

SUŠENJE

- Sušenje je tehnološka operacija kojom se dio vode iz krute tvari uklanja ishlapljivanjem
- Voda s površine tvari ishlapljuje, čime se smanjuje vlažnost površine tvari i radi nastale razlike koncentracije, voda difundira iz unutrašnjosti prema površini tvari

- Koliko vode u jedinici vremena ishlapi s površine tvari ovisi uglavnom:
 - o stanju i brzini strujanja zraka nad površinom
 - te o obliku veze između tvari i vode
- Za difuziju je vode prema površini tvari odlučna je:
 - struktura tvari, te
 - kapilarne pojave i
 - brzina difuzije pare

- Budući da je voda u krutoj tvari vezana kapilarnim silama, **tlak je vodene pare iznad krute tvari MANJI nego tlak vodene pare nad površinom vode kod iste temp.**
- Vodu u krutoj tvari dijelimo na:
 - Slobodnu i
 - Vezanu vlagu
- Pod pojmom *slobodne* vlage je voda koja ima *beznačajno mali* tlak vodene pare u odnosu na tlak pare nad površinom vode kod iste temp.

- Pod pojmom *vezane* vlage je voda koja ima *mali tlak* vodene pare u odnosu na tlak pare nad površinom vode kod iste temp.
- Tako da se teško može povući oštra linija granice između slobodne i vezane vlage
- Kod sušenja prvo ishlapi voda iz krupnijih, a zatim iz sitnijih kapilara
- Sušenje se često prekida u trenutku početka ishlapljivanja vezane vode

- Strujanje vode iz unutrašnjosti prema površini tvari nastaje na tri načina:
 - Uslijed kapilarnog efekta
 - Difuzijom vodene pare kroz šire kapilare i kapilarnom kondenzacijom
- *Kapilarna se kondenzacija* sastoji u tome da voda u nekom mjestu u tvari ishlapi, zatim kroz kapilaru difundira da bi ponovo kondenzirala u nekom užem dijelu kapilare ili na mjestu niže temp.

- *Nejednolika* temperatura u tvari kao i složenost procesa sušenja kod nestručnog rada uzrokuje deformacije i pucanje proizvoda
- To dolazi radi visoke temperature ili male vlažnosti zraka sušenja koja brzo opada, pa voda iz unutrašnjosti ne dopijeva u dovoljnoj količini na površinu tvari
- U tom se slučaju na površini tvari često stvara pokorica koja otežava difuziju

ADIJABATSKO SUŠENJE

- Pod adijabatskim se sušenjem podrazumijeva sušenje kod koga je entalpija i_1 zraka na ulazu u sušaru jednaka entalpiji i_2 zraka na izlasku iz sušare
- Sušenje se općenito provodi tako da se nad vlažnu tvar u sušari određenom brzinom puše nezasićeni topli zrak koji je prethodno zagrijan
- Kod toga vodu koja ishlapljuje iz tvari preuzima zrak

- Istovremeno se u sušaru uvodi G (kg_z/s) zraka stanja 1, a iz sušare izlazi zrak stanja 2.
- Količina vode W koja ishlapi iz tvari:
 $W = G (x_2 - x_1)$ (kg_v/s)
- Količina topline Q koju je u jedinici vremena potrebno dovesti u kalorifer:
 $Q = G (i_2 - i_1)$ (W)

- Specifični utrošak topline q tj. količina topline koja se troši za ishlapljivanje 1 kg vode je:

$$q = \frac{i_2 - i_1}{x_2 - x_1} \text{ [J / kg}_v\text{]}$$

- Bez obzira da li je poznato kako se mijenja stanje zraka, dovoljno je znati stanje 1 zraka na ulazu u sušaru i stanje 2 zraka na izlasku iz sušare – odredi se **specifični utrošak zraka**

- Iz jednadžbe za izračun količine vode uz poznatu **vlažnost zraka na ulazu** u sušaru i **specifično opterećenje zraka** može odrediti **vlažnost zraka na izlasku** iz sušare:

$$x_2 = \frac{W}{G} + x_1 \left[\frac{\text{kg}_v}{\text{kg}_z} \right]$$

STEPENASTO SUŠENJE

- Ako tvar koja se suši ne podnosi visoku temperaturu, sušenje se obavlja tako da se zrak u sušari dogrijava više puta
- Dok u tvari koja se suši ima slobodne vlage, temperatura površine tvari teži **temperaturi granice hlađenja** zraka u sušari
- Dijelovi površine tvari iz kojih je ishlapila slobodna vlaga teže **temperaturi zraka** pa može nastati zagorijevanje tvari

- Princip stepenastog sušenja sastoji se u dogrijavanju zraka u sušari u više kalorifera koji su smješteni u sušari
- Tako se može regulirati temperatura zraka u svakoj fazi sušenja
- Utrošak topline kod ovog načina sušenja je manji nego kod jednokratnog grijanja zraka

OPTOČNO SUŠENJE

- Kod većine prehrambenih proizvoda osjetljivost na povišenje temperature se javlja u drugoj fazi sušenja
- Dinamiku ishlapljivanja s površine tvari treba u tom slučaju uskladiti s dinamikom prispjeća vode iz unutrašnjosti prema površini tvari
- U protivnom dolazi do nastajanje pokorice koja otežava difuziju vode iz unutrašnjosti prema površini tvari

- Da bi se u sušaru uvodio zrak uvijek istog stanja preporučljivo je dio zraka koji izlazi iz sušare uvoditi u sušaru
- Na taj način se može izbjeći loš utjecaj promjene stanja svježeg zraka

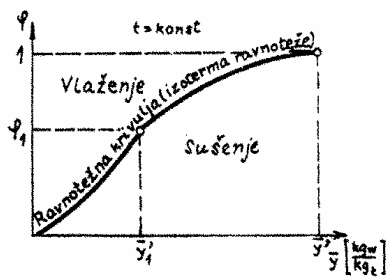
FAZE SUŠENJA

- Kod sušenja se razlikuje:
 - Predsušenje
 - Sušenje (I faza sušenja)
 - Dосуšivanje (II faza sušenja)
- U fazi predsušenja koja inače traje kratko vrijeme tvar se grije do temperature granice hlađenja (temp. mokrog termometra)
- U fazi sušenja iz tvari ishlapljuje slobodna vlaga dok je temp. tvari jednaka temp. granice hlađenja

- U fazi dosušivanja iz tvari ishlapljuje vezana vlaga
- Temp. tvari pri dosušivanju počinje rasti jer raste tlak pare vezane vlage
- Tvar u ovoj fazi poprima temp. **higroskopne granice hlađenja** koja je veća nego temp. granice hlađenja kod ishlapljivanja slobodne vlage jer ima manji tlak pare
- Do pucanja i deformacije tvari može doći i u fazi dosušivanja i hlađenja nakon sušenja
- Radi toga brzinu sušenja u fazi dosušivanja treba pažljivo regulirati:
 - Stanje i
 - Brzinu strujanja zraka
 - Brzinu hlađenja tvari

RAVNOTEŽA KOD SUŠENJA

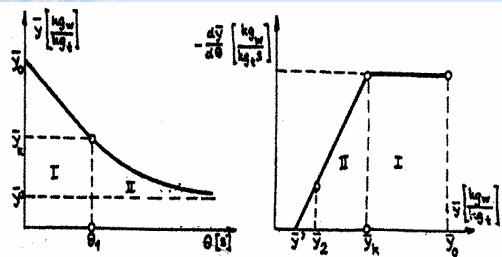
- Između vlažnosti zraka bilo kog stanja i vlažnosti tvari postoji određena ovisnost
- Ova se ovisnost pregledno može prikazati na ρ, γ dijagramu gdje je ρ – relativna vlažnost, a γ kg vode na 1 kg suhe tvari u nekoj tvari
- Vlažnost se tvari γ_1 kod relativne vlažnosti ρ_1 zove higroskopna vlažnost



Krivulja (izoterma) ravnoteže kod sušenja

BRZINA SUŠENJA

- Mjernje se mase tvari za vrijeme sušenja u određenim vremenskim razmacima može dobiti linija ovisnosti vlažnosti y tvari o vremenu sušenja
- Na y, Θ – dijagramu se mogu jasno uočiti I i II faza sušenja
- U I fazi sušenja linija ovisnosti vlažnosti y tvari o vremenu Θ sušenja u y, Θ – dijagramu **pravac**
- Nakon što se vlažnost tvari smanji na kritičnu vrijednost y_k , vlažnost tvari se počinje sporije smanjivati i postepeno se približava ravnotežnoj vlažnosti x
- Između vlažnosti zraka bilo kog stanja i vlažnosti tvari postoji određena ovisnost



Promjena vlažnosti tvari kod sušenja i brzina sušenja u različitim fazama

- Brzina se sušenja kad je vrijednost koeficijenta difuzije D mala može povećati samo povećanjem temp. tvari (i temp. zraka)
- Tada se povećava i koeficijent difuzije D
- Sama brzina difuzije D se ne može znatnije povećati povećanjem protoka zraka jer osnovni otpor čini kruta faza

PROMJENA PARAMETARA ZRAKA I TVARI KOD ADIJABATSKOG SUŠENJA

- Bilanca vode dijela sušare kod prolaza kroz sušaru u jedinici vremena m_t (kg_v/s) suhe tvari i G (kg_z/s) je:

$$m_t (y - y_1) = G (x - x_1) (kg_v/s)$$

- Promjena temp. t i vlažnosti x zraka u sušari pri adijabatskom sušenju može odrediti iz temp. t_1 na ulazu u sušaru i vlažnosti x_1 zraka na ulazu u sušaru

- Kod protustrujnog sušenja zrak temp. t_1 i vlažnosti x_1 ulazi nad tvar koja se nalazi u II fazi sušenja, a zatim nastrojava nad tvar koja se nalazi u I fazi sušenja
- Iz jednačbe pogonske linije se može odrediti vlažnost zraka x_0 na izlazu iz sušare za potrebnu konačnu vlažnost tvari y_2
- Razlika je u tome što se kod istosmjernog sušenja svježiji zrak uvodi u sušaru nad vlažnu tvar, a izvodi iz sušare na mjestu gdje se nalazi osušena tvar

SUŠENJE SUBLIMACIJOM

- **Sušenje** tvari **u zaleđenom stanju** kod čega voda iz stanja leda **direktno prelazi u paru** naziva se sušenje sublimacijom
- Prelaz pare u kruto stanje naziva se **desublimacija**, a **pseudosublimacija** je isparavanje tekućine s prelazom pare u kruto stanje
- Pod pojmom sublimacije se podrazumijeva i isparavanje krute tvari uz prelaz pare u kruto stanje

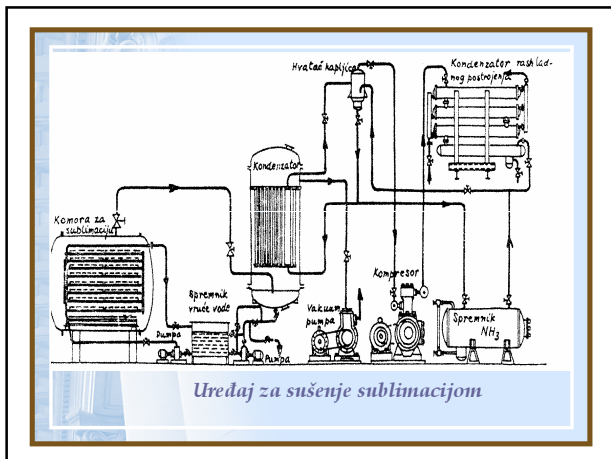
- Kod sublimacije se parna faza sastoji iz hlapive komponente iz krute tvari i vrlo male količine plinske komponente
- Kod provedbe sublimacije pod vakuumom je tlak pare krute faze manji od atmosferskog
- **Točkom sublimacije tvari** se naziva temperatura kod koje je tlak para krute tvari faze jednak ukupnom tlaku plinske faze
- Sublimacija se koristi i kao fizikalna metoda razdvajanja smjese na sastavne dijelove

- Sušenje sublimacijom je specifična metoda sublimacije kada voda koja se nalazi u krutom stanju direktno prelazi u paru
- Ako je tlak zasićenja pare nad krutom tvari (ledom) znatno manji od atmosferskog, sušenje se onda provodi kod znatnog podtlaka
- Voda se u krutoj tvari čitavo vrijeme nalazi obično u obliku otopine ili je u vezanom stanju
- Za održavanje vode u obliku leda treba je hladiti i od -10°C do -40°C

- Sušenje sublimacijom se koristi kada drugi oblici sušenja nisu svrsishodni jer je ova metoda sušenja skupa
- Kod ovog sušenja se zamrznuta tvar ne skuplja već je porozna
- To je razlog brze rehidracije u vodi, a kod niske temp. se sačuvaju prirodni miris i okus
- **Smanjuju** se kemijske promjene u tvari, gubitak hlapivih komponenti i stupanj koagulacije i povećanje kiselosti tvari

- Ako je kontakt između tvari koja se suši dobar, sušenje se provodi kondukcijom, a kod lošeg kontakta zračenjem
- Maksimalna temperatura ogrijevnog medija ne smije biti veća od temperature taljenja leda
- Obično se ukloni i do 95% vode za 80% vremena, dok se u preostalim 20% vremena ukloni ostalih 5% vode
- Ovom metodom se mogu sušiti tvari osjetljive na visoke temperature

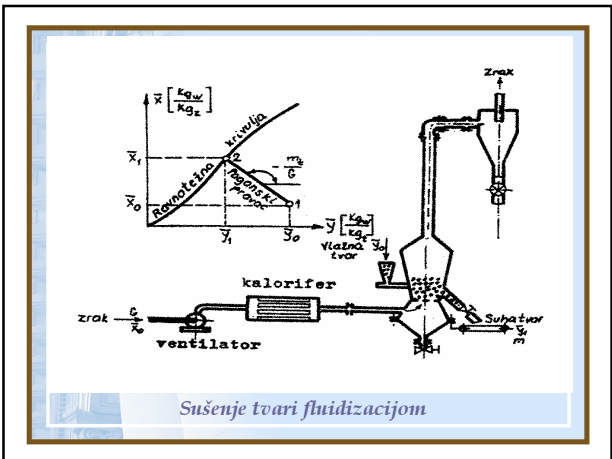
- Kod dubokog vakuuma nastaje hlađenje tvari radi intenzivnog isparavanja vode
- Ako iz tvari koja se suši odlazi više topline nego što dolazi, tvar se zamrzava
- Zato treba tvar prethodno zamrznuti u posebnim uređajima ili vakuum komori
- Vakuum komore se grade od stakla ili metala unutar kojeg je izveden poseban način hlađenja u obliku zmijače
- Svi dijelovi trebaju dobro brtviti da se izbjegne svaki oblik ulaska zraka u komoru



SUŠENJE FLUIDIZACIJOM

- kod sušenja fluidizacijom se tvar uslijed intenzivnog miješanja sa zrakom ravnomjerno suši kod čega je učin sušenja u jedinici vremena po jedinici površine velik
- Tvar se u sušaru uvodi kroz usipni lijevak dozatorom
- Zrak se u sušaru tlači ventilatorom kroz kalorifer i perforiranu rešetku na kojoj se nalazi tvar za sušenje
- U ovom tipu sušare se ravnoteža vlažnosti zraka i osušene tvari postiže na izlazu

- Za bilo koju se vlažnost zraka x u sušari može odrediti ravnotežna vlažnost tvari y u x, y – dijagramu
- Tada dobijemo ravnotežnu krivulju (krivulja adijabate)
- Točka 2 presjeka pogonskog pravca i ravnotežne krivulje odgovara konačnom stanju sušenja (zraka i tvari)



TIPOVI SUŠARA

- Do sada nije usvojena opća podjela sušara, jer se sušare međusobno razlikuju po više karakterističnim osobinama:
 - Načinu dovođenja topline (*konvektivne i kontaktne*)
 - Vrsti ogrijevnog medija (*zrak, plin, para*)
 - Veličini tlaka (*atmosferske i vakuum*)
 - Provedbi sušenja (*kontinuirane i diskontinuirane*)
 - Uzajamnom smjeru strujanja zraka i tvari (*istosmjerne, protusmjerne i unakrsne*)

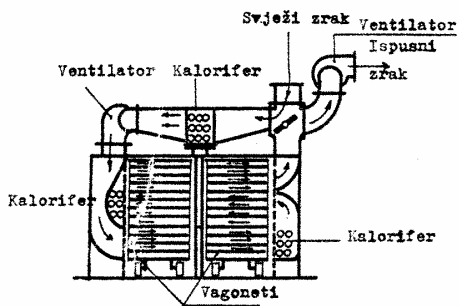
- **KONVEKTIVNE**
 - u kojima se tvar ne giba za vrijeme sušenja ili se giba pomoću posebnih uređaja
 - u kojima se tvar u struji zraka
- **KONTAKTNE**

Konvektivne sušare u kojima se tvar ne giba za vrijeme sušenja ili se giba pomoću posebnih uređaja

KOMORNA SUŠARA

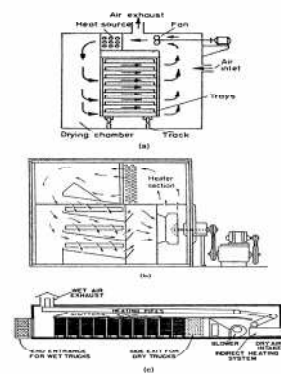
- Može biti zidana ili izgrađena od metalnih ploča u kojima je tvar koja se suši poredana u lijesu
- Lijese su postavljene na vagonete
- Sušenje se obavlja zrakom kojega u sušaru tlači jedan, a iz sušare odsisava drugi ventilator

- Zrak se prethodno grije u kaloriferu, a zatim se ventilatorom tlači između donje trećine lijesa
- Nedostatak je ovih sušara u tome:
 - što sušenje traje relativno dugo (jer tvar miruje za vrijeme sušenja)
 - Imaju mali učin
 - Tvar se nejednoliko suši
 - Utrošak radne snage je velik (jer se tvar na lijesu stavlja ručno)
 - Ovisno o tvari, sušenje traje oko 4 ili više sati



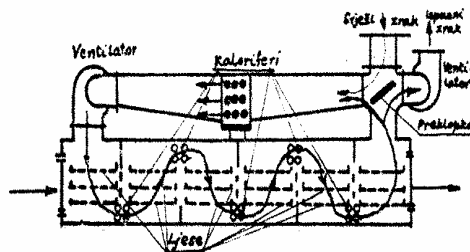
Komorna sušara

Komorne sušare



TUNELSKA SUŠARA

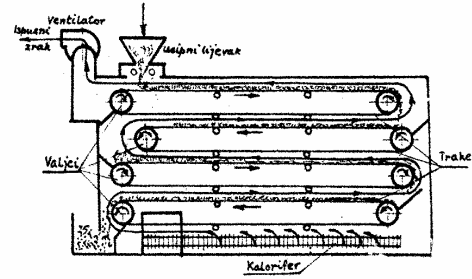
- Za razliku od komorne ova sušara je znatno dulja
- Pravokutnog je presjeka, isto može biti izrađena od metala ili zidana
- Tvar je poredana na lijesu, koja se kreću kroz sušaru po pomičnim šinama i tako tvar ulazi i izlazi iz sušare
- Zrak se prije uvođenja u sušaru kondicionira, prolazi kroz lijesu, ponovo dogrijava u slijedećem kaloriferu i tako sve do kraja
- Dio zraka se ispušta u okolinu, a dio se vraća i dodaje svježem zraku na ulazu zakretanjem preklopki
- Nedostaci slični komornoj, jedino je veći učinak



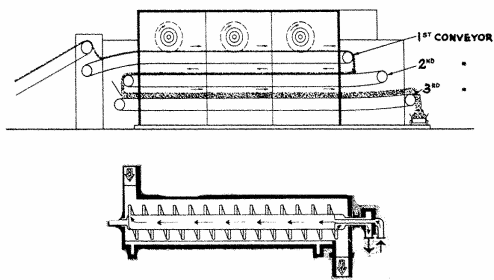
Tunelska sušara

TRAKASTA SUŠARA

- Napravljena je od metalnih ploča zavarenih na posebnu konstrukciju
- Unutar komore se nalaze više beskrajsnih traka za gibanje tvari
- S gornje trake, tvar pada na slijedeću donju traku i tako do izlaska iz sušare
- Zrak se grije kaloriferom i tlači ventilatorom
- I ovdje se dio zraka naizlazu iz sušare vraća i dodaje svježem zraku na ulazu
- Nedostaci isti kao i kod prethodnih sušara, jedino se tvar ravnomjernije suši, jer se prilikom prebacivanja sa trake na traku tvar okreće



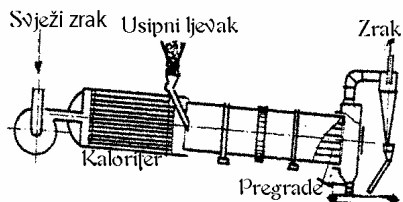
Trakasta sušara



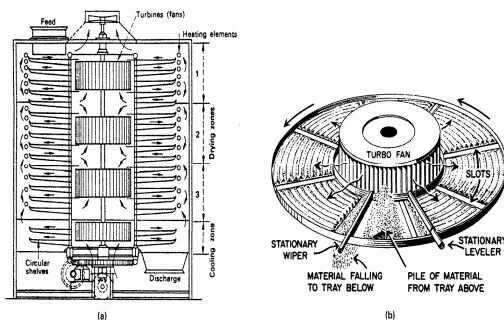
Trakaste sušare

SUŠARA S ROTIRAJUĆIM VALJKOM

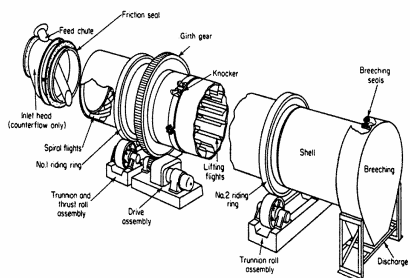
- Glavni dio je rotirajući valjak, koji transportira tvar koja se suši
- Valjak ima pregrade za rashlađivanje tvari
- Tvar se uvodi kroz usipni ljevak
- Zrak se kao i prije kondicionira i propuhuje ventilatorom kroz sušaru
- Najčešće se koristi u sušenju žitarica i sjemenki iz kojih se ekstrahira ulje



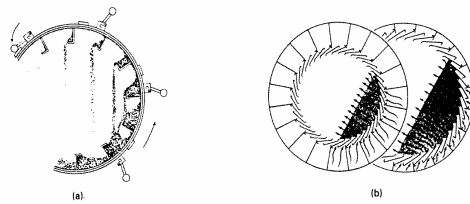
Sušara sa rotirajućim valjkom



Rotirajuće sušare



Sušara sa rotirajućim valjkom

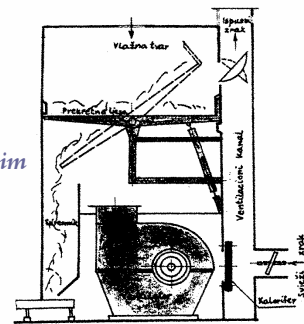


Presjek unutrašnjosti rotirajućih sušara

SUŠARA S PREKRETNIM LJESAMA

- Zidana komora, u kojoj se na na određenoj visini nalazi prekretna ljesa
- Služi za sušenje zelenog slada (proizvodnja piva)
- Zeleni slad se rasprostire u sloj do visine od 1 m
- Sušenje jedne šarže traje 20 sati
- Zrak se kondicionira kao i prije, tlači i dio ispušta, a dio vraća ponovo u proces
- Stanje zraka na ulazu i izlazu iz sušare se mijenja, što se danas automatski regulira
- Nakon što se slad osuši ljesa se posebnim hidrauličkim uređajem okreće i osušeni slad pada u spremnik

Sušara s prekretnim ljesama



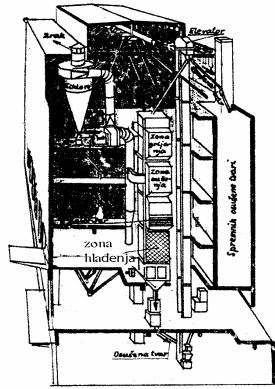
Konvektivne sušare u kojima se tvar giba u struji zraka

- U ovu skupinu sušara ubrajaju se:
 - Sušare u kojima se tvar kod sušenja fluidizira
 - Sušare u kojima se tvar (tekućine) kod sušenja raspršava u sitne kapljice
 - Sušare u kojima se tvar kod sušenja pneumatski transportira
- Zajednička im je osobina da se sušenje obavlja za kratko vrijeme, jer je relativno velika površina kontakta između tvari i zagrijanog zraka

PROTOČNA SUŠARA

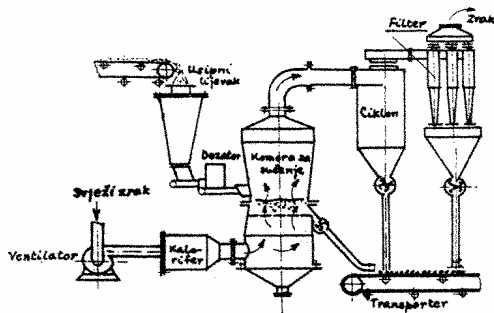
- Koristi se za sušenje žitarica i sjemeni uljarica
- Tvar se dovodi kroz usipni ljevak, prolazi kroz sušaru, okreće prevrtalima i izlazi na dnu
- Sušara je uvijek ispunjena s tvari
- Pravokutnog je oblika, a visina joj ovisi o vlažnosti tvari
- Sušara je podijeljena na zonu: grijanja, sušenja i hlađenja i dosušivanja
- u ciklonu se izdvajaju primjese
- Postoje izvedbe bez zone grijanja, tako da se to onda rješava konvekcijom

Protočna sušara



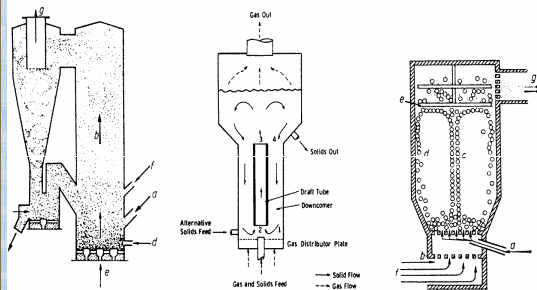
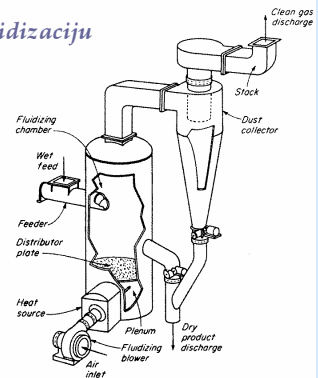
SUŠARE S FLUIDIZIRANOM TVARI

- Izvedba ovog tipa sušara je veoma različita i ovisi uglavnom o tvari koja se suši (zrnate, pastaste tvari)
- Najviše se koriste jednokomorne sušare
- Tvar se uvodi u usipni ljevjak, a potom se dozatorom dovodi u komoru za sušenje, gdje se nad rešetkom fluidizira u struji toplog zraka određene brzine
- Osim jednokomornih postoje i višekomorne, te stepenasto-protlačne sušare u fluidiziranom sloju



Jednokomorna sušara za fluidizaciju

Sušara za fluidizaciju



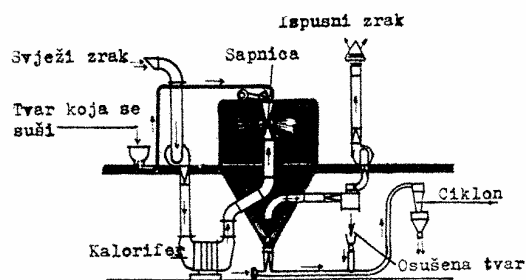
Razni tipovi sušara za fluidizaciju

SUŠARA RASPRŠIVAC

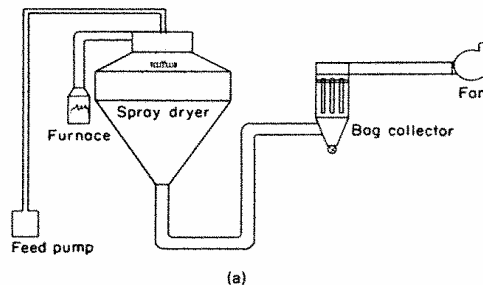
- U ovoj se sušari tekuća tvar (mlijeko, krv, detergents, dječja hrana i sl.) suši u struji toplog zraka u obliku sitnih kapljica
- Budući da su kapljice veoma sitne, površina kontakta je veoma velika pa se sušenje obavi za 15 do 30 sek.
- I bez obzira kojom se temperaturom zraka suši, temp. tvari ne prelazi granicu hlađenja
- Na taj način se dobije veoma topiv praškasti proizvod (instant)

- Tvar se u komori raspršiva pomoću sapnica
- Rotirajući su diskovi pogodni za raspršivanje suspenzija i viskoznih tekućina
- Međutim utrošak energije za ovakvo rotirajuće raspršivanje je veće nego kod mehaničkih sapnica (mogućnost začepljenja)
- Kod pneumatskih sapnica je opet nedostatak veliki utrošak energije i nejednolikost raspršivanja

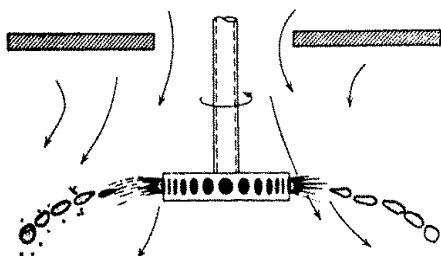
- U komori se zrak i tvar može gibati:
 - *Istosmjerno i*
 - *Protusmjerno*
- Kod istosmernog nema opasnosti od zagorjevanja
- Protusmjerno sušenje se koristi kod sušenja tvari veće gustoće
- Nedostaci ovih sušara :
 - *Mali učin*
 - *Zapremaju mnogo mjesta*
 - *Sušenje je vrlo skupo*



Sušara raspršivač



Sušara raspršivač

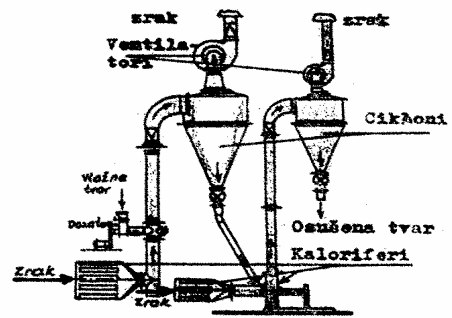


Glava raspršivača sušare

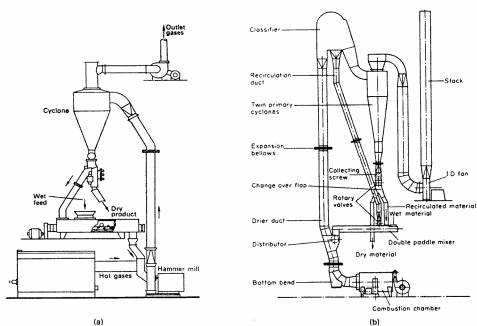
PNEUMATSKE SUŠARE

- Koriste za sušenje zrnatih tvari
- Princip se sastoji u pneumatskom transportiranju tvari strujom toplog zraka u vertikalnoj cijevi visine 20 m (ovisno o % vode koju treba oduzeti)
- Brzina strujanja zraka treba biti veća od brzine lebdenja i iznosi 10 do 30 m/s
- Uklanja se uglavnom slobodna vlaga
- Dimenzije čestica su od 8 do 10 mm
- Tvar se u pneumatsku cijev ubacuje preko usipnog ljevka preko dozatora

- Zrak se opet grije preko kalorifera i tlači putem ventilatora
- Struja toplog zraka odnosi tvar kroz I pneumatsku cijev do I ciklona
- Iz I ciklona tvar ulazi u II pneumatsku cijev i zatim ulazi u II ciklon
- U II ciklonu se izdvaja osušena tvar od zraka



Pneumatske sušare



Pneumatske sušare

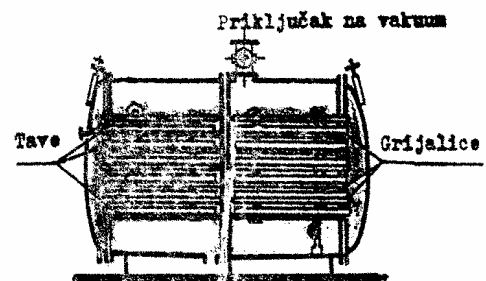
Kontaktne sušare

- Ovdje se sušenje vrši u struji zrak
- Tvar se direktno grije u kontaktu sa ognjivnom stijenkom pri čemu dolazi do ishlapljivanja vode

KOMORNE VAKUUM SUŠARE

- Komora je ovakve sušare cilindričnog oblika
- Tvar koja se suši stavlja se u plitke tave, a one su postavljene na grijalice u obliku pravokutnih komorica

- U grijalice se uvodi para ili topla voda
- Za vrijeme sušenja je komora spojena na uređaj za stvaranje vakuuma (vakuum pumpa) preko cijevnog priključka
- Količina isparene vode je mala: $0,5$ do $3,5 \text{ kg}_{\text{vode}}/\text{m}^2 \text{ h}$
- Unošenje i iznošenje tvari izvodi se ručno

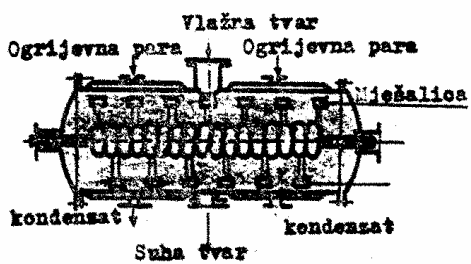


Komorna vakuum sušara

VALJKASTA VAKUUM SUŠARA S MJEŠALICOM

- Za razliku kod komornih, kod valjkastih vakuum sušara tvar za vrijeme sušenja ne miruje, već se miješa mješalicom
- Ovdje ishlapi veća količina vode 6 do 8 $\text{kg}_{\text{vode}}/\text{m}^2\text{h}$ ogrijevne površine sušare
- Sastoji se od valjka na kojem je privaren parni plašt
- U valjak je ugrađena mješalica s kojom se tvar za vrijeme sušenja okreće
- Mješalica se inače 5-8 min. okreće na jednu, a potom na drugu stranu

- Na taj način se sprečava nagomilavanje tvari na jedan kraj sušare
- Kada se radi diskontinuirano, utrošak je radne snage na posluživanju, manji nego kod komornih vakuum sušara

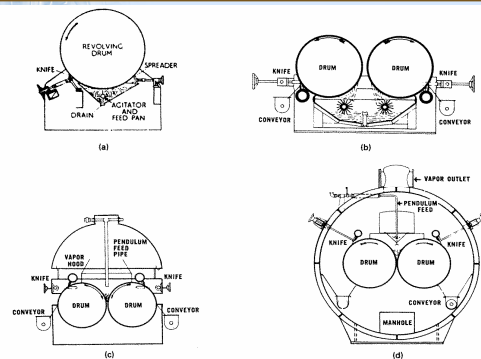


Valjkasta vakuum sušara s mješalicom

VALJKASTE SUŠARE

- Koriste se za sušenje tekućih i pastastih tvari
- Sušara se sastoji od dva valjka, koji se okreću na šupljim osovinama kroz koju se uvodi ogrijevna para
- Tvar za sušenje se odvodi u međuprostor između valjaka i pri tom se na valjcima nahvata tanki sloj tekućine koja se osuši za vrijeme jednog nepotpunog okretaja valjka
- Osušena se tvar sa valjka skida posebnim noževima strugačima, a zatim se pužnim transporterima odvodi iz sušare

- S površine m^2 valjka za 1 sat ishlapi 13 do 15 kg vode
- Ovdje je utrošak energije znatno manji nego kod sušenja raspršivanjem
- Zato je topljivost dobivenih proizvoda manja nego kod sušenja sa raspršivanjem
- Ove sušare mogu raditi i u vakuumu
- Tada su valjci smješteni u posebno kućište gdje se održava vakuum



Valjkaste sušare