

# 1 Preučevanje predeljenih sistemov s sledilnimi metodami

*Seznani se bomo s principom sledilnih metod, s pojmom predelek in hitrostna konstanta ter z merjenjem koncentracije snovi s fotometrom.*

Človeško telo je zapleten sistem, da dobro deluje stalno izmenjuje snovi in energijo z okolico. Skiraj nemogoče je, da bi sledili ali nadzorovali, kaj se dogaja z vsemi njegovimi deli (organi, celicami...) pri vnosu posamezne snovi, zato obravnavamo telo kot sistem predelkov. Predelek je lahko na primer notranjost celice, nek organ, vsa kri v telesu... Kaj vzamemo za predelek, je odvisno od procesa, ki ga preučujemo, in od natančnosti, s katero sistem obravnavamo. Posamezen predelek obravnavamo, kot da je v termodinamskem ravnovesju, kar pomeni, da je v predelku snov (ki jo obravnavamo) enakomerno porazdeljena, da so temperatura, tlak, koncentracije raztopljenih snovi... po celem predelku enake. Kar so nekatere vrednosti termodinamskih količin v različnih predelkih različne, sistem kot celota ni v termodinamskem ravnovesju in v splošnem snov prehaja iz predelka v predelek.

Običajno nas zanima, kako neka snov (zdravilo, sledilo) prehaja po telesu, zato je potrebno poznati velikosti predelkov in hitrost, s katero se snov izmenjuje med predelkom in okolico ali med predelki. Merilo za velikost predelka je lahko njegova masa ali prostornina, količina neke snovi v predelku ali kaj podobnega. Izmenjava snovi med predelkom in njegovo okolico lahko poteka tudi v stacionarnem stanju, ko se velikost predelka s časom ne spreminja.

## 1.1 Vpliv pritoka snovi in velikosti predelka na spreminjanje njegove velikosti

Kot primer pogledimo, kako hitro se izmenjuje voda v telesu in koliko je vse vode v telesu. Voda prihaja v telo s hrano in pijačo, izloča pa se z urinom, potem, izdihanim vlažnim zrakom, solzami... Porazdelitev vode v telesu ni enakomerna, a nas zanima le celotna količina vode in njena izmenjava z okolico (telo kot en predelek). Gledamo le daljša časovna obdobja, zato lahko privzamemo, da prihaja voda v telo enakomerno. Količino vode, ki jo vnesemo v telo, lahko reguliramo, medtem ko je izločanje predvsem odvisno od količine vode v telesu.

Za kvantitativni opis dogajanja označimo celotno prostornino vode (velikost predelka) z  $V$ , pritok s  $\phi$ , odtok pa s  $kV$ ,  $k$  je sorazmernostna konstanta z enoto  $s^{-1}$ .

Sprememba prostornine vode je v časovnem intervalu  $(dV/dt)$  podana z razliko med pritokom ( $\phi$ ), in odtokom ( $kV$ ):

$$\frac{dV}{dt} = \phi - kV. \quad (1.1)$$

Če se volumen s časom ne spreminja:

$$\frac{dV}{dt} = 0 \quad (1.2)$$



je pritok enak odtoku

$$kV = \phi . \quad (1.3)$$

To pomeni, da se ob povečanjem pitju poveča ali masa vode v telesu ali konstanta  $k$  (ker je povezana s hitrostjo izločanja jo imenujemo hitrostna konstanta). Če izmerimo pritok (ali odtok), lahko določimo hitrostno konstanto  $k$ , če poznamo celoten volumen (in obratno).

Drug način za določanje hitrostne konstante bi bil, da bi prekinili vnos vode ( $\phi = 0$ ) in opazovali zmanjševanje volumna s časom zaradi iztekanja. Po enačbi (1.1) velja za ta primer

$$\frac{dV}{dt} = -kV , \quad (1.4)$$

kar vodi do eksponentnega zmanjševanja volumna vode

$$V(t) = V_0 e^{-kt} , \quad (1.5)$$

kjer je  $V_0$  volumen v času  $t = 0$ . S poznavanjem odvisnosti volumna od časa bi lahko določili hitrostno konstanto, vendar je za človeka to neprimerna metoda, ker ne moremo za dalj časa prekiniti vnosa vode brez posledic, pa še zaradi fiziološke regulacije bi se spremenila hitrost izločanja. Zato pri proučevanju predeljenih sistemov pogosto uporabljamo sledilne metode, ki ne zmotijo normalnega delovanja sistema (organizma).

Sledilo (angleško: tracer), ki ga dodamo v predelek, mora imeti neko opazno lastnost, ki jo lahko merimo, hkrati pa se mora dobro mešati s snovjo, ki jo želimo proučevati, in hkrati z njo prehajati iz predelka v predelek. V medicini se za sledilo velikokrat uporabljajo kratkoživi radioaktivni izotopi. Merljiva količina je v tem primeru radioaktivnost\*.

Za učenje postopkov, kot tudi za razumevanje dogajanj v naravnih sistemih si velikokrat pomagamo z opazovanjem in merjenji na modelnih sistemih. Modelni sistem je lahko vsak sistem, za katerega veljajo enake zakonitosti kot za sistem, ki nas zanima.

Sledilno meritev predeljenih sistemov lahko simuliramo s hidrodinamskim modelom. Pretakamo vodo, vlogo sledila pa ima barvilo. Koncentracija barvila ustreza specifični aktivnosti, količina barvila pa celotni aktivnosti. Hidrodinamski model za sisteme z enim predelkom je posoda s pritokom in odtokom (spodnja posoda na sliki 1.2).

## 1.2 Določanje velikosti predelka in hitrostne konstante s sledilom

Poglejmo, kaj se zgodi v trenutku, ko sledilo (barvilo) vnesemo v predelek, če se snov ne izmenjuje ali pa se zelo počasi izmenjuje z okolico. Za velikost predelka vzemimo prostornino vode. V predelek prostornine  $V$  dodamo majhno količino sledila s prostornino  $V_s$  in s koncentracijo  $c_s$ . Dodano sledilo se enakomerno porazdeli po predelku, katerega prostornina je sedaj  $V + V_s$ , zato je koncentracija v predelku manjša ( $c$ ). Celotna količina (masa) sledila se seveda ne spremeni, zato velja:

$$c_s V_s = c(V + V_s) . \quad (1.6)$$

---

\*Za določanje količine vode v telesu se bi lahko uporabljala voda, ki ima namesto vodika vezan njegov radioaktivni izotop tritij.



Odtod lahko zapišemo izraz za izračun prostornine predelka

$$V = V_s \left( \frac{c_s}{c} - 1 \right) . \quad (1.7)$$

Običajno je pri takih meritvah prostornina sledila mnogo manjša od prostornine predelka ( $V_s \ll V$ ), tako da približno velja

$$V = V_s \frac{c_s}{c} . \quad (1.8)$$

Z uporabo sledila lahko določimo tudi hitrostno konstanto. Poglejmo si predelek, ki je v stacionarnem stanju (velikost se mu ne spreminja) in izmenjuje snov z okolico. Hidrodinamski model za sistem z enim predelkom je posoda, v katero priteka čista voda, iz nje pa odteka, kar je v posodi. V času  $t = 0$  v predelek damo znano količino sledila, ki se (z mešanjem) hitro porazdeli po celotni prostornini. Opazljiva lastnost je ponovno barva, preko katere določamo koncentracijo barvila. V pritekajoči snovi ni sledila, tako da sledilo le izteka skupaj z iztekajočo snovjo in se njegova koncentracija s časom zmanjšuje. Če se nič sledila ne vrne iz okolice nazaj v predelek, je sprememba koncentracije sledila na časovno enoto ( $d(cV)/dt$ ) sorazmerna s samo koncentracijo ( $cV$ )

$$\frac{d(cV)}{dt} = -kcV . \quad (1.9)$$

Ker je predelek v stacionarnem stanju ( $V = \text{konst.}$ ), lahko prostornino v enačbi (1.9) krajšamo in dobimo

$$\frac{dc}{dt} = -kc , \quad (1.10)$$

za spreminjanje koncentracije s časom pa

$$c(t) = c(0)e^{-kt} , \quad (1.11)$$

pri čemer je  $c(0)$  koncentracija v predelku ob času  $t = 0$ . Koncentracija v predelku pade na polovično vrednost v času  $t_{1/2}$ :

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0,693}{k} . \quad (1.12)$$

Iz izmerjene časovne odvisnosti koncentracije ( $c(t)$ ) lahko določimo hitrostno konstanto ( $k$ ). Ker poznamo tudi količino sledila ( $V_s c_s$ ), ki smo ga vnesli v predelek, bi lahko po enačbi (1.8) izračunali prostornino predelka. Zato potrebujemo še koncentracijo sledila, ko se je ta porazdelil po celotnem predelku, to je koncentracijo v predelku, ko še nič sledila ni odteklo, ali z drugimi besedami koncentracijo ob času  $t = 0$ . To dobimo enostavno tako, da podaljšamo (ekstrapoliramo) izmerjeno odvisnost do časa 0.

Če se spomnimo primera, ko s tritijem določamo količino vode v telesu: časovno odvisnost specifične aktivnosti pri človeku dobimo z merjenjem aktivnosti izločenega urina. Pri merjenju z radioaktivnimi sledili moramo upoštevati tudi, da se celotna aktivnost zmanjšuje zaradi radioaktivnega razpada. Razpadni časi za posamezne izotope so znani, aktivnost zaradi radioaktivnega razpada pa pada eksponentno, tako da tega popravka ni težko upoštevati.



### 1.3 Absorpcijski zakon

Kolorimetrija je analitski postopek, s katerim določamo koncentracije obarvanih raztopin.

Pri prehodu skozi obarvano raztopino ali neko drugo ne popolnoma prozorno snov se žarek oslabi, ker se del fotonov absorbira v snovi. Debelina snovi, ki absorbira polovico vpadnih fotonov, se imenuje razpolovna debelina. Vsaka nadaljna taka plast absorbira ponovno polovico vpadnih fotonov, tako, da skozi  $n$  plasti pride le še  $(1/2)^n$  fotonov. Odvisnost toka od debeline je splošna (ne velja le za razpolovno debelino), kar pomeni da enaka debelina ( $dx$ ) vedno zaustavi enak delež fotonov ( $dI/I$ ), sorazmernostni koeficient pa imenujemo absorpcijski koeficient ( $\mu$ ),

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx, \quad (1.13)$$

integriramo, dobimo **absorpcijski zakon**\*

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1.14)$$

kjer je  $x$  debelina plasti, skozi katero je šel svetlobni žarek,  $I_0$  in  $I$  pa sta jakosti vpadnega in izstopnega žarka. Za majhne koncentracije barvila v prozornem topilu je absorpcijski koeficient kar sorazmeren koncentraciji barvila:  $\mu = k'c$ , zato velja

$$I = I_0 e^{-k'cx}, \quad (1.15)$$

kjer je  $k'$  sorazmernostna konstanta. Vidimo, da je oslabitev žarka eksponentno odvisna od dolžine, ki jo žarek prepotuje po snovi, in od koncentracije raztopine.

Za različne valovne dolžine je absorpcijski koeficient lahko različen ( $\mu(\lambda)$ ), a še vedno sorazmeren s koncentracijo. Kar pomeni, da pri osvetljevanju z belo svetlobo izhodni žarek ni več bel, a je njegova jakost še vedno odvisna od koncentracije.

### 1.4 Fotometer

Za določanje neznane koncentracije obarvane raztopine bomo uporabljali preprosto napravo za merjenje svetlobnega toka, fotometer (shematsko je prikazan na sliki 1.1). Sestavljata ga izvor svetlobe (svetlobna dioda) in polprevodniški detektor svetlobe (ki je enak kot pri vaji št. 7). Napetost na detektorju je premosorazmerna svetlobnemu toku ( $U = bI$ ;  $b$  je konstanta). Med izvor svetlobe in detektor se vloži kiveta z vzorcem. Svetlobni tok se spremeni zaradi vpliva kivete in topila ( $I_k = aI_0$ ) in zaradi absorbcije v topljencu, zato izmerimo napetost (deleži oslabitve se množijo):

$$U = bI = baI_0 e^{-k'cx}. \quad (1.16)$$

Če izmerimo še refefrenčno napetost, ko je v kiveri le topilo:

$$U_R = bI_R = baI_0, \quad (1.17)$$

---

\* Absorpcijski zakon velja tudi za absorpcijo žarkov  $\gamma$  (enačba (12.7) na strani 139).



vidimo, da razmerje napetosti  $U/U_R$

$$\frac{U}{U_R} = \frac{baI_0 e^{-k'cx}}{baI_0} = e^{-k'cx}, \quad (1.18)$$

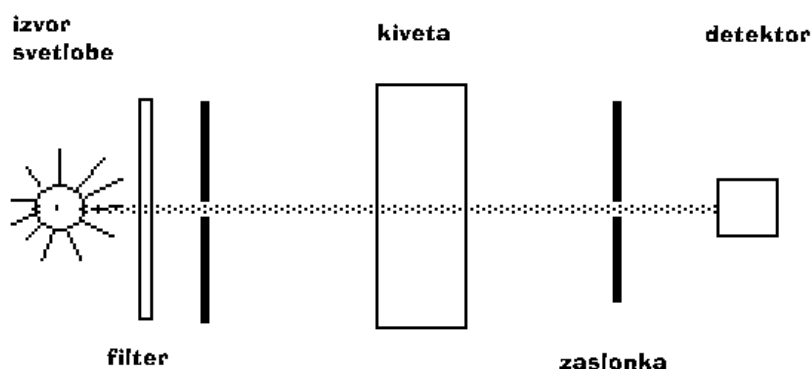
ni odvisno od vplivov kivete, topila in detektorja.

Če poznamo vrednost produkta ( $k'x$ ), lahko koncentracijo topila izračunamo:

$$c = -\frac{1}{k'x} \ln\left(\frac{U}{U_R}\right). \quad (1.19)$$

Ker sta  $x$  (dolžina kivete) in vrsta topljenca ( $k'$ ) pri vseh meritvah enaka, je produkt  $k'x$  konstanten in ga lahko določimo iz umeritve (izmerimo odziv detektorja za znane koncentracije topila).

Pri kolorimetrskih meritvah vedno naredimo referenčno meritev (s kiveto in topilom). Če se uporablja več kivet (ali topil) je potrebno narediti referenčno meritev za vsako od njih (le za enake in res čiste kivete so referenčne meritve enake).

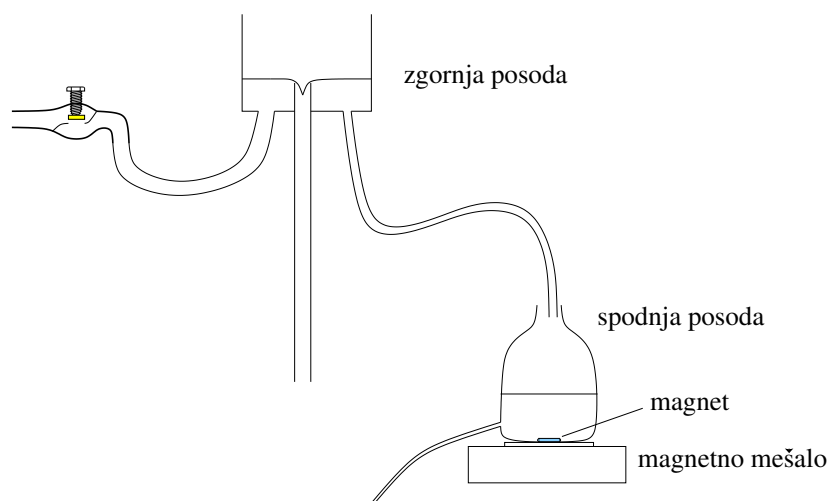


Slika 1.1: Skica sestavnih delov fotometra.

- Naloge:**
1. Priprava pretočnega sistema
  2. Umeritev fotometra
  3. Določitev velikosti predelka, če se snov ne izmenjuje z okolico
  4. Določitev velikosti predelka, hitrostne konstante in razpolovnega časa, ko se snov v predelku izmenjuje z okolico.



**Potrebščine:** sistem posod za pretakanje vode  
magnetno mešalo  
epruvete za vzorce in stojalo  
merilna pipeta  
standardne raztopine  
raztopine sledila različnih koncentracij  
štoparica  
fotometer  
voltmeter  
dve čaši



Slika 1.2: Shema postavitve potrebščin, ko se snov izmenjuje z okolico.

## Izvedba

### 1) Naloga 1: Priprava merjenja

**Pretočni sistem:** V pretočnem sistemu preverite, če ta posodi povezani, kot na sliki 1.2 in je magnetno mešalo v spodnji posodi.



- Odprite pipo in dotok vode uravnajte tako, da malo vode vseskozi odteka po cevi iz zgornje posode neposredno v lijak (s tem uravnate nivo vode v zgornji posodi).
- Vključite magnetno mešalo.
- Pustite, da se nivo vode v spodnji posodi ustali, medtem pa nadaljujete z drugimi nalogami. Med uravnavanjem nivoja vode in med meritvami ne spreminjajte položaja (višine) cevki in ne zapirajte vode.

### **Fotometer**

- Priklopite fotometer na napetost in povežite voltmeter s kontakti na sprednji strani fotometra. Ne pozabite, napetost na fotometru je enosmerna (območje 20 V).
- Prižgite izvor svetlobe v fotometru (pred prvo meritvijo počakamo kakšno minuto, da se svetilnost ustali). Med meritvami svetila ne ugašamo.
- Kiveto napolnite malo čez polovico (večina podobnih optičnih priprav za dobre meritve potrebuje v kiveti vsaj 1 cm tekočine). Kiveta mora biti z zunanje strani suha.
- Kiveto vstavite v odprtino, tako, da je oznaka na kiveti (trikotnik) v smeri oznake na fotometru.
- Med meritvijo pokrijte kiveto s pokrovčkom (da svetloba iz okolice ne moti meritev) in odčitajte napetost.
- Uporabljene raztopine zavržite (da ne pride do mešanja različnih raztopin).
- Merite vedno z isto kiveto (da zaradi morebitne obarvanosti ne pride do napak – če uporabljate več kivet, je potrebno preveriti, da so za vse kivete referenčne napetosti enake).

**Meritev je veliko, zato najprej opravite vse meritve, izračune in grafe pa boste izdelali na koncu.**

### **2) Naloga 2: Umeritev fotometra (določitev produkta $k'x$ )**

S fotometrom izmerite referenčno napetost  $U_R$  za vodo (referenčni vzorec) in napetosti za vzorce z znanimi koncentracijami. Koncentracije raztopin so označene na stekleničkah.

**Analiza:** Ker pričakujemo, da bo količina prepuščene svetlobe eksponentno padale s koncentracijo, narišemo graf (umeritveno krivuljo), ki prikazuje odvisnost  $\ln(U/U_R)$  od koncentracije (linearizacija grafa). Ne pozabite na koncentracijo  $c = 0$ .

Če merske točke ležijo na premici, je odvisnost prepuščene svetlobe (in izmerjene napetosti) od koncentracije res eksponentna, naklonski koeficient premice pa je  $-k'x$  [en. (1.19)].

### **3) Naloga 3: Določitev velikosti predelka, ko se snov ne izmenjuje z okolico.**

V posodo z neznano količino vode ( $V$ - velikost predelka) dodamo sledilo – znan volumen ( $V_s = 10$  ml) z znano koncentracijo ( $c_s = 0,5$  %). Počakajte, da se sledilo



enakomerno razporedi (lahko premešate). Vzemite vzorec in s fotometrom določite koncentracijo mešanice ( $c$ ).

**Analiza:** Koncentracijo določite z odčitavanjem iz umeritvene krivulje in izračunajte iz produkta  $k'x$  [en. (1.19)]. Izračunajte volumen vode  $V$  [en. (1.8)].

Kaj bi se zgodilo, če bi vzorec vzeli prehitro, ko še ni premešano?

Kakšne so posledice, če je volumen sledila primerljiv z volumnom vode?

#### 4) Naloga 4. Določitev velikosti predelka, hitrostne konstante in razpolovnega časa, ko se snov izmenjuje z okolico.

Merite na pretočnem sistemu, ki ste ga priključili na začetku. Medtem se je nivo vode (in s tem velikost predelka) v pretočnem sistemu uravnaval.

S štoparico izmerite čas, potreben, da iz spodnje posode v čašo nateče 200 ml vode. Meritev ponovite 5 krat. Če so časi podobni (ne naraščajo ali padajo monotono) je volumen vode v spodnji posodi res konstanten.

Iz povprečnega časa in natečenega volumna izračunajte volumski pretok.

V spodnjo posodo vlijte znano količino sledila ( $V_s = 5$  ml) z znano koncentracijo ( $c_s = 5$  %) (bolj koncentrirano sledilo) in istočasno vključite štoparico.

Po 1 minuti prestrezite prvi vzorec v epruveto, nato še vsako minuto enega, da nabere 10 vzorcev. Prostornine vzetih vzorcev naj ne bodo prevelike (koncentracija se s časom spreminja). Ko ste vzeli vse vzorce, lahko zaprete vodo.

S fotometrom določite koncentracijo barvila v vsakem vzorcu (kot ste storili pri nal. 3 – dovolj je na en način).

**Analiza:** Narišite odvisnost koncentracije od časa in odvisnost naravnega logaritma koncentracije od časa (lineariziran graf). Skozi merske točke narišite še krivulji (teoretični napovedi odvisnosti), ki te točke najboljše popišeta.

Iz naklonskega koeficienta premice, na grafu  $\ln c$  od časa, določite hitrostno konstanto ( $k$ ) in določite razpolovni čas ( $t_{1/2}$ ) (čas, ko se iz sistema izloči polovica barvila).

Če je potrebno, podaljšajte premico in pri času  $t = 0$  iz logaritma koncentracije izračunajte začetno koncentracijo (kakšna bi bila koncentracija, če ne bi nič barvila odteklo iz sistema) in določite volumen predelka  $V$ .

Iz volumna predelka in pretoka še na drug način [en. (1.3)] določite hitrostno konstanto ( $k$ ) in iz nje razpolovni čas.

Primerjajte vrednosti za hitrostno konstanto, ki ste ju dobili iz obeh načinov, primerjajte tudi vrednosti razpolovnih časov.