Kompleksno ponašanje sustava kondenzirajućih kapljica na hladnoj podlozi

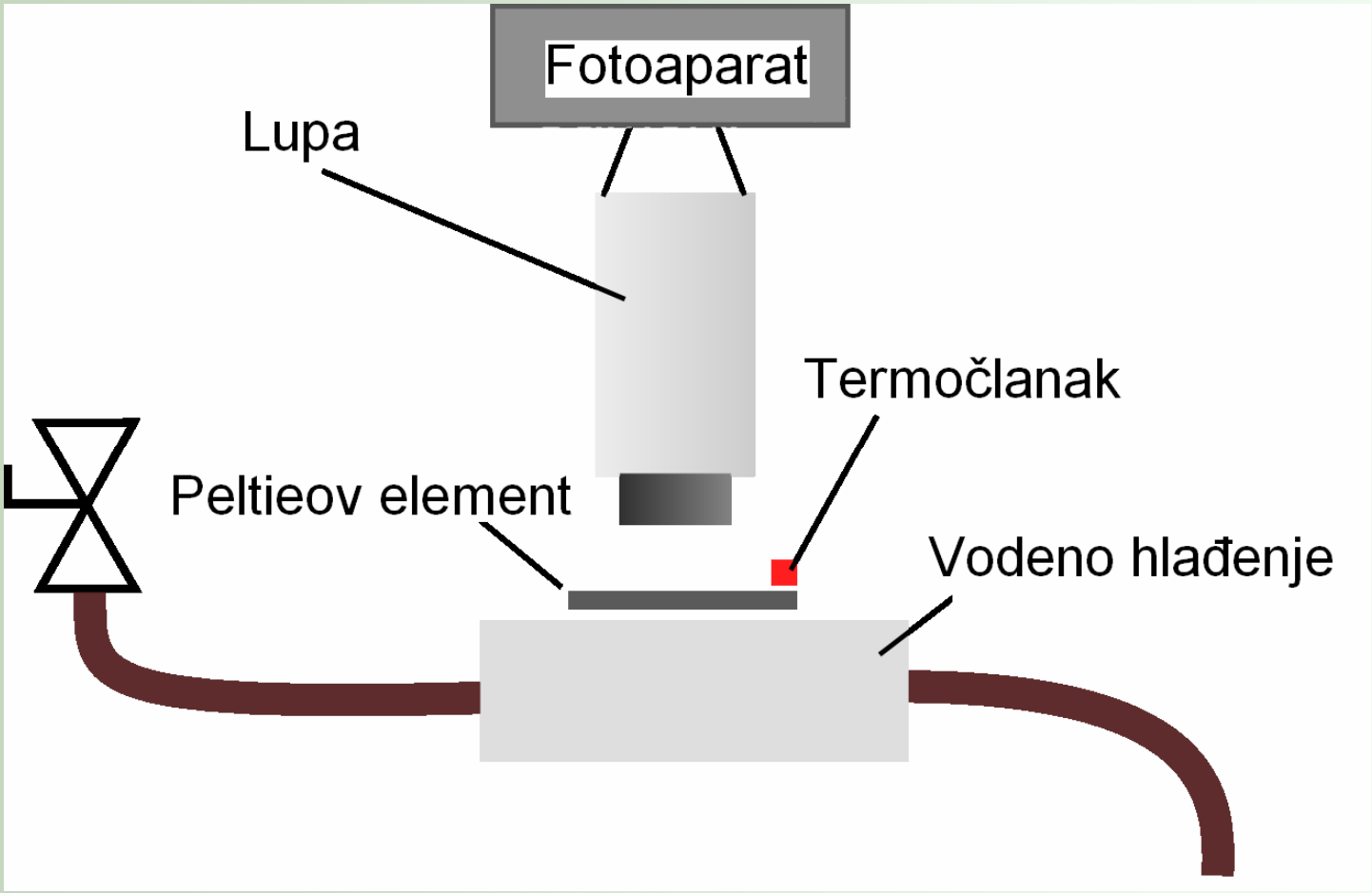
Sadržaj

- Eksperiment
- Razvoj jedne kapljice
  - Ovisnost brzine rasta kapljice o
    - Temperaturi
    - Vlažnosti
- Sustav kondenzorajućih kapljica
  - Nelinearnost
  - Samosličnost
- Zaključak

Aparatura

- Temperatura podloge
  - Peltierov element s vodenim hlađenjem
  - Mjerena termočlankom
- Regulacija vlažnosti
  - topla voda koja isparava
  - Mjerena digitalnom higrometrom
- Fotografije – pod povećanjem od 40 puta

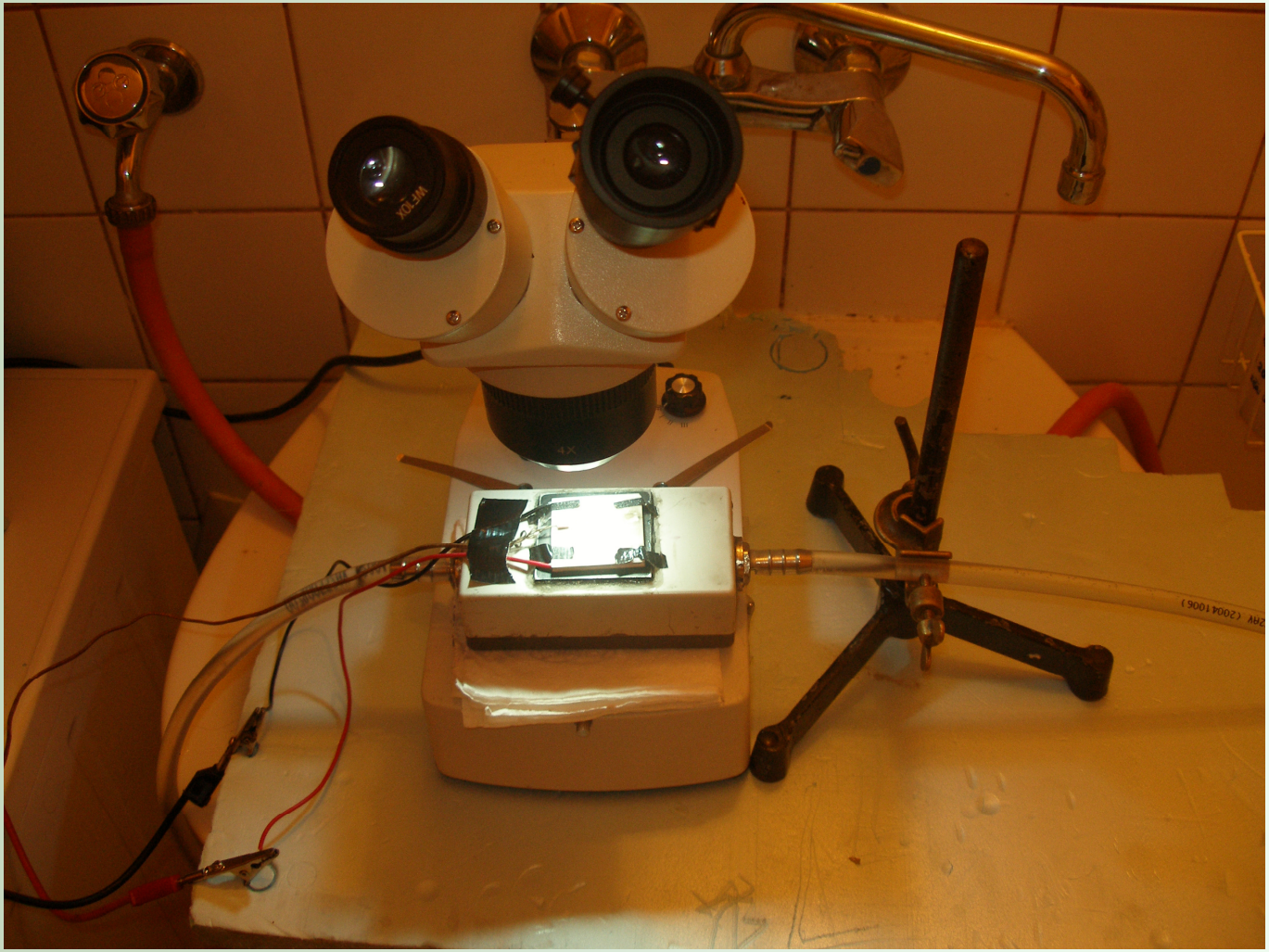
Aparatura


Fotoaparat
Lupa
Termočlanak
Peltieov element
Vodeno hlađenje

Aparatura



Aparatura

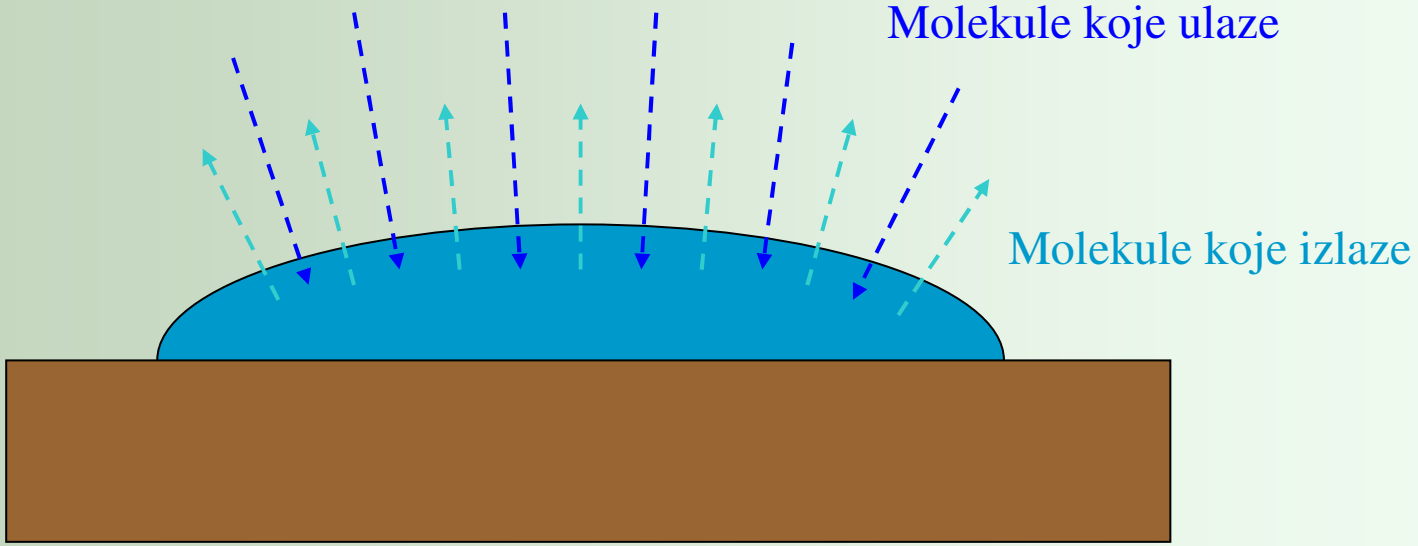


Kondenzacija

- Condensation start – nucleation
- Water molecules stick to surface at defects – nuclei
- Proof – artificial nucleation
- Surface wiped with salt water – salt crystals act as nucleation sites:

Kondenzacija

- U zraku je vodena para (aproksimiramo ju idealnim plinom)
- Molekule vode izlaze iz kapljice i ulaze u nju



Kondenzacija

- Brzina rasta kapljice:

$$\frac{dN_{en}}{dt} - \frac{dN_{ex}}{dt}$$

N_{en} – broj molekula koje ulaze

N_{ex} – broj molekula koje izlaze

- Posebno razmatramo molekule koje ulaze i izlaze

Molekule koje ulaze

- Broj molekula koje dolaze do kapljice u jedinici vremena:

$$\frac{dN_{en}}{dt} = \frac{1}{6}\frac{N}{V}S\langle v\rangle$$

N_{en} – broj molekula koje ulaze

N/V – broj molekula po jedinici volumena

S – površina kapljice

<v> – srednja brzina termičkog gibanja

- Taking the vapour as ideal gas:

$$\frac{1}{2}m\langle v\rangle^2 = \frac{s}{2}kT_A$$

m – masa molekule

s – broj stupnjeva slobode vode

k – Boltzmannova konstanrta

T_A – temperatura zraka

Molekule koje ulaze

- Broj molekula koje ulaze

$$\frac{dN_{en}}{dt} = \frac{1}{6}\frac{N}{V}\sqrt{\frac{skT_A}{m}}S$$

N_{en} – broj molekula koje ulaze
N/V – broj molekula po jedinici volumena
S – površina kapljice
<v> – srednja brzina termičkog gibanja
m – masa molekule
s – broj stupnjeva slobode vode
k – Boltzmannova konstanta
T_A – temperatura zraka

- Broj molekula po jedinici volumena je povezan s vlažnošću

Molekule koje izlaze

- Tlak pare:

$$P_{vap} = \frac{N}{V} kT_A$$

P_{vap} – tlak para

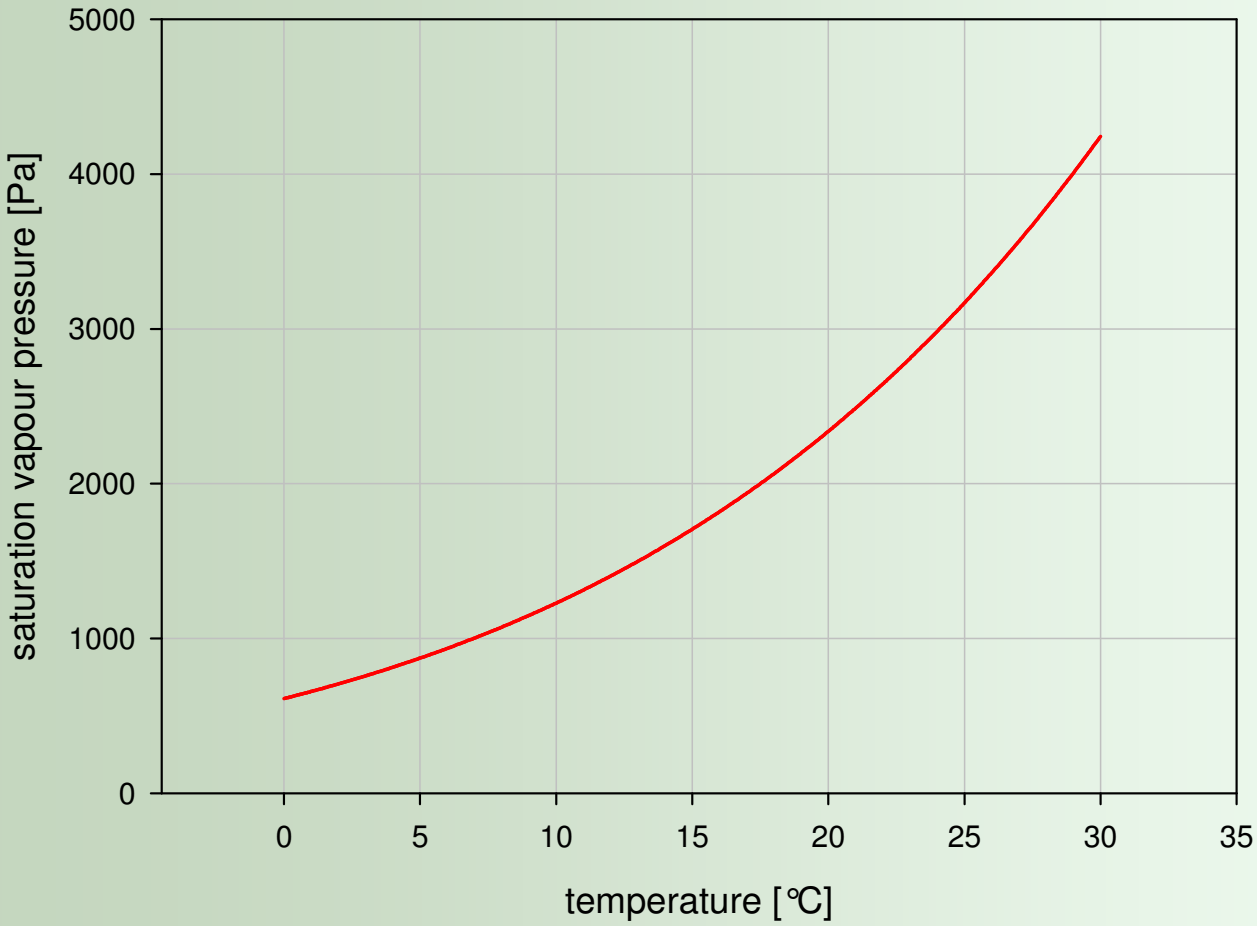
N/V – broj molekula u jedinici volumena

k – Boltzmannova konstanta

T_A – temperatura zraka

- Za određenu temperaturu postoji ravnotežni tlak para:

Molekule koje izlaze



Taken from CRC Handbook of Chemistry and Physics, 45th edition

Molekule koje izlaze

- Definicija relativne vlažnosti:

$$\chi = \frac{P_{vap}}{P_{sat}}$$

P_{vap} – tlak vodene pare

P_{sat} – ravnotežni tlak

- Apsolutna vlažnost:

$$\frac{N}{V} = \chi \frac{P_{sat}(T_A)}{kT_A}$$

P_{vap} – tlak vodene pare

N/V – broj molekula po jedinici volumena (apsolutna vlažnost!)

k – Boltzmannova konstanta

T_A – temperatura zraka

Molekule koje izlaze

- Pomoćni sustav: voda i para na temperaturi *T*, ravnnotežni tlak
- U tom sustavu: broj molekula koje izlaze = broj molekula koje ulaze
- Budući da je broj molekula koje ulaze neovisan od broja molekula koje ulaze, uvijek vrijedi:

$$\frac{dN_{ex}}{dt} = \frac{1}{6}\left(\frac{N}{V}\right)_{sat}\sqrt{\frac{skT}{m}}S$$

N_{en} – broj molekula koje ulaze

N/V – broj molekula po jedinici volumena u *ravnoteži*

S – površina kapljice

m – masa molekule

T – temperatura vode

Brzina rasta

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{6}\sqrt{\frac{s}{mk}}\left(\chi\frac{P_{sat}(T_A)}{\sqrt{T_A}} - \frac{P_{sat}(T)}{\sqrt{T}}\right)S = \lambda S$$

N – broj molekula koje ulaze

m – masa molekule

s – broj stupnjeva slobode molekule vode

k – Boltzmannova konstanta

T_A – temperatura zraka

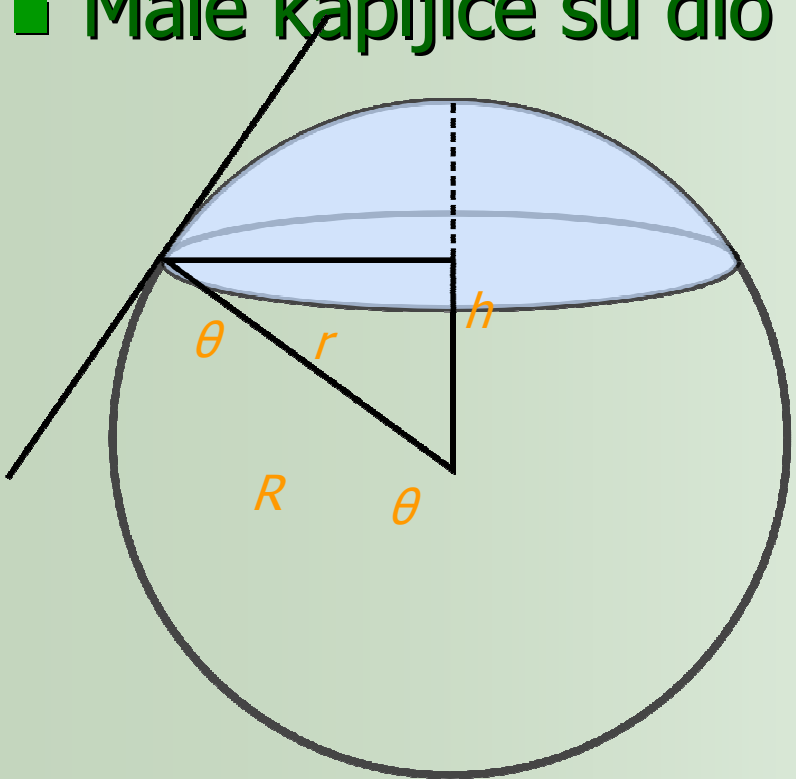
S – površina kapljice

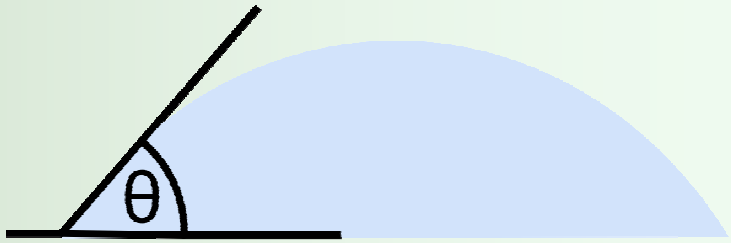
χ – relativna vlažnost

T – temperatura vode

Droplet radius

- If $\chi \frac{P_{sat}(T_A)}{\sqrt{T_A}} \geq \frac{P_{sat}(T)}{\sqrt{T}}$ kapljice rastu u vremenu
- Male kapljice su dio kugle:





r – 'polumjer kapljice'
θ – dodirni kut
R – radijus zakrivljenosti kugle
h – visina kapljice

Polumjer kapljice

- Rast kapljice:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{m}{\rho}\lambda S = \Lambda S$$

V – volumen kapljice
m – masa molekule
ρ – gustoća vode
S – površina kapljice
λ - konstanta

- Iz sferne geometrije slijedi:

$\Rightarrow$ Srednji radijus u vremenu:

$$\frac{d\langle r\rangle}{dt} = \frac{2\Lambda \sin\theta}{(1+\cos\theta)(2-\cos\theta)}$$

r – 'polumjer kapljice'
θ – dodirni kut

Polumjer kapljice

- Dobivamo:

- <r> - srednji radijus kapljice
- Za velike brojeve kapljica površina pločice je cijela prekrivena:

$r \approx \langle r \rangle$

Droplet number

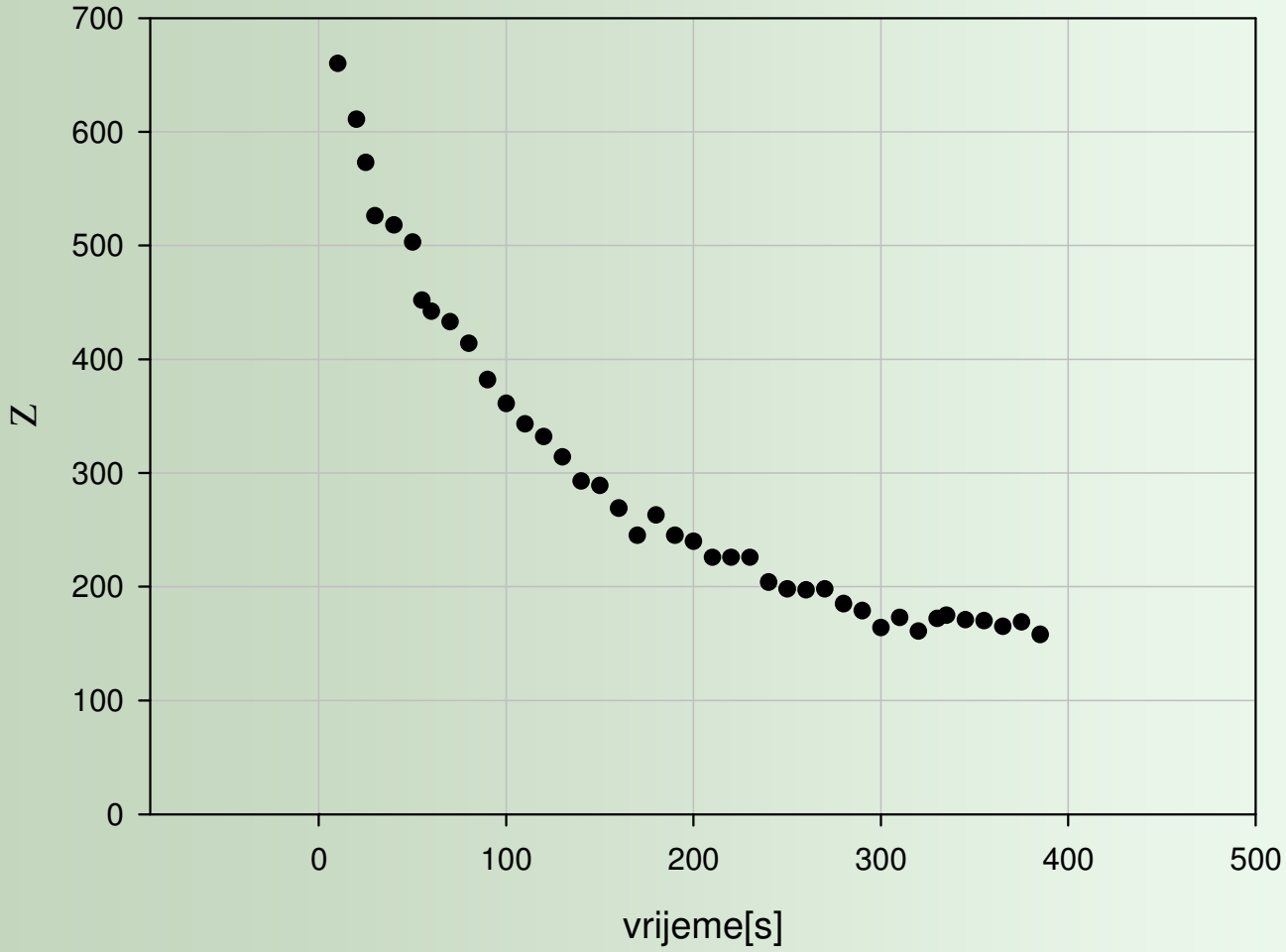
- Dobivamo:
- Za velike brojeve kapljica površina pločice je cijela prekrivena:

$$\Theta = \frac{A}{\langle r \rangle^2 \pi}$$

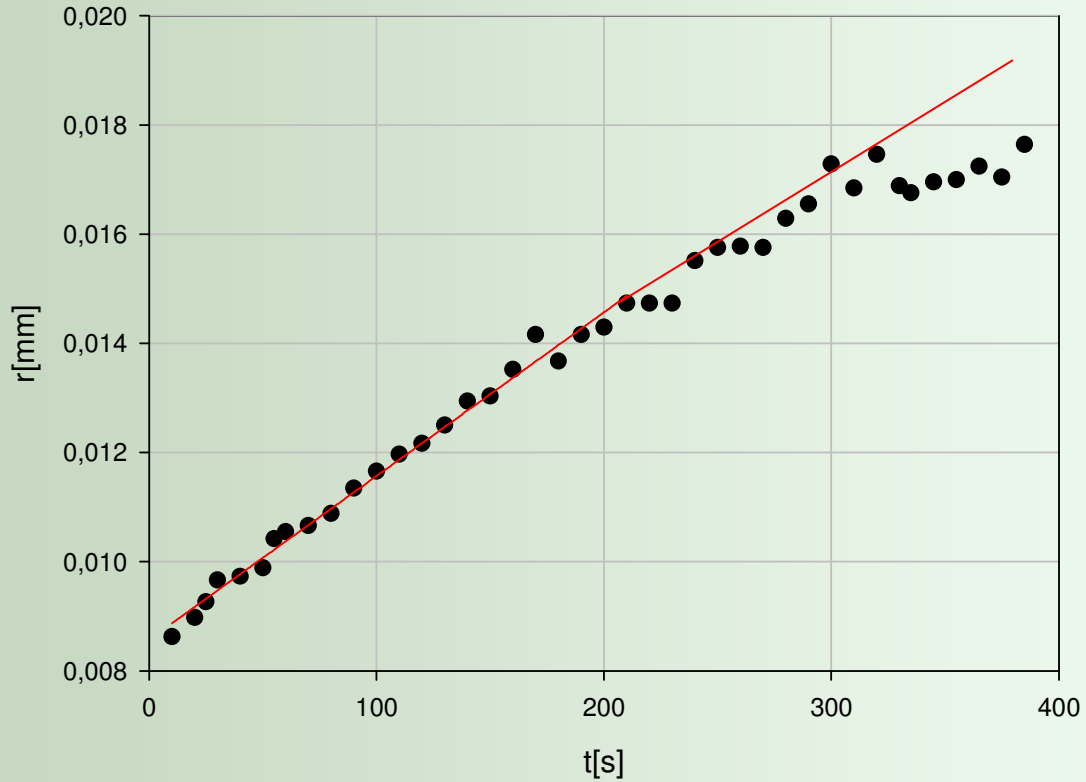
Θ – broj kapljica
A – površina pločice
r – srednji radijus kapljice

- <r>~r – nije

Droplet number



Mean radius of droplets in time



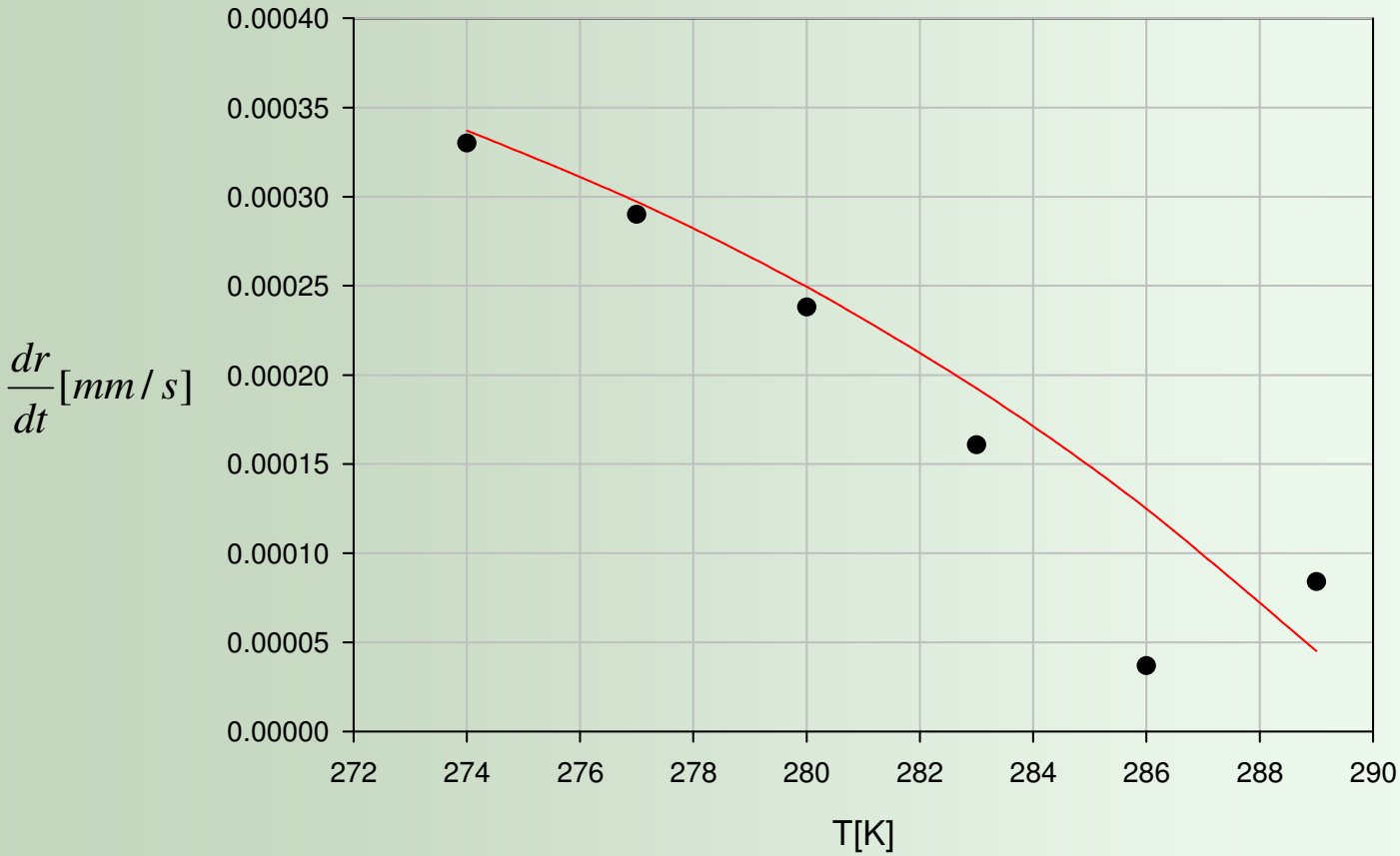
Mean radius of droplets in time
Theory – experiment comparison, cont.

- Good agreement of theory and experiment for small droplets
- Reasons for disagreement of theory and experiment for big droplets
  - Droplet isn't part of a ball anymore
  - Bigger counting error

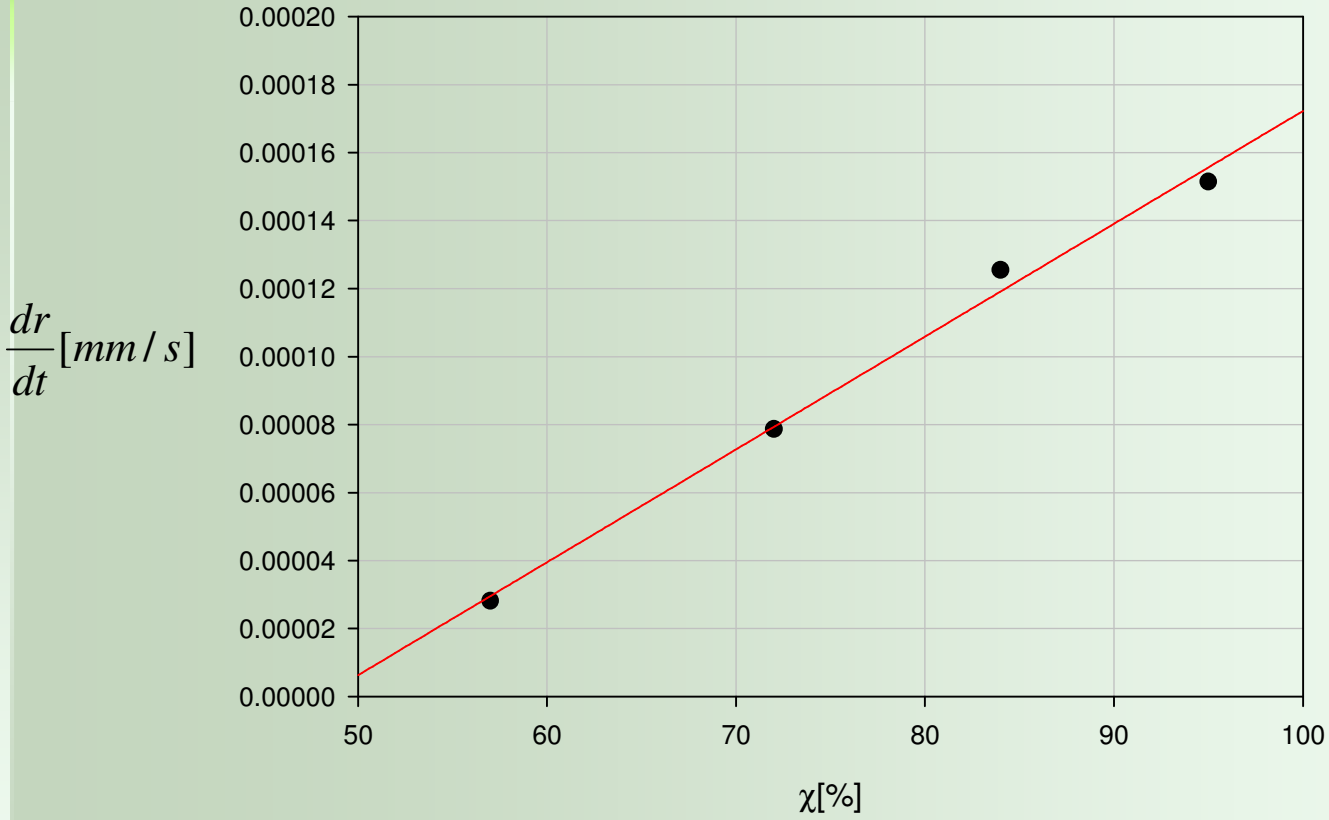
Relevant parameters

- Dependancy of speed of radius growth on
  - Temperature
  - Humidity

Temperature



Humidity


$\frac{dr}{dt}[mm/s]$
0.00020
0.00018
0.00016
0.00014
0.00012
0.00010
0.00008
0.00006
0.00004
0.00002
0.00000
50
60
70
80
90
100
χ[%]

Conclusion