temperaturi  $T_p$ .

Za sušenje opadajućom brzinom teže je odrediti trajanje procesa i njegovu brzinu. Ako je ovisnost brzine sušenja o vlažnosti materijala linearna ( $v = ay + b$ ), tada se diferenciranjem jednadžbe pravca ( $dv = a dy$ ) i uvrštenjem u jednadžbu (24) dobiva izraz za trajanje sušenja

$$t = \frac{m_{sm}}{aA} \int_{v_2}^{v_1} \frac{dv}{v} = \frac{m_{sm}}{aA} \ln \frac{v_1}{v_2}, \quad (37)$$

gdje su  $v_1$  i  $v_2$  brzine sušenja ( $v_1 > v_2$ ) koje odgovaraju početnoj ( $y_1$ ) i konačnoj ( $y_2$ ) vlažnosti materijala za neki promatrani period. Kako je  $a = (v_1 - v_2)/(y_1 - y_2)$ , to je konačni izraz za trajanje sušenja u tom periodu:

$$t = \frac{m_{sm}(y_1 - y_2)}{A(v_1 - v_2)} \ln \frac{v_1}{v_2}. \quad (38)$$

Ako pravac ovisnosti brzine sušenja o vlažnosti materijala prolazi ishodištem (sl. 8), a početak je promatranja pri kritičnoj vlažnosti materijala  $y_k$ , tada je koeficijent smjera pravca  $a = v_c/y_k$ , pa izraz (37) poprima oblik

$$t = \frac{m_{sm}y_k}{A v_c} \ln \frac{v_c}{v_2}. \quad (39)$$

Također se može postaviti da je  $v_c/v_2 = y_k/y_2$ , pa je trajanje sušenja s opadajućom brzinom

$$t = \frac{m_{sm}y_k}{A v_c} \ln \frac{y_k}{y_2}, \quad (40)$$

a brzina sušenja (pri nekoj vlažnosti materijala  $y$ ):

$$v = v_c \frac{y}{y_k}. \quad (41)$$

**Opis sušenja u sušioniku.** U sušionik se dovodi vlažni materijal (sl. 9a) s masenim protokom  $\dot{m}_m + \dot{m}_v$  i s temperaturom  $T_{m1}$ , gdje je  $\dot{m}_v$  maseni protok one vlage koja se uklanja iz materijala sušenjem. U  $\dot{m}_v$  nije, dakle, uključena ona vlaga koja i nakon sušenja zaostaje u materijalu, nego je ona sadržana u masenom protoku osušenog materijala  $\dot{m}_m$ . Nakon sušenja iz sušionika izlazi osušeni materijal s protokom  $\dot{m}_m$  i s temperaturom  $T_{m2}$ . Kao sredstvo za sušenje služi zrak masenog protoka  $\dot{m}_z$ , stanja definirane vlažnosti  $x_1$ , temperature  $T_1$  i specifične entalpije  $h_1$  (točka 1 na sl. 9a). Zrak napušta sušionik preuzimajući dio vlage iz materijala, pri čemu mu vlažnost raste do vrijednosti  $x_2$ , a temperatura i entalpija mu se mijenjaju do vrijednosti  $T_2$  i  $h_2$  (točka 2). Količina vode koju u danim uvjetima može prihvatiti suhi zrak definirana je izrazom

$$\dot{m}_v = \dot{m}_z(x_2 - x_1). \quad (42)$$

Sušiti se može bez utroška topline upotrebom velikih količina zraka. Međutim, češće se, da bi sušenje bilo brže, u

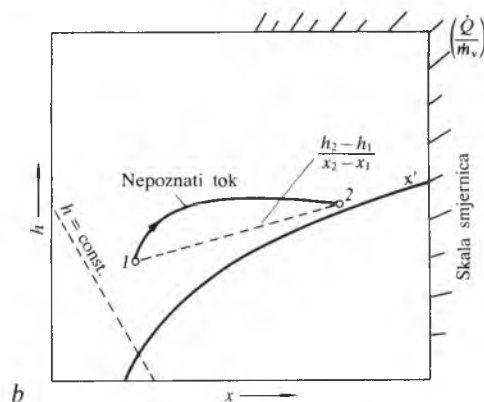
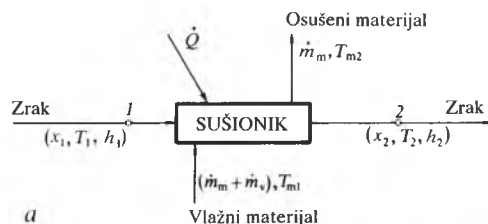
sušionik dovodi i toplina, pa je bilanca topline:

$$\dot{Q} = \dot{m}_z(h_2 - h_1) + \dot{m}_m c_m(T_{m2} - T_{m1}) - \dot{m}_v c_v T_{m1}, \quad (43)$$

gdje je  $\dot{Q}$  toplinski tok,  $c_m$  specifični toplinski kapacitet osušenog materijala, a  $c_v$  specifični toplinski kapacitet vode. Količina topline koja se troši na ishlapljivanje 1 kg vode može se odrediti, uzevši u obzir izraz (42), dijeljenjem izraza (43) sa  $\dot{m}_v$  pa se dobiva:

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_v} = \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1} + \frac{\dot{m}_m}{\dot{m}_v} c_m(T_{m2} - T_{m1}) - c_v T_{m1}. \quad (44)$$

Drugi i treći član desne strane izraza odnose se na toplinu zagrijavanja materijala i entalpiju unesene vlage. Općenito su ti članovi brojčano vrlo maleni pa se najčešće zanemaruju.



Sl. 9. Protočno sušenje nezagrijanim zrakom. a tok materijala, vlage i zraka, b prikaz u  $h, x$ -dijagramu

U toku sušenja stanje se zraka mijenja, pa se iz poznatog stanja zraka na ulazu u sušionik (točka 1) i konačnog stanja zraka na izlazu iz sušionika (točka 2) može pomoću  $h, x$ -dijagrama (sl. 9b) odrediti specifični utrošak zraka ( $\dot{m}_z/\dot{m}_v$ ) i topline ( $\dot{Q}/\dot{m}_v$ ), tj. utrošak za 1 kg vode uklonjene iz vlažnog materijala. Naime, točka 2 udaljena je od točke 1 u smjeru

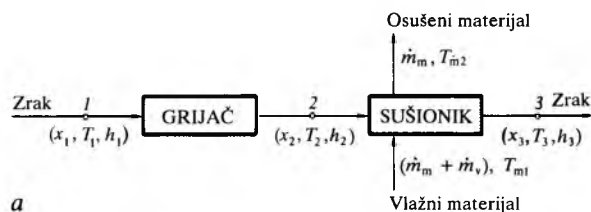
$$\frac{dh}{dx} = \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1} \approx \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_v}, \quad (45)$$

a smjer se može odrediti pomoću skale smjernica ( $\dot{Q}/\dot{m}_v$ ) na desnoj strani  $h, x$ -dijagrama. Treba, dakle, na skali naći vrijednost smjernice koja je paralelna s dužinom 12. Što je ta dužina položitija, manji je specifični utrošak topline. Također, što je točka 2 smještena više nadesno, specifični će utrošak zraka, u skladu s izrazom (42), biti manji. Vlažni se materijal može sušiti sve dok se zrak ne zasiti vlagom, što znači da točka 2 treba biti iznad linije zasićenja.

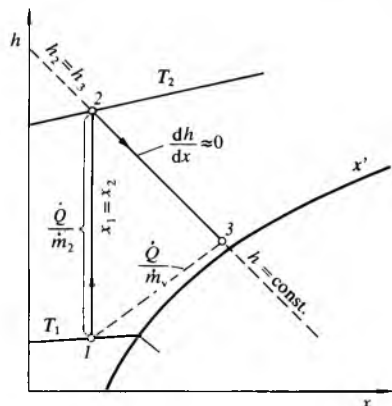
Toplina se u sušionik najčešće dovodi zagrijanim zrakom koji ujedno služi i za odvođenje vlage. Zrak se prvo zagrije u grijaču od temperature  $T_1$  do temperature  $T_2$ , dok mu vlažnost ostaje konstantnom,  $x_1 = x_2$  (sl. 10a). Stanje se zraka u sušioniku mijenja prema jednadžbi (44) od točke 2 do točke 3 u smjeru

$$\frac{h_3 - h_2}{x_3 - x_2} = - \frac{\dot{m}_m}{\dot{m}_v} c_m(T_{m2} - T_{m1}) + c_v T_{m1} \approx 0, \quad (46)$$

tako da točke 2 i 3 leže približno na istoj liniji,  $h_2 = h_3 = \text{const.}$  (sl. 10b). Ukupno potrebna toplina, koja uključuje i onu u grijaču, računa se s obzirom na polazno (točka 1) i konačno



a



b

Sl. 10. Protočno sušenje zagrijanim zrakom. a tok materijala, vlage i zraka, b prikaz u  $h, x$ -dijagramu

prelazi u zrak, pa se zraku vlažnost povećava od  $x_3$  na  $x_4$ , a temperatura snizuje od  $T_3$  na  $T_4$ .

Nakon sušenja samo se mali dio zraka s masenim protokom  $\dot{m}_{z1}$  ispušta u okoliš, dok se pretežan dio zraka s protokom  $\dot{m}_{z2} = \dot{m}_z - \dot{m}_{z1}$  ponovno miješa sa svježim zrakom protoka  $\dot{m}_{zs}$ , koji je jednak protoku zraka ispuštenog u okoliš,  $\dot{m}_{zs} = \dot{m}_{z1}$ . Tako se dobiva smjesa svježeg i optočnog zraka s protokom  $\dot{m}_z = \dot{m}_{z2} + \dot{m}_{zs}$  u točki 2. Točka 2 nalazi se na dužini miješanja  $I4$  i dijeli je u omjeru prikazanom na sl. 11b. Utrošak topline ovisi o stanju zraka na ulazu i izlazu sušionika, tj. o smjeru spojnice  $I4$ .

Prilikom sušenja treba osigurati dovođenje svježeg zraka s masenim protokom

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{m}_v}{x_4 - x_1}, \quad (48)$$

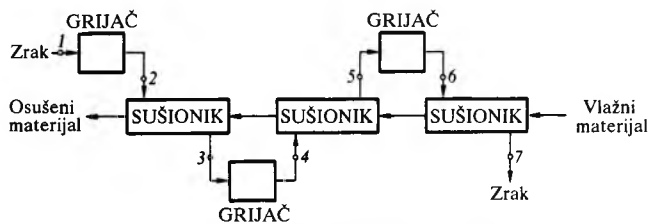
pa je ukupni protok zraka u sušioniku

$$\dot{m}_z = \frac{\dot{m}_v}{x_4 - x_2}. \quad (49)$$

S obzirom na klimatske uvjete, stanje se svježeg zraka na ulazu u sušionik stalno mijenja. Međutim, jednaka se svojstva zraka na ulazu u sušionik mogu postići prema pravilu miješanja regulacijom protoka optočnog zraka pomoću zasuna i regulacijom zagrijavanja zraka u grijaču.

**Višestupanjsko sušenje.** Izlaganje se osjetljivih materijala višim temperaturama u toku sušenja izbjegava primjenom višestupanjskog sušenja. Time se ujedno smanjuje i potreban maseni protok zraka te utrošak energije.

Višestupanjsko sušenje najčešće je protusmjerno (sl. 12). Materijal se suši do neke dopustive temperature  $T$  na ulazu u pojedine stupnjeve sušionika određene stanjem zraka u točkama 2, 4 i 6. Na izlazu iz pojedinih stupnjeva sušionika stanje zraka definirano je točkama 3, 5 i 7 koje leže na linijama  $h = \text{const}$ . Točke 3, 5 i 7 to su bliže liniji zasićenja što je veća površina ishlapljivanja i bolji koeficijent ishlapljivanja, a površina manje higroskopna. Udaljenost tih točaka od linije zasićenja ovisi o raspodjeli materijala u sušioniku te o načinu strujanja i vođenja zraka.



Sl. 12. Višestupanjsko protusmjerno sušenje

Ukupni je specifični utrošak topline

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_v} = \frac{h_7 - h_1}{x_7 - x_1}, \quad (50)$$

a određen je ulaznim i izlaznim stanjem zraka bez obzira na njegova međustanja.

### UREĐAJI ZA SUŠENJE

U industrijskoj se praksi upotrebljava mnogo različitih tipova sušionika. Oni se prema načinu dovođenja topline svrstavaju na sušionike s izravnim ili s neizravnim grijanjem, na one koji upotrebljavaju topli zrak, koji drugi plin ili vodenu paru, prema uzajamnom toku vlažnog materijala i sredstva za sušenje na istosmjerne i protusmjerne, prema radnom tlaku na one koji rade sa sniženim, atmosferskim tlakom ili povišenim tlakom, te prema načinu rada na šaržne i kontinuirane itd.

#### Sušionici s izravnim grijanjem

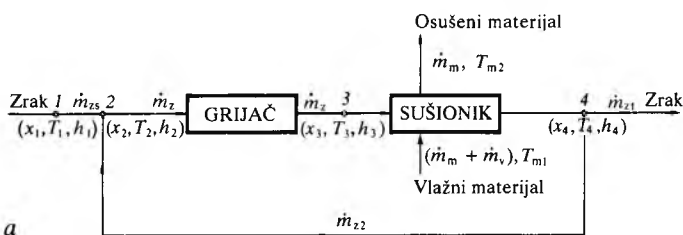
Bitno je obilježje sušionika s izravnim grijanjem da se kao nosilac topline za grijanje materijala upotrebljava topli zrak ili koji drugi plin, pa je konvekcija glavni mehanizam

stanje zraka (točka 3), bez obzira na međustanje definirano točkom 2. Zato je ukupno potrebna toplina

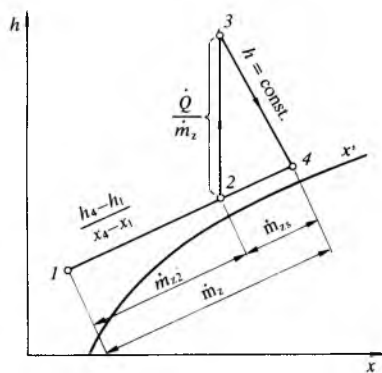
$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_v} \approx \frac{h_3 - h_1}{x_3 - x_1}, \quad (47)$$

pa je to smjer spojnice točkaka 1 i 3.

**Optočno (kružno) sušenje.** U praksi je, posebno pri sušenju osjetljivih materijala, često potrebno sušenje jednoličnom brzinom, neovisno o promjenama temperature i vlažnosti okolnog zraka. To se postiže izborom prikladnog režima sušenja (sl. 11a). Svježi zrak (točka 1) miješa se u točki 2 s dijelom zraka već iskorištenog za sušenje. Ta se smjesa dogrijava u grijaču, a vlažnost zraka ostaje konstantnom,  $x_2 = x_3$  (sl. 11b). Toplina se u sušionik, kao i prilikom protočnog sušenja, dovodi samo zrakom, tako da točke 3 i 4 leže na istoj liniji,  $h_3 = h_4 = \text{const}$ . Dio vlage iz materijala



a



b

Sl. 11. Optočno (kružno) sušenje. a tok materijala, vlage i zraka, b prikaz u  $h, x$ -dijagramu

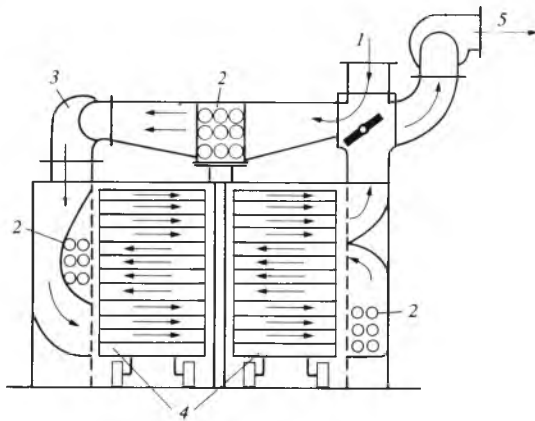
dovođenja topline. Zrak ili drugi plin ujedno odnosi i paru izašlu iz materijala. Sušionici s izravnim grijanjem mogu se prema kontaktu između vlažnog materijala i plina za sušenje svrstati na sušionike za sušenje materijala u kompaktnom i u dispergiranom stanju.

U kompaktnom stanju suše se komadni i sipki materijali nasuti u nešto debljem sloju. Plinoviti se nosilac topline giba iznad vlažnog materijala ili kroz njega, a površina međusobnog kontakta je dosta malena. Za takvo se sušenje navedenih vrsta materijala može primijeniti komorni sušionik s pladnjevima i s propuhivanjem, tunelni sušionik, sušionik s pokretnom trakom i protočni sušionik.

U dispergiranom stanju suše se disperzivni (praškasti, zrnati, granulirani) i dispergirani materijali (suspencije, paste). Između plinovitog nosioca topline i materijala stvara se vrlo prisnan kontakt na velikoj površini. U toj su skupini sušionici s raspršivanjem, s pneumatskim transportom i s fluidiziranim slojem, a mogu im se pribrojiti i neke vrste rotacijskih sušionika, u kojima se kontakt s plinovitim nosiocem topline pospješuje prevrtanjem i kaskadiranjem materijala.

Sušionici s izravnim grijanjem razlikuju se i po svojim radnim ciklusima. Šaržni su uglavnom samo komorni i njima slični sušionici, a rijetko se šaržno suši u fluidiziranom sloju. Svi ostali sušionici s izravnim grijanjem rade kontinuirano.

**Komorni sušionik.** To je najjednostavniji tip sušionika. On može biti građen kao komora s okvirima na koje se ručno stavlja pladnjevi s mokrim materijalom (sl. 13). Pladnjeva je obično 10-20, a upotrebljavaju se pri sušenju zrnatih, muljevutih i kapljevutih materijala. I komadni se masivni materijali, npr. drvo i keramika, mogu sušiti u tim sušionicima složeni na okvire.



Sl. 13. Komorni sušionik s pladnjevima. 1 ulaz zraka, 2 grijači, 3 ventilator, 4 vagoneti s pladnjevima, 5 izlaz zraka

Drugi tip komornog sušionika nema okvira za pladnjeve nego se u njega uvode kolica s već natovarenim pladnjevima. Takvi sušionici služe i za sušenje materijala u obliku filmova (nekih tekstilnih materijala i kožnih proizvoda) obješenih na uređaju za vješanje. Prednost je komornih sušionika što se proces može lako voditi i jednostavno kontrolirati. Glavni im je nedostatak što su pladnjevi različito udaljeni od mjesta ulaska zraka, pa sušenje nije jednolično. U nekim je sušionicima taj nedostatak uklonjen uređajima za obrtanje struje zraka.

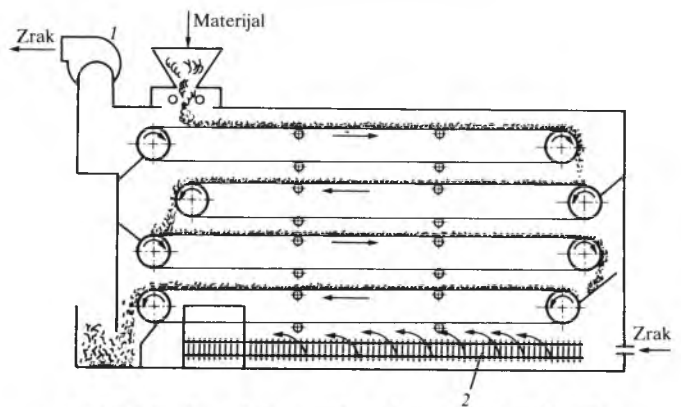
Za grijanje zraka služe plinski ili električni grijači. Potrošak energije glavni je trošak sušenja u komornim sušionicima, pa je ušteda energije najvažnija za racionalno vođenje tog procesa. Zbog toga se obično recirkulira dio zraka kojim se suši. Tada se postiže veća zasićenost ispušnog zraka vodom i njegovo bolje iskorištenje za sušenje.

**Komorni sušionik s propuhivanjem** također je sušionik s pladnjevima, samo što pladnjevi imaju rešetkasto dno, propusno za zrak. Osim toga, u takvu se sušioniku nalaze i uređaji za usmjeravanje struje zraka za jednokratni prolaz kroz sloj mokrog materijala. Zbog toga je, pri istim dimenzi-

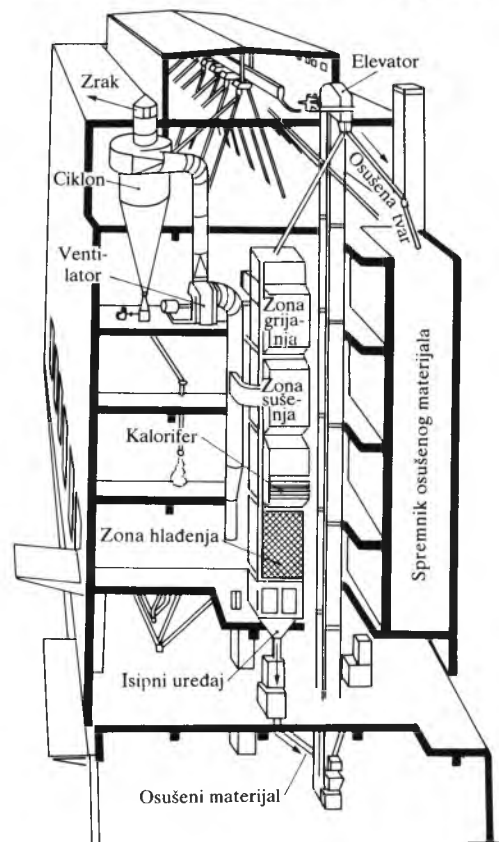
jama, broj pladnjeva manji nego u drugim sušionicima, ali je brzina sušenja veća zbog veće dodirne površine. Građe se i silosni te silosima slični sušionici s propuhivanjem. Manji se takvi sušionici upotrebljavaju, npr., za sušenje eksploziva, a vrlo veliki za sušenje žitarica.

**Tunelni sušionik** sličan je komornom, ali je dulji, a kroz njega se po tračnicama gibaju kolica s pladnjevima ili s obješenim materijalom. Kolica putuju sa zastojem ili bez zastoja. Zrak u tunelu može strujati u smjeru putovanja kolica, suprotno od toga ili okomito na taj smjer, a grije se grijačima i djelomično recirkulira. Pri upotrebi pladnjeva s propusnim dnom materijal se suši propuhivanjem, a struja zraka usmjeruje se tako da redom prolazi kroz pojedina kolica i svaki se put prije toga dogrijava.

**Sušionik s pokretnom trakom** (konvejski sušionik). U tom se sušioniku materijal suši na pokretnoj traci na koju se postavlja izravno ili u pladnjevima. Kroz sušionik struji zagrijani zrak, a brzina se trake tako namjesti da se materijal potpuno osuši neposredno prije izlaska iz sušionika. Iako postoje različite konstrukcije takvih sušionika, prevladavaju oni s više pokretnih traka postavljenih jedne nad drugima (sl.

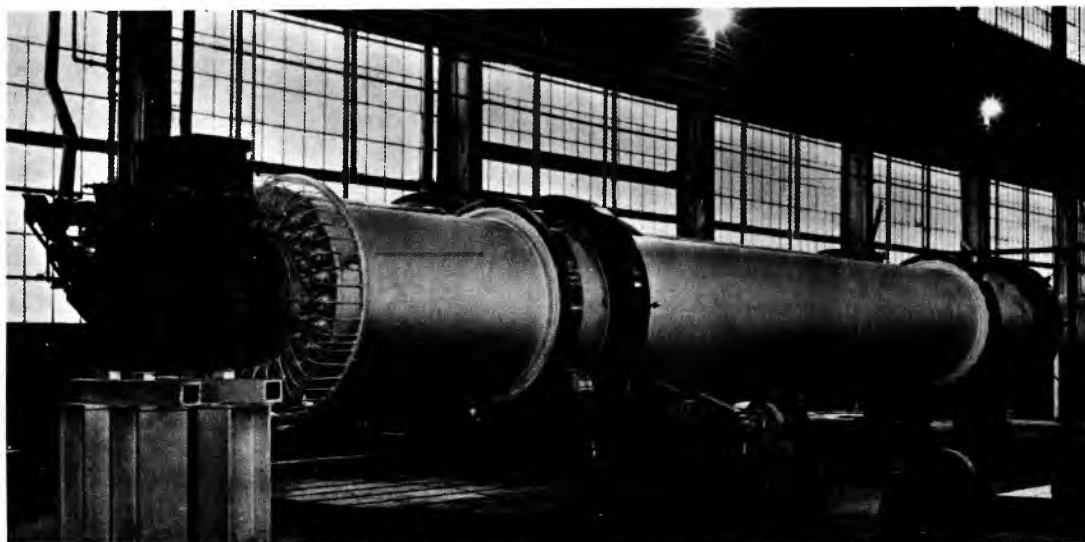


Sl. 14. Sušionik s pokretnom trakom. 1 ventilator, 2 grijač zraka

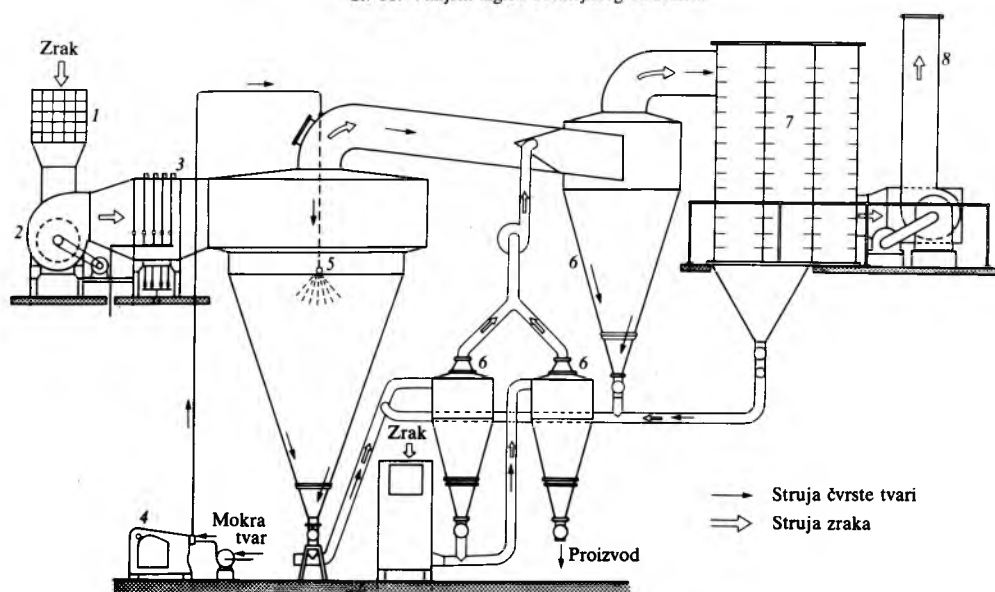


Sl. 15. Protočni sušionik





Sl. 16. Vanjski izgled rotacijskog sušionika



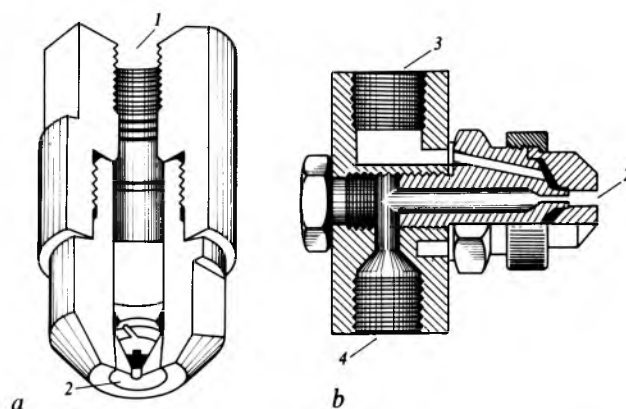
Sl. 17. Sušionik s raspršivanjem. 1 filter za zrak, 2 ventilator, 3 grijač zraka, 4 visokotlačna pumpa, 5 raspršivač, 6 cikloni za izdvajanje proizvoda, 7 filter, 8 ispuh zraka

14). Materijal pada s viših traka na niže i pritom se prevrće, pa se brže i ravnomjernije suši.

**Protočni sušionik** se najviše upotrebljava za sušenje žitarica i sjemenki uljarica. Zrnati se materijal ubacuje na vrhu kroz usipni lijevak, a na svom putovanju prema dnu prolazi kroz zonu neizravnog zagrijavanja, zatim kroz zonu sušenja, u kojoj se kroz postrane rešetke propuhuje zagrijani zrak, te konačno kroz zonu hlađenja s propuhivanjem hladnog zraka (sl. 15). Otvor ispusta na dnu uskladi se s količinom materijala koja ulazi za sušenje tako da sušionik bude uvijek pun.

**Rotacijski sušionik** vrlo je sličan rotacijskoj reakcijskoj peći (v. *Reakcijske peći*, TE 11, str. 491). Materijal putuje kroz nagnuti valjak koji se polako okreće, a u suprotnom se smjeru propuhuje topli zrak (sl. 16). U valjku se nalaze pregrade za prevrtanje materijala koje pospešuju sušenje. Takvi se sušionici upotrebljavaju za sušenje zrnatog materijala, npr. raznih sjemenki i žitarica.

**Sušionik s raspršivanjem** služi za sušenje otopina i suspenzija iz kojih se izdvaja čvrst proizvod. Takvo se sušenje primjenjuje, npr., u proizvodnji krvne plazme, detergenata, pigmenta, farmaceutskih i prehrambenih proizvoda (mlijeko i jaja u prahu, koncentrat kave, dječja hrana) kad je važno da proizvod bude sitnozrnate ili praškaste strukture radi lakog



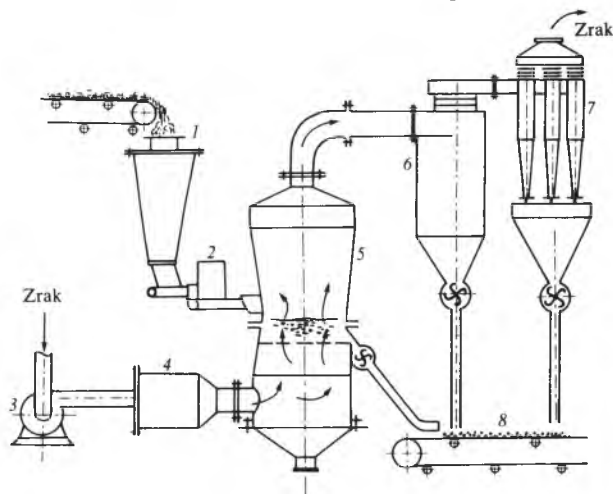
Sl. 18. Sapnice sušionika s raspršivanjem. a tlačna, b pneumatska sapnica; 1 ulaz kapljevina pod tlakom, 2 izlaz raspršene kapljevine, 3 ulaz stlačenog zraka, 4 ulaz kapljevine

otapanja. Kapljevina se raspršuje u vrlo sitne kapljice (s promjerom 20...600  $\mu\text{m}$ ). Time joj se silno poveća površina (sl. 17), pa se u dodiru s vrućim zrakom ili drugim plinom osuši vrlo brzo, za 15...40 sekundi.

Najvažniji je dio sušionika uređaj za raspršivanje (atomizator), koji može biti u obliku sapnice ili rotirajućeg diska. Razlikuju se tlačne i pneumatske sapnice (sl. 18). U tlačnima se kapljevina pod tlakom vrtložno giba, a na izlazu se iz sapnice oblikuje stožast mlaz kapljica. Prednost je tih sapnica njihova mala dimenzija i jednostavna konstrukcija. Mogu se upotrijebiti do tlaka od 7 MPa i za protok oko 40 m<sup>3</sup>/h. U pneumatskim se sapnicama kapljevina raspršuje stlačenim zrakom, a kapacitet im je manji od kapaciteta tlačnih sapnica. Opći je nedostatak sapnica njihova sklonost začepljivanju i trošenju čvrstim sastojcima u kapljevini.

Rotirajući diskovi (centrifugalni atomizatori) upotrebljavaju se za raspršivanje viskoznih kapljevina, suspenzija i pasta. Jaka centrifugalna sila odbacuje ulazni materijal prema otvorima na obodu diska, gdje se raspršuje u sitne kapljice. Promjer je diskova 5...40 cm, brzina vrtnje i do 15000 min<sup>-1</sup>. Za raspršivanje diskovima troši se mnogo više energije nego za raspršivanje sapnicama.

**Sušionik s pneumatskim transportom** upotrebljava se za sušenje rastresitih materijala koji se uređajem za doziranje, npr. pužnicom, ubacuju u struju vrućeg zraka ili kojega drugog plina. Brzina strujanja zraka mora biti dosta velika (10...30 m/s), tako da bude dovoljna za transport materijala kroz okomite cijevi visoke i do 20 m. Osnovna je odlika tih sušionika kratkotrajan ali prisan dodir materijala s vrućim zrakom (nekoliko sekundi), pa se zato može sušiti i na visokim temperaturama (i do 750 °C), mnogo višim od temperatura termičkog raspada mnogih materijala. U tim se sušionicima suše uglavnom zrnati i granulirani materijali s dimenzijama do 10 mm (npr. granulirane smole, ugljeni prah).



Sl. 19. Sušionik s fluidiziranim slojem. 1 usipni lijevjak, 2 uređaj za doziranje, 3 ventilator, 4 grijač, 5 komora s fluidiziranim slojem, 6 ciklon, 7 filtri, 8 transporter osušenog materijala

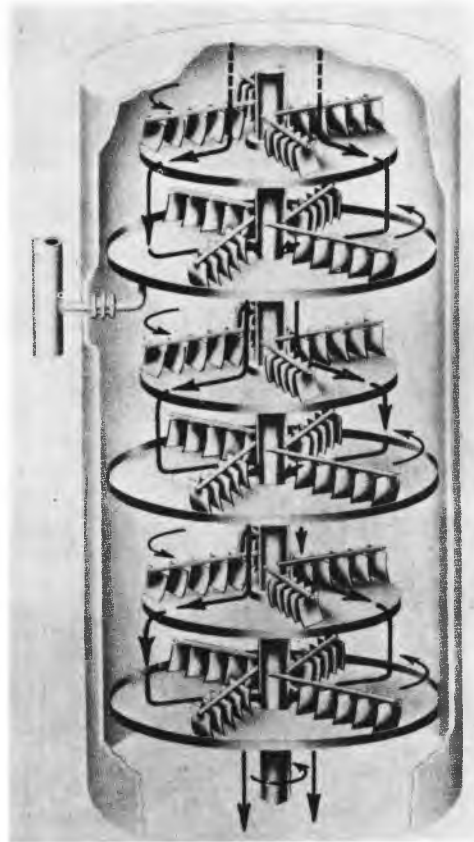
**Sušionik s fluidiziranim slojem** (sl. 19) vrlo je prikladan za sušenje sitnozrnatih čvrstih i pastastih materijala kakvi su npr., granulirani polimerni materijali i farmaceutski proizvodi. Sušionik je sličan reakcijskim pećima s fluidiziranim slojem (v. *Reakcijske peći*, TE 11, str. 494). Takvi sušionici omogućuju jednoličan i vrlo prisn kontakt materijala i zagrijanog zraka ili drugog plina za sušenje (v. *Fluidizacija*, TE 5, str. 487) te brzu izmjenu topline; malih su dimenzija i nemaju pokretnih dijelova. Njihov je kapacitet vrlo velik (i do 100 t/h). Loša im je strana što se ne mogu upotrebljavati za sušenje materijala s česticama prevelikih dimenzija i gustoće te ako su skloni aglomeriranju.

#### Sušionici s neizravnim grijanjem

U tim se sušionicima materijal zagrijava neizravno, kondukcijom topline kroz vruću čvrstu stijenku (kontaktne sušionici: tanjurasti sušionik, sušionik s transporterom, s bubnjevima, cilindarski i rotacijski sušionik), zatim dielektričnim zagrijavanjem ili prijenosom topline elektromagnetskim

zračenjem. Navedeni sušionici rade uglavnom pod atmosferskim tlakom, većinom kontinuirano. Izdvojena skupina sušionika s neizravnim, kontaktnim grijanjem jesu vakuumski sušionici koji rade šaržno. Oni su komorni ili rotacijski, a među njih se ubraja i poseban vakuumski sušionik za sušenje smrzanjem i sublimacijom.

**Tanjurasti sušionik.** Granulirani i zrnati materijal suši se na velikim okruglim pločama (tanjurima) različitih promjera. Materijal se grabljama pomiče i pada s jednog tanjura na drugi (sl. 20). Sušiti se može u struji toplog zraka, ali je tanjurasti sušionik posebno vrijedan kad se materijal suši na grijanim tanjurima. Tako materijal može, ako je potrebno, prolaziti kroz područja različitih temperatura, pa donji tanjuri mogu služiti čak i za hlađenje.



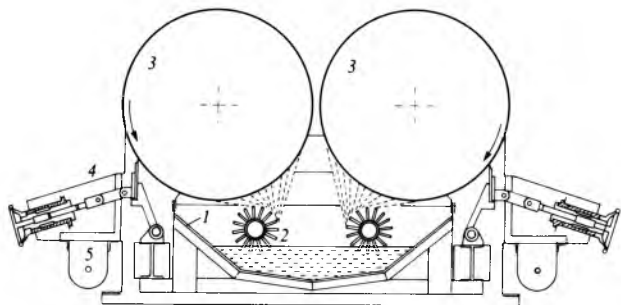
Sl. 20. Tanjurasti sušionik

**Sušionik s transporterom.** To je najčešće sušionik s pužnicom za sušenje zrnatih materijala. Najjednostavniji je sušionik s pužnicom u otvorenu zagrijanom koritu. Ponekad se zagrijava i pužnica. Češći su sušionici s pužnicom u zatvorenu ogrjevnom plaštu. Oni mogu raditi i pod sniženim tlakom, što je prikladno za sušenje kad se treba rekuperirati otapalo.

Poznat je i *sušionik s vibrirajućim pločama* unutar zagrijanog plašta po kojima se giba mokar materijal za vrijeme sušenja. Pare se odsivaju kroz napu iznad ploča, a za postizanje većeg učinka sušionici mogu nad pločama imati ugrađene i izvore infracrvenog zračenja.

**Sušionik s bubnjevima.** Ta vrsta sušionika služi za sušenje kapljeviti i pastastih tvari, i to takvih od kojih se sušenjem dobivaju čestice koje nisu tvrde i oštre, pa je sušenje organskih tvari glavno područje njegove primjene.

Sušionik se obično sastoji od dva šuplja bubnja (rjeđe od jednoga) kojima se unutrašnjost zagrijava vodenom parom ili, za više temperature, vrućim uljem. Bubnjevi se polako okreću s filmom mokre tvari na svojoj vanjskoj površini, a mogu biti funkcijski ovisni ili neovisni. Ako su funkcijski ovisni, pune se odozgo, vrte se, gledano s mjesta na kojem su najbliži, prema dolje, a toliko su blizu da se između njih mokar materijal zadržava kao u lijevku. Nasuprot tome,



Sl. 21. Sušionik s funkcijama neovisnim bubnjima. 1 posuda s mokrom tvari, 2 raspršivač, 3 bubanj, 4 uređaj za skidanje suhe tvari noževima za struganje, 5 transporter suhe tvari

funkcijski neovisni bubnjevi (sl. 21) uronjeni su u posudu s mokrim materijalom, ili se on na njih štrca raspršivačima. Bubnjevi se vrte u međusobno suprotnom smjeru i dovoljno su razmaknuti, pa sušenje na jednom bubnju nema utjecaja na sušenje na drugome. Pomoću noževa za struganje osušeni se proizvod skida s bubnja u obliku filma, ljustica, pahulja ili praha.

Sušionik s bubnjima zatvoren u zabrtvljeno kućište upotrebljava se i za sušenje pod sniženim tlakom.

**Cilindarski sušionik.** Za sušenje materijala u obliku koherentnih traka, u prvom redu tekstilnog materijala, upotrebljavaju se cilindarski sušionici. U sušioniku s vrućim zrakom ili vodenom parom materijal se zagrijava izravno, dok se neizravno, prijenosom topline kondukcijom, materijal zagrijava u dodiru sa zagrijanom površinom metalnih valjaka (v. *Apertura*, TE 1, str. 318).

**Rotacijski sušionik s neizravnim grijanjem.** Plašt najjednostavnijega takva sušionika zagrijava se izvana prilikom rotacije u ložišnoj komori. Složeniji sušionici imaju dva koaksijalna valjka, od kojih vanjski služi za sušenje, a unutrašnji za grijanje vrućim plinovima. Česti su i rotacijski sušionici s grijalica od jednoga ili više snopova cijevi za struganje vrućih plinova ili vodene pare.

**Vakuumski sušionik** može biti građen u obliku komore priključene na uređaj za stvaranje podtlaka, s policama dvostrukih stijenki za mokri materijal i njegovo grijanje. Police se griju različitim prenosivima topline, obično strujom vruće vode ili vodene pare. Materijal se unosi u sušionik i vadi iz njega ručno. Sušenje u komornim vakuumskim sušionicima s policama dosta je polagano, pa se primjenjuje uglavnom za sušenje malih šarži lijekova i finih kemikalija te temperaturno osjetljivih ili lako oksidabilnih tvari.

Osim komornih vakuumskih sušionika, vakuumski sušionici mogu biti i u obliku velikog valjka u kojemu materijal

ne miruje, već se miješa rotacionim mješalima ili prevrće uređajem za prevrtanje (sl. 22). Sušionik je priključen na uređaj za stvaranje podtlaka, a zagrijava se strujom vodene pare kroz plašt dvostrukih stijenki. Vakuumski sušionici posebno su prikladni za sušenje tvari iz kojih se uklanjaju organska otapala, jer se ona mogu lako hvatati.

**Sušionik za sušenje sublimacijom.** Sušenje tvari sublimacijom posebna je vrsta vakuumskog sušenja koje se naziva i sušenje smrzanjem ili liofilizacija. Vlažni se materijal suši u smrznutom stanju pri temperaturi  $\sim -30^\circ\text{C}$  i pri sniženom tlaku ( $\sim 10^{-2}$  bar), tako da se vlaga smrznuta kao led uklanja sublimacijom (v. *Sublimacija*). Prednost su sušenja sublimacijom niske temperature pri kojima se materijal kemijski i biološki uglavnom ne mijenja, a uz to je moguć i rad u sterilnim uvjetima. Nedostatak je takva sušenja složenost tehničke aparature, što njegovu primjenu ograničuju na sušenje vrijednih i skupih namirnica te na sušenje specijalnih spojeva i proizvoda, npr. bioloških i farmaceutskih. (Više o opisu aparature i načinu rada v. *Konzerviranje hrane*, TE 7, str. 278).

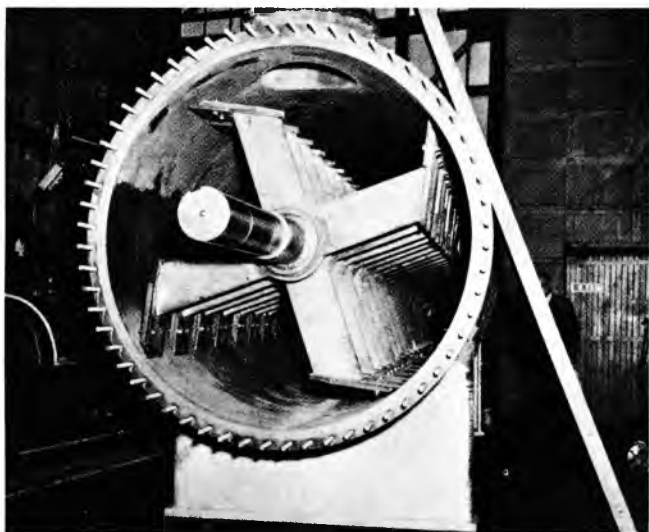
**Sušionik s infracrvenim zračenjem.** To je tip sušionika s neizravnim grijanjem jer se energija potrebna za zagrijavanje prenosi elektromagnetskim zračenjem, koje se tek apsorpcijom u materijalu pretvara u toplinu. Pretežan se dio tog zračenja nalazi u infracrvenom spektralnom području (v. *Elektrotermija*, TE 5, str. 185; v. *Grijanje*, TE 6, str. 281). Sušionik s infracrvenim zračenjem najprikladniji je za sušenje površina i tankih slojeva, pa se upotrebljava za sušenje tekstila (v. *Apertura*, TE 1, str. 319), papira i naliča od lakova i boja (v. *Lakovi i boje*, TE 7, str. 457).

**Sušionik s dielektričnim zagrijavanjem.** Poznato je da se neki vodiči i izolatori mogu zagrijavati ako se nalaze između kondenzatorskih ploča povezanih s generatorom visokih frekvencija. Zagrijavanje se temelji na pojavi da se molekule s permanentnim dipolom pobuđuju na titranje u visokofrekventnom električnom polju, a primljena energija elektromagnetskog zračenja prelazi u toplinu (v. *Elektrotermija*, TE 5, str. 191).

Dielektrično se zagrijavanje najviše primjenjuje upravo za sušenje. Prednost mu je što se materijal zagrijava mnogo više na vlažnim nego na suhim mjestima zbog visoke relativne dielektričnosti vode. Zato se, npr., unutrašnjost drveta može sušiti brže od površinskog dijela, čime se izbjegava njegovo savijanje i pucanje. Dielektrično je zagrijavanje skupo pa se primjenjuje uglavnom samo za sušenje plemenita drva, skupih vrsta papira, većih keramičkih predmeta, namirnica osjetljivih prema povišenoj temperaturi i sl.

LIT.: F. Bošnjaković, *Nauka o toplini*. Tehnička knjiga, Zagreb 1976. – R. B. Keey, *Introduction to Industrial Drying Operations*. Pergamon Press, Oxford 1978. – A. S. Foust, L. A. Wenzel, C. W. Clump, L. Maus, L. B. Andersen, *Principles of Unit Operations*. John Wiley & Sons, New York-London 1980. – W. R. A. Vauck, H. A. Müller, *Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1988. – B. И. Муштаев, В. М. Ульянов, *Сушка дисперсных материалов*. Химия, Москва 1988.

B. Tripalo Ž. Viličić



Sl. 22. Unutrašnjost rotacijskog vakuumskog sušionika s uređajem za prevrtanje i noževima za struganje materijala

**SVEMIRSKJE LETJELICE**, svemirski, upravljivi brodovi s ljudskom posadom kojima je zadatak da prenesu čovjeka na druga nebeska tijela (u prvom redu na Mjesec) i da postave u putanju oko Zemlje umjetne Zemljine satelite, s tim da se mogu više puta lansirati sa Zemlje (svemirske letjelice u užem smislu).

**Američki svemirski program Apollo.** Glavni je zadatak toga programa čovjekov let na Mjesec, spuštanje na njegovu površinu i povratak na Zemlju. Program je započeo 1961, s tim da se do kraja toga desetljeća taj pothvat izvede pod nazivom *Apollo*. Za njegovo je izvršenje projektirana raketa nosilica *Saturn V* i svemirski brod *Apollo* mase 43,8 t. Brod