

СУШЕЊЕ

У процесној техници често се јавља задатак сушења неког влажног материјала помоћу незасићеног влажног ваздуха. Код таквог сушења влага из материјала се транспортује у незасићен ваздух па се процес у суштини своди на транспорт материје из једне фазе у другу. Целокупан процес транспорта материје може да се подели на два дела:

Прелаз влаге са површине влажног материјала на ваздух при чему је меродаван коефицијент прелаза материје и разлика апсолутних влажности ваздуха на површини контакта са материјалом. $((X_v^*))$ и далеко од материјала који се суши (X) .

Транспорт (кретање) влаге у самом материјалу (чврстој фази) из унутрашњости ка површини контакта са ваздухом, при чему су од значаја капиаларне појаве, брзина дифузије, у самом материјалу.

Сушење (дехидрација) чини низ поступака, који омогућавају уклањање течности из разних средина (чак и правих раствора). Дехидрација се може остварити на више начина:

1. Применом механичког рада
 - A) Цеђење (на пресама),
 - B) Центрифугирање,
 - C) Филтрација,
 - D) Ультрафилтрација.
2. Применом топлотне енергије – процеси сушења
 - A. Кондуктивно сушење.
 - B. Конвективно сушење.
 - C. Сушење зрачењем.
 - D. Комбивновано сушење.
3. Применом физичко-хемијских метода
 - A. Адсорпцијом.
 - B. Апсорпцијом.
 - C. Осмозом.
 - D. Екстракцијом.

Циљ ових поступака је постизање жељених особина материјала као што су: постојаност састава (ради продуженог чувања), добијање бољих структурних особина, смањење транспортних трошкова, смањење корозије.

У прехранбеној технологији циљ дехидрације је најчешће конзервисање (продужено чување) и најчешће се из материјала уклања вода. Вода је у материјалу везана на различите начине и назива се влага. Она се из материјала уклања топлотном енергијом доведеном у влажан материјал, која условљава излажење влаге на површину материјала и њено даље одношење са површине (симултани процес преношења топлоте и масе).

Конвективно сушење је у пракси најраспрострањеније. Загрејани гас и то најчешће ваздух преноси топлоту материјалу који се суши механизмом конвективног преноса, при чему гас односи испарене молекуле воде.

Кондуктивно сушење се спроводи директним контактом грејних тела са влажним материјалом. Испарени молекули влаге се односе било незагрејаним ваздухом (гасом), било вакуум пумпом.

Код сушења зрачењем топлота за испаравање воде се предаје влажном материјалу посредством електромагнетних таласа одређених таласних дужина, али на пример и сунчевим зрачењем.

Комбиновано сушење, на пример сушење сублимацијом (лиофилизацијом) протиче кроз две фазе:

1. влага у материјалу се преводи у лед;
2. затим се на веома ниским притисцима и температурама лед директно преводи у пару.

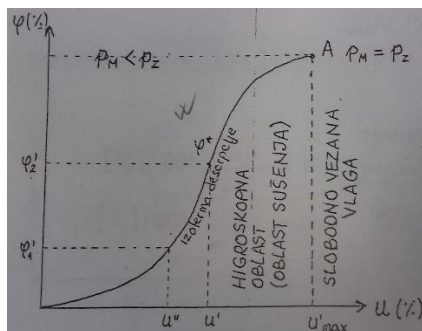
Транспорт влаге у самом материјалу је далеко сложенији од испаравања воде са слободне површине. Влага у материјалу се налази у његовим капиларима, које могу имати разне димензије. Притисак паре који је у равнотежи са водом у некој капилари (равнотежни притисак) је због капиларних сила мањи од равнотежног притиска који би посматрана пара имала да се вода исте температуре налази на некој слободној површини.

Уколико су капиларе мањег пречника (d) утолико је притисак водене паре у њима мањи (p_{pz}). Уколико су капиларе толико великих димензија да се смањене притиска водене паре може занемарити влага у тим капиларама је такозвана ГРУБА ВЛАГА. Влага у ситнијим капиларима која приметно смањује притисак паре је такозвана ХИГРОСКОПНА ВЛАГА. За произвољни влажни материјал тешко је одредити границу између грубе и хигроскопне влаге.

С обзиром да сваки материјал има капиларе различитих димензија при сушењу ваздухом одређеног стања прво ће испарити влага из већих капилара, а затим и из ситнијих. Тако постепено долазе на ред и капиларе у којима је притисак паре смањен до вредности парцијалних притисака водене паре у ваздуху (којим се обавља сушење)) $p_{pz} = p_p$. Тада сушење (испаравање) престаје и влажан материјал долази у равнотежу са ваздухом. При том ће материјал садржавати извесну количину влаге али само у тим мањим капиларима. На овај начин је дефинисана РАВНОТЕЖНА АПСОЛУТНА ВЛАЖНОСТ МАТЕРИЈАЛА. (u').

РАВНОТЕЖНА АПСОЛУТНА ВЛАЖНОСТ МАТЕРИЈАЛА (u') је функција стања ваздуха и дефинише равнотежне услове посматраног вишефазног система, а у директној је вези са физичко хемијским особинама материјала и његовом структуром и одређује се експериментално. Ова зависност се даје у дијаграмима (слика 1):

1. $u' = \varphi$ за $p = p_{atm} = \text{const.}$ И за разне температуре ваздуха
2. $\frac{p_i}{p_d} = u' ; \frac{p_i}{p_d} < 1$



Слика 1. Изотерма сорпције

Где је p_i притисак паре изнад воде у капиларама материјала, p_a притисак водене паре на истој температури али изнад слободне површине воде.

Кретање влаге у влажном материјалу током процеса сушења је сложена појава и има огроман утицај на квалитет осушеног материјала. Могу се разматрати три основна вида кретања влаге:

1. Кретање влаге услед капиларних ефеката,
2. Кретање водене паре кроз испразњене капиларе,
3. Појава капиларне кондензације.

Фактори који утичу на избор оптималног режима сушења су:

- Особине влажног материјала (физичке, хемијске, биолошке),
- Структура влажног материјала,
- Брзина сушења,
- Особина агенса сушења (T , ϕ , v)

Влажни материјал изложен процесу сушења мења своја такозвана физичко-хемијска својства. Ова промена материјала је условљена карактером молекулске везе влаге и материјала као и структуром и саставом сушеног материјала.

Процеси сушења су углавном условљени карактером брзинског, температурног и концентрационог поља у вишефазном систему (влажан материјал- околна средина). Поред карактеристика влажног ваздуха за конвективно сушење је потребно знати и карактер везивања влаге у материјалу јер од њега зависи механизам сушења.

Процес удаљавања влаге из материјала је праћен кидањем поменутих веза, а како је свака веза дефинисана различитим енергетским износима, за сваку везу се мора утрошити одређена количина енергије.

Према енергији везивања влаге класификују се и облици везе између влаге и материјала.

1. ХЕМИЈСКИ ВЕЗАНА ВЛАГА се у материјалу налази у облику хидроксилних јона или кристално везане влаге и за раскудање ових веза потребна је највећа енергија – загревањем на јако високој температури и само под утицајем одређене хемијске реакције. Она није предмет сушења у орехрамбеној технологији.

2. ФИЗИЧКО ХЕМИЈСКИ ВЕЗАНА ВЛАГА, као:

- А. Адсорпционо везана влага – на површини влажног материјала постоје некомпензоване међумолекулске силе, које могу везати молекулски адсорпциони слој влаги (мономолекулски или вишемалекулски слој). Ово је чврсто везана влага и особине овог слоја се знатно разликују од особина исте течности приликом нормалних услова (због наведених интеракција),
- В. Капиларно везана влага – настаје као резултат интеракције на граници фаза чврсто-течно-гасовито. Величина пора је мања од 10^{-7} m и ту је напон паре изнад влаги мањи од напона паре исте или слободне течности па је испаравање отежано – ово смањење напона паре је мера енергије везе паре. За случај макропора овај феномен се не јавља,
- С. Осмотски везана влага – се јавља у свим случајевима где је влага у комбинацији са јонима или другим растворљивим материјама које у њој хидратишу, па је парцијални притисак изнад раствора нижи од парцијалног притиска паре изнад чистог растварача,

3. ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКИ ВЕЗАНА ВЛАГА – зове се још и „слободна вода“ има све карактеристике као и чиста течност па се лако уклања. Овде спадају:

- А. Капиларна влага (влага квашења) на површини материјала,
- В. Капиларна влага, као влага у порама, микро и макро-капиларна.

ИЗРАЖАВАЊЕ САДРЖАЈА ВЛАГЕ У МАТЕРИЈАЛУ

Садржај влаги у материјалу се може изразити у односу на влажан материјал и у односу на апсолутно сув материјал.

Укупна маса влажног материјала је (G_{uk}):

$$G_{uk} = G_{vl} + G_{sm}$$

G_{vl} - маса влаги ; G_{sm} – маса сувог материјала

Релативна влажност материјала (d) изражена по влажној основи: $d = \frac{G_{vl}}{G_{uk}} \cdot 100 (\%)$

Релативна влажност материјала (u) изражена по сувој основи: $u = \frac{G_{vl}}{G_{sm}} \cdot 100 (\%)$

$$u = \frac{d}{100-d} \text{ одакле је } d = \frac{u}{100+u}$$

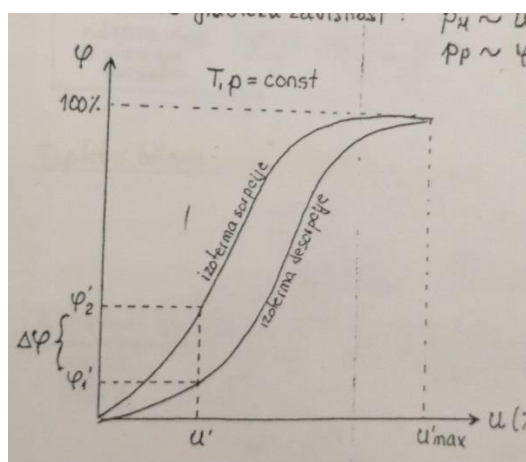
ПРОБЛЕМИ РАВНОТЕЖЕ СИСТЕМА МАТЕРИЈАЛ-ВАЗДУХ

СТАТИКА ПРОЦЕСА СУШЕЊА

Код операције сушења постоје услови при којима долази до равнотеже (када једнаке количине материје долазе и напуштају посматрану фазу.

При контакту влажног ваздуха и чврсте материје могу се одвијати следећи процеси:

1. Адсорпција – када влага прелази на материјал и влажи га. У граничном слоју материјала влада парцијални притисак паре (p_m), који је мањи од парцијалног притиска паре околног ваздуха (p_p) – влажење ($p_m < p_p$),
2. Десорпција – влага прелази из материјала у околни ваздух јер је парцијални притисак паре у граничном слоју материјала већи од парцијалног притиска паре околног ваздуха – сушење - ($p_m > p_p$),
3. Динамичка равнотежа – у којој нема нето преноса материје у систему – тада исти број молекула прелази са површине материјала у околину, колико се из околине пренесе на материјал - ($p_m = p_p$)



Слика 2. Крива сорпције и десорпције

Посматра се графичка зависност $p_m \sim$ (то јест d) у материјалу, $p_p \sim \varphi$ у влажном ваздуху за $T, p = \text{const} \rightarrow u' = \varphi$

Последња зависност представља ИЗОТЕРМУ СОРПЦИЈЕ или ДЕСОРПЦИЈЕ, зависно од тога да ли је равнотежно стање постигнуто сорпцијом или десорпцијом. Равнотежне криве сорпције односно десорпције (слика2) се одређују експериментално (увођењем влажног ваздуха одређене температуре и притиска, на влажни материјал и посматрањем низа равнотежних стања формира се функционална зависност у виду криве. Међутим ове криве се не поклапају – појава хистерезиса, осим у крајњим тачкама $\varphi = 0$ и $\varphi = 1$.

За равнотежну влажност материјала (u') при сорпцији постоји одговарајућа влажност ваздуха (φ'_2), а при десорпцији (φ'_1). Очигледна је појава $\Delta\varphi$.

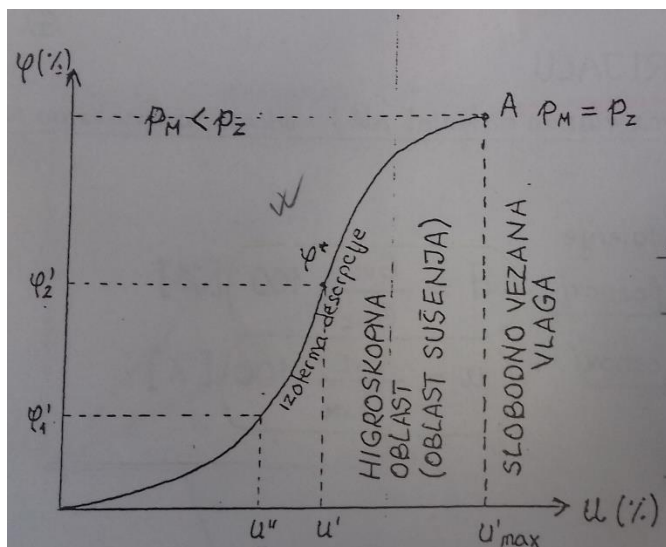
Ова разлика $\Delta\varphi$ је последица постојања капилара у материјалу, које су испуњене ваздухом па да би се обавила адсорпција ваздух се мора избацити да би на његово место дошла вода. Дакле неопходан је додатни рад па је изотерма сорпције изнад изотерме десорпције.

Особина материјала да упија воду је ХИГРОСКОПНОСТ.

Апсолутна влажност материјала која је у равнотежи са засићеним влажним ваздухом ($\phi = 1$) је максимална хигроскопна влажност ($u'_{\max}$) и она дефинише максималну сорпциону способност материјала.

При датој $u'_{\max}$ материјал не може да упије више влаге из ваздуха и даље влажење је могуће само путем механичког додавања воде (директним контактом материјала и течности).

Карактер равнотежних кривих - облик изотерми сорпције (слика 3) и десорпције, као и $u'_{\max}$ зависе од интензитета веза влаге са материјалом као и од структуре материјала.



Слика 3. Изотерма сорпције

p_z – парцијални притисак засићења за $t, p = \text{const.}$

У области иза тачке (А) (слика 3), то јест иза $u'_{\max}$ је област слободно везане влаге и она се може уклонити сваким влажним ваздухом чија је $\phi < 100\%$. (испаривање воде са њене површине).

Са ваздухом стања ϕ'_1 се обавља сушење влажног материјала стања u' јер је равнотежна влажност ваздуха за такав материјал већа од ϕ'_1 ($\phi^* > \phi'_1$).

Лево од тачке А где је $p_u < p_z$ уклања се влага из материјала, али не било којим влажним ваздухом већ само ваздухом који има ϕ ниже од одговарајуће равнотежне ϕ^* - тада се уклања равнотежна влага.

МАТЕРИЈАЛНИ И ТОПЛОТНИ БИЛАНС ПРОЦЕСА СУШЕЊА

Сушење представља симултани процес преноса масе и топлоте. Посматра се континуалан процес сушења. У сушару улази валажан материјал G_1

$$G_1 = G_2 + W \left(\frac{kg}{h} \right)$$

W – влага коју треба одстранити

G₂ – количина осушеног материјала на излазу из сушнице

G₁, G₂, W, - масени протоци

u, d – влажност материјала изражена по сувој, односно влажно основи

L – масени проток ваздуха (kg s.m./h)

$$G_1 = G_2 + W$$

$$G_1 \cdot \frac{100-d_1}{100} = G_2 \cdot \frac{100-d_2}{100} \quad (\text{биланс за суву материју})$$

Јер је садржај суве материје једнак и на почетку и на крају процеса

$$G_1 = G_2 \cdot \frac{100-d_2}{100-d_1} \quad G_2 = G_1 \cdot \frac{100-d_1}{100-d_2}$$

Биланс воде је (количина испарене воде):

$$W = G_1 - G_2 = G_2 \cdot \frac{100-d_2}{100-d_1} - G_2 = G_2 \cdot \left(\frac{100-d_2}{100-d_1} - 1 \right) \quad \text{одакле следи}$$

$$W = G_2 \cdot \frac{d_1-d_2}{100-d_1} = G_2 \cdot \frac{u_1-u_2}{100-u_2}$$

$$W = G_1 \cdot \frac{d_1-d_2}{100-d_2} = G_1 \cdot \frac{u_1-u_2}{100-u_1}$$

Влага прелази на ваздух и мења његово стање (у комори у контакту са влажним материјалом). Потребна количина материјала је

$$L_0 \cdot X_1 + W = L_0 \cdot X_2$$

L₀ · X₁ - количина воде у улазном ваздуху

W – испарена влага

L₀ · X₂ - количина воде у излазном ваздуху

X₁ – садржај воде у ваздуху на почетку сушења

X₂ – садржај воде у ваздуху на крају сушења

$L_0 = \frac{W}{X_2-X_1}$ - потребна количина сувог ваздуха која мора да се доведе материјалу да би се уклонила одговарајућа количинаа воде

КИНЕТИКА ПРОЦЕСА СУШЕЊА (БРЗИНА И МЕХАНИЗМИ)

Кинетика процеса сушења утврђује време трајања сушења и утицај разних фактора на процес сушења. Брзина сушења зависи од :

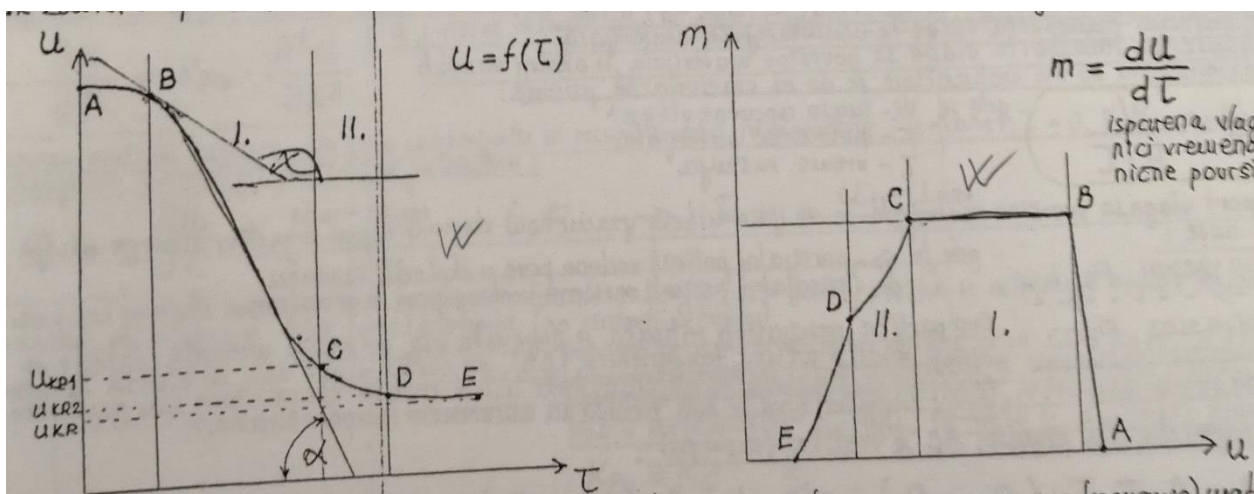
1. Облика везане влаге,
2. Механизма кретања влаге у материјалу,
3. Начина уклањања влаге са површине материјала.

Процеси сушења влажног материјала при којима се делимично одстрањује и хигроскопна влага су знатно сложенији. Код оваквих процеса сушења веома је важан и често пресудан транспорт влаге у материјалу односно транспорт влаге из унутрашњости материјала до површине контакта са ваздухом, којим се врши сушење.

Код конвективног сушења и у чврстој и у гасовитој фази се одвијају процеси преноса масе. Брзина миграције влаге се може изразити преко укупног коефицијента транспорта влаге који зависи од свих коефицијената који дефинишу основне облике транспорта влаге у материјалу. Сем тога укупни коефицијент транспорта влаге ће зависити од температурног, концентрационог и брзинског поља, врсте транспортоване влаге (пара, течност), као и од врсте сила које узрокују транспорт влаге у материјалу.

За свако конкретно сушење влажног материјала основна карактеристика је време трајања сушења од почетне апсолутне влажности до неке крајње жељене влажности.

Зависност промене влажности материјала од времена представља криву сушења (слика 4) – она се разликује за различите материјале и представља врло битну карактеристику материјала и посматраног процеса сушења (јер њихов облик зависи од параметара ваздуха за сушење).



Слика 4. Кинетика процеса сушења

Промени АВ одговара мала промена влажности материјала (u) уз постепено загревање (предгревање) материјала. Област ВС одговара интензивном сушењу (I период сушења), брзина сушења је максимална и константна (тј. влажност се мења константном брзином).

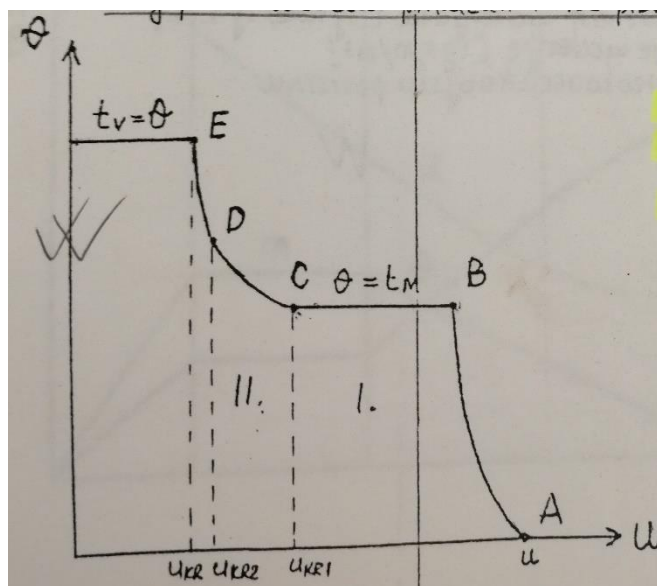
Овде се уклања слободна влага из материјала (слично испаравању воде са слободне површине) – $\text{tg}\alpha = \text{const}$. Граница ове области је по успостављању критичне влажности материјалка u_{kr1} .

Област CDE је област опадајуће брзине сушења (II период сушења). Тачка С одговара хигроскопној влажности материјала, а потом се из материјала уклања везана влага – капиларна и адсорпциона (CD). Када влажни материјал достигне критичну апсолутну влажност (u_{kr}) на његовој површини се појављују осушена места која се даљим процесом сушења повећавају.

Пошто је брзина сушења дефинисана за целу површину контакта (материјал-ваздух) долази до опадања брзине сушења иако њена вредност на потпуно оквашеним местима остаје непромењена. Дакле део процеса CD је сушење незасићене површине. Када се достигне апсолутна влажност материјала (u_{kr2}) цела површина контакта је сува.

Област DE је даљи процес сушења и овде брзину сушења одређује она брзина којом влага долази до површине из унутрашњости материјала (за шта је од важности транспорт масе у материјалу). Како разлика концентрација у слојевима материјала опада са временом трајања процеса сушења брзина сушења све више опада. У тачки u_{kr} је постигнута равнотежна влажност материјала, за посматране услове сушења и процес сушења престаје ($m=0$).

Овај процес се може представити и кроз промене температуре у влажном материјалу (слика 5)



Слика 5. Дијаграм промене температуре у влажном материјалу

Θ – температура у влажном материјалу

AB – краткотрајно загревање материјала

BC – $\Theta = t_m$ – температура мокрог термометра када испарава слободна влага и тада се материјал не загрева

CD – загревање материјала

E – стање у коме материјал и ваздух имају једнаке температуре

Област I – Ако влажан материјал изложимо струји ваздуха константних параметара, влажност материјала се смањује, најпре споро, а потом се издвајање влаге спроводи неком константном брзином. Брзина сушења у почетној фази расте нагло до одређене вредности односно до константне брзине сушења (BC) Уколико су све микропоре испуњене влагом на почетку процеса сушења тада ће температура на површини материјала бити једнака температури влажног термометра.

Уколико се параметри ваздуха и коефицијент прелаза топлоте и масе не мењају, интензитет сушења је константан (тј. период константне брзине сушења). У овом периоду притисак паре над површином материјала не зависи од влажности и једнак је притиску паре над слободном површином воде. Период константне брзине сушења траје све док се не постигне ($u_c = u_{kr1}$).

Област II – Са даљим опадањем влажности материјала (испод хигроскопне) опада и притисак водене паре над површином материјала. Влажност на површини зависи од брзине транспорта влаге кроз материјал до површине.

Температура у средини материјала се спорије повећава, него на површини, па се у материјалу ствара температурни градијент који се постепено смањује и постаје једнак нули – када се постиже равнотежна влажност, а температура површине материјала постаје блиска температури ваздуха.

У области DE из материјала почиње да се издваја чвршће везана влага. Тада је $m_{DE} < m_{BC}$, односно брзина транспорта влаге у материјалу је мала у односу на брзину дифузије са површине материјала на околни ваздух. У овом периоду брзина сушења је одређена само брзином влаге у материјалу.

Транспорт влаге унутар материјала се обавља у течном облику, па се након тога уклања влага са површине материјала, у облику паре. То значи да је овде заступљен транспорт влаге и у облику воде и у облику паре. Са одмицањем процеса фронт испаравања се све више помера ка унутрашњости материјала и влага се све више транспортује у облику паре.

На интензитет сушења (флукс испарене влаге) утичу:

- Механизам транспорта влаге из унутрашњости материјала
- Механизам транспорта влаге са површине материјала на околни ваздух,
- А карактеристично за ове механизме је да су стационарне природе.

$$\text{Флукс испарене влаге} = \frac{W}{F \cdot \tau}$$

W - Маса испарене влаге

F - Површина материјала

τ - Време сушења

Транспорт влаге са површине материјала се одвија у уском граничном слоју у којем се путем дифузије одвија пренос масе

ОКОЛНИ ВАЗДУХ p_p – парцијални притисак водене паре у околном ваздуху

ГРАНИЧНИ СЛОЈ p_z – парцијални притисак засићене водене паре у граничном слоју

МАТЕРИЈАЛ

Ова разлика парцијалних притисака је погонска сила за пренос материје. Такође се може јавити и разлика температура ($\Delta\tau$), при чему може доћи до ефекта термодифузије тј. до транспорта материје услед разлике температура као погонске силе (занимљива је код процеса са умереним температурама).

Треба нагласити да у другом периоду сушења материјал се загрева и долази до деформације материјала па је отежана дифузија јер су смањени капиларни простори.

Процес сушења у континуалним сушарама тече на следећи начин:

I ФАЗА је нестационарна, влажни материјал се доводи до неке почетне (ниже) температуре на температури засићења (температура мокрог термометра) ваздуха који се користи за сушење. У овој фази материјал губи мало влаге те се ова фаза може занемарити.

II ФАЗА је испаравање грубе влаге (невезане површинске влаге) и материјал се осуши до u_{krl} . Температура влажног материјала у овој фази је константна

III ФАЗА је сушење незасићене површине тако да се из влажног материјала издваја везана влага. Температура влажног материјала расте, приближавајући се температури ваздуха којим се врши сушење.

УРЕЂАЈИ ЗА СУШЕЊЕ

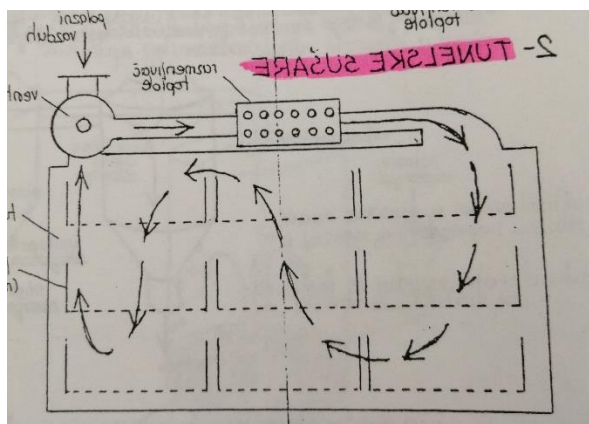
I. Конвективне сушаре са непокретним слојем материјала

1. Коморне сушаре

Коморне (тунелске) сушаре су великих капацитета (дужина коморе и до 25m). Рад им је дисконтинуалан и захтевају ангажовање знатне радне снаге. Користе се за сушење осетљивих материјала. Материјал се ручно слаже на лесе вагонета. Трајање сушења је дуго, до 4 сата, јер материјал на лесама мирује, па се материјал неравномерно суши. Кретање материјала у односу на кретање медијума за сушење може бити истосмерно и супротносмерно, а могуће су и конструкције које омогућавају и рецикулацију дела ваздуха.

Недостаци ових сушара су: материјал мирује па није једнако изложен процесу сушења, долази до раслојавања ваздуха по висини јер су висине ових сушница и до неколико метара, пуњење материјала је ручно, сушење дуго траје и рад је дисконтинуалан. И поред покушаја аутоматизације дела процеса као што је пуњење леса и покретање вагонета све се више избацују из употребе, мада се још увек користе за сушење воћа и поврћа.

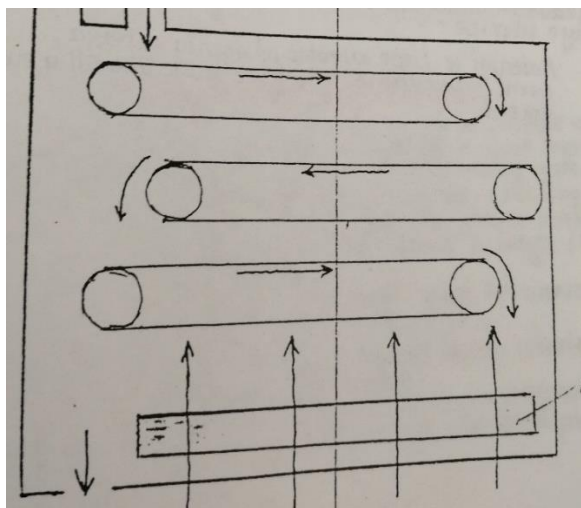
2. Тунелске сушаре (слика 6)



Слика 6. Тунелска сушара

3. Тракаста сушара (слика 7)

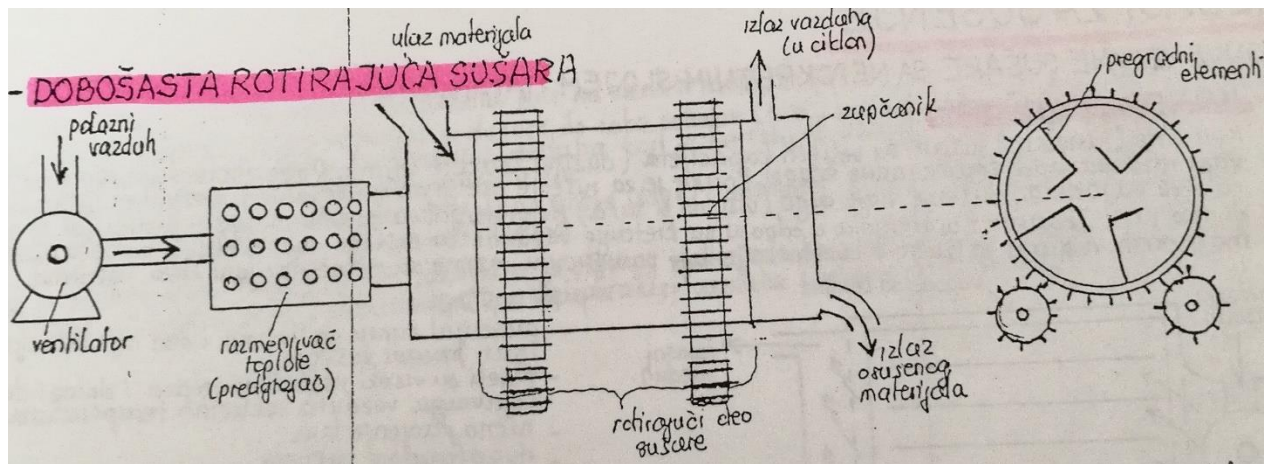
Тракасте сушаре су конструисане у виду бескрајних трака, поређаних једна изнад друге у комори за сушење. Кроз њих се продувава загрејан медијум за сушење. Ваздух струји одоздо или бочно у односу на материјал. Број трака није ограничен, а траке једна у односу на другу имају супротан смер кретања. Материјал се може сушити по зонама (са различитим температурама), а на највишој траци се врши хлађење материјала. При прелазу материјала са траке на траку долази до мешања материјала, па су тако сви делови изложени сушењу. Ако је слој материјала већи од 10-15 cm, да материјал не би оштетио траку испод траке се продувава ваздух, тако да материјал лебди чиме се повећава капацитет сушења. Раде континуално, по зонама, са минимумом радне снаге и високим степеном механизације и аутоматизације.



Слика 7. Тракаста сушара

4. Добошаста ротирајућа сушара (слика 8)

Код ове врсте сушара ваздух након пролаза кроз предгрејач, улази у комору где долази у контакт са влажним материјалом. У добошастом делу сушаре налази се обртни сегмент (покретан зупчаницима) у коме се креће материјал уз истовремено сушење. У ротационом добошу су профилисане преграде, које омогућавају превртање материјала и довољно задржавање материјала у сушници, што се регулише бројем обртаја добоша. Понекад се као агенс за сушење користе топли гасови – продукти сагоревања. Користе се за сушење житарица, сунцокрета и других сличних култура.



Слика 8. Добошаста ротирајућа сушара

5. Сушаре са флуидизационим слојем (слика 9)

Користе се за сушење зрнастог, прашкастог и гранулисаног материјала који се може довести у стање флуидизације. Овде агенс за сушење обавља и сушење у флуидизацију. Због доброг контакта агенса за сушење и флуидизације, интензивно је кретање материјала услед турбулентног кретања агенса за сушење. Време сушења је веома кратко, а сушење је интензивно и квалитетно. Користи се за сушење ратарских култура, шећера, минералних соли итд.

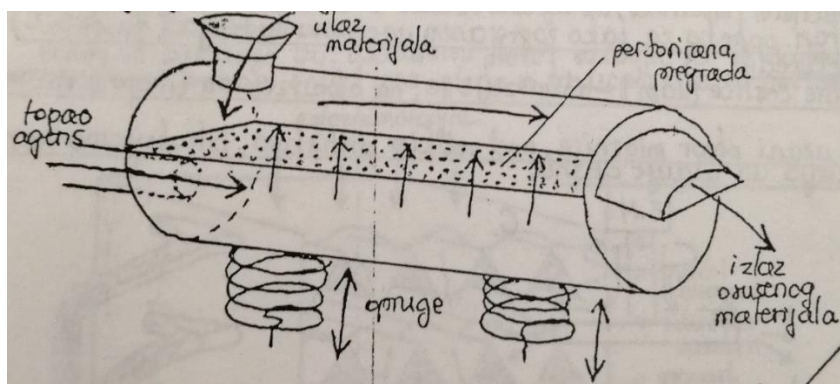
Недостаци овог начина сушења су:

- Долази до уситњавања материјала (услед трења и удара),
- Отежана је контрола времена задржавања материјала у сушници,
- Није погодна за сушење материјала који је нехомоген по величини честица јер долази до раслојавања у сушници, па се најситније честице односе са струјом ваздуха.

Постоје конструкције са постављеним преградама у комори, које задржавају материјал у комори и спречавају брзо напуштање коморе. Материјал се обично креће у супротном смеру у односу на агенс за сушење. У сваки сегмент са преградом се може убацивати цевни разменивач топлоте

6. Сушаре са виброфлуидизационим слојем (слика 9)

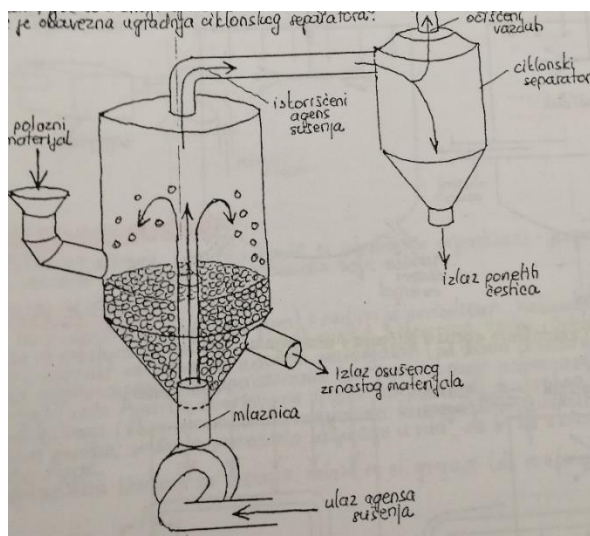
Код ове врсте сушара се цео уређај доводи у вибрационо кретање (горе – доле) помоћу опруга, па је покретање материјала поред флуидизације додатно поспешено и механичким путем. Комора која је ослоњена на опруге је по хоризонтали подељена перфорираном преградом, на доњи део коморе који служи за расподелу агенса за сушење и горњи део која представља комору за сушење. Користе се за финалну обраду прашкастог материјала, јер се оваквим сушењем материјал гранулише.



Слика 9. Сушаре са виброфлуидизационим слојем

7. Сушаре са фонтанским слојем (слика 10)

Фонтански слој се разликује од флуидизованог слоја. У језгру тока агенса за сушење формира се фонтана, при томе се честице крећу великом брзином и падају наниже, дуж зидова коморе. Брзине агенса за сушење су велике и најповољније је уклањање влаге са површине честица материјала. Зрна се у фонтанском слоју суше по површини уз истовремено мигрирање влаге из унутрашњости материјала према површини. Материјал се поново креће према средишњем делу, фонтанског слоја када се уклања влага која је дифузијом доспела до површине честица. Уз ове сушнице се обично уграђују циклонски сепаратори.



Слика 10. Сушаре са фонтанским слојем

8. Пнеуматско сушење

Пнеуматске сушаре се користе за сушење врло влажних материјала, а сушење се обавља у условима пнеуматског транспорта (материјал се може загревати до високих температура – код сушења скроба). Користе се најчешће за сушење ситнзрнастог материјала. Време сушења је јако кратко, свега неколико секунди. Загрејани ваздух покретан јаким вентилатором износи сав материјал до циклона где се материјал одваја од агенса за сушење, а недовољно осушен материјал се враћа на сушење. Полазни влажни материјал може бити у облику пасте, суспензије, концентрованих раствора.

Недостаци ових сушара су:

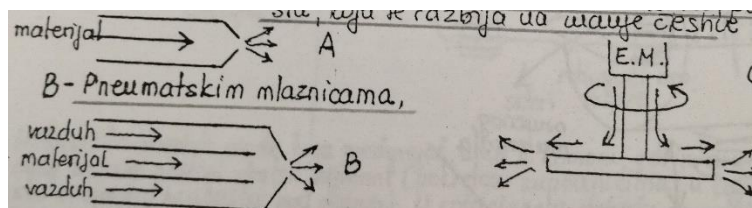
- Велика потрошња топлоте чије је искоришћење мало због кратког времена контакта материјала и агенса,
- Зрнасти материјал може да се уситни због великих брзина кретања честица,
- Отежана је контрола и аутоматизација процеса.

9. Сушење распршавањем (слика 11)

Примењују се за материјале са високим садржајем влаге, што омогућава издвајање чврсте материје и из колоидних и правих раствора. У прехранбеној технологији се користе за производњу инстант производа (млеко у праху, инстант пире од воћа, кромпира, парадајза, воћа), супа у праху, јаја у праху, месних бујона, беланчевина из соје..) Омогућава сушење материјала са високим садржајем влаге, при великим брзинама сушења. Због кратког времена контакта захтева се загрејани ваздух високе температуре и до 300°C , јер сушење траје свега неколико секунди.

Влажан материјал се распршује у ситне честице (капи), атомизује се помоћу атомизера (слика 12) (распршивача). То је могуће на неколико начина:

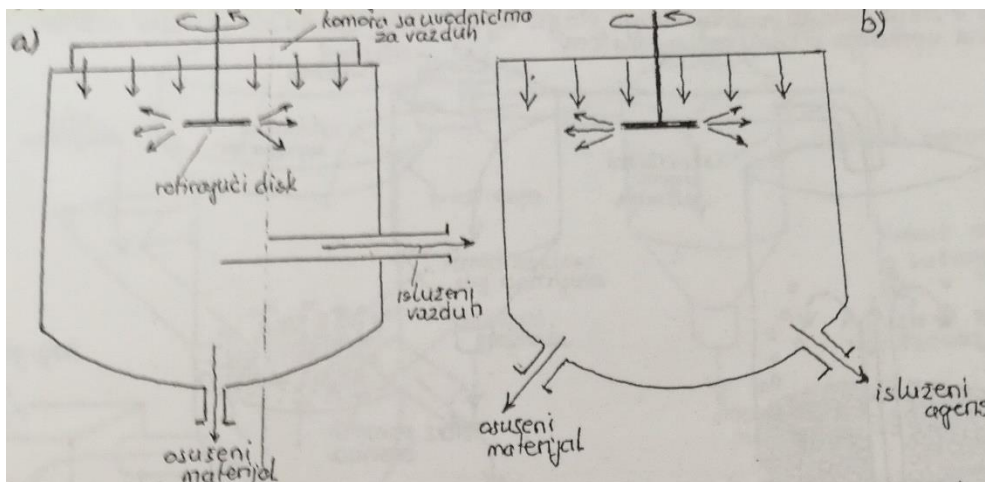
- а) Притисним млазницама, где се кроз узани отвор млазнице, под великим притиском истискује полазна смеша у ситне честице или капи;
- б) Пнеуматским млазницама;
- в) Ротирајућим дисковима, који се okreћу великом брзином ($20\,000\text{ o/min}$), при великим периферним брзинама, као и центрифугалне силе и већег су капацитета од притисних. Када се материјал преведе у честице (величине микрометра и нанометра) оне имају знатно повећану контактну површину, чиме се поспешава и убрзава сушење.



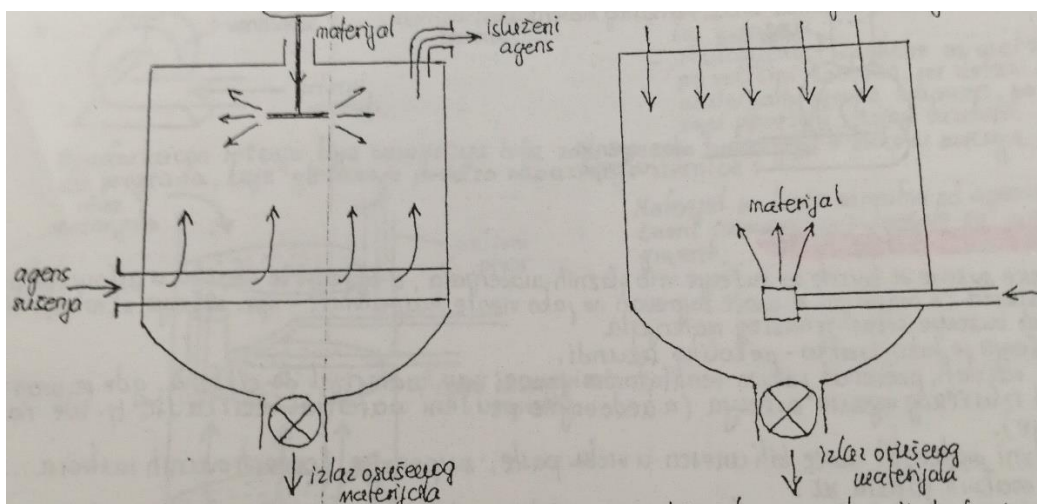
Слика 12. Начини распршавања материјала

Могућа су техничка решења у којима се остварује истосмеран (слика 13) и супротносмеран (слика 14) ток материјала и ваздуха за сушење. Осушени материјал се обавезно одводи у циклонски сепаратор. Недостаци овог начина сушења:

- Мала запреминска испуњеност уређаја,
- Недовољна искориштеност топлоте агенса за сушење,
- Неопходно је да постоје апарати за сепарацију (циклони, филтри).



Слика 13. Спреј сушаре са истосмерним током

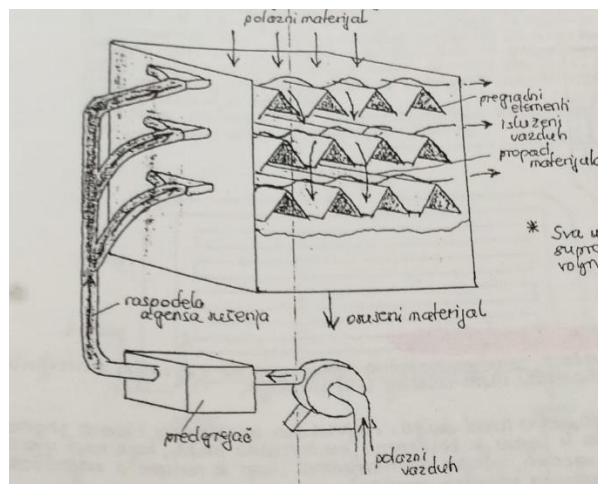


Слика 14. Спреј сушаре са супротносмерним током

10. Гравитационе сушаре за сушење ратарских култура (слика 15)

Примењују се за сушење кукуруза, пшенице, јечма. Великог су капацитета (50t/h) и обично се налазе у склопу силоса.

Конструисане су као високи цилиндрични торњеви издељени по висини на сегменте у којима се налазе одговарајући геометријски облици (у виду пирамида), који обезбеђују довољно задржавање материјала и бољу расподелу агенса за сушење. Агенс за сушење се може враћати поново у сушару, услед недовољне искориштености, уз поновно догревање.



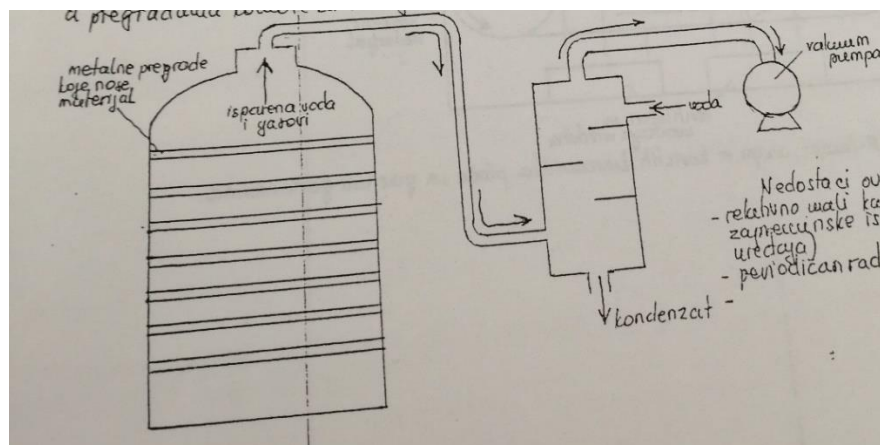
Слика 15. Гравитационе сушаре за сушење ратарских култура

II. КОНДУКТИВНЕ СУШАРЕ

Код кондуктивних сушара и градијент температуре и градијент концентрације су истосмерно оријентисани. Језгро материјала је на вишој температури од површине материјала, па се остварује боље сушење.

1. Вакуум сушаре (слика 16)

Вакуум сушаре раде на подпритиску. И рад је периодичан. Вакуум пумпом се остварује подпритисак чиме се из простора за сушење уклања ваздух и испарена вода. Добрим дихтовањем уређаја је искључен контакт материјала са ваздухом (па нема оксидационих промена) Загревање се врши на релативно ниским температурама, а осушено воће и поврће је високог квалитета. Остварује се велика брзина сушења због истосмерних градијената температуре и концентрације. Вакуум пумпа се периодично укључује у рад да би се уклонили некондензујући гасови и издвојена пара. У преградама коморе за сушење налазе се електрични грејачи (или се убацује прегрејана пара).

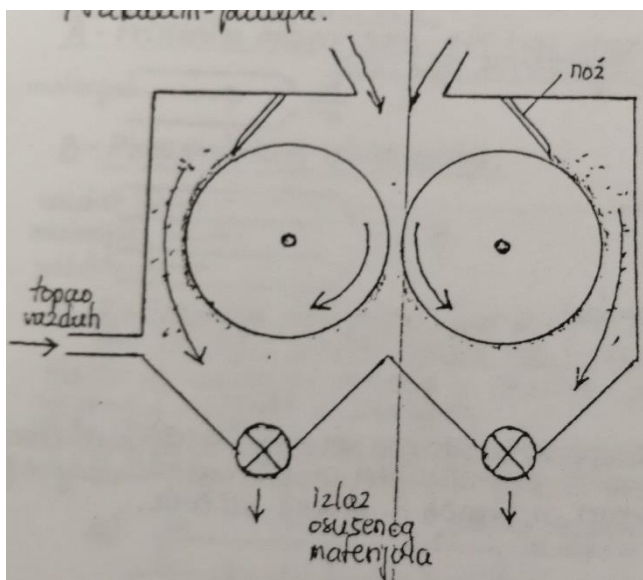


Слика 16. Вакуум сушаре

2. Сушаре са грејним ваљцима (слика 17)

Сушара са грејним ваљцима користи се за сушење пастозних и кашастих производа и материјала који садрже велику количину влаге на почетку сушења. Радни део сушаре чини комора са паром ваљака, хоризонтално постављеним један изнад другог, који су изнутра грејани воденом паром. Ваљци се обрћу у супротним смеровима прихватајући на полазну површину полазни материјал који се осуши пре него што ваљак обрне пун круг, а осушени материјал са ваљка скида статични нож. У комору се може увести и прегрејани ваздух, па се сушење одликује и конвективном компонентом.

Кондензована течност се уклања из унутрашњости ваљака. Може се прикључити и вакуум пумпа.



Слика 17. Сушаре са грејним ваљцима

3. Сублимационо сушење – лиофилизација (слика 18)

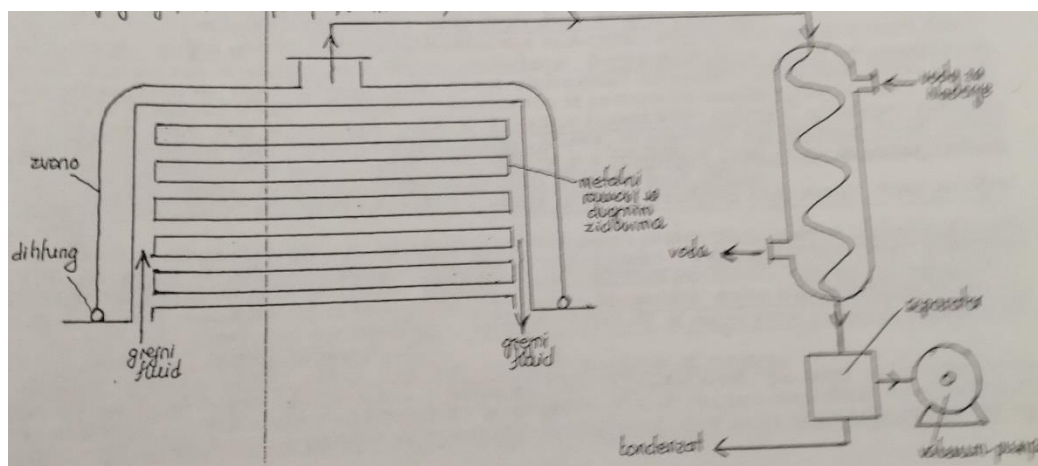
Овај начин сушења је релативно нов и ретко се користи у прехранбеној технологији јер је скуп и користи се за сушење изузетно квалитетних материјала. Процес сушења иде у неколико фаза.

Влага у материјалу се у припремном делу процеса преводи у чврсто стање (лед, кристали), па се у другом делу процеса лед сублимацијом преводи у пару (на ниским температурама (на ниским температурама уз високи вакуум- фазни прелаз из чврстог у гасовито).

Материјалу се топлота доводи кондуктивно, под високим вакуумом (вакуум пумпама које стварају подпритисак од 1,3 – 13,3 Ра. Материјал се загрева до релативно умерених температура (40-50 °С).

У припремној фази када је влага замрзнута, структура материјала је компактна, а у процесу сублимације (испаривања) заостали кристали леда не дозвољавају контракцију материјала, па материјал након сушења има непромењен облик, порозне структуре, са веома добром способношћу рехидрације. Због сниженог притиска знатно се смањене оксидационе промене материјала (и не нарушава се биолошка структура материјала)

Недостаци овог начина сушења су махом економске природе (висок утрошак енергије за припремну фазу, грејање, вакуум пумпе, вентилаторе.

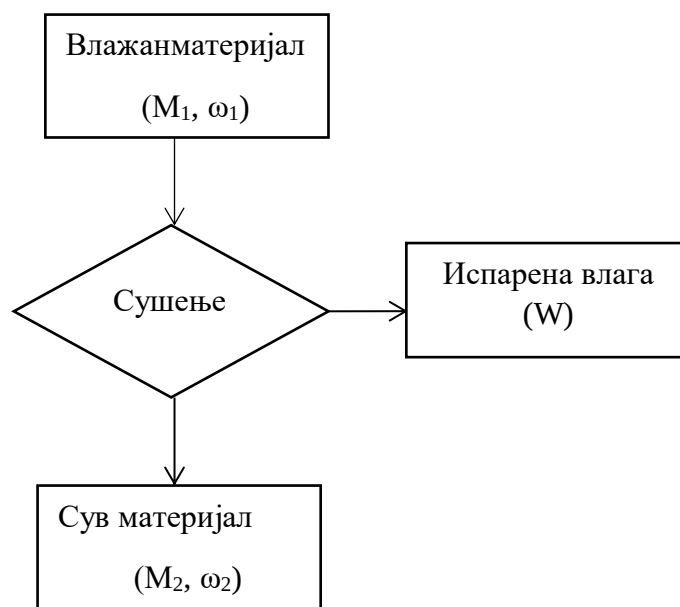


Слик 18.а Сублимационо сушење-лиофилизација

МАСЕНИ БИЛАНС СУШЕЊА И ДОРАДЕ ВОЋА И ГРОЖЋА

У доради воћа и грожђа основни прорачун представља масени биланс улазних и излазних компоненти. Технологију сушења воћа чини већи број технолошких операција од којих је сушење главна. У оквиру сваке технолошке операције дешавају се промене масе материјала. Основни циљ масеног биланса је да масе материјала на улазу у процес буду једнаке збиру маса излазних величина из процеса. Две најчешће технолошке операције у технологији дораде пољопривредних култура сушењем су сушење и рехидрирање. Током сушења влажност материјала се снижава, а самим тим му се снижава и маса за онолико колико је воде уклоњено из њега. Обрнут процес јесте рехидрирање где долази до упијања влаге од стране воћа односно долази до повећавања влажности и масе материјала сразмерно апсорбованој количини влаге.

Познавањем вредности влажности воћа пре и после технолошких операција сушења и рехидрирања, могу се уз помоћ одговарајућих релација израчунати масе материјала које улазе и излазе из процеса. Маса испарене (сушење) односно апсорбоване (рехидрирање) влаге. За масени биланс технолошке операције сушења (слика 19) користе се једначине.



Слика 19. Блок шема сушења

$$M_1 = M_2 \cdot \frac{100 - \omega_2}{100 - \omega_1}$$

$$M_2 = M_1 \cdot \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2}$$

$$W = M_2 \cdot \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2}$$

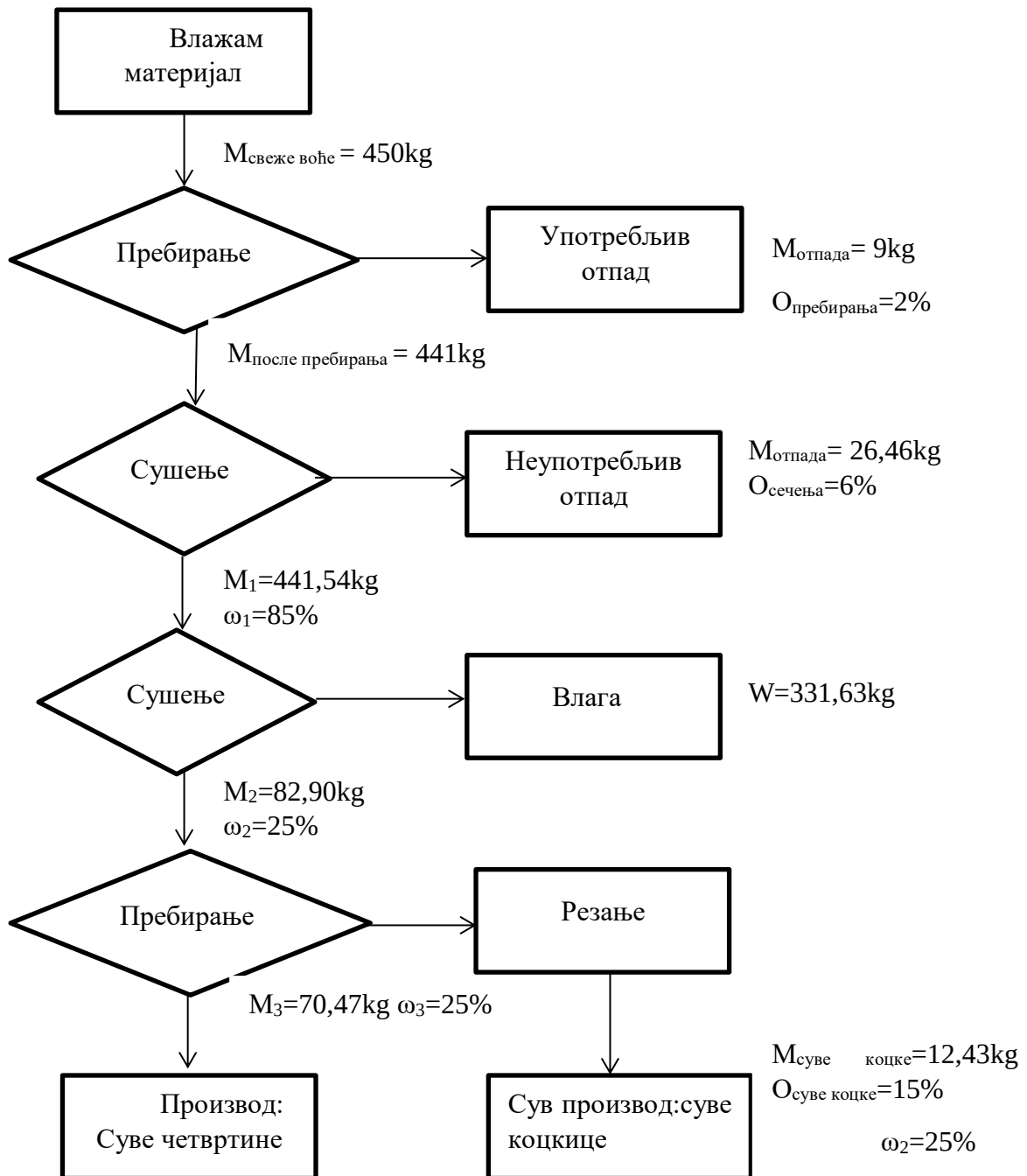
$$W = M_1 \cdot \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_1}$$

$$M_1 = M_2 + W$$

$$M_2 = M_1 - W$$

где је: M_1 - маса материјала за сушење [kg, kg/h], M_2 – маса материјала после сушења [kg, kg/h], ω_1 – влажност материјала пре сушења [%], ω_2 – влажност материјала после сушења, [%]; W – маса испарене влаге [kg, kg/h].

Ради лакшег сагледавања технолошког тока процеса прераде уобичајено је да се праве технолошке шеме редоследа технолошких операција са приказом масених биланса за сваку технолошку операцију. На слици 20. приказан је пример класичне технологије сушења воћа са масеним билансом улазних и излазних величина. Почетна сировина и излазне величине цртају се правоугаоницима, а технолошке операције код којих долази до промене масе материјала цртају се ромбовима.



Слика 20. Блок шем аоперације сушења са приказом масеног биланса (M_1 – маса пре сушења [kg], M_2 – маса после сушења [kg], M_3 – маса готовог производа суве четвртине [kg], ω_1 – влажност пре сушења [%], ω_2 – влажност после сушења [%], O – удео отпада [%], R – рандман [%])

1. Маса од 100 килограма свежег воћа припремљеног за сушење, влажности 85% суши се на складишну вредност од 20%. Израчунати масу произведеног сувог воћа и масу Познате вредности:

Маса свежег воћа припремљеног за сушење:

$$M_1 = 100 \text{ kg}$$

$$\text{Влажност свежег воћа: } \omega_1 = 85\%$$

$$\text{Влажност осушеног воћа: } \omega_2 = 20\%$$

Непознате вредности:

$$\text{Маса произведеног сувог воћа: } M_2 \text{ [kg]} = ?$$

$$\text{Маса испарене влаге у процесу сушења: } W \text{ [kg]} = ?$$

Прорачун:

Маса произведеног сувог воћа рачуна се помоћу једначине (11.2):

$$M_2 = M_1 \cdot \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2} = M_2 = M_1 \cdot \frac{100 - 85}{100 - 20} = 18,75 \text{ kg}$$

Маса испарене влаге у процесу сушења рачуна се помоћу једначине ():

$$W = M_1 \cdot \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2} = W = M_1 \cdot \frac{85 - 20}{100 - 20} = 81,25 \text{ kg}$$

Други начин израчунавања масе испарене влаге у процесу сушења је помоћу једначине ():

$$W = M_1 - M_2 = 100 - 18,75 = 81,25 \text{ kg}$$

Такође, маса испарене влаге у процесу сушења може се израчунати и помоћу једначине ():

$$W = M_2 \cdot \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_1} = W = M_2 \cdot \frac{85 - 20}{100 - 85} = 81,25 \text{ kg}$$

МЕРЕЊЕ ВЛАЖНОСТИ

Познавање вредности влажности пољопривредних култура је основа за пројектовање и управљање технолошким процесима сушења и дораде. Влажност пољопривредних производа дефинише се као однос масе влаге (W) и укупне масе производа (m). Рачуна се помоћу израза:

$$\omega = \frac{W}{m}$$
$$\omega = \frac{W}{m} \cdot 100$$

где је: ω - влажност - садржај влаге [kg/kg или %]; W – маса влаге у производу [kg];

m – укупна маса производа [kg]

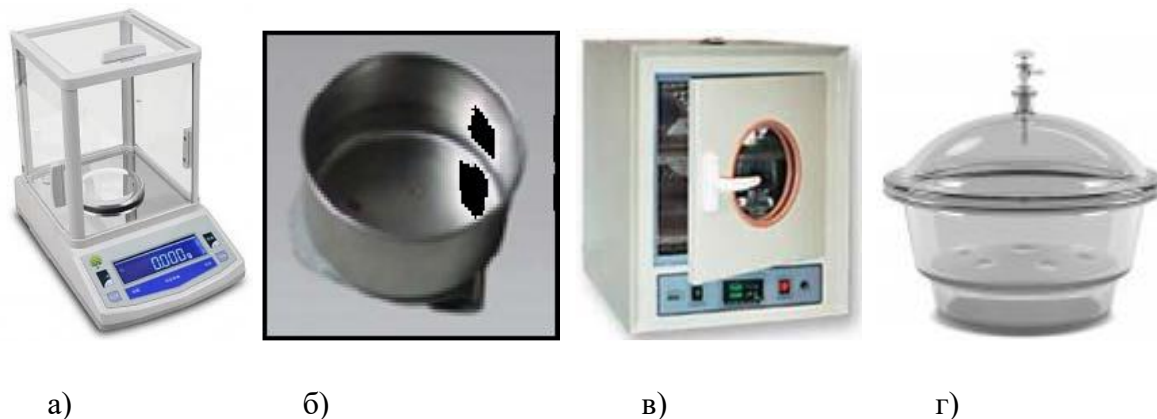
Укупна маса производа (m, [kg]) једнака је збиру масе влаге (W, [kg]) која се налази у њему и суве материје (m_{sm} , [kg]) па је:

$$m = W + m_{sm}$$

Овако израчуната влажност производа у односу на укупну масу назива се влажност изражена у односу на влажну основу.

Термогравиметријска метода мерења влажности

Најраспрострањенија метода одређивања влажности биоматеријала је термогравиметријска метода. За термогравиметријску методу потребна је : аналитичка вага прецизности $\pm 0,001\text{g}$; металне посуде са поклопцем од нерђајућег челика; сушница са вентилатором и термостатом за регулисање температуре ваздуха; ексикатор (стаклено звоно) са силикагелом. Потребан прибор је приказан на слици 21.



Слика 21. Опрема за термогравиметријску методу

а) - аналитичка вага, б) - металне посуде са поклопцем, ц) - сушница, д) - ексикатор

Поступак рада је следећи, у чисту и осушену металну посуду са поклопцем познате масе, одмери се 3 - 5 g припремљеног узорка (уситњен узорак). Посуда са узорком, без поклопца, се ставља у сушницу и суши један сат на температури ваздуха од 105°C , након чега се хлади један сат у ексикатору, а затим се мери маса посуде са поклопцем. Поступак се понавља сваки следећи сат све док маса између два узастопна мерења не буде једнака. Разлика маса посуде са узорком пре и након сушења, представља масу испарене влаге (W , [g]). Разлика маса посуде са осушеним узорком и масе саме посуде без узорка представља масу суве материје узорка (m_{sm} , [g]). Када се измере и прикупе сви потребни подаци израчуна се влажност материјала помоћу приказане једначине.

$$\omega = \frac{(m_0 - m_1)}{m_0} \cdot 100$$

где је: ω - влажност [%], m_0 – маса узорка биоматеријала пре сушења [g], m_1 – маса узорка биоматеријала после сушења [g].

Аутоматски термогравиметријски уређај за мерење влажности

Поред референтних (стандардних) метода за мерење влажности које се базирају на термогравиметрији развијени су аутоматски уређаји који раде на истом принципу. Ови уређаји су развијени због потребе да се скрати време мерења влажности методом сушења (хлађење узорка, мерење масе, досушивање, поновно хлађење, поновно мерење масе, израчунавање итд.).

Назив овог уређаја је инфрацрвени мерач влажности или скраћено IR (Infra Red) мерач влажности. Принцип рада се састоји из постављања припремљеног узорка зрна (исецканог, самлевоног) у алуминијумску посуду, а затим постављање у комору уређаја. У комори се налази аналитичка вага и грејно тело које ослобађа топлотну енергију у облику инфрацрвеног зрачења. Мерни систем уређаја континуално прати процес сушења мерењем масе узорка сваких 90 мс. Када се постигне задати критеријум искључивања - константна маса узорка, мерење је завршено. Процесор аутоматски израчунава разлику између почетне масе узорка и масе узорка на крају сушења и на дисплеју показује вредност измерене влажности.



Слика 22. Аутоматски инфрацрвени мерач влажности материјала

Физички смисао појма активност воде (a_w) је изражавање релативне количине слободне воде у ткиву која може послужити као основа за живот различитим непожељним микроорганизмима. Вредност активности воде су у распону од “1” за дестиловану воду до “0” за потпуно сув производ. Микроорганизми опстају при различитим вредностима a_w , испод одређене вредности њихова активност престаје. За сушено воће граница испод којих престаје активност микроорганизама је $a_w < 0,6$. Вредности a_w зависе од врсте воћног ткива, хемијског састава, структуре, влажности и температуре ткива.

Активност воде је дефинисана као однос парцијалног притиска водене паре на површини биоматеријала (p_m) и парцијалног притиска засићене водене паре над слободном површином воде (p_0).

$$a_w = \frac{p_m}{p_0}$$

где је: a_w – активност воде [-]; p_m – парцијални притисак водене паре на површини материјала [mbar]; p_0 - парцијални притисак засићене водене паре над слободном површином воде исте температуре као узорак [mbar].

Брзе, повољне и поуздане лабораторијско - аналитичке методе мерења a_w вредности су веома тражене у прехранбеној индустрији и у истраживачким лабораторијама за потврду квалитета и при избору услова складиштења намирница. Ово се посебно односи на намирнице у којима је контрола a_w вредности критична при одређивању микробиолошке активности и безбедности у које спада сушено воће и прерађевине од воћа.

Инструменти који се користе раде на различитим принципима: мерење притиска водене паре, хигрометар за одређивање тачке росишта, снижењем тачке мржњења, уређаји са сензорима формирани од жице превучене високо хигроскопном сољу итд. На слици 23 приказан је a_w – метар швајцарске фирме Novasina AG који ради на принципу мерења притиска водене паре.



*Слика 23. Уређај за мерење активности воде a_w – метар,
LabSwift – a_w , , Швајцарска, Швајцарска*

Принцип мерења се заснива на постављању уситњеног узорка за који се жели измерити a_w вредност у уређај. Претходно је потребно је постићи температуру материјала за коју се жели познавати a_w вредност, најчешће је то температура при којој ће производ бити ускладиштен. После извесног времена на дисплеју уређаја ће бити приказана измерена вредност активности воде и температура материјала. Уз познавање влажности материјала, све величине битне за складиштење су одређене.