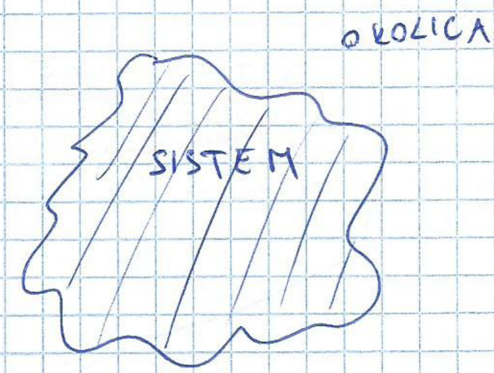
I. OSNOVNI KONCEPTI TERMODINAMIKE

- prve ~~xx~~ osnove termodinamike se ~~xx~~ pojavijo v 18. st v parnim strojem
- 1849 Lord Kelvin
- prvi učbenik termodinamike 1859 → ~~R~~ RANKIN

~~SISTEM~~
~~ENERGIJA~~

- sistem
- energija
- lastnosti sistema
- stanje sistema
- proces
- cikel
- tlak
- temperatura

· SISTEM:

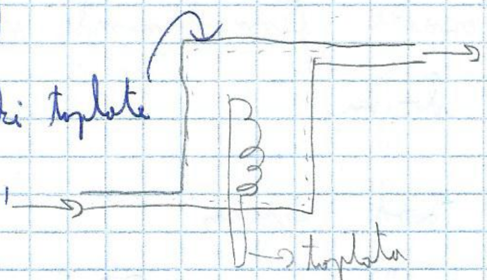


1. zakon termodinamike: če se zgodijo spremembe v sistemu, se zgodijo tudi v okolici

VRSTE SISTEMA:

- zaprt sistem: → reaktor ko notri delujejo polimeri (primer)
  masa ne more preidet meja sistema (masa sistema je konstantna)
  - energija lahko preide meje sistema v obliki

- ODPRT SISTEM: - dovoljuje prenos mase v in iz sistema
  - masa ni nujno, da je konstanta
  - $V = konst.$
  - energija pride v obliki toplote
  - masa: kinetično, potencialno, notranjo



- stacionarni pogoji (ostanejo enaki) mala T
- nestacionarni pogoji (se spreminjajo) T spreminja

VODA (kotlen)

· ENERGIJA:

- toplotna
- mehanska
- kinetično
- potencialna
- ~~električna~~
- magnetna
- kemijska

$$\sum E_i = E_T$$

(seštevek vseh energij; sistema)

Totalna energija sistema E_T [J]

W, Q ... pretvorita se v energij

(delo, toplota; nastopata v interakciji sistema)

TOTALNA KOLIČINA SISTEMA E_T [J]

KINETIČNA ENERGIJA SISTEMA

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad [J]$$

EKSTENZIVNE KOLIČINE

POTENCIALNA ENERGIJA SISTEMA

$$E_p = mgh \quad [J]$$

NOTRANJA ENERGIJA SISTEMA

(oznaka) $U = \quad [J]$

Termodinamika ne opredeljuje pojma U, ampak poda način kako izračunamo spremembo notranje energije (ΔU)

$$E_t = E_k + E_p + U$$!

INTENZIVNA KOLIČINA: ni odvisna od mase sistema! (T, tlak) → se ne spreminja

EKSTENZIVNA KOLIČINA: odvisna od mase sistema! (, masa) → se spreminja

EKSTENZIVNE KOLIČINE	INTENZIVNE KOLIČINE (brez mase)
E_t [J] →	$\hat{E}_t = \frac{E_t}{m, n}$ [J/kg, J/mol]
E_k [J] →	$\hat{E}_k = \frac{v^2}{2}$ [J/kg]
E_p [J] →	$\hat{E}_p = g \cdot h$ [J/kg]

NOTRANJA ENERGIJA

- čutna toplota
  (seštevek energije rotacije + vibracije + translacije) → med molekulami
  (rotacije + vibracije + translacije = kinetična energija molekule)
- latentna toplota
  → drži molekule skupaj — medmolekularna sila
  - odgovorna za fazne spremembe

• LASTNOSTI SISTEMA

-vsaka karakteristika sistema se imenuje lastnost sistema

1. – tlak (P), temperatura (T), volumen (V), masa (m), gostota (ρ)

2. – viskoznost (η), toplotna prevodnost (λ)

3. – hitrost (v)

GOSTOTA:

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} \left[\frac{m^3}{kg}\right] \equiv v$$ ...... specifični volumen (→ to ni hitrost)

• STANJE SISTEMA

→ sistem vseh lastnosti v ravnotežju

- imamo sistem, ki ni pod pogoji spremembe
- vse lastnosti sistema določajo stanje sistema

RAVNOTEŽJE:

- termično ravnotežje (povsod enaka T)
- mehansko ravnotežje (ni nujno, da je P (tlak) povsod enak)
- kemijsko ravnotežje (potencial, da reakcija steče)
- fazno ravnotežje (spreminjanje stanja: kondenzacija)

• PROCES

Sistem preide iz enega ravnotežnega stanja v drugo ravnotežno stanje

- proces => novo stanje
- cikel => nazaj v prvotno stanje

- proces lahko opišemo ~~v~~ v diagramih, kot koordinate ~~k~~ lahko uporabimo:
  - p, T, V, v

• TLAK

- kakšna sila deluje na 1 m^2 površine

$p \ldots Pa$

$1Pa \ldots N/m^2$

$1 \cdot 10^5 Pa = 1 bar = 100 kPa$

~~1 atm = 1,0~~

$1 atm = 1,0325 bar$ (atm → atmosfera)

- ABSOLUTNI TLAK

- merjen glede na vakuum

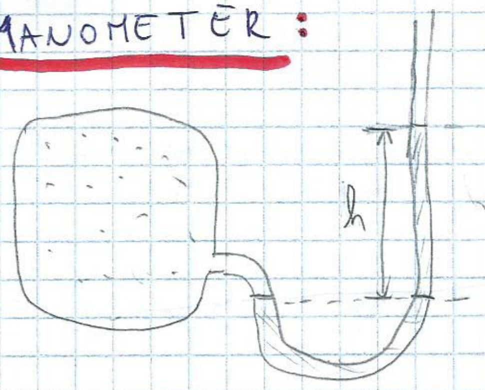
- NADTLAK

- merjen glede na atmosferski tlak (1atm) → več kot 1 atm

- PODTLAK

- merjen glede na atmosferski tlak → manj kot 1 atm

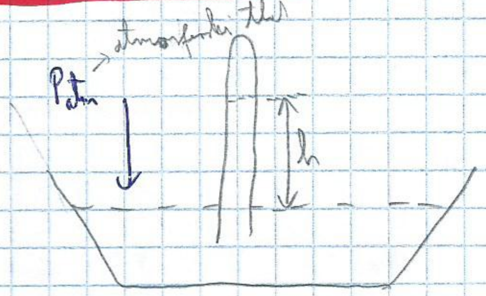
MANOMETER:



$$P = P_{atm} + \rho \cdot g \cdot h$$

→ meri tlak v nekem sistemu

BAROMETER:

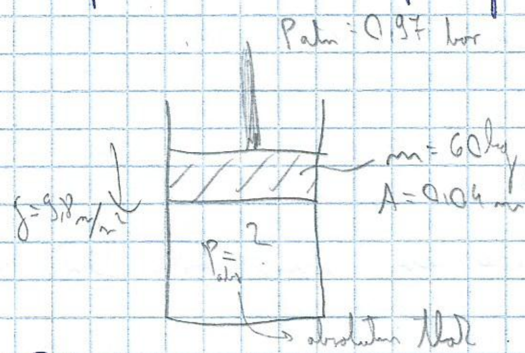


$$P_{atm} = \rho \cdot g \cdot h$$

→ merjenje zračnega tlaka

Primer:

Bat cilindra napolnjen s plinom ima 60 kg in površino 0,04 m², lokalni $P_{atm} = 0{,}97$ bar, gravitacijski pospešek je $9{,}8\ m/s^2$. Določi tlak v cilindru? Sistemu dodam toliko toplote, da se V podvoji, kakšen tlak je v sistemu sedaj?



$m = 60\ kg$

$A = 0{,}04\ m^2$

$P_{atm} = 0{,}97\ bar$

$g = 9{,}8\ m/s^2$

sila

$$\sum_i F_i = 0 \ !$$

sila teže

$$P_{atm} \cdot A + m \cdot g - P_{abs} \cdot A = 0$$

~~$P_{abs} = P_{atm} \cdot A + m g$~~

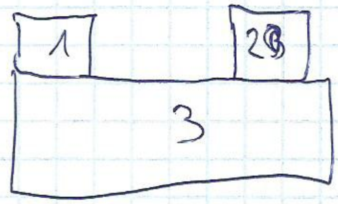
$$P_{abs} = P_{atm} + \frac{m g}{A}$$

$$P_{abs} = 0{,}97 \times 10^5\ Pa + \frac{60\ kg \cdot 9{,}8\ m}{s^2 \cdot 0{,}04\ m^2} = 1{,}117 \cdot 10^5\ Pa$$

•TEMPERATURA

NIČTI zakon termodinamike

(0-ti) (niči) ↳ če sta dve telesi v termičnem ravnovesju s tretjim telesom, potem sta tudi v termičnem ravnovesju med seboj



Tretje telo nadomestimo s termometrom:

- dve telesi sta v termičnem ravnovesju četudi nista v kontaktu med seboj in odražata isto T.

CELZIJSEVA temperaturna skala

$$T(K) = 273{,}15 + T(°C)$$

KELVINOVA temperaturna skala:

ČISTE SUBSTANCE

- FAZNE SPREMEMBE
- čista substanca ima enako kemijsko sestavo
- Primer: - zrak ✓
  - led - voda ✓
  - suspenzija olja v vodi //

- TERMODINAMSKI DIAGRAMI

1. graf

P. tlak → zrak

1.→2. = podhlajena tekočina

↳ če dodam čisto malo toplote ne bo prišlo do uparevanja / vrenja oz. do fazne spremembe

2. → nasičena tekočina

↳ Ni še hlapov / če dodam malo toplote pride do uparevanja

2 → 3 → 4 = nasičena mešanica tekočine in par   3 → nasičena raztopina

4 = nasičena para = malo odvzamemo pa nastane kondenzacija

↳ samo para je

4 se ne upošteva

4 → 5 = pregreta para → či odvzamemo malo toplote se ne zgodi nič

2. diagram str. 2

$1 MPa = 10^6 Pa = 10 bar$

$0,01 MPa = 0,1 bar$

Kritični pogoji za vodo:

$T = 374,14 °C$

$P = 22,09 MPa$

$v = 0,003155 \frac{m^3}{kg}$

↳ specifični volumen

3. diagram str. 3

$T = f(v)$!

$P = f(v)$

P–T diagram

Trojna točka vode (str. 4 LIST) → vse tri faze imamo

$T = 0,01 °C$

$P = 0,6113 kPa$

1. Tank vsebuje 30 kg nasičene ~~[illegible] [illegible]~~ raztopine pri 90°C. Določi tlak v tanku in volumen tega?

$T = 90°C$

$m = 30\,kg$

$P_{sat} = 70{,}14\ kPa = 0{,}7014\ Bar$

↳ list → $v = 0{,}001036\ \frac{m^3}{kg}$

$m = V \cdot \rho = \frac{V}{v} \rightarrow V = m \cdot v$

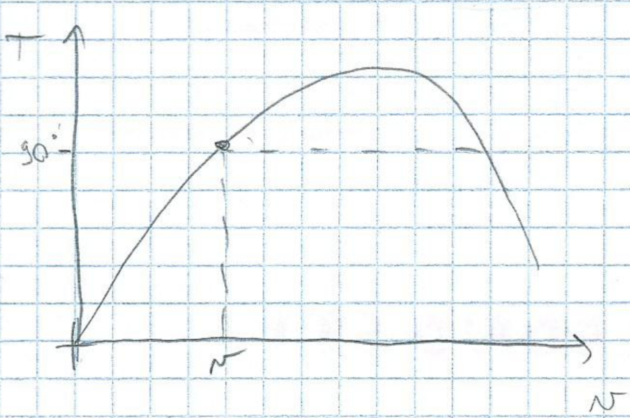
$V = 30\,kg \cdot 0{,}001036\ \frac{m^3}{kg}$

$V = 0{,}03108\ m^3$

$\rho = \frac{m}{V} = \frac{30\,kg}{0{,}03108\ m^3} = 965{,}251\ kg/m^3$

ali

$\rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{0{,}001036} = 965{,}251\ kg/m^3$



2. 200g nasičene vode popolnoma uparimo pri 100 kPa. Določi spremembo V in ~~[illegible]~~ količino ~~[illegible]~~ dodane energije?

$T = 100°C$

$m = 200\,g$) uparimo

$P_{sat} = 100\,kPa$

$V = \frac{m}{\rho}$

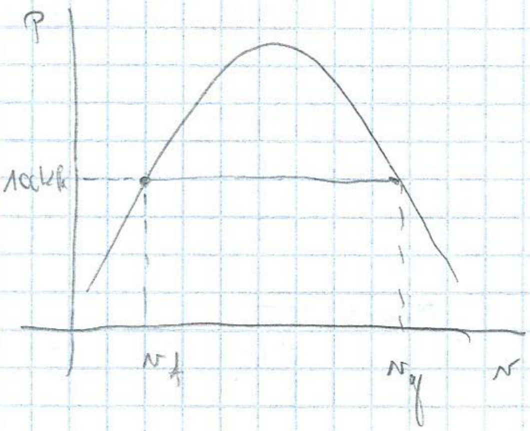
$V = m \cdot v$

$V = m(v - v)$

$$\Delta V = m(v_g - v_f)$$

$$= 0{,}2\,kg\,(1{,}672 - 0{,}001044)\,m^3/kg$$

$$= 0{,}3343712\,m^3$$



$$\Delta E = \Delta H = h_{fg} \cdot m$$

$$= 2257\,kJ/kg \cdot 0{,}2\,kg = 451{,}4\,kJ$$

3. Tank vsebuje 10 kg vode pri 90°C, če je 8 kg H_2O v obliki tekočine in ostalo v obliki par, določi tlak v tanku, V tanka in nariši pripadajoči T-v diagram

$m_t = 10\,kg$

$T = 90°C$

$m_f = 8\,kg$

$m_g = 2\,kg$

$P_{tank}, V_{tank} = ?$

$v_f = 0{,}001036\,m^3/kg$

$v_g = 2{,}361$

$V = \frac{m}{\rho} = m \cdot v$

$V_t = V_f + V_g$

LIST

$V_f = m_f \cdot v_f = 8\,kg \cdot 0{,}00103\,m^3/kg = 0{,}008288\,m^3$

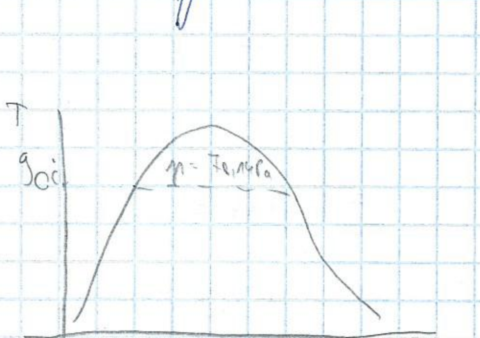
$V_g = m_g \cdot v_g = 2\,kg \cdot 2{,}361\,m^3/kg\ \ 4{,}722\,m^3$

LIST

$V_t = V_f + V_g = 0{,}008288\,m^3 + 4{,}722\,m^3 = 4{,}730288\,m^3$

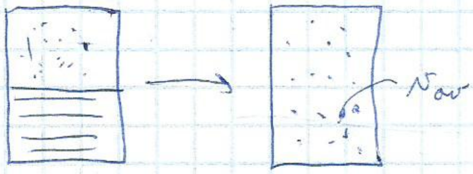
$P = 70{,}14\,Pa = 0{,}07\,bar$

LIST



ANALIZA NASIČENE MEŠANICE TEKOČINE IN PAR

$$V = m_t \cdot v_{av}$$ → povprečni specifični volumen



$$v_{av} = \frac{V_t}{m_t}$$ → totalna masa

$$V_t = V_f + V_g$$

$$m \cdot v_{av} = m_f \cdot v_f + m_g \cdot v_g$$

Definicija kvalitete x

$$X = \frac{m_g}{m_t}$$

$$v_{av} = \frac{m_f}{m_t} \cdot v_f + \frac{m_g}{m_t} \cdot v_g$$

$$v_{av} = (1-X) \cdot v_f + X \cdot v_g$$

$$v_{av} = v_f - X \cdot v_f + X \cdot v_g$$

$$v_{av} = v_f + X (v_g - v_f)$$

$$v_{av} = v_f + X \cdot v_{fg}$$

↓ povprečni specifični volumen

$$\hat{U}_{av} = \hat{U}_f + X \hat{U}_{fg}$$

$$\hat{H}_{av} = H_f + X \hat{H}_{fg}$$

Primer:

v 80L posodi imamo 4kg hladilnega sredstva R12. Tlak je 160 kPa

$m = 4kg$
$P = 160 kPa$
$V = 80L$

$T, X, \hat{H}, V_g$ → entalpija

↓

$T = -18,49$

$$v_{av} = \frac{V_t}{m_t} = \frac{80 \cdot 10^{-3} m^3}{4 kg} = 0,02 m^3/kg$$

$P = 160 kPa = 0,16 MPa$

$$v_{av} = v_f + X \cdot v_{fg}$$ tabele*

$\hat{H} = \hat{H}_f + x(\hat{H}_{fg})$

$h = h_f + x\, h_{fg}$

$h = 19{,}18 \frac{kJ}{kg} + 0{,}1919\,(160{,}23)\,\frac{kJ}{kg}$

$h = 49{,}9\ kJ/kg$

(→ celotna entalpija)

$H = h \cdot m_T = 49{,}9 \frac{kJ}{kg} \cdot 4\,kg = 199{,}6\ kJ$

$V_g = m_g \cdot v_g = 4\,kg \cdot 0{,}1919 \cdot 0{,}1031 \frac{m^3}{kg} = 79{,}139\ l$

ENAČBE STANJA

$P, T, V(v)$

1.) PLINSKA ENAČBA – idealni plini

$PV = n \cdot R \cdot T$ ✓

$R = 8{,}314\ kPa\ m^3/kmol \cdot K$
$J/mol \cdot K$

~~$R = \frac{R^*}{M}$~~

1\. Določi maso zraka v sobi. Soba ima $(4 \times 5 \times 6)\,m^3$, tlak je 100 kPa, T = 25°C

$M_{zraka} = 29\,g/mol$

$P \cdot V = n \cdot R\,T = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$

$m = \frac{P \cdot V \cdot M}{R \cdot T}$

$m = \frac{100\,kPa \cdot (4 \times 5 \times 6)\,m^3 \cdot 29\,g\ kmol\ K}{mol \cdot 8{,}314\ kPa\ m^3\ (273 + ...}$

NEIDEALNI PLINI,

Faktor kompresibilnosti Z

Def: $Z = \frac{V_{dej}}{V_{id}}$

reduciran tlak: $P_r = \frac{P}{P_{kr}}$ (reducirana; P_{kr} → kritična)

reducirana temperatura: $T_r = \frac{T}{T_{kr}}$

- ko je Z blizu 1 se vsi plini obnašajo kot idealni
- ko je tlak nizek, gre Z proti 1

1. Pri nizkih vrednostih tlaka (P) ($P_r << 1$) (reduciran) se plini obnašajo kot idealni, neglede na temperaturo
2. Pri visokih T ($T_r > 2$) (reducirana temperatura (T)) se plini obnašajo kot idealni, neglede na tlak
3. Največje deviacije / odmiki od idealnega plina so v okolici kritičnih pogojev ($T_R \sim 1$) ($P_r \sim 1$)

- vodna para je pri $P < 10$ kPa kot idealni plin

SPECIFIČNA TOPLOTA

↳ je tista količina energije, ki je potrebna, da se enoti mase določeni substance temperatura dvigne za 1 stopinjo

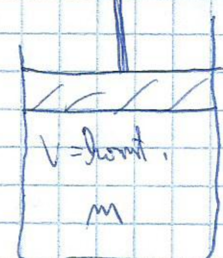
c_p, c_v

proces ogrevanja lahko nadzorujemo:

a) pri konstantnem volumnu

b) pri konstantnem tlaku

a)



$\Delta(E_T) = Q - W$

$\Delta U_m + \Delta E_k + \Delta E_p = Q - W$

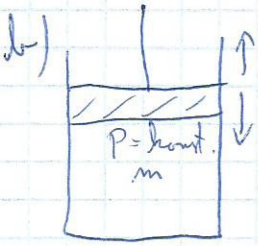
$$dU_m = dQ \Longrightarrow C_V = \left(\frac{\partial U_m}{\partial T}\right)_V$$

specifična toplota pri konstantnem V

∂ ..... parcialni odvod

d ..... navaden odvod

b)



$$\Delta(E_t) = Q - W \quad \text{(gibljiv bat)}$$

$$\Delta U_m + \cancel{\Delta E_k}^{\,0} + \cancel{\Delta E_p}^{\,0} = Q - W$$

$$\Delta U_m = Q - \underbrace{W}_{P\cdot\Delta V} \Rightarrow \Delta U_m = Q - P\cdot\Delta V$$

$$\underbrace{\Delta U_m + P\Delta V}_{\Delta H} = Q$$

$$\Delta H = Q$$

$$\Delta H = Q$$

$$dH = dQ \Rightarrow c_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p$$

specifična toplota pri konstantnem tlaku

DN pokaži relacijo ~~za~~ C_v in C_p za idealni plin!

OSNOVNI MEHANIZMI PRENOSA TOPLOTE

- KONDUKCIJA (prevajanje)
- KONVEKCIJA
- RADIACIJA

KONDUKCIJA (PREVAJANJE)

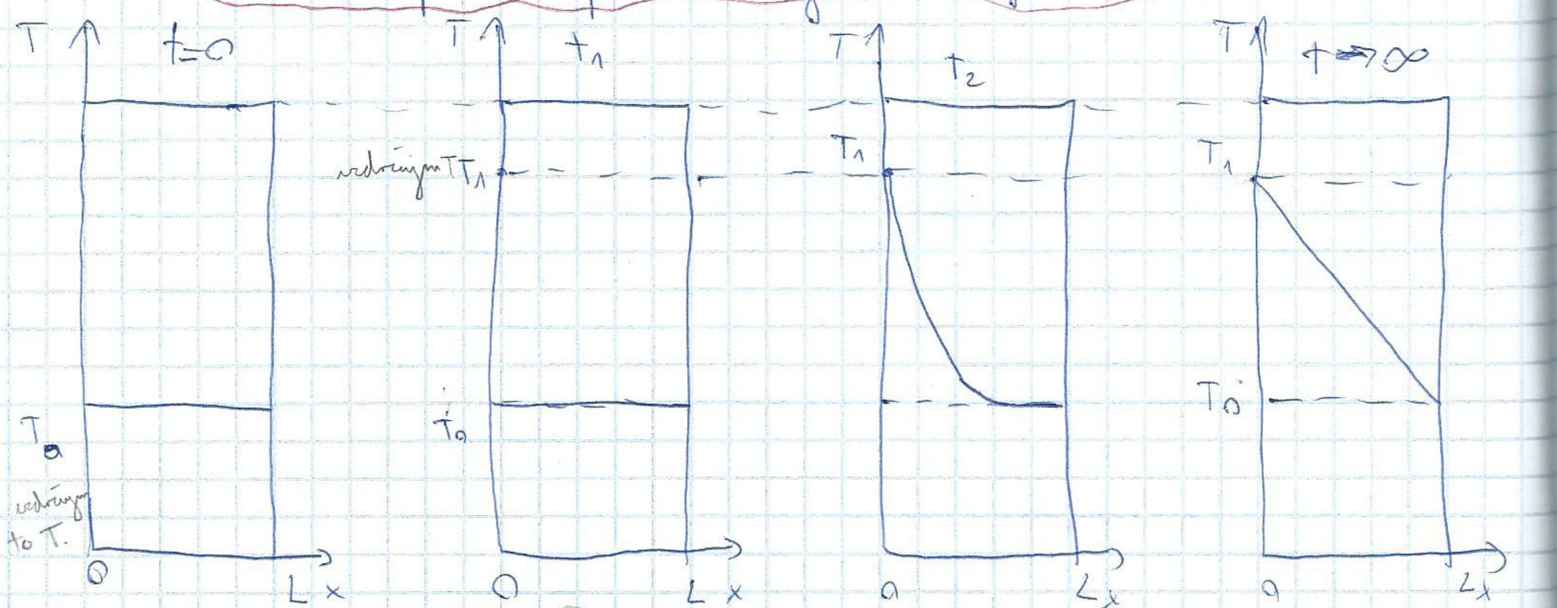
- trdno telo – energija gre na mikro skali (na ravni delcev) (elektron ravnina)
- tekočine – zaradi premikanja difuzije molekul (mikroskala)
- pline – s trki molekul (molekula z večjo energijo trči z molekulo …)

TRDNA STENA – enodimenzionalen problem

→ vpeljava enodimenzionalnega problema

↳ dve dolžini sta zelo veliki, ena je zelo majhna/kratka

↳ temperaturni gradienti se pri veliki površini razpršijo, pri kratki površini pa so zelo gosti in opazni



toplotni tok .... $\dot{Q} = \frac{Q}{t}$ $[J/s = W]$

toplotni fluks $q = \frac{Q}{tA}$ $\left[\frac{J}{s\,m^2} = \frac{W}{m^2}\right]$

$$\dot{Q} = \lambda \frac{A(T_1 - T_0)}{L}$$ TOPLOTNI TOK

$$\frac{\dot{Q}}{A} = q = \lambda \left(\frac{T_1 - T_0}{L}\right)$$

$\dot{Q}$ ..... toplotni tok [W]

A ..... površina [m^2]

L ..... debelina telesa [m]

λ ... toplotna prevodnost [W/mK]

DIFERENCIALNA OBLIKA

$$q_x = -\lambda \left(\frac{dT}{dx}\right)$$

FOURRIER-jev zakon!

TRODIMENZIONALEN PROBLEM

$$q_x = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)$$

$$q_y = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)$$

$$q_z = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

$$q = \nabla T$$

∇ ... nabla

λ ustreza kot faktor proporcionalnosti med fluksom in gradientom je snovna lastnost (odvisna samo od materiala)

λ ... snovna lastnost

snov ... λ [W/m K]

trdne snovi .... 1-450 (baker 360)

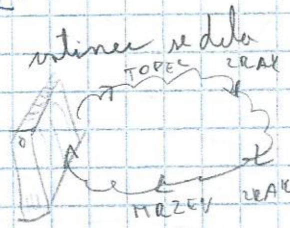
tekočine .... 0,1 - 1

plini .... 0,01 - 0,1

KONVEKCIJA

Do nastopi ko se gibajoči medij zaleti v trdno površino z drugačno temperaturo

[radiator – hladen zrak]



$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

$$\boxed{\vec{q} = h \cdot (\Delta T_{kar})}$$ NEWTON-ov zakon !!!

$\vec{q}$ .... toplotni fluks v prostoru $\left(\frac{W}{m^2}\right)$

$(\Delta T)_{kar}$ .... karakteristična temperaturna razlika (°C, K)

h .... koeficient toplotnega prestopa $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$

! $h = f$ (hidrodinamski pogoji, snovne lastnosti, geometrija, ΔT)

pojav	$h\,[W/m^2K]$
naravna konvekcija, zrak	5 - 50
prisilna konvekcija, zrak ...	25 - 200
naravna konvekcija, voda ...	50 - 1000
prisilna konvekcija, voda ...	250 - 15000
vretje vode	do 45 000
kondenzacija pare v filmu ...	do 20 000

$10^{-7} - 10^{-4}\,m$ toplotna radiacija

- sevanje → površinski pojav

SEVANJE ČRNEGA TELESA

$\dot{Q} = \sigma \cdot A \cdot T_s^4$ (T v kelvinih) STEFANOV ZAKON

σ … Stefan Boltzmanova konstanta ($\sigma = 5{,}676 \cdot 10^{-8}\ W/m^2K^4$)

A … površina telesa

T_s … temperatura površine (K!)

REALNO TELO (kak odstopa od črnega telesa)

ε … emisivnost (/)

$\varepsilon \leq 1$

realna telesa: $\varepsilon \sim 0{,}8$

$\dot{Q} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot T_s^4$

$\dot{Q}_{neto} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma T_s^4 - \alpha \cdot A \cdot \sigma \cdot T_{ok}^4$ (površina) (okolice)

α … absorbtivnost (/)

$0 \leq \alpha \leq 1$

Definicija sivega telesa: $\varepsilon \equiv \alpha$ (tolk k seva tok tut sprejema)

!!! $\dot{Q}_{neto} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma (T_s^4 - T_{ok}^4)$ — neto efekt izsevane energije sivega telesa, ki je dober približek realnega telesa.

LOM ZA KOLOKVIJ

1. Cev za transport pare se nahaja v laboratorijski hali. Temperatura stene in zraka 25°C. Zunanji premer cevi 70 mm, Temperatura površine stene cevi 200°C. Koeficient toplotnega prestopa je ocenjen na 15 W/m²K. Izračunaj toplotne izgube na 1 m cevi.

a) stacionarno stanje
b) radiacija skozi model majhne površine in velike zaprte ~~okolice~~ okolice
c) površino cevi enačim s sivim telesom

$T_{ok} = 25°C$

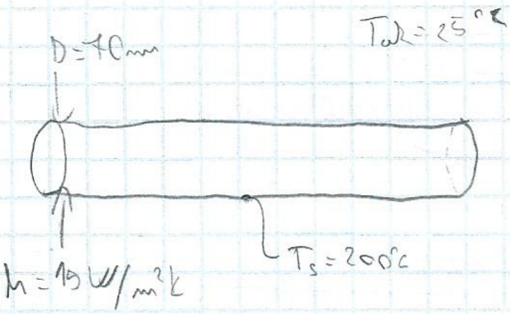
$T_s = 200°C$

$h = 15\ W/m^2K$

$L = 1\ m$

$D = 70\ mm$

sivo telo : $\varepsilon = \alpha \doteq 0,8$



toplotni tok pri konvekciji

$$\dot{Q}_{izgube} = \dot{Q}_{konv} + \dot{Q}_{neto\ radiacije}$$

Štefanova konstanta

$$\dot{Q}_{izgube} = h \cdot A\,(T_s - T_{ok}) + \varepsilon \cdot A \cdot \sigma\,(T_s^4 - T_{ok}^4)$$

$$\dot{Q} = \frac{15\ W}{m^2K} \cdot \pi \cdot 0,07m \cdot 1m\,(200-25) \cdot K +$$

$$+ 0,8 \cdot 5,676 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4} \cdot \pi \cdot 0,07m \cdot 1m \left[(473)^4 - 298^4\right]$$

~~Q = 577 W + 421~~

$$\dot{Q} = 577,27\ W + 421,08\ W = 998,35\ W$$

SNOVNE IN ENERGIJSKE BILANCE

a) ZAPRTEGA SISTEMA PRI KONČNI SPREMEMBI (ne bomo gledali po času ... samo začetek in konec!!)

↳ nereaktiven sistem

SNOVNA BILANCA

$$\begin{bmatrix}\text{akumulacija}\\ \text{mase v}\\ \text{sistemu}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\text{vtok mase}\\ \text{v sistem}\end{bmatrix}^{0} - \begin{bmatrix}\text{iztok mase}\\ \text{iz sistema}\end{bmatrix}^{0}$$

$$\Delta m = 0 - 0 \Rightarrow \boxed{\Delta m = 0,\ m = \text{konst.}}$$

ENERGIJSKA BILANCA

$$\begin{bmatrix}\text{akumulacija}\\ \text{energije v}\\ \text{sistemu}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\text{vtok energije}\\ \text{v}\\ \text{sistem z maso}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\text{iztok energije}\\ \text{iz sistema}\\ \text{z maso}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\text{dovedena}\\ \text{toplota v}\\ \text{sistem}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\text{delo sistema}\\ \text{ne okolico}\end{bmatrix}$$

$$\boxed{\Delta E_t = Q - W}$$

1. zakon termodinamike za zaprt sistem

$$\Delta E_t = \Delta(E_k^{\,0} + E_p^{\,0} + U_m)$$

običajno v kemijski tehniki !!!

$$\boxed{\Delta E_t = \Delta U_m = Q - W}$$

SNOVNA IN ENERGIJSKA BILANCA MAKROSKOPSKEGA ODPRTEGA SISTEMA

- gledam na časovno enoto : dt (delta t)

M.B. :

$$\begin{bmatrix}\text{akumulacija} \\ \text{mase v sistemu} \\ \text{na časovno enoto}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\text{vtok mase v} \\ \text{sistem na} \\ \text{časovno enoto}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\text{iztok mase iz} \\ \text{sistema na} \\ \text{časovno enoto}\end{bmatrix}$$

$$\boxed{\frac{d(m)}{dt} = \phi_{m_v} - \phi_{m_i}}$$

; $\phi_{m_v}, \phi_{m_i} = konst.$!!!

(ϕ_{m_v} → masni vtok; ϕ_{m_i} → masni iztok)

$$\int_{m_0}^{m} dm = (\phi_{m_v} - \phi_{m_i}) \int_0^t dt$$

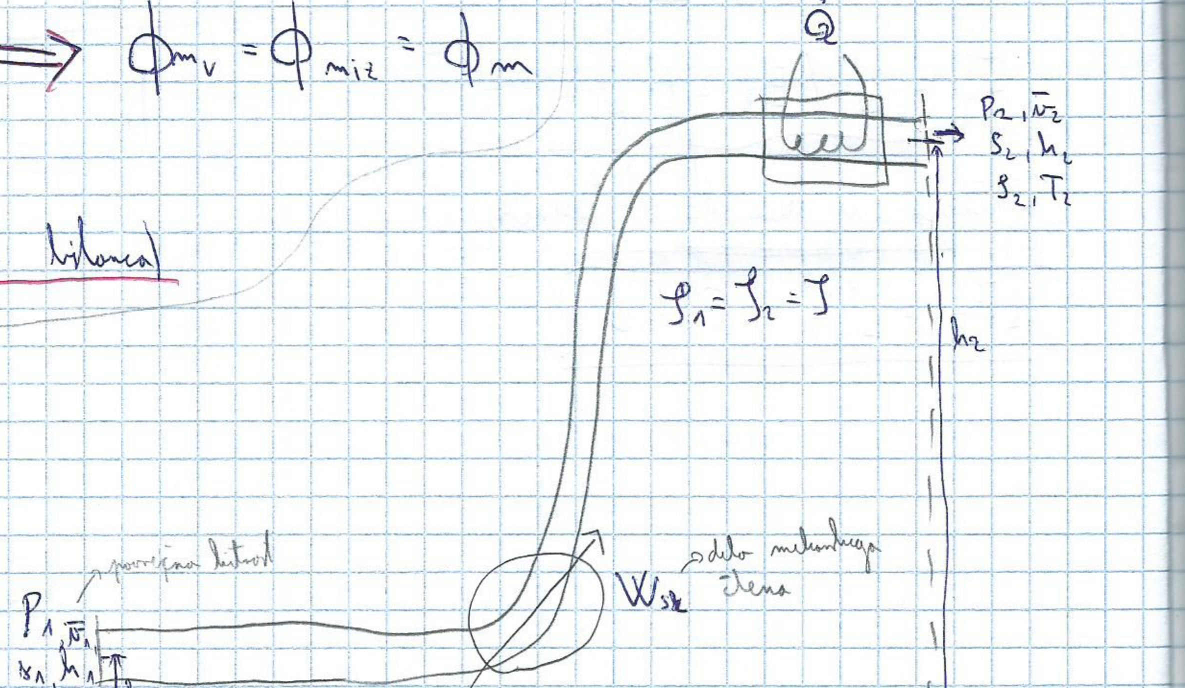
$$(m - m_0) = (\phi_{m_v} - \phi_{m_i}) \cdot t$$

$$\boxed{m = m_0 + (\phi_{m_v} - \phi_{m_i}) \cdot t}$$!

STACIONARNO STANJE

$$\boxed{\frac{dm}{dt} = 0} \Longrightarrow \phi_{m_v} = \phi_{m_{iz}} = \phi_m$$

E.B. (energijska bilanca)



[akumulacija totalne energije v sistemu na enoto časa] = [vtok E_T z maso v sistem na enoto časa] − [iztok E_T z maso iz sistema na enoto časa] + [dovedena toplota v sistem na enoto časa] −

− [delo sistema na okolico na enoto časa]

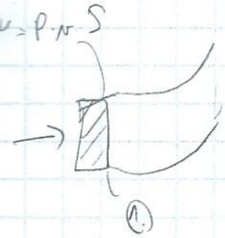
(→ totalna energija)

$$\frac{d(E_T)}{dt} = \Phi_{m_1}\left(\hat{E}_{k_1} + \hat{E}_{p_1} + U_{m_1}\right) - \Phi_{m_2}\left(\hat{E}_{k_2} + \hat{E}_{p_2} + U_{m_2}\right) + \dot{Q} - \dot{W} +$$

$$+ P_1 \bar{v}_1 S_1 - P_2 \bar{v}_2 S_2$$

(→ masni tok; notranja energija; na kilo; DELO ~~TEK~~ TOKA)

$\left[\frac{J}{s} = W\right]$ $\left[\frac{kg}{s}\right]$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$



$$\Phi_{m_1} \cdot \hat{U}_{m_1} + P_1 v_1 S_1 =$$

$$= \bar{v}_1 S_1 \rho \left(\hat{U}_{m_1} + \frac{P_1}{\rho}\right)$$

$\Phi_m = \Phi_v \cdot \rho$

$\Phi_m = \bar{v} S \cdot \rho$

$$\hat{H}_1 = \hat{U}_m + \frac{P_1}{\rho} = \hat{U}_m + P_1 \cdot \hat{V}_1$$ →entalpija

Pripeljem na entalpijo!

$$\frac{d(E_T)}{dt} = \Phi_{m_1}\left(\hat{E}_{k_1} + \hat{E}_p + \hat{H}_1\right) - \Phi_{m_2}\left(\hat{E}_{k_2} + E_{p2} + H_2\right) + \dot{Q} - \dot{W}$$

splošna oblika za stacionarno in nestacionarno stanje!!!

POSEBEN PRIMER

STACIONARNO STANJE

masna bilanca → M.B. $\frac{dm}{dt} = \Phi_{m_1} = \Phi_{m_2} = \Phi_m$

energijska bilanca → E.B. $\frac{d(E_T)}{dt} = 0$ $\quad 0 = \Phi_m\left(\left(\hat{E}_{k_1} - E_{k_2}\right) + \left(\hat{E}_{p_1} - \hat{E}_{p_2}\right) + \left(\hat{H}_1 - \hat{H}_2\right)\right) +$

DEFINICIJA

Δ = mesto 2 − mesto 1

$$\phi_m \cdot \Delta \left(\hat{E}_k + \hat{E}_p + \hat{H} \right) = \hat{Q} - \dot{W}$$

1. zakon termodinamike za odprt sistem v stacionarnem stanju

~~NESTISLJIVA TE~~

Izračun $\Delta \hat{H}$!

- za pline

$$\Delta \hat{H} = \int_{T_1}^{T_2} c_p \cdot dT \simeq \bar{c}_p (T_2 - T_1)$$

(specifična toplota pri konstantnem p.)

- za nestisljive tekočine:

$$\Delta \hat{H} = \int_{T_1}^{T_2} c_p \, dT + \frac{P_2 - P_1}{\rho}$$

$$\Delta H = \frac{T_1}{c_p} (T_2 - T_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho}$$

BILANCA MEHANSKE ENERGIJE:

(masni pretok)

$$\phi_m \Delta \left(\frac{v^2}{2} + gh + \frac{P}{\rho} \right) = -\dot{W}^{\,0}$$

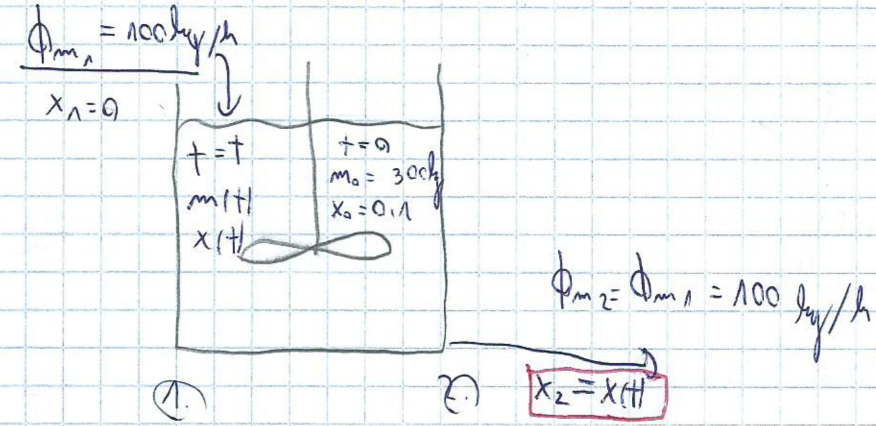
Sistem nič ne dela:

$$\Delta \left(\frac{v^2}{2} + gh + \frac{P}{\rho} \right) = 0 ; \qquad \frac{v^2}{2} + gh + \frac{P}{\rho} = \text{konstanta}$$

BERNULIJEVA ENAČBA

V mešalniku 300 kg 10% raztopine soli, v mešalnik doteka čista voda s pretokom 100 kg/h, iztok raztopine je enak vtoku. Zapiši zvezo med koncentracijo raztopine v mešalniku in ~~koncentracijo~~ časom.

- predpostavke:
  1. v mešalniku predpostavimo popolno premešanje
  2. - masne toplote so neodvisne od koncentracije soli in enake čisti vodi



MB: za celotno raztopino

$$\frac{d(m)}{dt} = \Phi_{m_1} - \Phi_{m_2} = 0 \Rightarrow m = \text{konst.!} \quad m \neq f(t)$$ (ni odvisna)

MB: za sol

$$\frac{d(m \cdot x)}{dt} = \Phi_{m_1} \cdot \overset{0}{x_1} - \Phi_{m_2} \cdot \overset{x}{x_2}$$

$$m \frac{dx}{dt} = 0 - \Phi_m \cdot x \rightarrow \frac{dx}{dt} = \frac{\Phi_m}{m} x$$

$$\int_{x_0}^{x} \frac{dx}{x} = \frac{\Phi_m}{m} \int_0^t dt$$

$$\ln x - \ln x_0 = \ln \frac{x}{x_0} = -\frac{\Phi_m}{m} \cdot t \rightarrow \frac{x}{x_0} = e^{\frac{\Phi_m \cdot t}{m}}$$

$$x = x_0 \cdot e^{-\frac{\Phi_m \cdot t}{m}}$$

→ rešitev

- kdaj pade koncentracija za polovico

$x = \frac{x_0}{2}$; $t = ?$

$$\ln \frac{x}{x_0} = -\frac{\Phi_m \cdot t}{m}$$

$$t = -\left(\ln \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{m}{\ldots}$$

$$t = \left(-\ln \frac{1}{2}\right) \frac{300\,\text{kg} \cdot \text{h}}{100\,\text{kg}}$$

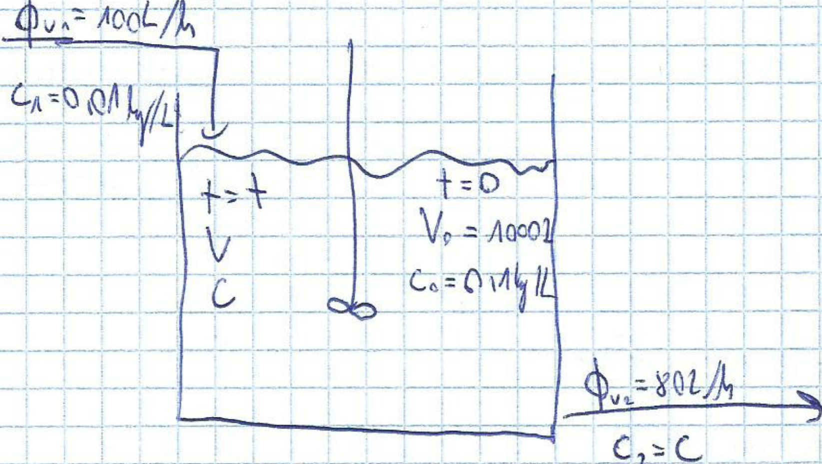
$$t = 2{,}1\ \text{h}$$

1. Rezervoar vsebuje 1000L vodne raztopine soli s koncentracijo 0,1 kg/L v rezervoar vodimo vodno raztopino soli, ki vsebuje 0,01 kg/L soli s pretokom 100L/h. Kakšna bo koncentracija soli 1 po dveh urah

a) če ni iztoka (D.N.)

b) hitrost iztoka 80L/h

– iste predpostavke kot pri prejšnji nalogi



b)

$V_0 = 1000L$

$c_0 = 0,1 kg/L$

$c_1 = 0,01 kg/L$

$\Phi_{V_1} = 100L/h$

$t = 2h$

$\Phi_{V_2} = 80L/h$

– nestacionaren proces

M.B.: za raztopino

akumulacija = vtok – iztok

$$\frac{d(V)}{dt} = \Phi_{V_1} - \Phi_{V_2}$$

$$\int_{V_0}^{V} dV = (\Phi_{V_1} - \Phi_{V_2}) \int_0^2 dt$$

$$V - V_0 = (\Phi_{V_1} - \Phi_{V_2}) \cdot t$$

$$V = V_0 + (\Phi_{V_1} - \Phi_{V_2}) \cdot t$$

M.B.: za sol

ak = vtok - iztok

↓ akumulacija

totalni diferencial

$c = c_2$

$$\frac{d(V\cdot c)}{dt} = \Phi_{V_1} c_1 - \Phi_{V_2} c$$

$$\left[\frac{m^3\, kg}{m^3\, s}\right] \qquad \left[\frac{m^3}{s}\;\frac{kg}{m^3}\right]$$

vsak je eden odvisen od časa

$$V \cdot \frac{dc}{dt} + c\frac{dV}{dt} = \Phi_{V_1} \cdot c_1 - \Phi_{V_2} \cdot c$$

$$\left[V_0 + (\Phi_{V_1} - \Phi_{V_2}) \cdot t) \cdot \frac{dc}{dt}\right] + c \cdot (\Phi_{V_1} - \Phi_{V_2}) = \Phi_{V_1} \cdot c_1 - \Phi_{V_2} \cdot c$$

$$\left[(V_0 + (\Phi_{V_1} - \Phi_{V_2}) \cdot t) \cdot \frac{dc}{dt}\right] = \Phi_{V_1} c_1 - \Phi_{V_2} c - \Phi_{V_1} c + \Phi_{V_2} \cdot c$$

$$-\text{ll}- \qquad = \Phi_{V_1} (c_1 - c)$$

$$\frac{dc}{\Phi_{V_1}(c_1 - c)} = \frac{dt}{V_0 + (\Phi_{V_1} - \Phi_{V_2}) \cdot t}$$

! $$\int \frac{dx}{a + bx}$$

↳ vpiši rešitev za kolokvij

$$\frac{dc}{\Phi_{V} \cdot c_1 - \Phi_{V_1} \cdot c} = \frac{dt}{V_0 + (\Phi_{V_1} - \Phi_{V_2})t}$$

(a, bx)

$$\int_{c_0}^{c} \frac{dc}{\Phi_{V} c_1 - \Phi_{V_1} c} = \int_0^t \frac{dt}{V_0 + (\Phi_{V_1} - \Phi_{V_2}) \cdot t}$$

$$-\frac{1}{\Phi_{\ldots}} \ln \frac{\Phi_{V_1} c_1 - \Phi_{V} c}{\Phi \ldots} = \frac{1}{\Phi \ldots \Phi \ldots} \ln \frac{V_0 + (\Phi_{V_1} - \Phi_{V_2})t}{\ldots} \;/ \cdot (-\Phi_{\ldots})$$

$$\ln \frac{\phi_{v_1} \cdot c_1 - \phi_{v_1} \cdot c}{\phi_{v_1} c_1 - \phi_{v_1} \cdot c_0} = - \frac{1 \phi_{v_1}}{\phi_{v_1} - \phi_{v_2}} \cdot \ln \frac{V_0 + (\phi_{v_1} - \phi_{v_2}) t}{V_0}$$

$$c(t = 2h) = ?$$

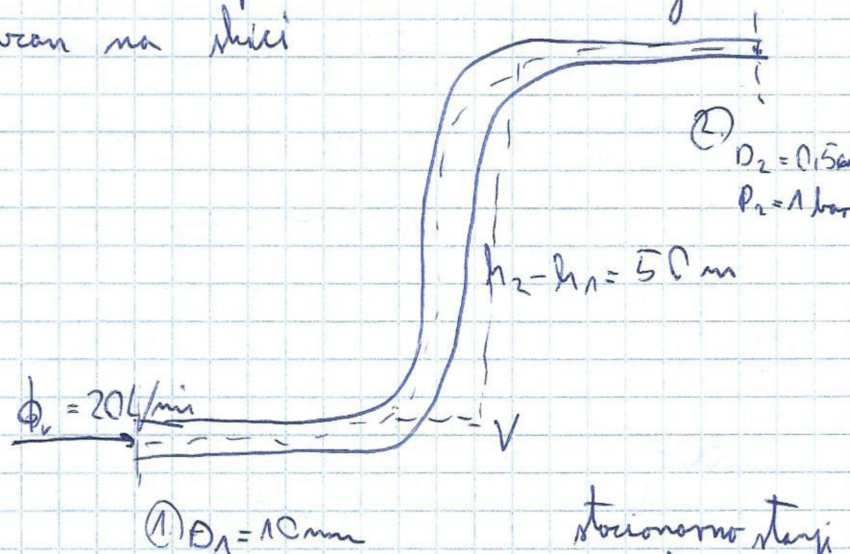
$$c = 0{,}08317 \, kg/L$$

$$c = - \frac{1 \phi_{v_1}}{\phi_{v_1} - \phi_{v_2}} \cdot \ln \frac{V_0 + (\phi_{v_1} - \phi_{v_2}) t (\phi_{v_1} c_1 - \phi_{v_1} c_0)}{V_0 \cdot \ln \phi_{v_1} c_1} + \phi_{v_1}$$

$$= -5 \cdot \ln \frac{1000 + 360}{1000 l \cdot \ln}$$

ZA KOLOKVIJ !!!

2.) Vodo v količini 20 L/min želimo spravit na 50 m višji nivo po cevovodu, ki je prikazan na skici



$\Phi_v = 20 L/min \rightarrow \Phi_{v_1} = \Phi_{v_2} = \Phi_v$

$\Delta h = 50 m$; $\Delta h = h_2 - h_1$

$D_1 = 10 mm = 0,01 m$

$D_2 = 0,5 mm = 0,005 m$

$P_2 = 1 bar$

$P_1 = ?$

stacionarno stanje

makroskopski sistem

Bernulijeva enačba:

$$\Delta\left(\frac{\bar{v}^2}{2} + gh + \frac{P}{\rho}\right) = 0$$

$$\left(\frac{\bar{v}_2^2}{2} - \frac{\bar{v}_1^2}{2}\right) + g(h_2 - h_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} = 0$$

$\Phi_v = S \cdot \bar{v}$

$\bar{v}_1 = \frac{\Phi_v}{S_1}$ → presek

$\bar{v}_1 = \frac{20 \cdot 10^{-3} m^3 \cdot 4}{\pi (0,01)^2 m^2 \cdot 60 s}$

$\bar{v}_1 = 4,24 m/s$

$\bar{v}_2 = 16,96 m/s$

$\bar{v}_2 = 4 \times v_1 = 16,96 m/s$

$\bar{v}_2 = \frac{\Phi_v \cdot 4}{D_2^2} = \frac{\Phi_v \cdot 4}{\left(\frac{D_1}{2}\right)^2}$

(gotovo)

$P_1 - P_2 = 1000 \left[\left(\frac{16,96^2}{2} - \frac{4,24^2}{2}\right) + 9,8(50)\right]$

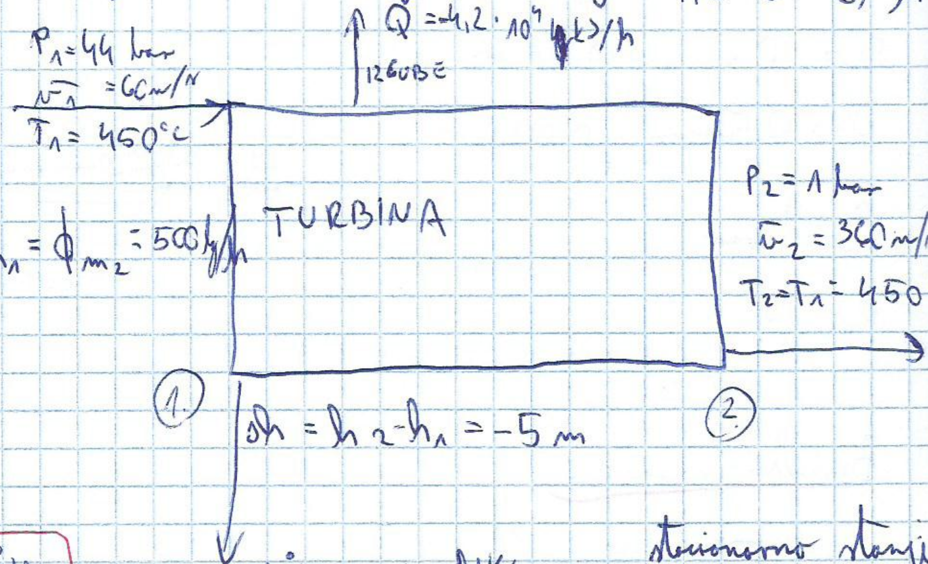
$P_1 - P_2 = 1000 \left[134,8 + 490\right]$

$P_1 - P_2 = 6,248 \cdot 10^5 Pa$

$P_1 = 6,248 \cdot 10^5 Pa + 1000 Pa$

(3) Parno turbino poganja 500 kg pare na uro. Para vstopa v turbino pri 44 barih, 450 °C in linearni hitrosti 60 m/s. Izstopa pa na 5 m nižjem nivoju pri atmosferskih tlaku s hitrostjo 360 m/s. Turbina opravlja delo s 700 kW, njene toplotne izgube znašajo 4,2 · 10^4 kJ/h

$\Delta H = ?$



stacionarno stanje
makroskopski sistem

ENERGIJSKA BILANCA

$$\phi_m \Delta(\hat{E}_k + \hat{E}_p + \hat{H}) = \dot{Q} - \dot{W}_s$$

$$\phi_m \cdot \Delta\hat{H} = -\phi_m \cdot \Delta\hat{E}_k - \phi_m \cdot \Delta\hat{E}_p + \dot{Q} - \dot{W}_s$$

$$= -8750\,W + 6{,}8\,W - \frac{4{,}2 \cdot 10^4\,kJ \cdot 10^3}{3600\,s} - 700 \cdot 10^3\,W \approx 720\,kW$$

(verjetno narobe)

$$-\phi_m \cdot \Delta\hat{E}_k = -\phi_m\left(\frac{\bar{v}_2^2}{2} - \frac{\bar{v}_1^2}{2}\right)$$

$$= -\frac{500\,kg}{3600\,s}\left(\frac{360^2\,m^2}{2\,s^2} - \frac{60^2\,m^2}{2\,s^2}\right)$$

$$= -8750\,W$$

$$-\phi_m \cdot \Delta\hat{E}_p = -\phi_m\left(g \cdot (h_2 - h_1)\right) =$$

$$= -\frac{500\,kg}{3600\,s}\left(9{,}8\,\frac{m}{s^2}\,(-5\,m)\right)$$

$$= -6{,}8\,W$$

b) Od celotne moči, ki smo jo jemali do zdaj, nismo odšteli zanemarljivi

TOK TEKOČIN

razlaga (definicija) viskoznosti!

LINEARNI KOORDINATNI SISTEM (normalen

LOGARITEMSKI KOORDINATNI SISTEM

REALNE TEKOČINE – izkazuje viskoznost!

strižna napetost $\tau = \frac{\text{sila } F}{\text{ploskev } A}$ [Pa]

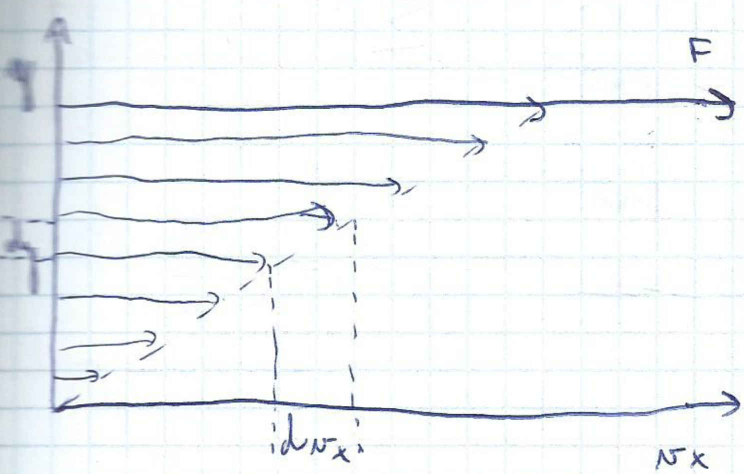
strižna hitrost $\dot{\gamma} = \frac{dv}{dx}$ [s^{-1}]

viskoznost $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$

η [μ] ... viskoznost [Pa s]

τ .... strižna napetost [Pa]

$\dot{\gamma}$ .. strižna hitrost [s^{-1}]



$$\eta = \frac{\tau}{\gamma}$$

$$\tau = \eta \cdot \gamma$$

$$\tau_{yx} = \eta \cdot \frac{dv_x}{dy}$$

Viskoznost razumemo kot faktor proporcionalnosti med strižno napetostjo in strižno hitrostjo

Toplota

Q → toplota

toplotni tok $\dot{Q}$

$q = \frac{Q}{A \cdot t}$

toplo...

gibalna količina

$m \cdot v$

$$\left(\frac{m \cdot v}{A \cdot t}\right) = \frac{m \cdot a}{A} = \frac{F}{A} = p$$

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

η → $f(T, P)$ – Newtonske tekočine (voda, sladkorna raztopina)

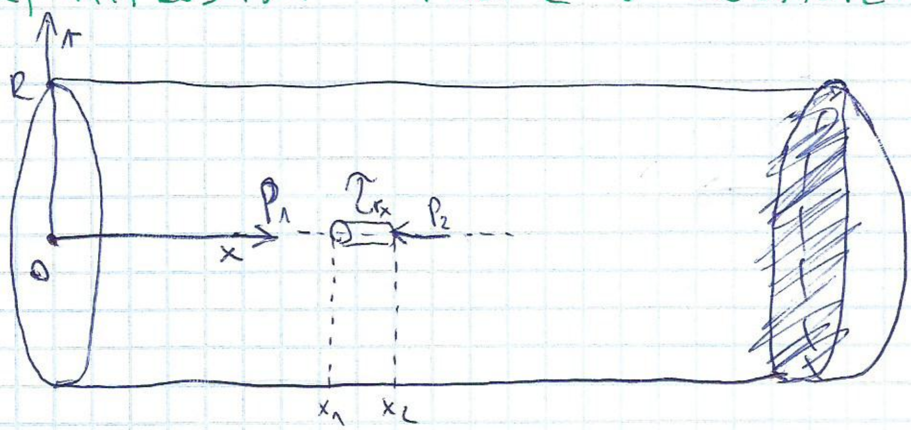
η → $f(T, P, \dot{\gamma})$ – Nenewtonske tekočine (raztopine polimerov, zobna pasta)

↳ da steče rabi nekako silo da se premakne

- hitrostni profil
- frikcijske izgube

LAMINAREN TOK

a) HITROSTNI PROFIL V CEVASTEM VODNIKU



$$\sum_i F_i = 0$$

$$\tau_{rx} = -\eta \frac{dv_x}{dr}$$

↳ ker hitrost pada mu, damo (−), da se izniči

STACIONARNO STANJE – se premika, vendar brez pospeška

$$\sum_i F_i = 0$$

$$P_1 \cdot \pi r^2 - P_2 \pi r^2 - \overset{TAC}{\tau_{rx}} \cdot 2\pi r (x_2 - x_1) = 0$$

$$\tau_{rx} = \frac{(P_1 - P_2)\pi r^2}{(x_2 - x_1) \cdot 2\pi r} = \frac{(P_1 - P_2)}{(x_2 - x_1)} \cdot \frac{r}{2}$$

$$-\eta \frac{dv_x}{dr} = \frac{(P_1 - P_2)}{x_2 - x_1} \cdot \frac{r}{2}$$

$$-dv_x = \frac{(P_1-P_2)}{x_2-x_1} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \int_r^R \frac{r}{2} \cdot dr$$

$$v_x = \frac{(P_1-P_2)}{(x_2-x_1)} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \left(\frac{R^2}{4} - \frac{r^2}{4}\right) \quad , 0 \leq r \leq R$$

$$v_x = \frac{(P_1-P_2)}{x_2-x_1} \cdot \frac{1}{\eta} \frac{R^2}{4} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$$

$$-\frac{dP}{dx} = konst.!! = \frac{P_1-P_2}{L}$$

↳ tlak pada linearno z dolžino cevi (dolžja cev, nižji tlak)

$$v_x = \frac{(P_1-P_2)}{L} \cdot \frac{1}{\eta} \frac{R^2}{4} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$$; L ... dolžina cevi!

$$v_{max} = \frac{(P_1-P_2)}{L} \frac{1}{\eta} \frac{R^2}{4}$$ maksimalna hitrost

$$\bar{v} = \frac{1}{A} \int_A v_x \, dA = \frac{1}{2} v_{max}$$ povprečna hitrost

$S = A =$ površina

$$\bar{v} = \frac{1}{2} v_{max}$$

$$\Phi_v = \bar{v} \cdot S$$

$$\Phi_v = \bar{v} \cdot S = \frac{(P_1-P_2)}{L} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R^2}{8} \pi r^2$$

$$\Phi_v = \frac{(P_1-P_2)}{L} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\pi R^4}{8}$$

FRIKCIJSKE IZGUBE

- ravni vodnik
- horizontalna lega
- konstanten presek
- stacionarno stanje
- konstantne snovne lastnosti

MEHANSKA BILANCA ENERGIJE

delo črpalke — lost-work-friction

$$\Delta\left(\frac{\bar{v}^2}{2} + g z + \frac{p}{\rho}\right) = -\dot{W}_{s} - \Phi_m \, l \hat{w}_f$$

popravljena bilanca energije za realen medij

hitrost konstantna, $\Delta = 0$ — sprememba višine

$$\Delta\left(\frac{\bar{v}^2}{2} + g \cdot z + \frac{p}{\rho}\right) = -l\hat{w}_f$$

$$\frac{\Delta p}{\rho} = -l\hat{w}_f$$

$$\frac{p_1 - p_2}{L} \cdot \frac{1}{\eta} \frac{\pi R^4}{8} = \Phi_V = \bar{v} \cdot S$$

$$R = \frac{D}{2}$$

$$\frac{\Delta p}{\rho} = -l w f = \frac{(p_2 - p_1)}{\rho} = -l w f$$

$$-\frac{\Delta p}{\rho} = \frac{(p_1 - p_2)}{\rho} = \frac{\bar{v}}{\rho} \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{L \eta \cdot 8}{\pi R^4} \Big/ \left(\frac{\bar{v}^2}{2}\right) \Big/ : \left(\frac{\bar{v}^2}{2}\right)$$

$$-\frac{\Delta p}{\rho} = l\hat{w}f = \left(\frac{\bar{v}^2}{2}\right) \frac{L \cdot \eta \; 4 D^2 \; 16}{\bar{v} \rho \; R^4 \; D^4 \; D^2 D D}$$

$$-\frac{\Delta p}{\rho} = \frac{64}{Re}\left(\frac{\bar{v}^2}{2}\right)\left(\frac{L}{D}\right)$$

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot D \cdot \rho}{\eta}$$

→ LAMINARNI TOK

b) TURBOLENTNI TOK — empiričen pristop

- hitrostni profil

$$v_x = v_{max}\left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n};$$

$n = f(Re)$

$n = 6,\ Re > 4 \cdot 10^3$

$n = 7,\ Re > 1{,}1 \cdot 10^5$

!!!

$$v_{max} = \frac{5}{4}\bar{v}$$

$$\bar{v} = \frac{\Phi_v}{S}$$

PADEC TLAKA

- hrapavost cevi!

$$\frac{e}{D} = \varepsilon$$ → hrapavost cevi

$$\frac{-\Delta P}{\rho} = f \cdot \left(\frac{\bar{v}^2}{2}\right)\left(\frac{L}{D}\right)$$

→ f ... frikcijski faktor $f = f\left(\frac{1}{Re}, \frac{e}{D}\right)$ → MOODY-jev diagram (str. 7 list)

→ TURBOLENTNI TOK

LIST (7)

$Re = 10^4$, $\varepsilon = 0{,}002$ } $f = 0{,}035$

- razločit moodyjev diagram

x, y

NALOGE

1. Po cevi premera 1 cm, dolžine 2 m teče tekočina z viskoznostjo 0,1 Pas, na cevi je bil izmerjen padec tlaka 0,1 bar. Nariši hitrostni profil.

a) lam. ali turbulenten tok ?

$D = 1\,cm = 0{,}01\,m \Rightarrow R = (0{,}005\,m)$

$L = 2\,m$

$\eta = 0{,}1\,Pa\,s$ ($\eta_{vode} = 1 \cdot 10^{-3}\,Pa\,s$)

$-\Delta P = 0{,}1\,bar$

nariši hitrostni profil

$Re = \frac{\bar{v}\,D\cdot\rho}{\eta}$, glede na η sklepam na laminaren tok

$\bar{v} = \frac{1}{2} v_{max} \Rightarrow v_{max} = 0{,}31\,m/s$

$\bar{v} = \frac{\Phi_V}{S} = \frac{1{,}22\cdot 10^{-5}\,m^3\cdot 4}{s\cdot\pi\,(0{,}01)^2\,m^2} = 0{,}155\,m/s$

$\Phi_V = \frac{(P_1 - P_2)}{L}\cdot\frac{1}{\eta}\cdot\frac{\pi R^4}{8} = \frac{0{,}1\cdot 10^5\,Pa\cdot 1\cdot\pi\cdot(5\cdot 10^{-3})^4\cdot m^{4}}{2\,m\cdot 0{,}1\,Pa\,s\cdot 8} = 1{,}227\cdot 10^{-5}\frac{m^3}{s}$

$v_x = \underbrace{\frac{P_1 - P_2}{L}\cdot\frac{1}{\eta}\cdot\frac{R^2}{4}}_{v_{max}}\left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$

$$v_x = v_{max}\left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$$

tok: $Re = \frac{\bar{v}\cdot D\cdot\rho}{\eta} = \frac{0{,}155\,m\cdot 0{,}01\,m\cdot 910\,kg\,s^2}{s\,m^3\cdot 0{,}1\,Pa\,s\,kg\,m}$

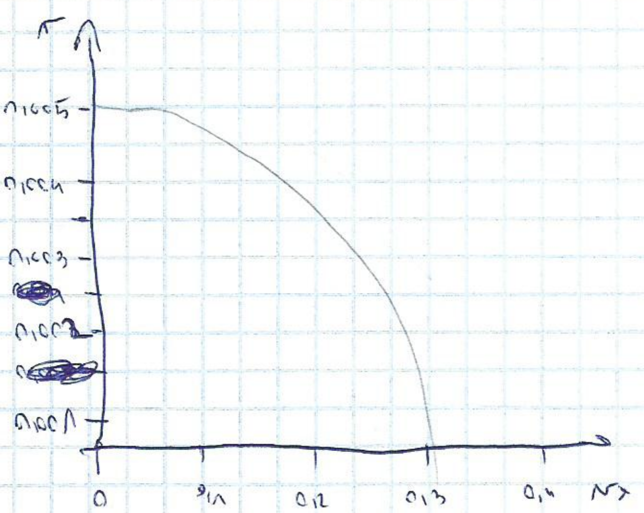
$\frac{F}{A} = \frac{m\,a}{A} = \frac{kg\,m}{s^2}$

$Re = 14{,}105$

ker je tok može turbulenten ?

$2000 < x$

$\rho = 910\,kg/m^3$



2. Dolžina cevi 2m, premer 1 cm, po njej se pretaka voda z 10X večjo hitrostjo

$L = 2\,m$

$d = 1\,cm$

$\bar{v} = 1{,}55\,m/s$

VODA

$\rho = 1000\,kg/m^3$

$\eta = 1 \cdot 10^{-3}\,kg/m \cdot s =$
$= 1 \times 10^{-3}\,Pa\,s$

$Re = \frac{\bar{v} \cdot D \cdot \rho}{\eta} = \frac{1{,}55 \cdot 0{,}01 \cdot 1000}{1 \cdot 10} =$

$= 15\,500 = 1{,}55 \cdot 10^4$

turbulenten tok

$v_x = v_{max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/m}$, $m = 6$

$v_{max} = \frac{5}{4}\bar{v}$

a) hitrostni profil

b) moč črpalke ? $\dot{W}_{sh} = ?$

(0,03 , 10^4) – iz lista (iz prejšnje naloge / samo za vzorec)

$\frac{e}{D}$ = hrapavost cevi $= 0{,}06 = \varepsilon = f$

$\frac{e}{D} = 0{,}03$

Frikcijske izgube: $\hat{lw}f = -\frac{\Delta P}{\rho} = f\left(\frac{\bar{v}^2}{2}\right)\left(\frac{2L}{D}\right)$

$\hat{lw}f = \frac{-\Delta P}{\rho} = 0{,}06\left(\frac{1{,}55^2}{2}\right)\left(\frac{2}{0{,}01}\right) = 14{,}4\,\frac{m^2}{s^2}$

E.b: stacionarno stanje, poenostavljena bilanca meh. energije za realen medij

kinetična in potencialna energija sta stalni; 0 → 0; 0 → pumpa kar deluje in je zato stalen tlak

$\Phi_m\left(\frac{\bar{v}^2}{2} + g \cdot h + \frac{P}{\rho}\right) = -\dot{W}_{sh} - \Phi_m \hat{lw}f$ ✓

$\left(\frac{\bar{v}^2}{2} + gh + \frac{P}{\rho}\right) = -\hat{W}_{sh} - \hat{lw}f$

$\dot{W}_{sh} = -\Phi_m\,\hat{lw}f = -1{,}75\,W$ ✓

$\dot{W}_{sh} = -\Phi_v\,\rho\,\hat{lw}f \cdot \hat{lw}f = -\bar{v} \cdot S \cdot \rho \cdot \hat{lw}f = -\frac{1{,}55\,m \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}01^2\,m^2 \cdot 1000\,kg \cdot 14{,}4}{\ldots}$

PREVAJANJE

- stena
- sestavljena stena
- kombiniran prenos toplote → U

MAKROSKOPSKA BILANCA : DIFERENCIALNA BILANCA

z matematičnimi operacijami
↳ Lahko prevedemo makroskopsko bilanco energije v diferencialno. (brez dokaza)

T. KOLOINI (knjiga): Prenos toplote in snovi

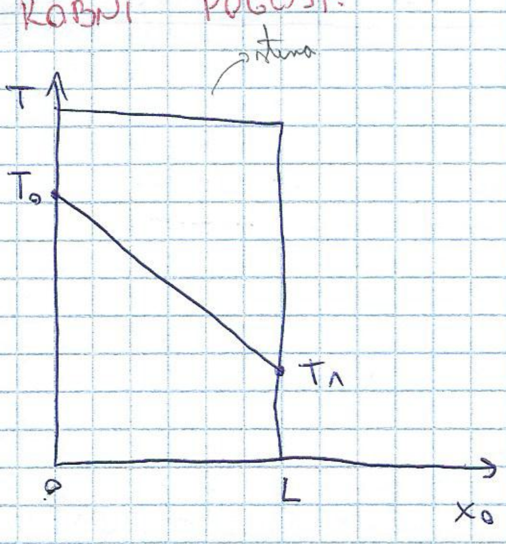
LIST s formulami

Stena, enodimenzionalen problem, stacionarno stanje, prevajanje

Def: $0 = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 0 + 0 \right)$ → na prvo formulo z dela lista (DIFERENCIAL)

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0$$

ROBNI POGOJI:



T_0 in T_1 vzdržujemo

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0$$

$x = 0$; $T = T_0$

$x = L$; $T = T_1$

Reševanje:

1. Integracija: $\frac{dT}{dx} = C_1$; $dT = C_1 \cdot dx$

2. integracija $T = C_1 x + C_2$ (konstanta)

$$T_0 = C_1 0 + C_2 \rightarrow C_2 = T_0$$

$$T_1 = C_1 L + T_0 \rightarrow C_1 = \frac{T_1 - T_0}{L}$$

$$T = \frac{T_1 - T_0}{L} \cdot x + T_0$$

$$\boxed{T = T_0 - \frac{T_0 - T_1}{L} \cdot x}$$

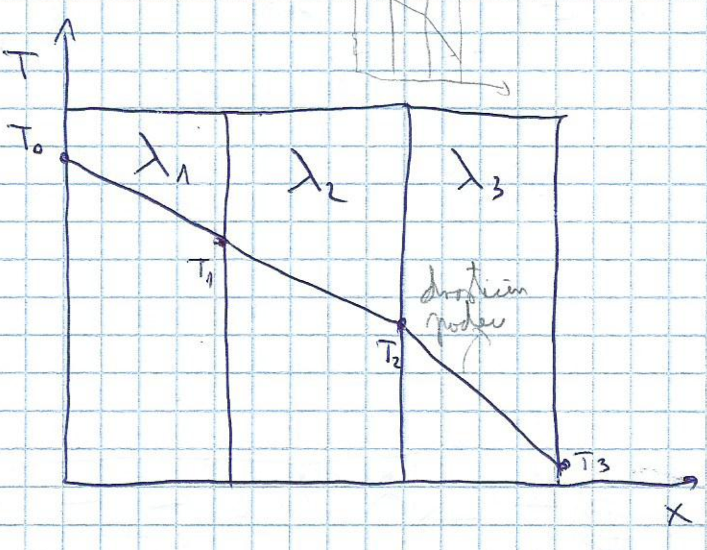
TOPLOTNI TOK

$$\dot{Q} = q_x \cdot A = \left(-\lambda \frac{dT}{dx}\right) \cdot A = -\lambda \left(-\frac{T_0 - T_1}{L}\right) \cdot A$$

$$\boxed{\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \left(\frac{T_0 - T_1}{L}\right)}$$

A → površina stene; L → debelina stene

SESTAVLJENA STENA



Definicija termičnega upora:

$$\dot{Q} = \lambda A \frac{(T_0 - T_1)}{L} \rightarrow \dot{Q} = \frac{(T_0 - T_1)}{R_T};$$

termični upor:

$$R_T = \frac{L}{A \cdot \lambda}$$ → stena prevajanja

$$\dot{Q} = \frac{T_0 - T_3}{\sum_{i=1}^{3} R_{T_i}}$$!!!

dokaz:

$$\dot{Q} = \lambda_1 A \frac{T_0 - T_1}{L_1} \rightarrow \text{za 1 steno} \rightarrow \frac{\dot{Q} \cdot L_1}{\lambda_1 A} = T_0 - T_1$$

$$\dot{Q} = \lambda_2 A \frac{T_1 - T_2}{L_2} \rightarrow \text{2 stena} \rightarrow \frac{\dot{Q} L_2}{\lambda_2 A} = T_1 - T_2$$

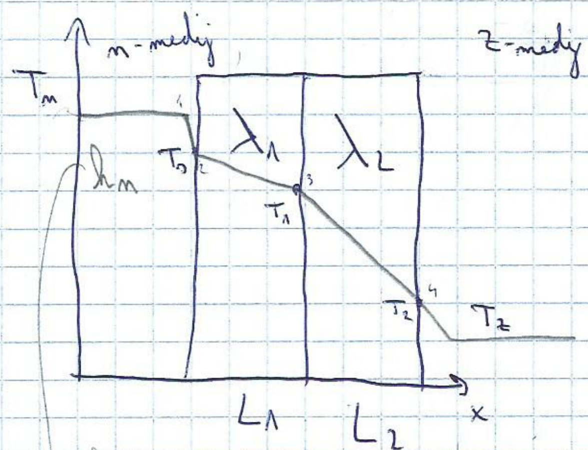
$$\dot{Q} = \lambda_3 \cdot A \frac{T_2 - T_3}{L_3} \rightarrow \text{za 3 stena} \rightarrow \frac{\dot{Q} L_3}{\lambda_3 \cdot A} = T_2 - T_3$$

sprašuj na ustnem zagovoru

$$\dot{Q}\left(\frac{L_1}{\lambda_1 A} + \frac{L_2}{\lambda_2 A} + \frac{L_3}{\lambda_3 A}\right) = T_0 - T_3$$

→ za 3 stene

KOMBINIRAN PRENOS TOPLOTE



→ koeficient notranjega prestopa

4 upori

$$\dot{Q} = \frac{T_n - T_z}{\sum_{i=1}^{4} RT_i}$$

Definicija R_T pri konvekciji:

$R_T = \frac{L}{A\lambda}$, prev.

$R_T = \frac{1}{hA}$, konv.

$$\dot{Q} = A \cdot h (\Delta T)_{kon}$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T_{kon}}{R_T}, \quad R_T = \frac{1}{hA}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_n - T_z}{\frac{1}{h_n \cdot A} + \frac{L_1}{\lambda_1 A} + \frac{L_2}{\lambda_2 A} + \frac{1}{h_z \cdot A}}$$

$$\dot{Q} = \frac{A (T_n - T_z)}{\frac{1}{h_n} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_z}}$$

→ $\frac{1}{U}$! → $\dot{Q} = U \cdot A \cdot (T_n - T_z)$!!!

h … koeficient toplotnega prestopa

U … koeficient topl. prehoda

$$\dot{Q} = U \cdot A\,(T_n - T_z)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_n} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_z}$$

STACIONARNO STANJE

$$\dot{Q} = U \cdot A\,(T_n - T_z) = h_n A\,(T_n - T_0) = \frac{\lambda_1 A\,(T_0 - T_1)}{L_1} = \dots$$

NALOGA

Izračunajte toplotne izgube izolirane stene hiše, če je stena zidana iz zidakov in obložena z izolacijo penastega betona. Notranja temperatura je 20°C, zunanja $T = -10°C$

$L_1 = 0{,}2\ m$

$\lambda_1 = 0{,}2\ W/mK$

$L_2 = 0{,}1\ m$

$\lambda_2 = 0{,}05\ W/mK$

notranja → $T_n = 20°C$

zunanja → $T_z = -10°C$

$h_n = 5\ W/m^2K$

$h_z = 20\ W/m^2K$

$A = 1\ m^2$

$\dot{Q} = ?$

kontrola decimalke

more priti med čez −10,

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T = 0{,}308 \cdot 1 \cdot 30 = 9{,}24\ W/m^2$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_n} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_z}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{5} + \frac{0{,}2}{0{,}2} + \frac{0{,}1}{0{,}05} + \frac{1}{20} =$$

$$= 0{,}2 + 1 + 2 + 0{,}05 \Rightarrow U = 0{,}308\ W/m^2K$$

Temperaturni profil: $\frac{\dot{Q}}{h_n A}$

$$\dot{Q} = h_n \cdot A\,(T_n - T_0) \longrightarrow T_n - T_0 = \frac{9{,}24}{1 \cdot 5} = 1{,}848$$

$$K \Rightarrow T_0 = (20 - 1{,}848) = 18{,}152$$

$$\dot{Q} = \frac{\lambda_1 A\,(T_0 - T_1)}{L_1} \longrightarrow T_0 - T_1 = \frac{0{,}2 \cdot 1 \cdot 9{,}24}{0{,}2} =$$

$$= 9{,}24\ K \longrightarrow T_1 = 18{,}152 - 9{,}24 = 8{,}912°C$$

$$\dot{Q} = \lambda_2 A\,(T_1 - T_2) \dots$$

+ dodatno vprašanje: Izračunaj debelino izolacije, ki je potrebna, da zmanjšamo za polovico toplotne izgube

$\dot{Q} = 9{,}24 \, W$

$L_2' = ?$

$\dot{Q}' = \frac{\dot{Q}}{2}$

$$\dot{Q}' = U' A \cdot (T_n - T_z)$$

$$\dot{Q} = \frac{\dot{Q}}{2} \quad ; \quad U' = \frac{U}{2} = 0{,}154 \, W/m^2K$$

$$\frac{1}{U'} = \frac{1}{h_n} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2'}{\lambda_2} + \frac{1}{h_z}$$

$$L_2' = \left(\frac{1}{U'} - \frac{1}{h_n} - \frac{L_1}{\lambda_1} - \frac{1}{h_z}\right) \cdot \lambda_2 =$$

$$= \left(\frac{1}{0{,}154} - \frac{1}{5} - \frac{0{,}2}{0{,}2} - \frac{1}{20}\right) \cdot 0{,}05 =$$

$L_2' = 0{,}262 \, m$