



FKITMCMXIX

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet kemijskog  
inženjerstva i tehnologije



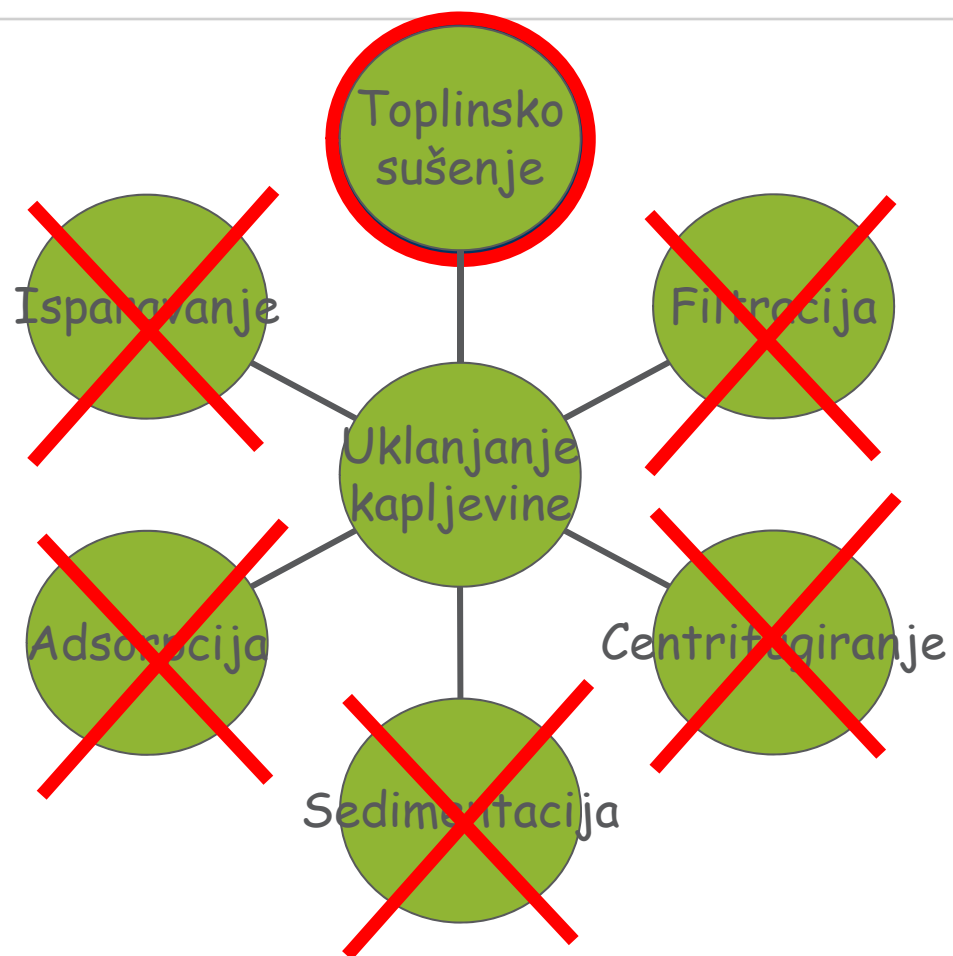
# SUŠENJE

# Definicija

---

Sušenje je toplinski separacijski proces uklanjanja vlage iz vlažnog materijala u svrhu dobivanja suhog proizvoda

- Proces prisutan u većini industrijskih grana
- prije sušenja potrebno je mehanički ukloniti što je više moguće vlage
  - filtracija (gravitacijska, vakuum, tlačna)
  - taloženjem
  - centrifugiranjem

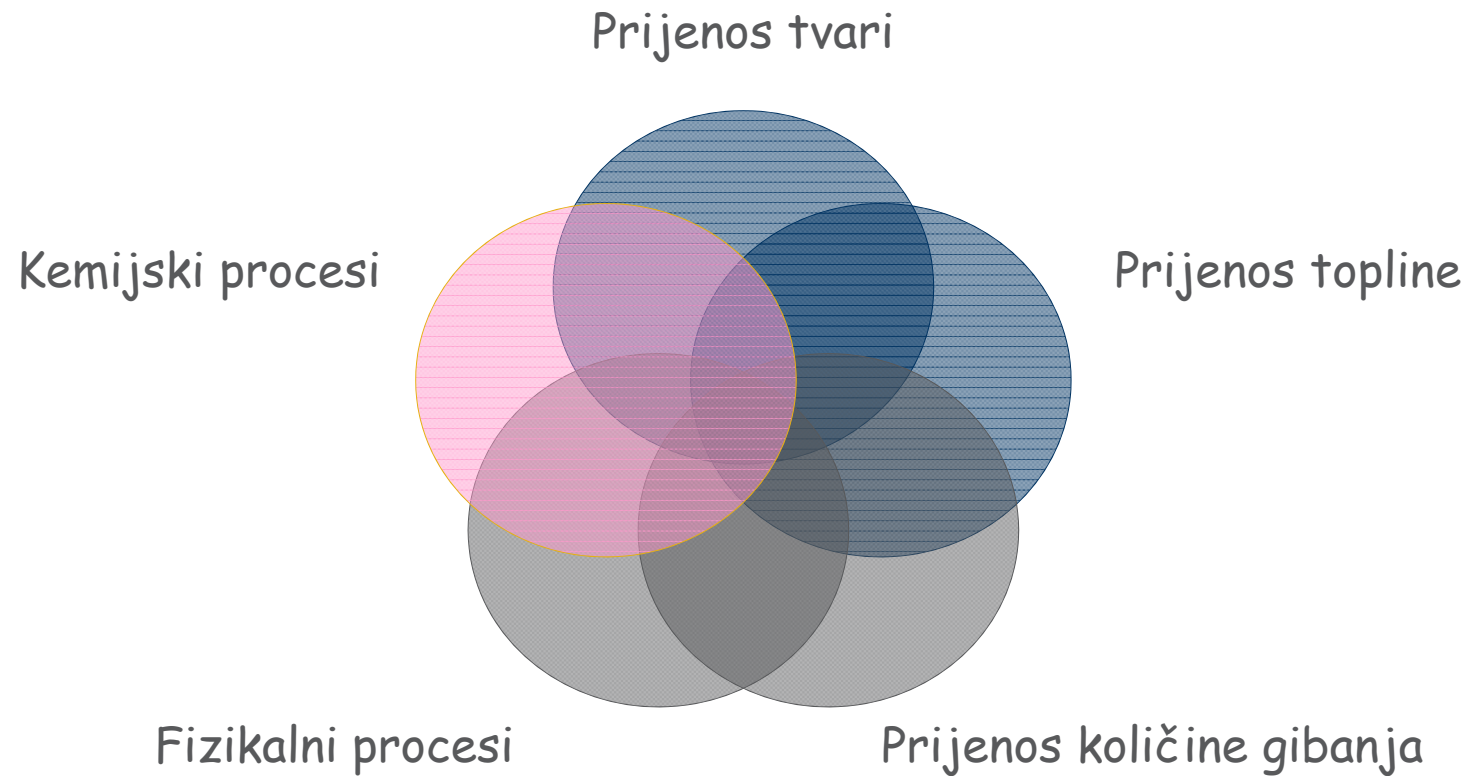


## Značajke procesa sušenja

---

- Veličina proizvoda (od  $\mu\text{m}$  do desetaka cm)
- Poroznost materijala (0-99.9 %)
- Vrijeme sušenja (od 0.25 s do 5 mjeseci)
- Kapacitet proizvodnje (od 0.1 kg/h do 100 t/h)
- Brzina (od 0-2000 m/s)
- Temperatura (od ispod trojne točke do iznad kritične točke kapljevine)
- Tlak (od mbara do 25 atm)
- Načini dovođenja topline

## Procesi koji se tijekom sušenja odvijaju



## VAŽNI POJMOVI I DEFINICIJE

### Temperatura isparavanja vlage

- konvekcijsko sušenje → površina potpuno prekrivena vlagom → sušenje neovisno o svojstvima materijala; brzina isparavanja se može odrediti iz brzine konvekcijskog prijenosa topline sa zraka na površinu materijala (temperatura površine =  $T_{MT}$  → adijabatsko)
- zračenje →  $T_{površine} > T_{MT}$
- ako materijal nije u kontaktu sa zrakom → neadijabatski uvjeti → temperatura vlage koja isparava odgovara temperaturi vrelišta kapljevine pri tlaku u sušioniku

## Temperatura suhog termometra

---

- stvarna temperatura smjese zraka i vlage
- $T_{MT}$

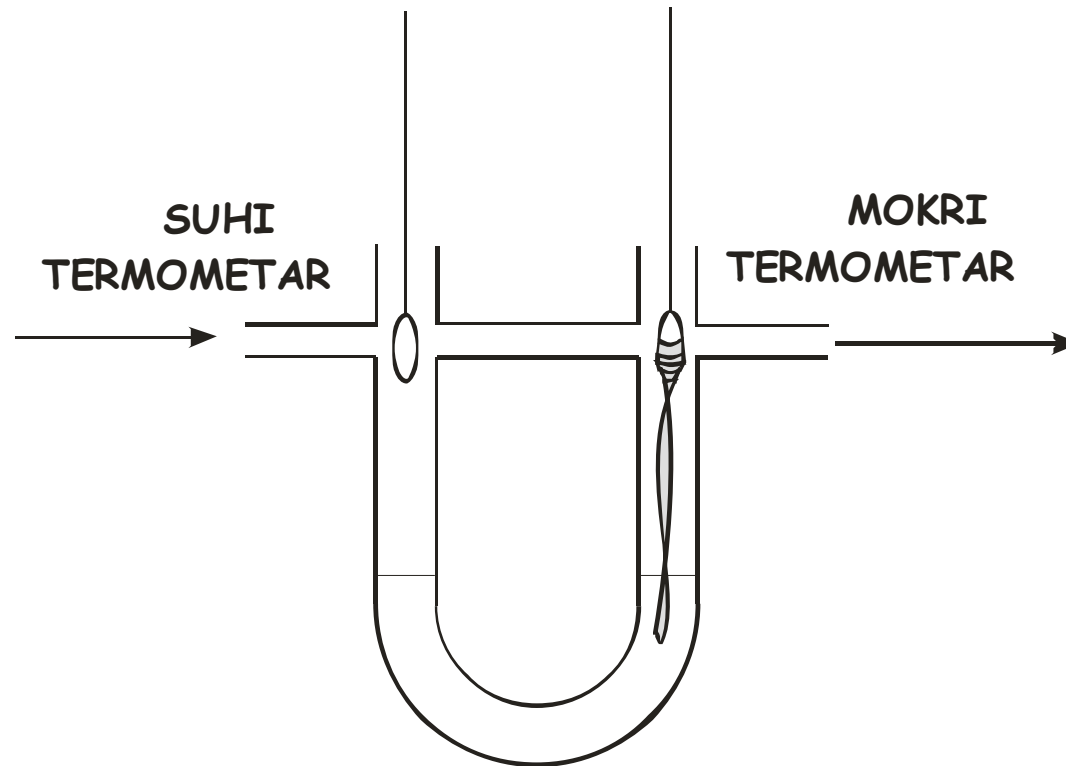
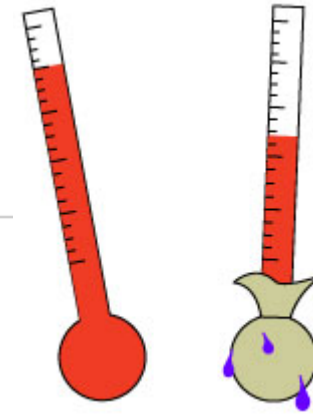
### Temperatura adijabatskog zasićenja

- ravnotežna temperatura koju je zrak postigao u kontaktu sa kapljevinoom koja isparava/ishlapljuje u adijabatskim uvjetima
- $T_{az}$

### Temperatura mokrog termometra

- temperatura koju bi imao zrak u danim uvjetima  $T$  i  $p$  kada bi bio zasićen vodenom parom
- $T_{MT}$

# Psihrometar







FKIT MCMXIX



## Rosište

- 
- temperatura kod koje nezasićena smjesa zraka i vode postaje zasićena hlađenjem uz  $Y=\text{const}$
  - $T_R$

## Apsolutna vlažnost zraka

---

- količina vodene pare prisutna u jediničnoj masi suhog zraka

$$Y = \frac{M_w}{M_g} \cdot \frac{p_w}{p_{uk} - p_w} = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_w^*}{p_{uk} - \varphi \cdot p_w^*}$$

## Relativna vlažnost zraka

---

- omjer parcijalnog tlaka vodene pare u smjesi sa zrakom i ravnotežnog tlaka para pri istoj temperaturi

$$\varphi = \left( \frac{p_w}{p_w^*} \right)_{T_{st}}$$

## Postotna vlažnost zraka

---

- omjer stvarne apsolutne vlažnosti zraka i apsolutne vlažnosti u stanju zasićenja

$$Y\% = \left( \frac{Y}{Y^*} \right)_{T_{st}}$$

## Specifični toplinski kapacitet vlažnog zraka

- toplina potrebna da se 1 kg vlažnog zraka povisi temperatura za 1 stupanj (K, °C)

$$c_{vz} = c_{sz} + c_v \cdot Y$$

## Specifični volumen vlažnog zraka

- Specifični volumen suhog zraka
- volumen koji zauzima suhi zrak kod temperature mokrog termometra i ukupnog tlaka,  $v_{sz}$ , m<sup>3</sup>/kg suhog zraka
- Specifični volumen vlažnog zraka u stanju zasićenja
- suma volumena jedinične mase suhog zraka i volumena vlage koji je potreban da se plina zasiti vodenom parom, pri temperaturi suhog termometra i P,  $v^*$
- Specifični volumen vlažnog zraka
- ukupni volumen suhog zraka i odgovarajuće količine vlage

$$v_{vz} = v_{sz} + (v^* - v_{sz}) \cdot Y\%$$

## Gustoća vlažnog zraka

---

$$\rho_{VZ} = \rho_{SZ} + \rho_W$$

$$\rho_{VZ} = \frac{3,48 \cdot 10^{-3}}{T} \cdot (p_{uk} - 0,378 \cdot \varphi \cdot p^*)$$

## Entalpija vlažnog zraka

---

- entalpija smjese zraka i vlage po kg suhog zraka pri temperaturi  $T_0$

$$h = c_{vz} \cdot (T - T_0) + \lambda_0^{isp} \cdot y$$

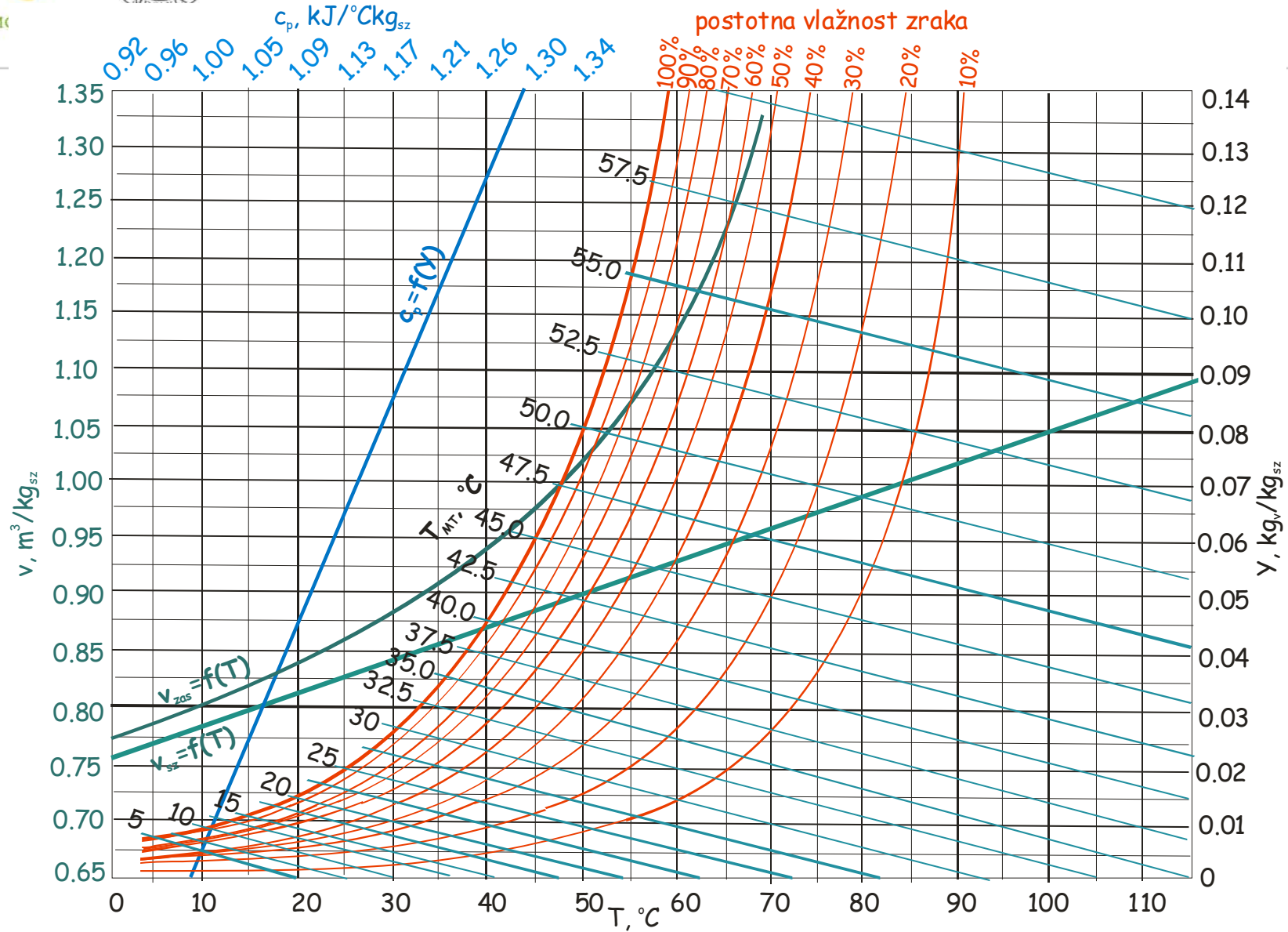




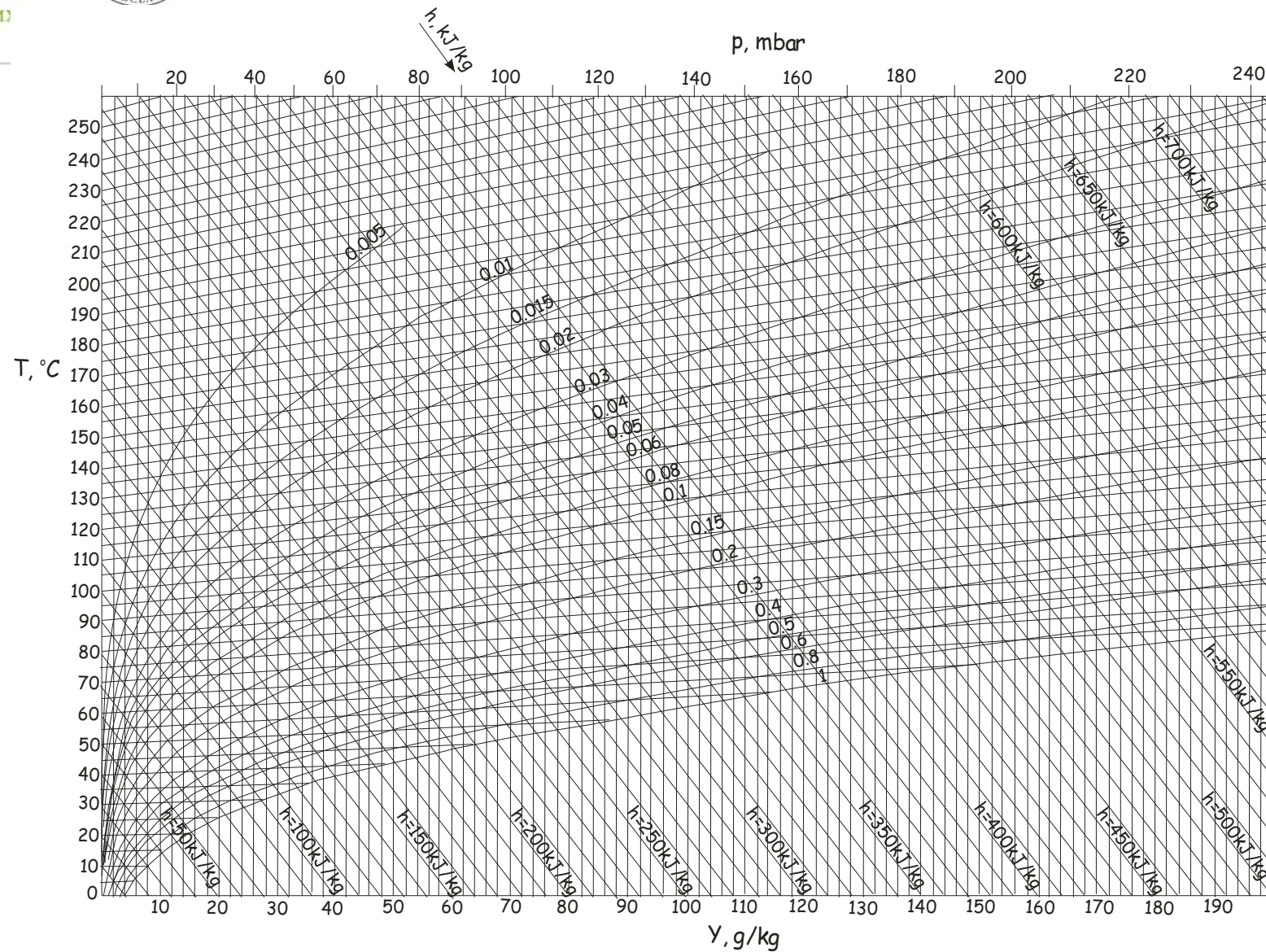
FKIT



# Y-T dijagram za zrak

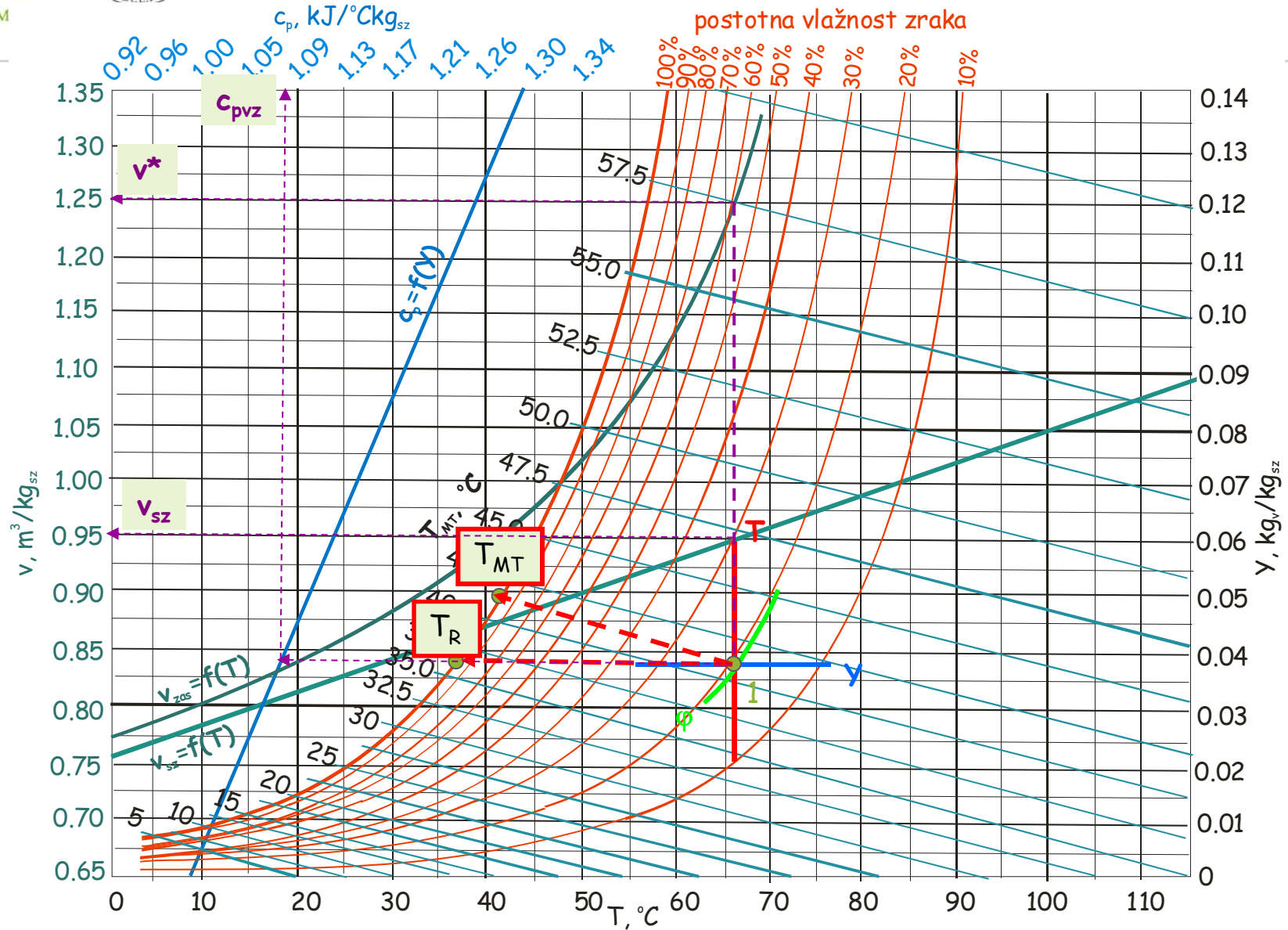


# h-Y diagram



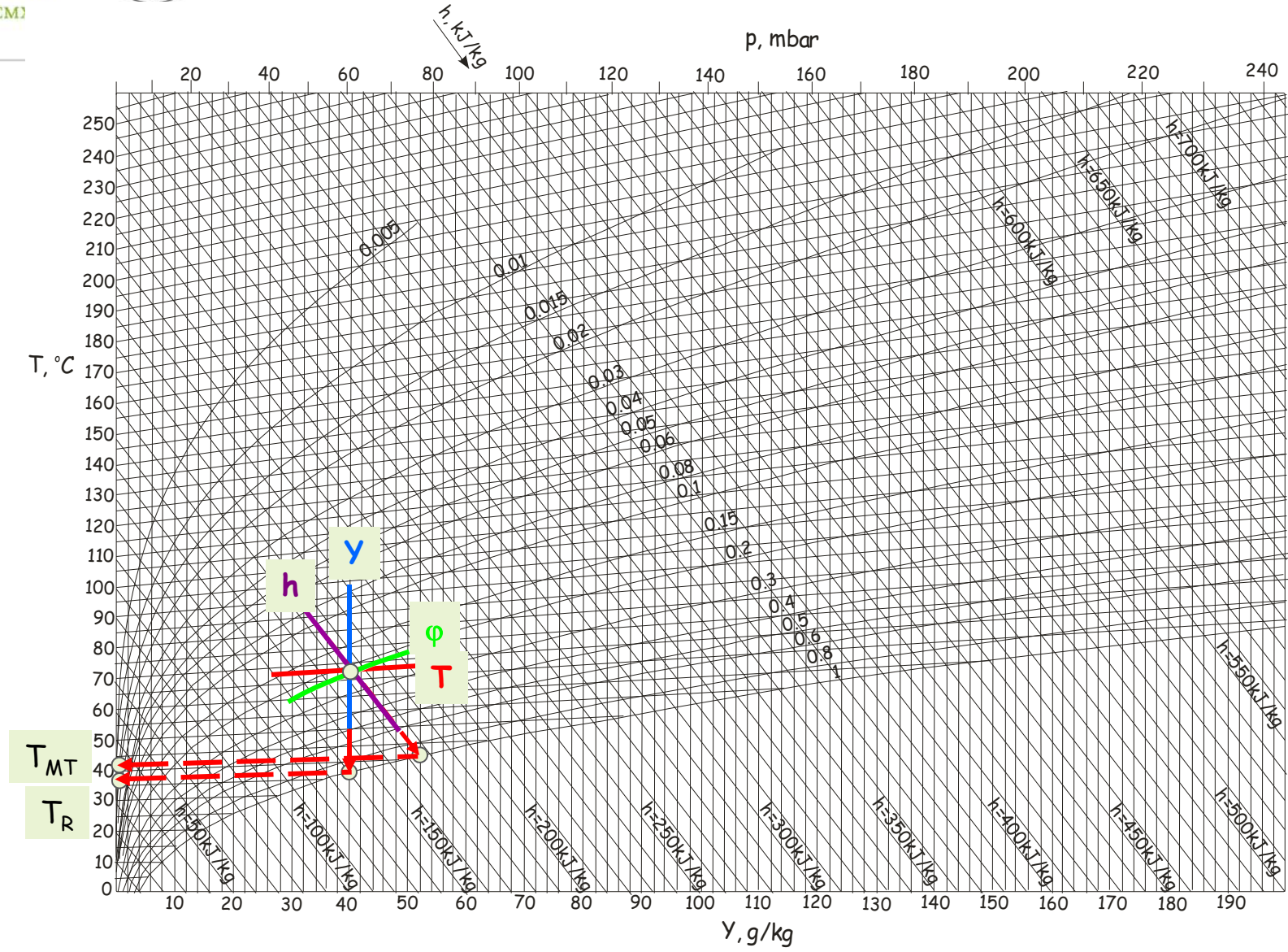


# Y-T dijagram za zrak





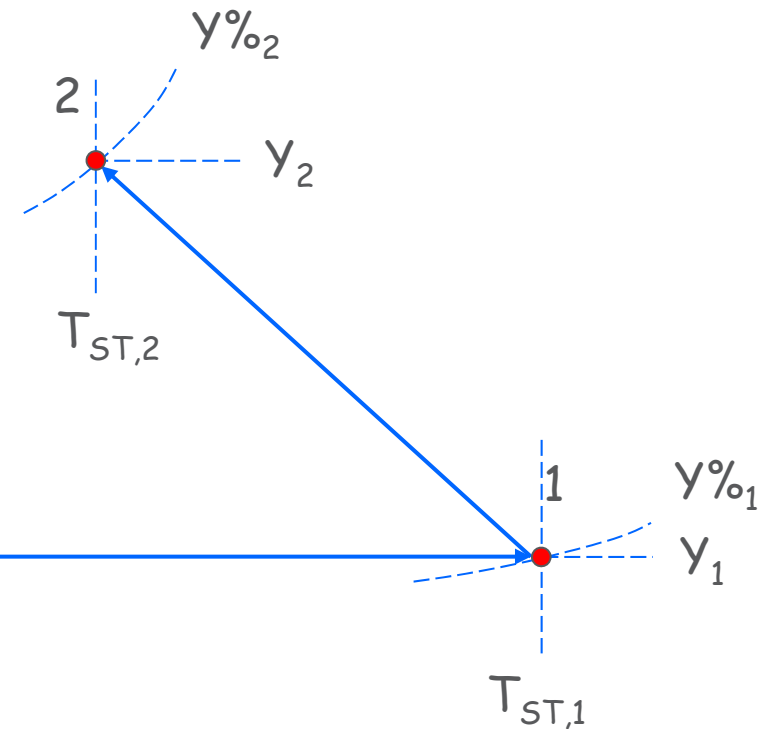
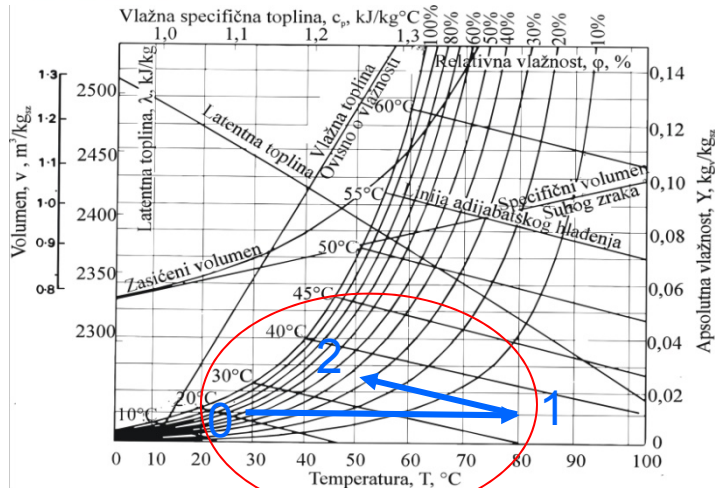
# h-Y diagram





FKIT MCMXIX

# prikaz procesa u Y-T dijagramu

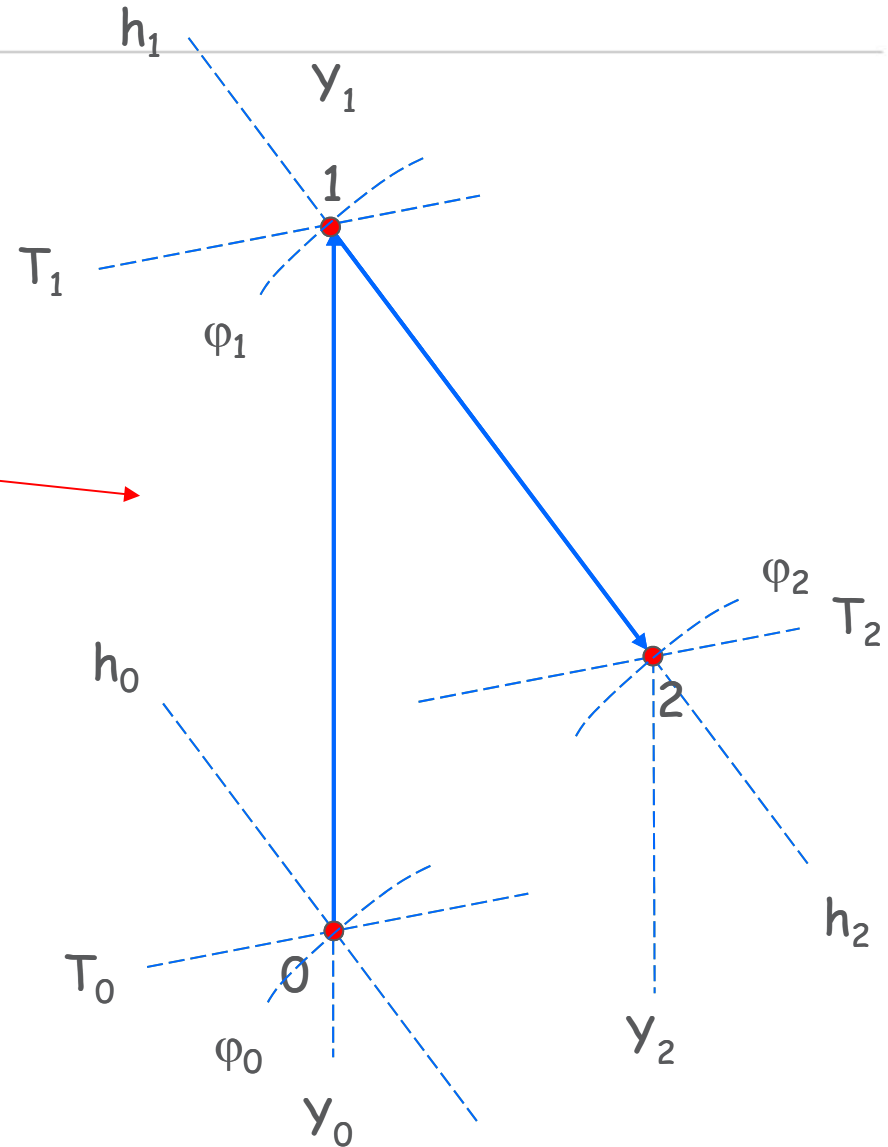
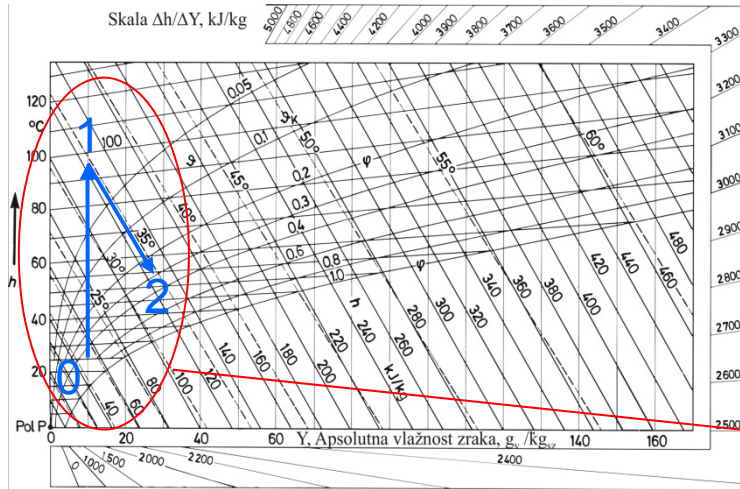




FKIT MCMXIX



# Prikaz procesa u h-Y dijagramu



- Protok suhog zraka kroz sušionik,  $m_{sz}$  (kg/s)

$$m_{sz} = m_v \cdot g$$

- specifični protok suhog zraka,  $kg_{sz}/kg_v$

$$g = \frac{1}{Y_2 - Y_0}$$

- Količina topline koja se troši u predgrijaču zraka,  $Q$  (W)

$$Q = m_{sz} \cdot (h_2 - h_0)$$

- Specifični utrošak topline za isparavanje vlage,  $q$  (J/kg)

$$q = \frac{Q}{m_v} = \frac{h_2 - h_0}{Y_2 - Y_0} = g \cdot (h_2 - h_0)$$



- Toplinska efikasnost sušionika

$$E = \frac{\lambda}{q}$$

- $\lambda$  – latentna toplina isparavanja vode kod  $T_{MT}$
- $q$  – specifični potrošak topline

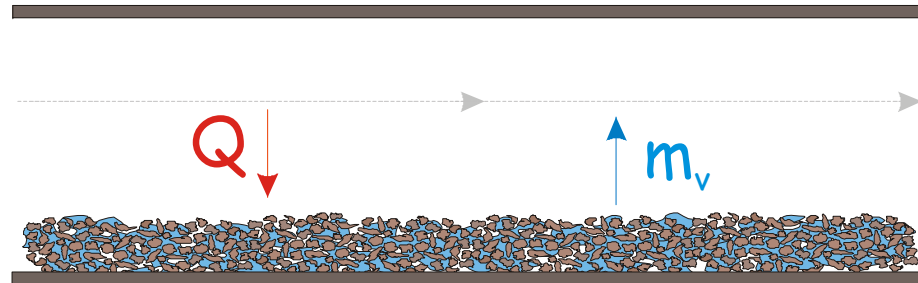


# Načini dovođenja topline

---

- Konvekcija
- Kondukcija
- Radijacija
- Mikrovalno zračenje

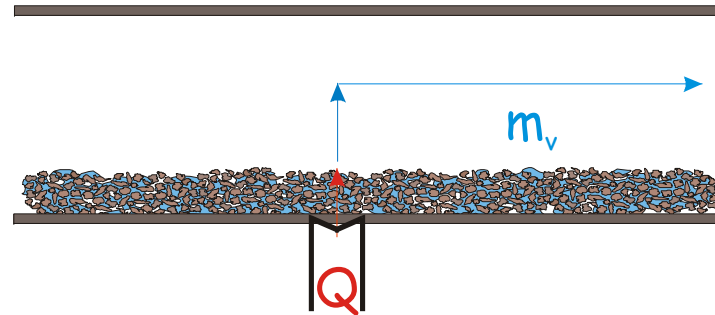
## Konvekcijsko sušenje



Toplina se dovodi pomoću zagrijanog zraka koji struji iznad površine vlažnog materijala .

Toplina potrebna za isparavanje konvekcijski se prenosi na izloženu površinu materijala, a isparena vlaga se odvodi pomoću sušnog medija.

## Kondukcijsko sušenje

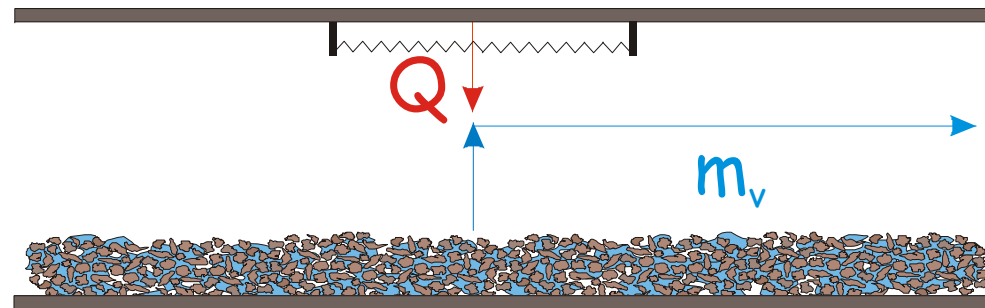


Toplina potrebna za isparavanje dovodi se preko grijanih površina koje mogu biti nepokretne ili pokretne, postavljenih u sušionik.

Isparena vlaga odvodi se pomoću inertnog plina koji služi isključivo kao sredstvo za odvođenje isparene vlage

Vakuum sušenje → materijali osjetljivi na povišene temperature

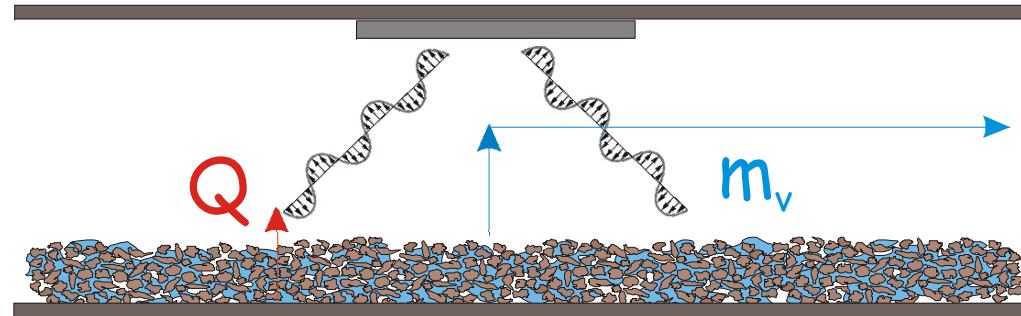
## Radijacijsko sušenje



Dio energije koju emitira izvor zračenja apsorbira se na površini materijala i na taj način zagrijava vlažni materijal i dolazi do isparavanja vlage.

Isparena vlaga odvodi se pomoću inertnog plina.

## Mikrovalno sušenje



Toplina se generira unutar materijala zbog interakcije elektromagnetskih valova i vode.

Jednoliko zagrijavanje cijelog volumena materijala.

## Sušenje zaleđivanjem (liofilizacija)

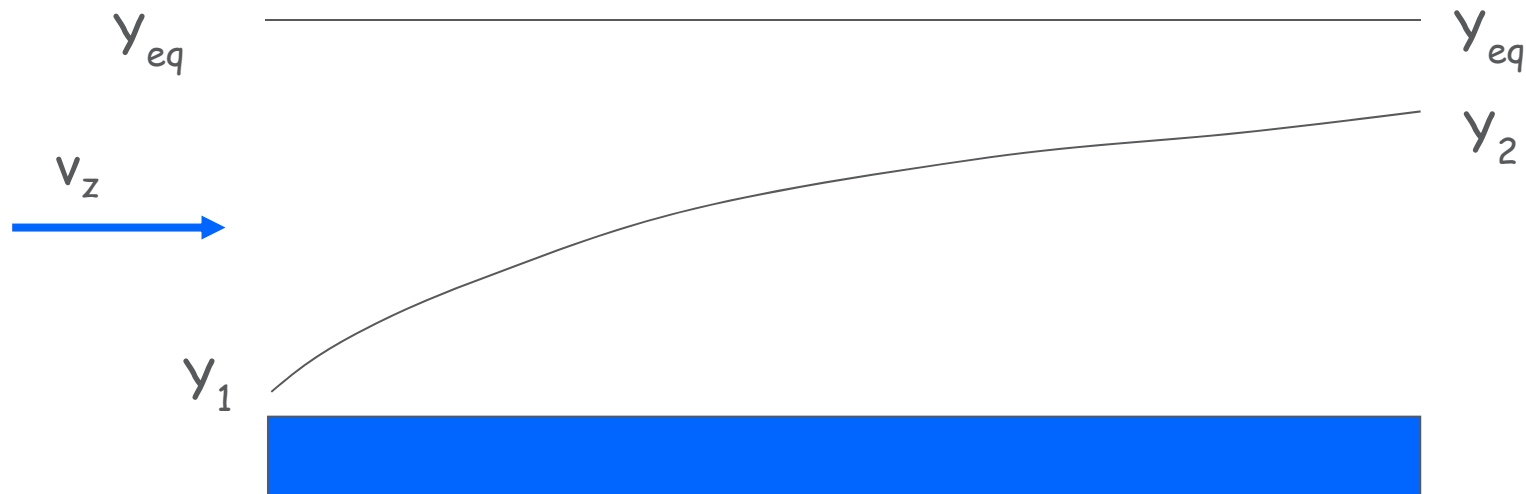
---

- vlaga se u materijalu prvo zaledi, hlađenjem materijala a zatim sublimira kondukcijskim, konvekcijskim ili radijacijskim zagrijavanjem
- kontrolirano zagrijavanje da se izbjegne taljenje vlage ili razgradnja materijala
- biološki i farmaceutski materijali, prehrambeni proizvodi
- porozni, ne skupljaju se
- kvalitetni proizvodi

# KINETIKA SUŠENJA

## Pokretačka sila procesa

- $\Delta X$  – sadržaj vlage materijala
- $\Delta Y$  – apsolutna vlažnost zraka
- $\Delta p$  – parcijalni tlak vodene pare





## Sadržaj vlage materijala

---

- količina vlage prisutna u jediničnoj masi suhog materijala
  - $X$ , kg (vode)/kg (suhog materijala)

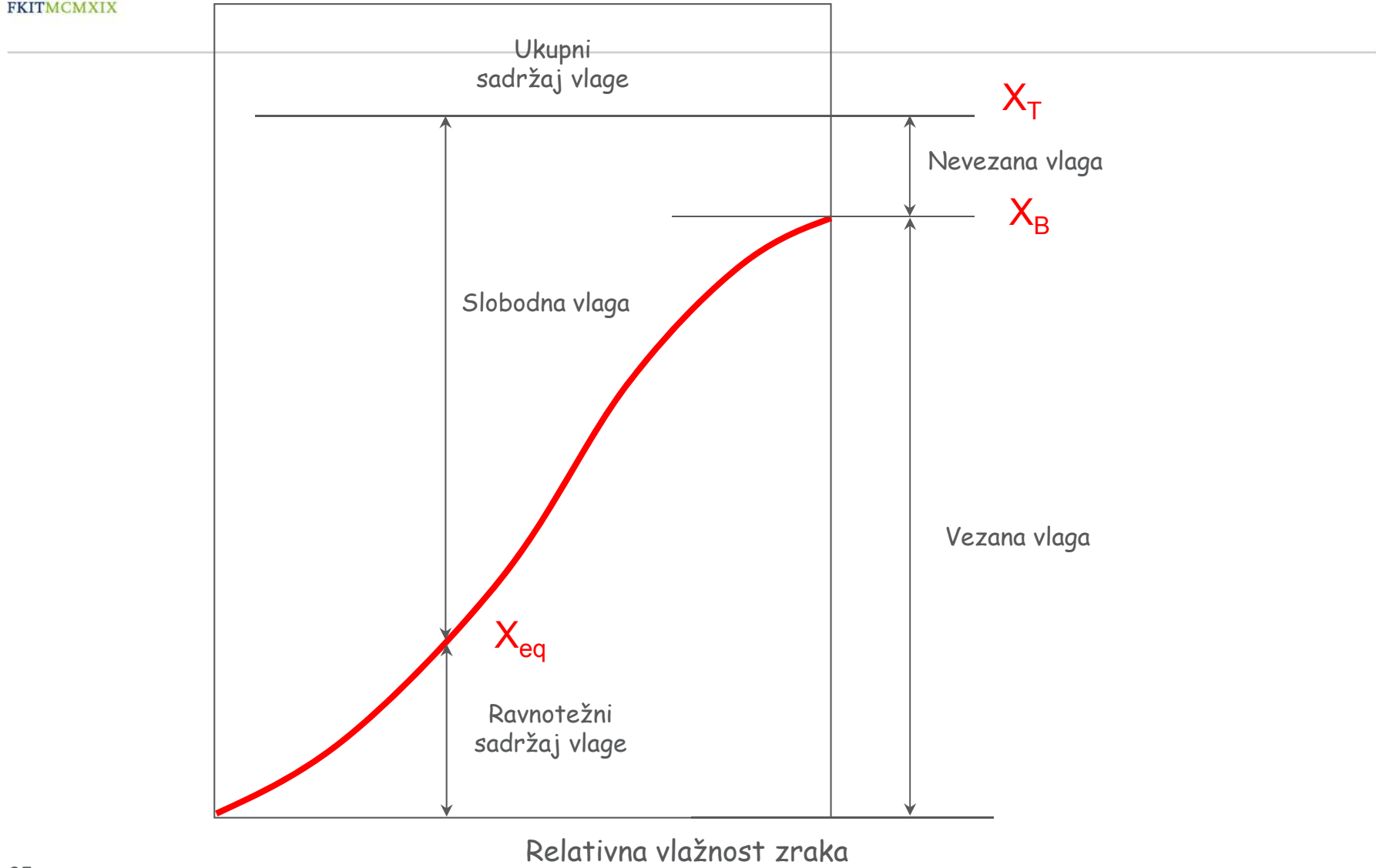
### Ravnotežni sadržaj vlage

- sadržaj vlage vlažne krutine u ravnoteži sa smjesom zraka i vlage, kod danog tlaka i temperature
- $X_{eq}$

## Ravnotežni sadržaj vlage

---

- vlažne krutine:
- praškaste ili kristalinične krutine → vlaga u međučestičnom prostoru
  - tijekom sušenja svojstva materijala ostaju nepromijenjena
  - brzo sušenje do niskih sadržaja vlage
- vlaknasti amorfnii materijali, gelovi → otapaju se ili zarobe vlagu
  - sušenje utječe na svojstva materijala
  - bubrenje-skupljanje
  - pažljiv odabir radnih uvjeta



## Vezana vlaga, $X_B$

---

- Ravnotežni sadržaj vlage materijala kod  $\varphi=100\%$

## Nevezana vlaga, $X_{NB}$

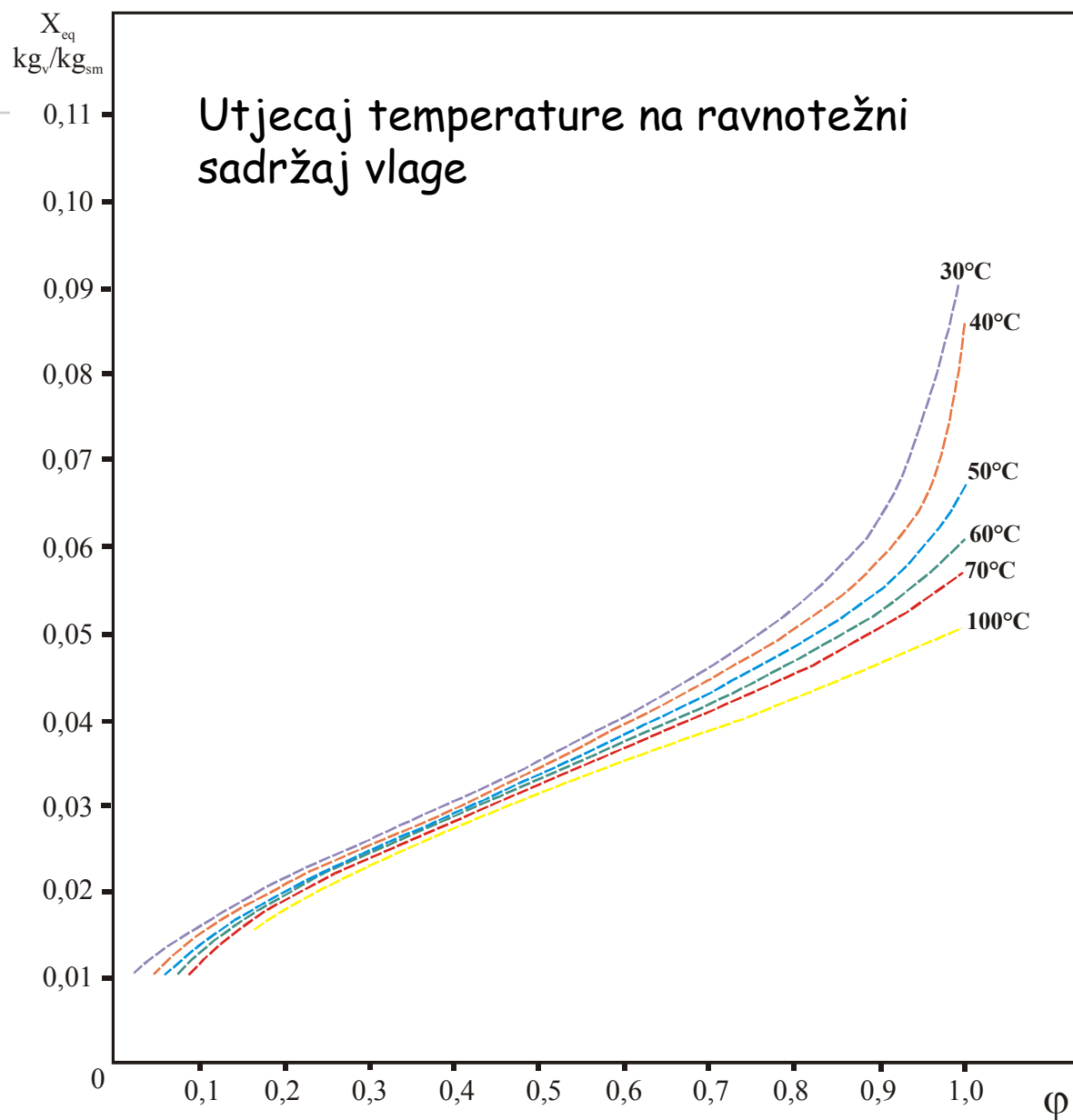
- Ako materijal ima ukupni sadržaj vlage veći od  $X_B$ , količina vlage u suvišku odgovara nevezanoj vlazi
- $X_T - X_B$



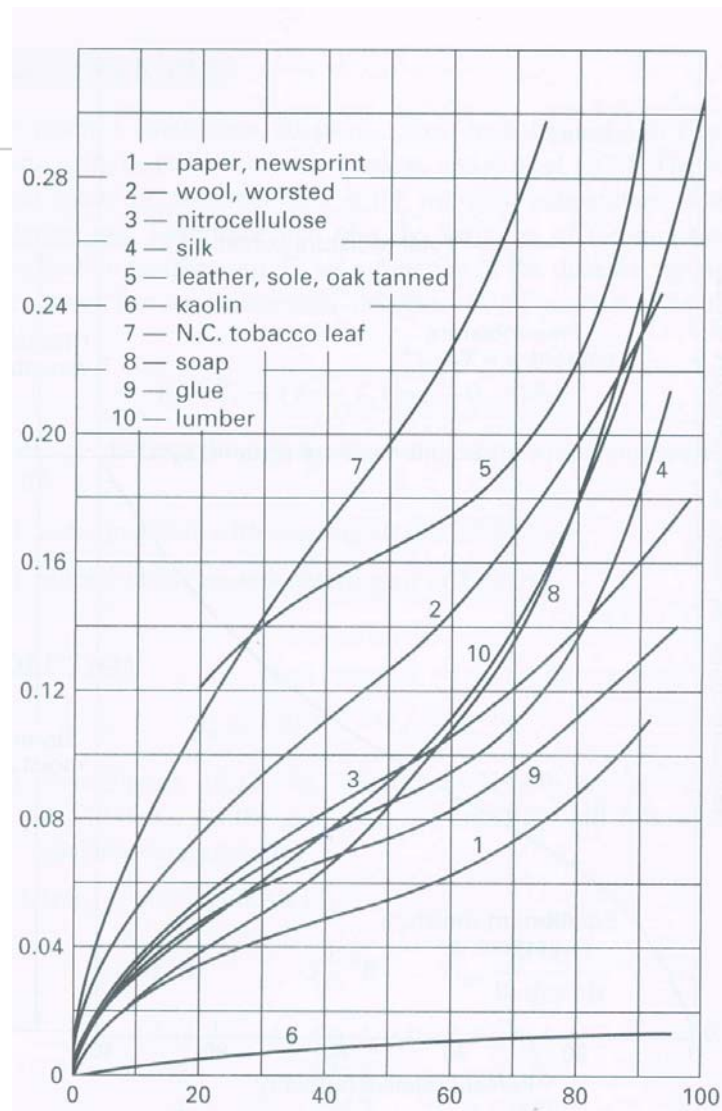
## Slobodna vlaga

---

- sadržaj vlage materijala veći od ravnotežnog koji se može ukloniti sušenjem
- $X_T - X_{eq}$

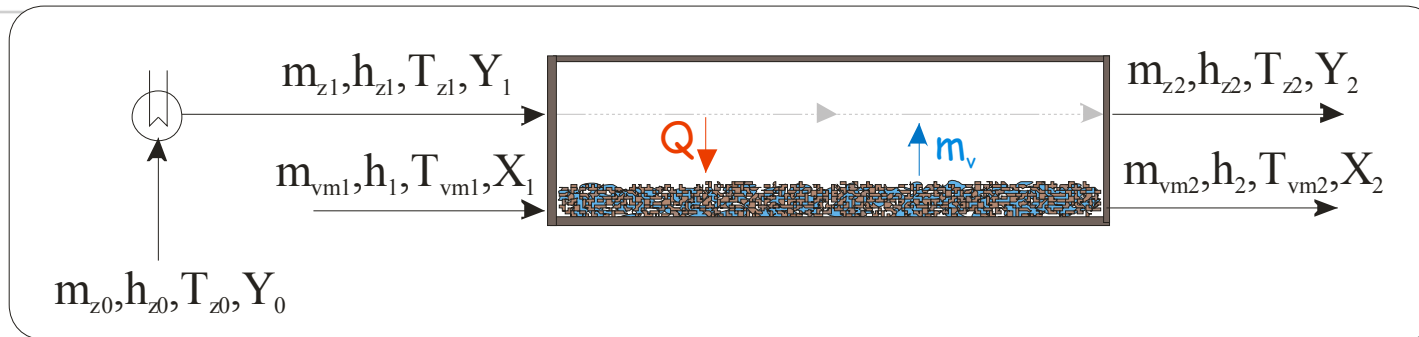


Ravnotežni sadržaj vlage materijala,  $X_{eq}$



Relativna vlažnost zraka, %

## Konvekcijsko sušenje



Eksperimentalno određivanje kinetičkih krivulja sušenja:

Gravimetrijski – materijal

$(m(t) \rightarrow X(t), T(t))$

Psihrometrijski – zrak

$(T_z(t), \varphi(t) \rightarrow Y(t))$



- U stacionarnom stanju:

$$X_0 \cdot m_{sm} + Y_0 \cdot m_{sz} = X_{kon} \cdot m_{sm} + Y_{kon} \cdot m_{sz}$$

- Iz toga slijedi brzina isparavanja vode:

$$m_v = m_{sm} \cdot (X_0 - X_{kon}) = m_{sz} \cdot (Y_{kon} - Y_0)$$

- U stacionarnom stanju:  $ULAZ = IZLAZ$

$$ULAZ = m_{sm} \cdot (H_{sm})_0 + X_0 \cdot m_{sm} \cdot (H_{vlage})_0 + m_{sz} \cdot (H_{sz})_0 + Y_0 \cdot m_{sz} \cdot (H_{vlage})_0$$

$$IZLAZ = m_{sm} \cdot (H_{sm})_{kon} + X_{kon} \cdot m_{sm} \cdot (H_{vlage})_{kon} + m_{sz} \cdot (H_{sz})_{kon} + Y_{kon} \cdot m_{sz} \cdot (H_{vlage})_{kon}$$

- Sređivanjem jednadžbe dobiva se:

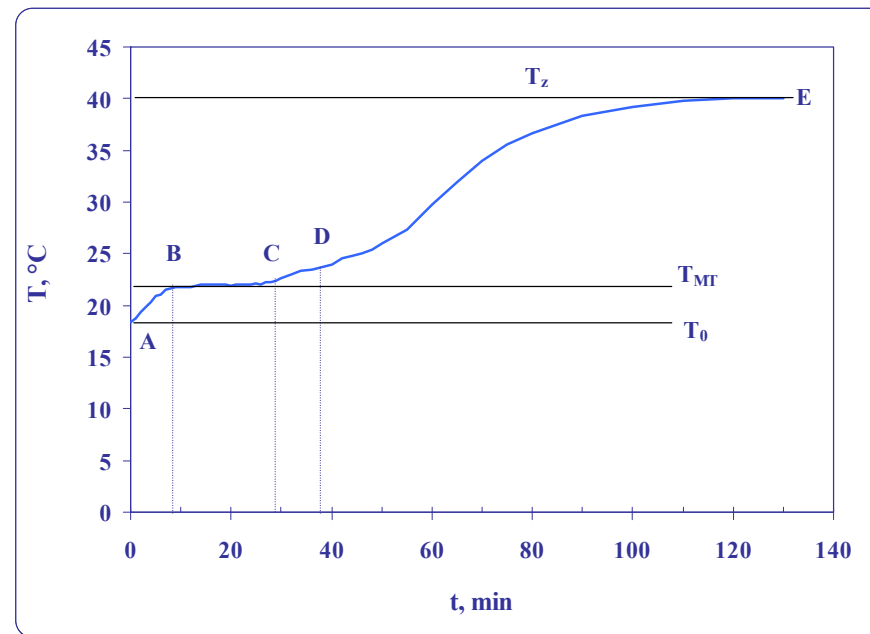
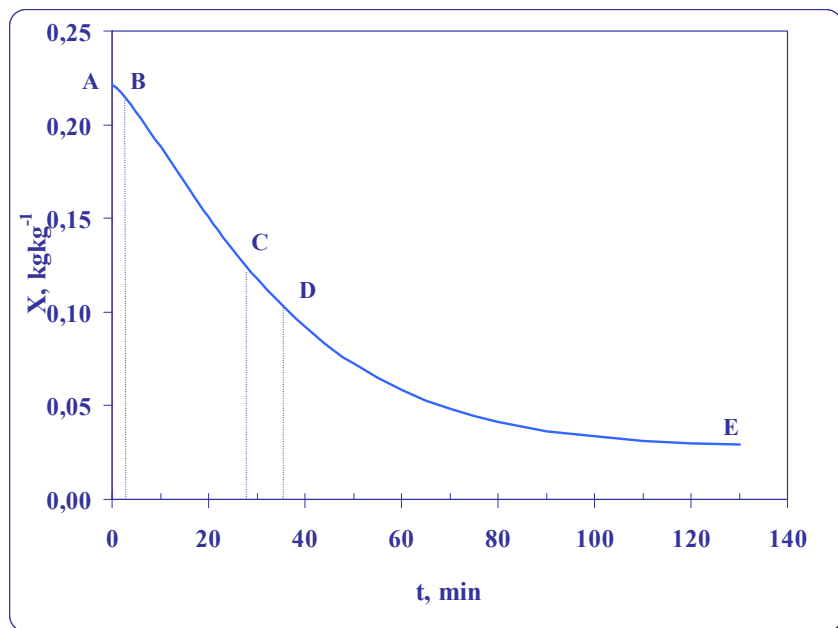
$$m_{sm} \cdot \left[ (H_{sm})_0 + X_0 \cdot (H_{vlage})_0 - (H_{sm})_{kon} - X_{kon} \cdot (H_{vlage})_{kon} \right] =$$

$$m_{sz} \cdot \left[ (H_{sz})_0 + Y_0 \cdot (H_{vlage})_0 - (H_{sz})_{kon} - Y_{kon} \cdot (H_{vlage})_{kon} \right]$$

# Krivulje sušenja

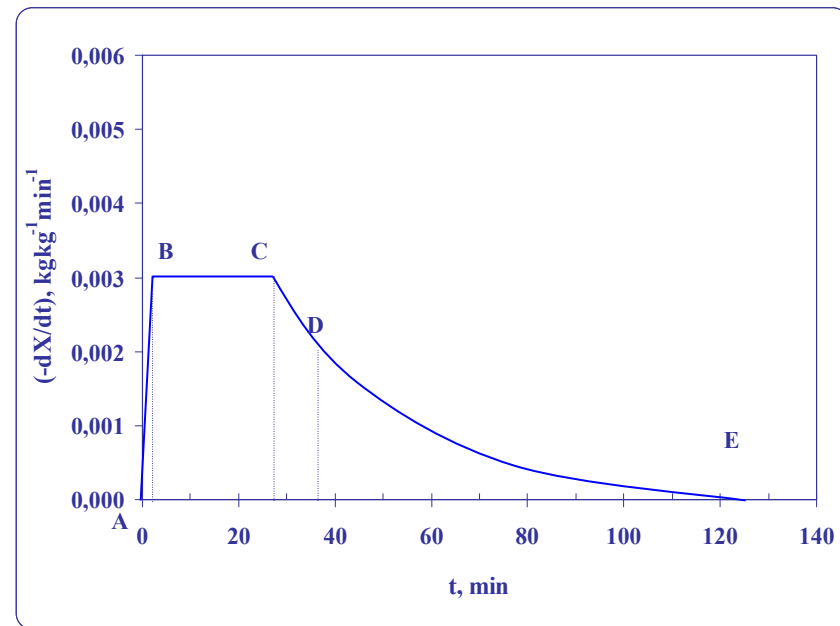
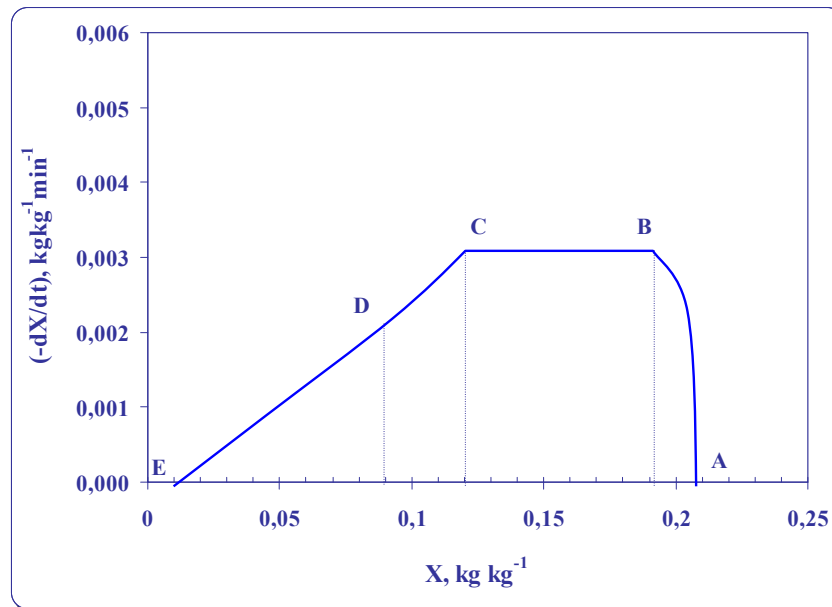
$X(t)$

$T(t)$

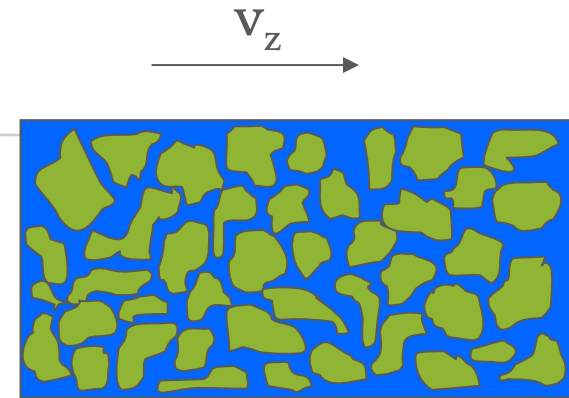


## Krivulje brzine sušenja

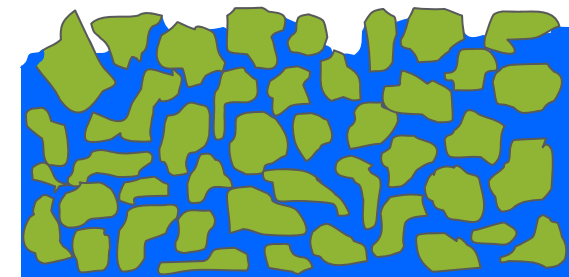
1. Period stabilizacije (A-B)
2. Period konstantne brzine sušenja (B-C)
3. Periodi padajuće brzine sušenja (C-D, D-E)



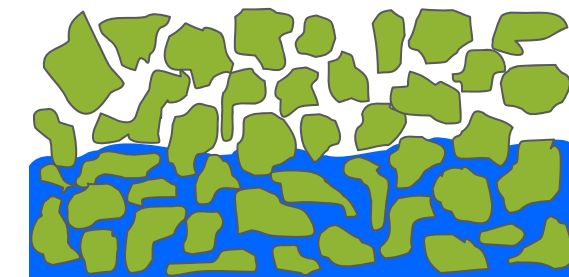
period konstantne brzine sušenja



prvi period padajuće brzine sušenja

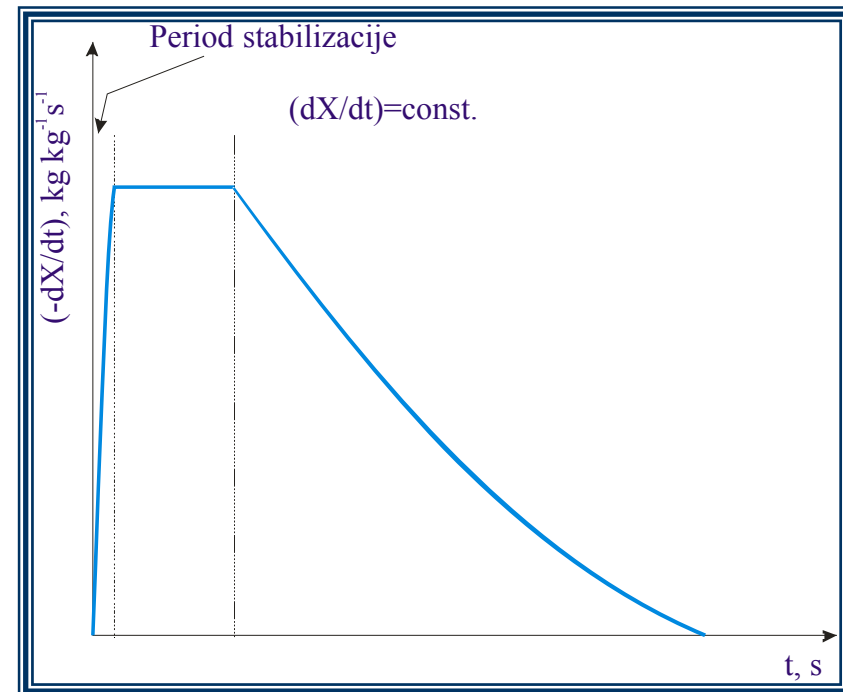
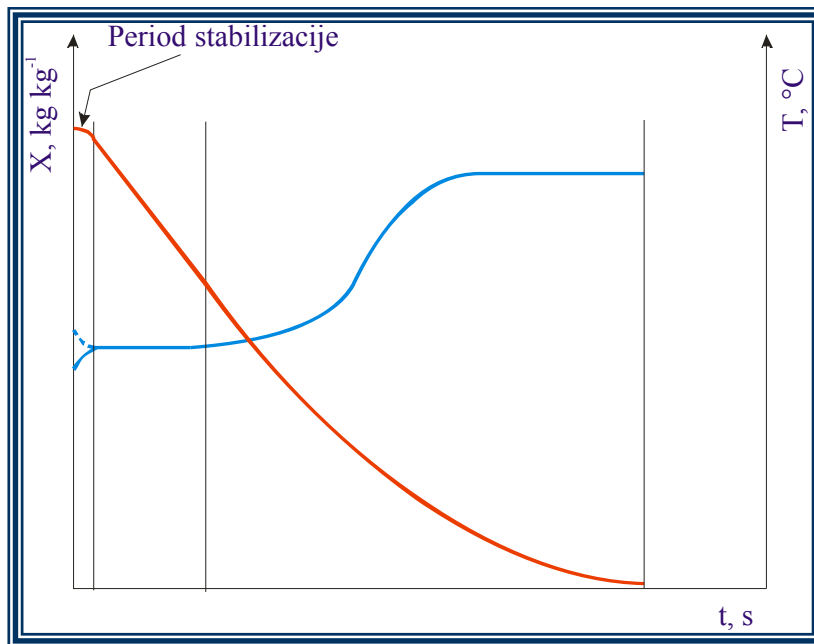


drugi period padajuće brzine sušenja



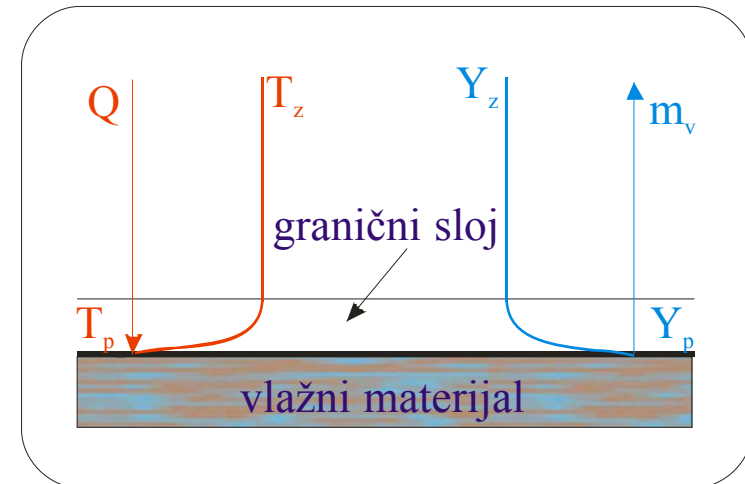
## Period stabilizacije

- Kratki period zagrijavanja materijala
- Vrlo mali gubitak vlage
- Temperatura materijala raste ili pada do  $T_{MT}$



## Period konstantne brzine sušenja

- tijekom sušenja period u kojem je, pri stalnim vanjskim uvjetima, brzina isparavanja sa površine materijala stalna
  - Površina materijala potpuno je prekrivena tankim slojem vlage
  - Na brzinu sušenja utječu svojstva zraka
- proces je pod kontrolom vanjskih uvjeta



$$\Delta T = \text{const}$$

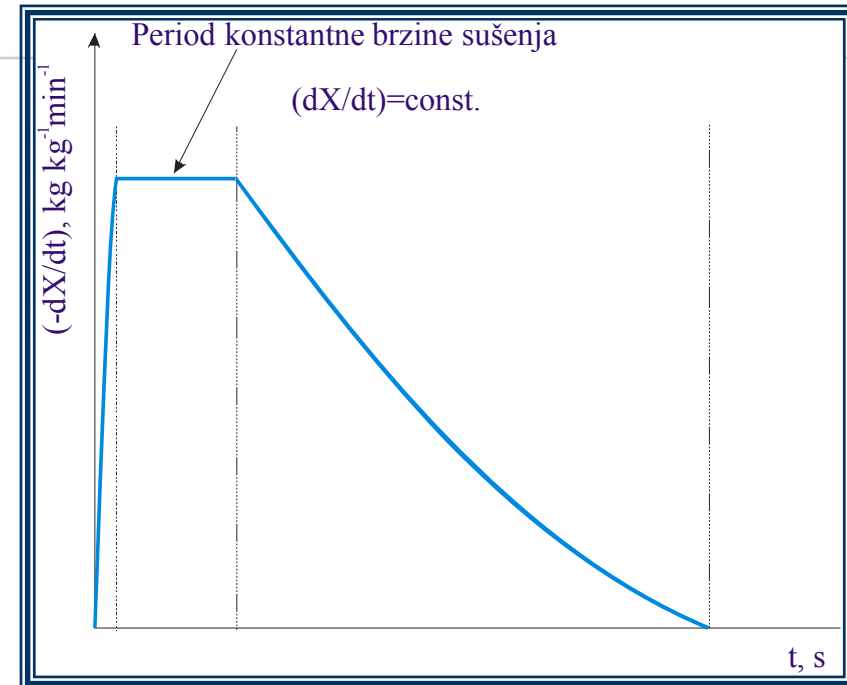
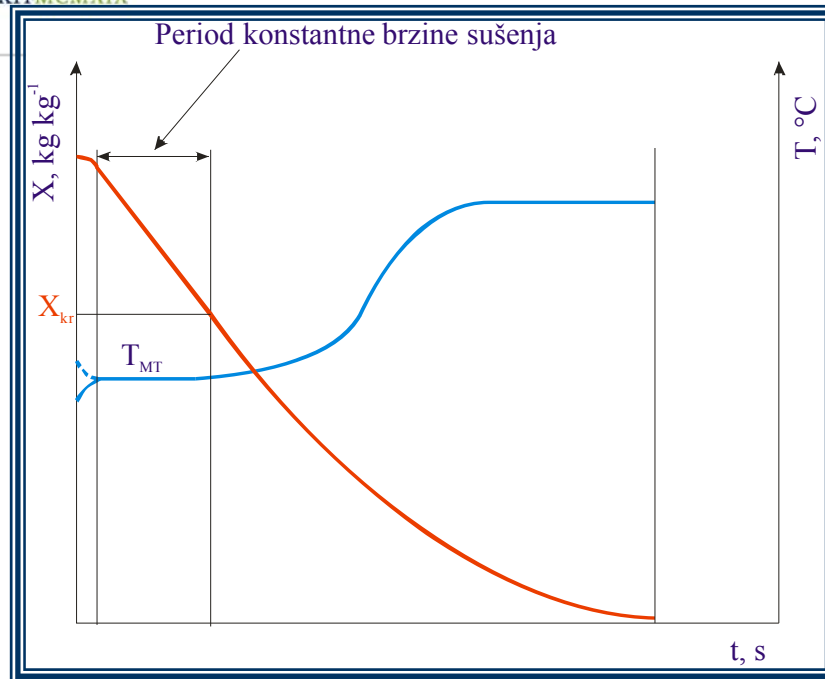
$$\Delta Y = \text{const}$$

$$\Delta X / \Delta t = \text{const}$$

$$\Delta p = \text{const}$$



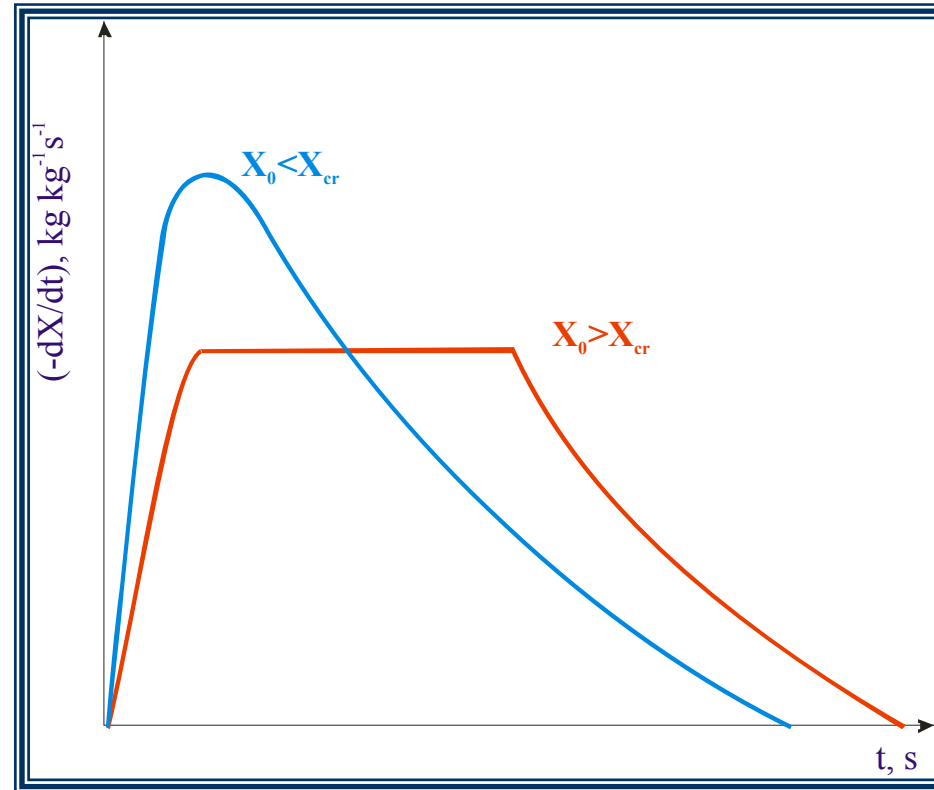
FKIT MCMXIX



- sadržaj vlage materijala linearno opada s vremenom do postizanja  $X_{kr}$
- temperatura materijala se ne mijenja  $T_{mat} = T_{MT}$
- brzina sušenja je konstantna

$T_{MT}$  – temperatura mokrog termometra  
 $X_{kr}$  – kritični sadržaj vlage





## Brzina sušenja

---

1. Na temelju provedenog eksperimenta sušenja

$$R = -\frac{m_{sm}}{A} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta t}$$

R – brzina sušenja (isparavanja),  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$

## 2. Procijenom koeficijenta prijenosa tvari, $k$

$$m_v = k \cdot A \cdot \Delta Y_{lm}$$

$$Sh = C \cdot Re^n \cdot Sc^{0,33} \cdot Gu^{0,135}$$

$$Sh = \frac{k \cdot L}{D} \quad Sc = \frac{\eta}{D \cdot \rho} \quad Re = \frac{v \cdot L \cdot \rho}{\eta}$$

$$Gu = \frac{T_{ST} - T_{MT}}{T_{ST}}$$

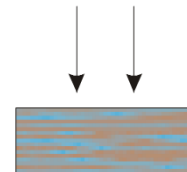
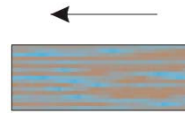
Re	C	n
1-200	0,900	0,50
200-6000	0,870	0,54
6000-70000	0,347	0,65

### 3. Procijenom koeficijenta prijelaza topline, $\alpha$

$$m_v = \frac{\alpha \cdot A \cdot \Delta T_{lm}}{\lambda}$$

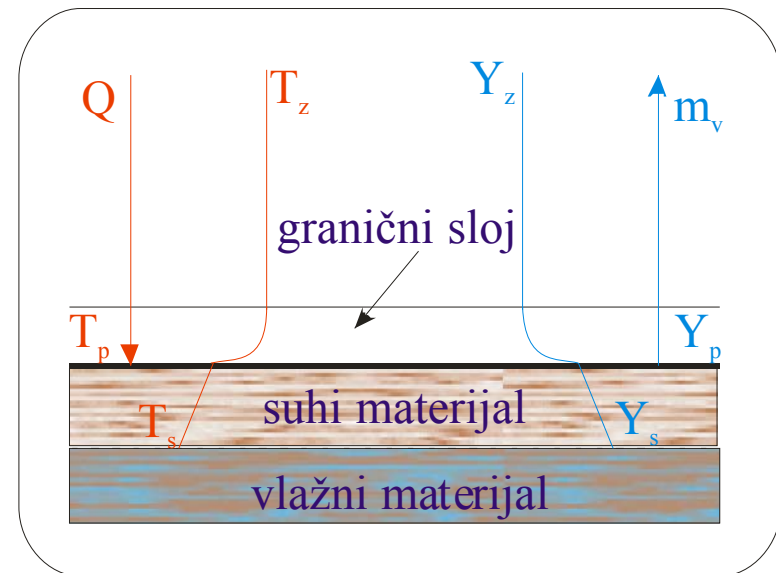
$$\alpha = 0,0204 \cdot \left( \frac{m_z}{A} \right)^{0,8}$$

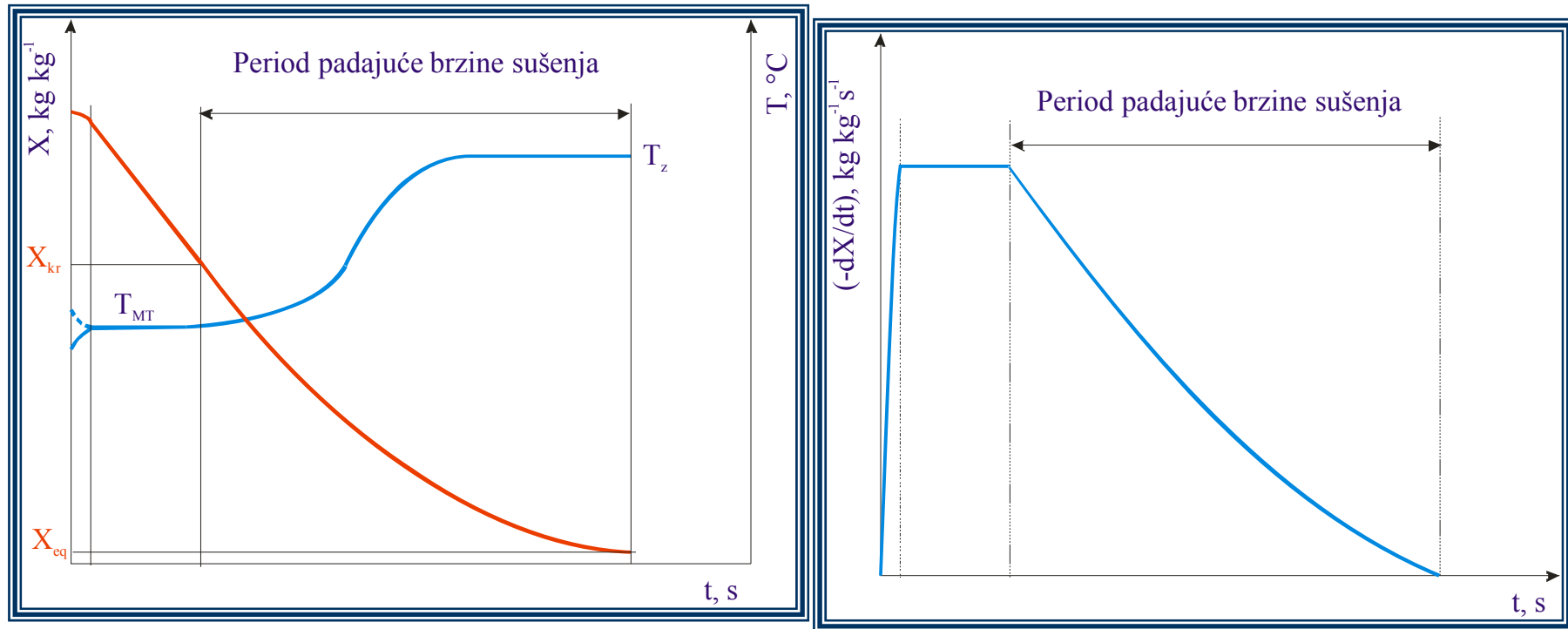
$$\alpha = 1,17 \cdot \left( \frac{m_z}{A} \right)^{0,37}$$



## Period padajuće brzine sušenja

- period sušenja (u stalnim uvjetima sušenja) tijekom kojeg brzina sušenja opada
- Površina materijala postaje prvo djelomično a zatim potpuno suha
- Na brzinu sušenja utječu svojstva materijala
  - proces je pod kontrolom unutrašnjih uvjeta





- Sadržaj vlage materijala opada do  $X_{eq}$
- Temperatura materijala raste do radne temperature
- Brzina kojom se vlaga dovodi do površine materijala manja je od brzine isparavanja, pa brzina sušenja počinje opadati s vremenom

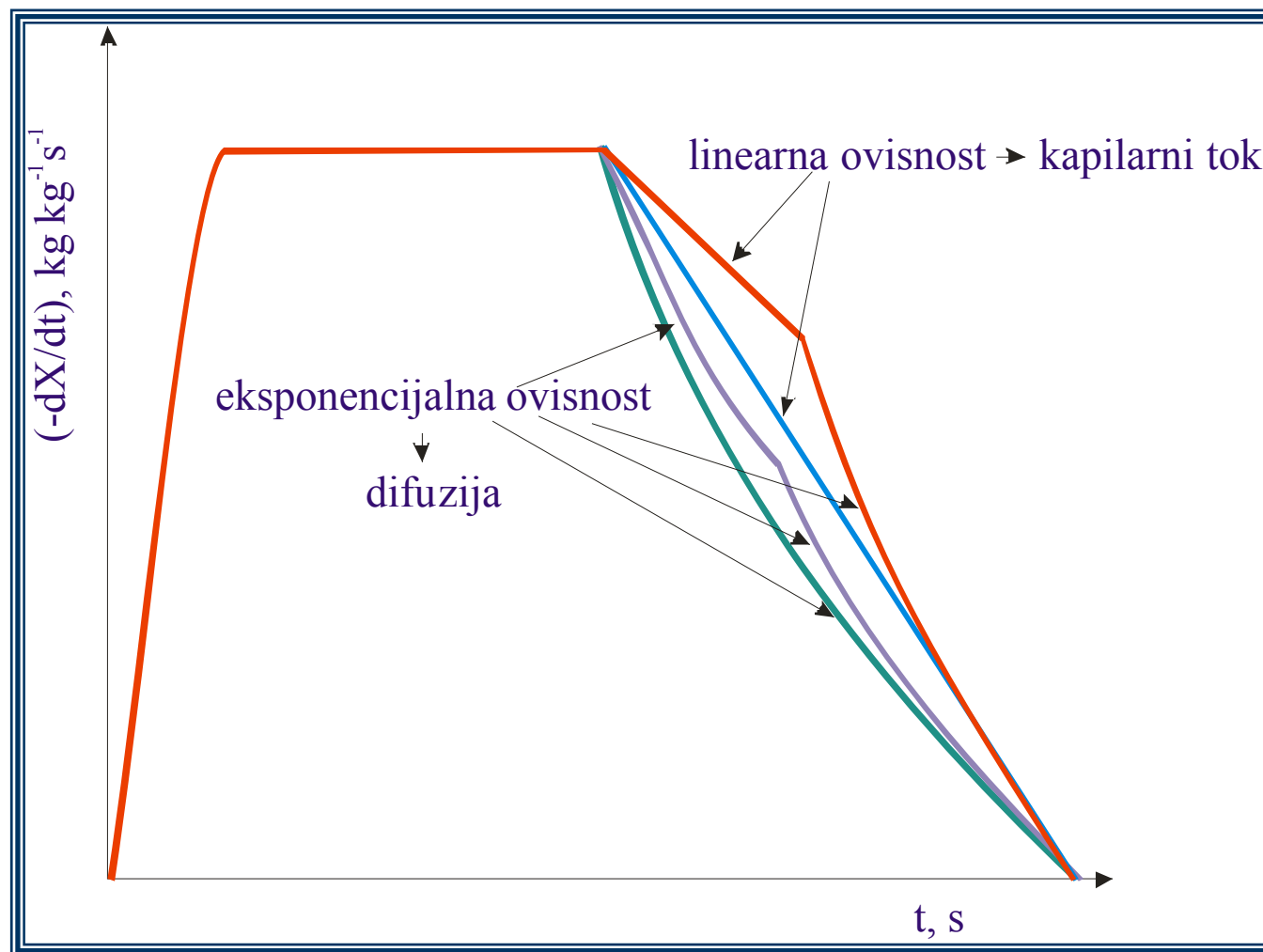


## Mehanizmi prijenosa vlage

---

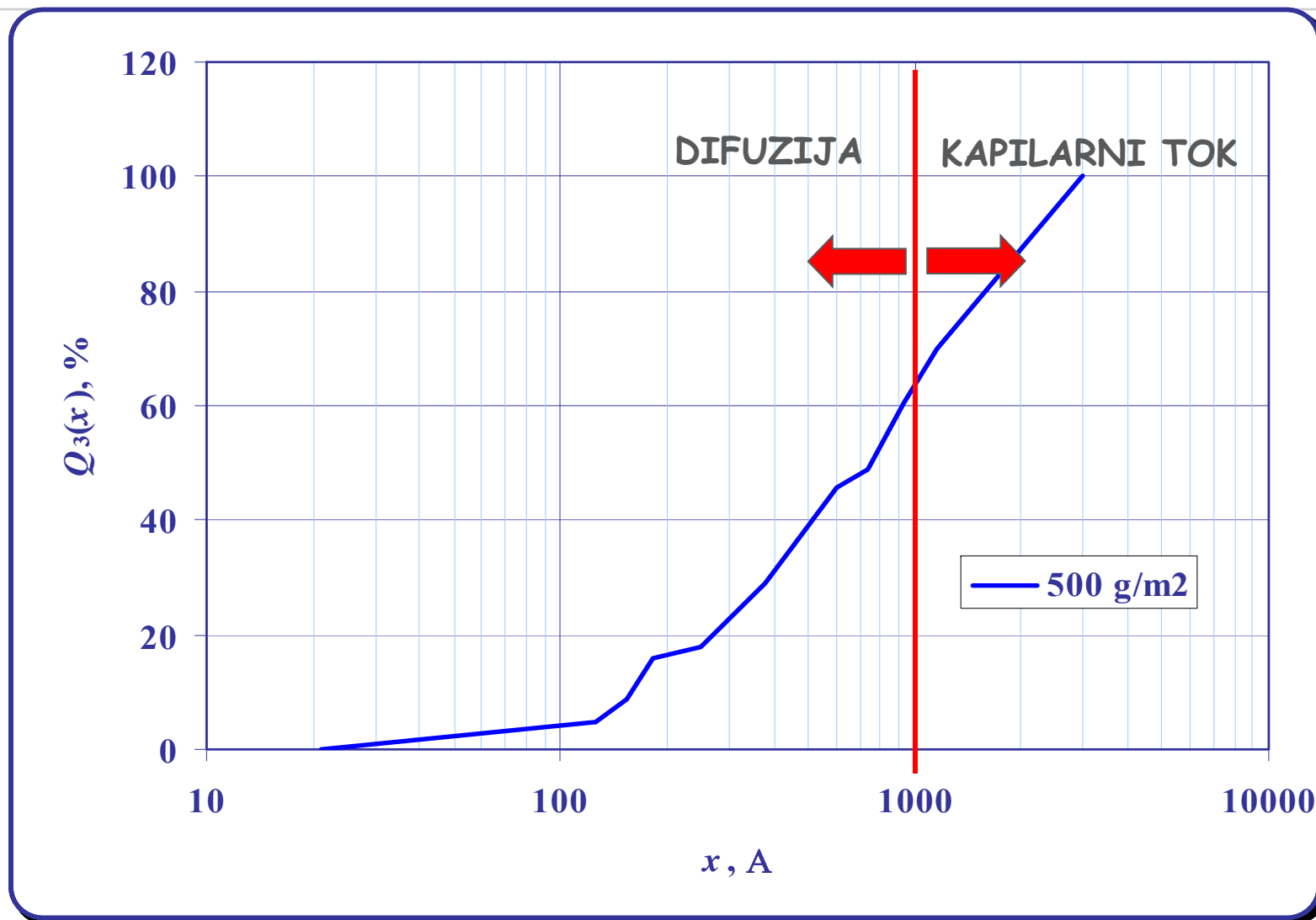
- Difuzija
  - Difuzija kapljevine
  - Difuzija pare
  - Knudsenova difuzija (uske (2-50nm) dugačke pore)
  
- Kapilarni tok
  
- Kombinacija navedenih metoda

## Mehanizmi prijenosa vlage u periodu padajuće brzine sušenja





# Raspodjela veličina pora papira



## Brzina sušenja u periodu padajuće brzine sušenja

➤ Određuje se eksperimentalno

$$R = -\frac{m_{sm}}{A} \cdot \frac{dX}{dt}$$

➤ Analitički

a. linearna ovisnost brzine sušenja i sadržaja vlage materijala

$$\rightarrow R = aX + b$$

$$\rightarrow R = aX$$

$$dR = a dX$$

$$R = -\frac{m_{sm}}{a \cdot A} \cdot \int_{R_2}^{R_1} \frac{dR}{dt}$$

$$t = \frac{m_s}{A} \cdot \frac{X_1 - X_2}{R_1 - R_2} \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$$

$$t = \frac{m_s}{A} \cdot \frac{X_c}{R_c} \cdot \ln\left(\frac{R_c}{R_2}\right)$$

## kapilarni tok vlage $d_p > 10^{-7}$ m

$$R = R_c \cdot \frac{X}{X_c}$$

$$t = \frac{m_{sm} \cdot X_c}{A \cdot R_c} \cdot \ln\left(\frac{X_c}{X}\right)$$

b. eksponencijalna ovisnost  $\rightarrow$  difuzijski tok vlage  $d_p < 10^{-7}$  m

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$$

$$t = \frac{4 \cdot x^2}{\pi^2 \cdot D_{ef}} \cdot \ln\left(\frac{8 \cdot X_{kr}}{\pi^2 \cdot X}\right)$$

$$\ln \left( \frac{X - X_{eq}}{X_{kr} - X_{eq}} \right)$$



$$\frac{D \cdot t}{x^2}$$



FKIT MCMXIX

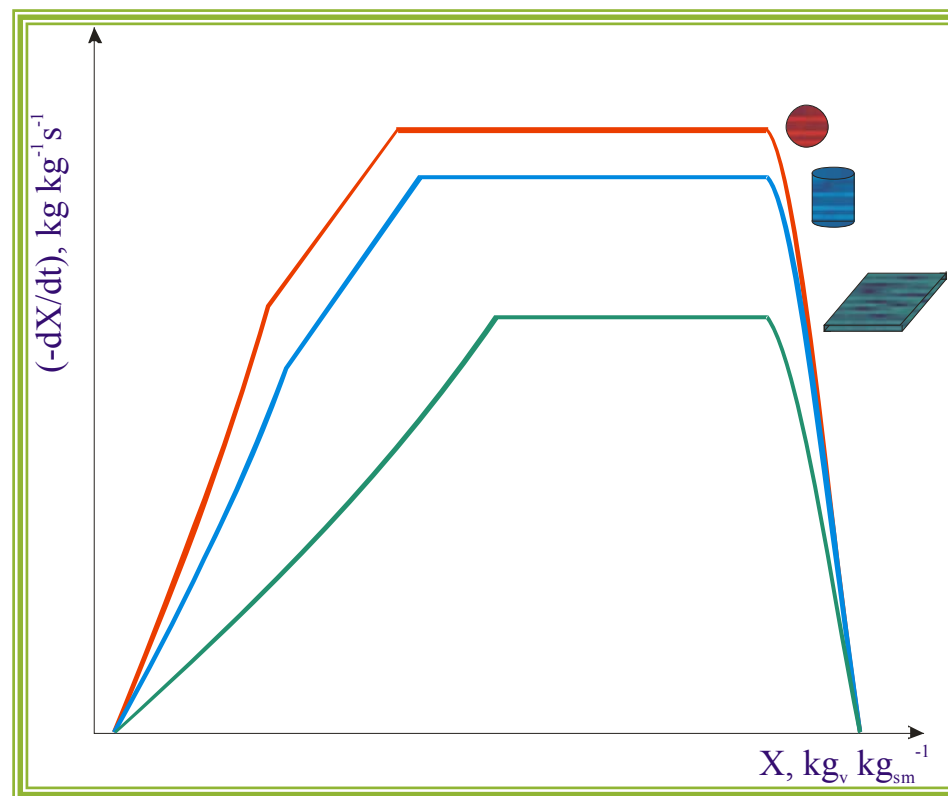


## Utjecaj vanjskih uvjeta na kinetiku sušenja

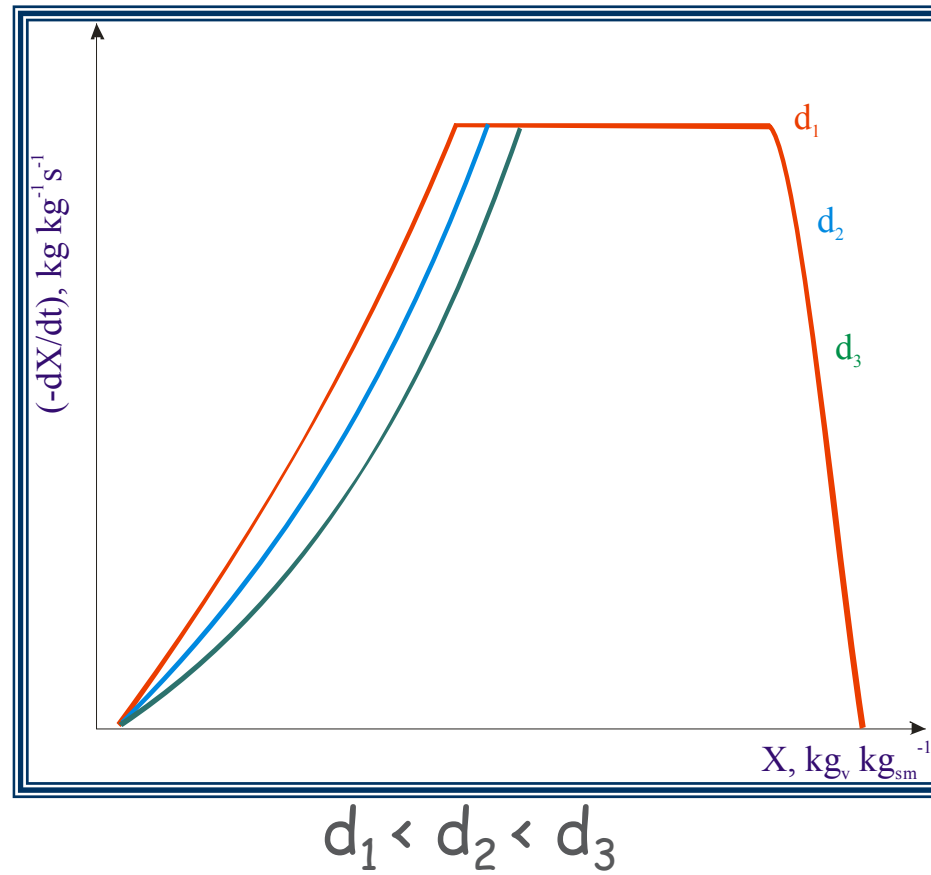
---

- oblik čestica
- debljina materijala
- temperatura zraka
- relativna vlažnost zraka
- smjer strujanja zraka
- brzina strujanja
- način dovođenja topline

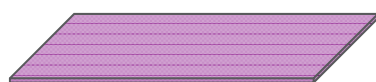
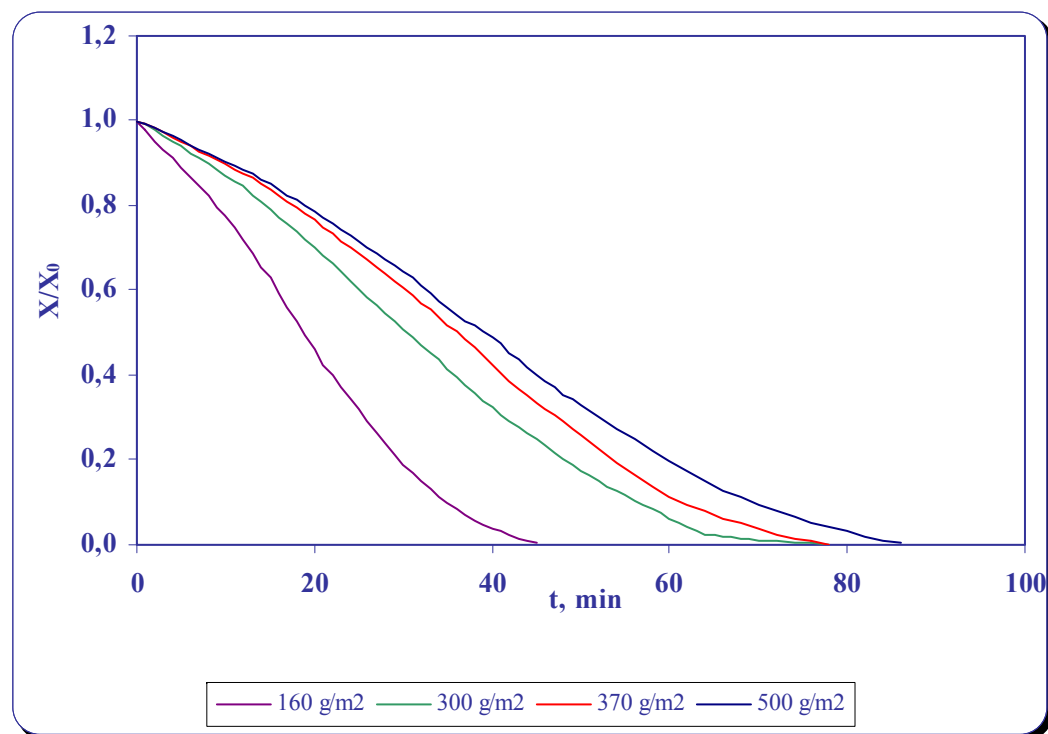
# Utjecaj oblika čestica



# Utjecaj debljine materijala



# Utjecaj površinske mase papira na kinetiku sušenja papira



160 g/m<sup>2</sup>



300 g/m<sup>2</sup>



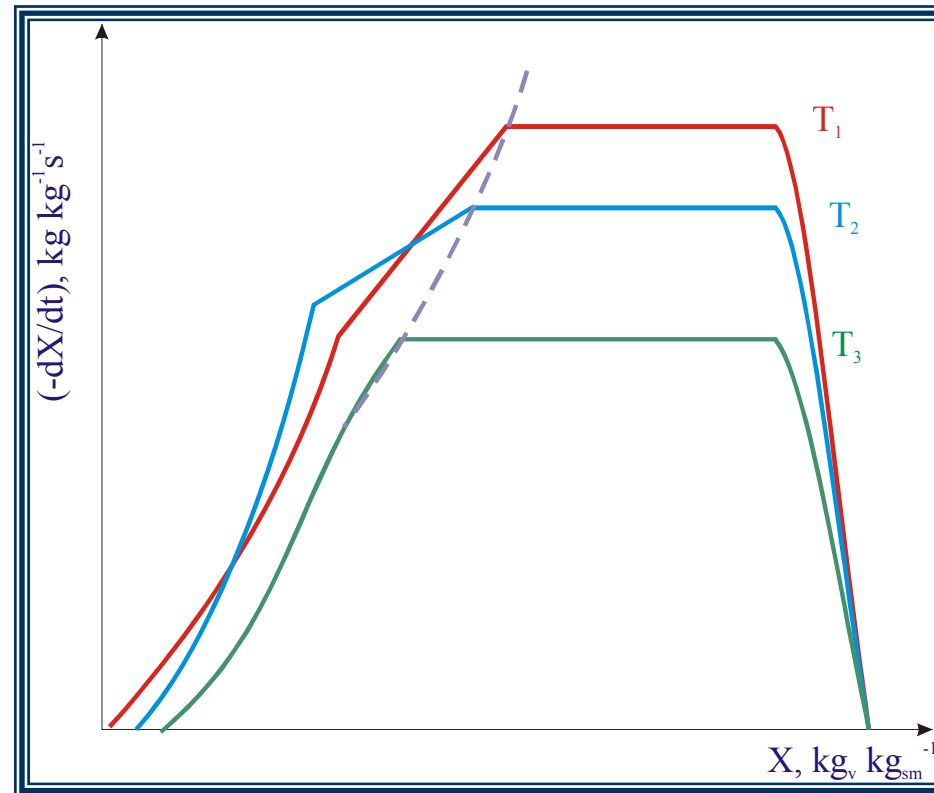
370 g/m<sup>2</sup>



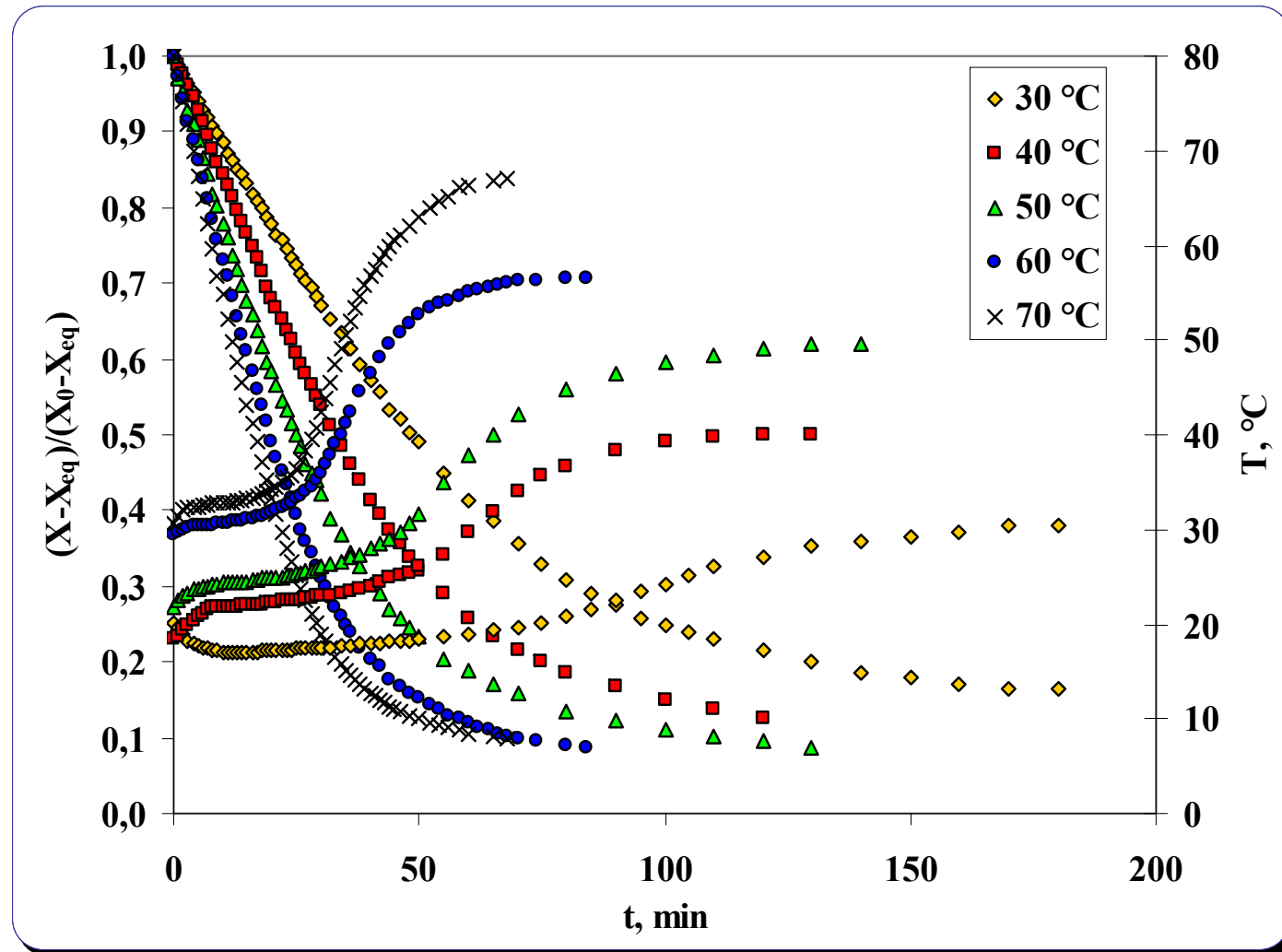
500 g/m<sup>2</sup>



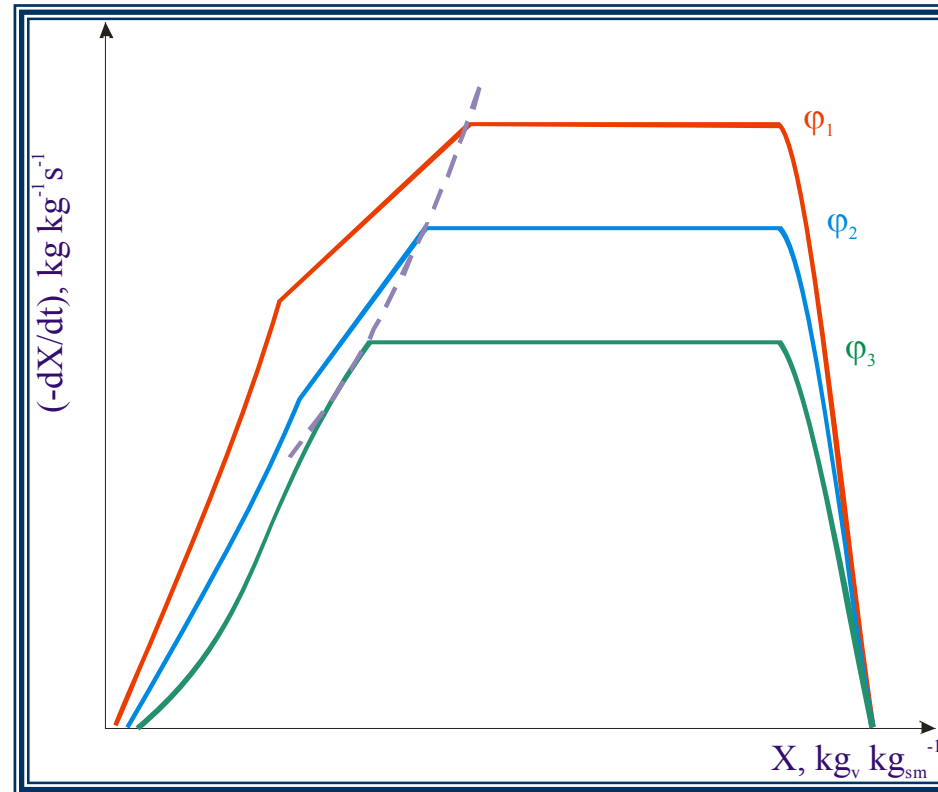
# Utjecaj temperature zraka



$$T_1 > T_2 > T_3$$

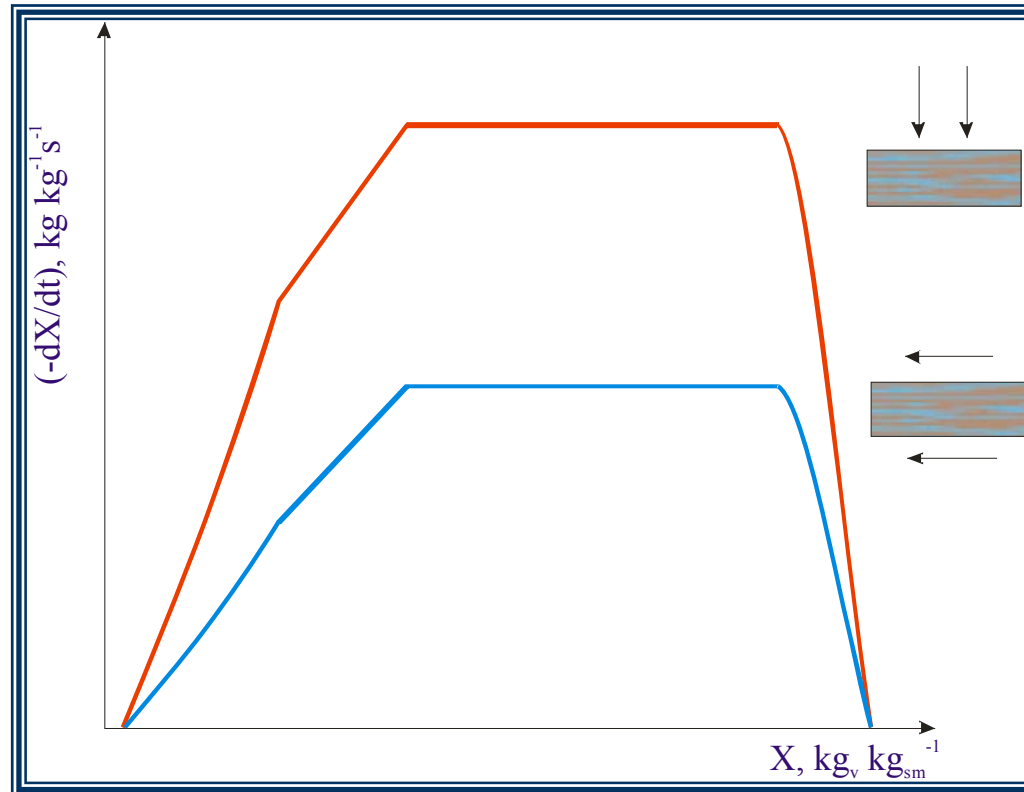


# Utjecaj relativne vlažnosti zraka

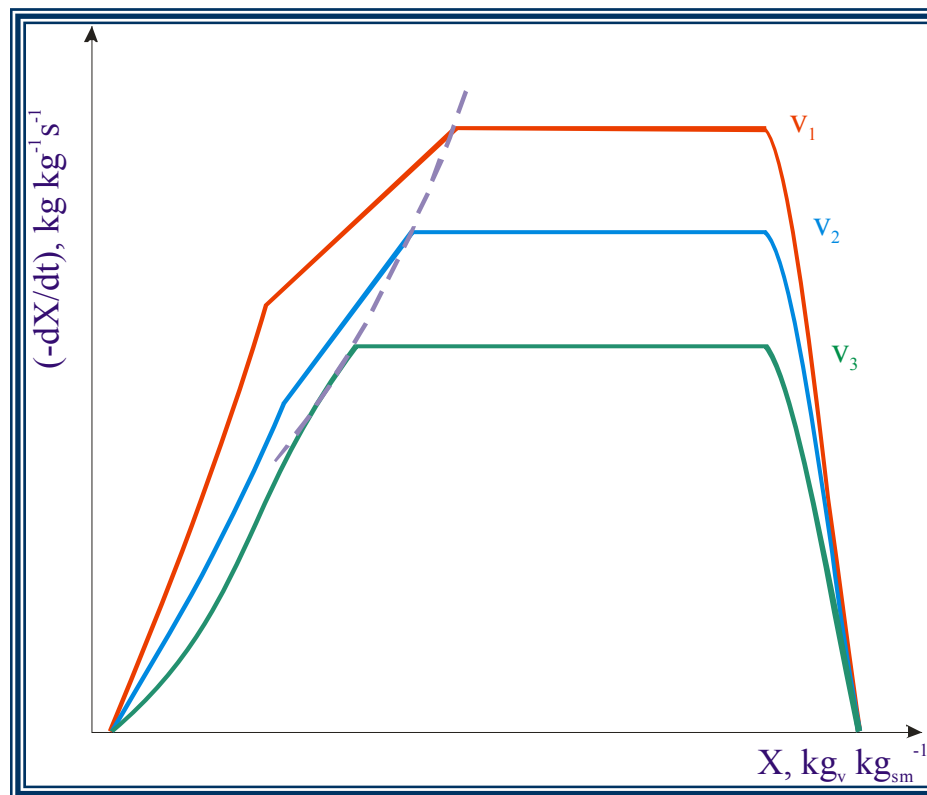


$$\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3$$

# Utjecaj smjera strujanja zraka



# Utjecaj brzine strujanja zraka



$$V_1 > V_2 > V_3$$

# Utjecaj načina dovođenja topline

