

ISPARAVANJE PRI SUŠENJU MLEKA RASPRŠAVANJEM

Prof. dr. Svetozar STANIŠIĆ, Milan MEDOJEVIĆ, dipl. inž.,
Tehnološki fakultet, Novi Sad

S a ž e t a k

U ovom radu autori obrađuju dinamiku isparavanja vode pri sušenju mleka isparavanjem. U radu su date i računске formule za proračun sušara raspršivača sa diskovima, mehaničkim i pneumatičkim mlaznikom. Pri proračunu dimenzija sušara pošlo se od postavke da visinu komore za sušenje određuju kapljice najvećih dimenzija i da je količina toplote koju preuzima jedinica mase u jedinici vremena jednaka za male i velike kapljice.

Uvod

Već duži niz godina proizvodnja mleka u prahu u svetu neprekidno se povećava. Danas se mleko u prahu sem za proizvodnju raznih prehrambenih proizvoda koristi i za izradu raznih mešavina za jelo. Pretpostavlja se da će u budućnosti brzo rastvorljivo mleko u prahu uspešno zamenjivati sveže mleko osobito u toku jeseni i zime (Knipsehildt, 1969).

Danas se dobar deo mleka suši na dvovaljcima za sušenje ili se suši raspršavanjem. Kvalitet mleka u prahu kod toga je različit. Mleko u prahu dobiveno sušenjem na dvovaljcima za sušenje uglavnom se upotrebljava pri proizvodnji čokolade, kobasica i proizvoda dečije hrane. I pored nekih svojih prednosti u odnosu na mleko u prahu dobiveno u sušarama raspršivačima ovo je mleko manje rastvorljivo od mleka u prahu dobivenog u sušarama raspršivačima (Bubich, 1972).

Osnovni polazni materijal za sušenje u tvornicama za sušenje mleka su punomasno mleko, obrano mleko i surutka.

Za pojevtinjenje proizvodnje mleka u prahu od posebnog je značaja ugušćivanje mleka pre sušenja. Udaljavanje dela vode pre sušenja u višestepenim isparnim stanicama znatnije pojevtinjuje troškove proizvodnje jer se na udaljavanje 1 kg vode iz mleka troši i do 10 puta manje pare nego kod sušenja raspršavanjem (Cook, 1976).

Osnovni preduslov uspešnog sušenja raspršavanjem je postizanje finog i ravnomernog raspršavanja mleka. Pritisak potreban za raspršavanje u mehaničkim ili pneumatičkim mlaznicima, ili obodna brzina u centrifugalnim raspršivačima s diskovima zavisi od fizičkih svojstava mleka koje se raspršava, dimenzija kapljice koja se treba dobiti raspršavanjem, načina uvođenja vazduha u komoru za sušenje kao i od njenih dimenzija. Od ukupne količine energije koja se troši na raspršavanje oko 1% troši se na nastajanje kapljica (površinska energija kapljice), 3—4% na trenje u mlazniku, a sva preostala energija predaje se kapljici kao kinetička energija (Stanišić, 1978).

Eksperimentalno je utvrđeno da se kapljica vode prečnika 60 μ otkida od diska koji ima obimnu brzinu 151 m/s i da dostiže konačnu brzinu za vreme od 0,1 s na radijalnom putu dužine 0,451 m (Masters, 1968).

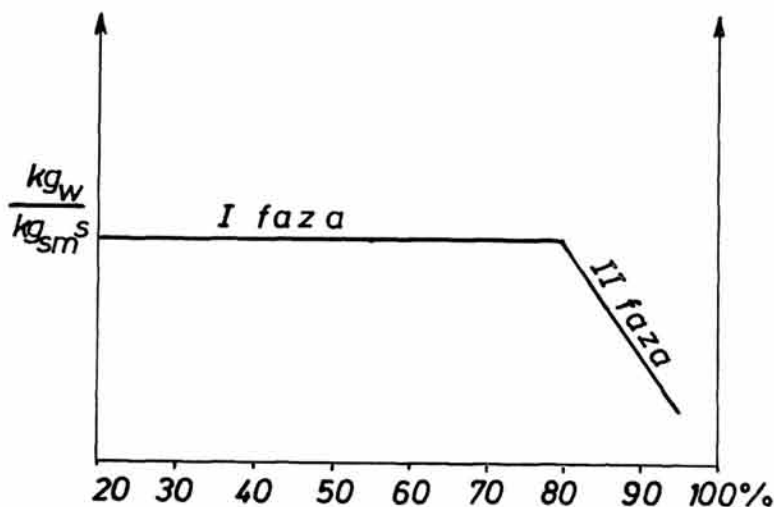
Pri izboru konstrukcije uređaja za raspršavanje prednost treba dati raspršivačima koji daju što ujednačenije dimenzije kapljica. Za sušare u kojima se

dobivaju ujednačene kapljice moguće je napraviti tačniji proračun sušare i izbeći pregrevanje sitnijih čestica. Uređaj za raspršavanje treba osim toga da kapljice što ravnomernije raspodeli po čitavom poprečnom preseku komore za sušenje (Entwistle, 1976).

Isparavanje vode raspršavanjem mleka u struji toplog vazduha

Cilj je raspršavanje mleka u sitne kapljice povećanje površina dodira između agensa za sušenje (toplog vazduha ili smeše vazduha i sagorevnih gasova) i mleka kako bi se sušenje mleka moglo obaviti za što kraće vreme. Prečnik kapljica mleka pri sušenju raspršavanjem obično iznosi oko $50 \mu\text{k}$ tako da površina kapljica koja se dobije iz 1 litra mleka iznosi oko 120 m^2 (Krupina, 1974). Učin sušara raspršivača u mnogome zavisi od prečnika kapljice koja nastaje raspršavanjem jer količina isparene vode u jedinici vremena direktno je srazmerna površini isparavanja.

Sušenje mleka raspršavanjem u struji vrućeg vazduha može se podeliti u dve faze (sl. 1). U prvoj fazi udaljava se iz mleka slobodna voda a u drugoj fazi vezana voda. Pod pojmom slobodna voda podrazumeva se voda čiji je napon para približno jednak naponu para vode nad slobodnom površinom vode uz uslov da su temperature mleka i vode jednake.



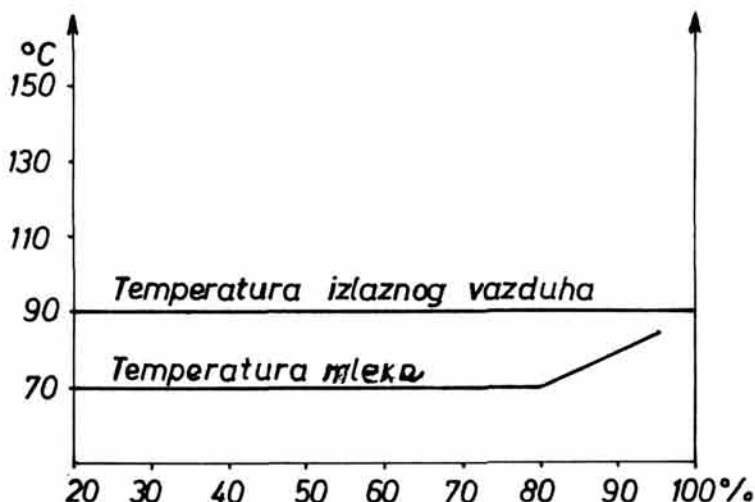
Sl. 1 — Faze sušenja

U prvoj fazi sušenja temperatura kapljica mleka jednaka je temperaturi vlažnog termometra. Pri sušenju vazduhom temperature oko 150°C temperatura kapljica mleka u zoni raspršavanja ne prelazi $70\text{--}75^\circ\text{C}$ jer je to temperatura vlažnog termometra za vazduh stanja koji obično dolazi u dodir s kapljicama mleka. Ta temperatura pri kratkotrajnom dodiru ne utiče negativno na kvalitet mleka u prahu. U zoni raspršavanja udaljava se praktično sva slobodna voda. Međutim, u toj zoni mleko se ne suši do ravnoteže vlažnosti. U toku daljnijeg sušenja udaljava se vezana voda pri čemu se temperatura kapljice mleka povećava do 85°C . Ova faza nastaje za vreme taloženja kapljice mleka. U fazi

predsušenja temperatura kapljica mleka se izjednačava sa temperaturom vlažnog termometra.

Ukoliko se mleko uvodi u raspršivač s nižom temperaturom od temperature vlažnog termometra u fazi predsušenja njegova se temperatura povećava do temperature vlažnog termometra. Ako je temperatura mleka na izlazu i raspršivača veća od temperature vlažnog termometra njegova temperatura u fazi predsušenja se smanjuje do temperature vlažnog termometra, kod čega se toplota hlađenja troši na delimično isparavanje vode iz mleka (Dlonhy, 1970).

Temperatura vazduha u zoni raspršavanja smanjuje se na 75 do 90°C i s tom temperaturom obično napušta sušaru (sl. 2). Iako se za sušenje raspršava njem troši manje toplotne energije nego na sušenje drugog komadnog materijala ipak je sušenje raspršavanjem relativno skup proces (Patsavas, 1973).



Sl. 2 — Promena temperature

Toplotni koeficijent korisnog delovanja sušare je relativno mali a izražava se kao odnos razlike temperature ulaznog t_u i izlaznog t_i vazduha i temperatur ulaznog t_u i okolnog vazduha (Canvin, 1970).

$$\eta = \frac{t_u - t_i}{t_u - t_o}$$

Tabela 1

temperatura ulaznog vazduha t_u °C	temperatura izlaznog vazduha t_i °C	temperatura okolnog vazduha °C	toplotni koeficijent korisnog delovanja η
130	80	20	0,455
135	80	20	0,478
140	80	20	0,500
145	80	20	0,520
150	80	20	0,538
155	80	20	0,555
160	80	20	0,571

Iz tabele br. 1 je vidljivo da se s povećanjem temperature ulaznog vazduha povećava koeficijent korisnog delovanja sušare. Međutim, velike mogućnosti povećanja koeficijenta korisnog delovanja povećanjem temperature ne postoje jer suviše velika temperatura sušenja mleka može negativno uticati na kvalitet dobivenog proizvoda.

Pri određivanju dinamike sušenja u sušarama raspršivačima pošlo se od sledećih pretpostavki:

- količina toplote koju u jedinici vremena predaje vazдушna struja kapljicama u komori za sušenje proračunava se za kapljicu najvećeg prečnika;
- odnos maksimalnog i srednjeg prečnika kapljice različit je za različite uređaje za raspršavanje;
- veličina Nu — broja kod sušenja raspršavanjem iznosi dva;
- uslovi sušenja uključujući i temperaturu vazduha jednaki su po čitavom obimu komore za sušenje;
- voda isparava s površine kapljice;
- kapljica predstavlja zasićeni rastvor;
- pokretačka sila sušenja jednaka je razlici između temperature izlaznog gasa i temperature kapljice;
- prečnik kapljice se u toku sušenja ne menja;
- u toku sušenja kapljica ne dodiruje bočne zidove plašta komore za sušenje.

Dinamika sušenja raspršavanjem

Fiktivna brzina kretanja mlaza w (u smeru osi sušare) nakon izlaza iz pneumatičnog mlaznika zbog trenja o vazдушnu struju se smanjuje. Smanjenje fiktivne brzine raspršene tečnosti od trenutka napuštanja mlaznika, na putu x (razmak od mlaznika), pri prečniku mlaza na mestu isticanja d_m i brzini isticanja w_m može se prikazati jednačinom (Hoffman, 1968).

$$w = K w_m \left(\frac{d_m}{x} \right) \text{ (m/s)} \quad (1)$$

Vrednost koeficijenta K zavisi od tipa mlaznika i brzine isticanja. Pri brzini isticanja iz pneumatičnog mlaznika od 300 m/s vrednost $K = 6,2$.

Smanjenje fiktivne brzine tečne struje tokom vremena Θ može se prikazati jednačinom:

$$W = \frac{d x}{d \Theta} \text{ (m/s)} \quad (2)$$

Iz jednačina (1) i (2) pri brzini isticanja $w_m = 300$ m/s sledi da se promena fiktivne brzine tečne struje u smeru osi sušare može prikazati jednačinom:

$$\frac{d x}{d \Theta} = 6,2 w_m \left(\frac{d_m}{x} \right) \quad (3)$$

Integriranjem jednačine (3) dobije se ukupno vreme padanja raspršene kapljice na putu x_0 koji je jednak efektivnoj visini sušare:

$$\Theta = \frac{x_0^2}{12,4 w_m d_m} \text{ (s)} \quad (4)$$

Zapremina valjkaste komore prečnika d_k i visine x_0 jednaka je:

$$V = \frac{\pi d_k^2 x_0}{4} \text{ (m}^3\text{)} \quad (5)$$

Pri odnosu visine i prečnika komore $x_0 \approx 4 d_k$ dobije se da je zapremina valjkaste komore:

$$V = \frac{\pi x_0^3}{64} \text{ (m}^3\text{)} \quad (6)$$

Iz prethodne jednačine dobije se da je:

$$x_0^2 = \left(\frac{64}{\pi} \right)^{2/3} V^{2/3} \quad (7)$$

Iz jednačine (4) i (7) sledi da se vreme padanja kapljice može prikazati u obliku:

$$\Theta = \frac{64^{2/3}}{\pi} \frac{V^{2/3}}{12,4 w_m d_m} \text{ (s)} \quad (8)$$

Kroz pneumatički mlaznik protiče smeša tečne i gasovite faze pa je maseni protok jednak zbiru masenih protoka mleka m_t i masenog protoka vazduha m_v .

$$m_t + m_v = \frac{w_m \pi d_m^2 \varrho_m}{4} \text{ (kg/s)} \quad (9)$$

gde je ϱ_m (kg/m³) — gustina struje na izlazu iz mlaznika.

Uzimajući u obzir ubrzanje, koje se predaje tečnosti strujom vazduha predpostavljajući da zapremina tečnosti neznatno menja zapreminu struje dobije se jednačina vremena taloženja kapljice.

$$\Theta = 1,48 \times 10^{-4} V^{2/3} \sqrt{\left(\frac{\varrho_v}{m_v w_v} \right) \left(\frac{m_v + m_t}{m_t} \right)} \text{ (s)} \quad (10)$$

gde je ϱ_v (kg/m³) — gustina vazduha sa kojim se raspršava w_v (m/s) — brzina vazduha sa kojim se raspršava.

Količina toplote koju u jedinici vremena preuzima kapljica najvećeg prečnika (d_{max}) od vazduha sa kojim se suši može se prikazati jednačinom:

$$\frac{dQ'}{d\Theta} = \alpha A \Delta t = 2 \pi \lambda d_{max} \Delta t \quad \text{(W)} \quad (11)$$

gde je α (W/m²K) — koeficijent preloga toplote, A (m²) — površina kapljice Δt (°C) — razlika temperatura između vazduha sa kojim se suši i površina kapljice, λ (W/mK) — koeficijent toplotne provodljivosti sloja vazduha oko kapljice

Količina toplote koju u jedinici vremena preuzima jedinica mase kapljice najvećeg prečnika od vazduha sa kojim se suši može se prikazati jednačinom:

$$\frac{dq}{d\Theta} = \frac{12 \pi \lambda d_{\max} \Delta t}{\rho_t d_{\max}^3} = \frac{12 \lambda \Delta t}{\rho_t d_{\max}^2} \quad (\text{W/kg}) \quad (12)$$

gde je ρ_t (kg/m^3) — gustina mleka koja se raspršava. Integriranjem jednačine (12) uz pretpostavku da se tokom sušenja prečnik kapljice ne menja dobija se:

$$q = \frac{12 \lambda \Delta t}{\rho_t d_{\max}^2} \Theta_{\max} \quad (\text{J/kg}) \quad (13)$$

Količina toplote koju u jedinici vremena preuzima od vazduha s kojim se suši jedinica mase manjih i većih kapljica je jednaka pa je:

$$Q = \frac{dq}{d\Theta} = q' m_t \quad (\text{W}) \quad (14)$$

Iz jednačina 13 i 14 dobija se da je:

$$Q = \frac{12 \lambda \Delta t m_t \Theta_{\max}}{\rho_t d_{\max}^2} \quad (\text{W}) \quad (15)$$

Usvajajući da je $\Theta = \Theta_{\max}$ i uvrštavanjem vrednosti iz jednačine (10) u jednačinu (15) dobija se maksimalna brzina razmene toplote, koja se može ostvariti pri uslovima da se manje kapljice isušuju od trenutka nastanka do trenutka taloženja na zid komore za sušenje:

$$Q = \frac{6,38 \lambda V^{2/3} \Delta t}{d_{\max}^2} \frac{m_t}{\rho_t} \sqrt{\left(\frac{\rho_v}{m_v w_v}\right)} \left(\frac{m_v + m_t}{m_t}\right) \quad (\text{W}) \quad (16)$$

Dinamika sušenja u sušari s mehaničkim raspršivanjem

Za sušare u kojima se tečnost raspršava pomoću mehaničkih mlaznika tražakotorija tečne struje, nakon izlaza iz mlaznika izračunava se pomoću merenja struje vazduha, koji dovodi u kretanje struju tečnosti koja ističe iz mlaznika.

Obradom podataka dobijenih ogledom dobijen je izraz za određivanje faktora osne brzine strujanja vazduha w (Hoffman, 1968).

$$W = W_t K \left(\frac{d_m}{x}\right) \quad (\text{m/s}) \quad (17)$$

kod čega je koeficijent $K = 3,2$.

Vreme potrebno da tečna raspršena struja pređe put jednak četvorostrukom prečniku komore za sušenje može se odrediti iz jednačine:

$$\Theta = \left(\frac{64}{\pi}\right)^{2/3} \frac{V^{2/3}}{6,4 w_m d_m} \quad (18)$$

S obzirom da su početna brzina tečnosti i fiktivna brzina gasne faze jednake, tada su masene brzine struja jednake zbog čega je:

$$d_m = d_0 \left(\frac{\rho_t}{\rho_v} \right)^{1/2} \quad (19)$$

gde su ρ_t i ρ_v (kg/m³) — gustina tečnosti i izlaznog vazduha.

Maksimalna brzina predaje toplote od vazdušne struje na raspršenu tečnost pri uslovima u kojima se kapljice najvećih dimenzija dovoljno isušuju može se odrediti iz jednačina:

$$Q = \frac{10,98 \lambda V^{2/3} \Delta t}{d_{\max}^2} d_0 \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_t}} (W) \quad (20)$$

Dinamika sušenja u sušarama s centrifugalnim raspršivačem

Putanja raspršene tečne faze određivana je na isti način kao i kod sušara s mehaničkim mlaznikom. Obradom podataka dobijenih ogledom dobijena je računska jednačina za određivanje fiktivne osne brzine struje vazduha (Hoffman, 1968).

$$W = K w_t \left[\left(\frac{Y}{r_k - r_d} \right) \left(\frac{r_d}{r_k} \right) \right]^{1/2} \quad (m/s) \quad (21)$$

gde je vrednost $K = 1,2$. Pri postavljanju jednačine (21) pošlo se od pretpostavke jednakosti brzine tečnosti, koja predstavlja vektorsku sumu radijalne i tangencionalne komponente, i fiktivne brzine struje vazduha širine Y (m) kod čega je:

$$Y = \frac{m_t}{\sqrt{2} (2\pi r)^2 n \rho_v} \quad (m) \quad (22)$$

U jednačini (22) jen (s^{-1}) — broj obrtaja, m_t (kg/s) — masena brzina tečne struje, r (m) — poluprečnik diska i r_k (m) — poluprečnik komore.

Za fiktivnu osnu brzinu struje vazduha u sušarama s centrifugalnim raspršivačem valjana je relacija

$$V = \frac{dr_k}{d\Theta} \quad (m/s) \quad (23)$$

Iz jednačine 21 i 23 sledi da je:

$$\frac{dr_k}{d\Theta} = 1,2 w_t \frac{(Yr)^{1/2}}{(r_k - r) r_k^{1/2}} \quad (24)$$

Jednačina (24) može se prikazati u obliku

$$1,2 w_t (Yr)^{1/2} d\Theta = [(r_k - r) r_k]^{1/2} dr_k \quad (25)$$

Integriranjem jednačina (25) u granicama $\Theta = 0$ do $\Theta =$ vremenu taloženja kapljice i u granicama $r_k = r$ do $r_k =$ poluprečnik komore dobije se za $r_k = 5r$ vreme taloženja kapljice:

$$\Theta = \frac{(r_k - 0,5r)^2}{2,4 w_t (Yr)^{0,5}} \text{ (s)} \quad (26)$$

Uvrštenjem vrednosti Y iz jednačine (22) u jednačinu (26) i $w_y = \sqrt{2} 2\pi r n$, dobija se jednačina za određivanje brzine predaje toplote od vazdušne struje na raspršenu tečnost

$$Q = \frac{4,19 \lambda (r_k - 0,5 r)^2 \Delta t}{d_{\max}^2 Q_t} \sqrt{\frac{m_t Q_v}{r n}} \quad (27)$$

Zaključak

Pri proračunu sušara u kojima se mleko raspršava u struji toplog vazduha moguće je poći od pretpostavke da je količina toplote koju jedinica mase kapljica preuzima od struje toplog vazduha sa kojim se suši jednaka bez obzira na dimenzije kapljice. Odnos prečnika kapljice maksimalnih i srednjih dimenzija različit je za različite uređaje za raspršavanje pri čemu se polazi od stanovišta da potrebnu visinu kamare za sušenje određuje kapljica najveće dimenzije.

Toplotni koeficijent korisnog delovanja sušare je relativno mali. Povećanje toplotnog koeficijenta korisnog delovanja sušare moguće je povećanjem temperature ulaznog vazduha. Ta je mogućnost ograničena zbog štetnog delovanja visokih temperatura na kvalitet gotovog proizvoda.

Summary

The authors describe dynamics of water evaporation at milk spray drying. The amount of heat absorbed by milk droplets does not depend of their dimensions. Increase of heat coefficient is possible with increase of inlet air temperature. But this possibility is limited due to damaging effect of high temperatures on product quality.

Literatura

1. BUBICH, W.: Techniczne problemy produkcji mleka w proszku. Prz. mlecz. 1972, 21, No 8, 8—13
2. COOK, M.: Estimating spray drying costs. Chem. Engng. Progr. 1976, 62, No 6, 93—97
3. DLONHY, J.: Evaporation rates in spray drying, Canad. J. Chem. Engng. 1970, 38, No 4, 113—120
4. ENTWISTLE, E.: Spray drying. Food Engng. 1976, 38, No 2, 82—83, 85—86
5. GAUVIN, T.: Probleme bei der Berechnung von Zerstäubertürmen. Chem. Techn. 1970, 12, No 4, 196—199
6. HOFFMAN, D., EMERY, A.: Thermal diffusion for liquids, in Columbus, A. J. Ch. E Journal, 1968, 9 No 5, 563—695
7. KNIPSCHILD, E.: Recent development in milk drying techniques. J. Soc. Dairy Technol. 1969, 22, No 4, 201—213
8. KRUPINA, G.: Tehnologičeskoe oborudovanie predpriyatij maločnoj promišlennosti, Mašinstroenie, Moskva, 1974. g.
9. MASTERS, K.: A study of centrifugal atomisation and spray drying. Brit. Chem. Engng. 1968, 13, No 2, 242—244
10. PATSAVAS, C.: The spray dryer, Chem. Engng. Progr. 1973, 59, No 4, 54—70
11. STANIŠIĆ, S.: Mehaničke operacije, Tehnološki fakultet, Novi Sad, 1978.